

國立中山大學海洋生物科技暨資源學系研究所

碩士論文

Department of Information Management National Sun Yat-sen University Master Thesis

南海與黑潮超微浮游植物生物量及生長率之 季節與空間變動

Seasonal and spatial dynamics of abundance and growth rates of picophytoplankton in the South China Sea and the Kuroshio

研究生:劉懿賢

Yi-Shain Liu

指導教授:李玉玲 博士

Dr. Yuh-ling Lee Chen

中華民國 101 年 6 月

June 2012

國立中山大學研究生學位論文審定書 本校海洋生物科技暨資源學系碩士班 研究生劉懿賢(學號: M985020013)所提論文 南海與黑潮超微浮游植物生物量及生長率之季節與空間變動 Seasonal and spatial dynamics of abundance and growth rates of picophytoplankton in the South China Sea and the Kuroshio 於中華民國 10 年 6 月 日經本委員會審查並舉行口試, 符合碩士學位論文標準。 學位考試委員簽章: 召集人蔣國平翦國軍委員李玉玲奉玉玲 委員陳慶能]]建度:能委員 委 員 委員 李玉玲 指導教授(李玉玲) (簽名)

坦白說,研究所期間,真的想要感謝的人真的太多了。但真的最由衷想說聲 謝謝也最難具體表達的,是李玉玲老師。回首當年,貿然跨領域來到中山,真的 慶幸能遇到李玉玲老師,老師不但不因學生的過往而拒門於外,並在求學期間不 論是在課業學術上,老師總是很細心、耐心的去指導我海洋相關知識,也常不厭 其煩的教我一些基本理論,在做人處事上,更是將畢生經驗、眉角(台語)教給我。 從老師身上真的學到了很多畢生受用的東西,李玉玲老師真的謝謝您。另外也特 別感謝蔣國平老師,在求學期間,不斷的指導我有關捕食實驗方面的知識,包括 鞭毛蟲的辨識、實驗設計、數據處理及口試時,都給予十分保貴的建議。以及感 謝口試委員陳慶能老師,在論文中,亦提供了不少浮游植物生理方面上的知識及 建議。也感謝楊穎堅老師提供 EK500 的數據及有關海流方面知識上的指導。亦感 謝曾若玄老師及,在水下海流資訊方面的指導。也感謝羅文增老師,在動浮(捕食 者)習性上及食物階層方面知識的指導。此外感謝博士後研究員塩崎拓平博士,指 導我有關衛星資料上的應用,及博士後研究員谷內由貴子博士,在分子生物學上

除此之外,感謝在背後默默支持我的家人們,讓我任性的完成學業。以及感 謝研究所期間的夥伴們:艷慧學姊、珠美學姊及拖拖學長在日常生活上的照顧以 及提供課業、論文上的指導。感謝建智除了細心、耐心的帶我入行,也感謝你及 子清、柏瑞、皮皮、信忠和良芬、詩婷你們在我研究所期間不斷的加油打氣。感 謝所有海一、海三研究船上及貴儀中心的所有工作人員,沒有你們的協助幫忙, 無法順利完成此篇論文。另外也感謝老大(鎮遠)、小豬(朱申)、家畜(家訓)、仲賢、 小麥(智詠)、葉葉、亞珍、彥汝陪我渡過研究所的生活。也謝謝所有在這三年來陪 伴過我的同學們、朋友們讓我得研究生生活得以精彩完美。也感謝尚未出現的另 一伴,讓我能更專注完成這一次。謝謝各位(鞠躬)!

劉懿賢 於 2012 年夏 中山大學

本研究探討南海與黑潮海域三類超微浮游植物,包括原核綠球藻、聚球藻及 真核超微藻類之生物量及生長率,在不同季節與空間之變動,及影響其變動之機 制。研究方法分為(1)直接採樣觀察自然界生物量的變動;(2)培養實驗。研究期間 自 2009 年 8 月至 2010 年 12 月,共五個航次。培養實驗包括:營養鹽添加培養(添 加 EDTA、FeCl₃及 NH4⁺)及捕食實驗。三類超微浮游植物生長率,以 2µm 孔徑濾 膜過濾之海水(無捕食者),培養一段時間後生物量之變動計算之。捕食實驗則以體 型分濾(size-fractionation)法,區分成<2 µm(無捕食者)及<10 µm(含捕食者)二組,此 兩組生長率之差為捕食率。捕食者數量以顯微鏡檢查,三類超微浮游植物生物量 以流式細胞儀(flow cytometry)計數。

結果發現,原核綠球藻生物量在暖季較冷季高,在空間上以西北太平洋、黑 潮和南海海盆比南海陸坡、陸棚生物量較高。此現象與氮、磷鹽濃度高低無關, 而是因為富營養鹽的季節或海域,強光之危害較小,使生長率較高,捕食率也相 對較高,且捕食率高於生長率,使生物量較低。本研究發現,存在體型<2 µm 的微 鞭毛蟲,且部分原核綠球藻夜間生長率與微鞭毛蟲數量呈顯著負相關。添加培養 結果,僅添加 EDTA 有助於原核綠球藻生長,此可能與 EDTA 可螯合去除一些有 毒的微量金屬(如 Cu²⁺、Cd²⁺)或螯合有利於其生長的微量金屬(如 Co²⁺)所致。

聚球藻生物量之季節/空間變動與原核綠球藻相反。其變動可能與硝酸鹽濃度 有關。硝酸鹽太低及光線太強,對聚球藻生長率皆有抑制作用。反之氮鹽高的季 節/海域,雖然亦有較高的被捕食率,但其生長率高於被捕食率,使之呈現較高的 生物量。捕食實驗結果發現,聚球藻的被捕食率與體型約2-5μm的色素型微鞭毛 蟲數量呈正相關。添加培養結果,亦僅在添加EDTA後有助於聚球藻生長,可能 與EDTA 螯合對期生長有害的 Cd²⁺或螯合有助於其生長的 Co²⁺有關。

真核超微藻類生物量之季節/空間變動與聚球藻類似。但真核超微藻類組成複雜,何種生態因子影響其生物變動尚未解明。

關鍵字:原核綠球藻、聚球藻、真核超微藻類、南海、黑潮

i

Abstract

This research studied the seasonal and spatial dynamics for abundance of picophytoplanktons (including *Prochlorococcus* spp., *Synechococcus* spp. and picoeukaryotes) in the South China Sea (SCS) and the Kuroshio. Waters were collected during five cruises between August 2009 and December 2010. Growth rates were determined in two size fractioned waters, <2 um and <10 um, after incubation. The differences of growth rates between the two size fractions were defined as the grazing rates. Before the incubation, waters were enriched with FeCl₃, EDTA, or NH₄Cl to examine the possible shortage of Fe or nitrogen. Abundances of picophytoplanktons and nanoflagellates were examined using a flow-cytometry and a microscope, respectively.

Prochlorococcus was more abundant in the warm than the cold seasons and in the Kuroshio and the basin of the SCS than in the shelf and slope of the SCS. In the high abundance seasons/regions, low irradiance enhanced the growth rates of *Prochlorococcus*. Although both of the growth rates and grazing rates were high during then, the growth rates were found higher than the grazing rates. Addition of EDTA enhanced the growth rates that was likely attributed to its chelating with toxic trace metals (such as Cd^{2+} , Cd^{2+}) and/or with growth necessity trace metals (such as Co^{2+}).

The seasonal/spatial distributions for *Synechococcus* were in contrast to that of *Prochlorococcus*. High growth rates of *Synechococcus* were related to high nitrate concentrations and the low irradiance. The growth rates were higher than the grazing rates in the high nitrogen seasons/regions when/where irradiance was also relatively low. EDTA also enhanced the growth of *Synechococcus*, and was likely due to its chelating to remove Cd^{2+} and/or to retain Co^{2+} .

Distributions of picoeukaryotes were similar to that of *Synechococcus*. Factors affected its dynamics were not clear because of its complicated compositions. Keywords : *Prochlorococcus*, *Synechococcus*, picoeukaryotes, SCS, Kuroshio

目	錄
4	201

中	文摘要…		i
英	文摘要…		ii
第	一章	前 言	1
第	二章	文 獻 回 顧	2
	第一節	南海(South China Sea, SCS)	• 2
	第二節	黑潮(Kuroshio)	• 4
	第三節	超微浮游植物(Picophytoplankton)	5
	第四節	三類超微浮游植物在各海域生物量分佈	8
	第五節	流式細胞儀原理	12
第	三章	材料與方法	13
	第一節	自然界樣本採集	13
	第二節	培養實驗	19
	第三節	環境因子、生態因子之定義及符號	24
	第四節	統計方法	26
第	四章	結 果	27
	第一節	重點航次	27
	第二節	CRITOP	66
	第三節	內波、潮汐(內潮)	69

	第四節	影響三類超微浮游植物生長率之生態因子(培養實驗)	80
第	五章	討 論	94
	第一節	Prochlorococcus	94
	第二節	Synechococcus	101
	第三節	Picoeukaryotes	109
參:	考文獻··		114
附金	錄		125



圖 次

圖 3-1 黑潮經常流經範圍		125
圖 3-2 採樣測站位置圖		126
圖 3-3 比較重點四航次間表水溫度(SST)差到	異	127
圖 3-4 CR910 航行前 Morakot 颱風路徑圖及領	對星雲圖	128
圖 3-5 CR1487 航行前 Lionrock 颱風路徑圖·		129
圖 3-6 CR1487 航行期間各測站到站時間與 N	Meranti 颱風路徑圖…	130
圖 3-7 CRITOP 航行期間台灣附近海域海流數	數值模擬結果	131
圖 3-8 比較 CRITOP 不同海域之生物量及環	境因子	132
圖 3-9 CRITOP 探測時, Parma 颱風路徑圖	及衛星雲圖	133
圖 3-10 CRITOP, T1 測站之各因子時間序列	變化	134
圖 3-11 CRITOP, T2 測站之各因子時間序列	變化	135
圖 3-12 CR910, IW1 和 IW3 測站內波通過前	前、後 EK500 所示水體	密度
變化情形		136
圖 3-13 CR1455, S1 測站內波通過前、後 E	EK500所示水體密度變	化情
形		137
圖 3-14 CR1455, S2 測站內波通過前、後 E	EK500所示水體密度變	化情
形		138
圖 3-15 三類超微浮游植物在流式細胞儀之業	辨識	139

圖 3-16 色素型及非色素型 nanoflagellates 區別方法 1	40
圖 4-1 四重點航次各航次不同海域間表水鹽度平均 14	1
圖 4-2 CR910 各測站水文資料、營養鹽和生物量垂直剖面圖 ······· 1	42
圖 4-3 CR1455 各測站水文資料、營養鹽和生物量垂直剖面圖 1	43
圖 4-4 重點四航次溫鹽曲線圖 14	4
圖 4-5 四重點航次各航次不同海域間混合層深度差異 14	5
圖 4-6 重點航次航行期間,船上記錄之每日白天平均光照強度與中	央
氣象局恆春氣象站記錄之全天日照量之關係 14	6
圖 4-7 比較重點四航次之平均光照強度及有光層深度之差異 14	7
圖 4-8 重點四航次硝酸鹽濃度差異 14	8
圖 4-9 重點四航次硝酸躍層深度差異 14	9
圖 4-10 重點四航次磷酸鹽濃度差異 150)
圖 4-11 重點四航次 Prochlorococcus 生物量之差異 15	1
圖 4-12 CR910 Prochlorococcus 垂直分佈圖及其 30 m 累計生物量占 2	00
m 累計生物量百分比······ 15	2
圖 4-13 重點四航次 Synechococcus 生物量之差異 15	53
圖 4-14 CR1455 Prochlorococcus 垂直分佈圖及其 40 m 累計生物量占	
200 m 累計生物量百分比······154	4
圖 4-15 CR1455 Synechococcus 垂直分佈圖及其 40 m 累計生物量占 2	00

m	累計生物量百分比	155
圖	4-16 重點四航次 Picoeukaryotes 生物量之差異	156
圖	4-17 CR1487 各測站水文資料、營養鹽和生物量垂直剖面圖…	157
圖	4-18 CR1487 Synechococcus 垂直分佈圖及其 40 m 累計生物量占	; 200
m	累計生物量百分比	158
圖	4-19 CR1487 Synechococcus 垂直分佈圖及其 40 m 累計生物量也	; 200
m	累計生物量百分比	159
圖	4-20 重點四航次葉綠素 a 濃度差異	160
圖	4-21 CR950 各測站水文資料、營養鹽和生物量垂直剖面圖	161
圖	4-22 CR950 航行期間針對台灣附近海域海流數值模擬之結果…	162
圖	4-23 CR950 Prochlorococcus 垂直分佈圖及其 40 m 累計生物量是	5 200
m	累計生物量百分比	163
圖	4-24 三類超微浮游植物生物量與表水溫度(SST)間之關係	164
圖	4-25 比較四重點航次間及各海域間三類超微浮游植物之水表至	. 30
m	累計生物量占 200 m 累計至水表生物量之百分比	165
圖	4-26 三類超微浮游植物水表至 30 m 累計生物量占 200 m 累計	至水
表	生物量之百分比與有光層深度(Deu)之關係	166
圖	4-27 三類超微浮游植物生物量與硝酸鹽濃度間關係	167
圖	4-28 三類超微浮游植物生物量與磷酸鹽濃度間之關係	168

圖	4-29	11	三類オ	迢微注	浮游	植物	生物	物量	與對	素綠	素	a 濃	度昆]之	關係	•••••	•	169
圖	4-30	ĿĿ	:較(CRIT	OP i	西北;	太子	下洋:	測刘	與	暖季	重	點三	航次	こい たいしん こうしん こうしん こうしん こうしん こうしん こうしん こうしん こう	黑潮	和	南海
=	海域	間:	之水	文、	環境	因子	、	上 物	量間	之	差異	<u>.</u>	••••	•••••	••••		••	170
圖	4-31	Cl	R145	55 航	次 S	2 測	站主	愚內	波之	こ隨	時間	月 0-1	150	m Ŧ	均	生物	量	、營
養	鹽以	及注	溫度	、鹽	度、	密度	變亻	£		••••		•••••	••••	••••	••••		•••	171
圖	4-32	Cl	R145	55 航	次S	1 测	站主	愚內	波之	こ隨	時間	月 0-8	83 n	1平;	均生	物量		營養
鹽	以及	溫	度、	鹽度	、密)	度變	化			••••		•••••	••••	•••••	••••		•••	172
圖	4-33	С	RIT	ЭР,	T2 :	測站	, _	三類	超微	汝 浮	游植	植物	與葉	綠素	₹a	 5 時 1	間.	之垂
直	分佈	變⁄	化…	•••••	• • • • • •		••••	• • • • • •	••••	••••	••••	••••	• • • • •	••••	••••	••••	•	173
圖	4-34	Cl	RITC)P,	T1	測站	, <i>1</i>	各水	文团	日子	、為国	营養!	遹、	生物	勿量.	之隨日	诗	間垂
直	分佈	變	化…	•••••	• • • • • •		••••	• • • • • •	••••	••••	••••	••••	• • • • •	••••	••••	••••	•	174
圖	4-35	Pr	rochl	oroc	осси	is 白;	天生	上長	率真	<u></u> 特	養當	天日	白天	平均)光	強度	間.	之關
係	•••••	••••	••••	•••••	• • • • • •		••••	• • • • • •	••••	••••	••••	••••	• • • • •	••••	••••	••••	•	175
圖	4-36	5 F	Proch	hloro	00000	cus d	全天	(白	天+	夜間	引)生	長	率與	培養	當	天白	天·	平均
光	強度	間:	之關	係…	• • • • • •		••••	• • • • • •	••••	••••	••••	••••	• • • • •	••••	••••	••••	•	176
圖	4-37	7 S	Synec	choco	осси	5 白;	天生	上長	率真	<u></u> 特	養當	天日	白天	平均	的光	強度	間.	之關
係	•••••	••••	••••	••••			••••		••••	••••	••••	••••	• • • • •	•••••	••••	••••	•	177
圖	4-38	8 S	ynec	hocc	occus	5 全尹	F(f	白天	+夜	間)	生長	率兵	與培	養當	宫天	白天-	平:	均光
強	度間	之	關係	••••	•••••	•••••	••••	•••••	••••	• • • • •	••••	••••	••••	••••	••••	••••	•	178

圖 4-39 Picoeukaryotes 白天生長率與培養當天白天平均光強度間之	.闘
係	79
圖 4-40 Picoeukaryotes 全天(白天+夜間)生長率與培養當天白天平均	光
強度間之關係	30
圖 4-41 Prochlorococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前硝酸鹽濃度	F
間之關係	31
圖 4-42 Synechococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前硝酸鹽濃度間	間
之關係	32
圖 4-43 Picoeukaryotes 全天(白天+夜晚)生長率與培養前硝酸鹽濃度問	間
之關係	33
圖 4-44 Prochlorococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前磷酸鹽濃度	FL
間之關係	34
圖 4-45 Synechococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前磷酸鹽濃度晶	目
之關係	35
圖 4-46 Picoeukaryotes 全天(白天+夜晚)生長率與培養前磷酸鹽濃度問	間
之關係	36
圖 4-47 體型為 1 μm 之色素型及非色素型 nanoflagellates ········1	87
圖 4-48 Prochlorococcus 生物量在「<2μm」培養組隨培養時間之變	
化	38

圖 4-49 Synechococcus 生物量在「<2μm」培養組隨培養時間之變
化
圖 4-50 Picoeukaryotes 生物量在「<2μm」培養組隨培養時間之變
化
圖 4-51 CR1455 Prochlorococcus 夜間生長率與各類型 nanoflagellates 之
關係
圖 4-52 CR1487 Prochlorococcus 夜間生長率與各類型 nanoflagellates ≥
關係
圖 4-53 CR950 Prochlorococcus 夜間生長率與各類型 nanoflagellates 之
關係
圖 4-54 Prochlorococcus 夜間生長率與培養當天白天平均光強度間之關
係
圖 4-55 Prochlorococcus 被捕食率與各類型 nanoflagellates 數量間之關
係
圖 4-56 Synechococcus 在 $< 2 \mu m$ 」培養組之全天(白天+夜晚)生長率(K
μm)與四類 nanoflagellates 間之關係
圖 4-57 Synechococcus 被捕食率與各類型 nanoflagellates 數量間之關
係
圖 4-58 CR950 培養實驗中體型 2-5 μm 之色素型 nanoflagellates 數量與

體型約 5-10 μm 之異營型 nanoflagellates 數量間之關係 198
圖 4-59 Picoeukaryotes 在「<2μm」培養組之全天(白天+夜晩)生長率與
四類 nanoflagellates 間之關係
圖 4-60 Picoeukaryotes 被捕食率與各類型 nanoflagellates 數量間之關
係
圖4-61 三類超微浮游植物碳流通量(Carbon flow)往上層食物鏈
(nanoflagellates)傳遞之關係。 201
圖4-62 三類超微浮游植物生產率與被攝食率間之關係。 202
圖4-63 三類超微浮游植物碳流通量(Carbon flow)往上層食物鏈
(nanoflagellates)傳遞之關係,數據分析已去除負生產率並將負被攝食率
化整為零。 203
圖4-64 三類超微浮游植物生產率與被攝食率間之關係,數據分析已去
除負生產率並將負被攝食率化整為零。 204
圖 4-65 CR1455 三類超微浮游植物添加 FeCl3 培養實驗結果 205
圖 4-66 CR950 三類超微浮游植物添加 FeCl3 培養實驗結果 206
圖 4-67 合併航次及測站後,三類超微浮游植物添加培養實驗結果 207
圖 4-68 CR1487 三類超微浮游植物添加 NH ₄ Cl 培養實驗結果 208
圖 4-69 CR950 三類超微浮游植物添加 NH ₄ Cl 培養實驗結果 209
圖 5-1 Nanoflagellates 在各航次的平均數量及各類型 Nanoflagellate 組成

百	分比	210
圖	5-2 三類超微浮游植物生長率與被捕食率間之關係	211
圖	5-3 Synechococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前海水溫度間	之關
係		212

表次

表 3-1 各重點航次採樣日期、採樣測站、進行培養實驗之測站及	.培養
項目	213
表 3-2 CRITOP 各測站之三類超微浮游植物生物量及水文資料	· 214
表 3-3 各類培養實驗進行之環境資料整理	215
表 4-1 CR910 不同海域間水文環境及生物量	216
表 4-2 CR910 三類超微浮游植物生物量與環境因子之相關係數…	217
表 4-3 CR1455 不同海域間水文環境及生物量	· 218
表 4-4 CR1455 三類超微浮游植物生物量與環境因子之相關係數…	· 219
表 4-5 CR1487 不同海域間水文環境及生物量	· 220
表 4-6 CR1487 三類超微浮游植物生物量與環境因子之相關係數…	· 221
表 4-7 CR950 不同海域間水文環境及生物量	222
表 4-8 CR950 三類超微浮游植物生物量與環境因子之相關係數…	223
表 4-9 重點航次資料合併後,三類超微浮游植物生物量與環境因	子間
之相關係數	224
表 4-10 生物量與環境因子之複迴歸分析	225
表 4-11 生物量與環境因子之複迴歸分析環境因子不包括有光	層深
度	226
表 4-12 CRITOP 西北太平洋測站,與暖季三重點航次之黑潮(Kuro	oshio)

測站與南海測站之各類生物量及水文資料	227
表 4-13 CR950 培養實驗中,生物之生長率與環境因子及捕食者數	量之
相關係數表	228
表 4-14 CR1487 培養實驗中,生物之生長率與環境因子及捕食者	·數量
之相關係數表	229
表 4-15 CR1455 培養實驗中,生物之生長率與環境因子及捕食者	·數量
之相關係數表	230
表 4-16 CR1455+CR1487+CR950 培養實驗中,生物之生長率與環	境因
子及捕食者數量之相關係數表	231
表 4-17 Prochlorococcus 生長率與環境因子及捕食者之複迴歸分析	- 232
表 4-18 Synechococcus 之生長率與環境因子及捕食者之複迴歸分材	f 233
表 4-19 Picoeukaryotes 之生長率與環境因子及捕食者之複迴歸分材	f 234

第一章、前言

超微浮游植物(Picophytoplankton)為細胞體型<2 μm 的浮游植物,主要包括 Prochlorococcus(原核綠球藻)、Synechococcus(聚球藻)及 Picoeukaryotes(真核超微藻 類)三大類。三類超微浮游植物在熱帶、亞熱帶貧營養鹽的海域,常占總初級生產 力的 50%以上(Agawin et al. 2000; Liu et al. 2007),是有機碳很重要的來源 (Worden et al. 2004)。

Prochlorococcus 是目前已知世界上體型最小(0.5-0.7 μm),能行光合作用的浮 游植物(Scanlan and West 2002),在大洋區或貨營養鹽海域較 Synechococcus 及 picoeukaryotes 優勢(Partensky et al. 1999)。Synechococcus 是藍綠藻,體型較 Prochlorococcus 大,約1 μm,與 Prochlorococcus 比較,其對營養鹽可利用的型式 較廣(Moore et al. 2002),對溫度、光度耐受性較高(Zwirglmaier et al. 2008; Llabr'es and Agusti 2006),通常在近岸營養鹽高的海域較 Prochlorococcus 優勢。 picoeukaryotes 豐度在超微浮游植物中占的比例最少,但其體型較 Prochlorococcus 及 Synechococcus 大,以碳量評估時,有時會成為超微浮游植物中最優勢的族群 (Worden et al. 2004)。

南海與黑潮皆屬於高溫、貧營養鹽的海域,超微浮游植物是此兩海域中最主 要組成之浮游植物。南海為世界第二大內海,受季風及複雜地形影響,使其水文 系統較黑潮複雜多變。就南海與黑潮而言,超微浮游植物佔總浮游植物生物量之 比例,以葉綠素 a 濃度來估算,在南海海盆暖季占 80%以上,最高達 90%,即使 在冷季此比例略低,亦占了 78%(Chen 2005),黑潮測站則可高達 89%(Chen 2000)。 另外北南海海域有世界上振幅最大之內波 (internal wave)現象(Lu et al. 2010),根 據 Sharples et al. (2007)在北大西洋之研究,內波擾動後造成深層硝酸鹽向上混合, 有助於浮游植物生長。本研究探討南海與黑潮超微浮游植物生物量及生長率之季 節與空間變動及其變動機制,亦針對南海內波通過前後,造成三類超微浮游植物 生物量變動情形做描述。

第二章、文獻回顧

第一節、南海(South China Sea, SCS)

南海是世界第二大邊緣海,也是亞洲三大邊緣海(黃海、東海、南海)之一,其 地理位置涵蓋 3°00'-23°37'N,99°10'-122°10'E,西臨中南半島(越南)與馬來半島, 北接中國、台灣,東鄰菲律賓群島,南連印尼群島,被陸塊與島嶼鏈所包圍,為 典型半封閉海,整體地形呈現中央深(最深處可達 5567 m,平均深度 4000 m),周 圍淺的盆狀地形,其中西北部與南部有較寬廣之大陸棚(平均深度小於 100 m)。南 海的交換水道,分別以北部的台灣海峽與東海相通;東有呂宋海峽與太平洋相連、 閩都海峽(Mindoro Strait)通蘇祿海(Sulu Sea);南有卡里馬塔海峽(Karimata Strait)通 爪哇海(Java Sea);西南方有麻六甲海峽(Malacca Strait)與印度洋相會。匯入的大河 川以珠江(Zhujiang)、韓江(Han River)、紅河(Red River)和媚公河(Mekong River)為 主,皆夾帶大量泥沙,在下游處沖積成三角洲。

若依據桑四維分類系統(C.W.Thornthwaite)劃分,除北南海屬亞熱帶氣候外, 大部份海域皆屬熱帶氣候。其氣候型態受到季風影響甚深,受四個季風系統影響。 在南海西南部受熱帶印度季風系統影響,在南海東南部受澳大利亞季風系統影 響,在南海海域北部受亞熱帶東亞季風系統影響,以及南海東邊臨近菲律賓群島 海域有西北太平洋季風系統影響。普遍來說,南海夏季盛行西南季風,且熱帶低 氟壓及颱風頻繁;冬季盛行東北季風,當東北季風旺盛,在春季受沙塵暴影響(Lin et al. 2007)。有研究指出,南海海域會受聖嬰週其影響(Shaw and Chao 1994; Shaw et al. 1996)。

根據美國海軍水文局(Hydrographic Office of the U.S. Navy),在1970年代以前 的研究指出,南海海流系統受季風系統顯著影響(Wyrtki 1961),在夏季受熱帶印度 季風系統影響,使南海西部馬來半島及中南半島附近海域表水流,流向向北,而 此時,南海東部表水流補償機制,造成南產生順時針環流;在冬季則受亞熱帶東 亞季風系統影響,盛行東北季風,中南半島附近海域表水流,流向向南,產生逆 時針環流。而南海北部,廣東沿海一帶,有一支終年流向東北方的南海暖流(South China Sea warm current, SCSWC) (Qiu 1985)。而在 SCSWC 南方,另有一支終年 向西流的海流稱之為南海黑潮支流(South China Sea Branch of Kuroshio, SCSBK) (Qiu 1985)。此外在東沙西南海域,有一個規模 180 Km 終年存在的中尺度渦流(Qiu 1985)。根據 Hwang and Chen (2000),以衛星(TOPEX/POSEIDON, T/P)觀測 1993-1994 年資料,發現該渦流受季風影響,在夏季是一個順時針暖芯(warm core) 渦流,在冬季是一個冷芯(cold core)逆時針渦流。這些海流及因季節性產生的渦流, 可能是造成沿岸海域湧升流的主因之一(Wong et al. 2003)。根據 Peñaflor et al. (2007) 以衛星(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer , MODIS)觀測北南海表水 溫及表面葉綠素 a 間之關係,發現這些沿岸湧升流區或逆時針渦流區,有低的表 水溫及較高的葉綠素 a 濃度。

南海海域其表水溫終年高於22℃以上,南海表水年平均等溫線分布成震旦向 (Liu et al. 2009)。冬季時,除了北南海陸緣地區受閩江沿岸流影響,最低水溫在15 ℃左右外,冬季表水均溫在北南海諸島(如:東沙群島、巴旦島等)約24℃。夏 季除部分受湧升流影響及沿岸海域水溫較低外,整個海域表水均溫約29℃(Tseng et al. 2009)。

南海北部是目前已知世界上具有最大振幅(可達到 100 m),長內波波列(200 km)之內波(Hsu et al. 2000)。內波在傳遞過程中,由於其波能在海底與海表間產 生折、反射作用時,造成表水能量往海底傳遞,而海底之含富營養鹽(硝酸鹽、 亞硝酸鹽)之冷海水往表水混合之現象。而當內波由深海到淺水域之地形(例如: 陸棚)時,因波型受到阻礙,易產生更高頻之碎內波、孤立內波,而增強混合作 用(Bruno et al. 2006)。

另外與內波相似的內潮作用,則是因潮汐作用力使海流在海脊、陸坡、海檻、 珊瑚礁盤等較崎嶇的海底地形反覆流動時,造成海水內部有上下振幅擾動的現 象,而發生頻率與潮汐週期接近一致,故稱做內潮(Inall et al. 2003)。根據 Sharples et al. (2007)在 Celtic Sea (46-52°N, 5-11°W)的研究發現,在內潮經常發生的海域, 因深水層高濃度的硝酸鹽易向上水層擴散,有利於浮游植物生長。根據 New (1988)

在美國加州蒙特呂灣(Biscay Bay) (46-49°N, 4-8°W)發現有內潮作用, 而 New and Pingreet (1990)在該海域(Biscay Bay) (46-49°N, 4-8°W)的研究發現, 內潮作用支持該海域高達 30%的初級生產量。

雖然內波和內潮發生機制相似,但內波作用力較內潮劇烈且反應時間較內潮 短(Farmer et al. 2009),故雖然根據 Wang et al. (2007)在南海東沙群島(20.4-21.2°N, 116.4-117.2°W)常觀測到內波之海域,以衛星遙測發現,常有較高的葉綠素 a 濃 度。但內波作用對浮游植物的反應機制究竟如何,礙於採樣技術瓶頸,尚無法圓 滿解明之。

第二節、黑潮

黑潮,為北太平洋環流中的一環,也是目前已知世界上第二大洋流。一般認為,其起源自北赤道洋流,遇菲律賓群島(約12-15°N,126°E)後向北偏轉分支(Qu and Lukas 2003)即形成了所謂的黑潮(Nitani 1972)。黑潮沿呂宋島東邊向北流經呂宋海峽(18-22°N,124°E)、台灣至東海、日本,與親潮(Oyashio Current)相匯,整體流幅範圍自北緯15度至北緯40度(Nitani 1972);其最大平均流速為為100-150 cm s⁻¹(Su et al. 1990),流幅寬約為120-170 km(Liang et al. 2003),深度達800 m (Nitani 1972)。另黑潮的流幅寬窄(流通量大小)與流速快慢,受聖嬰(El Niño)和反聖嬰(La Niña)現象影響,有年間變化。流通量大小與南方震盪指數(Southern Oscillation index, SOI)有顯著正相關(Qu et al. 2004),意即在聖嬰年時流通量大,反聖嬰年時流通量小;黑潮流速則與南方震盪指數有顯著負相關(Ueki et al. 2003),即在聖嬰年時流

受東北季風風應力的影響,在冬季部分黑潮會經由呂宋海峽(18-22°N,124°E) 向西匯入(流速 80-100 cm s⁻¹)南海(Nitani 1972; Centurioni et al. 2004)。但是 Fang et al. (1998)指出,不僅是東北季風是造成黑潮入侵南海的條件,侵入南海之黑潮支流 (SCS Branch of the Kuroshio(SCSBK))、呂宋西北邊環流(Northwest Luzon Cyclonic Gyre)、呂宋西北邊渦流(Northwest Luzon Cyclonic Eddy)、呂宋西北邊沿岸流 (Northwest Luzon Coastal Current)這四條海流的作用力影響,使黑潮不論冬季或夏 季皆可能會經由呂宋海峽入侵南海北部,另除上述海流會影響黑潮入侵北南海 外,南海中南海暖流(SCS Warm Current(SCSWC))、廣東沿岸流(Guangdong Coastal Current)這兩條海流和季風在季節上的變動會間接影響黑潮入侵南海北部的程度 (Hu et al. 2000)。以 1965 和 1966 年夏天為例,黑潮表水甚至入侵至北南海 118°E 處(Zhang et al. 1995),在冬季時甚至可入侵至東沙附近(Hu et al. 2000)。又根據 Huang and Zheng (1995)以 CTD 和 ADCP 的資料推算出黑潮水進入呂宋海峽後入侵 北南海方式大致區分為(1)在恆春半島西南方外海形成 loop 後回流至黑潮、(2)直接 順著 SCSBK 往陸棚侵入後不復返、(3)與 Northwest Luzon Cyclonic Gyre 結合等三 形式。

黑潮表水雖終年為低硝酸鹽、低磷酸鹽(< 0.1 μM)、(Chen 1995),但仍有季節 間差異,呈現冬季表水硝酸鹽濃度高於夏季表水硝酸鹽濃度(Chen 2008)。以硝酸 躍層比較北南海與黑潮上游(upstream Kuroshio),則夏季的硝酸躍層深度以黑潮上 游(平均硝酸躍層深度為 92m)(Chen et al. 2003)較北南海深(平均硝酸躍層深度低於 50m)(Chen et al. 2003),冬季雨海域間則相似,另以有光層深度比較之,則黑潮的 有光層深度終年較北南海深,使其生產者以 Chl a 代表則在黑潮分布(Chl a maximum 深度平均大於 75 m)較南海深(Chl a maximum 深度平均小於 75 m) (Chen 2008)。比較黑潮上游與北南海間的浮游植物結構,計算超微浮游植物(以 < 2 μm Chl a 代表)佔總浮游植物生物量(以葉綠素 a 代表)之比例,在兩海域均能達 50%, 南海海盆可高達 85% (Ning et al. 2005);黑潮測站可高達 89%(Chen 2000)。

第三節、超微浮游植物(Picophytoplankton)

超微浮游植物,係指體型小於2μm之浮游植物(Li et al. 1983)。超微浮游植物 為微浮游生物食物網(Microbial food chain)的一環(Liu et al. 2004),其體型雖小, 但因生物量大(Campbell et al. 1994),故對海洋生態系中貢獻很重要的初級生產力 及碳循環主要來源(Worden et al. 2004),尤其在大洋或貧營養鹽的海域,是主要的 初級生產者之一(Liu et al. 2009)在熱帶、亞熱帶貧營養鹽的海域,常占總初級 生產力的 50%以上(Agawin et al. 2000; Liu et al. 2007);就南海與黑潮的研究,超 微浮游植物佔總浮游植物生物量之比例以葉綠素濃度來估算,亦在 50%以上,有 些海盆測站甚至可高達 85%;黑潮測站可高達 89%(Ning et al. 2005; Chen 2000)。

超微浮游植物中又以 Prochlorococcus (原核綠球藻)、Synechococcus (聚球藻) 及 Picoeukaryotes (真核超微藻類)這三類最優勢,分別敘述如下:

(-) · *Prochlorococcus*

Chisholm et al. (1988)透過流式細胞儀(Flow cytometry)偵測海水中微小有機懸 顆粒,意外發現在小於 0.8 µm 懸浮顆粒中,有被紅光激發的小細胞生物 (*Prochlorococcus* 含 Chl *b*, Palenik and Haselkorn 1992; 含 Chl *a*₂、Chl *b*₂, Goericke and Repeta 1992)。同年 Palenik (1988)在 Sargasso Sea 的有光層深度底部(120 m)獨 立出第一株 *Prochlorococcus*。並開啟一連串對 *Prochlorococcus* 的初步研究(Li and Wood 1988; Neceux et al. 1989; Vauolt et al. 1990), 直到 1992 年由 Chisholm et al. 命 名為 *Prochlorococcus marinus*。

Prochlorococcus 是目前已知海洋中族群數量最多(Partensky et al. 1999), 體型 最小(其細胞直徑大約在 0.5-0.7 μm, Morel et al. 1993)的浮游植物,在世界各大洋 中的有光層區(表水至透光度 0.1%)皆有分佈(Campbell et al. 1997)。根據 Partensky et al. (1999)統整其他野外研究(北大西洋(25°-45°N, 62°-78°E), Olson et al. 1990*a*; 北太平洋(ALOHA, 22°45'N; 158°W), Campbell and Vaulot 1993; 紅海(5°S-25°N, 35-65°E), Veldhuis and Kraay 1993;北大西洋(15°-30°N, 10°-40°E), Partensky et al. 1996),發現 Prochlorococcus 分佈在一些貧營養鹽的海域及開闊性的大洋較為優 勢。Prochlorococcus 普遍生長在溫暖(> 15°C)貧營養的海域(Zwirglmaier et al. 2008);細胞存活最低溫度記錄為西北地中海(42°50'N; 5°00'E)約 13°C (Vaulot et al. 1990),當溫度高於 30°C 時族群豐度驟減(Partensky et al. 1999b)。 (=) · Synechococcus

Synechococcus 其細胞直徑大小大約 1 µm, 是最早被發現的超微浮游植物並認 為其為大洋區主要的浮游植物優勢種(Watts et al. 1968), 但直到 1985 年因流式細胞 儀的應用(Olsen et al. 1988), 發現大洋中的 Synechococcus 豐度比早期研究推估的 還要多,才開啟一連串對 Synechococcus 的研究迄今。另外,因 Synechococcus 體 內含有藻膽素(phycourobilin, PUB, λ =495-500nm)與藻紅素(phycoerythrobilin, PEB, λ =540-570nm)兩種酵素(Glover,1985),所以在流式細胞儀中很容易與 Prochlorococcus 和 Picoeukaryotes 做區分。

根據野外樣本的研究亦發現, Synechococcus 在河口、沿岸、湧升流等營養鹽 較高的海域,常有較高的族群豐度。故早在 1984 年 Cuhel and Waterbury 的研究以 Synechococcus 細胞的 C:N:P:S=95:16:3:1 推測對 Synechococcus 而言的營養 鹽限制因子為氮鹽。

Synechococcus 相較於 Prochlorococcus,相對廣溫性(Partensky et al. 1999; Zwirglmaier et al. 2008)。根據野外調查紀錄, Synechococcus 細胞存活最低溫度記錄在冬季的 Boothbay Harbor 海域約 2°C(Shapiro et al. 1988)。Synechococcus 最適生長溫度範圍約 22-29 °C(Moore et al. 1995; Zwirglmaier et al. 2008),在 16-29 °C 隨溫度增高生長率增加(Tsai et al. 2008);超過 29 °C 生物量(Partensky et al. 1999) 及生長率(Moore et al. 1995)隨溫度增加而遞減。

 (Ξ) · Picoeukaryotes

Picoeukaryotes 是對細胞直徑大小小於 2µm 的真核超為藻類統稱,因其群聚結構組成複雜(Diez et al. 2001; Worden et al. 2006),故在海洋生態的研究相對稀少。 目前已知 Picoeukaryotes 是三類超微浮游植物中族群豐度最少,但因其體型比 *Prochlorococcus、Synechococcus*大,主要在超微浮游植物中貢獻了很重要的碳生 物量。以 Worden et al. (2004)的在南加州灣流 California Current. (32°53'N; 117°15'W)的研究,將三類超微浮游植物以碳量估計,發現 Picoeukaryotes 在三類 超微浮游植物總碳量 50 %以上;在日本 Sagami Bay 的研究發現 Picoeukaryotes, 甚至可占總浮游植物碳量百分比 60 %以上(Mitbavkar et al. 2009)。

部分研究指出, Picoeukaryotes 在營養鹽高的海域族群數量相對較多(Brown et al. 1999)。Mitbavkar et al. (2009)在日本 Sagami Bay 的研究亦發現,在營養鹽、Chl a濃度較高的季節, Picoeukaryotes 豐度也相對較高;在貧營養鹽的北太平洋 ALOHA 測站的時間序列研究中,亦可發現一般 Picoeukaryotes 的細胞豐度(Campbell et al. 2004; Campbell et al. 1997)相對較近岸(Mitbavkar et al. 2009; Sharples et al. 2007) 或營養鹽高的海域來得低。另根據 Worden et al. (2004)在南加州灣流的時間序列研 究亦發現,在海水溫 15-25 °C 時, Picoeukaryotes 豐度與水溫有極顯著正相關。

第四節、三類超微浮游植物在各海域生物量分佈

(一)、太平洋地區

1. Hawaiian Ocean Time series (ALOHA, 22°45'N, 158°W)

據 Campbell et al. (1997)在 ALOHA 測站 1990 年 12 月至 1994 年 3 月時間序列 的研究發現, Prochlorococcus 在夏季 0-200 m 累計細胞數為 20×10^{12} Cells m⁻²; 冬 季為 17×10^{12} Cells m⁻²。 Synechococcus 夏季 0-200 m 累計細胞數為 0.13×10^{12} Cells m⁻²; 冬季為 0.19×10^{12} Cells m⁻²。 Picoeukaryotes 夏季 0-200 m 累計細胞數為 0.017×10^{12} Cells m⁻²; 冬季為 0.01×10^{12} Cells m⁻²。該研究發現以該海域三類超微浮游植 物碳生物量占總浮游植物碳生物量百分比評估, 三類超微浮游物優勢度分別為 Prochlorococcus 在夏季較為優勢, Synechococcus 和 Picoeukaryotes 則分別在冬季和 春季,造成此現象知結果,推測與當地海域硝酸鹽濃度變動週期有關。

2. Southeast Asia Time-series Station(SEATS , 18°N; 116°E)

據Liu et al. (2007)於2001年10至2002年9月(聖嬰年)及2004年11月至2005年12月(反聖嬰年),針對南海 SEATS 測站超微浮游植物的季節性變動研究,發現該測站整年間以Prochlorococcus 最為優勢(於研究期間年平均混合層至表水細胞數

為 15-28×10⁴ Cells ml⁻¹,其平均細胞數最大值發生在夏季。Synechococcus 整年間 混合層至表水平均細胞數則在 10×10⁴ Cells ml⁻¹以下。另 Synechococcus 在冬季至 早春有藻華(bloom)現象。Picoeukaryotes 在該測站研究期間生物量均低,其混合層 至表水平均細胞數為 500-15000 Cells ml⁻¹,其平均細胞數最大值發生在冬季。根據 該研究發現,Synechococcus 和 Picoeukaryotes 在冬季細胞豐度增加,Prochlorococcus 則相反,與該海域冬季吹東北季風導致混合層深度較深,營養鹽較豐富有關。而 聖嬰年會導致的表水溫較高、Chl a 濃度較低、Prochlorococcus 豐度較高;在反聖 嬰年則 Chl a 濃度和 Picoeukaryotes 豐度較高。

3. South China Sea

根據 Chen et al. (2009)於 2007 年夏季(8、9月)南海海盆地區(11-15.75°N; 109.5-114°E)的研究發現, Prochlorococcus 表水平均細胞數為 3.1-23×10⁴ Cells ml⁻¹ 為最優勢的超微浮游植物。Synechococcus 表水平均細胞數為 0.34-15×10⁴ Cells ml⁻¹ 次之, Picoeukaryotes 則為 0.007-0.21×10⁴ Cells ml⁻¹ 最少。該研究發現, Prochlorococcus 在外洋、貧營養鹽、低生物量、低浮游植物生長率的測站較優勢 族群。Synechococcus 在中度營養鹽(營養鹽不貧乏也不過度富足)的海域影響較 重要。而促使此現象產生與超微浮游植物共同捕食者的捕食有關,即 Synechococcus 在中度營養鹽海域,生長率大於被捕食率而 Prochlorococcus 則被捕食率大於生長 率,促使 Prochlorococcus 族群之優勢轉變進而被 Synechococcus 取代,在營養鹽富 足海域則為 Picoeukaryotes 和其他大型浮游植物較為優勢。

4. Luzon Strait Bordering the South China Sea (16-24 °N; 114-126°E)

根據 Chen et al. (2007)在南海與黑潮及該還與渦流區的研究發現, Prochlorococcus 在海域之間無顯著差異,但 Synechococcus 和 Picoeukaryotes 在富 營養鹽的渦流區(表水硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度:107 nM;表水磷酸鹽濃度:70 nM) 生物量高於相對貧營養鹽的南海海域(表水硝酸鹽濃度:14±1 nM;表水磷酸鹽濃 度:21±3 nM)及黑潮海域(表水硝酸鹽濃度:21±5 nM;表水磷酸鹽濃度:19±2 nM)。 其 *Prochlorococcus* 表水生物量在渦流區為 12.50 × 10⁴ Cells ml⁻¹,在南海為 8.29-16.46 × 10⁴ Cells ml⁻¹,在黒潮為 3.08-20.46 × 10⁴ Cells ml⁻¹;以 0-200 m 累計 *Prochlorococcus* 生物量觀察則在渦流區為 9.15 × 10¹² Cells m⁻²,在南海為 13.8-30.0 ×10¹² Cells m⁻²,在黒潮為 11.3-34.0 ×10¹² Cells m⁻²。而 *Synechococcus* 表水生物量 在渦流區為 8.12 × 10⁴ Cells ml⁻¹,在南海為 1.27-1.71 × 10⁴ Cells ml⁻¹,在黒潮為 0.39-0.66 × 10⁴ Cells ml⁻¹;以 0-200 m 累計 *Synechococcus* 生物量觀察則在渦流區為 3.51 × 10¹² Cells m⁻²,在南海為 2.36-2.76 ×10¹² Cells m⁻²,在黒潮為 0.37-0.61 ×10¹² Cells m⁻²。Picoeukaryotes 表水生物量在渦流區為 1.06 × 10⁴ Cells ml⁻¹,在南海為 0.17-0.22 × 10⁴ Cells ml⁻¹,在黒潮為 0.06-0.18 × 10⁴ Cells ml⁻¹,在南海為 0.45-1.35 ×10¹² Cells m⁻²,在黒潮為 0.21-0.41 ×10¹² Cells m⁻²。

5.Sagami Bay(35 °N ; 139.35 °E)

根據 Mitbavkar et al. (2009)於 2002 年 6 月至 2004 年 5 月的時間序列(每月採樣 一次)研究,發現該海域的 Prochlorococcus 在研究期間平均細胞數> 2.1×10⁴ Cells ml⁻¹,在暖季(混和層溫度>18 °C)有光層累計細胞數為 0.1-0.5×10¹² Cells m⁻²;冷季 (混和層溫度<18 °C)有光層累計細胞數為 0.054-0.26×10¹² Cells m⁻²。Synechococcus 在研究期間平均細胞數 0.1×10⁴ Cells ml⁻¹,在暖季有光層累計細胞數為 0.5-2.8×10¹² Cells m⁻²;冷季有光層累計細胞數為 0.007-0.3×10¹² Cells m⁻²。Picoeukaryotes 在研 究期間平均細胞數>3.1×10⁴ Cells ml⁻¹,整年平均有光層累計細胞數為 0.1-0.6×10¹² Cells m⁻²。該篇研究指出,由於研究海域為近岸使 Synechococcus 和 Picoeukaryotes 相對於 Prochlorococcus 優勢,且在暖季時受到黑潮入侵(intrusion)帶來的暖水團促 使 Prochlorococcus 和 Synechococcus 在暖季時更為優勢,Picoeukaryotes 則因營養 鹽貧乏則細胞豐度下降。此現象亦顯示在高緯地區,溫度的限制較為明顯。 (二)、大西洋地區

1. Bermuda Atlantic Time-series (BATS , 31°50'N ; 64°10'W)

根據 DuRand et al. (2001)於 1989 至 1994 年在 BATS 測站的研究結果發現 *Prochlorococcus* 在夏秋雨季以水深 200 m 累計細胞數為 10-20 ×10¹² Cells m⁻²; 冬 春雨季為 1-3 ×10¹² Cells m⁻²。*Synechococcus* 夏秋雨季 200 m 累計細胞數為 0.3-0.5 ×10¹² Cells m⁻²; 冬春雨季為 2-4 ×10¹² Cells m⁻²。該研究結果顯示,於該測站的 *Prochlorococcus* 生物量與海水溫呈正相關與硝酸鹽濃度呈負相關; 而 *Synechococcus* 則相反。

2. Celtic Sea(48°34.5'N; 9°30.6'W)

根據 Sharples et al. (2007)在 Celtic Sea 針對內潮波對浮游植物群聚的影響的研 究發現,週期性的內潮波會影響該海域硝酸鹽供應平衡(硝酸鹽通量與葉綠素 a 濃 度有 3.5 天的變動週期),進而影響該海域的浮游植物群聚分布。以超微浮游植物 的影響而言,體型最大的 Picoeukaryotes(真核超微藻類)在陸坡區比陸棚或外洋區 還多;體型最小的 Prochlorococcus (原核綠球藻, size 約 0.5-0.7 μm)則主要在大洋 區分布較優勢; Synechococcus(聚球藻, size 約 1 μm)則在陸棚區較優勢。

(三)、印度洋地區

根據 Brown et al. (1999)於 1995 年 8、9 月 Arabian Sea(10-23°N; 57-69°E)的研 究發現 Prochlorococcus 僅存在於低 NO₃ 濃度、低 Chl a 濃度的測站細胞數約為 $1.58-2.64 \times 10^5$ Cells ml⁻¹; Synechococcus 在所有測站皆有,細胞數約為 0.4-0.5 Cells ml⁻¹; Picoeukaryotes 為 $0.025-0.035 \times 10^5$ Cells ml⁻¹。該研究結果顯示,在經過西南 季風吹拂後,該研究海域大洋區的超微浮游植物所提供的碳量占總體浮游植物 92 %以上。另於研究期間, Prochlorococcusy 在大洋區測站生長率為 1.4 d⁻¹。 Synechococcus 生長率在近海地區和沿岸地區分別為 0.5-1.1 d⁻¹ 和 0.5-0.7 d⁻¹。 Picoeukaryotes 則除大洋區外生長率皆高於 Prochlorococcusy 和 Synechococcus 為 1.3 d⁻¹。該研究又以稀釋法(Dilution experiments)檢定捕食者的捕食效應。結果發現捕 食者的捕食效應對三類超微浮游植物生長率的影響程度又依 Prochlorococcusy、 Synechococcus 和 Picoeukaryotes 分別為。90、70 和 86%。即營養鹽的增加除會影 響三類超微浮游植物的成長外,捕食者的捕食效應亦會干擾三類超微浮游植物在 各海域的優勢度。

第五節、流式細胞儀原理(InFlux cell sorter, Becton Dickinson, USA)

因為超微浮游植物體型很小、數量很大,透過傳統光學顯微鏡不易觀測之, 自流式細胞儀發明並之後,根據超微浮游植物之特性(體型、螢光),得以應用在三 類超微浮游植物之區分並計數。(Chisholm et al. 1988)

流式細胞儀構造主要有下列四大系統:流路系統、光路系統、分選系統及電 子訊號處理及電腦系統。

流式細胞儀的作用原理如下:將預檢測之樣本細胞,透過流路系統將細胞依 序輸送至雷射激發區(光路系統),當雷射打到來自流路系統流出之細胞時,因細 胞折射和反射原理,產生散射光和螢光(含有螢光或染有螢光染劑之細胞),緊接 透過光偵測器接收散射光和螢光訊號並轉為電子訊號,電子訊號經過放大處理之 後傳輸至電腦(電子訊號處理及電腦系統),最後透過電腦軟體將有興趣之細胞進 行圈選並進行分析。若欲將樣本之細胞進行分選時,則再透過分選系統,利用壓 電效應原理,讓細胞在電荷場中產生偏移,使樣本細胞收集至多孔培養盤或試管 之中。

第三章、材料與方法

本研究方法分為兩部分(一)自然界中三類超微浮游植物生物量之變動(二)控制 培養實驗,以解明自然界中當多個生態因子共變時,何者為其決定性因子。兩部 分之採樣及實驗步驟分述如下

第一節、自然界樣本採集

自然界樣本採樣以測站區分為(1)南海與黑潮重點航次測站,(2)西北太平洋的 CR ITOP 測站,以及(3)採樣其間受內波通過影響的測站三部分。

(一)、採樣地點

1.南海與黑潮重點測站

重點採樣測站依據 Hsin et al. (2008)依 1982-2005 年間 0-50m 平均海流流向流 速圖所定義之黑潮流域(圖 3-1),將本研究重點測站區分為 K1、K2 和 A(CR910-受淡水影響)等三個黑潮測站與 S1-S7、M1(CR910)、KK1(CR950)等 9 個南海測站。 南海測站又依海底深度地形區分為海盆(水深大於 2500 m)測站(S5-S7、M1 及 KK1)、陸坡(水深由大於 2500 m 急驟減至小於 1000 m)測站(S3-S4)與陸棚(水深小 於 300 m)測站(S1-S2)(圖 3-2)。

重點測站主要採自下列四個採樣航次 CR910(2009 年 8 月 14-20 日)、 CR1455(2010 年 5 月 12-17 日)、CR1487(2010 年 9 月 4-10 日)及 CR950(2010 年 12 月 2-11 日)。以各航次所有測站平均表水溫 27 ℃為歸類標準,將 CR910(29.3±0.2 ℃)、CR1455(27.8±0.6 ℃)、CR1487(29.3±0.4 ℃)三航次歸類為暖季航次,將 CR950(25.9±0.7 ℃)歸類為冷季航次(圖 3-3)。暖季三航次中,有二個航次受颱風影 響, CR910 航次是受 Morakot 颱風(2009 年 8 月 6-8 日,八八風災事件,圖 3-4) 後 6 天開始進行航次; CR1487 則是在航行前(2010 年 8 月 29 至 9 月 2 日)在東沙 海域有 Lionrock 颱風形成,沿著 21°N 左右測站線往東在 S6 站往北轉,行進(圖 3-5),在 CR1487 航行期間則受熱帶低壓襲罩,且該熱帶低壓在 9 月 9 日形成 Meranti 颱風,颱風形成時之颱風眼位置(約 21°N,119°E)在正進行中之陸棚 S2、S1 測站 (21°N,116.5-117°E)採樣位置東方距離不遠,(圖 3-6)。CR1455 為暖季無颱風影響的 航次,CR950 則有東北季風的影響。

本研究中,培養實驗皆在重點四航次中進行,故各航次採樣測站,各航次培養實驗項目如表 3-1。

2.CRITOP

CRITOP的測站,依據Hsin et al. (2008)所做1982-2005年間0-50m平均海流流向 流速圖所定義之黑潮流域(圖3-1),將最靠近21°E的T1、T2測站歸類為黑潮測站, 其餘的C1-22及A1-3等20個測站,歸類為西北太平洋測站。透過美國海軍實驗室 (Naval Research Laboratory, NRL)針對台灣附近海域海流數值模擬結果(Taiwan Nowcast/Forecast System, TNFS, 圖3-7), 將此20個西北太平洋測站依航行期間所 受海流影響,細分為12個逆時針渦流(Cyclonic eddy)測站(其中A1測站採樣兩次, 分別為A1-1(白天)及A1-2(晚上)),4個順時針渦流(Anti-cyclonic eddy)測站,以及5 個夾在順、逆時針渦流中間之測站(表3-2)。以One Way-ANOVA及Duncan's Multiple Range Test分析比較。結果顯示不同渦流狀況,其環境因子、營養鹽或生物量,皆 異均不顯著(圖3-8),因此將之合併,統稱為西北太平洋測站討論之。另T1和T2測 站除了是黑潮測站外,在停留期間受Parma(圖3-9)颱風影響,並有內潮發生,雖然 缺乏水下聲納(EK500)資料,但以(A)CTD下放(down cast,實線)、上收(up cast,虛 線)時記錄之溫度、鹽度、密度資料(T1:圖3-10A;T2:圖3-11A);(B)0-200 m平 均鹽度(T1:圖3-10B;T2:圖3-11B);(C)0-200 m平均營養鹽濃度(T1:圖3-10C-E; T2: 圖3-11C-E); (D) 0-200 m平均生物量(T1: 圖3-10F-H; T2: 圖3-11F-H), 皆發 現有24小時週期性(全日潮)上下起伏之現象。因此將其結果歸類至內波、內潮測站 討論。

3. 內波、內潮測站

透過船上深納 EK500(120 K Hz)或 EK60(38 K Hz)於航行期間遇到內波的測站 包括 CR910 的 IW1、IW3 測站(圖 3-12); CR1455 的 S1(圖 3-13)、S2(圖 3-14)測站。 因 CR1455 的內波測站有較長時間的停留採樣(時間序列採樣),資料較為完整,故 內波探討以該航次測站描述為主。

另 CRITOP 的 T1、T2 測站,由定點時間序列 CTD 樣本,溫度、鹽度、密度 等資料,發現有 24 小時為一週期的上下起伏變化(圖 3-10、11),故歸類至內潮影 響測站。

(二)、採樣方法

野外重點航次測站之採樣主要透過研究船海研一號或海研三號進行,每個測 站採 6-9 個水層,其中若白天到站採樣則依水層透光度採透光度 100 %、46 %、38 %、13 %、5 %、1 %及水深 100 m、150 m、200 m。若晚上到站採樣則固定採深度 5 m、15 m、30 m、50 m、75 m(或透過螢光探針即時測得之螢光最大值深度)、100 m、150 m、200 m 等。

另 CRITOP 的採樣主要透過 Roger Revelle 進行,每個測站固定採 5 m、15 m、 30 m、50 m、75 m(或透過螢光探針即時測得之螢光最大值深度)、100 m、150 m、 200 m 等 8 個深度。

1.水文資料

本研究中,定義之水文資料,泛指物理性因子,例如:水溫、鹽度、密度、 混合層深度、硝酸躍層深度,表水流速、表水流向、水下聲納系統(EK500)、光照 度等。

海水溫度、鹽度、密度,主要透過研究船上 CTD(SBE9/11 CTD, SeaBird Eletronics Ins. Washington, USA) 記錄收集。水下 PAR 值資料以 CTD 上附載水中 光度計(QSP-2300, Biospherical, USA)記錄收集。表水流向、流速等水文資料取自船 上 ADCP。 光照度資料取自研究船上附載光度計(Alphatracka MKII, Chelsea

Instruments Ltd, USA)所記錄之表面 PAR 值。而海底深度資料與內波的觀測則透過船上附載 EK500(Scientific Sounder System, SIMRAD, NOR)記錄之。

2.營養鹽及葉綠素 a 濃度

本研究中, 營養鹽資料, 包括硝酸鹽(NO₂)加亞硝酸鹽(NO₃)(本研究中將 NO₂+NO₃ 合稱為硝酸鹽, N+N)、NH₄⁺、磷酸鹽(SRP)。

硝酸鹽、NH4⁺、磷酸鹽樣本,來自採水瓶之水樣,採水後則迅速在甲板上分 裝至兩個 250 ml 的 PC 瓶(Nalgene, USA)與兩個 250 ml 的 PE(Nalgene, USA)瓶中。 而後迅速冰存至-20 ℃冷凍櫃,帶回實驗室再進行營養鹽分析。

葉綠素 a (Chl a)濃度樣本,亦自採水瓶採得水樣之後,迅速分裝至 500 ml PE 瓶中裝滿,再將水樣加入1% MgCO3溶液後,即刻以 GF/F 濾紙過濾,過濾後的 濾紙以-20℃冷凍保存。最後將 GF/F 濾紙以-20℃ 冷凍保存,攜帶回實驗室後再 進行分析。回實驗室後,各類營養鹽分析方法,描述如下:

(1)硝酸鹽、亞硝酸鹽分析

測定水體中所含亞硝酸鹽濃度,可透過 naphthyl-rthylenrdiamine 與水體中的亞 硝酸鹽及 Sulphilamid 結合反應形成紫紅色偶氮染料(pink azo dye),再透過流動式 自動分析儀(FIA)以光波長 534 nm 測量水樣中光譜吸收值(Strickland and Paesons 1972),再以實驗室所配置之亞硝酸定量濃度標準品的光譜吸收值來校正出水體中 亞硝酸鹽濃度。海水中硝酸鹽與亞硝酸鹽通常共存,且浮游植物對此兩種型態的 氮鹽皆可利用。故測量水體中的硝酸鹽及亞硝酸鹽濃度時,先以鎘絲上附載的銅 離子將硝酸根離子還原為亞硝酸根離子,再進行測定,此過程稱為鎘銅還原法。

當水樣中的硝酸鹽與亞硝酸鹽濃度低於上述方式偵測極限(0.2 μM)時,則以化 學螢光法(Garside 1982)測量至 nM 級濃度。本研究所使用硝酸鹽及亞硝酸鹽濃度數 據,皆為實驗室其他同仁分析後,提供使用。

(2)磷酸鹽分析

磷酸鹽的測定方法,主要透過鉬酸銨(ammonoim molybdate, (NH)₆Mo₇O₂₄ 4H₂O)與水樣中所存在的磷酸根離子進行反應,而成藍色磷酸鉬複合物 (Phosphomolybdenum complex),再透過分光光度計(U-2000, Hitachi Co., Tokyo, Japan)以波長 880 nm 測量水樣中光譜吸收值,再以實驗室所配置之定量磷酸鹽濃 度標準品(0、0.5、1、2、5、10、20 μM K₂HPO₄)的光譜吸收值所換算之斜率來校 正出水體中磷酸鹽濃度(Strickland and Parsons. 1972)。

當磷酸鹽濃度低於上述方式之偵測極限(0.2 μM)時,再以 MAGIC 法(Karl and Georgia 1992) 分析測定至 nM 濃度,低磷酸鹽之測定由實驗室其他同仁分析後,提供數據。

(3)NH4 濃度分析

NH4⁺的測定,主要透過靛藍法測定(Pai et al. 2001)。靛藍法先將 10 M Citrate 、 0.5 M NaOH 及飽和濃度的漂白水以 2:2:1 的方式混合成 Mixed oxidizing reagent, 再依序加入 Phenol、Nitroprusside、和 Mixed oxidizing reagent 使其反應成靛藍色, 而後以分光光度計(U-2000, Hitachi Co., Tokyo, Japan)以波長 640 nm 測量吸收值, 再以實驗室所配置之定量 NH4 濃度標準品(0、0.5、1、2、5、10、20 μ M NH4Cl) 的光譜吸收值來校正得出水體中 NH4⁺濃度。NH4⁺濃度分析由實驗室其他同仁分析 後,提供數據。

(4)Chl a 濃度分析

分析樣本時,將濾紙取出並以90% acetone,在4℃黑暗環境下萃取20小時 (Strickland and Parsons 1972),萃取液再以螢光分光光度計(F3010, Hitachi Co., Tokyo, Japan)測量光譜吸收值,以Chla標準品的光譜吸收值來校正出水體中Chla 濃度。Chla濃度分析由實驗室其他同仁進行分析後,提供數據。 3.生物樣本

水樣主要透過研究船上所附載的輪盤式(Rosette)採水器及採水瓶採集。由採水 器採得水樣,迅速取水樣1ml(採2-3重複)放入2ml抗凍管(Cryogenic Vials, Nalgene, USA)中,並加入0.02ml 10%的PFA(最終濃度為0.2%) (paraformaldehyde, Sigma, Missouri, USA)固定,固定後的樣本先放入暗袋中靜置15分鐘,而後再迅速將樣 本置於液態氮桶中保存。樣本帶回實驗室後再將之放置至-80℃冰存。

様本以流式細胞儀分析細胞數。欲分析當天,將樣本自-80 °C 冷凍庫取出解 凍,將解凍之樣本取出 0.25ml 置入專用試管(FALCON 2063)中,並分別加入 0.02 ml 1µm 的螢光珠子(Beads) (Polyscience, USA)做為定位校正標準。另加入 0.05 ml 已 知濃度(每 0.05 ml 有 47753 或 53028 顆 Beads)之 2.04 µm 珠子(AccuCount Blank Particles, Sphero Inc.) 做為定量標準。

三類超微浮游植物,在經過流式細胞儀(InFlux Cell Sorter, Cytopia, USA)藍光 雷射(波長 488nm)激發後,會因其細胞大小及自營色素產生出不同螢光,而被區分 出來。Synechococcus 除含有 Chl a 外,另含有藻膽素,故會產生橘紅色螢光,使 其在流式細胞儀中,可被橘光偵測器接收(波長 579nm),而 Prochlorococcus 和 Picoeukaryotes 則因含無藻膽素,只靠 Chl a 被藍光激發產生暗紅色螢光,故可被 流式細胞儀之紅光偵測器(波長 692nm)接收。另因 Prochlorococcus 體型較小(其細 胞直徑大約在 0.5-0.7 μm)、Picoeukaryotes 體型較大(細胞直徑大小小於 2μm 的真 核超為藻類統稱),故透過 1 μm 定位用 Beads 即可區分出此兩類細胞。流式細胞 儀偵測所得之訊號,經過訊號處理後以 FCS Express V3 軟體(De Novo Software, USA)進行圈選和計數(圖 3-15),各類族群之生物量以下列公式計算出。

$$(Cells/ml) = \frac{N}{V} \times \frac{V_T}{V_R}$$

N: 樣品測完後, 數據上呈現測得超微浮游植物細胞數(cells)。

V_R:上機時所取的水樣中,真實海水水樣體積所含體積(ml)。在本研究中,於上機時從抗凍管中所取出之 0.25 ml 水樣中,含有最終濃度 2 %PFA(0.02 ml),即真實海

水體積為 0.2451 ml。

 $V_T: 受測樣品總體積(ml)。在本研究中, V_T = 0.32ml。$

VT=海水樣品體積(0.25ml)+2µm Beads (0.05ml)+1µm Beads (0.02ml)=0.32ml。

V:受測樣品消耗體積(ml)。在本研究中 $V = \frac{N_B}{B} \times V_T$ 其中。

B:定量用 2 μm Beads 之濃度。在本研究中所使用之定量用 2 μm Beads 濃度,為 每 0.05 ml 有 47753 或 53028 顆 Beads。

NB: 樣品測完後,數據上呈現測得定量用 2 µm Beads 之個數。

第二節、培養實驗

各航次培養實驗所進行的測站列於表 3-1,培養水樣以採水器採兩水深,即A 水層(5m,代表光透度(LDP)100%)和C水層(白天採水培養時,採LDP=38%;夜 間採水培養食採固定深度 15m)表 3-3。培養實驗皆在研究船上甲板以自然光培養 進行,培養時以船上幫浦抽取表水至培養槽,以流水式控制培養溫度使之在各自 的航次、測站中能貼近環境水溫。培養進行 1-2 個日+夜週期(日出時間到日落時間 為日週期,日落時間到隔天日出時間為夜週期),因天候、人力,各航次培養時間 及採樣時間記錄於表 3-3。

培養瓶採用 250 或 500 ml 透明 PC 瓶(Nalgene, USA)。培養前,培養瓶已用 1 N 之 H₂Cl 酸洗,酸洗後再以超純水(Milli-Q Water)潤洗晾乾,晾乾後之培養瓶以黑 色網布包覆,來模擬採水水層之光透度(光透度 38 %)。實驗前先以欲進行培養之 海水水樣潤洗,再裝入水樣進行培養。

培養過程,每個採樣時間點(表 3-3),皆從培養瓶中採水樣 1 ml,每次採樣皆 採二至三個重複,採得之水樣加入最終濃度為 0.2 %的 PFA 固定之。固定後的樣 本先放入暗袋中靜置 15 分鐘後再迅速將樣本置於液態氮桶中保存。樣本帶回實驗 室後再以流式細胞儀分析其細胞數。

培養實驗包括捕食率培養、NH4+添加培養及 Fe 添加培養三種方式進行,各實
(一)、捕食率培養

1. 體型分濾實驗法(size-fractionation experiments)

捕食實驗方法,採Hansen (1994)所建立之體型分濾實驗法(size-fractionation experiments)進行。根據Chen et al. (2009)若將海洋生物體型以ESD (equivalent spherical diameters)換算,捕食者與被捕者之間有最適體型比例,就微浮游生物食 物網的捕食階層而言,小型捕食者(如. heterotrophic nanoflagellate)與被捕食者 (如.Picophytoplankton)之間最適體型比約2-3:1因此推估超微浮游植物的小型捕食 者體型可能約為2-5 μm之間,而較大型捕食者(或二階捕食者)體型大約為5-10 μm。

按此,將採樣所得之原海水樣,先以2、5及10 μm 等不同孔徑大小的 PC 膜 (Nuclepore Polycarbonate, Whatman, UK)分別進行過濾,獲得<2 μm、< 5 μm(僅 CR1455)、<10μm 及未過濾(僅 CR1455)共2-4 組水樣。其中<2 μm 者假設只有超 微浮游植物無捕食者(Control 組,以本研究中以「Control」表示)、< 5 μm 者表示 除超微浮游植物外,還含有第一階捕食者(以本研究中以「2-5 μm」表示)、<10 μm 者表示除超微浮游植物及第一階捕食者外,還可能含有第二階捕食者(以本研究中 以「2-10 μm」表示),而未過濾者表示自然狀況下的捕食率。另顧及捕食者本身有 日夜垂直遷移習性(Diel Vertical Migration, DVM),故在航次時間允許時,部分測 站有日間、夜間各一次採樣培養。各實驗組與各時間點生物樣本採樣皆以2-3 重複 進行。

2. 捕食者計數

捕食者觀測計數,則於培養前及實驗結束時,從培養瓶中採45ml之水樣置入離心管(50ml Centrifuge Tube, Corning Incorporated, Mexico)中,並加入2ml戊二醛 (glutaldehyde, Sigma Missouri, USA)固定後,以-20⁰C 冷凍冰存。回實驗室後將水 樣取出退冰,以便製成玻片。於退冰後,取水樣20ml(其中海水樣本19.15ml;戊 二醛樣本 0.85 ml)以 0.8 µm 黑色 PC 膜過濾, 過濾至剩餘 10 ml 時,停止抽氣,加 入最終濃度 0.2 %之 DAPI (4'6-diaminodino-2-phenylindole, Sigma Missouri, USA), 避光等五分鐘。最後將剩餘之水樣繼續抽氣濾乾,濾膜取出製成玻片。玻片以螢 光顯微鏡(10 倍目鏡、100 倍率物鏡)觀察。其中因為在玻片製作過程中,加入了會 與細胞核結合的 DAPI, 故透過 UV 光激發下,可清楚區分有核細胞(生物)的藍色 螢光亮點與非生物有機體。而 nanoflagellates 本身又分為有色素型(包括自營與混 營,本研究以 PNF 表示)與無色素型(異營型,本研究以 HNF 表示)兩種。在螢光顯 微鏡下,以藍光激發時, PNF 因其體內含有葉綠素,呈亮紅色;而 HNF 則呈現亮 綠色(圖 3-16)。

鏡檢時,記錄下濾膜中所有 nanoflagellate 之細胞長、細胞寬及個體數。將觀 測所得之體長、體寬後,根據 Hansen (1994)所提出之 equivalent spherical diameters(ESD) 公式進行標準換算,其計算如下:

 $ESD = (細胞體長 \times 細胞體寬²)^{1/3}$

將玻片中之每個 nanoflagellate 體長、體寬轉換成 ESD 後,按 ESD 將體型大 小歸類成<2 μ m(本研究以 PNF_{<2 μ m} 或 HNF_{<2 μ m} 表示)、2-5 μ m(本研究以 PNF_{2-5 μ m} 或 HNF_{2-5 μ m} 表示)、5-10 μ m(本研究以 PNF_{5-10 μ m} 或 HNF_{5-10 μ m} 表示)、>10 μ m(本研 究中無計數到>10 μ m) nanoflagellate 細胞(Chen et al. 2009)。再經過下列公式求出每 ml 中含有不同大小之 nanoflagellate 細胞數。

$$(Cells/ml) = \frac{N_n}{V} \times \frac{V_s}{V_T}$$

Nn:玻片中計數所得到之 nanoflagellate 細胞數(cells)。

V:製作玻片時,所取水樣體積(20 ml)。

V_T:水樣總體積(含戊二醛)(47 ml)。

Vs:原始海水水樣體積(不含戊二醛)(45 ml)。

3.超微浮游植物生長率與被捕食率計算方式如下

(1)生長率(K, d⁻¹):單位時間內族群豐度的變動率。

由
$$N_t = N_0 e^{kt}$$
,得到 $K = ln(\frac{N_t}{N_0}) \frac{1}{t}$
N_t:培養t小時後的族群豐度。
N₀:實驗開始時(t=0)的族群豐度。

本研究中,「Control」之生生長率以「K_{<2μm}」表示,「2-5μm」之生生長率 以「K_{2-5μm}」表示,「2-10μm」之生生長率以「K_{2-10μm}」表示。

(2)被捕食率(G,d⁻¹):同一族群在含有捕食者之「K_{2-5 μm}」、「K_{2-10 μm}」、與「K_{<2 μm}」
 間差值,即為捕食率(Chen et al. 2009)。若以「2-5 μm」為例

 $G_{5\mu m} = \ \lceil K_{2-5 \ \mu m} \rfloor \quad \text{-} \ \lceil K_{< 2 \ \mu m} \rfloor \circ$

4. 比較三類超微浮游植物對 nanoflagellates 碳生物量來源之相對重要性

從上一段計算中,得到三類超微浮游植物之生長率(K,d⁻¹)及被捕食長率(G, d⁻¹),欲探討三類超微浮游植物究竟有多少碳生物量,透過捕食效應往上一階層 (nanoflagellates)傳遞,則必須透過下列算式轉換之。

(1)生產率(Production rates, P, $\mu g C L^{-1} h^{-1}$):單位時間內族群因生長而增加之碳生物量。

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \times \mathbf{N}_0 \times \mathbf{C}$$

K:單位時間內族群生長率(K,d⁻¹)。

N₀:實驗開始時(t=0)的族群豐度。

C:三類超微浮游植物中,每一顆細胞所含之碳生物量。其中 Prochlorococcus = 53
fg C cell⁻¹, CamPbell et al. 1997; Synechococcus = 250 fg C cell⁻¹, CamPbell et al.
1997; Picoeukaryotes = 1626 fg C cell⁻¹, Blanchot et al. 2001。

(2)攝食率(Ingestion rate, I, μg C L⁻¹ h⁻¹):單位時間內捕食者由三類超微浮游植物 中所攝食之碳生物量。 $I = G \times N_0 \times C$

 $G: 單位時間內族群被捕食率(K, d^{-1})$ 。

 N_0 : 實驗開始時(t=0)的族群豐度。

C: 三類超微浮游植物中,每一顆細胞所含之碳生物量。

由於本研究培養實驗過程中發現,三類超微浮游植物之生產率及被攝食率均 有正、負值。故數據分析時,又分為兩種方式處理:

(1)All data

部分培養航次、測站,受水體其他環境因子限制(如:營養鹽匱乏、光線抑制等 因素)造成三類超微浮游植物生產率為負值。本研究認為,此乃反應自然環境下, 三類超微浮游植物真實生長情形,應保留所有數值,進行分析。

(2)生產率刪除負值者,被攝食率為負值者化整為零

然而在培養過程中,其生長率已為負值,則本身被攝食率之計算,亦會因其 他環境因子干擾其生長率,而增加計算誤差,故應將負生產率者刪除。而負被攝 食率為自然界中不應存在之現象,故將負生產率之數據剔除後,仍有負被攝食率 者,將之負值化整為零。

(二)、NH4⁺添加培養

添加 NH4⁺之培養,則於輪盤是採水器採水完畢之後,迅速將水樣以 2 μm PC 膜過濾,以去除捕食者捕食效應之影響。而後將濾液分為控制組(無添加)與添加培 養組,每組有 2 重複。濾液置入預先準備好的培養瓶中,實驗組添加 NH4Cl 最終 濃度為 1 μM 進行培養。培養時間列於表 3-3,每個時間點採 2-3 重複。另為瞭解< 2μm 濾液中,是否有捕食者之干擾,採 45 ml 培養之水樣(< 2μm),置於 50 ml 離 心管中,並加入戊二醛,迅速以-20 ⁰C 冷凍冰存,回實驗室後將水樣製成玻片檢查 捕食者。 本研究中以「<2µm」作為控制組(Control)組,以「Control」表示;添加NH4Cl 之培養組,以「NH4」表示。

(三)、FeCl3添加培養實驗

本研究中以「<2µm」作為控制組(「Control」組),及三個添加組 FeCl₃(「Fe」 組)、EDTA(「EDTA」組)、EDTA + FeCl₃(「FeEDTA」組)。採水器採集光透度 100 %及光透度 38%水樣後,立即將水樣以 2 µm PC 膜過濾以去除捕食者。濾液置入 預先準備好的培養瓶中,上述四實驗組每組有 2-3 重複,添加組分別添入 50 nM FeCl₃、20 µM EDTA 及 50 nM FeCl₃+20 µM EDTA。培養時間參見表 3-3,每個時 間點採 2-3 重複。

第三節、環境因子、生態因子之定義及符號

本研究中,所使用之各類生物量、環境因子(水文資料、營養鹽)指標之定義整 理如下:

1.水文資料

(1)表水溫度(SST, ℃)、表水鹽度(SSS):皆指取自 CTD 記錄之水深 5 m 溫度、鹽度資料。

(2)混合層深度(Depth of mixed layer, D_{mi}, m):以研究船上附載 CTD 所測得每個水深(m)水體密度,依水深加以排序(由表水排至深水層)後,以每公尺水深間密度相差大於 0.1 g cm⁻³之水深。

(3)平均光照強度;以研究船上光度計之表面 PAR 資料,累計積分白天培養時間內 所有 PAR 值後,再除以累計時間。

(4)有光層深度(Depth of euphotic zone):以研究船上 CTD 附載光度計,記錄至少5個水深之 PAR 值並換算光衰竭係數後,換算出透光度1%之深度,視為有光層深度,以 Deu 表示。

2. 營養鹽

(1)各類營養鹽符號

本研究中硝酸鹽濃度泛指硝酸鹽加亞硝酸鹽濃度,以[N+N]表示。磷酸鹽濃度以[SRP]表示。葉綠素 a 濃度在本研究中以[T Chl]表示。

(2)硝酸躍層深度(Depth of nitracline, Dni, m):各測站[N+N]為1µM之深度。

3.生物量

(1)生物量符號

[Pro]表示 Prochlorococcus 生物量; [Syn]表示 Synechococcus 生物量; [Eurk] 表示 Picoeukaryotes 生物量。

(2) 0-30 m 累計生物量占 0-200 m 累計生物量之百分比(下標 30/200,%)

三類超微浮游植物 0-30 m 累計生物量占 0-200 m 累計生物量之百分比分别以 [Pro]_{30/200}, [Syn]_{30/200}, [Eurk]_{30/200}表示。為表示三類超微浮游植物,在上水層集中 的程度,計算 0-30 m 累計生物量占 0-200 m 累計生物量之百分比(下標 30/200,%)。 其計算方法,先以內插法,取得 30 m 生物量(若採樣深度有 30 m 則直接用),以積 分方式計算出 0-30 m 累計生物量,此值除上 0-200 m 累計生物量得到比值。此比 值越高,表示生物量分佈越偏在上水層(0-30 m),反之表示生物量主要分佈偏在深 水層(30-200 m)。而為何以 30 m 做為上水層與深水層的界線,係因為南海暖季的 混合層深度約為水深 30 m 之故。

4.各因子之下標符號

(1)表水

下標 S:為代表各生物量或環境因子之表水資料。

(2)混合層平均

下標 Mix:表示各生物量或環境因子之混合層平均值。混合層平均值,先以內 插法取得混合層深度之值。再以積分方式計算0m累計至混合層深度之累計值, 而後除以混合層深度。

(3)0-200 m 平均

下標 200:表示各生物量或環境因子之 0-200 m 平均值。計算方法,以積分方 式計算 0 m 累計至 200 m 之累計值,除以 200 m。

第四節、統計方法

比較不同航次間或不同海域間的生物量或環境因子的差異。或比較添加 FeCl3 培養實驗中實驗組與控制組間(treatment = 4)之差異,以單因子變異數分析 (One-way ANOVA)或 Randomized Block Design,及 Duncan's Multiple Range Test 分 析。比較添加 NH4Cl 培養實驗中實驗組與控制組間(treatment = 2)差異,則以 t test 或 paired-t test 分析之。

野外樣本之生物量與環境因子間之關係;或培養實驗中三類超微浮游植物生物量生長率與環境因子間,或與捕食者數量間之關係;或三類超微浮游植物被捕食率與捕食者數量間之關係,皆透過相關係數(Pearson's correlation coefficient)、簡單直線迴歸(Simple Linear Regression)或複迴歸(Multiple Regression)分析之。

上述統計方法皆用SAS(SAS 9.2 , SAS, USA)或SPSS(SPSS17.0, SPSS, USA) 統計分析軟體進行。

第四章、 結果

研究結果分為自然界樣本採樣以及培養實驗兩部分敘述。自然界樣本採樣以 測站區分為(1)南海與黑潮重點航次測站,(2)西北太平洋的 CR ITOP 測站,以及(3) 採樣其間受內波通過影響的測站三部分;南海與黑潮重點航次共進行四次,其中 三航次在暖季,一航次在冷季,ITOP 航次只進行一次。培養實驗均在重點航次的 測站進行,依實驗類型區分為控溫培養、營養鹽添加培養以及捕食實驗三部分。

第一節、重點航次

重點航次共有四個採樣航次,包括 CR910 (2009 年 8 月 14-20 日)、CR1455 (2010 年 5 月 12-17 日)、CR1487 (2010 年 9 月 4-10 日)及 CR950 (2010 年 12 月 2-11 日)。暖季三個航次(CR910、CR1455 和 CR1487) 之測站平均表水溫均在 27℃以上。冷季航次之 CR950 平均表水溫為 25.9 ± 0.7 °C(圖 3-3)。暖季三航次中, 有二個航次受颱風影響,分別是:CR910 航次是 Morakot 颱風(2009 年 8 月 6-8 日, 八八風災事件,圖 3-4)後 6 天開始進行航次;CR1487 則是在航行前(2010 年 8 月 29 至 9 月 2 日)在東沙海域有 Lionrock 颱風形成,沿著 21°N 左右測站線往東在 S6 站往北轉,行進(圖 3-5),在 CR1487 航行期間則受熱帶低壓壟罩,且該熱帶低壓 在 9 月 9 日形成 Meranti 颱風,颱風形成時之颱風眼位置(約 21°N,119°E,)在正進 行中之陸棚 S2、S1測站(21°N,116.5-117°E)採樣位置東方距離不遠,(圖 3-6)。CR1455 為暖季無颱風影響的航次,CR950 則有東北季風的影響。

(−) · CR910

1. 水文資料

CR910(2009年8月14-20日)採樣前,颱風 Morakot於8月6-8日行經台灣
(圖 3-4A),在台灣造成所謂八八風災,由衛星雲圖觀察,該颱風覆蓋本研究之海 域(圖 3-4B)。

航次於高雄港出發後,隨即以船上表面 SCTD 觀測表水鹽度,鹽度為 30.7,

船經過巴士海峽向東航行至 A 測站 (21°51'N,121°36'E),該測站為黑潮經常流經 之區域(圖 3-1),開始採樣,其 SCTD 鹽度記錄為 33.5,比一般黑潮測站表水鹽度 低(表 4-1)。此航次所有測站表水(5 m)鹽度平均為 33.57±0.40,比未受颱風影響之 暖季航次 CR1455 之表水平均鹽度 34.2±0.3 顯著為低(P<0.01,圖 4-1E),以鹽度 剖面圖(Contour)亦可發現 CR910 的 0-100 m 鹽度(圖 4-2)低於 CR1455 的 0-100 m 的鹽度(圖 4-3)。且透過溫鹽圖(TS 圖),亦可發現黑潮測站(K1、K2、A)上水層溫 度、鹽度均偏離典型黑潮水(圖 4-4A),顯示水體可能受淡水注入影響。

由於此航次 A 測站和 M1 測站,在所有重點航次中只此一次採樣,且其特質 與鄰近測站差異頗大,故比較不同航次間或比較此航次不同海域間生物量與環境 因子時,皆未列入計算。以下就A測站與另外二黑潮測站(K1、K2)平均及 M1 測 站與南海海盆三個測站(S5、S6、S7)平均水文狀況做比較:

(1)A 測站與二個黑潮測站(K1、K2)平均比較

A 測站 SST 為 29.5℃高於黒潮的 29.2±0.1℃。SSS 為 33.6,低於該航次黒潮 平均的 34.2±0.1。D_{mi} 為 33 m,送於該航次黒潮平均的 71±19 m (表 4-1)。

雖然 A 測站[N+N]s 為 6 nM 低於黑潮平均15±8 nM,但其 [N+N]_{Mix} 為 0.16 μM 及 [N+N]₂₀₀ 為 1.95 μM 皆高於黑潮平均([N+N]_{Mix}: 0.02±0.00 μM; [N+N]₂₀₀: 0.65 ± 0.04 μM), D_{ni} 為 56 m 也淺於黑潮平均 D_{ni} 的 89±7 m (表 4-1),可能是淡水注入影響所致。

磷酸鹽濃度不論是[SRP]s 的 20 nM, [SRP]_{Mix} 的 0.05 μM 或[SRP]₂₀₀ 的 0.17 μM 皆高於黑潮平均([SRP]s:18±4 nM, [SRP]_{Mix}:0.02±0.00 μM, [SRP]₂₀₀:0.06±0.00 μM)(表 4-1),可能是淡水注入影響所致。

A 測站的 *Prochlorococcus*,其[Pro]_s 為 9.73×10^4 Cells ml⁻¹, [Pro]_{Mix} 為 11.18×10^4 Cells ml⁻¹, [Pro]₂₀₀ 為 4.63×10^4 Cells ml⁻¹,均低於該航次黑潮測站平均[Pro]_s ($10.87 \pm 3.13 \times 10^4$ Cells ml⁻¹), [Pro]_{Mix}($12.97 \pm 0.17 \times 10^4$ Cells ml⁻¹), [Pro]₂₀₀($7.32 \pm 0.21 \times 10^4$ Cells ml⁻¹) (表 4-1)。

Synechococcus 除[Syn]_{Mix} $(0.01 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ 低於黑潮平均 $(0.30 \pm 0.42 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ 之外,其餘則與 Prochlorococcus 相反。[Syn]_s $(1.11 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ 及 [Syn]₂₀₀ $(0.57 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$,均高於該航次黑潮測站平均之[Syn]_s $(0.68 \pm 0.17 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ 及[Syn]₂₀₀ $(0.30 \pm 0.06 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ (表 4-1)。

Picoeukaryotes 則除[Eurk]_s $(0.04 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ 低於黑潮平均的[Eurk]_s $(0.07 \pm 0.02 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ 外,其餘如[Eurk]_{Mix} $(0.11 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$, [Eurk]₂₀₀ $(0.07 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ 皆高於黑潮平均([Eurk]_{Mix} : $0.06 \pm 0.00 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1}$ 、[Eurk]₂₀₀ : $0.06 \pm 0.00 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1}$ 、[Eurk]₂₀₀ : $0.06 \pm 0.00 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1}$ (表 4-1)。

此結果顯示,可能受淡水注入影響的 A 測站,其營養鹽濃度較黑潮測站平均高, Synechococcus 與 Picoeukaryotes 生物量也較黑潮測站平均高, Prochlorococcus 生物量則與之相反,黑潮測站平均較 A 測站高。

(2) M1 測站與南海海盆測站(S7、S6、S5)平均比較

M1 測站的 SST(29.5 ℃), SSS(33.4), D_{mi}(64 m)均與海盆測站平均相似, SST
 為 29.5±0.1 ℃), SSS(33.2±0.1), D_{mi}(69±12 m)(表 4-1)。

M1 測站的硝酸鹽濃度,不論是[N+N]s 的 9 nM, [N+N]_{Mix} 的 0.03 μM 以及
[N+N]₂₀₀ 的 2.00 μM)均低於南海海盆平均([N+N]_S:15±7 nM, [N+N]_{Mix}:0.23±0.22
μM 及[N+N]₂₀₀: 3.60±1.63 μM (表 4-1)。

磷酸鹽濃度則與硝酸鹽濃度相反,M1 站[SRP]_S 為 38 nM,[SRP]_{Mix} 為 0.08 μM, [SRP]₂₀₀ 為 0.41 μM,均高於南海海盆平均([SRP]_S:26±10 nM,[SRP]_{Mix}:0.04±0.02 μM 及[SRP]₂₀₀:0.25±0.08 μM)(表 4-1)。

M1 測站的 Prochlorococcus, Synechococcus 及 Picoeukaryotes 生物量,皆低於 南海海盆測站平均生物量者。

M1 測站的 Prochlorococcus 生物量不論以[Pro]_s: 10.44 × 10⁴ Cells ml⁻¹,
[Pro]_{Mix}: 11.74 × 10⁴ Cells ml⁻¹, [Pro]₂₀₀: 5.50 × 10⁴ Cells ml⁻¹ 均低於該航次南海海
盆測站平均([Pro]_s: 12.36 ± 2.25 × 10⁴ Cells ml⁻¹, [Pro]_{Mix}: 13.06 ± 0.99 × 10⁴ Cells

 ml^{-1} , $[Pro]_{200}$: 6.19 ± 0.44 × 10⁴ Cells ml^{-1}) (表 4-1) °

Synechococcus 在 M1 測站各類生物量指標[Syn]_S(0.93 × 10⁴ Cells ml⁻¹), [Syn]_{Mix}(0.76 × 10⁴ Cells ml⁻¹), [Syn]₂₀₀: 0.36×10^4 Cells ml⁻¹)均低於南海海盆測站 平均[Syn]_S (0.98 ± 0.05×10^4 Cells ml⁻¹), [Syn]_{Mix}(1.17 ± 0.20×10^4 Cells ml⁻¹), [Syn]₂₀₀ ($0.57 \pm 0.15 \times 10^4$ Cells ml⁻¹) (表 4-1)。

Picoeukaryotes 亦同, M1 測站[Eurk]_S $(0.09 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$, [Eurk]_{Mix} $(0.10 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$, [Eurk]₂₀₀ $(0.12 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ 均低於南海海盆測站平均[Eurk]_S $(0.12 \pm 0.04 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$, [Eurk]_{Mix} $(0.18 \pm 0.04 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ 及[Eurk]₂₀₀ 平均生物量 $(0.16 \pm 0.05 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$ (表 4-1)。

2. 環境因子

(1)混和層深度

扣除測站 A 及 M1 後, CR910 航次之 D_{mi}, 在黑潮平均為 71 ± 19 m; 南海海 盆平均為 69 ± 12 m, 南海陸坡的 S4 站為 39 m, 南海陸棚平均為 58 ± 16 m (表 4-1)。 CR910 所有測站平均為 62 ± 14 m, 顯著低於冷季 CR950 的 93 ± 27 m (P <0.01, 圖 4-5E), 但與其他暖季航次相較 (CR1487:56 ± 24 m; CR1455:43 ± 31 m)差異 不顯著(P > 0.05, 圖 4-5E), 各航次內測站間變異大可能是造成不顯著的原因。以 平均值來看, CR910 為暖季三航次中最深者(圖 4-5E), 可能與航次前 Morakot 颱風 影響有關。

(2)光照強度與有光層深度

為確定兩艘研究船光度計可比較,將航行期間船上記錄之每日平均光照強度 與中央氣象局恆春氣象站全天日照量(Solar radiation),進行簡單迴歸分析,發現正 相關顯著($R^2 = 0.24$, n = 27, P < 0.01,圖 4-6)。以 One-Way ANOVA 及 Duncan's -Multiple Range Test 比較重點四航次間平均光照強度,發現暖季 CR910 的平均光 照強度(1435 ± 89 μ E m⁻² S⁻¹)與 CR1455(1332 ± 261 μ E m⁻² S⁻¹)顯著高於 CR1487(662 ± 327 μE m⁻² S⁻¹)及冷季的 CR950(758 ± 481 μE m⁻² S⁻¹) (P < 0.01, 圖
4-7A)。亦為四重點航次中平均光照強度最高者。

比較此航次不同海域間有光層深度,以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後發現,黑潮 D_{eu} (107.0±0.0 m) 顯著深於南海陸棚平均 D_{eu} (69.0± 11.3 m)(P < 0.05,圖 4-7C),而南海海盆 D_{eu} (91.8±11.2 m)介於兩海域之間,差異 不顯著(圖 4-7C)。陸坡 S4 站的(n = 1)的 D_{eu} 為 63 m。

(3)硝酸鹽(NO₂+NO₃)

CR910 的[N+N]_S (13 ± 5 nM)與 CR1455(16 ± 8 nM)顯著低於 CR1487(36 ± 20 nM) (P < 0.01,圖 4-8F)。此航次各海域[N+N]_S在黑潮平均為 15 ± 8 nM,南海海盆 平均為 15 ± 7 nM,南海陸坡的 S4 站為 12 nM,南海陸棚平均為 11 ± 4 nM (表 4-1), 海域間差異不顯著(圖 4-8A)。

比較不同海域[N+N]_{Mix} 差異,則發現因測站變異大,海域間在統計上差異不 顯著(圖 4-8A)。黑潮平均為 0.02±0.00 μM;南海海盆平均為 0.23±0.22 μM;南海 陸坡的 S4 站為 0.01 μM;南海陸棚平均為 0.24±0.24 μM (表 4-1)。

比較不同海域[N+N]₂₀₀,以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,發現南海陸棚(6.64 ± 2.22 μM)顯著(P < 0.05,圖 4-8A)高於黑潮(0.65 ± 0.04 μM),而南海海盆(3.60 ± 1.63 μM)則介於兩者之間差異不顯著,南海陸坡的 S4 站 為 7.86 μM (表 4-1)。

以硝酸鹽躍層深度觀察,則發現亦因海域內測站間變異大,海域之間差異不 顯著(圖 4-9A)。黑潮平均為 89±7m;南海海盆平均為 49±30m;南海陸坡的 S4 站為 40m;南海陸棚平均為 42±21 m(表 4-1)。

(4)磷酸鹽濃度

此航次[SRP]s在海域間差異不顯著 (圖 4-10A)。黑潮平均為 18±4 nM;南海海盆平均為 26±10 nM;南海陸坡的 S4 站為 33 nM;南海陸棚平均為 20±6 nM (表

4-1) •

比較此航次[SRP]_{Mix}在海域間差異,發現海域之間統計上差異不顯著(圖 4-10A)。黑潮平均為 0.02±0.00 μM;南海海盆平均為 0.04±0.02 μM;南海陸坡的 S4 站為 0.03 μM;南海陸棚平均為 0.05±0.02 μM(表 4-1)。

比較此航次[SRP]₂₀₀ 在海域間差異時,經過 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,發現南海陸棚(0.45±0.03 μM)顯著高於南海海盆(0.25±0.08 μM) (P < 0.01,圖 4-10A),而黑潮(0.06±0.00 μM)則在海域間顯著最低者(P < 0.01,圖 4-10A)。南海陸坡的 S4 站為 0.63 μM (表 4-1)。

3.生物量

(1)Prochlorococcus

比較 *Prochlorococcus* 生物量在海域間差異,則發現[Pro]s 在不同海域間統計 上差異不顯著(圖 4-11A)黑潮平均為 10.87 ± 3.13 × 10⁴ Cells ml⁻¹; 南海海盆平均為 12.36 ± 2.25 × 10⁴ Cells ml⁻¹; 南海陸坡的 S4 站為 15.27 × 10⁴ Cells ml⁻¹; 南海陸棚 平均為 10.63 ± 7.81 × 10⁴ Cells ml⁻¹ (表 4-1)。

以[Pro]_{Mix}比較海域之間在統計上差異不顯著(圖 4-11A)。黑潮為 $12.97 \pm 0.17 \times 10^4$ Cells ml⁻¹; 南海海盆平均為 $13.06 \pm 0.99 \times 10^4$ Cells ml⁻¹; 南海陸坡的 S4 站為 16.08×10^4 Cells ml⁻¹; 南海陸棚平均為 $7.30 \pm 4.79 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-1)。

比較[Pro]₂₀₀ 在此航次四海域間差異並以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,發現南海陸棚(2.97 ± 2.10 × 10⁴ Cells ml⁻¹)顯著低於南海海盆(6.19 ± 0.44 × 10⁴ Cells ml⁻¹)以及黑潮(7.32 ± 0.21 × 10⁴ Cells ml⁻¹) (P < 0.05, 圖 4-11A),南海海盆與黑潮之間差異不顯著(圖 4-11A),南海陸坡的 S4 測站則為 6.54 × 10⁴ Cells ml⁻¹(表 4-1)。

比較該航次不同海域之[Pro]_{30/200} (圖 4-12),可發現黑潮平均為 29.4 ± 8.1 %、 南海海盆平均 30.9 ± 3.3 %及南海陸坡 S4 站的 34.63 %皆低於南海陸棚的 40.2 ± 13.6 %。顯示 Prochlorococcus 在黑潮及南海海盆、陸坡之垂直分佈比其在南海陸

(2)Synechococcus

Synechococcus 生物量,不論以[Syn]_S、[Syn]_{Mix}或[Syn]₂₀₀觀察,皆差異不顯著,可能因陸棚海域測站間變異大之故(圖 4-13A)。

[Syn]s 在黑潮為 0.68 ± 0.17 × 10⁴ Cells ml⁻¹; 南海海盆為 0.98 ± 0.05 × 10⁴ Cells ml⁻¹; 南海陸坡的 S4 站為 1.13 × 10⁴ Cells ml⁻¹; 南海陸棚為 1.11± 0.34 × 10⁴ Cells ml⁻¹ (表 4-1)。

[Syn]_{Mix}則在黒潮為 $0.30 \pm 0.42 \times 10^4$ Cells ml⁻¹; 南海海盆為 $1.17 \pm 0.20 \times 10^4$ Cells ml⁻¹; 南海陸坡的 S4 站為 1.06×10^4 Cells ml⁻¹; 南海陸棚為 $1.16 \pm 0.42 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-1)。

[Syn]₂₀₀則在黒潮為 $0.30 \pm 0.06 \times 10^4$ Cells ml⁻¹; 南海海盆為 $0.57 \pm 0.15 \times 10^4$ Cells ml⁻¹; 南海陸坡的 S4 站為 0.41×10^4 Cells ml⁻¹; 南海陸棚平均為 $0.45 \pm 0.10 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-1)。

(3) Picoeukaryotes

Picoeukaryotes 與 Synechococcus 相似,因海域內可能受測站間變異大影響,海域間 Picoeukaryotes 生物量差異不顯著(圖 4-11A)。

[Eurk]s 在黑潮為 $0.07 \pm 0.02 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, 南海淦為 $0.12 \pm 0.04 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, 南海陸坡的 S4 站為 0.11×10^4 Cells ml⁻¹, 南海陸棚平均為 $0.06 \pm 0.06 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-1)。

以[Eurk]_{Mix}觀察,黑潮平均為 $0.06 \pm 0.00 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海海盆平均為 $0.18 \pm 0.04 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸坡的 S4 站為 0.12×10^4 Cells ml⁻¹,南海陸棚平均為 $0.12 \pm 0.08 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-1)。

以[Eurk]₂₀₀ 觀察,黑潮為 $0.06 \pm 0.00 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海海盆平均為 $0.16 \pm 0.05 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸坡的 S4 站為 0.14×10^4 Cells ml⁻¹,南海陸棚為 $0.07 \pm 0.05 \times 10^4$ Cells ml⁻¹

 0.05×10^4 Cells ml⁻¹ (表 4-1) •

3. 生物量與環境因子

將 Prochlorococcus 生物量與各類環環境指標進行相關分析後發現, [Pro]s 與 [Eurk]s 有顯著正相關(r=0.78, n=8, P<0.05, 表 4-2A),與其他表水因子皆無顯 著相關。而[Pro]_{Mix}與[T Chl]_{Mix}有顯著負相關(r=-0.93, n=8, P<0.01,表 4-2C), 與其他混合層平均因子皆無顯著相關。[Pro]₂₀₀與[N+N]₂₀₀有顯著負相關(r=-0.72, n=8, P<0.05,表 4-2B),與其他混合層平均因子皆無顯著相關。

Synechococcus 生物量與其他因子之間關係,僅以[Syn]_{Mix}與營養鹽(硝酸鹽與 磷酸鹽)有顯著。包括[Syn]_{Mix}與[N+N]_{Mix}有顯著正相關(r=0.71, n=8, P<0.05, 表 4-2C)與[SRP]_{Mix}亦有顯著正相關(r=0.82, n=8, P<0.05, 表 4-2C), 與 D_{ni}(r=-0.76, n=8, P<0.05, 表 4-2C)及SSS(r=-0.74, n=8, P<0.05, 表 4-2C)均呈顯著負相關,而[N+N]_{Mix}與[SRP]_{Mix}有極顯著正相關(r=0.96, n=8, P<0.01,表 4-2C)。即營養鹽濃度越高表水鹽度越低處,有越高的 Synechococcus 生物量。而[Syn]_S與表水環境因子皆無關係,[Syn]₂₀₀亦與 0-200 m 平均環境因子 皆無關係。

各類指標之 Picoeukaryotes 生物量與營養鹽間均無關(表 4-2)。僅[Eurk]₂₀₀與 SSS 呈顯著負相關(r=-0.77, n=8, P<0.05, 表 4-2B)。

(ニ)、CR1455

1.水文資料

CR1455(2010 年 5 月 12-17 日)航次,時值春末夏初由 One-Way ANOVA 及
Duncan's Multiple Range Test 分析後發現,為三暖季航次中表水溫(SST)顯著最低
(27.8±0.6 ℃)的航次(CR910:29.3±0.2 ℃;CR1487:29.3±0.4 ℃) (P<0.01,
圖 3-3)。該航次航行期間(農曆 3 月 29 日至 4 月 4 日)採樣時恰逢大潮,於南海陸
棚(S1、S2 測站)的 S1 站(圖 3-13)及 S2 站(圖 3-14)發現明顯內波。除此之外透過該

航次鹽度剖面(Contour,圖 4-3)於南海陸坡 S4 站,發現湧升跡象,S4 站的 SST 為 27.2 ℃低於鄰近 S3 站的 27.6 ℃及 S6 站的 28.1 ℃,且 S4 站的 SSS 為 34.2 亦高 於 S6 站的 33.8(表 4-3),以 S4 站溫鹽曲線圖觀察,亦發現其溫鹽曲線圖偏離典型 南海(圖 4-4B)。

(1)混合層深度

此航次各海域內不同測站間混合層深度變異大,故海域之間差異不顯著(圖 4-5B),在黑潮平均為 53 ± 27 m,南海海盆平均為 26 ± 4 m,南海陸棚平均為 37 ± 25 m,南海陸坡 S3 站與 S4 站差異大,因 S4 站有湧升現象,其 D_{mi}為 103 m 是該 航次 D_{mi}最深者,S3 站為 11 m。南海陸棚兩測站(S2、S1)則因內波通過,其 D_{mi} 變異大, S2 站 D_{mi}為 19 m,S1 站為 54 m (表 4-3)。

雖然暖季三航次間,受航次內測站間變異大,使 D_{mi} 差異不顯著(圖 4-5E),但 此航次的 D_{mi} 平均值(43.1±31.3 m)為暖季三航次(CR910:62.8±15.7 m; CR1487: 55.9±24.4 m)中最小者(圖 4-5E)。此航次航行前及航行中均無任何氣象事件發生, 可能是造成 D_{mi} 相對較淺的原因。測站間因湧升和內波,使航次內之變異大。

(2)光照強度與有光層深度

航行期間各測站之平均光照強度(圖 4-7A)已顯示, CR1455 (1332 ± 261 μE S⁻¹ m⁻²)與 CR910(1435 ± 89 μE S⁻¹ m⁻²)光照強度為四航次中較強的兩航次。

比較該航次不同海域間有光層深度,則因樣本資料少,海域間差異不顯著 (P= 0.053,圖 4-7D)。黑潮 D_{eu}為 142 m,南海海盆為 77 m,南海陸坡平均 133±8 m, 南海陸棚為 75±12 m。

(3)硝酸鹽(NO₂+NO₃)

此航次各海域[N+N]s在海域間統計上差異不顯著(圖4-8B),在黑潮平均為16±11 nM;南海海盆平均為16±11 nM;南海陸坡平均為9±6 nM;南海陸棚平均為

23 ± 3 nM (表 4-3)。南海陸坡 S4 站受湧升影響, S4 的[N+N]s(13 nM),高於同海域 在陸坡的 S3 站的 5 nM。

南海陸坡區 S4 站,因為湧升呈現 D_{mi}較深(103 m),故其[N+N]_{Mix}較高(2.723 μM),致測站間變異大。故以[N+N]_{Mix}比較該航次海域間差異,在統計上差異不顯 著 (圖 4-8B)。其中黑潮[N+N]_{Mix}為 0.02 ± 0.00 μM;南海海盆平均為 0.01 ± 0.00 μM;南海陸坡平均為 1.37 ± 1.92 μM;南海陸棚平均為 0.09 ± 0.03 μM (表 4-3)。

當比較不同海域間 $[N+N]_{200}$ 時,因S3站僅採至127m,扣除後,陸坡只剩S4站,故先將陸坡測站資料扣除,以One-Way ANOVA及Duncan's Multiple Range Test 分析,發現黑潮 $[N+N]_{200}$ (0.34±0.37 μ M)顯著低於南海海盆(7.38±0.42 μ M)以及南海陸棚(7.64±1.00 μ M) (P<0.01,圖4-8B)。南海陸坡的S4站為5.03 μ M(表4-3)。此結果表示,黑潮 $[N+N]_{200}$ 低遠低於南海各海域。

以硝酸鹽躍層深度觀察,則發現黑潮 (134 ± 21 m)顯著深於南海海盆(55 ± 7 m)、南海陸坡(58 ± 24 m)及南海陸棚(40 ± 23 m) (P < 0.05,圖 4-9B)。

(4)磷酸鹽

此航次各海域[SRP]_S因海域內測站間變異大,致統計上差異無不顯著(圖 4-10B)。在黑潮為 55±3 μnM;南海海盆為 29±2 nM;南海陸坡為 31±6 nM;南 海陸棚為 30±4 nM(表 4-3)。

比較[SRP]_{Mix},海域間呈現差異不顯著(圖 4-10B),黑潮平均為 0.06±0.03 μM, 南海海盆平均為 0.04±0.00 μM,南海陸坡平均為 0.14±0.15 μM,南海陸棚平均 為 0.05±0.00 μM(表 4-3)。而無顯著差異之原因,可能為南海陸坡區 S4 站混合層 深度特別深(103 m),致其[SRP]_{Mix}特別高(0.24 μM),導致測站間變異大(圖 4-10B)。

[SRP]₂₀₀,在黑潮(0.07±0.02 μM)顯著最低(P<0.01,圖 4-10B),南海陸棚(0.52 ± 0.08 μM)顯著最高(P<0.01,圖 4-10B),南海海盆(0.47±0.01 μM)介於兩者之間
(P<0.01,圖 4-10B),陸坡測站的 S3 站僅採 127 m,扣除後陸坡測站僅剩 S4 站的
[SRP]₂₀₀(0.38 μM)(表 4-3),故以上為陸坡測站扣除後以 One-Way ANOVA 及

Duncan's Multiple Range Test 分析之結果。

2.生物量

(1) Prochlorococcus

 $[Pro]_s 在海域間差異不顯著(P = 0.084, 圖 4-11B)。黑潮為 7.48 \pm 2.15 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, 南海海盆平均為 $10.36 \pm 2.81 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, 南海陸坡平均為 $18.30 \pm 3.96 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, 南海陸棚平均為 $14.06 \pm 2.99 \times 10^4$ Cells ml⁻¹(表 4-3)。海域之間受測 站間變異大, 在統計上無顯著差異。

比較四海域[Pro]_{Mix},在統計上亦是差異不顯著,可能因海域內測站間變異大之故(圖 4-11B)。黑潮為 $8.44 \pm 2.50 \times 10^4$ Cells ml⁻¹;南海海盆為 $11.82 \pm 4.33 \times 10^4$ Cells ml⁻¹;南海陸坡為 $14.75 \pm 8.98 \times 10^4$ Cells ml⁻¹;南海陸棚為 $15.02 \pm 5.73 \times 10^4$ Cells ml⁻¹(表 4-3)。

比較四海域[Pro]₂₀₀,在統計上差異亦不顯著。可能因海域內測站間變異大之 故(圖 4-11B)。黑潮為 $6.97 \pm 0.55 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海海盆為 $7.19 \pm 0.19 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸坡的 S4 測站為 4.90×10^4 Cells ml⁻¹,南海陸棚為 $5.47 \pm 3.82 \times 10^4$ Cells ml⁻¹(表 4-3)。

比較不同海域之[Pro]_{30/200},可發現黑潮(14.95 ± 7.42 %)與南海海盆(27.77 ± 8.00 %)皆低於南海陸坡 S4 站(40.16 %)及南海陸棚(42.79 ± 12.95 %)(圖 4-14)。

(2)*Synechococcus*

 $[Syn]_{s}$,在海域間差異不顯著(圖 4-13B),可能受測站間變異大所致。黑潮為 0.37 ± 0.14 × 10⁴ Cells ml⁻¹,南海海盆為 0.75 ± 0.05 × 10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 1.83 ± 0.16 × 10⁴ Cells ml⁻¹;南海陸棚平均為 1.63 ± 1.10 × 10⁴ Cells ml⁻¹(表 4-3)。其 中陸棚有內波通過之 S2 測站的 $[Syn]_{s}(2.41 \times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$,為該航次中最高者。

以[Syn]_{Mix}觀察,海域間在統計上差異不顯著(圖 4-13B) 可能因海域內測站間 變異大所致。黑潮為 $0.25 \pm 0.35 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海海盆為 $0.83 \pm 0.09 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, 南海陸坡為 1.31 ± 0.77 × 10⁴ Cells ml⁻¹; 南海陸棚為 1.81 ± 0.97 × 10⁴ Cells ml⁻¹ Cells ml⁻¹ (表 4-3)。其中陸棚 S2 內波測站混合層平均 Synechococcus 生物量 2.50 × 10⁴ Cells ml⁻¹ 為該航次中最高。

以[Syn]₂₀₀ 觀察併以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析(扣 除陸坡測站後),發現黑潮($0.21 \pm 0.02 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)顯著低於南海海盆平均的 $0.63 \pm 0.03 \times 10^4$ Cells ml⁻¹及南海陸棚平均的 $0.49 \pm 0.09 \times 10^4$ Cells ml⁻¹(P < 0.05,圖 4-13B),而南海陸坡的 S4 站為 0.40×10^4 Cells ml⁻¹(表 4-3)。

觀察[Syn]_{30/200},可發現在湧升的 S4 測站(58.93%)及內波測站的 S2 測站(60.56%)比例特別高,顯示此兩測站 Synechococcus 生物量主要分布在上水層 30 m 以淺。 在黑潮此比例為 20.50 ± 12.26%,南海海盆平均為 26.02 ± 10.57%,皆低於南海陸 坡和陸棚(平均 46.13 ± 20.40%),即黑潮及南海海盆之 Synechococcus 分佈在較深 水層(圖 4-15)。

(3)Picoeukaryotes

$$\label{eq:entropy} \begin{split} & [Eurk]_S \end{tabular} \\ & [Eurk]_S \end{tabular}$$

以[Eurk]_{Mix} 觀察並以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析 後,發現南海陸棚($0.41 \pm 0.07 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)顯著最高(P < 0.05,圖 4-16B),而黑 潮($0.14 \pm 0.02 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)、南海陸盆($0.14 \pm 0.01 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)及陸坡($0.22 \pm 0.09 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)間無顯著差異(表 4-3)。

以[Eurk]₂₀₀ 觀察,海域間在統計上差異不顯著(圖 4-16B),可能因海域內測站 間變異大所致。黑潮為 $0.13 \pm 0.02 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海海盆為 $0.26 \pm 0.23 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸坡的 S4 站為 0.17×10^4 Cells ml⁻¹,南海陸棚平均為 $0.25 \pm 0.07 \times 10^4$ Cells ml⁻¹(表 4-3)。 3. 生物量與環境因子

CR1455 航次三類超微浮游植物生物量與各類環環境指標進行相關分析,發現 Prochlorococcus 不論以[Pro]s, [Pro]_{Mix}, [Pro]₂₀₀ 均與環境因子間皆無顯著相關(表 4-4)。

將 Synechococcus 生物量與環境因子進行相關分析,發現[Syn]s與 SST 有顯著 負相關 (r=-0.84, n=8, P<0.01,表4-4A),與[T Chl]s 有顯著正相關 (r=0.88, n=8, P<0.01,表4-4A)。而[Syn]_{Mix}與 SST 有顯著負相關 (r=-0.74, n=8, P <0.01,表4-4A)。[Syn]₂₀₀與[N+N]₂₀₀有顯著正相關 (r=0.93, n=7, P<0.01, 表4-4C),與 D_{ni}有顯著負相關 (r=-0.81, n=7, P<0.01,表4-4C)以及其與[SRP]₂₀₀ 亦有顯著正相關 (r=0.89, n=7, P<0.01,表4-4C),而[N+N]₂₀₀與[SRP]₂₀₀間 有極顯著正相關 (r=0.99, n=7, P<0.01,表4-4C)。表示[SRP]₂₀₀越高時,有 越高的[Syn]₂₀₀。

[Eurk]s與SST有顯著負相關(r=-0.71,n=,P<0.05,表4-4A),與[T Chl]s 有顯著正相關(r=0.72,n=8,P<0.05,表4-4A),[Eurk]_{Mix}亦與SST 間有顯 著負相關(r=-0.81,n=8,P<0.05,表4-4B)。[Eurk]s與[T Chl]s有顯著正相 關(r=0.72,n=8,P<0.05,表4-4A),[Eurk]_{Mix}亦與[T Chl]_{Mix}間有顯著正相 關(r=0.72,n=8,P<0.05,表4-4B)。而[Eurk]_{Mix}與混合層平均指標之環境 因子皆無顯著相關(表4-4C)。

(三)、CR1487

1.水文資料

CR1487(8月27日至9月2日)採樣前,有Lionrock 颱風形成,並於8月30-31 日颱風眼沿21°N 往東在119.5°E(約S6站)往北轉,於9月2日侵襲福建沿海(圖 3-5)。此航次航行期間也受熱帶低氣壓壟罩,該熱帶低氣壓於9月9日在巴士海峽 海域(約21°N,119.5°E,S6測站西北方)形成Meranti 颱風,颱風形成之時颱風眼 位置約在 S5、S6 間離正採樣進行中之陸棚測站(約 21°N, 116.5-117°E)採樣位置不 遠(圖 3-6)。

此航次 SST 為 29.3 ± 0.4 ℃與 CR910 的 SST (29.4 ± 0.2 ℃)差異不顯著, 兩者 皆顯著高於同為暖季的 CR1455(27.8 ± 0.6 ℃) (P < 0.01, 圖 3-3)。

此航次 SSS(33.6 ± 0.3)與 CR910(33.5 ± 0.4)差異不顯著,皆顯著低於暖季的 CR1455(34.2 ± 0.3)與冷季的 CR950(34.0 ± 0.3) (P < 0.01,圖 4-1E)。比較此航次不 同海域間 SSS 差異,在扣除黑潮測站(n = 1)後,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,發現南海陸棚測站 SSS(33.4 ± 0.0)顯著低於南海海盆 (33.5 ± 0.0) 和南海陸坡(33.5 ± 0.0) (南海海盆和南海陸坡之間差異不顯著)(P > 0.05,圖 4-1C)。黑潮 SSS 為 34.43 為該航次最高。若觀察鹽度剖面圖,亦可發現 鹽度由黑潮往陸棚遞減(圖 4-17)。

(1)混合層深度

比較此航次不同海域間混合層深度,在統計上差異不顯(圖 4-5C)。黑潮為 52 m,南海海盆為 80 ± 22 m,南海陸坡為 43 ± 3 m,南海陸棚為 35 ± 13 m (表 4-5)。 雖然受航次內測站間變異大,使暖季三航次間 D_{mi} 差異不顯著(P > 0.05,圖 4-5E), 但以平均值觀察,CR1487 航次 $D_{mi}(56 \pm 24 \text{ m})$ 高於無颱風的 CR1455(43 ± 31 m), 而僅次於 CR910 航次的 $D_{mi}(62 \pm 14 \text{ m})$ 。

(2) 光照強度與有光層深度

比較暖季三航次間平均光照強度。發現 CR1487(662 ± 327 µE m⁻² S⁻¹)為暖季三 航次中顯著最低者(P < 0.01,圖 4-7A),而暖季的 CR910 (1435 ± 89 µE m⁻² S⁻¹)與 CR1455(1332 ± 261 µE m⁻² S⁻¹),兩者差異不顯著。CR1487 與冷季 CR950(758 ± 481µE m⁻² S⁻¹)差異不顯著(圖 4-7A),可能與該航次航行期間有熱帶低壓壟罩有關。 而該航次之有光層深度,受限於到站採樣時間,僅量測到 S6 站的 93 m 與 S2 站的 80 m。 (3)硝酸鹽(NO₂+NO₃)

比較航次內不同海域之間[N+N]s,在統計上差異不顯著(圖 4-8C)。黑潮為 15 nM,南海海盆為 34±11 nM,南海陸坡為 23±16 nM,南海陸棚為 63±21 nM (表 4-5)。

比較此航次不同海域間[N+N]_{Mix},結果發現統計上差異不顯著(圖 4-8C),可能 受海域內測站間變異大影響所致。此航次黑潮的[N+N]_{Mix}為 0.01 μM,南海海盆為 0.05±0.01 μM,南海陸坡為 0.02±0.01 μM;南海陸棚為 0.08±0.04 μM(表 4-5)。

比較 $[N+N]_{200}$ 在海域間之差異,在扣除黑潮測站(n = 1)後,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,發現南海陸棚測站的 $[N+N]_{200}$ (7.83±0.31 μ M)顯著最高,南海陸坡(4.99±0.63 μ M)次之,南海海盆(2.56±1.02 μ M)顯著最低 (P<0.01,圖 4-5C)。而黑潮平均為 0.26 μ M,為該航次最低。由上述結果已知該航 次之前,該海域有 Lionrock 颱風影響,且根據 SSS 資料已發現,南海陸棚測站 SSS 為該航次中顯著最低者(圖 4-1C)。檢視透過該航次溫、鹽度剖面圖 (Contour,圖 4-17)亦呈現鹽度梯度由陸棚 S1 測站往海盆 S7 測站遞增。 $[N+N]_{200}$ 由南海陸棚往 南海陸坡、南海海盆、黑潮顯著遞減,可能是與颱風後,珠江淡水輸至南海有關, $[N+N]_{200}$ 與 SSS 呈顯著負相關(r = -0.72, n = 8, P < 0.05, 表 4-6)。

比較此航次不同海域間硝酸躍層深度,在扣除黑潮測站(n = 1)後,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,結果發現南海陸棚 $(44 \pm 11 \text{ m})$ 顯 著淺於南海海盆 $(103 \pm 22 \text{ m})$ (P < 0.01,圖 4-9C),而南海陸坡 $(65 \pm 1 \text{ m})$ 則在介於 兩者間與兩者皆差異不顯著(P > 0.05,圖 4-9C)。黑潮硝酸躍層深度為 181 m(表 4-5)。另外 SST 與 D_{ni} 間有顯著正相關(r = 0.78, n = 8, P < 0.05, 表 4-6A), SSS與 D_{ni} 間亦有顯著正相關(r = 0.88, n = 8, P < 0.01, 表 4-6A),透過該航次剖面圖 (Contour,圖 4-17),可發現 1 μ M 的等 [N+N]線亦由陸棚往黑潮遞深,皆可顯示該 航次受颱風影響,淡水由陸棚往海盆方向侵入。 (4)磷酸鹽

比較該航次不同海域間[SRP]s,發現海域之間在統計上並無顯著差異(圖 4-10C)。黑潮為27 nM,南海海盆為26±8 nM,南海陸坡為18±1 nM,南海陸棚 為17±1 nM(表 4-5)。

比較該航次不同海域間 $[SRP]_{Mix}$,發現海域之間在統計上並差異不顯著(圖 4-10C)。黑潮為 0.03 μ M,南海海盆為 0.03 \pm 0.01 μ M,南海陸坡為 0.02 \pm 0.00 μ M; 南海陸棚為 0.03 \pm 0.00 μ M (表 4-5)。

以[SRP]₂₀₀比較海域間之差異, 在扣除黑潮測站(n = 1)後, 經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,發現南海陸棚 $(0.42 \pm 0.02 \mu M)$ 顯著高於南 海海盆 $(0.18 \pm 0.10 \mu M)$ (P < 0.05,圖 4-10C),而南海陸坡 $(0.33 \pm 0.04 \mu M)$ 則介於兩 者之間與兩者差異皆不顯著(P > 0.05,圖 4-10C)。而黑潮平均為 0.07 μM ,為該航 次最低(表 4-5)。

2.生物量

(1) *Prochlorococcus*

比較不同海域[Pro]s 差異,則發現因海域內測站間變異大,海域間在統計上差 異不顯著 (圖 4-11C)。黑潮為 2.99×10^4 Cells ml⁻¹,南海海盆為 $16.91 \pm 5.12 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 $7.83 \pm 0.63 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸棚為 $6.71 \pm 1.60 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-5)。

比較不同海域[Pro]_{Mix} 差異,則發現因海域內測站間變異大,統計上差異不顯 著(圖 4-11C)。黑潮為 2.80×10^4 Cells ml⁻¹,南海海盆為 $16.68 \pm 5.33 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, 南海陸坡為 $8.09 \pm 0.46 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸棚為 $13.06 \pm 2.05 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-5)。

比較該航次四海域[Pro]₂₀₀,在扣除黑潮測站(n = 1)後,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,發現南海海盆($8.95 \pm 1.43 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)顯 著高於南海陸坡($4.23 \pm 0.56 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)以及南海陸棚($4.36 \pm 2.15 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)南海陸坡與南海陸棚差異不顯著(P>0.05,圖 4-11C)。另黑潮的 0-200 m 平均 *Prochlorococcus* 生物量為 4.48×10⁴ Cells ml⁻¹(表 4-5)。

以上發現本航次 Prochlorococcus 生物量在黑潮較南海低。計算[Pro]_{30/200},發現黑潮 8.94%,低於南海海盆(28.23±4.47%)、南海陸坡(27.66±2.15%)及南海陸 棚(24.29±1.64%),即本航次在黑潮之 Prochlorococcus 不僅生物量低於南海,且 分佈遠深於南海各海域(圖 4-18)。

(2)*Synechococcus*

比較不同海域[Syn]s 差異,則發現因海域內測站間變異大,統計上差異不顯著 (圖 4-13C)。黑潮為 0.15×10^4 Cells ml⁻¹,南海海盆為 $1.20 \pm 0.29 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, 南海陸坡為 $1.42 \pm 0.57 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸棚為 $1.38 \pm 0.63 \times 10^4$ Cells ml⁻¹(表 4-5)。其中陸棚 S2 測站的[Syn]s 為該航次中最高者(1.82×10^4 Cells ml⁻¹),而黑潮 [Syn]s 為該航次最低者(表 4-5)。

比較不同海域[Syn]_{Mix} 觀察,則發現扣除黑潮測站(n = 1)後,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析發現,南海陸棚($2.18 \pm 0.34 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)顯著高於南海陸坡($1.21 \pm 0.28 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)及南海海盆($1.08 \pm 0.17 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)(P < 0.05,圖 4-13C),南海陸坡與南海海盆兩者間差異不顯著(P > 0.05,圖 4-13C)。黑潮為 0.13×10^4 Cells ml⁻¹,為該航次中最低者(表 4-5)。

比較不同海域[Syn]₂₀₀ 差異,則發現因海域內測站間變異大,統計上差異不顯 著(圖 4-13C)。黑潮為 0.09×10^4 Cells ml⁻¹,南海海盆為 $0.57 \pm 0.09 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, 南海陸坡為 $0.42 \pm 0.07 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸棚為 $0.50 \pm 0.23 \times 10^4$ Cells ml⁻¹(表 4-5)。黑潮測站偏低。

計算[Syn]_{30/200} (圖 4-19)並比較海域間之差異,結果發現統計上差異不顯著, 可能受海域內測站間變異大所致,其在南海海盆為 31.62 ± 11.48 %,南海陸坡為 31.62 ± 7.25%,南海陸坡為 44.93 ± 6.41 %,黑潮為 22.25 %。雖然統計上差異不顯 著,但可發現[Syn]_{30/200} 由黑潮往南海陸棚遞增之趨勢,即越靠近南海陸棚 Synechococcus 生物越分佈越趨近水表,相對的越往黑潮,其生物量分佈在越深水層。

(3). Picoeukaryotes

比較不同海域[Eurk]s,統計上差異不顯著(圖 4-16C)。黑潮為 0.10×10^4 Cells ml⁻¹,南海海盆為 $0.10 \pm 0.02 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 $0.11 \pm 0.01 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸棚為 $0.11 \pm 0.01 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-5)。

比較不同海域間[Eurk]_{Mix},在扣除黑潮的 K2 測站(n = 1)後,以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,發現南海陸棚($0.30 \pm 0.03 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)顯著高於南海陸盆($0.16 \pm 0.01 \times 10^4$ Cells ml⁻¹及及南海陸坡($0.12 \pm 0.02 \times 10^4$ Cells ml⁻¹) (P < 0.01,圖 4-16C),南海陸盆與陸坡兩者間差異不顯著(P > 0.05,圖 4-16C)。而黑潮的 0.08 × 10⁴ Cells ml⁻¹ 為該航次中最低者(表 4-5)。

比較不同海域[Eurk]₂₀₀,統計上差異不顯著(圖 4-11C),可能受海域內測站間 變異大所致。黑潮為 0.08×10^4 Cells ml⁻¹ 為最低,南海海盆為 $0.18 \pm 0.03 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 $0.12 \pm 0.02 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸棚為 $0.23 \pm 0.04 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-5)。

3.生物量與環境因子

若將本航次三類超微浮游植物與各類環環境指標進行相關分析後發現,不論 是表水、混和層平均或 0-200 m 平均指標[Pro]與[T Chl]之間皆有極顯著正相關。 其中[Pro]s 與[T Chl]s(r = 0.98, n = 8, P < 0.01, 表 4-6A), [Pro]_{Mix} 與[T Chl]_{Mix}(r = 0.98, n = 8, P < 0.01, 表 4-6B), [Pro]₂₀₀與[T Chl]₂₀₀(r = 0.86, n = 8, P < 0.01, 表 4-6C), 由該航次垂直剖面圖,亦可發現[Pro]與[T Chl]分佈相似(圖 4-17)。另 外[Pro]₂₀₀與 D_{mi}亦有顯著正相關(r = 0.73, n = 8, P < 0.01, 表 4-6C)。

[Syn]s與SST有顯著負相關(r = -0.74, n = 8, P < 0.05, 表 4-6A),與SSS 有顯著負相關(r = -0.73, n = 8, P < 0.05, 表 4-6A),然而SST與D_{ni}間有顯著 正相關(r=0.78,n=8,P<0.05,表4-6A),SSS與D_{ni}間亦有顯著正相關(r=0.88,n=8,P<0.01,表4-6A),故[Syn]s與SST以及SSS之間有顯著關係,可 能是D_{ni}間接影響。

$$\begin{split} & [Syn]_{Mix} \, \underline{\mu} [N+N]_{Mix} \, f \, \underline{M} \, \check{F} \, \underline{m} \, \check{F} \, \underline{m} \, \check{F} \, \underline{m} \, \check{R} \, \underline{n} \, \underline{n} = 8 \, , P < 0.05 \, , \, \underline{n} = 8 \, , P < 0.01 \, , \, \underline{n} = 8 \, , P < 0.01 \, , \, \underline{n} \,$$

$$\begin{split} & [Syn]_{200} \, \wp \, SST \, f \, \mbox{$\widehat{\mbox{$\widehat{\mbox{\max}}}$} \\ & f \, \mbox{$\widehat{\mbox{\max}}$} \, \mbox{$\widehat{\mbox{\max}}$$

[Eurk]s與[SRP]s有顯著負相關(r=-0.75, n=8, P<0.05, 表 4-6A)。

$$\begin{split} [Eurk]_{Mix} 與 D_{ni} 有顯著負相關(r = -0.72, n = 8, P < 0.05, 表 4-6B), 與[N+N]_{Mix} \\ 有顯著正相關(r = 0.71, n = 8, P < 0.05, 表 4-6B)。而[Eurk]_{Mix}與 SST 有顯著 \\ 負相關(r = -0.74, n = 8, P < 0.05, 表 4-6B), 但 SST 與 D_{ni} 有顯著正相關(r = 0.78, n = 8, P < 0.05, 表 4-6B)。故[Eurk]_{Mix}與 SST 之關係,亦可能是 D_{ni} 間接 影響。 \end{split}$$

而[Eurk]₂₀₀與SST 有顯著負相關(r=-0.82, n=8, P<0.05, 表 4-6C),但 SST與D_{ni}有顯著正相關(r=0.78, n=8, P<0.05, 表 4-6C),故[Eurk]₂₀₀與SST 之關係,亦可能是D_{ni}間接影響。

上述結果皆發現, Synechococcus 與 Picoeukaryotes 生物量皆與 D_{ni}有顯著負相關(表 4-6),而 SST 與 SSS亦皆與 D_{ni}有顯著正相關(表 4-6),根據該航次剖面圖 (Contour,圖 4-17),又發現 SST、SSS與 D_{ni}之關係可能為 Lionrock 颱風後珠

江淡水注入影響。故 Synechococcus 與 Picoeukaryotes 在此航次中的陸棚海域有較高的生物量,可能為 Lionrock 颱風後,珠江淡水夾帶較高的硝酸鹽影響有關。

(四)、CR950

1.水文資料

CR950 為本研究中唯一的冷季航次,故其所有測站平均 SST 為 26.0±0.8 ℃, 為四航次中顯著最低(P < 0.01,圖 3-3)。CR950 的 SSS(33.9 ± 0.4)顯著高於 CR910(33.6±0.4)及 CR1487(33.6±0.4) (P < 0.01,圖 4-1E)與暖季的 CR1455(34.2± 0.3)間差異不顯著(圖 4-1E)。CR950 混合層深度(91±26 m)為四航次最深(P < 0.01, 圖 4-5E)。其[N+N]_S (116±98 nM, P < 0.01,圖 4-8F)、[SRP]_S(62±16 nM, P < 0.01, 圖 4-10F)及[T Chl]_S (368±109 µg m⁻³, P < 0.01,圖 4-20F)皆為四航次中顯著最高。

三類超微浮游植物生物量,不論以表水、混合層平均或 0-200 m 平均指標皆發現, CR950 的 Prochlorococcus 生物量為四航次中顯著最少(P < 0.01,圖 4-11E), 而 Synechococcus 與 Picoeukaryotes 則與 Prochlorococcus 相反,不論以何種生物量 指標,皆顯示 Synechococcus(P < 0.01,圖 4-13E)與 Picoeukaryotes(P < 0.01,圖 4-16E) 在 CR950 顯著為四航次中最高者(圖 4-21)。

此航次中的 KK1(Southeast Asia Time-series Station, SEATS, 18°N,116°E, 圖 3-2)測站在四航次中僅出現一次。S2-3(2010年12月9日)測站則為 S2(2010年12 月6日)測站隔三日後再測之數據。上述資料,在比較海域間差異時,未列入計算。 此兩測站水文、生物量資料分別敘述如下:

(1)KK1 測站與海盆站(S7、S6、S5)平均之比較

KK1 測站與重點測站(S7、S6、S5)皆為南海海盆測站,但重點測站(S7、S6、S5)在冬季時經常受到黑潮水入侵影響,而KK1 測站則無。根據美國海軍實驗室估 測當時海流狀況(圖 4-22),亦已發現此航次南海海盆的S7、S6、S5 測站受黑潮水 入侵影響,比較KK1 與南海海盆的S7、S6、S5 測站溫鹽曲線圖(圖 4-4B)發現, KK1 的溫鹽曲線趨近於典型南海水,而 S7、S6、S5 測站的溫鹽曲線則偏離典型南海水。

KK1 測站 SST 為 26.9 ℃,略高於該航次南海海盆(26.5±0.4 ℃),SSS 為 33.3, 則低於該航次之南海海盆(33.9±0.3), D_{mi} 為 37 m、D_{ni} 為 42 m 皆淺於南海海盆平 均的 D_{mi} (69±29 m)及 D_{ni} (93±20 m)(表 4-7)。

雖然 KK1 測站[N+N]_s (27 nM)低於南海海盆(189 ± 105 nM),但其[N+N]_{Mix} (0.26 µM)及[N+N]₂₀₀(12.87 µM)皆高於南海海盆平均([N+N]_{Mix}: 0.23 ± 0.15 µM; [N+N]₂₀₀: 2.83 ± 1.16 µM)(表 4-7)。

類似者,KK1 磷酸鹽濃度與南海海盆平均相比,[SRP]_S (31 nM)較南海海盆(69 ± 3 nM)低,但[SRP]_{Mix} (0.14 μM)和[SRP]₂₀₀ (0.80 μM)皆高於南海海盆平均([SRP]_{Mix} 為 0.08±0.01 μM 及[SRP]₂₀₀ 為 0.22±0.07 μM) (表 4-7)。

KK1 的[T Chl]_S (131 μg m⁻³)、[T Chl]_{Mix} 為(202 μg m⁻³)及[T Chl]₂₀₀ (95 μg m⁻³)
皆低於南海海盆平均的[T Chl]_S (349 ± 36 μg m⁻³)、[T Chl]_{Mix} 度(330 ± 28 μg m⁻³) (及
[T Chl]₂₀₀ (184 ± 24 μg m⁻³)(表 4-7)。

KK1 測站的[Pro]_s為 1.52×10^4 Cells ml⁻¹, [Pro]_{Mix}為 3.97×10^4 Cells ml⁻¹, [Pro]₂₀₀為 2.43×10^4 Cells ml⁻¹。除[Pro]₂₀₀高於南海海盆的[Pro]₂₀₀ ($2.37 \pm 0.25 \times 10^4$ Cells ml⁻¹)外,其於指標均低於該航次南海海盆測站平均([Pro]_s為 $4.53 \pm 1.08 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, [Pro]_{Mix}為 $4.40 \pm 1.28 \times 10^4$ Cells ml⁻¹) (表 4-7)。

Synechococcus 在 KK1 測站的[Syn]_S為 1.43×10^4 Cells ml⁻¹, [Syn]_{Mix}為 1.90×10^4 Cells ml⁻¹, [Syn]₂₀₀為 0.70×10^4 Cells ml⁻¹。皆分別低於南海淦平均的[Syn]_S 為 $3.98 \pm 1.00 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, [Syn]_{Mix}為 $3.68 \pm 0.70 \times 10^4$ Cells ml⁻¹), [Syn]₂₀₀為 $1.93 \pm 0.37 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-7)。

Picoeukaryotes 與 *Synechococcus* 相似, [Eurk]_s 為 0.16×10^4 Cells ml⁻¹, [Eurk]_{Mix} 為 0.31×10^4 Cells ml⁻¹, [Eurk]₂₀₀ 為 0.15×10^4 Cells ml⁻¹ 均低於南海淦平均的 [Eurk]_s 為($0.59 \pm 0.05 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, [Eurk]_{Mix} 為 $0.55 \pm 0.09 \times 10^4$ Cells ml⁻¹, [Eurk]₂₀₀ 為 $0.30 \pm 0.07 \times 10^4$ Cells ml⁻¹ (表 4-7)。 此結果顯示雖然 KK1 站與重點測站(S7、S6、S5)皆為南海海盆測站,但 KK1 站的表水營養鹽濃度較南海海盆平均低,而三類超微浮游植物生物量亦低於重點 測站(S7、S6、S5)南海海盆平均。

(2)S2-3 測站與S2 測站之比較

S2-3(2010年12月9日)測站則為S2(2010年12月6日)測站隔三日後再測之 數據。其中12月7-12日為大陸冷氣團通過時間,故比較SST時,發現S2-3(24.6℃) 低於S2站(25.5℃)。以SSS比較則S2-3(34.0)高於S2(33.9)(表4-7)。

S2-3 的 D_{mi}(78 m), D_{ni}(54 m)皆淺於 S2 站 D_{mi}(104 m), D_{ni} 的 76 m (表 4-7)。

S2-3 的[N+N]_S (280 nM)及[N+N]₂₀₀ (7.29 μM)皆高於 S2 站的[N+N]_S (65 nM)及 [N+N]₂₀₀ (7.03 μM) (表 4-7)。而[N+N]_{Mix} 的 1.32 μM 低於 S2 站的 1.37,為受到 S2-3 的 D_{mi} 淺於 S2 站 D_{mi} 影響所致。

S2-3 的[SRP]_S (82 nM)、[SRP]_{Mix} (0.14 μM)及[SRP]₂₀₀ (0.48 μM)皆高於 S2 站的
[SRP]_S (58 nM)、 [SRP]_{Mix} (0.13 μM)及[SRP]₂₀₀(0.44 μM) (表 4-7),可能是 S2-3 受
大陸冷氣團,帶來擾動所致。S2-3 不論表水或深水層營養鹽濃度都較 S2 高。

類似者,葉綠素 a 濃度,亦以 S2-3 測站濃度高於 S2 站者,S2-3 的[T Chl]_S (376 μ g m⁻³)、[T Chl]_{Mix}(307 μ g m⁻³)及[T Chl]₂₀₀ (135 μ g m⁻³)皆高於 S2 站的[T Chl]_S (366 μ g m⁻³)、[T Chl]_{Mix}(222 μ g m⁻³)及[T Chl]₂₀₀ (124 μ g m⁻³) (表 4-7)。

而表水三類超微浮游植物生物量,與葉綠素 a 相反皆以 S2-3 低於 S2 站。S2-3 的[Pro]_S (2.65 × 10⁴ Cells ml⁻¹), [Syn]_S (6.63 × 10⁴ Cells ml⁻¹)及[Eurk]_S (0.85 × 10⁴ Cells ml⁻¹), S2 站的[Pro]_S 為 3.12×10^4 Cells ml⁻¹, [Syn]_S 則為 7.05×10^4 Cells ml⁻¹, [Eurk]_S 則為 0.91×10^4 Cells ml⁻¹ (表 4-7)。

而混合層平均生物量則與表水生物量相反,皆為 S2-3 站高於 S2 站,其中 S2-3 測站的[Pro]_{Mix}為 2.04×10⁴ Cells ml⁻¹, [Syn]_{Mix}為 5.56×10⁴ Cells ml⁻¹, [Eurk]_{Mix}為 0.69×10⁴ Cells ml⁻¹, S2 站的[Pro]_{Mix}則為 1.63×10⁴ Cells ml⁻¹, [Syn]_{Mix}為 4.08×10⁴ Cells ml⁻¹, [Eurk]_{Mix}則為 0.54×10⁴ Cells ml⁻¹。而以平均 200 m 生物量觀察則發現

S2-3 的[Pro]₂₀₀ 為 0.96 × 10⁴ Cells ml⁻¹, [Syn]₂₀₀ 為 2.30 × 10⁴ Cells ml⁻¹ 高於 S2 站的 0.94 × 10⁴ Cells ml⁻¹ 及 2.18 × 10⁴ Cells ml⁻¹。而[Eurk]₂₀₀ 則相反,在 S2-3 站的 0.29 × 10⁴ Cells ml⁻¹ 低於 S2 站的 0.29 × 10⁴ Cells ml⁻¹(表 4-7)。

(3)混合層深度

比較 CR950 航次不同海域間混合層深度差異,結果顯示海域間差異不顯著(圖 4-5D),可能受同一海域內測站間變異大所致。黑潮 D_{mi}為 120 m,南海海盆平均 為 69 ± 29 m,南海陸坡平均為 114 ± 8 m,南海陸棚平均為 97 ± 11 m(表 4-7)。海 盆三測站透過溫鹽圖(圖 4-4B),發現海盆三測站的溫鹽圖皆偏離典型南海,證明海 盆三測站受黑潮侵入現象。海盆三測站 S6 測站的 D_{mi}(35 m)最淺,其與 S7 測站(82 m)及 S5 測站(86 m)差距較大,根據美國海軍實驗室估測當時海流狀況(圖 4-22), 發現 S7 測站與 S5 測站於採樣當時,位處黑潮侵入南海之支流上,且而 S6 測站則 為處在,該黑潮侵支流造成部分海域呈反渦流(Anti-cyclonic)之位置上(圖 4-22),故 此可能造成位置相近的三海盆測站(彼此間差 0.5°E),有如此大之變異原因。

(4)光照強度與有光層深度

此航次航行期間,平均光照強度為 758 ± 481 μE m⁻² S⁻¹ 顯著低於暖季 CR910(1435 ± 89 μE m⁻² S⁻¹)及 CR1455(1332 ± 261 μE m⁻² S⁻¹)(P < 0.01,圖 4-7A)。 而有光層深度,則受限於到站採樣時間,僅測得 K2 有光層深度 134 m,S2 測站 D_{eu} 為 88 m 及 KK1D_{eu} 為 101 m 等三筆資料。

(5)硝酸鹽(NO₂+NO₃)

比較此航次不同海域間[N+N]s,在海域間無顯著差異(圖 4-5D),可能受測站 間變異大所致。南海海盆為 189±105 nM,南海陸坡為 125±91 nM,南海陸棚為 50±22 nM。而黑潮為 10 nM 為該航次最低(表 4-7)。而其南海海盆測站間,以 S6 測站的[N+N]s 73 nM 明顯與 S5 測站的 219 nM 及 S7 測站的 276 nM 有明顯差異, 造成此現象,可能與S6測站位於反渦流(Anti-cyclonic)之內有關(圖 4-22)。

比較此航次不同海域間[N+N]_{Mix},在海域間差異不顯著 (圖 4-8D),可能受同 一海域內測站間變異大所致。其中黑潮為 0.54 μM,南海海盆為 0.23 ± 0.15 μM、 南海陸坡為 1.72 ± 0.38 μM、南海陸棚為 0.79 ± 0.82 μM (表 4-7)。

比較該航次不同海域間[N+N]₂₀₀之差異,在扣除黑潮測站(n = 1)後,經One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,發現南海海盆(2.83 ± 1.16 μM)顯 著低於南海陸坡(5.45 ± 0.35 μM)及南海陸棚(6.56 ± 0.66 μM) (P < 0.01,圖 4-8D)。 而黑潮 0-200 m 平均硝酸鹽濃度(1.37 μM)為該航次中最低者(表 4-7)。

(6)磷酸鹽

比較此航次不同海域間[SRP]s 差異, 在統計上差異不顯著(圖 4-10D)。黑潮(27 nM)為該航次中最低者, 南海海盆為 69 ± 3 nM, 南海陸坡為 67 ± 17 nM, 南海陸 棚為 64 ± 8 nM (表 4-7)。

以[SRP]_{Mix}為指標,在扣除黑潮測站(n = 1)後,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,則發現南海陸坡($0.16 \pm 0.01 \mu$ M)顯著高於南海陸坡 ($0.10 \pm 0.04 \mu$ M)及南海海盆($0.08 \pm 0.01 \mu$ M) (P < 0.01,圖 4-10D),南海陸坡與南海 海盆兩海域在統計上差異不顯著。而黑潮的[SRP]_{Mix}為 0.07 μ M 為該航次中最低者 (表 4-7)。

比較此航次不同海域之[SRP]₂₀₀,在扣除黑潮測站(n = 1)並經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,發現南海海盆 $(0.22 \pm 0.07 \mu M)$ 顯著低於南 海陸坡 $(0.37 \pm 0.04 \mu M)$ 及南海陸棚 $(0.43 \pm 0.01 \mu M)$ (P < 0.01,圖 4-7D),南海陸坡 與南海陸棚兩海域在統計上差異不顯著。而黑潮[SRP]₂₀₀ (0.12 μ M)為該航次中最低 (表 4-7)。

2.生物量

(1) Prochlorococcus

CR950所有測站平均[Pro]_s(4.75 ± 2.42 × 10⁴ Cells ml⁻¹), [Pro]_{Mix}(3.63 ± 1.52 × 10⁴ Cells ml⁻¹), [Pro]₂₀₀(2.06 ± 0.80 × 10⁴ Cells ml⁻¹), 皆為四航次中顯著最低(P < 0.01,圖 4-11E)。若欲比較 CR950 不同海域間 *Prochlorococcus* 生物量之差異,則發現不論以[Pro]_s、[Pro]_{Mix}及[Pro]₂₀₀,皆無顯著差異(圖 4-11D)。

 $[Pro]_{s}$,在南海海盆為 $4.53 \pm 1.08 \times 10^{4}$ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 $5.86 \pm 5.73 \times 10^{4}$ Cells ml⁻¹,南海陸棚為 $4.19 \pm 1.52 \times 10^{4}$ Cells ml⁻¹。黑潮表水 *Prochlorococcus* 生物 量為 4.30×10^{4} Cells ml⁻¹(表 4-7)。

[Pro]_{Mix},在南海海盆為4.40±1.28×10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸坡為2.71±1.98×10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸棚平均為3.12±2.10×10⁴ Cells ml⁻¹。黑潮為4.46×10⁴ Cells ml⁻¹ (表 4-7)。

[Pro]₂₀₀,在南海海盆為2.37±0.25×10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸坡為1.67±1.23×10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸棚為1.48±0.76×10⁴ Cells ml⁻¹。黑潮[Pro]₂₀₀為3.06×10⁴ Cells ml⁻¹ 為該航次中最高者(表4-7),雖然統計上海域間差異不顯著(圖4-11D),但以平均值觀察則發現,0-200 m平均 Prochlorococcus 生物量由黑潮往南海陸棚遞減。

計算[Pro]_{30/200} (圖 4-23),則發現黑潮(18.90%)為所有航次中最低,而南海陸坡為 48.66±18.52%,南海陸棚為 42.70±4.97%皆高於南海海盆(25.22±7.71%)及黑潮(18.90%),表示相較於黑潮和南海海盆,南海陸坡和南海陸棚的 Prochlorococcus 主要分佈較靠近表水。

(2) Synechococcus

與 Prochlorococcus 相反, Synechococcus 在 CR950 所有測站平均[Syn]s (4.47±2.60×10⁴ Cells ml⁻¹), [Syn]_{Mix} (3.46±1.58×10⁴ Cells ml⁻¹), [Syn]₂₀₀ (1.83±0.81×10⁴ Cells ml⁻¹), 皆為四航次中顯著最高者(P<0.01,圖4-13E)。若比較 CR950 不同 海域間 Synechococcus 生物量之差異,則發現不論以何種指標,統計上皆差異不顯 著(圖4-13D), 可能為海域內測站間變異大所致。

[Syn]s,在南海海盆為 3.98±1.00×10⁴ Cells ml⁻¹, 南海陸坡為 6.15±4.65×10⁴

Cells ml⁻¹, 南海陸棚為 5.88± 1.65 × 10⁴ Cells ml⁻¹。黑潮為 1.18 × 10⁴ Cells ml⁻¹, 是 該航次最低者(表 4-7)。

[Syn]_{Mix},在南海海盆為 3.68 ± 0.70 × 10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 3.68 ± 2.52 × 10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸棚為 4.33 ± 0.36 × 10⁴ Cells ml⁻¹。黑潮為 0.60 × 10⁴ Cells ml⁻¹,
 是該航次中最低者(表 4-7)。

[Syn]₂₀₀,在南海海盆為 1.93 ± 0.37 × 10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 2.14 ± 1.36 × 10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸棚為 2.11 ± 0.10 × 10⁴ Cells ml⁻¹。黑潮為 0.37 × 10⁴ Cells ml⁻¹, 是該航次中最低者(表 4-7)。

以上顯示, Synechococcus 生物量在南海不同海域間,統計上差異不顯著,但 與黑潮相比,南海生物量有高於黑潮之趨勢。

(3)Picoeukaryotes

與 Synechococcus 相似, Picoeukaryotes 在 CR950 所有測站平均[Eurk]_s (0.71 ± 0.34 × 10⁴ Cells ml⁻¹), [Eurk]_{Mix} (0.56 ± 0.19 × 10⁴ Cells ml⁻¹), [Eurk]₂₀₀ (0.31 ± 0.11 × 10⁴ Cells ml⁻¹), 皆為四航次中顯著最高(P < 0.01, 圖 4-16E)。若比較 CR950 不同海 域間 Picoeukaryotes 生物量之差異,則發現不論是[Eurk]_s、[Eurk]_{Mix} 及[Eurk]₂₀₀, 統計上皆差異不顯著(圖 4-11D), 可能為海域內測站間變異大所致。

[Eurk]s,在南海海盆為 0.59±0.05×10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 1.02±0.64×10⁴
 Cells ml⁻¹,南海陸棚為 0.73±0.25×10⁴ Cells ml⁻¹。黑潮為 0.41×10⁴ Cells ml⁻¹為
 該航次最低(表 4-7)。

[Eurk]_{Mix},在南海海盆為 0.55±0.09×10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 0.69±0.38×
 10⁴ Cells ml⁻¹,南海陸棚平均為 0.57±0.04×10⁴ Cells ml⁻¹。黒潮為 0.34×10⁴ Cells ml⁻¹ 是該航次中最低(表 4-7)。

 $[Eurk]_{200}$,在南海海盆為 $0.30 \pm 0.07 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸坡為 $0.42 \pm 0.21 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,南海陸棚平均為 $0.28 \pm 0.02 \times 10^4$ Cells ml⁻¹。黑潮為 0.22×10^4 Cells ml⁻¹ 是該航次中最低(表 4-7)。

3.生物量與環境因子

 $[Pro]_{s} 與表水環境因子之間以及[Pro]_{Mix} 與混合層平均環境因子之間,皆無顯著$ $相關(表 4-8A、B)。而[Pro]_{200} 與[N+N]_{200}間有顯著負相關(r = -0.72, n = 8, P < 0.05,$ $表 4-8C)與[SRP]_{200}有顯著負相關(r = -0.79, n = 8, P < 0.05, 表 4-8C)。而[Pro]_s與$ $SST 有顯著正相關(r = 0.75, n = 8, P < 0.05, 表 4-8C), 然而 SST 與[N+N]_{200}間有$ $顯著負相關(r = -0.74, n = 8, P < 0.05, 表 4-8C)與[SRP]_{200}間亦有顯著負相關(r =$ $-0.76, n = 8, P < 0.05, 表 4-8C),故[Pro]_s與 SST 有顯著正相關,可能是反映其與$ $[N+N]_{200}及[SRP]_{200}間有顯著負相關所致。$

[Syn]s與SST間呈顯著負相關(r=-0.72, n=8, P<0.05,表4-8A)。而[Syn]_{Mix} 僅與[Eurk]_{Mix}間有顯著正相關(r=0.77, n=8, P<0.05,表4-8B)與其他混合層平 均環境因子皆無相關。而[Syn]₂₀₀亦僅與[Eurk]₂₀₀間有顯著正相關(r=0.75, n=8, P<0.05,表4-8C)與其他混合層平均環境因子皆無相關。</p>

而 Picoeukaryotes 生物量僅[Eurk]s與 SST 間呈顯著負相關(r=-0.75, n=8, P< 0.05,表4-8A),與[Syn]s間呈顯著正相關(r=0.93, n=8, P<0.01,表4-8A)。而 [Eurk]_{Mix}與[Eurk]₂₀₀皆與環境因子之間皆無顯著相關(表4-8B、C)。

(伍)、四航次合併資料

上述個別航次分析時,樣本數(n)太小及同一季節內環境因子之變化中幅度有限,探討三類超微浮游植物生物量與環境因子之關係時,不易顯著呈現,本節將四航次資料合併後分析。以下合併資料中,已扣除 CR910 的 A、M1 測站及 CR950 的 KK1、S2-3 測站。

1. 生物量與表水(5m)溫度

比較重點四航次 SST 差異,以 One Way ANOVA 及 Duncan's -Multiple Range Test 分析後發現,冷季 CR950 的 SST(25.9±0.7 ℃)顯著低於暖季三航次(P<0.01, 圖 3-3)。而暖季三航次中又以 CR1455(27.8±0.6 ℃)顯著低於其他兩者(P<0.01, 圖 3-3)。而 CR910 為 29.3±0.2 ℃, CR1487 為 29.3±0.4 ℃。

(1) Prochlorococcus

將 $[Pro]_{s}$ 與 SST 進行簡單線性迴歸分析後,發現 SST 與 $[Pro]_{s}$ 間,呈現顯著正 相關 $(R^{2} = 0.13, n = 32, P < 0.05, 圖 4-24A)$ 。但溫度因子與營養鹽間又有顯著負 相關。由上述結果已知冷季 *Prochlorococcus* 生物量為四航次中顯著最低者(P < 0.01, 圖 4-11E),因此 $[Pro]_{s}$ 與 SST 呈顯著負相關,無法排除其他與季節共變因子 如營養鹽所致。 $[Pro]_{30/200}$ 與表水溫進行簡單線性迴歸分析後,發現呈顯著負相關 $(R^{2} = 0.17, n = 32, P < 0.05, 圖 4-24B)$,即雖然冷季表水 *Prochlorococcus* 生物量較暖 季低,但其生物量分佈較靠近上表層水體。

(2) Synechococcus

 Synechococcus 與 Prochlorococcus 相反,其[Syn]s與 SST 間呈顯著負相關(R²=

 0.62, n=32, P<0.05,圖 4-24A)。如上述 SST 與[N+N]s (r=-0.53, n=32, P<</td>

 0.01,表 4-9B)及[SRP]s (r=-0.72, n=32, P<0.01,表 4-9B)間皆呈顯著負相關,</td>

 因此 Synechococcus 與表水溫度間之顯著負相關,可能無法排除為其他與季節共變

 因子如營養鹽之影響結果。而[Syn]_{30/200}與表水溫間,則無顯著相關(圖 4-24B)。

(3) Picoeukaryotes

Picoeukaryotes 與 Synechococcus 相同,其[Eurk]s與 SST 間呈顯著負相關($R^2 = 0.71$, n = 32, P < 0.05,圖 4-24A)。如上述 SST 與[N+N]s 及[SRP]s 間皆顯著負相關,此 Picoeukaryotes 與表水溫度間之顯著負相關,亦可能無法排除其他與季節共變因子如營養鹽之影響。而[Eurk]_{30/200}與表水溫進行簡單線性迴歸分析後,發現呈顯著負相關($R^2 = 0.71$, n = 32, P < 0.01,圖 4-24B),即冷季表水溫度低時,Picoeukaryotes 生物量分佈較靠近上表層水體。

2. 生物量與混合層深度

比較重點四航次混合層深度差異,以 One Way ANOVA 及 Duncan's -Multiple Range Test 分析後發現,冷季 CR950 混合層深度(91.6 ± 26.1 m)顯著深於暖季三航 次(P < 0.01,圖 4-5E)。暖季三航次彼此間差異不顯著,CR910 為 62.8 ± 15.7 m, CR1455 為 43.1 ± 31.3 m, CR1487 為 55.9 ± 24.4 m(圖 4-5E)。

(1) Prochlorococcus

將Prochlorococcus 生物量與D_{mi}進行簡單迴歸分析發現,不論是[Pro]s、[Pro]_{Mix} 或是[Pro]₂₀₀,其與混合層深度之間皆關係不顯著(表 4-9A)。表示本研究中 Prochlorococcus 生物量分佈與混合層深度無關。

(2) *Synechococcus*

將 Synechococcus 生物量與 D_{mi}進行簡單迴歸分析發現, [Syn]s與 D_{mi}有顯著 正相關(r=0.41, n=32, P<0.05, 表 4-9A)。然而 D_{mi}與[SRP]s間有顯著正相關(r =0.40, n=32, P<0.05, 表 4-9B), 故[Syn]s與 D_{mi}間之關係,可能亦包含[SRP]s 高之影響。

而[Syn]₂₀₀與 D_{mi}間亦有顯著正相關(r = 0.38, n = 31, P < 0.05, 表 4-9A), 但 由上述結果已知,冷季 D_{mi}較深,使 D_{mi}與 SST 有顯著負相關(r = -0.44, n = 32, P < 0.05,表 4-9B),且[Syn]₂₀₀亦與 SST 有顯著負相關(r = -0.77, n = 31, P < 0.01, 表 4-9A),故[Syn]₂₀₀與 D_{mi}間之關係,亦可能無法排除其他與季節共變因子,如營 養鹽,之影響。

(3) Picoeukaryotes

將 Picoeukaryotes 生物量與 D_{mi}進行簡單迴歸分析,發現[Eurk]_{30/200}與 D_{mi}有顯 著正相關(r=0.38, n=32, P<0.01,表 4-9A)。即 D_{mi}越深時,上水層 Picoeukaryotes
生物量越高,然而 D_{mi}與[SRP]s 間亦有顯著正相關係(r = 0.40, n = 32, P < 0.05, 表 4-9B),且[Eurk]_{30/200}與[SRP]s 有顯著正相關(r = 0.61, n = 32, P < 0.01, 表 4-9A)。 故[Eurk]_{30/200}與 D_{mi}有顯著正相關,可能亦包括其他水體環境因子共同影響之結果 關係相同

[Eurk]s與 D_{mi}有顯著正相關(r=0.47,n=32,P<0.01,表 4-9A)。而造成[Eurk]s 與 D_{mi}有顯著正相關之原因與[Syn]s與 D_{mi} 間關係類似。可能包含[SRP]s 高之影響。

[Eurk]_{Mix}與 D_{mi}有顯著正相關(r=0.38, n=32, P<0.05, 表 4-9A)。而 D_{mi}與
[N+N]_{Mix}間有顯著正相關(r=0.61, n=32, P<0.01, 表 4-9B)以及與[SRP]_{Mix}間皆
有顯著正相關(r=0.61, n=32, P<0.01, 表 4-9B)。故[Eurk]_{Mix}與 D_{mi}間之關係,
可能包含[N+N]_{Mix}及[SRP]_{Mix}共同之影響。

3. 生物量與光照

比較重點四航次間平均光照強度差異,以 One Way ANOVA 及 Duncan's -Multiple Range Test 分析後發現 CR910(1435 ± 89 μE S⁻¹ m⁻²)和 CR1455(1332 ± 261 μE S⁻¹ m⁻²)兩者間差異不顯著,二者顯著大於 CR1487(662 ± 327 μE S⁻¹ m⁻²)及 CR950(758 ± 480 μE S⁻¹ m⁻²) (P < 0.01,圖 4-7A), CR1487 與 CR950 間不顯著(圖 4-7A)。暖季 CR1487 航次光照強度低於其他兩個暖季航次,與航次期間逢熱帶低 壓壟罩及颱風影響有關,CR950 光照強度低,為冷季之故。

為比較超微浮游植物垂直分佈是否因季節光線強度不同而受影響,計算 [Pro]_{30/200},[Syn]_{30/200},[Eurk]_{30/200}並以 One Way ANOVA 及 Duncan's -Multiple Range Test 分析,結果如下

(1) Prochlorococcus

[Pro]_{30/200} 在航次間差異不顯著(圖 4-25A) ,可能為航次內不同測站間變異大所致。[Pro]_{30/200} 在 CR910 為 31.6 ± 8.8 %, CR1455 為 29.4 ± 14.4 %, CR1487 為 24.7 ± 7.1 %, CR950 為 35.9 ± 13.6 %。

若比較海域間之差異,結果發現[Pro]_{30/200} 在黑潮(17.8±7.0%)顯著低於南海海 盆(28.6±5.1%)、南海陸坡(37.9±12.7%)及南海陸棚(36.9±11.8%)(P<0.01,圖 4-25A)。

若以簡單迴歸分析[Pro]_{30/200}與有光層深度之關係,發現呈顯著負相關(R² = 0.26, n = 16, P < 0.05; 圖 4-26),即有光層深度越深的測站, Prochlorococcus 分 布在上水層之比例越低。

(2) Synechococcus

[Syn]_{30/200} 在航次間差異不顯著(圖 4-25A) ,可能為航次內不同測站間變異大所致。在 CR910 為 30.4 ± 7.5 %, CR1455 為 34.9 ± 18.2 %, CR1487 為 37.7 ± 12.0 %, CR950 為 38.5 ± 8.7 %。

比較[Syn]_{30/200} 在海域間之差異,發現黑潮(30.6±11.2%)和南海海盆(27.8±8.2%)(黑潮與南海海盆間差異不顯著)顯著低於南海陸坡(45.1±8.1%)和南海陸棚(42.2±11.4%),而南海陸坡與南海陸棚間差異不顯著(P < 0.01,圖 4-25B)。 [Syn]_{30/200} 與有光層深度間關係不顯著(圖 4-35),而造成[Syn]_{30/200} 在不同海域知間的差異,可能為其他環境因子作用影響。

(3) Picoeukaryotes

[Eurk]_{30/200}在冷季航次(34.6±7.1%)顯著高於其他暖季三航次(CR910:11.9±2.7%; CR1455:17.2±8.8%; CR1487:14.6±6.8%;)(P<0.01,圖4-25A),即
冷季光線較弱時,其生物量分佈在淺層。

[Eurk]_{30/200} 在海域間差異不顯著(圖 4-25B),在南海海盆為 15.9 ± 8.8%,南海陸坡為 21.5 ± 12.9%,在南海陸棚為 22.0 ± 12.3%(圖 4-25B)。[Eurk]_{30/200} 與有光層深度間關係亦不顯著(圖 4-26)。

4. 生物量與硝酸鹽(NO₂+NO₃)

比較重點四航次間[N+N]_S,發現冷季 CR950 的[N+N]_S (116±98 nM)顯著高於 暖季 CR910(13±5 nM), CR1455(16±8=nM), CR1487(36±21 nM)的[N+N]_S (P< 0.01,圖 4-8F)。

 $[N+N]_{Mix}$ 在航次間差異不顯著(圖 4-8F),可能是同一航次內不同測站間變異大所致。CR910 為 0.15 ± 0.18 μ M, CR1455 為 0.37 ± 0.95 μ M, CR1487 為 0.05 ± 0.03 μ M, CR950 為 0.78 ± 0.72 μ M。

 $[N+N]_{200}$ 在航次間差異,在統計上差異不顯著(圖 4-8F),亦可能是同一航次不同航次測站間變異大所致。CR910 為 4.15 ± 2.97 μ M, CR1455 為 5.11 ± 3.41 μ M, CR1487 為 4.20 ± 2.77 μ M, CR950 為 4.24 ± 2.12 μ M。比較四航次不同海域間 $[N+N]_{200}$ 差異,則發現南海陸棚(7.17 ± 1.14 μ M)顯著高於南海陸坡(5.63 ± 1.16 μ M) 與南海海盆(3.79 ± 2.09 μ M) (P < 0.01,圖 4-8E),南海陸坡與南海海盆間差異不顯著,而黑潮(0.60 ± 0.44 μ M)為四海域中顯著最低者(圖 4-8E)。

(1) Prochlorococcus

以簡單迴歸比較 *Prochlorococcus* 生物量與硝酸鹽濃度之關係,結果發現 *Prochlorococcus* 與 *Synechococcus* 及 Picoeukaryotes 間之趨勢有明顯不同, [Pro]s 與[N+N]s間呈現顯著負相關($R^2 = 0.21$, n = 32, P < 0.01, 圖 4-27A)。[Pro]_{Mix}亦 與[N+N]_{Mix}間亦有顯著負相關($R^2 = 0.18$, n = 32, P < 0.05, 圖 4-27B), 表示硝酸 鹽濃度越高時, *Prochlorococcus* 生物量越少。而[Pro]₂₀₀與[N+N]₂₀₀間無顯著相關(圖 4-27C)。而[Pro]_{30/200}與 D_{ni} 間,亦呈現顯著負相關($R^2 = 0.33$, n = 31, P < 0.01, 圖 4-27D),表示 D_{ni} 越淺, *Prochlorococcus* 生物量在上水體比例則越高。但 D_{ni} 又與 D_{eu} 有顯著正相關(r = 0.69, n = 16, P < 0.01, 表 4-9B), 即[Pro]_{30/200}與 D_{ni} 間之關 係,可能亦包含 D_{eu} 之共同影響。

(2) Synechococcus

以簡單線性迴歸比較[Syn]s 與[N+N]s 間之關係,發現呈顯正相關 $(R^2 = 0.43, n = 0.43)$

32 , P < 0.01,圖 4-27A)表示[N+N]s 越高時,[Syn]s 越高。而[Syn]_{Mix}與[N+N]_{Mix} 間(圖 4-27B)以及[Syn]₂₀₀與[N+N]₂₀₀間(圖 4-27C)則無顯著相關。[Syn]_{30/200}與 D_{ni} 間亦有顯著負相關(R² = 0.18, n = 31, P < 0.01,圖 4-27D)。表示 D_{ni}越淺時水表 至 30 m 累計 Synechococcus 生物量越高。此結果皆顯示,在無光線不足限制下(靠 近水表),硝酸鹽濃度越高時,Synechococcus 生物量越高。

(3) Picoeukaryotes

Picoeukaryotes 與 Synechococcus 相似,以簡單線性迴歸比較[Eurk]_S與[N+N]_S 間之關係,發現呈顯正相關($R^2 = 0.42$, n = 32, P < 0.01,圖 4-27A) 表示表水硝酸 鹽濃度越高時,其表水生物量越高。另[Eurk]_{Mix}與[N+N]_{Mix} 間有顯著相關($R^2 = 0.19$, n = 32, P < 0.05,圖 4-27B),亦表示硝酸鹽濃度越高時 Picoeukaryotes 生物 量也越高。而[Eurk]₂₀₀與[N+N]₂₀₀間(圖 4-27C)以及[Syn]_{30/200}與[N+N]_{30/200}間(圖 4-27D)則無顯著相關。

5. 生物量與磷酸鹽

比較重點四航次間[SRP]s 差異,發現冷季 CR950($62 \pm 16 \text{ nM}$)顯著高於三個暖 季航次(P < 0.01,圖 4-10F),而暖季三航次中,CR1455($36 \pm 17 \text{ nM}$)顯著高於 CR1487($22 \pm 6 \text{ nM}$) (P < 0.01,圖 4-10F),CR910($23 \pm 8 \text{ nM}$)介於兩者之間(圖 4-10F)。比較不同海域間[SRP]s 差異,則發現差異不顯著(圖 4-10E)。在黑潮為 $33 \pm 22 \text{ nM}$,在南海海盆為 $38 \pm 21 \text{ nM}$,在南海陸坡為 $38 \pm 22 \text{ nM}$,在南海陸棚為 $32 \pm 20 \text{ nM}$ 。

比較四航次[SRP]_{Mix},結果發現冷季 CR950(0.10 ± 0.04 μ M)顯著最高(P < 0.01,圖 4-10F),而於暖季的 CR910(0.04 ± 0.02 μ M)及 CR1487(0.03 ± 0.01 μ M) 顯 著最低(P < 0.01,圖 4-10F)。而 CR1455(0.07 ± 0.07 μ M)則介於兩者間,與各組皆 差異不顯著(圖 4-10F)。比較不同海域間[SRP]_{Mix} 差異,則發現差異不顯著(圖 4-10E),可能因海域內不同測站間變異大所致。在黑潮為 0.07 ± 0.02 μ M,在南海 海盆為 $0.05\pm0.02~\mu M$,在南海陸坡為 $0.10\pm0.09~\mu M$,在南海陸棚為 $0.06\pm0.03~\mu M$ 。

若以[SRP]₂₀₀比較四航次間差異,在統計上差異不顯著(圖 4-10F),可能受同一 航次不同測站間變異大所致,CR910為 0.30 ± 0.21 μM,CR1455為 0.35 ± 0.21 μM, CR1487為 0.26 ± 0.14 μM, CR950為 0.30 ± 0.13 μM。若比較不同海域間[SRP]₂₀₀ 差異,則發現南海陸棚(0.46 ± 0.05 μM)與南海陸坡(0.40 ± 0.12 μM)兩者差異不顯 著,但兩者皆顯著高於與南海海盆(0.26 ± 0.13 μM),而黑潮(0.07 ± 0.02 μM)為四海 域中顯著最低者(P < 0.01,圖 4-10E)。

(1) Prochlorococcus

將 Prochlorococcus 生物量與磷酸鹽濃度間進行迴歸分析,發現 Prochlorococcus與 Synechococcus及 Picoeukaryotes 間之趨勢相反,其[Pro]s與 [SRP]s間呈現顯著負相關(R²=0.24,n=32,P<0.01,圖4-28A),表示[SRP]s越 高時,[Pro]s則越少。[Pro]_{Mix}亦與[SRP]_{Mix}間亦有顯著負相關(R²=0.26,n=32,P < 0.05,圖4-28B),表示[SRP]_{Mix}越高時,混合層平均。[Pro]_{Mix}生物量則越少。而 [Pro]₂₀₀與[SRP]₂₀₀間相關不顯著(圖4-28C)。

(2) *Synechococcus*

將 Synechococcus 生物量與磷酸鹽濃度進行簡單迴歸分析後發現, [Syn]s 與 [SRP]s 呈顯著正相關(R² = 0.48, n = 32, P < 0.01, 圖 4-28A)。[Syn]_{Mix}與[SRP]_{Mix} 間亦呈顯著正相關(R² = 0.15, n = 32, P < 0.05, 圖 4-28B)。即[SRP]越高, [Syn] 越高。而[Syn]₂₀₀與[SRP]₂₀₀間相關不顯著(圖 4-28C)。

(3) Picoeukaryotes

Picoeukaryotes 與 Synechococcus 相同,以簡單線性迴歸比較[Eurk]s 與[SRP]s 間之關係,發現呈顯著正相關($R^2 = 0.57$, n = 32, P < 0.01,圖 4-28A)。而[Eurk]_{Mix}

與[SRP]_{Mix}間亦呈現顯著正相關(R²=0.32, n=32, P<0.05, 圖 4-28B),即[SRP] 越高時[Eurk]也越高。而[Eurk]₂₀₀與[SRP]₂₀₀間相關不顯著(圖 4-28C)。

6. 生物量與葉綠素 a 濃度

比較重點四航次間[TChl]s 差異,發現冷季 CR950(368 ± 109 µg m⁻³)顯著高於暖 季三航次(P < 0.01,圖 4-20F)。而暖季的 CR1487(160 ± 73 µg m⁻³)顯著高於 CR910(85 ± 15 µg m⁻³) (P < 0.01,圖 4-20F),而 CR1455(117 ± 30 µg m⁻³)介於兩者之間差異不 顯著(圖 4-20F)。

比較四航次[TChl]_{Mix} 差異,結果發現冷季 CR950(288 ± 61 µg m⁻³)顯著高於暖季三航次(P < 0.01,圖 4-20F)。而暖季三航次間差異不顯著(圖 4-20F),CR910 為 $161 \pm 82 \ \mu g \ m^{-3}$,CR1455 為 $148 \pm 66 \ \mu g \ m^{-3}$,CR1487 為 $193 \pm 78 \ \mu g \ m^{-3}$ 。

若比較四航次間[TChl]₂₀₀ 差異,在統計上差異不顯著(圖 4-20F),可能受同一航次不同測站間變異大所致,CR910 為 137 ± 33 μ g m⁻³, CR1455 為 133 ± 37 μ g m⁻³, CR1487 為 140 ± 43 μ g m⁻³, CR950 為 163 ± 28 μ g m⁻³。

[TChl]s與 D_{mi}有顯著正相關(r = 0.54, n = 32, P < 0.01, 表 4-9B),與[N+N]s 有顯著正相關(r = 0.64, n = 32, P < 0.01, 表 4-9B)及[SRP]s 有顯著正相關(r = 0.72, n = 32, P < 0.01, 表 4-9B)°[TChl]s與 SST 有顯著負相關(r = -0.77, n = 32, P < 0.01, 表 4-9B)° m SST與[N+N]s間(r = -0.53, n = 32, P < 0.01, 表 4-9B)及[SRP]s間亦 有顯著負相關(r = -0.72, n = 32, P < 0.01, 表 4-9B)°故[TChl]s與 SST 間之顯著負 相關,可能包含與季節共變因子如營養鹽所致。

 $[TChl]_{Mix} 與環境因子之關係,其結果與表水者相同,而[TChl]_{Mix} 與 D_{mi}有顯著$ $正相關(r=0.38, n=32, P<0.01,表 4-9B),與[N+N]_{Mix}間有顯著正相關(r=0.36,$ $n=32, P<0.05,表 4-9B),與[SRP]_{Mix}間亦有顯著正相關(r=0.44, n=32, P<0.05,$ $表 4-9B),與SST 有顯著負相關(r=-0.54, n=32, P<0.01,表 4-9B),即當 D_{mi}$ $越深、[N+N]_{Mix}及[SRP]_{Mix}越高時有越高的[TChl]_{Mix}。因此[TChl]_{Mix}與SST 間之關$ 係,可能包含其他與季節共變因子如營養鹽影響所致。

(1) Prochlorococcus

Prochlorococcus 生物量不像 *Synechococcus* 及 Picoeukaryotes, 與葉綠素 a 濃度之間無顯著相關(圖 4-29)。

(2) Synechococcus

Synechococcus 生物量與葉綠素 a 濃度之間,不論以表水、混合層平均或 0-200 m 平均指標皆呈顯著正相關(P < 0.01,表 4-9A)。[Syn]_S與[T Chl]_S間(R² = 0.64, n = 32, P < 0.01, B 4-29A), [Syn]_{Mix}與[T Chl]_{Mix}間(R² = 0.47n = 32, P < 0.01, B 4-29B), [Syn]₂₀₀與[T Chl]₂₀₀為(R² = 0.18, n = 32, P < 0.01, B 4-29C),皆是顯著正相關。

(3) Picoeukaryotes

[Eurk]s與[T Chl]s呈正相關係(R²=0.66, n=32, P<0.01, 圖 4-29A)。[Eurk]_{Mix}
與[T Chl]_{Mix}間與上述指標皆同,呈正相關(R²=0.38, n=32, P<0.01, 圖 4-29B)。
[Eurk]₂₀₀與[T Chl]₂₀₀間亦呈正相關(R²=0.17, n=32, P<0.01, 圖 4-29C)。

7. 生物量與環境因子之綜合

由上述結果已知, Synechococcus 及 Picoeukaryote 與環境因子間的變動關係與 葉綠素 a 濃度者一致。但 Prochlorococcus 與環境因子間之關係則與上述三者不 同。在生物量與環境因子之綜合討論時,葉綠素 a 濃度不列入影響因子。

光線因子之測量,受限於到站採樣時間,有些測站無資料,在扣除這些測站 及特殊測站(CR910的A、M1及CR950的KK1、S2-3)後,樣本由n=32縮小變成 n=17,且這些數據集中在CR910(n=7)及CR1455(n=6)兩航次。以下將資料分 為兩部分處理:(1)環境因子包含有光層深度時(n=17);以及(2)不包含有光層深度 因子時(n=32)。其中CR1455的S3測站因採樣水深僅至127m,故0-200m平均 時無法獲得數據,處理 0-200m 平均時所有樣本數皆減1。

(1) 環境因子包含有光層深度 (n=17或16)

A. Prochlorococcus

將[Pro]s與D_{mi}、D_{ni}、D_{eu}、SST、[N+N]s、[SRP]s進行複迴歸分析,結果發現 沒有任何環境因子可加入迴歸方程式。

將[Pro]_{Mix}與 D_{mi}、D_{ni}、D_{eu}、SST、[N+N]_{Mix}、[SRP]_{Mix}進行複迴歸分析,僅 D_{mi}與之呈顯著負相關(R²=0.36, n=17, P<0.01,表 4-10)。

將[Pro]₂₀₀與 D_{mi}、D_{ni}、D_{eu}、SST、[N+N]₂₀₀、[SRP]₂₀₀進行複迴歸分析,僅 SST 與之呈顯著正相關(R²=0.26, n=16, P<0.01,表 4-10)。

B. Synechococcus

將[Syn]s與D_{mi}、D_{ni}、D_{eu}、SST、[N+N]s、[SRP]s進行複迴歸分析,則發現[SRP]s 及[N+N]s二者皆與之呈顯著相關複迴歸方程式之 R² = 0.69(n = 17, P < 0.01,表 4-10)。 [SRP]s之顯著正相關(partial t = 3.87, P = 0.002,表 4-10),比[N+N]s之顯 著正相關(partial t = 2.71, P = 0.017,表 4-10)影響較大。

將[Syn]_{Mix}與 D_{mi}、D_{ni}、D_{eu}、SST、[N+N]_{Mix}、[SRP]_{Mix}進行複迴歸分析,結果 發現[Syn]_{Mix}與 SST 及 D_{eu}二者與之呈顯著相關,複迴歸方程式之 R² = 0.52(n = 17, P < 0.01,表 4-10)。SST 之顯著負相關(partial t = -3.41, P = 0.004,表 4-10),比 D_{eu}之顯著負相關(partial t = -2.86, P = 0.013)影響大。然而 SST 亦與[N+N]_{Mix} (r = -0.53, n = 32, P < 0.01,表 4-9)及[SRP]_{Mix} (r = -0.65, n = 32, P < 0.01,表 4-9)間 有顯著負相關,故[Syn]_{Mix}與 SST 之關係顯著,可能包括其他共變之季節性因子如 營養鹽影響之結果。

將[Syn]₂₀₀與 D_{mi}、D_{ni}、D_{eu}、SST、[N+N]₂₀₀、[SRP]₂₀₀進行複迴歸分析,結果 無任何環境因子可加入迴歸方程式。 C. Picoeukaryotes

將[Eurk]s與D_{mi}、D_{ni}、D_{eu}、SST、[N+N]s、[SRP]s進行複迴歸分析,發現SST 及[SRP]s二者與之呈顯著相關,複迴歸方程式之R² = 0.77(n = 17, P < 0.01,表 4-10),SST 之顯著負相關(partial t = -3.43, P = 0.004,表 4-10),比[SRP]s之顯著 正相關(partial t = 2.49, P = 0.026,表 4-10)影響大。此結果顯示SST 越低及[SRP]s 越高時,有越多[Eurk]s。

將[Eurk]_{Mix}與 D_{mi}、D_{ni}、D_{eu}、SST、[N+N]_{Mix}、[SRP]_{Mix}進行複迴歸分析,結 果僅 SST 呈顯著負相關(R²=0.61, n=17, P<0.01,表 4-10)。然而 SST 亦與[N+N] _{Mix} (r=-0.53, n=32, P<0.01,表 4-9)及[SRP]_{Mix} (r=-0.65, n=32, P<0.01,表 4-9)間有顯著負相關,故[Syn]_{Mix}與 SST 之顯著關係,可能包括其他共變之季節性 因子如營養鹽等。

將[Eurk]₂₀₀與 D_{mi}、D_{ni}、D_{eu}、SST、[N+N]₂₀₀、[SRP]₂₀₀進行複迴歸分析,結 果發現其亦僅與 SST 有顯著負相關(R²=0.41, n=16, P<0.01,表 4-10)。

(2) 環境因子不包含有光層深度(n=32或31)

A. Prochlorococcus

將[Pro]s與 D_{mi}、D_{ni}、SST、[N+N]s、[SRP]s進行複迴歸分析,僅[SRP]s與之 呈顯著負相關(R²=0.24, n=32, P<0.01,表 4-11)。

將[Pro]_{Mix}與 D_{mi}、D_{ni}、SST、[N+N]_{Mix}、[SRP]_{Mix}進行複迴歸分析,僅[SRP]_{Mix} 與之呈顯著負相關(R²=0.26, n=32, P<0.01,表 4-11)。

將 $[Pro]_{200} 與 D_{mi} \times D_{ni} \times SST \times [N+N]_{200} \times [SRP]_{200} 進行複迴歸分析,僅表水溫$ $度與之呈顯著正相關<math>(R^2 = 0.38, n = 31, P < 0.01, 表 4-11)$ 。此結果雖然顯示 *Prochlorococcus* 生物量與磷酸鹽或溫度之間有負相關,但是否為真或有其他因子 (例如:光線、捕食者) 之影響,將進一步由培養實驗解答之。

B. Synechococcus

將[Syn]s與D_{mi}、D_{ni}、SST、[N+N]s、[SRP]s進行複迴歸分析,發現SST及[N+N]s 二者與之呈顯著相關,複迴歸方程式之R²=0.70(n=32, P<0.01,表4-11), SST 之顯負相關(partial t = -5.13, P<0.001,表4-11)比[N+N]s之顯著正相關(partial t = 2.76, P=0.010,表4-11)影響大。

將[Syn]_{Mix}與 D_{mi}、D_{ni}、SST、[N+N]_{Mix}、[SRP]_{Mix}進行複迴歸分析,發現[Syn]_{Mix} 與 SST 間有顯著相關(R²=0.54, n=32, P<0.01,表 4-11)。然而 SST 亦與[N+N] _{Mix} (r=-0.53, n=32, P<0.01,表 4-9)及[SRP]_{Mix} (r=-0.65, n=32, P<0.01,表 4-9)間有顯著負相關,故[Syn]_{Mix}與 SST 之關係顯著,可能為其他季節性因子共變 影響之結果。

將[Syn]₂₀₀與 D_{mi}、D_{ni}、SST、[N+N]₂₀₀、[SRP]₂₀₀進行複迴歸分析,發現[Syn]₂₀₀ 與 SST 有顯著負相關(R²=0.60, n=31, P<0.01,表 4-11)。

此結果雖然顯示主要影響 Synechococcus 生物量的因子為 SST,但與 SST 共變的因子包括[N+N]、[SRP]及光線與捕食者等。SST 在此是否包含或只代表其他因子,將由後續培養實驗結果解明。

C. Picoeukaryotes

Picoeukaryotes 與 Synechococcus 之結果相似。將[Eurk]s 與 D_{mi}、D_{ni}、SST、 [N+N]s、[SRP]s進行複迴歸分析,發現 SST 及[N+N]s 二者與之呈顯著相關,複迴 歸方程式之 R² = 0.77(n = 32, P < 0.01,表 4-11), SST 之顯著負相關(partial t = -6.72, P < 0.001,表 4-11)比[N+N]s之顯著正相關(partial t = 2.70, P = 0.011,表 4-11) 影響大。

將[Eurk]_{Mix}與 D_{mi}、D_{ni}、SST、[N+N]_{Mix}、[SRP]_{Mix}進行複迴歸分析,發現[Eurk]_{Mix} 與 SST 間有顯著相關(R²=0.73, n=32, P<0.01,表 4-11)。然而 SST 亦與[N+N] _{Mix} (r=-0.53, n=32, P<0.01,表 4-9)及[SRP]_{Mix} (r=-0.65, n=32, P<0.01,表 4-9)間有顯著負相關,故[Syn]_{Mix}與 SST 之關係顯著,可能為其他季節性因子共變 影響之結果。 將[Eurk]₂₀₀與 D_{mi}、D_{ni}、SST、[N+N]₂₀₀、[SRP]₂₀₀進行複迴歸分析,發現[Eurk]₂₀₀ 與 SST 有顯著負相關(R²=0.47, n=31, P<0.01,表 4-11)。

究竟主要影響[Eurk]的因子為 SST,或與 SST 有關之其他因子,將由培養實驗解明。

第二節、CRITOP

(一)、水文特質

CRITOP的測站,依據Hsin et al. (2008)依1982-2005年間0-50m平均海流流向流 速圖所定義之黑潮流域(圖3-1),區分為兩個黑潮測站(T1、T2)及20個西北太平洋測 站(C1-22及A1-3)。再透過美國海軍實驗室(Naval Research Laboratory, NRL)針對台 灣附近海域海流數值模擬結果(Taiwan Nowcast/Forecast System, TNFS, 圖3-7), 將20個西北太平洋測站依航行期間所受海流影響,細分為12個逆時針渦流 (Cyclonic eddy) 測站(其中A1 測站採樣兩次,分別為A1-1及A1-2),4個順時針渦流 (Anti-cyclonic eddy) 測站,以及5個位夾在順、逆時針渦流中間(Between) 之測站(表 3-2)。結果以One Way-ANOVA分析比較上述三類處於不同渦流狀況,其環境因子、 營養鹽及生物量,結果皆差異不顯著(圖3-8),因此將之合併,統稱為西北太平洋 測站討論之。另T1和T2測站除了是黑潮測站外,在停留期間受Parma(圖3-9)颱風影 響並有內潮發生,雖缺乏EK資料故,但以(A)CTD下放(down cast,實線)、上收(up cast, 虛線)時記錄之溫度、鹽度、密度資料(T1:圖3-10A; T2:圖3-11A), (B)0-200 m平均鹽度(T1:圖3-10B;T2:圖3-11B),(C)0-200 m平均營養鹽濃度(T1:圖 3-10C-E;T2: 圖3-11C-E),(D) 0-200 m平均生物量(T1: 圖3-10F-H;T2: 圖3-11F-H), 皆發現有24小時週期性(全日潮)上下起伏之現象。因此將T1、T2數據歸類至內波、 內潮測站討論。

探討CRITOP野外樣本(以下簡稱"西北太平洋")資料時,將與重點航次中,三 暖季航次(CR910、CR1455、CR1487)之南海平均(以下簡稱"南海")及黑潮平均(以 下簡稱"黑潮")比較。 (二)、環境因子

西北太平洋平均SST為29.44±0.21 ℃,顯著高於南海測站的28.75±0.83 ℃(P < 0.01,圖4-30A),亦比黑潮平均為29.02±0.86 ℃略高(able 15)。CRITOP的SSS 為34.28±0.10與黑潮(34.39±0.24)差異不顯著,而南海的SSS為33.63±0.36 顯著 最低(表4-12)。

因CRITOP航次,船上無PAR值資料,光照強度數據以西北太平洋測站採樣期間(2009年9月21日至10月1日)全天日照量(Solar Radiation)與暖季三重點航次採樣期間之全天日照量比較,日照量皆採用中央氣象局恆春氣象站之記錄。西北太平洋測站採樣期間平均全天日照量(16.23 ± 6.29 MJ m⁻²)略低於暖季三重點航次(18.15 ± 7.92 MJ m⁻²)。但t test分析,二者在統計上差異不顯著(P > 0.05)。

比較三海域間D_{mi},西北太平洋測站的D_{mi}為52.0±13.2 m,黑潮為59.8±19.2 m,南海為52.4±26.5 m(表4-12),在統計上差異不顯著(圖4-30A)。

比較三海域間D_{ni},黑潮(152.2 ± 39.8 m)顯著最深,南海(58.1 ± 26.6 m)顯著最 淺(P < 0.01,圖4-30A),而西北太平洋(91.0 ± 22.3 m)介於兩者之間(表4-12)。比較 [N+N]_S,海域之間差異不顯著(圖4-30B)。西北太平洋為20 ± 12 nM,黑潮為15 ± 7 nM,南海為23 ± 18 nM(表4-12)。比較[N+N]₂₀₀,則發現南海(5.57 ± 2.26 μ M)顯著 高於西北太平洋(1.00 ± 0.27 μ M)及黑潮0.45 ± 0.27 μ M(表4-12) (P < 0.01,圖 4-30B),而西北太平洋及黑潮間差異不顯著(圖4-30B)。

比較三海域間磷酸鹽濃度,結果與硝酸鹽相似,其[SRP]s在三海域間差異不顯 著(圖4-30B),西北太平洋為23±9nM,黑潮則為34±24nM,在南海為25±7nM(表 4-12)。若以[SRP]₂₀₀觀察,則發現南海(369±145nM)顯著高於西北太平洋(102±16 nM)以及黑潮(62±9nM)(表4-12)(P<0.01,圖4-30B),且黑潮與西北太平洋間差 異不顯著(圖4-30B)。

以葉綠素a濃度觀察時,不論以表水或200 m平均,結果一致。[T Chl]s在南海 (128±58μg m⁻³)顯著高於西北太平洋(85±29μg m⁻³) (P<0.05,圖4-30B)而黑潮(91 ±23 μg m⁻³)則介於兩者之間(表4-12)。[T Chl]₂₀₀亦同,在南海(141±37 μg m⁻³)顯著 高於西北太平洋(114±15 μg m⁻³) (P < 0.05,圖4-30B),而黑潮(121±33 μg m⁻³)則 介於兩者之間(表4-12)。

(三)、生物量

比較三海域之[Pro]_s,發現西北太平洋(13.74 ± 4.22 ×10⁴ Cells ml⁻¹)與南海 (12.57 ± 4.85 ×10⁴ Cells ml⁻¹)間差異不顯著(表4-12) (圖4-30C),二者皆顯著高於黑 潮(7.94 ± 3.76 ×10⁴ Cells ml⁻¹)(P < 0.05,圖4-30C)。若以[Pro]₂₀₀來觀察,則發現西 北太平洋(9.45 ± 2.24 ×10⁴ Cells ml⁻¹)顯著高於黑潮(6.61 ± 1.24 ×10⁴ Cells ml⁻¹)以及 南海(5.85 ± 2.29 ×10⁴ Cells ml⁻¹)(表4-12) (P < 0.01,圖4-30C),而黑潮與南海間差 異不顯著 (圖4-30C)。

Synechococcus與Prochlorococcus明顯相反,以[Syn]s觀察,發現南海(1.26±0.48 ×10⁴ Cells ml⁻¹)顯著高於黑潮(0.45±0.25×10⁴ Cells ml⁻¹)以及西北太平洋(0.23±0.26×10⁴ Cells ml⁻¹)(表4-12) (P<0.01,圖4-30C),而黑潮與西北太平洋間差異不 顯著(圖4-30C)。以[Syn]₂₀₀來觀察,亦為南海(0.51±0.12×10⁴ Cells ml⁻¹)顯著高於黑 潮(0.22±0.09×10⁴ Cells ml⁻¹)以及西北太平洋(0.16±0.07×10⁴ Cells ml⁻¹)(表4-12) (P<0.01,圖4-30C),而黑潮及西北太平洋間差異不顯著(圖4-30C)。以上說明 Synechococcus在南海,不論[Syn]_s或[Syn]₂₀₀,均較黑潮或西北太平洋高。

Picoeukaryotes則與Synechococcus相似。[Eurk]_s,在南海(0.13±0.07×10⁴ Cells ml⁻¹)願著高於西北太平洋(0.08±0.03×10⁴ Cells ml⁻¹) (P < 0.01,圖4-30C) (表 4-12),而黑潮(0.09±0.02×10⁴ Cells ml⁻¹)介於兩者之間(圖4-30C)。[Eurk]₂₀₀,則在 南海(0.18±0.09×10⁴ Cells ml⁻¹)亦顯著高於西北太平洋(0.11±0.04×10⁴ Cells ml⁻¹) 與黑潮(0.09±0.035×10⁴ Cells ml⁻¹) (表4-12) (P < 0.01,圖4-30C),而西北太平洋 及黑潮之間差異不顯著(圖4-30C)。以上說明Picoeukaryotes在南海,不論[Eurk]_s或 [Eurk]₂₀₀,均較西北太平洋高。

(四)、生物量與營養鹽

以 CRITOP 及暖季三航次之生物量與環境因子進行簡單線性迴歸分析,發現 [Pro]s僅與[T Chl]s有顯著正相關(r = 0.30, n = 44, P < 0.05, 表 4-13A)。而[Syn]s 與[Eurk]s類似,二者皆與 D_{ni} 有顯著負相關(*Synechococcus*: r = -0.49, n = 44, P <0.01; Picoeukaryotes: r = -0.34, n = 44, P < 0.01, 表 4-13A),即 D_{ni} 越淺時,有 越高的生物量。另[Syn]s與[Eurk]s亦皆與 SST 呈顯著負相關(*Synechococcus*: r = -0.54, n = 45, P < 0.01; Picoeukaryotes: r = -0.70, n = 45, P < 0.01, 表 4-13A)。 由 SST與 D_{ni} 間之顯著正相關(r = 0.35, n = 44, P < 0.05, 表 4-13A),說明[Syn]s 與[Eurk]s與 SST之關係,可能包含 D_{ni} 影響的結果。而[Syn]s與[Eurk]s與[T Chl]s 間亦呈顯著正相關,此與 *Prochlorococcus*類似(*Synechococcus*: r = 0.51, n = 44, P < 0.01; Picoeukaryotes: r = 0.33, n = 44, P < 0.05, 表 4-13A)。

若以 200 m 平均生物量與環境因子間進行簡單線性迴歸分析,發現[Pro]₂₀₀與 D_{ni} 有顯著正相關係(r = 0.42, n = 44, P < 0.01,表 4-13B),與[N+N]₂₀₀有顯著負相 關(r = -0.61, n = 44, P < 0.01,表 4-13B)與[SRP]₂₀₀亦有顯著負相關(r = -0.57, n = 44, P < 0.01,表 4-13B)。

而[Syn]₂₀₀ 與環境因子間之關係,與[Pro]₂₀₀ 相反,與 D_{ni} 有顯著負相關係(r = -0.51, n = 44, P < 0.01,表 4-13B),與[N+N]₂₀₀ 有顯著正相關(r = 0.69, n = 44, P < 0.01,表 4-13B)與[SRP]₂₀₀ 亦有顯著正相關(r = 0.65, n = 44, P < 0.01,表 4-13B)。

而[Eurk]₂₀₀與環境因子間之關係,與[Syn]₂₀₀類似,其與 D_{ni}有顯著負相關係(r =-0.33, n=44, P<0.05,表 4-13B),與[N+N]₂₀₀有顯著正相關(r=0.47, n=44, P<0.01,表 4-13B)與[SRP]₂₀₀亦有顯著正相關(r=0.44, n=44, P<0.01,表 4-13B)。

第三節、內波、潮汐(內潮)

透過船上深納 EK500(38 K Hz)記錄,於航行其間遇到內波的測站為 CR910 的 IW1、IW3 測站(圖 3-12); CR1455 的 S1(圖 3-13)、S2(圖 3-14)測站。CR1455 的兩 內波測站有較長時間的停留採樣(時間序列採樣),資料較為完整,尤其 S2 測站之 內波最為明顯,以下內波結果描述以 CR1455 的 S2 測站為主。另 CRITOP 的 T1、 T2 等測站,則發現有明顯潮汐(內潮)現象。一併敘述如下

(一)、内波

1.CR1455 航次

(1)S2 測站

CR1455 航次 S2 測站到站日期為 2010 年 5 月 15 日(農曆 4 月 2 日), 恰逢大潮, 在採樣期間 15:40-23:10,透過 EK500 記錄觀察到內波前,內波通過時與內波通過 後水體變化情形(圖 3-14)。在內波通過前的 Cast 1 (15:40)至內波通過時之 Cast 2 (18:10)期間,水體呈穩定狀態(圖 3-14)。內波通過時(18:10, Cast 2),水體迅速大 幅變動(圖 3-14)。內波通過後 Cast 3 (18:40)至該測站採樣結束(21:40, Cast 4; 23:10, Cast 5),水體呈持續小幅上下起、伏。下述就內波發生前(15:40, Cast 1)、內波發 生時(18:10, Cast 2)及內波通過後(18:40-23:10, Cast 3-5)三個時段分別描述水文資 料、營養鹽及生物量變動。

A.水文資料

根據 CTD 測量資料(圖 4-31A),發現在內波前(15:40,Cast 1), CTD 下放(down cast,黑色實線)與上收(up cast,紅色虛線)之溫、鹽、密度相似(圖 4-31A)。但在內 波發生時(18:10,Cast 2),CTD 下放與上收所間隔之短時間內(約 25 分鐘)水溫、鹽 度、密度有明顯不同,以 26.0 ℃在 down cast 時位在 60 m,在 up cast 時在 113 m,水深差異 50 m(圖 4-31A)。內波通過後 Cast 3 (18:45,圖 4-31A),水溫 26.0℃在 down cast 時已回升至 41 m,且水體持續向上移動,在 up cast 時水溫 26.0℃位在 34 m (圖 4-31A)。在內波通過後的 21:40 至最後一次採樣(23:10)期間,水體仍持續性上下變動,其中 21:40(Cast 4)採樣時,水層水體正相下層移動(圖 4-31A),而 23:10(Cast 5) 最後一次採樣時,下層往上水層移動(圖 4-31A)。

若計算每個採樣時間點 up cast 的 0-150 m 平均鹽度,發現內波擾動過程中,

鹽度變化尺度為 34.22 - 34.41。在內波通過前(15:40, Cast 1)為 34.41,內波通過時 (18:10, Cast 2)降至 34.22(圖 4-31B),而造成平均鹽度下降原因,來自內波通過時, 將鹽度低的表水匯聚往深水層移動 (圖 3-14, Cast 2)。而內波通過後(16:40, Cast 3),平均鹽度回到 34.39(圖 4-31B)。而內波通過後,因水體仍持續小幅度上下變動, 在 21:40(圖 3-14, Cast 4)時,平均鹽度為 34.32(圖 4-31B), 23:10(圖 3-14, Cast 5) 時平均鹽度為 34.35(圖 4-31B)。

B.營養鹽

0-150 m 平均營養鹽隨時間的變動與鹽度變動趨勢相同。硝酸鹽濃度,在內波 發生前後 0-150 m 平均硝酸鹽濃度變動尺度為 0.50-6.67 μM,其中以內波前(6.67 μM)和內波通過時(0.50 μM)的變動程度最大(約降了 13.34 倍),其變情形如下:以 在內波通過前(15:40, Cast 1,圖 4-31C)為 6.67 μM,內波通過時(18:10, Cast 2, 圖 4-31C)降至 0.50 μM,原因為低濃度的表水硝酸鹽匯聚往深水。而內波通過後 Cast 3(18:45, 圖 4-31C)時,平均硝酸鹽濃度回到 5.95 μM,Cast 4 (21:40)時,為 3.79 μM (圖 4-31C)。Cast 5 (23:10) 時,為 4.53 μM(圖 4-31C)。

0-150 m 平均磷酸鹽濃度的變動和硝酸鹽濃度變動趨勢一致,在內波發生前後 0-150 m 平均磷酸鹽濃度變動尺度為 85-464 nM,其中以內波前(464 nM)和內波通 過時(85 nM)的變動程度最大(約降了 5.46 倍),其變情形如下:在內波通過前 (15:40, Cast 1,圖 4-31D)為 463 nM,內波通過時(18:10, Cast 2,圖 4-31D)降至 84 nM。而內波通過後 Cast 3 (18:45)時,回到 404 nM(圖 4-31D)。Cast 4 (21:40)時, 為 275 nM(圖 4-31D)。Cast 5 時(23:10)時,為 320 nM(圖 4-31D)。

C.生物量

浮游植物生物量的變動基本上與營養鹽相反,主要原因為二者垂直分佈之差 異,浮游植物生物量在有光層區生物量高於深水層,此與營養鹽垂直分佈趨勢相 反。以葉綠素 a 為整體浮游植物生物量之指標觀察時,發現在內波通過前(15:40, Cast 1), 0-150 m 平均葉綠素 a 濃度為 188 μg m⁻³(圖 4-31E), 內波通過時(18:10, Cast 2)升至 240 μg m⁻³(圖 4-31E), 約為內波前的 1.3 倍。而內波通過後(18:40, Cast 3), 平均葉綠素 a 濃度降回到 190 μg m⁻³(圖 4-31E)。在 Cast 4 (21:40)時,為 294 μg m⁻³(圖 4-31E)。在 Cast 5 (23:10)時,為 235 μg m⁻³(圖 4-31E)。

超微浮游植物生物量的變動與葉綠素 a 濃度變化趨勢類似,0-150 m 平均 *Prochlorococcus* 生物量,在內波通過前(15:40,Cast 1)為 3.63×10^4 Cells ml⁻¹(圖 4-31F),內波通過時(18:10,Cast 2) 升為 13.92×10^4 Cells ml⁻¹(圖 4-31F),約為內 波前的 3.8 倍。而內波通過後(18:40,Cast 3),*Prochlorococcus* 生物量降回到 5.69×10^4 Cells ml⁻¹(圖 4-31F)。在 21:40 (Cast 4),為 7.29×10^4 Cells ml⁻¹(圖 4-31F)。在 23:10(Cast 5),為 6.30×10^4 Cells ml⁻¹(圖 4-31F)。

0-150 m 平均 Synechococcus 生物量,在內波通過前(15:40,Cast 1)為 0.73×10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-31G),內波通過時(18:10,Cast 2) 升為 3.65 × 10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-31G),約為內波前的 5 倍。而內波通過後(18:40,Cast 3),降回到 1.40×10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-31G)。在 Cast 4 (21:40)時,為 1.99×10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-31G)。在 Cast 5 (23:10)時,為 1.51×10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-31G)。

0-150 m 平均 Picoeukaryotes 生物量,在內波通過前(15:40,Cast 1)為 0.39×10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-31H),內波通過時(18:10,Cast 2) 升為 0.73×10⁴ Cells ml⁻¹,約為內 波前的 1.8 倍(圖 4-31H)。而內波通過後(18:40,Cast 3),降回到 0.47×10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-31H)。在 Cast 4 (21:40) 時,為 0.81×10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-31H)。在 Cast 5 (23:10) 時,為 0.66×10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-31H)。

由上述結果可發現,CR1455 的 S2 測站所遇到的內波擾動,是個振幅大且變 動劇烈的內波。其內波發生前與內波發生時,平均 0-150 m 平均硝酸鹽濃度降了 13.34 倍、磷酸鹽濃度降了 5.46 倍、葉綠素 a 濃度上升了 1.26 被、Prochlorococcus 生物量上升了 3.84 倍、Synechococcus 生物量上升了 5 倍、Picoeukaryotes 生物量上 升了 1.84 倍。而內波通過前與內波通過後,平均 0-150 m 平均硝酸鹽濃度降了 1.12 倍、磷酸鹽濃度降了 1.15 倍、葉綠素 a 濃度上升了 1.01 被、Prochlorococcus 生物 量上升了 1.56 倍、Synechococcus 生物量上升了 1.92 倍、Picoeukaryotes 生物量上 升了 1.21 倍。

(2)S1 測站

與 S2 測站相似, CR1455 航次 S2 測站到站日期為 2010 年 5 月 16 日(農曆 4 月 3 日),透過 EK500 記錄到內波前,內波通過時與內波通過後水體變化情形(圖 3-13),該測站的內波約在 11:30 發生 (介於 Case 1 與 Case 2 之間),其垂直變動不 若 S2 測站(圖 3-14)。Cast 1(8:55)在內波通過前,當時水體相對穩定(圖 3-13)。EK500 記錄,到約 11:30 有一內波通過(圖 3-13)。Cast 2(12:45) 採樣在內波通過後,水體 仍呈現小幅變動。Cast 3(14:25)至 Cast 5 (17:35)採樣時,水體變動似乎趨於緩和。 以下就 S1 測站內波發生前(8:55, Cast 1)、內波剛通過後(12:45, Cast 2)及內波通 過後(14:25-17:35, Cast 3-5)三個時段分別描述其水文資料、營養鹽及生物量變動。

A 內波發生前 Cast 1 (8:55)

根據 CTD 測量資料(圖 4-32A),發現在內波通過前 Cast 1 (8:55),CTD 下放 (down cast,黑色實線)與上收(up cast,紅色虛線)時之水溫、鹽度、密度變化類似(圖 4-32A)。其 0-83m 平均鹽度為 34.31(圖 4-32B)、平均硝酸鹽為 1.06 μM(圖 4-32C)、 平均磷酸鹽為 106 nM(圖 4-32D)、平均 *Prochlorococcus* 生物量為 16.87 × 10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-32F)、平均 *Synechococcus* 生物量為 0.98 × 10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-32G)、平 均 Picoeukaryotes 生物量為 0.36 × 10⁴ Cells ml⁻¹(圖 4-32H)。

B內波剛通過後 Cast 2 (12:45)

根據 EK500 記錄,約 11:30 有一內波通過(圖 3-13)。而 Cast 2 (12:45)採樣是在 內波剛通過後,下放與上收間,短時間內(約 15 分鐘)水溫、鹽度、密度垂直分佈 有差異,顯示水體仍處於小幅變動(圖 4-32A)。與 S2 測站結果不同的是,此 Cast 1, 其 0-83 m 平均鹽度上升與平均營養鹽(下降)趨勢相反,與平均生物量(上升) 趨勢相類似。造成此現象之原因,主要因 up cast 採水時,水體移動方向改變之影 響,該 Cast 在剛上收時,水體為由深水層往上移動,CTD 鹽度升高,直至 CTD 上升至水深 49 m 採水時,水體開始變動,由上水層往深水層移動,因此 49 m 以 上採集之水樣,為上水層往深水層匯聚的低營養鹽、高生物量之上水層水體。故 以 0-83m 平均指標觀察時,發現在 Cast 2 (12:45)時,比起 Cast 1 而言,平均鹽度 升至 34.35 (圖 4-32B)、平均硝酸鹽濃度降至 0.51 μ M (圖 4-32C)、平均磷酸鹽濃度 降至 80 nM (圖 4-32D)、平均葉綠素濃度升至 236 μ g m⁻³ (圖 4-32E)、平均 *Prochlorococcus* 生物量升為 18.77 × 10⁴ Cells ml⁻¹ (圖 4-32F) 、平均 *Synechococcus* 生物量為 0.98 × 10⁴ Cells ml⁻¹ (圖 4-32G) 、平均 Picoeukaryotes 生物量升為 0.38 × 10⁴ Cells ml⁻¹ (圖 4-32H)。

C內波剛通過後Cast 3-5 (14:25-17:35)

Cast 3(14:25)至 Cast 5 (17:35)採樣時,水體上下變動似乎趨於緩和,各類水體 指標,在此期間變動較小。其中 0-83 m 平均鹽度由 Cast 2 (12:45)的 34.35 降至 Cast 3 (14:25)的 34.32,直至 Cast 4 (15:55)與 Cast 5 (17:35),平均鹽度均為 34.31(圖 4-32B;圖 3-13)。

0-83 m 平均硝酸鹽亦由 Cast 2 (12:45)時的 0.51 μM, 至 Cast 3(14:25)升到 1.41 μM, 至 Cast 4 (15:55) 時,降至 0.96 μM, Cast 5 (17:35) 時,為 0.99 μM (圖 4-32C; 圖 3-13)。0-83 m 平均磷酸鹽亦由 Cast 2 (12:45)時的 0.08 μM, 至 Cast 3 (14:25)回 到 0.14 μM, Cast 4 (15:55) 時,降至 0.12 μM, Cast 5 (17:35) 時,為 0.11 μM(圖 4-32D;圖 3-13)。

生物量的變動,以 0-83 m 平均葉綠素 a 濃度觀察,亦由 Cast 2 (12:45)時的 236 μg m⁻³,至 Cast 3 (14:25)降到 166 μg m⁻³, Cast 4 (15:55) 時,為 158 μg m⁻³。在 Cast 5 (17:35) 時為 150 μg m⁻³ (圖 4-32E;圖 3-13)。類似者, *Prochlorococcus* 亦由 Cast 2 (12:45)時的 18.77 × 10⁴ Cells ml⁻¹,降至 Cast 3 (14:25)的 17.59 × 10⁴ Cells ml⁻¹,至 Cast 4 (15:55) 時為 17.23 × 10⁴ Cells ml⁻¹, Cast 5 (17:35) 時為 17.17 × 10⁴ Cells ml⁻¹ (圖 4-32F;圖 3-13)。*Synechococcus* 亦由 Cast 2 (12:45)時的 0.91 × 10⁴ Cells ml⁻¹, 降至 Cast 3 (14:25)的 0.77 × 10⁴ Cells ml⁻¹, 至 Cast 4 (15:55) 時,為 0.69 × 10⁴ Cells ml⁻¹, Cast 5 (17:35) 時為 0.61 × 10⁴ Cells ml⁻¹ (圖 4-32G;圖 3-13)。Picoeukaryotes 則由 Cast 2 (12:45)時的 0.38 × 10⁴ Cells ml⁻¹,降至 Cast 3 (14:25)、Cast 4 (15:55) 時, $\geq 0.23 \times 10^4$ Cells ml⁻¹,在 Cast 5 (17:35) 時為 0.21 × 10⁴ Cells ml⁻¹ (圖 4-32H;圖 3-13)。

由上述結果可發現,CR1455的S1 測站所遇到的內波擾動,相較於同航次S2 測站而言,其振幅和擾動程度相對小。其內波發生前與內波發生時,平均0-83 m 平均硝酸鹽濃度降了2.07倍、磷酸鹽濃度降了1.32倍、葉綠素 a 濃度上升了1.29 被、Prochlorococcus 生物量上升了1.11倍、Synechococcus 生物量下降了1.08倍、 Picoeukaryotes 生物量上升了1.06倍。而內波通過前與內波通過後,平均0-150 m 平均硝酸鹽濃度上升了1.33倍、磷酸鹽濃度上升了1.27倍、葉綠素 a 濃度下降了 1.10倍、Prochlorococcus 生物量上升了1.04倍、Synechococcus 生物量下降了1.27 倍、Picoeukaryotes 生物量下降了1.58倍。

2.潮汐(內潮)

CRITOP 的 T1 和 T2 測站除了是黑潮測站外,T2 測站停留期間(10 月 5-7 日) 受 Parma (圖 3-9)颱風影響,並有內潮現象,雖然缺乏 EK500 資料。由(A) CTD 下 放(down cast,實線)、上收(up cast,虛線)時記錄之溫度、鹽度、密度資料(圖 3-11A); (B)0-200 m 平均鹽度(圖 3-11B);(C)0-200 m 平均營養鹽濃度(圖 3-11C-D),均發現 呈現 24 小時週期性(全日潮)上下起伏之規律現象。因內潮為潮汐作用,受潮汐週 期影響,其水體變動不像非線性內波,產生頻率短且振幅大。內潮測站中以 T2 測 站的記錄時間較長。

(1) T2 測站 (2009 年 10 月 5-7 日, 農曆 8 月 17-19 日)

以 CTD 下放(down cast, 黑色實線)與上收(up cast, 紅色虛線)時之水溫、鹽度、 密度變化資料 (圖 3-11A),並對照 0-200 m 平均鹽度資料(圖 3-11B)觀察,發現在 10月5日的6:50至12:00期間,水體由深水層往上水層移動(圖3-11A),其0-200m 平均鹽度亦由 10 月 5 日 6:50 的 34.56 上升至 12:00 的 34.59, 而 18:00 的 CTD down cast 與 up cast, 並無明顯變化, 其 0-200 m 平均鹽度為 34.58(圖 3-11B)。至 10 月 6 日的 0:00 至 6:00 期間,水體由上水層往深水層移動(圖 3-11A),其 0-200 m 平均鹽 度亦由 10 月 6 日 0:00 時的 34.58 降至 6:00 時的 34.57(圖 3-11B),此為一日週期變 動。第二日周期變動由 10 月 6 日 6:00 時開始至 18:00 水體由深水層往上移動(圖 3-11A), 其 0-200 m 平均鹽度在 12:00 為 34.61, 18:00 為 34.62, 於 10 月 7 日 0:00 開始改由上水層往深水層移動(圖 3-11A),其 0-200 m 平均鹽度在 0:00 為 34.59, 6:00 為 34.56, 12:00 為 34.58(圖 3-11B)。由於潮汐週期並非正好 24 小時變動,根 據 Cai et al. (2002)以數學模式推估該海域潮汐週期約 25.8 小時。根據 Jan et al. (2008) 的研究,該海域受地形、洋流(黑潮)、季節因子(如季風),使該海域同時會有全日 潮和半日潮交錯現象發生(又稱斜壓潮(baroclinic tides)),加上該航次採樣以固定時 間間隔,每6小時採樣一次,故與實際潮汐週期,可能略有誤差。以10月5日的 6:50 至 10 月 6 日的 6:00 為第一個日週期變動,以 10 月 6 日的 6:00 至 10 月 7 日 的 6:00 為第二個日週期變動。

0-200 m 平均營養鹽隨時間變動的趨勢,與 0-200 m 平均鹽度趨勢相類似,觀 察[N+N]₂₀₀ 的日週期變動,發現在 10 月 5 日的 6:50 至 12:00 期間,水體由深水層 往上移動時,[N+N]₂₀₀ 亦由 6:50 的 1.28 μM 上升至 12:00 的 1.43 μM。當 10 月 5 日的 18:00 至 10 月 6 日 6:00 期間,水體由上水層往深層移動時,[N+N]₂₀₀ 則由 18:00 的 1.29 μM 降至 10 月 6 日 0:00 的 1.24 μM 及 6:00 的 0.92 μM。而第二日週期的 12:00,因部分水層缺乏資料,不計算其[N+N]₂₀₀,但由第二日週期的 18:00 至 10 月 7 日 6:00 期間,水體由上水層往深層移動時,其與 0-200 m 平均鹽度趨勢相似, 由 18:00 的 1.46 μM 降至 10 月 7 日 0:00 的 1.35 μM 及 6:00 的 1.29 μM。10 月 7 日 的 12:00 則回升至 1.41 μM(圖 3-11C)。

76

[SRP]₂₀₀ 的週期變動趨勢與[N+N]₂₀₀ 相似。10 月 5 日的 6:50 至 12:00 期間,水 體由深水層往上移動時,[SRP]₂₀₀ 亦由 6:50 的 0.12 μM 上升至 12:00 的 0.13 μM。 當 10 月 5 日的 18:00 至 10 月 6 日 6:00 期間,水體由上水層往深層移動時,[SRP]₂₀₀ 則由 18:00 的 0.13 μM 降至 10 月 6 日 0:00 的 0.12 μM 及 6:00 的 0.08 μM。而第二 日週期的 6:00 至 12:00,水體由深水層往上層移動期間,[SRP]₂₀₀ 由 6:00 的 0.08 μM 上升至 12:00 的 0.13 μM, 10 月 6 日 18:00 至 10 月 7 日 6:00,水體由上水層往深 層移動期間,[SRP]₂₀₀與 0-200 m 平均鹽度趨勢相似,由 18:00 的 0.14 μM 降至 10 月 7 日 0:00 及 6:00 的 0.12 μM。10 月 7 日的 12:00 則回升至 0.14 μM (圖 3-11C)。

生物性參數隨時間變動趨勢,受生物垂直分佈趨勢影響,不論以[T Chl]200、 [Pro]200、[Syn]200、[Eurk]200觀察其隨時間變化之趨勢(圖 3-11E-H),與 0-200 m 平 均鹽度、[N+N]200、[SRP]200 間有明顯不同,且似乎無週期規律。但若將生物量以 垂直剖面圖方式觀察,則可發現其變動仍是與水體上下變動有關。

觀察葉綠素 a 垂直分佈隨時間之變化(圖 4-33A),發現在第一個日週期的 6:50 至 12:00,水體由深水往上移動時(圖 3-11A),葉綠素 a 最大值(Chl a Max)亦由深水 往上移動。而第一日週期的 18:00 至 10 月 6 日 6:00,水體由上水層往深水移動時, 葉綠素 a 最大值在 18:00 至 0:00 時明顯往深水層移動,而 6:00 時原在 80 m 的葉 綠素 a 最大值(Chl a Max),往深水層分佈致 150 m 的葉綠素 a 濃度明顯增加(圖 4-33A)。第二日週期的葉綠素 a 濃度濃度亦與第一日週期變化相似,於 12:00 至 18:00 水體由深水層往上移動時(圖 3-11A),葉綠素 a 最大值亦往上水層移動(圖 4-33A),當 0:00 至 6:00 水體由上水層往深水移動時,葉綠素 a 最大值亦由上水層 往深水層移動。

Prochlorococcus 生物量垂直分佈隨時間變化的趨勢,與葉綠素 a 垂直分佈隨時間變化趨勢相似。在第一個日週期的 6:50 至 12:00,水體由深水往上移動時(圖 3-11A), Prochlorococcus 生物量最大值亦由深水往上移動 (圖 4-33B)。而第一日週期的 18:00 至 10 月 6 日 6:00,水體由上水層往深移動時,在 18:00 至 0:00 時 Prochlorococcus 生物量最大值明顯往由上水層往深水移動,而 6:00 時原在 80 m 的 最大值 Prochlorococcus,其生物量減少,而100 m的 Prochlorococcus 生物量明顯 增加(圖 4-33B),為 Prochlorococcus 往深水層分佈之證據。第二日週期的 Prochlorococcus 生物量垂直分佈隨時間變化趨勢與第一日週期相似。雖然於12:00 至 18:00 水體由深水層往上移動時(圖 3-11A),Prochlorococcus 生物量最大值深度 未改變,但生物量變多,生物量最大值深度以下水層的 Prochlorococcus 生物量減 少,顯示 Prochlorococcus 生物量由深水層往上水層匯集(圖 4-33B)。當 0:00 至 6:00 水體由上水層往深水移動時,Prochlorococcus 生物量最大值亦由上水層往深水移 動。

Synechococcus 變動趨勢相似。在第一個日週期的 6:50 至 12:00,水體由深水 往上移動時(圖 3-11A),Synechococcus 生物量最大值亦由深水往上移動(圖 4-33C)。而第一日週期的 18:00 至 10 月 6 日 6:00,水體由上水層往深水移動時, 在 18:00 至 0:00 時 Synechococcus 生物量最大值由上水層往深水移動,而 6:00 時 原 Synechococcus 在 80 m 最大值深度的生物量減少,而 100 m 的生物量略微增加 (圖 4-33C)。第二日週期的 Synechococcus 生物量垂直分佈隨時間變化趨勢與第一 日週期相似。雖然於 12:00 至 18:00 水體由深水層往上水層移動時(圖 3-11A), Synechococcus 生物量最大值深度亦往上水動。當 0:00 至 6:00 水體由上水層往深水

Picoeukaryotes 變動趨勢亦相似。在第一個日週期的 6:50 至 12:00,水體由深 水往上移動時(圖 3-11A),Picoeukaryotes 生物量最大值亦由深水往上移動(圖 4-33D)。第一日週期的 18:00 至 10 月 6 日 6:00,水體由上水層往深水移動時,在 18:00 至 0:00 時 Picoeukaryotes 生物量最大值由上水層往深水層移動,但 6:00 時 Picoeukaryotes 生物量減少,與其他生物參數有明顯不同。而第二日週期的 Picoeukaryotes 生物量垂直分佈隨時間變化趨勢與第一日週期相似。雖然於 12:00 至 18:00 水體由深水層往上移動時(圖 3-11A),Picoeukaryotes 生物量最大值深度亦 往上移動(圖 4-33D)。但當 0:00 至 6:00 水體由上水層往深水移動時,Picoeukaryotes 生物量最大值卻無改變,且生物量增加。 由上述結果可發現,相較於 CR1455 的內波擾動,CRITOP 的內潮擾動,其振幅和擾動程度相對較小,其中 CRITOP 的 T2 測站,0-200 m 平均鹽度變動範圍在 34.56-34.62,其變動趨近於 1 倍,即無變動。0-200 m 平均硝酸鹽變動範圍在 0.92-1.46 μ M,即採樣期間最大硝酸鹽變動差異約 1.59 倍。0-200 m 平均磷酸鹽變 動範圍在 84-143 nM,即採樣期間最大磷酸鹽變動差異約 1.74 倍。0-200 m 平均葉 線素 a 變動範圍在 0.086-0.123 mg m⁻³,即採樣期間最大葉綠素 a 變動差異約 1.43 倍。而 *Prochlorococcus* 的變動動範圍在 8.0077-10.7708 × 10⁴ Cells ml⁻¹,即採樣期 間最大變動差異約 1.35 倍。*Synechococcus* 的變動動範圍在 0.0922-0.1769 × 10⁴ Cells ml⁻¹,即採樣期間最大變動差異約 1.92 倍。Picoeukaryotes 的變動動範圍在 0.0670-0.1606 × 10⁴ Cells ml⁻¹,即採樣期間最大變動差異約 2.40 倍。

以上結果顯示,雖然內波與內潮都會影響水體營養鹽的垂直分佈、生物量垂 直分佈受物理作用在水體內上下移動。但內波的作用力(振幅)較內潮大,且作 用時間短。雖然本研究之結果無法解明內波這種擾動對生物造成何種明確影響。 但其短時間內讓生物經歷劇烈的垂直變動,可能對生物有淺在直、間接的影響。 內潮作用,相較於內波而言,影響較為緩和。另外在內波的影響下,深水營養鹽 易經力擾動、擴散作用往上水傳遞,相較下內潮造成深水營養鹽往上水層擴散能 力較內波小。故此營養鹽擴散是否會對超微浮游植物造成不同程度上的影響,有 待後續研究解明之。

(2) T1 測站(2009 年 10 月 1-2 日, 農曆 8 月 13-14 日)

T1 測站的水文變動頻率,為每6 個小時水體往上或往下(半日週期)移動。以 該測站 CTD up cast 記錄之溫度、鹽度、密度變化作為水體上下移動指標(圖 4-34A),發現在10月1日18:50至10月2日0:00時,水體由深水層往上移動, 而三類營養鹽(圖 4-34B)及三類生物量(圖 4-34C)之垂直分佈亦由深水層往上移 動。10月2日0:00至6:00,溫度、鹽度、密度由上水層往深水移動(圖 4-34A), 此時三類營養鹽(圖 4-34B)及三類生物量(圖 4-34C)之垂直分佈亦由上水層往深水 移動。而10月2日6:00至12:00,溫度、鹽度、密度由深水層往上移動(圖4-34A), 此時三類營養鹽(圖 4-34B)及三類生物量(圖 4-34C)之垂直分佈亦由深水層往上移動。

由上述結果可發現, CRITOP 的 T1 測站, 0-200 m 平均鹽度變動範圍在 34.15-34.63, 其變動約 1.01 倍, 即幾乎無變動。0-200 m 平均硝酸鹽變動範圍在 0.72-1.21 μM, 即採樣期間最大硝酸鹽變動差異約 1.68 倍。0-200 m 平均磷酸鹽變 動範圍在 85-108 nM, 即採樣期間最大磷酸鹽變動差異約 1.27 倍。0-200 m 平均葉 線素 a 變動範圍在 0.114-0.126 mg m⁻³, 即採樣期間最大葉錄素 a 變動差異約 1.11 倍。而 *Prochlorococcus* 的變動動範圍在 9.1061-12.8813 × 10⁴ Cells ml⁻¹, 即採樣期 間最大變動差異約 1.41 倍。*Synechococcus* 的變動動範圍在 0.1553-0.1950 × 10⁴ Cells ml⁻¹, 即採樣期間最大變動差異約 1.26 倍。Picoeukaryotes 的變動動範圍在 0.1089-0.1481 × 10⁴ Cells ml⁻¹, 即採樣期間最大變動差異約 1.36 倍。

與 T2 測站不同的是,此測站的潮汐週期頻率類似半日潮週期,且水體的垂直<變動尺度比 T2 測站來得大。

第四節、影響三類超微浮游植物生長率之生態因子(培養實驗)

捕食者、添加 FeCl3 及添加 NH4Cl 培養實驗,進行之航次、培養當天日出、 日落時間、培養測站、培養總時間、採樣時間與採樣時水體溫度(Temp)、混合層深 度(D_{mi})、硝酸躍層深度(D_{ni})、硝酸鹽濃度([N+N])、磷酸鹽濃度([SRP])等,列於表 3-3。

培養實驗之結果以四構面進行探討,分別為(一)「Control」組生長率與環境因 子(光線、營養鹽等)間之關係,以Botton up control 機制,探討可能會影響「Control」 組生長率之環境因子;(二)捕食者效應,以Top down control 機制,探討捕食實驗 之結果;(三)影響三類超微浮游植物之因子,主要以複迴歸分析,探討三類超微 浮游植物生長率受 Botton up control 機制及 Top down control 機制之影響;(四)添加 培養實驗,主要探討添加 FeCl₃ 及添加 NH₄Cl 培養實驗之結果。 (一)、環境因子

環境因子主要在探討,「K<2μm」與環境因子間之關係。 1.光線

為釐清白天光線強弱是否對培養實驗之超微浮游植物生長率造成影響,將 CR1455、CR1487及CR950三類超微浮游植物在白天期間之生長率與培養期間平 均日照強度(10^{3} µE m² S⁻¹)進行簡單迴歸及線性相關分析。結果發現,暖季時 *Prochlorococcus* 白天生長率與平均日照度間呈顯著負相關(CR1455:r=-0.37, n= 32, P < 0.05; CR1487:r=-0.82, n = 12, P < 0.01,圖 4-35),但冷季的CR950 則無顯著相關(圖 4-35)。表示在暖季光線強時,*Prochlorococcus* 白天生長率就較 差,此現象在冷季不明顯。若將三航次資料合併一起進行分析,則發現 *Prochlorococcus* 白天生長率與平均日照度之間仍具有顯著負相關(r=-0.29, n = 63, P < 0.05,圖 4-35)。若以全天(白天+夜間)生長率(K<2µm) 與培養期間白天平均 光照強度間進行分析,結果與以上相同。在暖季航次呈顯著負相關(CR1455:r = -0.48, n = 32, P < 0.01; CR1487:r = -0.82, n = 12, P < 0.01,圖 4-36),在冷 季 CR950則無顯著相關(圖 4-36)。在三航次資料合併一起進行分析時,亦呈現顯 著負相關(r = -0.40, n = 63, P < 0.01,圖 4-36)。

Synechococcus 在各別航次中,其白天生長率(K<2 μ m-白天) 與培養期間白天平 均光照強度之間均無顯著相關性(圖 4-37),但若將三航次資料合併一起進行分析, 則發現具有顯著負相關(r=-0.44, n=63, P<0.01,圖 4-37)。此結果顯示,當合 併不同季節來觀察時,光強度變化範圍較大,則可看出其間之相關性。以 Synechococcus 全天(白天+夜間)生長率(K<2 μ m)與培養其間白天平均光照強度間進 行分析,則發現只有 CR1455 與平均光照度有顯著負相關(r=-0.35, n=32, P< 0.05,圖 4-38),其他二航次則關係不顯著(圖 4-38),若合併三航次資料觀察時,其 與光線間有顯著負相關(r=-0.40, n=63, P<0.01,圖 4-38)。綜合以上結果顯示, Synechococcus 生長率與光線間的關係,需在季節尺度上,光線變化範圍較大時才 顯現出負相關,各別航次分析則不明顯。

Picoeukaryotes 則不論以白天生長率或全天生長率與培養期間白天平均光照度 間進行分析,結果皆顯示僅在 CR1487 呈顯著負相關(白天生長率:r = -0.76, n = 12, P < 0.01, 圖 4-39; 全天生長率:r = -0.70, n = 12, P < 0.05, 圖 4-40), 其他 二航次各別分析或三航次合併分析結果皆與光照度無關(圖 4-40)。

2.營養鹽

 $(1) \cdot NO_2 + NO_3$

Prochlorococcus 全天生長率與培養前水體[N+N]間的關係,在 CR1455 及 CR950 航次中,或三航次合併時皆不顯著(圖 4-41)。但在 CR1487 時有顯著負相關 (r=-0.76, n=12, P<0.01,圖 4-41)。CR1487 的[N+N]與光線間有顯著正相關(r= 0.96, n=12, P<0.01,表 4-14),即[N+N]低的培養測站,培養當天平均日照度也 正好相對較低。顯示 *Prochlorococcus* 全天生長率在 CR1487 與[N+N]之負相關,其 實是[N+N]與光線因子間之負相關所致。

Synechococcus 全天生長率與培養前水體的[N+N]間之關係,只在 CR950 航次 中有顯著正相關(r=0.65, n=19, P<0.01,圖 4-42),其他二個暖季航次,[N+N] 低且變化範圍小,關係不顯著。三個航次合併時則有極顯正相關(r=0.59, n=63, P<0.01,圖 4-42),即 Synechococcus 在冷季[N+N]較高時有較高生長率(圖 4-42)。

Picoeukaryotes 全天生長率與培養前水體的[N+N]間的關係,在 CR1455 及 CR950 皆不顯著(圖 4-43),在 CR1487 航次中,呈極顯著負相關(r = -0.75, n = 12, P < 0.01, 圖 4-43)。然 CR1487 之負相關,如前所述,可能是該航次[N+N]與光線 間有顯著正相關(r = 0.96, n = 12, P < 0.01, 表 4-14)所致。當三航次合併時,則 Picoeukaryotes 全天生長率與[N+N]間呈顯著正相關(r = 0.27, n = 63, P < 0.05, 圖 4-43)。

(2) \cdot SRP

Prochlorococcus 全天生長率與培養前水體[SRP]間的關係,發現在暖季兩個別 航次中無顯著相關(圖 4-44)。而在 CR950 航次有顯著正相關(r = 0.49, n= 19, P < 0.05,圖 4-44)。三航次合併分析時亦無顯著相關(圖 4-44)。CR950 為冷季航次比 其他兩個暖季航次,其光線強度為所有航次中最低者(CR950^a:0.429±0.344 10³ μE⁻² S⁻¹; CR1487^a: 0.570±0.361 10³ μE⁻² S⁻¹; CR1455^b: 1.102±0.607 10³ μE⁻² S⁻¹)(圖 4-7A),但其[SRP]為所有航次中最高者(CR950^a: 59.8±23.7 nM; CR1487^b: 20.8± 4.1 nM; CR1455^c: 35.3±16.1 nM)(圖 4-10F)。CR950 之[SRP]與[N+N]、溫度間均 有顯著關係(表 4-13),可能因此造成冷季 *Prochlorococcus* 全天生長率與[SRP]間的 顯著正相關,也可能包含其他與冷季共變的環境因子的影響。

Synechococcus 全天生長率與[SRP]間的關係,可發現除 CR1455 航次不顯著(圖 4-45),其他二航次皆呈極顯著正相關(CR1487:r=0.80,n=12, P<0.01;CR950: r=0.79,n=19, P<0.01,圖4-45),但磷酸鹽濃度在 CR1487 與溫度有顯著相關 (表 4-14);在 CR950 則與硝酸鹽濃度和溫度有顯著相關(表 4-13),故 CR1487 與 CR950 Synechococcus 全天生長率與[SRP]間的顯著正相關,亦可能與上述共變環境 因子有關。將三航次合併分析時,亦與[SRP]有顯著正相關(r=0.44,n=63,P< 0.01,圖4-45),即磷酸鹽濃度越高時,Synechococcus 生長越快。

Picoeukaryotes 全天生長率與[SRP]間的關係,發現僅 CR1455 有顯著負相關 (CR1455:r=-0.45,n=12, P<0.05,圖4-46),三航次合併分析時,與[SRP]間 無顯著相關,而 CR1455 之[SRP]與溫度和 PNF_{2μm} 有顯著負相關(表 4-15),所以造 成其負相關可能分別與此兩個因子及其共同影響有關。

(二)、捕食者

1.Prochlorococcus

原假設在「Control」組內無捕食者。但實驗後以顯微鏡檢視觀察「Control」 組內水體樣品,發現有體型(SED)大小約1-2μm 之 nanoflagellates(圖 4-47)。加上 本研究結果顯現,培養其間 *Prochlorococcus* 生物量在夜晚有明顯減少現象(圖 4-48),相對的 Synechococcus 與 Picoeukaryotes 則無此等夜間生物量減少之現象(圖 4-49、圖 4-50)。似乎顯示「Control」組內有 Prochlorococcus 之捕食者存在。

將 Prochlorococcus 夜間生長率(K_{<2} μm-夜晚)與「Control」組中各類型 nanoflagellates(PNF_{<2}μm、PNF₂₋₅μm、HNF_{<2}μm、HNF₂₋₅μm)進行簡單迴歸及線性相關 分析,發現 CR1455 的 Prochlorococcus 夜間生長率與 PNF_{<2}μm 有顯著負相關(r = -0.57, n = 32, P < 0.01, 圖 4-51); CR1487 則是與 HNF_{<2}μm 有顯著負相關(r = -0.76, n = 12, P < 0.01, 圖 4-52); 但 CR950 卻是與 HNF_{<2}μm 有顯著正相關(r = 0.57, n = 12, P < 0.01, 圖 4-52); 但 CR950 的 Prochlorococcus 夜間生長率與與 HNF_{<2}μm 有顯 著正相關難以確切解釋,但 CR1455 與 CR1487 雨航次夜間顯著負成長(CR1455 達 -5d⁻¹; CR1487 達 -3d⁻¹)與這些體型小於 2 µm 之捕食者數量有關。另外,為釐清夜 間的負成長是否受白天平均光照強度太強所致,將 Prochlorococcus 夜間生長率與 培養當天白天平均光照強度進行簡單迴歸及線性相關分析,發現僅有 CR950 航次 有顯著負相關(n = 12, r = -0.54, P < 0.05, 圖 4-54),其他雨航次或三航次合併資 料均無相關。

綜合上述結果,瞭解估計 Prochlorococcus 被捕食率時,必須考量「Control」 組內已存在體型小於 2 µm 的 nanoflagellates,會影響 Prochlorococcus 生長率,因 此「Control」組內 Prochlorococcus 生長率是被低估的。因此當計算 Prochlorococcus 被捕食率與 nanoflagellates 豐量間之關係時,若照原設計以「Control」組生長率(K<2 µm)減去「< 10 µm」組生長率(K<10 µm)代表被捕食率,此被捕食率相對應之 nanoflagellates 數量則應為「< 10 µm」組減去「Control」組者。按此方式計算,發 現僅在 CR950 之 Prochlorococcus 被捕食率與 HNF<2 µm 間有顯著負相關(r = -0.46, n = 19, P < 0.05,圖 4-55).其他二航次或三航次合併資料皆無顯著關係。推測或 許「< 10 µm」組中的捕食者,對 Prochlorococcus 而言已含有多個階層捕食效應, 食物鏈關係複雜不易呈現簡單直線關係。

2.Synechococcus

相對於 Prochlorococcus, Synechococcus 在「Control」組中無論白天、夜晚皆 無明顯負成長(被捕食)現象(圖 4-49)。分析 Synechococcus 在「Control」組中的全 天生長率與「Control」組中各類型 nanoflagellates 數量間之關係(圖 4-56),發現僅 在 CR1487 時, Synechococcus 全天生長率與 PNF_{<2 µm} 有顯著負相關(r = -0.90, n = 12, P < 0.01,圖 4-56)。另外在 CR950 卻呈現與 HNF_{<2 µm} 有顯著正相關(r = 0.64, n = 19, P < 0.01,圖 4-56);CR1455 則與各類 nanoflagellates 數量間皆無相關(圖 4-56)。合併三航次資料觀察,則發現其與 PNF_{<2 µm} 及 PNF_{2-5 µm} 皆呈現顯著正相關 (PNF_{<2 µm}: r = 0.42, n = 63, P < 0.01; PNF_{2-5 µm}: r = 0.48, n = 63, P < 0.01, 圖 4-56),但 PNF_{<2 µm} 以及 PNF_{2-5 µm} 數量又與[N+N]、[SRP]間有極顯著正相關且與光 線有極顯著負相關(表 4-16),故上述與 nanoflagellates 間之正相關係亦可能和其他 與 nanoflagellates 共變之環境因子有關。

若將 Synechococcus 被捕食率(G_{10 µm})與「< 10 µm」組減去「Control」之各類 型 nanoflagellates 數量進行簡單迴歸及線性相關分析,發現在 CR950 航次中 Synechococcus 被捕食率(G_{10 µm})與 PNF_{2-5 µm}有顯著正相關(r = 0.49, n = 19, P < 0.05,圖 4-57),與 HNF_{5-10 µm} 有極顯著負相關(r = - 0.62, n = 19, P < 0.01,圖 4-57)。 而 CR950 的 PNF_{2-5 µm}與 HNF_{5-10 µm} 間則有顯著負相關(r = - 0.53, n = 19, P < 0.05, 圖 4-58),顯示 PNF_{2-5 µm} 可能為 Synechococcus 的第一階捕食者,而 HNF_{5-10 µm} 為第 二階捕食者,捕食 PNF_{2-5 µm} 。以三航次資料合併觀察,亦可發現 Synechococcus 被捕食率(G_{10 µm})與 PNF_{2-5 µm} 間亦有顯著正相關(r = 0.30, n = 63, P < 0.05,圖 4-57)。綜合上述結果,推測 Synechococcus 的一階捕食者可能是 2-5µm 之色素型 nanoflagellates。但為何未在所有航次皆呈現此現象,是否因 CR1455 與 CR1487 中 PNF_{2-5 µm} 數量之範圍最大值相對較少(範圍較小),統計上檢測不出所致?仍待未來 更深入研究。

3. Picoeukaryotes

Picoeukaryotes 在「Control」組中的全天生長率與「Control」組中各類型

nanoflagellates 數量間之關係(圖 4-59),僅發現 CR1455 中 Picoeukaryotes 全天生長 率與 PNF_{<2 µm} 有顯著負相關(r = -0.37, n = 32, P < 0.05, 圖 4-59)。CR950 中 Picoeukaryotes 全天生長率則與 PNF_{<2 µm} 以及 PNF_{2-5 µm} 有顯著正相關(PNF_{<2 µm}: r = 0.66, n = 12, P < 0.01; PNF_{2-5 µm}: r = 0.55, n = 12, P < 0.05, 圖 4-59); 而在 CR1487 其生長率則與各類型 nanoflagellates 數量皆無相關。以三航次合併資料觀 察,則發現其生長率與 PNF_{<2 µm} 以及 PNF_{2-5 µm} 有顯著正相關(PNF_{<2 µm}: r = 0.32, n = 63, P < 0.05; PNF_{2-5 µm}: r = 0.32, n = 63, P < 0.05, 圖 4-59)與 HNF_{2-5 µm} 有顯 著負相關(r = -0.26, n = 63, P < 0.05), 但 PNF_{<2 µm} 以及 PNF_{2-5 µm} 或量 又與硝酸 鹽間有極顯著正相關,與溫度間有顯著負相關(表 4-16),故生長率與 PNF_{<2 µm} 及 PNF_{2-5 µm} 間之正相關,可能和與 nanoflagellates 數量共變之環境因子有關。

將 Picoeukaryotes 被捕食率($G_{10 \ \mu m}$)與「< 10 μm 」組減去「Control」之各類型 nanoflagellates 數量進行簡單迴歸及線性相關分析,發現在 CR1455 與 CR1487 二 航次,Picoeukaryotes 的被捕食率($G_{10 \ \mu m}$)與 HNF_{2-5 \mumber m}有顯著正相關(CR1455:r = 0.46, n = 32, P < 0.05; CR1487:r = 0.59, n = 12, P < 0.05, 圖 4-60)。在 CR1455 其被捕食率亦與 HNF_{5-10 \mumber m}顯著正相關(r = 0.37, n = 32, P < 0.05, 圖 4-60),在冷 季以及三航次合併資料中則與各類型 nanoflagellates 皆無顯著相關(圖 4-60)。

(三) 比較三類超微浮游植物對 nanoflagellates 碳生物量來源之相對重要性

1.All data

Prochlorococcus 在暖季 CR1455 航次中,其生產率平均為-14.97 μg C L⁻¹ h⁻¹, 被攝食率平均為-37.92 μg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 58.01%碳生物 量被 nanoflagellates 攝食(圖 4-65);其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.44, n = 32, P = 0.00,圖 4-66)。而 CR1487 航次的生產率平均為 488.53 μg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為-34.83 μg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 0.9%碳生 物量被 nanoflagellates 攝食。而冷季 CR950 航次則其生產率平均為 16.22 μg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為 6.42 μg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 4.40%碳生 物量被 nanoflagellates 攝食。若三航次合併資料,則其生產率平均為 90.34 μ g C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為-23.96 μ g C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 19.05 % 碳生物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.12, n = 63, P = 0.005,圖 4-66)。

Synechococcus 在暖季 CR1455 航火中,其生產率平均為-8.47 µg C L⁻¹ h⁻¹,被 攝食率平均為 18.82 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 19.44 %碳生物 量被 nanoflagellates 攝食(圖 4-65);其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.17, n = 32, P = 0.020,圖 4-66)。而 CR1487 航火的生產率平均為 214.24 µg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為-1.46 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 12.25 %碳 生物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.49, n = 12, P = 0.012,圖 4-66)。而冷季 CR950 航次則其生產率平均為 1008.02 µg C L⁻¹ h⁻¹, 被攝食率平均為 84.61 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 11.48 %碳生 物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.33, n = 19, P = 0.010,圖 4-66)。若三航次合併資料,則其生產率平均為 340.51 µg C L⁻¹ h⁻¹, 被攝食率平均為 34.80 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 11.55 %碳生 物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.30, n = 63, P = 0.000,圖 4-66)。

Picoeukaryotes 在暖季 CR1455 航次中,其生產率平均為-115.15 µg C L⁻¹ h⁻¹, 被攝食率平均為-72.39 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 62.72 %碳生 物量被 nanoflagellates 攝食(圖 4-65);其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.75, n = 32, P = 0.000,圖 4-66)。而 CR1487 航次的生產率平均為-175.76 µg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為-200.26 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 112.43 % 碳生物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.94, n = 12, P = 0.000,圖 4-66)。而冷季 CR950 航次則其生產率平均為-137.35 µg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為-163.75 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 27.18 % 碳生物量被 nanoflagellates 攝食。若三航次合併資料,則其生產率平均為-133.39 µg CL⁻¹h⁻¹,被攝食率平均為-124.29 µg CL⁻¹h⁻¹,每生產1單位的碳生物量中,約43.20 %碳生物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.10, n = 63, P = 0.011, 圖 4-66)。

2.生產率刪除負值者,被攝食率為負值者化整為零

Prochlorococcus 在暖季 CR1455 航次中,其生產率平均為 143.99 μg C L⁻¹ h⁻¹, 被攝食率平均為 49.02 μg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 39.28 %碳生 物量被 nanoflagellates 攝食(圖 4-67)。而 CR1487 航次的生產率平均為 488.53 μg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為 70.50 μg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 16.55 % 碳生物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.43, n = 12, P = 0.021,圖 4-68)。而冷季 CR950 航次則其生產率平均為 38.24 μg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為 11.71 μg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 24.27 % 碳生物量被 nanoflagellates 攝食。若三航次合併資料,則其生產率平均為 200.62 μg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為 41.86 μg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 19.51 %碳生物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.09, n = 45, P = 0.041,圖 4-68)。

Synechococcus 在暖季 CR1455 航次中,其生產率平均為 50.78 µg C L⁻¹ h⁻¹,被 攝食率平均為 29.67 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 80.28 %碳生物 量被 nanoflagellates 攝食(圖 4-67);其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.46, n = 20, P = 0.001,圖 4-68)。而 CR1487 航次的生產率平均為 214.24 µg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為 39.53 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 21.39 % 碳生物量被 nanoflagellates 攝食。而冷季 CR950 航次則其生產率平均為 1202.49 µg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為 123.72 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 13.45 %碳生物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.46, n = 16, P = 0.000,圖 4-68)。若三航次合併資料,則其生產率平均為 475.55 µg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為 59.91 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 13.70%碳生物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關($R^2 = 0.46$, n = 48, P = 0.000, 圖 4-68)。

Picoeukaryotes 在暖季 CR1455 航次中,其生產率平均為 32.21 µg C L⁻¹ h⁻¹,被 攝食率平均為 11.40 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 135.09 %碳生物 量被 nanoflagellates 攝食(圖 4-67);其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.69 · n = 6 · P = 0.042 · 圖 4-68) ° 而 CR1487 航次的生產率平均為 29.28 µg C L⁻¹ h⁻¹, 被攝食率平均為 0.93 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 38.19 %碳生物 量被 nanoflagellates 攝食。而冷季 CR950 航次則其生產率平均為 361.96 µg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為 57.01 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 25.82 % 碳生物量被 nanoflagellates 攝食。若三航次合併資料,則其生產率平均為 169.36 µg C L⁻¹ h⁻¹,被攝食率平均為 23.16 µg C L⁻¹ h⁻¹,每生產 1 單位的碳生物量中,約 26.75 %碳生物量被 nanoflagellates 攝食;其生產率與被攝食率間有顯著正相關(R² = 0.56, n = 12, P = 0.005,圖 4-68)。

(四)生長率與環境因子

1. Prochlorococcus

綜合上述結果,已知光線及部分 nanoflagellates 會影響 *Prochlorococcus* 全天(白 天+夜晚)生長率。故將光線及 nanoflagellates 進行複迴歸分析,發現在 CR1455 *Prochlorococcus* 全天生長率與光線及 PNF_{<2µm} 間($R^2 = 0.49$, n = 32, P < 0.05,表 4-17)或光線及 PNF_{2.5µm} 間有顯著相關($R^2 = 0.36$, n = 32, P < 0.05,表 4-17)。且 光線的影響程度均較 nanoflagellates 高。由於其皆與兩類色素型 nanoflagellates 皆 有顯著相關,故將 PNF_{<2µm} 以及 PNF_{2.5µm} 兩類型 nanoflagellates 數量合並(PNF)分 析。發現 *Prochlorococcus* 全天生長率與光線及 PNF 間有顯相關($R^2 = 0.50$, n = 32, P < 0.01,表 4-17),且 PNF 的影響程度(t = -4.024, P = 0.000)較光線(t = -3.743, P = 0.001)高。表示在 CR1455 影響 *Prochlorococcus* 全天(白天+夜晚)生長率的主要因 子為 PNF 的捕食效應,其次為光線的影響。

2. Synechococcus

影響 Synechococcus 全天生長率的因子有光線(圖 4-38)及營養鹽(圖 4-42、59)。 故若將三航次資料合併進行複迴歸分析則發現, Synechococcus 全天生長率與硝酸 鹽呈顯著正相關(t = 5.327, P = 0.000)與光線呈顯著負相關(t = -3.041, P = 0.003) ($R^2 = 0.50$, n = 63, P < 0.05, 表 4-18)。此結果顯示冷季的環境(高營養鹽、低光照) 越有利於 Synechococcus 生長。此結果亦可能為冷季 Synechococcus 有較高生物量 之原因。

3. Picoeukaryotes

根據上述結果,將三航次合併資料之 Picoeukaryotes 全天生長率與硝酸鹽、溫 度、PNF_{<2 μm}、PNF_{2-5 μm} 以及 HNF_{2-5 μM} 等顯著相關之因子,進行複迴歸分析,結 果發現,其與溫度 (t = -2.980, P = 0.004)以及 HNF_{2-5 μM}(t = -2.083, P = 0.041)有顯 著相關 $(R^2 = 0.19, n = 63, P < 0.05, 表 4-19)$,且溫度影響較大,然溫度與營養 鹽(硝酸鹽及磷酸鹽)間有顯著負相關(表 4-16),故亦可能為溫度、營養鹽間共變影 響之結果。

(伍)、添加培養實驗

1.鐵(FeCl₃)

本研究鐵添加培養,包括在 CR1455 航次的南海海盆 (S6站,自天採水(S6D)、 晚上採水(S6N))、陸棚測站(S1D、S1N)以及 CR950 航次的黑潮(K2D)、南海陸坡(S3N) 進行。每個測站皆採兩水層,即A 水層(5m,代表透光度 100%,即LDP=100%) 和 C 水層(自天採水培養時採透光度 38%(LDP=38%)水層;夜間採水培養時採固 定深度即 15 m)(表 3-3)。實驗分為控制組(「Control」組,未添加)、添加 FeCl₃ 50 nM(「Fe」組)、添加 EDTA 20 μM(「EDTA」組),以及添加 FeCl₃50 nM+ EDTA 20 μM(「Fe+EDTA」組)共四組。實驗結果皆以 One-Way ANOVA 及 Duncan's -Multiple Range Test 比較四組全天(白天+夜晚)生長率差異。

實驗結果發現,四個處理組之 Prochlorococcus 生長率,如果有所差異,大部 分是「EDTA」組或「FeEDTA」組較其他兩組高。如在 CR1455 的 S6D 的 A 水層, 以「EDTA」組以及「FeEDTA」組顯著高於「Control」組及「Fe」組(P<0.01,圖 4-65A); S6N 的 A 水層,以「EDTA」 組顯著最高(P < 0.01,圖 4-65A),「Control」 組及「Fe」組顯著最低(P<0.01,圖 4-65A),「FeEDTA」組介於兩者之間,與其他 組差異不顯著(圖 4-65A)。S6N 的 C 水層,則以「FeEDTA」組顯著最高(P<0.01, 圖 4-65A),「Control」組顯著最低(P < 0.01,圖 4-65A),「Fe」組及添「EDTA」 組介於兩者之間,與其他組差異不顯著(圖 4-65A)。類似者, CR950 的黑潮 K2D 的 C 水層,以「EDTA」組顯著高於其他三組(P < 0.05,圖 4-66A)。同航次的 S3N 的 C 水層,亦以「EDTA」組顯著高(P<0.05,圖 4-66A),而「Fe」組及「FeEDTA」 組則顯著最低(P < 0.05,圖 4-66A),「Control」組則與以上二組間差異不顯著(圖 4-66A)。四組間差異不顯著得有 CR1455 的 S6D 之 C 水層以及 S1D、S1N 的 A、C 水層與 CR950 的 K2D 之 A 水層及 S3N 之 A 水層(圖 4-65A、76A)。若將所有航次、 測站、水層資料合併分析,經 Randomized Block Design(以不同航次、測站、水層 作為 Block)及 Duncan's Multiple Range Test 分析,發現「EDTA」組以及「FeEDTA」 組(兩組間差異不顯著)顯著高於「Control」及「Fe」組(P<0.01,圖 4-67A)。

Synechococcus 四個處理組間之生長率若有顯著差異,亦是以「EDTA」組及 「FeEDTA」組高於其他二組。在 CR1455 的 S6D 之 A 及 C 水層皆以「EDTA」組 及「FeEDTA」組顯著高於「Control」及「Fe」組(P < 0.01,圖 4-65B)。S6N 的 A 水層則以「EDTA」組顯著最高(P < 0.01,圖 4-65B)。而 S1D 的 A 水層則以「FeEDTA」 組顯著最高(P < 0.01,圖 4-65B),「Fe」組最低(P < 0.01,圖 4-65B),「EDTA」組 介於「Control」及「FeEDTA」組(圖 4-65B),而「Control」則介於「EDTA」及「Fe」 組(圖 4-65B)。S1N 的 A 水層則以「EDTA」組及「FeEDTA」組顯著最高(P < 0.01, 圖 4-65B),「Fe」組最低(P < 0.01,圖 4-65B),而「Control」組則介於兩者間(圖
4-65B)。CR950的K2D之C水層則以「EDTA」組顯著高於其他三組(P<0.01,圖 4-66B)。四組間差異不顯著的包括CR1455的S6N、S1D、S1N之C水層(圖 4-65B) 以及CR950的K2D之A水層和S3N之A、C水層(圖 4-66B)。若將所有航次、測 站、水層資料合並分析,經Randomized Block Design及Duncan's Multiple Range Test 分析後,發現「EDTA」組以及「FeEDTA」組(兩組間差異不顯著)顯著高於「Control」 及「Fe」組(P<0.01,圖 4-67A)。

Picoeukaryotes 四個處理組之生長率,大多為差異不顯著(圖 4-35、50C),唯一 顯著者為 CR1455 的海盆 S6D 之 C 水層,亦以「EDTA」組以及「FeEDTA」組(兩 組間差異不顯著)顯著高於「Control」組(P < 0.01,圖 4-65C),而「Fe」組則介於 兩組間,差異不顯著。若將所有航次、測站、水層資料合並分析,經 Randomized Block Design 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,四個處理組間亦呈現差異不顯著(圖 4-67A)。

 $2.NH_4^+$

NH₄⁺添加培養,包括在 CR1487 航次的南海海盆(S6D、S6N)、南海陸棚(S2N) 以及 CR950 航次的黑潮(K2D)、南海海盆(S5D、KK1D)、南海陸坡(S3N)和南海陸 棚(S2D)站進行,所有測站皆採 A(5m,LDP = 100%)、C(白天採水培養為透光度 38%(LDP = 38%);晚上採水培養為固定 15m 深度)兩水層(表 3-3)。實驗分為控制 組(「Control」,未添加)與添加 NH₄Cl 1 μ M(「NH₄」組)兩組。實驗結果以 t test 比較兩組全天(白天+夜晚)生長率差異。

實驗結果發現,添加NH4Cl對三類超微浮游植物而言,大部分均無顯著效果(圖 4-68、65)少數有影響組別,都呈現「NH4」組比「Control 組生長率差,如對 Prochlorococcus 有影響的只在CR1487 的 S2N 站 A、C 水層,其「NH4」組生長率 顯著較差(P < 0.05,圖 4-68A),對 Picoeukaryotes 有影響者,只在 CR950 的 K2D 測站的 C 水層,「NH4」組生長率顯著較差(P < 0.05,圖 4-69C),對 Synechococcus 而言,所有實驗在添加 NH4Cl 後生長率皆無顯著不同。若將所有航次、測站、水 層資料合併分析,經 paired-t test 分析後,只有 *Prochlorococcus* 的生長率在「Control」 組顯著高於「NH₄」組(P < 0.05,圖 4-67B), Picoeukaryotes 與 *Synechococcus* 之生 長率在二組間皆無顯著差異(圖 4-67B)。 第五章、討論

第一節、Prochlorococcus

本研究野外樣本資料分析,發現 Prochlorococcus 的生物量有明顯季節性變動,在暖季貧營養鹽(硝酸鹽、磷酸鹽)時有較高的生物量,相反的在冷季(富營養 鹽)時有較低的生物量。野外分析呈現 Prochlorococcus 生物量和硝酸鹽及磷酸鹽之 間有顯著的負相關,與表水溫呈正相關(表 4-9A)。而硝酸鹽與磷酸鹽之間有極顯 著正相關(表 4-9B),硝酸鹽與磷酸鹽皆與溫度之間有極顯著負相關。究竟是溫度、 營養鹽或其他隨季節變動的環境因子之影響?或捕食之結果所致?逐一討論於 下。

(一)營養鹽

1.氮鹽

本研究培養實驗結果,發現 Prochlorococcus 全天生長率與[N+N]間無顯著相 關,因此 Prochlorococcus 生物量隨季節改變,可能與隨季節變動之水中[N+N]高 低無關。根據 Moore et al. (2002)的研究結果發現,大部分 Prochlorococcus 不會利 用 NO₃⁻,僅少部分品系會利 NO₃⁻(如: P. marinus MIT9313)或 NO₂⁻(如: P. marinus MIT9313、P. marinus MIT9303、P. marinus NATL1、P. marinus NATL2A)。多數 Prochlorococcus 不能利用 NO₃⁻、NO₂⁻,係因為其 DNA 缺乏可利用 NO₃⁻、NO₂的 基因片段所致(Dufresne et al. 2003)。即使部分 Prochlorococcus 品系之中,會利用 NO₃⁻或 NO₂⁻,但 Prochlorococcus 體型小,表面積相對較其他體型較大之藻類大 (Chisholm 1992),加上其基因片段短小,有利於其對 NO₃⁻或 NO₂⁻利用有較低需求 (Dufresne et al. 2003),皆說明貧營養海域中 Prochlorococcus 不易受 NO₃⁻或 NO₂⁻限 制(Moore et al. 2008)的可能。

另外根據 Van Mooy et al. (2008),在西北太平洋 ALOHA (22.75°N, 158.00°W) 測站的研究發現,在貧營養鹽海域,添加 NH4⁺會增加 Prochlorococcus 的 RNA 合 成率,但添加 PO4³⁻並沒有顯著增加 Prochlorococcus 的 RNA 合成率。本研究添加 NH4⁺實驗結果發現,對 Prochlorococcus 有影響只在 CR1487 的 S2N 站 A、C 水層 「NH4」組生長率顯著較差(P < 0.05,圖 4-68A),其餘測站、水層之添加培養均不 顯著(圖 4-68、79)。根據 Moore et al. (2008)在北大西洋(21-32°N,25-65°W)的研究, 發現在添加最終濃度為1 μM 的 NH4 並培養 48 小時後 , Prochlorococcus 平均每 顆細胞被偵測之葉綠素濃度顯著比控制組(未添加)高,表示 NH4 是有利於 Prochlorococcus 生長。不同的是,該篇研究的實驗組處理方法,在採集水樣後先 培養 48 小時後(本研究推測,可能為避免原水體中富足的營養鹽干擾實驗結果), 將各處理組添加 Chelex-100 移除有毒的微量金屬元素,最後再添加 NH4⁺,並將培 養瓶放置在透光度 20 %的水體環境中(本研究推測,可能避免光線因子的干擾)進 行 48 小時的培養。另 Davey et al. (2008)在北大西洋(3-12°N,15-50°W)的研究,其 方法則是在日落後 3 小時(本研究推測,可能避免光線影響)以 Trace metal-clean techniques 採集水深 1-3 m 的水體(本研究推測,可能避免水體汙染),以虹吸方式 多次過濾後將水樣放置至培養瓶中,並添加 Chelex-resin 移除有毒的微量金屬元素 後再進行培養24小時。結果亦發現在添加NH4+後, Prochlorococcus 平均每顆細 胞被偵測之葉綠素濃度顯著比控制組(未添加)高,表示 NH4⁺是有利於 Prochlorococcus 生長。與之相較而本研究之方法不同,本研究在採集水樣後,隨 即進行過濾及添加,且本研究中添加 NH4 實驗,在 CR1487 有颱風擾動影響,冷 季 CR950 則有東北季風擾動影響,在未知原水體中是否已含充足 NH4⁺的狀況下, 進行添加NH4⁺培養,可能是造成本實驗結果,大部分不顯著的原因。

2.磷酸鹽

本研究中的[N+N]:[SRP]呈現<16:1(表 3-2),且表水[SRP]在14-82 nM 範圍, 顯示本研究海域屬氮限制(N-limitation),而非磷限制海域。Prochlorococcus 生長率 在暖季航次及三航次資料合併結果皆發現,與[SRP]間無顯著相關(圖 4-44),說明 Prochlorococcus 生長率與[SRP]間無相關,而冷季的 Prochlorococcus 生長率與[SRP] 間有顯著正相關可能為其他與季節共變之環境因子之影響。相較於 Picoeukaryotes 等其他藻類或細菌, Prochlorococcus 能透過利用海水中的硫, 合成 sulphoquinovosyldiacylglycerol (SQDG) (Van Mooy et al., 2009), 取代 PO₄³⁻合成磷脂 質(Van Mooy et al., 2009), 因此使得 Prochlorococcus 只需要極低的 PO₄³⁻即可合成 磷脂質(Van Mooy et al., 2006)。

3. 微量金屬元素

在本研究中,因未測水體中鐵濃度,有關鐵可能之影響,相關研究僅有鐵添 加培養實驗。該實驗結果發現,大部分 Prochlorococcus 生長率在添加「EDTA」組 或「FeEDTA」組後,比「Control」組或「Fe」組高(圖 4-65A)。根據 Thompson et al. (2011)的研究,當水體環境中的溶解鐵(dissolved Fe)濃度低於 0.001 nM 時 P. marinus MED4 無法生長,而在 0.001-0.1 nM 時,其生長率會隨溶解鐵濃度增加而 增高。低光適應型的 P. marinus MIT9313,所需要的溶解鐵濃度較高才在 0.01-0.1 nM 時,其生長率隨溶解鐵濃度增加而增高。南海海水中溶解鐵之濃度,根據 Wen et al. (2006)在南海 SEATS 站(South East Asia Time-series Studies, 18°N, 116°E)的研 究,測得在 2004 年 3 月,表水 10 m 溶解態(Truly dissolved)的鐵濃度為 0.1 nM, 推測本海域的鐵濃度,對 Prochlorococcus 而言可能是充足的,此可能是本研究中 添加鐵後,對 Prochlorococcus 生長率並無顯著增加之原因。

由於 EDTA 是一種可以螯合多種金屬離子的有機化合物。可螯合去除一些有 毒的微量金屬(例如: Cu²⁺、Cd²⁺)(Price et al. 1988)以及螯合一些有利於浮游植物生 長的微量金屬(例如: Fe³⁺、Co²⁺),提供浮游植物利用(Price et al. 1989)。故常用來 添加在培養液中。

根據 Mann et al. (2002)發現,當海水中的 Cu²⁺達到 2.3 pM 時,會對部分低光 照品系的 Prochlorococcus 造成抑制(如: P. marinus SS120、P. marinus 9313、P. marinus 9401);而高光照品系的 Prochlorococcus(如: P. marinus MED 4、P. marinus 9311) 則在 Cu²⁺濃度達到 112 pM 時受抑制。根據 Wen et al. (2006)在南海 SEATS 站的研究,表水 10 m 溶解態(Truly dissolved)及離子態(Labile)的 Cu²⁺分別為 0.59 及 0.35 nM,顯示南海中 Cu²⁺濃度頗高;遠超過上述的 2.3 pM 或 112 pM,可能會抑制 Prochlorococcus 生長。

根據 Saito et al. (2003)的研究,水體中的 Cd²⁺濃度高於 1 pM 時會抑制 *Prochlorococcus* 生長,對照 Wen et al. (2006) 在南海 SEATS 站(South East Asia Time-series Studies, 18°N, 116°E)的研究發現,在 2004 年 3 月,所測得之表水 10 m 溶解態的 Cd²⁺濃度為 23 pM,離子態(Labile)的 Cd²⁺濃度為 26 pM,顯示在南海海 水中的 Cd²⁺濃度,可能會抑制 *Prochlorococcus* 的生長。

Saito et al. (2003)的研究亦顯示,水體中的 Co^{2+} 低於 1 pM 時亦會抑制 Prochlorococcus 生長,但 Zn^{2+} 濃度在 0.1-10 pM 時,不論濃度高低, Prochlorococcus 生長率皆不改變,並推測 Zn^{2+} 對 Prochlorococcus 而言,可能並不是限制因子。故 本研究中,添加 EDTA 後有利於 Prochlorococcus 生長,可能是因為 EDTA 螯合去 除一些有毒的微量金屬如: Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 及有利於生長的微量金屬如: Co^{2+} 所致。

(二)溫度

溫度是另一個常隨季節共變之因子,但本研究中發現,Prochlorococcus 生長 率與水體溫度間無顯著相關。相對的,Partensky et al. (1999)整合全球野外 Prochlorococcus 生物量之記錄,發現 Prochlorococcus 普遍生長在溫暖(> 15 °C)貧 營養的海域,當水溫超過 30 °C 的海域生物量明顯減少,而 Zinser et al. (2007)培養 實驗結果指出,高光適應型的 P. marinus eMIT9312 其生長率當溫度在 12 °C 至 28 °C 間時,呈現與溫度成正相關,而 P. marinus eMED4、P. marinus eMIT9313 和 P. marinus eNATL2A 則在 19 至 25 °C 有最高的生長率。而本研究海域,在冬季表水 溫度為 24.6-26.9 °C(表 4-7)。夏季除部分受湧升流影響及南海陸棚海域水溫較低 外,整個海域表水溫範圍為 27.9-30.2 °C(表 4-1、6、8)。溫度範圍相對較窄且偏溫 暖,可能是造成 Prochlorococcus 與水體溫度間無顯著相關之原因。

(三) 光線

97

本研究野外樣本之[Pro]_{30/200}與有光層深度有顯著負相關(圖 4-26)。即光線強度 越強時,Prochlorococcus 越往深水層分佈。且若比較[Pro]_{30/200}在不同海域間之差 異,發現有光層深度較深的黑潮(17.79 ± 6.95 %)顯著低於南海海盆(28.58 ± 5.11 %);南海陸坡(37.91 ± 12.69 %)及南海陸棚(36.89 ± 11.78 %)(圖 4-25B)。此順序似 乎與不同海域間有光層深度差異吻合(圖 4-7B),即Prochlorococcus 在光層深度較 淺的南海,越往上水層分佈,反應出其對光線的敏感。由Prochlorococcus 生長率 分析,發現白天生長率與培養期間白天平均光照強度間有顯著負相關(圖 4-35),全 天(白天+夜晚)生長率亦與培養期間白天平均光照強度間有顯著負相關(圖 4-35),全 天(白天+夜晚)生長率亦與培養期間白天平均光照強度間有極顯著負相關(圖 4-36)。而Prochlorococcus 在暖季 CR1455 的生長率(0.23 ± 0.93 d⁻¹)低於暖季 CR1487 的生長率(0.64 ± 0.14 d⁻¹)及冷季 CR950 的生長率(0.44 ± 0.81 d⁻¹)之結果。亦可以航 次間光照強度來解釋,即 CR1455(暖季無颱風的航次)的培養期間平均光照強度高 於 CR1487(暖季受熱帶低氣壓壟罩及颱風影響的航次)及CR950(冷季受東北季風影 響的航次)所致(圖 4-7A)。

本研究上述之結果與 Llabrés and Agustí (2006)的研究結果吻合, Llabrés and Agustí 發現 *Prochlorococcus* 對光線敏感,他們檢查表水(100%)到光透度 23%水深 之活細胞受總太陽輻射(Total solar radiation, PAR+UV) 之滅絕率(decay rate),發現 *Prochlorococcus* sp.為三類超微浮游植物中最高者,平均為 -0.24 ± 0.053 h⁻¹,且 有較短的半生命週期(half life time),大約在 1.5 - 13.4 小時。而 *Prochlorococcus* 對光線較為敏感之原因,根據 Dufresne et al. (2005)研究發現 *Prochlorococcus* 擁有較低的 G + C 鹼基對(如: *P. marinus* MED4 的 G + C 鹼基對約占 DNA 的 31 %;*P. marinus* MIT9313 的 G + C 鹼基對約占 DNA 的 46 %),而低的 G + C 鹼基對,使 DNA 在 UV 光照射下有較高的突變率(mutation rate),降低細胞修復能力。

按此, Prochlorococcus 生物量在季節上變動,可能與光線有關。唯如果此等 生長率與光線之負相關關係存在,似乎應看到暖季(光照強)時有較低之 Prochlorococcus 生物量,但在本研究結果中,卻發現暖季的 Prochlorococcus 生物 量高於冷季(圖 4-11)。當生物量之季節性變動以光線強弱做解釋時,似乎正好相 反。造成此等似乎矛盾的原因,可能在於捕食率隨季節之變動。

(四)捕食

按以上推論,本研究 Prochlorococcus 生物量在季節上以貧營養鹽的暖季較富 營養鹽的冷季優勢,以及在空間上以相對貧營養鹽的西北太平洋、黑潮和南海海 盆比南海陸坡、陸棚優勢的原因。可能是因富營養鹽的季節、海域,有較差的透 光度(較淺的有光層深度),使之有較高的生長率,但也相對有較高捕食率,高於其 生長率,使 Prochlorococcus 生物量較低;而在貧營養鹽的季節、海域,有較高的 透光度(較深的有光層深度),使之有較低的生長率,但相對亦有較低的捕食率,低 於其生長率,使 Prochlorococcus 生物量呈現較高。對此假說,本研究部份結果顯 示支持,但並不完全吻合。支持之證據包括冷季時捕食者數量遠高於暖季(圖 5-1), 且生長率與捕食率呈正相關(圖 5-2)。另外個別案例如:本研究在 CR1455 的 S4 站 (湧升流測站), Prochlorococcus 生物量低於同為陸坡的 S3 測站,觀察其生長率與 被捕食率,可發現 S4 站的生長率小於捕食率 (圖 5-2),顯示該測站捕食率大於生 長率,與本研究假設相吻合。此現象與 Chen et al. (2009)在南海(10-16°N;108-114°E) 的研究發現類似,即在營養鹽高的海域如:逆時針渦流、湧升流以及湄公河口海 域)捕食率相對高於生長率,造成有較低的 Prochlorococcus 生物量。

另一部分無法支持此假說的原因,可能與本研究「Control」組內已含捕食者 之捕食效應有關。原實驗設計假設在「Control」組(「<2μm」)內無捕食者,但由 顯微鏡檢視觀察,發現「Control」組內存在約1-2μm 之 PNF及 HNF(圖4-47), 因此「Control」組在培養期間的夜間時,Prochlorococcus 生物量有明顯下降趨勢(圖 4-48)。此等夜間生物量下降與白天光照強度無關,因以 Prochlorococcus 夜間生長 率與白天光照強度間作相關,發現除冷季 CR950 外,三航次合併資料均無相關(圖 4-54)。相對的,Prochlorococcus 夜間生長率卻與「Control」組內 nanoflagellate 數 量有關,CR1455 的 Prochlorococcus 夜間生長率與 PNF<2μm 有顯著負相關(圖 4-51);CR1487 則是與 HNF<2μm 有顯著負相關(圖 4-52),因此本研究中以「Control」 組結果計算出之 Prochlorococcus 生長率,可能為低估值。例外者為 CR950,卻是與 HNF<2 µm 有顯著正相關(圖 4-53)。

根據 Hansen (1994)的研究結果,捕食者與被捕者之間有最適體型比例,以微 浮游生物食物網的捕食階層而言,最適體型比約 2-3:1(Chen et al. 2009)。按此來 估算 Prochlorococcus (0.5-0.7 µm)的第一階捕食者體型約為 1 - 2.1µm。因此本研究 所計數「Control」組內之 PNF 及 HNF,可能即為 Prochlorococcus 的第一階捕食 者。因此未來 Prochlorococcus 生長率之測定,應以 1 µm PC 膜過濾後之水體假設 為無捕食者(「Control」組)進行。唯根據 Chen et al. (2009b)在南海(10-25°N; 110-120°E)的研究,以體型分濾法,在夏季航次之 treatment 細分為<1、1-2、2-5、 5-10、10-60、60-200 µm 等六組,但實驗結果卻發現在「<1µm」組之 Prochlorococcus 生長率,低於「1-2 µm」組,該作者無法解釋其原因,只在計算各組平均生長率 及分析數據時,將「<1µm」組不列入討論。並將「<1µm」組及「1-2 µm」組合 併視為「<2 µm」組,且假設「<2 µm」組無捕食者,由於「<2 µm」組有最高生 長率,「5-10 µm」組為次高生長率,且「2-5 µm」組生長率低於「<2 µm」組及「5-10 µm」組,故作者推測南海 Prochlorococcus 的第一階捕食者之體型為介於 2-5 µm 之間的 nanoflagellates。究竟 Prochlorococcus 之捕食者體型為何?其生長率與被捕 食率間之關係為何,需待後續更進一步實驗探討。

而 Prochlorococcus 對 nanoflagellates 碳生物量的貢獻,若將所有培養數據進行 分析,則發現 Prochlorococcus 在暖季 CR1487 航次生產率最大(圖 4-66),造成此結 果,可能是 CR1487 航次的 nanoflagellates 生物量,為三航次中最低(圖 5-1)使然。 若將生產率為負值者刪除,而被攝食率為副值者化整為零,則發現 Prochlorococcus 在暖季(CR1455、CR1487)生產率大於冷季(CR950)(圖 4-67)。其中又以暖季 CR1487 航次最高,而 CR1487 航次的 nanoflagellates 生物量,亦為三航次中最低(圖 5-1), 此可能是造成 CR1487 有高生產率、低被攝食率之原因。

(伍)、内波

根據 Sharples et al. (2007)在 Celtic Sea(47-49°N, 6-10°W)的內潮研究發現,內

潮擾動導致營養鹽擴散,一直到對浮游植物的影響約 3.5 天,並且發現 Prochlorococcus 生物量低於沒有內潮擾動的大洋區。本研究與之不同的是,內波 較內潮發生時間較為短暫且劇烈,本研究結果,在 CR1455 的 S1 測站受內波影響, 比海盆測站(S6、S7)有較高的 Prochlorococcus 生物量。若以 Bottom – up 機制觀察, S1 站的水體透光度(有光層深度 83 m)為該航次最低,可能為其較高生長率之原 因。雖然內波對捕食者的影響,在本研究中並不明瞭,但可發現 S1 站的生長率遠 大於捕食率 (圖 5-2),較高的生物量可能也因此所致。

第二節、Synechococcus

本研究野外樣本, Synechococcus 生物量在冷季富營養鹽時較高,暖季貧營養 鹽(硝酸鹽、磷酸鹽)時較低。Synechococcus 生物量和硝酸鹽及磷酸鹽間有顯著的 正相關,與表水溫呈負相關(表 4-9A)。然而硝酸鹽與磷酸鹽之間有極顯著正相關(表 4-9B),硝酸鹽與磷酸鹽皆與溫度間有極顯著負相關。故究竟是溫度、營養鹽或其 他隨季節變動的環境因子之影響,或捕食之結果所致?逐一討論如下。

(一)營養鹽

1.氮鹽

本研究結果中發現,Synechococcus 生長率與硝酸鹽間之關係,除 CR1455、 CR1487 航次無相關,冷季 CR950 航次及三航次資料合併皆有顯著正相關(圖 4-42),此結果顯示 Synechococcus 生長率是可能受到[N+N]影響。根據 Moore et al.(2002)針對不同品系的 Synechococcus 對各類型氮鹽利用所做的研究結果發現, 除品系 MS 9920 的 Synechococcus 不利用 NO₃⁻以外,大部分品系 Synechococcus 皆 會利用 NO₃⁻,NO₂⁻以及 Urea、Amino acid、NH₄⁺等,與多數 Prochlorococcus 僅利 用再生性氮鹽的 Urea、Amino acid、NH₄⁺等不同。且根據 Moore et al.(2008) 在北 大西洋(21-32°N,25-65°W)的研究,發現在分別添加 1 μM 的 NO₃或 NH₄⁺培養 48 小時後, Synechococcus 平均每個細胞之葉綠素濃度顯著比控制組(未添加)高,此 說明 Synechococcus 對氮鹽的利用較不受氮鹽型式的限制。另一方面 Synechococcus 體型相對較 Prochlorococcus 為大,表面積與體積比值相對較 Prochlorococcus 小 (Chisholm 1992),因此對[N+N]之不足比 Prochlorococcus 較敏感。此可說明,在 本研究中, Synechococcus 在暖季貧營養鹽時,生長率與[N+N]間無顯著相關,可 能受限於硝酸鹽濃度過低且[N+N]變動範圍小,但當冷季或三航次資料合併時, [N+N]變動範圍加大,便明顯呈現 Synechococcus 生長率與[N+N]間有顯著正相 關。

雖然根據 Moore et al.(2002)針對不同品系的 Synechococcus 對各類型營養鹽利 用所做的研究結果已知 Synechococcus 皆會利用 NH4⁺,以及 Moore et al.(2008) 在 北大西洋(21-32°N,25-65°W)的研究,添加 1 µM NH4⁺ Synechococcus 平均每個細胞 之葉綠素濃度顯著比控制組(未添加)高。但本研究中添加 NH4 之結果,發現 Synechococcus 生長率,不論在何航次、測站培養實驗中,皆與控制組無顯著差異。 造成此結果之原因,可能與 Prochlorococcus 類似。除與 Moore et al.(2002)及 Davey et al. (2008)等人的實驗方法不同外,本研究添加 NH4⁺之航次,可能原水體環境已 含充足的 NH4⁺,但因為未測水中[NH4],亦無法證實。

2.磷酸鹽

Synechococcus 生長率與[SRP]間之關係,很可能是 Synechococcus 與[N+N]間 之正相關或其他與[N+N]共變之環境因子影響所致。在野外 Synechococcus 生物量 的分析中,可發現[N+N]常同時與[SRP]呈正相關,如 CR910 航次中 [Syn]_{Mix} 與 [SRP]_{Mix}間有顯著正相關,同時與[N+N]_{Mix} 有顯著正相關(表 4-2)。而 CR1455 的 [Syn]₂₀₀與[SRP]₂₀₀及[N+N]₂₀₀皆呈顯著正相關(表 4-4)。因此當四航次資料合併時, [Syn]₅與[SRP]₅間呈顯著正相關(圖 4-28),可能來自於[SRP]與[N+N]二者間有極顯 著正相關(表 4-9)所致。即[Syn]與[SRP] 間正相關,可能是 Synechococcus 與[N+N] 間正相關之結果。

根據 Bertilsson et al. (2003)在實驗室培養結果發現,在 P-limitation 的環境下,

102

Synechococcus 體內的含氮量並未減少,推測 Synechococcus 存在某種轉換機制抵抗 P-limitation 的環境。根據 Moore et al. (2008)在北大西洋(21-32°N,25-65°W)的研究 發現,在貧營養鹽的海域,添加 NO3⁻或 NH4⁺會增加 Synechococcus 體內葉綠素濃 度,添加 PO4⁻時並不會增加 Synechococcus 體內葉綠素濃度,表示 Synechococcus 相對適應 P-limitation 的環境(Geider and La Roche 2002)。根據 Van Mooy et al.(2008) 研究,發現 Synechococcus 與 Prochlorococcus 相同,皆能透過海水中的硫,合成 sulphoquinovosyldiacylglycerol (SQDG) (Van Mooy et al., 2008b),取代 PO4³⁻合成磷 脂質(Van Mooy et al., 2009),故使得 Synechococcus 只需要極低的 PO4³⁻即可合成磷 脂質(Van Mooy et al., 2009)。另外根據本研究野外資料顯示,[N+N]:[SRP]呈現< 16:1(表 3-2),顯示本研究是氮限制(N-limitation)而非磷限制海域,而且本研究海 域中[SRP](14-82 nM)相對較 Moore et al. (2008)在北大西洋(21-32°N,25-65°W)的 [SRP](< 8 nM)為高,皆支持在本研究中對 Synechococcus 對而言,[SRP]並不是影 響 Synechococcus 生長率的限制因子,而 Synechococcus 與[SRP]間之正相關系,可 能是[N+N]與[SRP]有正相關之間接結果所致。

3. 微量金屬元素

與 Prochlorococcus 類似,大部分 Synechococcus 生長率在添加「EDTA」組或 「FeEDTA」組後,比「Control」組或「Fe」組高(圖 4-65B)。根據 Moore et al. (2008) 在大西洋(21-32°N,25-65°W)的研究亦發現,在氮充足的情況下,添加 2 μ M 的 Fe 是有助於 Synechococcus 生長。相反的,根據 Bonnet et al. (2008)在南太平洋(9-34°S, 92-145°W)缺氮環境的研究,添加鐵並無助於 Synechococcus 生長。造成此現象之 原因,如同前章節氮鹽討論所述, Synechococcus 生長率與氮鹽濃度高低有關,對 氮鹽反應敏感,當氮缺乏時,不管是否受到 Fe 不足之限制, Synechococcus 之生長 可能均無法提高。另一方面,南海海水中的 Fe 濃度對 Synechococcus 生長而言, 可能是足夠的,根據 Timmermans et al. (2005) 的研究,發現 Synechococcus CCMP 839 品系對鐵的最低需求為 10^4 pM,當水體中溶解鐵達到 0.01 pM 時,

103

Synechococcus 生長率不再顯著增加(鐵濃度範圍在 0.01-1 pM 時,其生長率維持在約 0.6 d⁻¹)。按此由 Wen et al. (2006)在南海 SEATS 站所測表水 10 m 溶解態(Truly dissolved)的鐵濃度為 0.1 nM,推測南海的鐵濃度,可能對 Synechococcus 而言是充足的,此亦可能是本研究中添加鐵後,對 Synechococcus 生長率並無顯著增加之原因。

如同前章節 *Prochlorococcus* 與微量金屬元素的討論,EDTA 是一種可以螯合 多種金屬離子的有機化合物。包括有毒的微量金屬 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 或促進浮游植物生 長的微量金屬 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 。

根據 Mann et al. (2002)的研究, Synechococcus 品系 WH7805、WH8103 在添加 122 pM 的 Cu²⁺後,生長率並無顯著降低,顯示 Synechococcus 較 Prochlorococcus 可耐較高濃度的 Cu²⁺。另外 Debelius et al. (2009)在 Gulf of Cadiz(36-38°N; 6-8°W) 對 Cu²⁺汙染的監控研究中發現,指標物種 Synechococcus 生長率,在水體中的 Cu²⁺ 高於 312.5 μ M 時明顯被抑制,表示高濃度的 Cu²⁺會抑制 Synechococcus 的生長。 根據 Wen et al. (2006)在南海 SEATS 站所測表水 10 m 的 Cu²⁺濃度,不論是溶解態 (0.59 nM)或離子態(0.35 nM)均遠低於 312.5 μ M,顯示海水中的 Cu²⁺濃度,可能不 會妨礙 Synechococcus 生長。

另外根據 Saito et al. (2003)的研究,水體中的 Cd²⁺濃度高於 1 pM 時亦會抑制 Synechococcus 生長。而 Wen et al. (2006)在南海 SEATS 站所測表水 10 m 的 Cd²⁺ 濃度,不論是溶解態(23 pM)或離子態(26 pM)的 Cd²⁺均高於 1 pM,故推測在本研 究海域,高濃度的 Cd²⁺可能抑制 Synechococcus 生長。

與 Prochlorococcus 類似,當 Zn^{2+} 濃度在 0.1-10 pM 時,不論濃度高低, Synechococcus 生長率皆不改變,因此 Saito et al. (2003)推測 Zn^{2+} 對 Synechococcus 而言,可能並不是限制因子。而水體中的 Co^{2+} 低於 1 pM 時亦會抑制 Synechococcus 生長(Saito et al. 2003)。故本研究中,添加 EDTA 後有利於 Synechococcus 生長,可 能是因為 EDTA 螯合去除一些如 Cd^{2+} 等有毒的微量金屬所致,或螯合了有利於生 長的微量金屬如: Co^{2+} 。

(二)溫度

溫度因子,如前節在 Prochlorococcus 的討論中所述,常與其他季節性因子共 變,使其影響效應難以釐清。但根據 Moore et al. (1995)實驗室培養的結果發現 Synechococcus 在超過 29 °C 時,其生長率隨溫度增加而遞減,直至 35 °C 時停止 生長,並推測其最適生長溫度範圍約 22-29 °C(Zwirglmaier et al. 2008)。而 Tsai et al. (2008) 在 副 熱 帶 西 太 平 洋 沿 岸 (25°09.4'N ; 121°46.3'E) 的 研 究 中 發 現 , Synechococcus 生長率在 16-29 °C 隨溫度增高而增加;而 Partensky et al. (1999),根 據全球野外樣本調查發現,當水溫超過 29 °C 時 Synechococcus 生物量隨之減少。 本研究平均表水溫度變化範圍為 24-29 °C,應屬 Moore et al. (1995)實驗培養適合生 長範圍,但本研究結果 Synechococcus 生長率與水體溫度間有顯著負相關(圖 5-3), 無法排除水體中其他與溫度共變之因子的影響,但無法明確解答。

(三)光線

Synechococcus 與 Prochlorococcus 類似,在強光照射下會降低其生長率。而但 相對於 Prochlorococcus, Synechococcus 對強光照射的抵抗能力較佳。本研究的培 養實驗當四航次資料合併時,Synechococcus 白天生長率與培養期間白天光照強度 有顯著負相關(圖 4-37),全天(白天+夜晚)生長率與培養期間白天光照強度亦有極 顯著負相關(圖 4-38)。即光線太強時 Synechococcus 生長率會降低。但在個別航次 分別分析時,只在光照強度較強的 CR1455 呈負相關(圖 4-7),其他二航次無顯著 相關(圖 4-38)。而三個航次個別分析時,Synechococcus 白天生長率與培養期間白 天光照強度皆無顯著相關(圖 4-37)。本研究野外 Synechococcus 生物量樣本與環境 因子間的相關分析結果亦發現,Synechococcus 生物量與有光層深度間並無顯著相 關(表 4-9),其無相關的原因,除可能是樣本數太小(n = 16 或 17)所致外,亦可能 為 Synechococcus 對強光照射的抵抗能力相對較佳所致。

此結果與 Llabrés and Agustí (2006)的研究結果類似,即 Synechococcus 對光線

耐受性較 Prochlorococcus 高,當檢查表水(100%)到光透度 23%水深之活細胞受總 太陽輻射(Total solar radiation)之滅絕率(decay rate)時,Synechococcus 為三類超微 浮游植物中最低者,平均為-0.021±0.008 h⁻¹。且 Synechococcus 半生命週期較長, 為 8.8 - 14.7 小時。Synechococcus 在 UV 光照射下有較高抵抗能力(Campbell et al.,1998),其 DNA 的 G+C 鹼基對約占 69.5-47.4 %(Partensky et al. 1999),具有較 佳的光保護(photo-protection)機制及能迅速修復光系統二 (photosystem II)(Ting et al.,2002),能很迅速修復 DNA(Dufresen et al. 2005),具有較高抵抗太陽光輻射的能 力(Llabrés and Agustí 2006)。此可能是 Synechococcus 全天生長率與培養期間白天 平均光照強度間關係在個別航次中不易顯著,但在季節尺度上有顯著負相關之原 因。

(四)捕食

若探討捕食者數量對 Synechococcus 生長率的影響,則發現 Synechococcus 不 同於 Prochlorococcus,在「Control」組中無論白天、夜晚皆無明顯負成長(被捕食) 現象(圖 4-49,顯示此「Control」組之 Synechococcus 全天生長率應可代表無受捕 食影響的 Synechococcus 生長率。雖然當把 Synechococcus 全天生長率與「Control」 組之 nanoflagellates 數量間做相關時,可能呈現某些關係(圖 4-56),但此關係無一 致性。如在 CR1487 Synechococcus 全天生長率與 PNF<2μm(圖 4-56)呈顯著負相關, 在 CR1455 Synechococcus 全天生長率與 PNF<2μm(圖 4-56)呈顯著負相關, 個 4-56),而在 CR950 航次中發現 Synechococcus 全天生長率與 HNF<2μm 有顯著正相 關(圖 4-56),三航次合併資料時,Synechococcus 全天生長率與 PNF<2μm 亦呈現顯 著正相關(圖 4-56)。此等關係可能為其他共變因子影響所致,如 CR950 航次, Synechococcus 全天生長率亦與[N+N] 有顯著正相關,而三航次合併資料時,PNF<2 μm 又與[N+N]、[SRP]間有極顯著正相關,且與光線有極顯著負相關(表 4-16)。

根據 Hansen (1994)的研究,捕食者與被捕者之間有最適體型比例,以微浮游生物食物網的捕食階層,最適體型比約 2-3:1(Chen et al. 2009),來估算

Synechococcus (1 µm)的一階捕食者體型約為 2-3 µm,因此在< 2 µm 中之 nanoflagellates 可能不是 Synechococcus 之捕食者。Chen et al. (2009b)在南海 (10-25°N;110-120°E)的研究結果,發現 Synechococcus 在「< 2 µm」組(假設無捕 食者)有最高生長率,「5-10 µm」組為次高生長率,而「2-5 µm」組生長率低於「< 2 µm」組及「5-10 µm」組,故推測南海 Synechococcus 的第一階捕食者為體型介 於 2-5 µm 之間的 nanoflagellates。

本研究中, Synechococcus 被捕食率 (「< 10 µm」組減去「Control」組)與 nanoflagellates 數量間之關係,顯示在 CR950 航次中 Synechococcus 被捕食率(G_{10 µm}) 與 PNF_{2-5 µm} 有顯著正相關(圖 4-57),與 HNF_{5-10 µm} 有極顯著負相關(圖 4-57)。且 CR950 的 PNF_{2-5 µm} 與 HNF_{5-10 µm} 間有顯著負相關(圖 4-58),此結果與 Chen et al. (2009)之結果相吻合,即南海 Synechococcus 的第一階捕食者體型介於 2-5 µm 間,而第二階捕食者體型介於 5-10 µm 間。類似者,Tsai et al. (2007)在台灣北部 (25°09.4'N;121°46.3'E)的研究中,發現 PNF 是 Synechococcus 主要捕食者(平均占整體捕食力的 43 %),而 Lin et al. (2009)在相同地方(25°09.4'N;121°46.3'E) 的研究指出,該海域最主要的第一階捕食者整型平均約 3.4 - 4.6 µm 的 PNF。本研究 另雨航次(CR1455 及 CR1487)並無此等類似關係,是否因其 PNF_{2-5 µm} 數量之範圍 最大值相對較少(範圍較小),致統計上檢測不出?仍待更深入研究。

综合上述討論,對本研究海域之 Synechococcus 而言,硝酸鹽濃度高低會影響 Synechococcus 生長,磷酸鹽濃度高低,並不是 Synechococcus 生長的限制因子。溫 度高低雖然可能對 Synechococcus 生長造成影響,但本研究中無證據可證實,而體 型大小約 2-5 µm 的 nanoflagellates 可能是 Synechococcus 的第一階捕食者。

若將本研究中,生長率與被捕食率間之關係合併觀察,則發現在 CR1487 及 CR950 時,生長率與被捕食率比值普遍大於 1(圖 5-2),即在硝酸鹽濃度高,光線 相對弱的航次越有利於 Synechococcus 生長。類似者, Chen et al. (2009)在南海 (10-16°N; 108-114°E)的研究發現,在營養鹽高的海域(逆時針渦流、湧升流以及湄 公河口海域), Synechococcus 生長率相對高於被捕食率, Synechococcus 生物量因 此較高。

若探討 Synechococcus 對 nanoflagellates 碳生物量的貢獻,並以所有培養數據 進行分析,則發現冷季 Synechococcus 受硝酸鹽濃度顯著高於暖季影響(圖 4-8F), 使之生產率遠高於暖季(圖 4-66)。而暖季兩航次中,因 CR1487 航次受颱風影響(圖 3-6),硝酸鹽濃度高於同為暖季的 CR1455 航次,使其生產率亦較 CR1455 航次高。 另外,雖然冷季的 nanoflagellates 生物量雖然亦高(圖 5-1),但生產率遠高於被攝食 率,使之在冬季有較高的碳生物量。而夏季 CR1487 航次的攝食率,亦因 nanoflagellates 生物量少(圖 5-1)有較低的被攝食率,而 CR1455 航次則生產率略等 於被攝食率(圖 4-65),即表示 Synechococcus 不論生產率多少隨即被 nanoflagellates 攝食,此可能是暖季 Synechococcus 在暖季有較低的碳生物量之原因。若將生產率 為負值者刪除且將被攝食率為負值者化整為零,則發現冷季 Synechococcus 受硝酸 鹽濃度顯著高於暖季影響(圖 4-8F),使之生產率遠高於暖季(圖 4-68)。而暖季兩航 次中,因 CR1487 航次受颱風影響(圖 3-6),硝酸鹽濃度高於同為暖季的 CR1455 航次,使其生產率亦較 CR1455 航次高。另外,雖然冷季的 nanoflagellates 生物量 雖然亦高(圖 5-1),但生產率遠高於被攝食率,使之在冬季有較高的碳生物量。而 夏季 CR1487 航次的攝食率,亦因 nanoflagellates 生物量少(圖 5-1)有較低的被攝食 率,而 CR1455 航次則生產率略等於被攝食率,即表示 Synechococcus 不論生產率 多少隨即被 nanoflagellates 攝食,此可能是暖季 Synechococcus 在暖季有較低的碳 生物量之原因。

(伍)、内波

另外 CR1455 航次,在內波擾動相較大的 S2 測站, Synechococcus 生物量是該 航次中最高者。雖然 S2 測站並無培養實驗可以佐證說明其生長率與被捕食率之關 係。但觀察[N+N]_{Mix},發現 S2 較 S1 高。根據 Sharples et al. (2007)在 Celtic Sea(47-49°N, 6-10°W)的內潮研究,發現內潮擾動有利於硝酸鹽擴散。S2 測站亦 可能是因有劇烈且短暫內波擾動使之有較高的[N+N]_{Mix}。除此之外, S2 測站有光 層深度為 66 m,較其他測站為淺,由上述討論推測,在此測站氮鹽豐富及無光線 抑制下,可能使 Synechococcus 有較高的生長率,因而顯現有較高的 Synechococcus 生物量。

綜合以上討論,造成 Synechococcus 在富營養鹽的季節、海域有較高的生物量, 而在貧營養鹽的季節、海域則相反之機制,本研究認為,可能是 Synechococcus 在 貧營養鹽海域受硝酸鹽不足之限制,在貧營養鹽的季節則同時受硝酸鹽不足及光 線太強的抑制,使之生長率低。而在富營養鹽的海域,雖然亦有較高的被捕食率, 但在氮鹽較豐富及無光線抑制下,生長率高於被捕食率,使之有高的生物量。此 說明本研究 Synechococcus 生物量在富營養鹽的冷季較貧營養鹽的暖季優勢,以及 相對富營養鹽的南海陸坡、陸棚較西北太平洋、黑潮和南海海盆海域優勢的原因。

第三節、Picoeukaryotes

Picoeukaryotes 與 Synechococcus 類似,其野外樣本生物量在冷季營養鹽時較高,暖季貧營養鹽(硝酸鹽、磷酸鹽)時較低(圖 4-16E)。Picoeukaryotes 生物量和硝酸鹽及磷酸鹽間有顯著正相關,與表水溫呈負相關(表 4-9A)。如前述,硝酸鹽及磷酸鹽間有顯著正相關,而此兩者亦與溫度間有顯著負相關。究竟溫度、營養鹽、 光線及捕食四個影響因子逐一討論如下。Picoeukaryotes 由於組成複雜(Dimier et al. 2009),其在生態上的角色地位以及生態因子對其族群的影響,皆不如 Prochlorococcus 及 Synechococcus 來得清楚。

(一)營養鹽

1.氮鹽

本研究結果顯示 Picoeukaryotes 生長率與[N+N]間之關係,僅在三航次資料合 併時有顯著正相關(圖 4-43)。但根據 Moore et al.(2008) 在北大西洋 (21-32°N,25-65°W, [N+N] < 30 nM)的研究,發現在添加1 μM 的 NO₃ 培養 48 小時 後, Picoeukaryotes 平均每個細胞之葉綠素濃度與控制組(未添加)間差異不顯著, 作者因此推測 Picoeukaryotes 可能不易受 NO₃ 或 NO₂ 限制(Moore et al. 2008)。但是 根據野外(Sargasso Sea, 30°50'N,64°10'W)時間序列調查研究中,常發現 Picoeukaryotes 在[N+N]高的海域生物量相對較高(DuRand et al. 2001)。二者間矛盾 之結果,可能是 Picoeukaryotes 組成複雜(Dimier et al. 2009)所致。至今 Picoeukaryotes 對氮鹽的利用,仍未解明(Moore et al. 2008)。另外在本研究中,硝 酸鹽與磷酸鹽之間有極顯著正相關(表 4-9B),硝酸鹽與磷酸鹽皆與溫度間有極顯著 負相關。故本研究結果,在三航次資料合併時,Picoeukaryotes 生長率與[N+N]間 之關係,無法排除是因其他與[N+N]共變之環境因子影響所致。

本研究添加 NH4 結果,顯示 Picoeukaryotes 僅在 CR950 的 K2D 測站的 C 水層, 「NH4」組生長率顯著較「Control」組差(P < 0.05,圖 4-69C)。其他組實驗皆不顯 著,根據 Moore et al. (2008)在西北大西洋(21-32°N,25-65°W)的研究顯示,NO₃及 NH4 對 Picoeukaryotes 生長而言,無明顯幫助。但 Davey et al. (2008)在西北大西洋 (3-12°N,15-50°W)的研究結果卻顯示,NH4 是有利於 Picoeukaryotes 生長。究竟本 研究中 Picoeukaryotes 在添加 NH4後,生長率無顯著增加,是 Picoeukaryotes 組成 複雜所致,或是實驗方法上的差異所致,有待後續研究更進一步釐清。

2.磷酸鹽

Picoeukaryotes 生長率與[SRP]間之關係,除暖季 CR1455 有顯著負相關外,其 餘航次或三航次資料合併皆無顯著相關(圖 4-46)。根據 Moore et al. (2008)在北大西 洋(21-32°N,25-65°W)的研究發現,在貧營養鹽的海域,添加 PO4⁻時並不會增加 Picoeukaryotes 細胞內葉綠素濃度。此外,其他文獻指出 Picoeukaryotes 的細胞膜 組成,大部分為非磷物質的 sulfolipids(Bell and Pond, 1996)、glycolipid(Kato et al, 1996)及 betaine lipids(Van Mooy et al, 2006),故 Picoeukaryotes 對磷的需求極低(Van Mooy et al, 2008)。此可解釋本研究中,Picoeukaryotes 生長率與[SRP] 無顯著正相 關(圖 4-46)之現象。而 CR1455 的 Picoeukaryotes 生長率與[SRP]有顯著負相關,可 能是該航次其他與[SRP] 共變之環境因子影響結果(表 4-15)。 本研究野外生物量樣本顯示,[Eurk]與[SRP]之間,僅 CR1487 的[Eurk]_s與 [SRP]_s有顯著負相關(表 4-6),其餘航次中[Eurk]與[SRP]間皆無顯著相關(表 4-2、7、 11)。而四航次資料合併時,[Syn]_s與[SRP]_s間以及[Syn]_{Mix}與[SRP]_{Mix}間之關係皆 呈顯著正相關(圖 4-28)。雖然 Van Mooy et al, (2008)之研究已指出 Picoeukaryotes 對磷的需求極低,但無法明確解釋為何在野外生物量調查中,[N+N]、[SRP]較高 的海域有較高的 Picoeukaryotes 生物量(Moore et al. 2008),類似者,本研究及 Mitbavkar et al. (2009)在日本 Sagami Bay(35°N,139.35°E),及 Wu et al. (2000)在 Sargasso Sea(26-32°N,60-70°W)的研究等,皆發現[SRP]較高的季節,Picoeukaryotes 生物量也相對較高。

3. 鐵(FeCl₃)

Picoeukaryotes 與其他二類超微浮游植物不同,在本研究添加鐵實驗中,不論 任何實驗組,其生長率與控制組差異皆不顯著(圖 4-65C)。根據 Moore et al. (2008) 在大西洋(21-32°N,25-65°W)的研究發現,即使在氮充足的情況下,添加 2 μM 的 Fe 對 Picoeukaryotes 生長仍無顯著幫助,該篇研究作者說明,雖然在該篇研究中, 無證據指出,該研究中磷酸鹽是否對 Picoeukaryotes 來說是充足的,但該研究海域 是磷缺乏海域,故造成添加 Fe 後,對 Picoeukaryotes 生長無顯著之原因,可能是 磷限制所致。另外根據 Bonnet et al. (2008)在南太平洋(9-34°S, 92-145°W) 在氮限制 海域([N+N]: [SRP] < 16:1)的研究亦發現,單獨添加 FeCl₃後,培養結束時的 Picoeukaryotes 生物量亦無顯著高於控制組,該篇作者亦指出造成此原因,可能與 氮缺乏有關。本研究添加 FeCl₃或 EDTA 後,均不會促進 Picoeukaryotes 生長,其 原因亦不排除可能是營養鹽不足之影響,但目前本研究並無足夠的證據可解明。

(二)光線

本研究培養實驗結果,顯示 Picoeukaryotes 不論在四航次資料合併之白天生長率與白天光照強度間(圖 4-39),或全天(白天+夜晚)生長率與培養期間白天均光照

111

強度間(圖 4-40),皆無顯著相關。而野外樣本生物量之結果亦顯示,[Eurk]_{30/200}與 有光層深度亦無顯著相關(圖 4-26),此結果亦與 Llabrés and Agustí (2006)的研究結 果相類似,即 Picoeukaryotes 對強光耐受性較 *Prochlorococcus* 高。只是 Picoeukaryotes 細胞種類組成複雜,其與光線間的關係,仍待後續研究瞭解(Dimier et al. 2009)。

(三)捕食

Picoeukaryotes 在「Control」組中的夜晚無明顯負成長(被捕食)現象(圖 4-50)。 顯示此「Control」組之 Picoeukaryotes 生長率應可代表 Picoeukaryotes 之生長率。 雖然 Picoeukaryotes 全天生長率與「Control」組之之 nanoflagellates 數量間可能呈 現某些相關,但此關係並無一致性 (圖 4-59)。因此「Control」組中 Picoeukaryotes 生長率與 nanoflagellates 間之關係可能為其他共變因子影響所致,如三航次合併資 料中,PNF<2 µm 以及 PNF2.5 µm 數量與硝酸鹽間有極顯著正相關,與溫度間有顯著 負相關(表 4-16),故生長率與 PNF<2 µm 及 PNF2.5 µm 間有正相關,無法排除是因與 硝酸鹽之正相關或與溫度之負相關所致。按 Hansen (1994)的研究結果,捕食者與 被捕者之間有最適體型比例,以微浮游生物食物網的捕食階層,最適體型比約 2-3:1(Chen et al. 2009),來估算 Picoeukaryotes (< 2 µm)的一階捕食者體型約為 4-6 µm,故推測南海 Picoeukaryotes 的第一階捕食者,其體型應較 Prochlorococcus 及 Synechococcus 之捕食者為大。因此在「Control」組中,Picoeukaryotes 全天生長率 與各類型 nanoflagellates 數量間之關係,可能是由那些與 nanoflagellates 數量共變 之環境因子所致。

檢查 Picoeukaryotes 被捕食率($G_{10 \ \mu m}$)(「< 10 μm 」組減去「Control」組) 與各 類型 nanoflagellates 數量間之關係,發現在 CR1455 與 CR1487 二航次, Picoeukaryotes 的被捕食率($G_{10 \ \mu m}$)與 HNF_{2-5 $\mu m}$ 有顯著正相關(圖 4-60),在 CR1455 Picoeukaryotes 被捕食率亦與 HNF_{5-10 $\mu m}}顯著正相關(圖 4-60),此結果與根據 Hansen$ $(1994)的研究結果估算 Picoeukaryotes 的一階捕食者體型約為 4-6 <math>\mu m$,吻合。但在}</sub>

112

冷季以及三航次合併資料中,Picoeukaryotes 被捕食則與各類型 nanoflagellates 皆無 顯著相關(圖 4-60)。為何未在所有航次呈現相同現象,仍待未來更深入研究。若探 討 Picoeukaryotes 對 nanoflagellates 碳生物量的貢獻,並以所有培養數據進行分析, 則發現 Picoeukaryotes 則不論在何航次,皆有較明顯的負生產率或負被攝食率,造 成此實驗結果,可能與培養水體中的營養鹽濃度,對 Picoeukaryotes 而言相對匱乏 所致。若將生產率為負值者刪除,被攝食率為負值者化整為零,則發現 Picoeukaryotes 與 Synechococcus 相似,皆在冷季生產率遠高於暖季,雖然冷季亦有 較高的被攝食率,但其生產率遠高於被攝食率,使之在冷季有較高的生物量。暖 季則可能受培養水體中的營養鹽濃度相對匱乏,使之有較低的生產率。

综合上述討論,在野外調查研究當中,常發現當營養鹽富足時,Picoeukaryotes 有相對較高的生物量,但受限於Picoeukaryotes 組成複雜,其在生態上的角色地位 以及各生態因子對不同族群的影響,均需後續研究更進一步釐清。雖然, Picoeukaryotes 的第一階捕食者體型可能約 4-6µm 的 nanoflagellates,但何類型的 nanoflagellates 是 Picoeukaryotes 的主要捕食者,亦需後續研究探討。

- Agawin, N. S. R., C. M. Duarte, and S. Agusti. 2000. Nutrient and temperature control of contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. Limnol. Oceanogr. 45: 591-600.
- Bell, M. V., and D. Pond. 1996. Lipid composition during growth of motile and coccolith forms of Emiliania huxleyi. Phytochemistry **41**: 465-471.
- Bertilsson, S., O. Berglund, D. M. Karl, and S. W. Chisholm. 2003. Elemental composition of marine *Prochlorococcus* and *Synechococcus*: Implications for the ecological stoichiometry of the sea. Limnol. Oceanogr. 48: 1721-1731.
- Bonnet, S., C. Guieu, F. Bruyant, O. Pra'sil, F. Van Wambeke, P. Raimbault, T.
 Moutin, C. Grob, M. Y. Gorbunov, J. P. Zehr, S. M. Masquelier, L. Garczarek, and
 H. Claustre. 2008. Nutrient limitation of primary productivity in the Southeast
 Pacific (BIOSOPE cruise). Biogeosciences 5: 215-225.
- Brown, S. L., M. R. Landry, R. T. Barber, L. Campbell, D. L. Garrison, and M. M. Gowing. 1999. Picophytoplankton dynamics and production in the Arabian Sea during the 1995 Southwest Monsoon. Deep-Sea Res. II 46: 1745-1768.
- Bruno, M., A. Va'zquez, J. Go'mez-Enri, J. M. Vargas, J. Garcı'a Lafuente, A. Ruiz-Canavate, L. Mariscal, and J. Vidal. 2006. Observations of internal waves and associated mixing phenomena in the Portimao Canyon area. Deep-Sea Res. II 53: 1219-1240.
- Campbell, L., B. Liu, H. A. Nolla, and D. Vaulot. 1997. Annual variability of phytoplankton and bacteria in the subtropical North Pacific Ocean at Station ALOHA during the 1991-1994 ENSO event. Deep-Sea Res. I 44: 167-192.
- —, H. A. Nolla, and D. Vaulot. 1994. The importance of *Prochlorococcus* to community structure in the Central North Pacific-Ocean. Limnol. Oceanogr. **39**: 954-961.
- , and D. Vaulot. 1993. Photosynthetic Picoplankton Community structure in the Subtropical North Pacific-Ocean near Hawaii (Station ALOHA).
 Deep-Sea Res. I 40: 2043-2060.

- Centurioni, L. R., P. P. Niiler, and D. K. Lee. 2004. Observations of inflow of Philippine Sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait. J. Phys. Oceanogr. 34: 113-121.
- Chen, B., B. Liu, and Z. Wang. 2009a. Trophic interactions within the microbial food web in the South China Sea revealed by size-fractionation method. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 368: 59-65.
- —, H. Liu, M. R. Landry, M. Dai, B. Huang, and J. Sun. 2009b. Close coupling between phytoplankton growth and microzooplankton grazing in the estern South China Sea. Limnol. Oceanogr. 54: 1084-1097.
- Chen, C. T. A., R. Ruo, S. C. Pai, C. T. Liu, and G. T. F. Wong. 1995. Exchange of water masses between the East-China-Sea and the Kuroshio off Northeastern Taiwan. Cont. Shelf Res. 15: 19-39.
- Chen, Y. L. L. 2005. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary production in the South China Sea. Deep-Sea Res. I **52**: 319-340.
- ——, 2000. Comparisons of primary productivity and phytoplankton size structure in the marginal regions of southern East China Sea. Cont. Shelf Res. 20: 437-458.
- —, H. Y. Chen, I. I. Lin, M. A. Lee, and J. Chang. 2007. Effects of cold eddy on Phytoplankton production and assemblages in Luzon Strait bordering the South China Sea. J. Oceanogr. 63: 671-683.
 - —, —, and Y. H. Lin. 2003. Distribution and downward flux of *Trichodesmium* in the South China Sea as influenced by the transport from the Kuroshio Current. Mar. Ecol. Prog. Ser. **259**: 47-57.
- , —, S. H. Tuo, and K. Ohki. 2008. Seasonal dynamics of new production from *Trichodesmium* N-2 fixation and nitrate uptake in the upstream Kuroshio and South China Sea basin. Limnol. Oceanogr. **53**: 1705-1721.
- Chisholm, S. W., S. L. Franket, R. Goericke, R. J. Olson, B. Palenik, J. B. Waterbury, L. West-Johnsrud, and E. R. Zettle. 1992. *Prochlorococcus*-marinus nov gen-nov

sp - an oxyphototrophic marine prokaryote containing divinyl Chlorophyll-a and Chlorophyll-B. Arch. Microbiol. **157:** 297-300.

- , S. W., R. J. Olson, E. R. Zettler, R. Goericke, J. B. Waterbury, and N. A.
 Welschmeyer. 1988. A novel free living Prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone. Nature 334: 340-343.
- Davey, M., G. A. Tarran, M. M. Mills, C. Ridame, R. J. Geider, and J. Laroche. 2008. Nutrient limitation of picophytoplankton photosynthesis and growth in the tropical North Atlantic. Limnol. Oceanogr. 53: 1722-1733.
- Debelius, B., J. M. Forja, T. A. Delvalls, and L. Lubian. 2009. Toxicity of copper in natural marine picoplankton populations. Ecotoxicol. Environ. Saf. **18**: 1095-1103.
- Diez, B., C. Pedros-Alio, and R. Massana. 2001. Study of genetic diversity of eukaryotic picoplankton in different oceanic regions by small-subunit rRNA gene cloning and sequencing. Appl. Environ. Microbiol. 67: 2932-2941.
- Dimier, C., C. Brunet, R. Geider, and J. Raven. 2009. Growth and photoregulation dynamics of the picoeukaryote *Pelagomonas* calceolata in fluctuating light. Limnol. Oceanogr. 54: 823-836.
- Dufresne, A., L. Garczarek, and F. Partensky. 2005. Accelerated evolution associated with genome reduction in a free-living prokaryote. Genome Biol. **6:** R14
- M. Salanoubat, F. Partensky, F. Artiguenave, I. M. Axmann, V. Barbe, S.
 Duprat, M. Y. Galperin, E. V. Koonin, F. L. Gall, K. S. Makarova, M. Ostrowski, S.
 Oztas, C. Robert, I. B. Rogozin, D. J. Scanlan, N. T. D. Marsac, J. Weissenbach, P.
 Wincker, Y. I. Wolf, and W. R. Hess. 2003. Genome sequence of the cyanobacterium *Prochlorococcus marinus* SS120, a nearly minimal oxyphototrophic genome. P. Natl. Acad. Sci. USA 100: 10020-10025.
- Durand, M. D., R. J. Olson, and S. W. Chisholm. 2001. Phytoplankton population dynamics at the Bermuda Atlantic Time-series station in the Sargasso Sea. Deep-Sea Res. II 48: 1983-2003.
- Fang, W. D., W. D. Fang and K. Wang. 1998. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation. Acta. Oceanogr. Taiwan 37: 1-16

- Farmer, D., Q. Li, and J. H. Park. 2009. Internal wave observations in the South China Sea: The role of rotation and non-linearity. Atmos. Ocean **47:** 267-280.
- Garside, C. 1982. A Chemiluminescent Technique for the determination of nanomolar concentrations of nitrate and nitrite in Sea-Water. Mar. Chem. 11: 159-167.
- Glover, H. E., A. E. Smith, and L. Shapiro. 1985. Diurnal-variations in photosynthetic rates comparisons of ultraphytoplankton with a larger phytoplankton size fraction. J. Plankton Res. 7: 519-535.
- Goericke, R., and D. J. Repeta. 1992. The pigments of *Prochlorococcus-Marinus* the presence of divinyl Chlorophyll-a and Chlorophyll-B in a marine prokaryote. Limnol. Oceanogr. **37:** 425-433.
- Hansen, B., P. K. Bjornsen, and P. J. Hansen. 1994. The Size ratio between planktonic predators and their prey. Limnol. Oceanogr. **39:** 395-403.
- Huang, Q. Z. and Y. R. Zheng. 1995. Currents in the northeastern South China Sea and bashi channel in March 1992. Proceedings of symposium of marine sciences in Taiwan Strait and its adjacent Waters, China Ocean , 72: 15-29
- Hsin, Y. C., C. R. Wu, and P. T. Shaw. 2008. Spatial and temporal variations of the Kuroshio east of Taiwan, 1982-2005: A numerical study. J Geophys. Res. Oceans 113: 1982-2005:
- Hsu, M. K., A. K. Liu, and C. Liu. 2000. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR. Cont. Shelf Res. **20:** 389-410.
- Hwang, C., and S. A. Chen. 2000. Fourier and wavelet analyses of TOPEX/Poseidon-derived sea level anomaly over the South China Sea: A contribution to the South China Sea Monsoon Experiment. J. Geophys Res. Oceans 105: 28785-28804.
- Hu, J., H. Kawamura, H. Hong, and Y. Qi. 2000. A review on the currents in the South China Sea: seasonal circulation, South China Sea warm current and

Kuroshio intrusion. J. Oceanogr. 56: 607-624.

- Inall, M. E., G. I. Shapiro, and T. J. Sherwin. 2001. Mass transport by non-linear internal waves on the Malin Shelf. Cont. Shelf Res. **21:** 1449–1472.
- Karl, D. M., and G. Tien. 1992. MAGIC A sensitive and precise method for measuring dissolved phosphorus in aquatic environments. Limnol. Oceanogr. 37: 105-116.
- Kato, M., M. Sakai, K. Adachi, H. Ikemoto, and H. Sano. 1996. Distribution of betaine lipids in marine algae. Phytochemistry 42: 1341-1345.
- Li, W. K. W., S. Rao, W. G. Harrison, J. C. Smith, J. J. Cullen, B. Irwin, and T. Platt. 1983. Autotrophic picoplankton in the tropical ocean. Science **219**: 292-295.
- , and A. M. Wood. 1988. Vertical-Distribution of North-Atlantic
 Ultraphytoplankton Analysis by Flow-Cytometry and Epifluorescence
 Microscopy. Deep-Sea Res. 35: 1615-1638.
- Liang, W. D., T. Y. Tang, Y. J. Yang, M. T. Ko, and W. S. Chuang. 2003. Upper-ocean currents around Taiwan. Deep-Sea Res. II **50**: 1085-1105.
- Lin, I. I., J. P. Chen, G. T. F. Wong, C. W. Huang, and C. C. Lien. 2007. Aerosol input to the South China Sea: Results from the MODerate resolution imaging spectro-radiometer, the quick scatterometer, and the measurements of pollution in the troposphere sensor. Deep-Sea Res. II 54: 1589-1601.
- Liu, B., J. Chang, C. M. Tseng, L. S. Wen, and K. K. Liu. 2007. Seasonal variability of picoplankton in the Northern South China Sea at the SEATS station. Deep-Sea Res. II 54: 1602-1616.
- —, M. Dagg, L. Campbell, and J. Urban-Rich. 2004. Picophytoplankton and bacterioplankton in the Mississippi River plume and its adjacent waters. Estuaries 27: 147-156.
- Liu, P., Y. F. Qian, and A. N. Huang. 2009. Impacts of land surface and sea surface temperatures on the onset date of the South China Sea summer monsoon. Adv. Atmos. Sci. 26: 493-502.

- Llabres, M., and S. Agusti. 2006. Picophytoplankton cell death induced by UV radiation: Evidence for oceanic Atlantic communities. Limnol. Oceanogr. **51**: 21-29.
- Lu, Z. M., J. P. Gan, M. H. Dai, and A. Y. Y. Cheung. 2010. The influence of coastal upwelling and a river plume on the subsurface chlorophyll maximum over the shelf of the northeastern South China Sea. J. Mar. Syst. 82: 35-46.
- Mann, E. L., N. Ahlgren, J. W. Moffett, and S. W. Chisholm. 2002. Copper toxicity and cyanobacteria ecology in the Sargasso Sea. Limnol. Oceanogr. **47:** 976-988.
- Martin, J. H., R. M. Gordon, and S. E. Fitzwater. 1990. Iron in antarctic waters. Nature **345**: 156-158.
- Mitbavkar, S., T. Saino, N. Horimoto, J. Kanda, and T. Ishimaru. 2009. Role of environment and hydrography in determining the picoplankton community structure of Sagami Bay, Japan. J. Oceanogr. 65: 195-208.
- Moore, C. M., M. M. Mills, R. Langlois, M. Milne, E. P. Achterberg, J. L. Roche and R. J. Geider. 2008. Relative influence of nitrogen and phosphorus availability on phytoplankton physiology and productivity in the oligotrophic sub-tropical North Atlantic Ocean. Limnol. Oceanogr. 53: 291-305.
- Moore, L. R., R. Goericke, and S. W. Chisholm. 1995. Comparative Physiology of *Synechococcus* and *Prochlorococcus* - influence of light and temperature on growth, pigments, fluorescence and absorptive properties. Mar. Ecol. Prog. Ser. 116: 259-275.
- , A. F. Post, G. Rocap, and S. W. Chisholm. 2002a. Utilization of different nitrogen sources by the marine cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. Limnol. Oceanogr. 47: 989-996.
- Morel, A., Y. H. Ahn, F. Partensky, D. Vaulot, and H. Claustre. 1993. *Prochlorococcus* and *Synechococcus* - a comparative-study of their optical-properties in relation to their size and pigmentation. J. Mar. Res. **51:** 617-649.

Neveux, J., D. Vaulot, C. Courties, and E. Fukai. 1989. Green photosynthetic bacteria

associated with the deep Chlorophyll maximum of the Sargasso Sea. CR. Acad. Sci. Paris. **308:** 9-14.

- New, A. L. 1988. Internal tidal mixing in the Bay of Biscay. Deep-Sea Res. **35**: 691-709.
- , and R. D. Pingree. 1990. Evidence for internal tidal mixing near the shelf break in the Bay of Biscay. Deep-Sea Res. 37: 1783-1803.
- Ning, X. R., W. K. W. Li, Y. M. Cai, C. G. Liu, and J. X. Shi. 2005. Standing stock and community structure of photosynthetic picoplankton in the northern South China Sea. Acta. Oceanol. Sin. 24: 57-76.
- Nitani, H., H. Stommel, and K. Yoshida 1972. Beginning of the Kuroshio. : In Kuroshio-its physical aspects, University of Washington, Seattle. 129-163
- Olson, R. J., S. W. Chisholm, E. R. Zettler, M. A. Altabet, and J. A. Dusenberry. 1990. Spatial and temporal distributions of prochlorophyte picoplankton in the North Atlantic Ocean. Deep-Sea Res. **37:** 1033-1051.
- —, —, —, and E. V. Armbrust. 1988. Analysis of *Synechococcus* pigment types in the sea using single and dual beam Flow-Cytometry. Deep-Sea Res **35**: 425-440.
- Pai, S. C., Y. J. Tsau, and T. I. Yang. 2001. PH and buffering capacity problems involved in the determination of ammonia in saline water using the indophenol blue spectrophotometric method. Anal. Chim. Acta. 434: 209-216.
- Palenik, B., and R. Haselkorn. 1992. Multiple evolutionary origins of prochlorophytes, the Chlorophyll B-Containing prokaryotes. Nature 355: 265-267.
- Partensky, F., J. Blanchot, F. Lantoine, J. Neveux, and D. Marie. 1996. Vertical structure of picophytoplankton at different trophic sites of the tropical northeastern Atlantic Ocean. Deep-Sea Res. I 43: 1191-1213.

—, —, and D. Vaulot. 1999a. Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic water: a review.

- , W. R. Hess, and D. Vaulot. 1999b. *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. Microbiology and molecular biology reviews. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 63: 106-127.
- Penaflor, E. L., C. L. Villanoy, C. T. Liu, and L. T. David. 2007. Detection of monsoonal phytoplankton blooms in Luzon Strait with MODIS data. Remote. Sens. Environ. 109: 443-450.
- Price, N. M., G. I. Harrison, J. G. Hering, R. J. Hudson, P. M. V. Nirel, B. Palenik, and F. M. M. Morel. 1988. Preparation and chemistry of the artificial algal culture medium Aquil. Biol. Oceanogr. 6: 443–461.
- Qiu, D. Z., Y. T. Huang, L. M. Chen, and Z. X. Guo. 1985. Circulation structures in the studied waters. In comprehensive investigations and studies of the South China Sea, ed. By South China Sea Institude of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Science Press, Beijing. 2: 204-230.
- Qu, T. D., Y. Y. Kim, M. Yaremchuk, T. Tozuka, A. Ishida, and T. Yamagata. 2004. Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea? J. Climate 17: 3644-3657.
- ——, and R. Lukas. 2003. The bifurcation of the North Equatorial Current in the Pacific. J. Phys. Oceanogr. **33:** 5-18.
- Saito, M. A., D. M. Sigman, and F. M. M. Morel. 2003. The bioinorganic chemistry of the ancient ocean: the co-evolution of cyanobacterial metal requirements and biogeochemical cycles at the Archean-Proterozoic boundary? Dalton. Trans. J. Inorg. Chem. 356: 308-318.
- Scanlan, D. J., and N. J. West. 2002. Molecular ecology of the marine cyanobacterial genera *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. Fems. Microbiol. Ecol. 40: 1-12.
- Shapiro, L. P., and E. M. Haugen. 1988. Seasonal distribution and temperature tolerance of *Synechococcus* in boothbay harbor, Maine. Est. Coast. Shelf Sci. 26: 517-525.

Sharples, J. and others 2007. Spring-neap modulation of internal tide mixing and

vertical nitrate fluxes at a shelf edge in summer. Limnol. Oceanogr. 52: 1735-1747.

- Shaw, P. T., and S. Y. Chao. 1994. Surface circulation in the South China Sea. Deep-Sea Res. I **41**: 1663-1683.
- —, S. Y. Chao, K. K. Liu, S. C. Pai, and C. T. Liu. 1996. Winter upwelling off Luzon in the northeastern South China Sea. J. Geophys. Res. Oceans. 101: 16435-16448.
- Strickl, J. D., T. R. Parsons, J. C. Stevenson, L. W. Billingsley, and R. H. Wigmore. 1972. Inorganic micronutrients in sea water in editors a practical handbook of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada, Ottawa. 49-77.
- Su et al., J. L. Su, B. X. Guan, and J. Z. Jiang. 1990. Physical features oceanography and marine biology an annual review. The Kuroshio. Part I. 28: 11–71
- Thompson, A. W., K. Huang, M. A. Saito, and S. W. Chisholm. 2011. Transcriptome response of high- and low-light-adapted *Prochlorococcus* strains to changing iron availability. Microb. Ecol. 5: 1580-1594.
- Ting, C. S., G. Rocap, J. King, and S. W. Chisholm. 2002. Cyanobacterial photosynthesis in the oceans: the origins and significance of divergent light-harvesting strategies. Trends Microbiol **10**: 134-142.
- Timmermans, K. R., B. Van Der Wagt, M. J. W. Veldhuis, A. Maatman, and H. J. W.
 De Baar. 2005. Physiological responses of three species of marine pico-phytoplankton to ammonium, phosphate, iron and light limitation. J. Sea Res. 53: 109-120.
- Tsai, A. Y., K. P. Chiang, J. Chang, and G. C. Gong. 2008. Seasonal variations in trophic dynamics of nanoflagellates and picoplankton in coastal waters of the western subtropical Pacific Ocean. Aquat. Microb. Ecol. 51: 263-274.
- Tseng, C. M., G. C. Gong, L. W. Wang, K. K. Liu, and Y. Yang. 2009a. Anomalous biogeochemical conditions in the northern South China Sea during the El-Nino events between 1997 and 2003. Geophys. Res. Lett. 36: 354-384

—, K. K. Liu, L. W. Wang, and G. C. Gong. 2009b. Anomalous hydrographic and biological conditions in the northern South China Sea during the 1997-1998 El Nino and comparisons with the equatorial Pacific. Deep-Sea Res. I 56: 2129-2143.

- Ueki, I., Y. Kashino, and Y. Kuroda. 2003. Observation of current variations off the New Guinea coast including the 1997-1998 El Nino period and their relationship with Sverdrup transport. J. Geophys. Res. Oceans. 108: 3243-3260
- Van Mooy, B. A. S., and A. H. Devol. 2008. Assessing nutrient limitation of *Prochlorococcus* in the North Pacific subtropical gyre by using an RNA capture method. Limnol. Oceanogr. 53: 78-88.
- , H. F. Fredricks, B. E. Pedler, S. T. Dyhrman, D. M. Karl, M. Kobliz, M. W.
 Lomas, T. J. Mincer, L. R. Moore, T. Moutin, M. S. Rappe, and E. A. Webb. 2009.
 Phytoplankton in the ocean use non-phosphorus lipids in response to phosphorus scarcity. Nature 458: 69-72.
- , G. Rocap, H. F. Fredricks, C. T. Evans, and A. H. Devol. 2006.
 Sulfolipids dramatically decrease phosphorus demand by picocyanobacteria in oligotrophic marine environments. P. Natl. Acad. Sci. USA 103: 8607-8612.
- Vaulot, D., F. Partensky, J. Neveux, R. F. C. Mantoura, and C. A. Llewellyn. 1990. Winter presence of Prochlorophytes in surface waters of the northwestern Mediterranean-Sea. Limnol. Oceanogr. 35: 1156-1164.
- Veldhuis, M. J. W., and G. W. Kraay. 1993. Cell Abundance and fluorescence of picoplankton in relation to growth irradiance and nitrogen availability in the Red-Sea. Neth. J. Sea Res. 31: 135-145.
- Wang, G. H., J. L. Su, and P. C. Chu. 2003. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data. Geophys. Res. Lett. **30:** 61-64
- Wang, Y. H., C. F. Dai, and Y. Y. Chen. 2007. Physical and ecological processes of internal waves on an isolated reef ecosystem in the South China Sea. Geophys Res Lett 34: 71-77
- Wen, L. S., K. T. Jiann, and P. H. Santschi. 2006. Physicochemical speciation of bioactive trace metals (Cd, Cu, Fe, Ni) in the oligotrophic South China Sea. Mar.

Chem. **101:** 104-129.

- Worden, A. Z. 2006. Picoeukaryote diversity in coastal waters of the Pacific Ocean. Aquat. Microb. Ecol. **43**: 165-175.
- Worden, A. Z., J. K. Nolan, and B. Palenik. 2004a. Assessing the dynamics and ecology of marine picophytoplankton: The importance of the eukaryotic component. Limnol. Oceanogr. 49: 168-179.
- Wu, J. F., W. Sunda, E. A. Boyle, and D. M. Karl. 2000. Phosphate depletion in the western North Atlantic Ocean. Science 289: 759-762.
- Wyrtki, K. 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian water. In NAGA report scientific result of marine investigation of the South Chain Sea and Gulf of Thailand 1959-1961, Scripps Insutution of Oceanography, La Jolla, California, 2: 195.
- Zhang, F., W. Z. Wang, Q. Z. Huang, Y. S. Li, and K. W. Chau. 1995. Summarycurrent structure in Bashi Channel. In proceedings of symposium of marine sciences in Taiwan Strait and its adjacent waters, China Ocean , Beijing. 65-72.
- Zinser, E. R., Z. I. Johnson, A. Coe, E. Karaca, D. Veneziano, and S. W. Chisholm. 2007. Influence of light and temperature on *Prochlorococcus* ecotype distributions in the Atlantic Ocean. Limnol. Oceanogr. **52**: 2205-2220.
- Zwirglmaier, K. and others 2008. Global phylogeography of marine *Synechococcus* and *Prochlorococcus* reveals a distinct partitioning of lineages among oceanic biomes. Environ. Microbiol. **10:** 147-161.



圖 3-1 黑潮經常流經範圍。圖為 1982-2005 年,平均秋季(9-11 月)表水(0-50m)海流 流向、流速圖,其中黑色實線選取範圍(20-22°N,121-123°E)涵蓋本研究黑潮測站, 亦為黑潮經常流經範圍(Hsin et al. 2008)。



圖 3-2 採樣測站位置圖。重點航次(CR910、CR1455、CR1487、CR950),測站包括 A、K1、K2 等 3 個黑潮測站以及海盆測站 (S5~S7、M1 及 KK1)、陸坡測站(S3、S4)與陸棚測站(S1、S2)等 9 個南海測站。獨立航次 CRITOP,測站包含 A1-A3(A3 採樣兩次)、C1-C22 等 20 個西北太平洋測站以及 T1、T2 兩個黑潮測站。另採樣期間內波通過測站有 CR910 的 IW1、IW3;CR1455 的 S1、S2 以及 CRITOP 的 T1、T2 等 6 個測站。



圖 3-3 比較重點四航次間表水溫度(SST)差異。柱狀圖表示平均值及標準差,航次樣本皆已扣除特殊測站(CR910 的 A、M1 測站; CR950 的 KK1、S2-3),故n=8。不同航次間之比較,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表 示彼此之間無顯著差異。


(B)



圖 3-4 CR910 航行前 Morakot 颱風路徑圖及衛星雲圖。(A) Morakot 颱風路徑圖, 圖上每個標示點間隔為 6 小時,咖啡色圓點為該航次測站位置。(B)Morakot 颱風 衛星雲圖。2009 年 8 月 6-8 日為該颱風影響研究測站之主要時間,紅色框框範圍 約 20-25°N,115-125°E,涵蓋本研究測站(資料來源: TDB 防災颱風資料庫 <u>http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php</u>)。

(A)



圖 3-5 CR1487 航行前 Lionrock 颱風路徑圖。颱風路徑圖上每個標示點間隔為 6 小時。紅色圓點為該航次測站位置。(資料來源:TDB 防災颱風資料庫 http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php)。



圖 3-6 CR1487 航行期間各測站到站時間與 Meranti 颱風路徑圖,颱風路徑圖上每個標示點間隔為6小時。黑色圓點為該航次測站位置及到站時間。(資料來源:TDB 防災颱風資料庫 http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php)。



圖 3-7 CRITOP 航行期間(A:9/21,B:9/22,C:9/25,D:9/26,E:9/27,F:10/01) 以 Taiwan Nowcast/Forecast System (TNFS) 針 對 台 灣 附 近 海 域 海 流 數 值 模 擬 之 結 果 。 取 自 美 國 海 軍 實 驗 室 (Naval Research Laboratory, NRL) (http://www7320.nrlssc.navy.mil/global_nlom32/taw.html) (Ko et al., 2008) 。亮粉紅色圓點為測站位置,黑色初框線為當日航行軌 跡。色階表示流速。



圖 3-8 比較 CRITOP 不同海域之生物量及環境因子。其中海域分為黑潮(Kuroshio, n = 2),西北太平洋逆時針渦流測站(Cyclonic, n = 12),西北太平洋順時針渦流測 站(Anti-cyclonic, n = 4),在順、逆時針渦流中間測站(Between, n = 5)。生物量資 料包括 Prochlorococcus 生物量([Pro]), Synechococcus 生物量([Syn])及 Picoeukaryotes 生物量([Eurk])。水文資料包括混合層深度(D_{mi}),硝酸躍層深度 (D_{ni}),表水溫度(SST),表水鹽度(SSS),硝酸鹽(NO_2+NO_3)濃度([N+N]),磷酸鹽濃 度([SRP])及葉綠素 a 濃度([T Chl])。下標 S 表示表水資料,下標 200 表示 200 m平 均資料。柱狀圖表示平均值及標準差。經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,皆差異不顯著。



(B)



圖 3-9 CRITOP 探測時, Parma 颱風路徑圖及衛星雲圖。(A) Parma 颱風路徑圖,圖 上每個標示點間隔為6小時,黑色圓點為該航次測站位置。(B) Parma 颱風衛星雲 圖。2009 年 10 月 3-7 日正在 T2 測站採樣, 紅色框框範圍約 18-22°N,120-125°E, 涵蓋本研究測站(資料來源:TDB 防災颱風資料庫 <u>http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php</u>)。



圖 3-10 CRITOP,T1 測站之各因子時間序列變化。(A) 採樣時,CTD 下放(down cast,實線)、上收(up cast,虛線)時記錄之溫度(Temp,℃)、鹽度(Salinity)、密度 (density,Kg m⁻³)資料,(B)0-200 m 平均鹽度,(C)0-200 m 平均硝酸鹽濃度 ($[N+N]_{200}, \mu M$),(D)0-200 m 平均磷酸鹽濃度($[SRP]_{200}, \mu M$),(E)0-200 m 平均葉 緣素 a 濃度($[T Chl]_{200}, mg m^{-3}$),(F)0-200 m 平均 *Prochlorococcus* 生物量($[Pro]_{200}, \times 10^4$ Cells ml⁻¹),(G)0-200 m 平均 *Synechococcus* 生物量($[Syn]_{200}, \times 10^4$ Cells ml⁻¹),(H)0-200 m 平均 Picoeukaryotes 生物量($[Eurk]_{200}, \times 10^4$ Cells ml⁻¹)。



圖 3-11 CRITOP,T2 測站之各因子時間序列變化。(A) 採樣時,CTD 下放(down cast,實線)、上收(up cast,虛線)時記錄之溫度(Temp,℃)、鹽度(Salinity)、密度 (density,Kg m⁻³)資料,(B)0-200 m 平均鹽度,(C)0-200 m 平均硝酸鹽濃度 ($[N+N]_{200}, \mu M$),(D)0-200 m 平均磷酸鹽濃度($[SRP]_{200}, \mu M$),(E)0-200 m 平均葉 線素 a 濃度($[T Chl]_{200}, mg m^{-3}$),(F)0-200 m 平均 *Prochlorococcus* 生物量($[Pro]_{200}, \times 10^4$ Cells ml⁻¹),(G)0-200 m 平均 *Synechococcus* 生物量($[Syn]_{200}, \times 10^4$ Cells ml⁻¹),(H)0-200 m 平均 Picoeukaryotes 生物量($[Eurk]_{200}, \times 10^4$ Cells ml⁻¹)。



圖 3-12 CR910 IW1 和 IW3 測站內波通過前、後 EK500 所示水體密度變化情形。



圖 3-13 CR1455-S1 站內波通過前、後 EK500 所示水體密度變化情形。其中內波前(Cast1:8:55)、內波發生時(Cast2:12:45)及 內波通過後(Cast3:14:25; Cast4:15:55; Cast5:17:35)皆有生物量及營養鹽採樣。



圖 3-14 CR1455, S2 測站內波通過前、後 EK500 所示水體密度變化情形。其中內波前(Cast1:15:40)、內波發生時(Cast2:18:10) 及內波通過後(Cast3:18:40; Cast4:21:40; Cast5:23:10)皆有生物量及營養鹽採樣。



圖 3-15 三類超微浮游植物在流式細胞儀之辨識。上以流式細胞儀分析辨識各類族 群細胞之辨識 Synechococcus(紅色點區域)因含有藻膽素,會產生橘紅色螢光(波長 579nm),而 Prochlorococcus(綠色點區域)和 Picoeukaryotes(紫色點區域)則無藻膽 素,只靠 Chl a 被藍光雷射激發產生紅色螢光(波長 692nm)。Prochlorococcus 體 型比 Picoeukaryotes 體型小,故透過 1 μm Beads(藍色點區域)定位可將兩者區分, 細胞數計數則需透過加入已定量的 2 μm Beads(咖啡色點區域)來推算。



圖 3-16 色素型(PNF)及非色素型(HNF)nanoflagellates 區別方法。(A) PNF 以藍光激發後,細胞含有葉綠素部分,呈亮紅色螢光,(B) 以 UV 光激發後,染 DAPI 的 PNF 其細胞核呈亮藍色。(C) HNF 以藍光激發後,細胞呈亮綠色,(D) 以 UV 光激發後, 染 DAPI 的 HNF 其細胞核呈亮藍色。



圖 4-1 四重點航次各航次不同海域間表水(5 m)鹽度(Salinty)平均。柱狀圖表示平均 值及標準差,航次樣本皆已扣除特殊測站(CR910 的 A、M1 測站; CR950 的 KK1、 S2-3)。個別航次中,若其中一海域樣本數只有一個時 (n=1),則不計該海域後, 再以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析。字母相同者表示彼此 之間無顯著差異(P>0.05)。(A)為 CR910 航次,(B)為 CR1455 航次,(C)為 CR1487 航次,(D)為 CR950 航次,(E) 比較四個重點航次間表水鹽度。



圖 4-2 CR910 各測站水文資料、營養鹽和生物量垂直剖面圖。



圖 4-3 CR1455 各測站水文資料、營養鹽和生物量垂直剖面圖。



圖 4-4 重點四航次中,(A)黑潮測站、(B) 南海海盆測站、(C) 南海陸坡測站及 (D) 南海陸棚測站之溫鹽曲線圖。圖中典型 Kuroshio 與 South Chain Sea 溫鹽曲 線為 Chen and Huang(1996)所定義。



圖 4-5 四重點航次各航次不同海域間混合層深度(D_{mi})差異。柱狀圖表示平均值及 標準差,航次樣本皆已扣除特殊測站(CR910 的 A、M1 測站;CR950 的 KK1、S2-3)。 經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,字母相同者表示彼此 之間無顯著差異(P>0.05)。(A)為 CR910 航次,(B)為 CR1455 航次,(C)為 CR1487 航次,(D)為 CR950 航次,(E) 比較四個重點航次間混合層深度(D_{mi})。



圖 4-6 重點航次航行期間,船上記錄之每日白天平均光照強度(Light intensity)與中 央氣象局恆春氣象站記錄之全天日照量(Solar radiation)之關係。



圖 4-7 比較重點四航次之平均光照強度及有光層深度(Deu)之差異。柱狀圖表示平均值及標準差,光照強度為航行期間船上記錄 之每日 PAR 值平均,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表示彼此之間無顯著差異。(A)比較 重點四航次之平均光照強度,(B)比較不同海域間有光層深度之差異(四航次合併),(C)比較 CR910 不同海域間之有光層深度差 異,(D)比較 CR1455 不同海域間之有光層深度差異。



圖 4-8 重點四航次硝酸鹽濃度 (NO_2+NO_3) 差異。(A)CR910 不同海域間之差異, (B)CR1455 不同海域間之差異,(C)CR1487 不同海域間之差異,(D)CR950 不同海 域間之差異,(E) 合併四航次資料後,不同海域間之差異,(F)四航次間之差異。柱狀圖表示平均值及標準差,航次樣本皆已扣除特殊測站(CR910 的 A、M1 測站; CR950 的 KK1、S2-3)。個別航次中,若其中一海域樣本數只有一個時(n = 1), 則扣除該海域後再以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母 相同者表示彼此之間差異不顯著(P > 0.05)。 $[N+N]_S$ 為表水硝酸鹽濃度, $[N+N]_{Mix}$ 為混合層平均硝酸鹽濃度, $[N+N]_{200}$ 為 0-200 m 平均硝酸鹽濃度。



圖 4-9 重點四航次硝酸躍層深度(D_{ni})差異。(A)CR910 不同海域間之差異, (B)CR1455 不同海域間之差異,(C)CR1487 不同海域間之差異,(D)CR950 不同海 域間之差異,(E)四航次資料合併不同海域間之差異、(F)四航次間之差異。柱狀圖 表示平均值及標準差,航次樣本皆已扣除特殊測站(CR910 的 A、M1 測站;CR950 的 KK1、S2-3),個別航次中,若其中一海域樣本數只有一個時(n = 1)則扣除 該海域後再以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者 表示彼此之間無顯著差異。



圖 4-10 重點四航次磷酸鹽濃度差異。(A)CR910 不同海域間之差異,(B)CR1455 不同海域間之差異、(C)CR1487 不同海域間之差異,(D)CR950 不同海域間之差異, (E) 合併四航次資料後,不同海域間之差異,(F)四航次間之差異。柱狀圖表示平 均值及標準差,航次樣本皆已扣除特殊測站(CR910 的 A、M1 測站;CR950 的 KK1、 S2-3)。個別航次中,若其中一海域樣本數只有一個時(n = 1),則扣除該海域後再 以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表示彼此之 間差異不顯著(P>0.05)。[SRP]s 為表水磷酸鹽濃度、[SRP]_{Mix} 為 0 m-混合層深度平 均磷酸鹽濃度、[SRP]₂₀₀ 為 0-200 m 平均磷酸鹽濃度。



圖 4-11 重點四航次 Prochlorococcus 生物量之差異。(A)CR910 不同海域間之差異, (B)CR1455 不同海域間之差異,(C)CR1487 不同海域間之差異,(D)CR950 不同海 域間之差異,(E)不同航次間之差異。柱狀圖表示平均值及標準差,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表示彼此之間無顯著差 異。[Pro]表示 Prochlorococcus 生物量,下標 S 表示表水生物量,下標 Mix 表示混 合層平均生物量,下標 200 表示 0-200 m 平均生物量。



圖 4-12 CR910 Prochlorococcus 垂直分佈圖及其 30 m 累計生物量占 200 m 累計生物量百分比。



圖 4-13 重點四航次 Synechococcus 生物量之差異。(A)CR910 不同海域間之差異, (B)CR1455 不同海域間之差異,(C)CR1487 不同海域間之差異,(D)CR950 不同海 域間之差異,(E)不同航次間之差異。柱狀圖表示平均值及標準差,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表示彼此之間無顯著差 異。[Syn]表示 Synechococcus 生物量,下標 S 表示表水生物量,下標 200 表示 200 m 平均生物量,下標 Mix 表示混合層平均生物量。



圖 4-14 CR1455 Prochlorococcus 垂直分佈圖及其 30 m 累計生物量占 200 m 累計生物量百分比。



圖 4-15 CR1455 Synechococcus 垂直分佈圖及其 30 m 累計生物量占 200 m 累計生物 量百分比。



圖 4-16 重點四航次 Picoeukaryotes 生物量之差異。(A)CR910 不同海域間之差異, (B)CR1455 不同海域間之差異,(C)CR1487 不同海域間之差異,(D)CR950 不同海 域間之差異,(E)不同航次間之差異。柱狀圖表示平均值及標準差,經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表示彼此之間無顯著差 異。[Eurk]表示 Picoeukaryotes 生物量,下標 S 表示表水生物量,下標 200 表示 200 m 平均生物量,下標 Mix 表示混合層平均生物量。



圖 4-17 CR1487 各測站水文資料、營養鹽和生物量垂直剖面圖。



圖 4-18 CR1487 Synechococcus 垂直分佈圖及其 30 m 累計生物量占 200 m 累計生物 量百分比。



圖 4-19 CR1487 Synechococcus 垂直分佈圖及其 30 m 累計生物量占 200 m 累計生物 量百分比。



圖 4-20 重點四航次葉綠素 a 濃度差異。(A)CR910 不同海域間之差異,(B)CR1455 不同海域間之差異,(C)CR1487 不同海域間之差異,(D)CR950 不同海域間之差異, (E) 合併四航次資料後,不同海域間之差異,(F)四航次間之差異。柱狀圖表示平 均值及標準差,航次樣本皆已扣除特殊測站(CR910 的 A、M1 測站;CR950 的 KK1、 S2-3),個別航次中,若其中一海域樣本數只有一個時(n=1)則扣除該海域後再 以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表示彼此之 間無顯著差異。[T Chl]s 為表水葉綠素 a 濃度、[T Chl]_{Mix} 為混合層平均葉綠素 a 濃度、[T Chl]₂₀₀ 為 200 m 平均葉綠素 a 濃度。



圖 4-21 CR950 各測站水文資料、營養鹽和生物量垂直剖面圖。



圖 4-22 CR950 航行期間(2010 年 12 月 3-9 日)以 Taiwan Nowcast/Forecast System (TNFS)針對台灣附近海域海流數值模擬之結果。 取自美國海軍實驗室(Naval Research Laboratory, NRL)(http://www7320.nrlssc.navy.mil/global_nlom32/taw.html), (Ko et al., 2008)。 粉紅色方點為測站位置,黑色粗框線圈選測站為當日作業測站(12 月 3 日:K2;12 月 4 日:S7-S6;12 月 5 日:S5-S3;2 月 6 日:S3-S1;12 月 7 日:KK1站;12 月 9 日:S2-3)。色階表示流速。



圖 4-23 CR950 Prochlorococcus 垂直分佈圖及其 30 m 累計生物量占 200 m 累計生物量百分比。


圖 4-24 三類超微浮游植物生物量與表水溫度(SST)間之關係。(A)表水生物量與表水溫度之關係。(B)水表至 30 m 累計生物量占水表至 200 m 累計生物量之百分比 與表水溫之關係。



圖 4-25 (A)四航次間及(B)四海域間 (南海陸棚(Shelf)、南海陸坡(Slope)、南海海盆(Basin)及黑潮(Kuroshio))三類超微浮游植物之水 表至 30 m 累計生物量占 200 m 累計至水表生物量之百分比。柱狀圖表示平均值及標準差。不同航次間或海域間之比較,經 One Way ANOVA 分析後再以 Duncan's -Multiple Range Test 分析進行分析,相同字母表示彼此之間差異不顯著(P>0.05)。



圖 4-26 三類超微浮游植物水表至 30 m 累計生物量占 200 m 累計至水表生物量之百分 比與有光層深度(Deu)之關係。



圖 4-27 三類超微浮游植物生物量與硝酸鹽濃度間關係。(A)表水生物量與表水硝酸鹽濃度([N+N]s),(B)混合層平均生物量與混合層平均硝酸鹽濃度([N+N]_{Mix}),(C)0-200 m平均生物量與 0-200 m 平均硝酸鹽濃度([N+N]₂₀₀),(D)水表至 30 m 累計生物量占 200 m 累計至水表生物量之百分比與硝酸躍層深度(D_{ni})。



圖 4-28 三類超微浮游植物生物量與磷酸鹽濃度間之關係。(A)表水生物量與表水磷酸鹽 濃度([SRP]_S),(B)混合層平均生物量與混合層平均磷酸鹽([SRP]_{Mix}),(C)200 m 平均生 物量與 200 m 平均磷酸鹽濃度([SRP]₂₀₀)。



圖 4-29 三類超微浮游植物生物量與葉綠素 a 濃度間之關係。(A)表水生物量與葉綠素 a 濃度([T Chl]s),(B)混合層平均生物量與混合層平均葉綠素 a 濃度([T Chl]_{Mix}),(C)200 m 平均生物量與 200 m 平均葉綠素 a 濃度([T Chl]₂₀₀)。



圖 4-30 比較 CRITOP 西北太平洋測站(Pacific Ocean)與暖季重點三航次(CR910、 CR1455、CR1487)的黑潮(Kuroshio)和南海(South Chain Sea, SCS)三海域間之(A)水文、 (B)環境因子、(C)生物量間之差異。水文資料:包括混合層深度(D_{mi})、硝酸躍層深度 (D_{ni})、表水溫(SST),環境因子資料包括:硝酸鹽(NO_2+NO_3)濃度([N+N])、磷酸鹽濃度 ([SRP])及葉綠素 a 濃度([T Ch], mg m⁻³),生物量資料:包括 *Prochlorococcus* 生物量 ([Pro]),*Synechococcus* 生物量([Syn]),Picoeukaryotes 生物量([Eurk])。下標 S 表示表水 資料,下標 200 表示 200 m 平均資料。柱狀圖表示平均值及標準差。海域之間以 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表示彼此之間無顯著差異。



圖 4-31 CR1455 航次 S2 測站遇內波之隨時間 0-150 m 平均生物量、營養鹽以及溫度、 鹽度、密度變化。(A)CTD 所記錄垂直水體(含下放(doen cast)及上收(up cast))之溫度、 鹽度、密度變化,(B) 0-150 m 平均鹽度([Salinty]₁₅₀)隨採樣時間變化,(C)0-150 m 平均 硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N]₁₅₀)隨採樣時間變化,(D)0-150 m 平均磷酸鹽濃度([SRP]₁₅₀) 隨採樣時間變化,(E)0-150 m 平均葉綠素 a 濃度([T Chl]₁₅₀)隨採樣時間變化,(F)0-150 m 平均 *Prochlorococcus* 生物量([Pro]₁₅₀)隨採樣時間變化,(G)0-150 m 平均 *Synechococcus* 生物量([Syn]₁₅₀)隨採樣時間變化,(H)0-150 m 平均 Picoeukaryotes 生物量([Eurk]₁₅₀)隨採 樣時間變化。



圖 4-32 CR1455 航次 S1 測站遇內波之隨時間 0-83 m 平均生物量、營養鹽以及溫度、鹽 度、密度變化。(A)CTD 所記錄垂直水體(含下放(doen cast)及上收(up cast))之溫度、鹽 度、密度變化,(B) 0-83m 平均鹽度([Salinty]₈₃)隨採樣時間變化,(C)0-83 m 平均硝酸鹽 (NO₂+NO₃)濃度([N+N]₈₃)隨採樣時間變化,(D)0-83 m 平均磷酸鹽濃度([SRP]₈₃)隨採樣時 間變化,(E)0-83 m 平均葉綠素 a 濃度([T Chl]₈₃)隨採樣時間變化,(F)0-83 m 平均 *Prochlorococcus* 生物量([Pro]₈₃)隨採樣時間變化,(G)0-83 m 平均 *Synechococcus* 生物量 ([Syn]₈₃)隨採樣時間變化,(H)0-83 m 平均 Picoeukaryotes 生物量([Eurk]₈₃)隨採樣時間變 化。



圖 4-33 CRITOP, T2 測站, 三類超微浮游植物與葉綠素 a 隨時間之垂直分佈變化。該測站每六個小時採樣一次, 第一日週期變化 (First day cycle)為 2009 年 10 月 5 日的 6:50 至 10 月 6 日的 6:00。第二日週期變化(Second day cycle) 為 2009 年 10 月 6 日的 6:00 至 10 月 7 日的 12:00。



圖 4-34 CRITOP T1 測站,各水文因子、營養鹽、生物量之隨時間垂直分佈變化。(A) 水文因子包括 CTD 記錄之水溫(Temp)、鹽度(Salinty)、密度(Density)資料。(B)營養鹽包 括硝酸鹽濃度([N+N])、磷酸鹽濃度([SRP])、葉綠素 a 濃度([T Chl])。(C) 生物量包括 *Prochlorococcus* 生物量([Pro])、*Synechococcus* 生物量([Syn])、Picoeukaryotes 生物量 ([Eurk])。採樣時間為 2009 年 10 月 1 日的 18:50 至 10 月 2 日的 12:00。每六個小時採樣 一次。



圖 4-35 Prochlorococcus 白天生長率與培養當天白天平均光強度間之關係。



圖 4-36 Prochlorococcus 全天(白天+夜間)生長率與培養當天白天平均光強度間之關係。



圖 4-37 Synechococcus 白天生長率與培養當天白天平均光強度間之關係。



圖 4-38 Synechococcus 全天(白天+夜間)生長率與培養當天白天平均光強度間之關係。



圖 4-39 Picoeukaryotes 白天生長率與培養當天白天平均光強度間之關係。



圖 4-40 Picoeukaryotes 全天(白天+夜間)生長率與培養當天白天平均光強度間之關係。



圖 4-41 Prochlorococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前硝酸鹽([N+N])濃度間之關係。



圖 4-42 Synechococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前硝酸鹽([N+N])濃度間之關係。



圖 4-43 Picoeukaryotes 全天(白天+夜晚)生長率與培養前硝酸鹽([N+N])濃度間之關係。



圖 4-44 Prochlorococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前磷酸鹽([SRP])濃度間之關係。



圖 4-45 Synechococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前磷酸鹽([SRP])濃度間之關係。



圖 4-46 Picoeukaryotes 全天(白天+夜晚)生長率與培養前磷酸鹽([SRP])濃度間之關係。



圖 4-47 體型為 1 μm 之色素型(PNF)及非色素型(HNF)nanoflagellates。(A)藍光激發下之 PNF,(B)以 UV 光激發下之 PNF,(C)藍光激發下之 HNF,(D) UV 光激發下之 HNF。



圖 4-48 Prochlorococcus 生物量在「Contro」培養組隨培養時間之變化。圖中灰色區塊 為該航次夜間時段。航次包括 CR1455、CR1487、CR950。



圖 4-49 Synechococcus 生物量在「Control」培養組隨培養時間之變化。圖中灰色區塊為該航次夜間時段。航次包括 CR1455、CR1487、CR950。



圖 4-50 Picoeukaryotes 生物量在「Control」培養組隨培養時間之變化。圖中灰色區塊為該航次夜間時段。航次包括 CR1455、CR1487、CR950。



圖 4-51 CR1455 *Prochlorococcus* 夜間生長率與各類型 nanoflagellates 之關係。其中其中 PNF 表示色素型 nanoflagellates; HNF 表示 非色素型 nanoflagellates。下標<2 μm 表示 nanoflagellates 體型小於 2 μm; 下標 5-10 μm 表示 nanoflagellates 體型介於 5-10 μm。



圖 4-52 CR1487 Prochlorococcus 夜間生長率與各類型 nanoflagellates 之關係。其中 PNF 表示色素型 nanoflagellates; HNF 表示非色 素型 nanoflagellates。下標<2 μm 表示 nanoflagellates 體型小於 2 μm; 下標 2-5 μm 表示 nanoflagellates 體型介於 2-5 μm。



圖 4-53 CR950 Prochlorococcus 夜間生長率與各類型 nanoflagellates 之關係。其中其中 PNF 表示色素型 nanoflagellates; HNF 表示 非色素型 nanoflagellates。下標<2 μm 表示 nanoflagellates 體型小於 2 μm; 下標 2-5 μm 表示 nanoflagellates 體型介於 2-5 μm。



圖 4-54 Prochlorococcus 夜間生長率與培養當天白天平均光強度間之關係。



圖 4-55 *Prochlorococcus* 被捕食率與各類型 nanoflagellates 數量間之關係。其中被捕食率計算為 K_{<2μm} 減去 K_{<10μm}; nanoflagellates 數量計算為「< 10μm」培養組減去「Control」之各類型 nanoflagellates 數量。PNF 表色素型 nanoflagellates, HNF 表異營型 nanoflagellates。下標表示 nanoflagellates 之體型。



圖 4-56 Synechococcus 在「Control」培養組之全天(白天+夜晚)生長率(K<2μm)與四類 nanoflagellates 間之關係。其中 PNF 表色素型 nanoflagellates, HNF 表異營型 nanoflagellates。下標表示 nanoflagellates 之體型。



圖 4-57 Synechococcus 被捕食率與各類型 nanoflagellates 數量間之關係。其中被捕食率計算為 K_{<2 μm} 減去 K_{<10μm}; nanoflagellates 數量計算為「< 10 μm」培養組減去「Control」之各類型 nanoflagellates 數量。PNF 表色素型 nanoflagellates, HNF 表異營型 nanoflagellates。下標表示 nanoflagellates 之體型。



圖 4-58 CR950 培養實驗中體型 2-5 μm 之色素型 nanoflagellates(PNF_{2-5μm})數量與體型約 5-10 μm 之異營型 nanoflagellates(HNF_{5-10μm})數量間之關係。



圖 4-59 Picoeukaryotes 在「Control」培養組之全天(白天+夜晚)生長率與四類 nanoflagellates 間之關係。其中 PNF 表色素型 nanoflagellates, HNF 表異營型 nanoflagellates。下標表示 nanoflagellates 之體型。


圖 4-60 Picoeukaryotes 被捕食率與各類型 nanoflagellates 數量間之關係。其中被捕食率計算為 K_{<2 μm} 減去 K_{<10μm}; nanoflagellates 數量計算為「< 10 μm」培養組減去「Control」之各類型 nanoflagellates 數量。PNF 表色素型 nanoflagellates, HNF 表異營型 nanoflagellates。下標表示 nanoflagellates 之體型。



圖 4-61 三類超微浮游植物碳流通量(Carbon flow)往上層食物鏈(nanoflagellates)傳遞之 關係。Pro 為 *Prochlorococcus*, Syn 為 *Synechococcus*, Eurk 為 Picoeukaryotes。數值為 碳生物量($\mu g C L^{-1}$),箭頭為每小時碳生物量流通情形。括號為每小時三類超微浮游植 物生產率中有多少比例被攝食者捕食。



圖 4-62 三類超微浮游植物生產率與被攝食率間之關係。



圖 4-63 三類超微浮游植物碳流通量(Carbon flow)往上層食物鏈(nanoflagellates)傳遞之 關係,數據分析已去除負生產率並將負被攝食率化整為零。Pro 為 *Prochlorococcus*, Syn 為 *Synechococcus*, Eurk 為 Picoeukaryotes。數值為碳生物量(µg C L⁻¹),箭頭為每小時 碳生物量流通情形。括號為每小時三類超微浮游植物生產率中有多少比例被攝食者捕 食。



圖 4-64 三類超微浮游植物生產率與被攝食率間之關係,數據分析已去除負生產率並將 負被攝食率化整為零。



圖 4-65 CR1455 三類超微浮游植物添加 FeCl₃培養實驗結果。(A) Prochlorococcus 生長率, 率,(B) Synechococcus 生長率,(C) Picoeukaryotes 生長率。柱狀圖表示平均值及標準差, 經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表示彼此之間無 顯著差異。每個測站字尾為 D 者表示白天採水、字尾為 N 者表示夜間採水,每個測站 皆採雨水層,即A 水層(5 m,代表透光度 100%,即 LDP = 100%)和 C 水層(白天採水 培養時採透光度 38%(LDP = 38%)水層;夜間採水培養時採固定 15 m 深度)。此次培養 每測站、水層皆採 3 重複(n = 3)。



圖 4-66 CR950 三類超微浮游植物添加 FeCl₃培養實驗結果。(A) Prochlorococcus 生長率, 率,(B) Synechococcus 生長率,(C) Picoeukaryotes 生長率。柱狀圖表示平均值及標準差, 經 One-Way ANOVA 及 Duncan's Multiple Range Test 分析,字母相同者表示彼此之間無 顯著差異。每個測站字尾為 D 者表示白天採水、字尾為 N 者表示夜間採水,每個測站 皆採雨水層,即 A 水層(5 m,代表透光度 100%,即 LDP = 100%)和 C 水層(白天採水 培養時採透光度 38%(LDP = 38%)水層;夜間採水培養時採固定 15 m 深度)。此次培養 每測站、水層皆採 2 重複(n = 2)。



圖 4-67 合併航次及測站後,三類超微浮游植物添加培養實驗結果。(A)添加 FeCl3 實驗,n=32,(B)添加 NH4Cl 實驗,n=31。柱 狀圖表示平均值及標準差,因受航次、測站、水層間變異大,故將不同航次、測站、水層間當作 Block 後,(A) 添加 FeCl3 實驗以 Randomized Block Design 及 Duncan's Multiple Range Test 分析後,字母相同者表示彼此之間無顯著差異;(B)添加 NH4Cl 實驗以 paired-t test 比較 NH4 組與控制組間之差異。



圖 4-68 CR1487 三類超微浮游植物添加 NH₄Cl(1 μ M)培養實驗結果。(A) Prochlorococcus 生長率,(B) Synechococcus 生長率,(C) Picoeukaryotes 生長率。柱狀圖表示平均值及標 準差,經 paired-t test 比較, P < 0.05 者有顯著差異,無標示 P 者為無顯著差異。每個測 站字尾為 D 者表示白天採水、字尾為 N 者表示夜間採水,每個測站皆採雨水層,即 A 水 層(5 m,代表透光度 100%,即 LDP = 100%)和 C 水層(白天採水培養時採透光度 38 %(LDP = 38%)水層;夜間採水培養時採固定 15 m 深度)。此次培養每測站、水層皆採 2 重複(n = 2)。



圖 4-69 CR950 三類超微浮游植物添加 NH₄Cl(1 μ M)培養實驗結果。(A) Prochlorococcus 生長率,(B) Synechococcus 生長率,(C) Picoeukaryotes 生長率。柱狀圖表示平均值及標 準差,經 paired-t test 比較, P<0.05 者有顯著差異,無標示 P 者為無顯著差異。每個測 站字尾為 D 者表示白天採水、字尾為 N 者表示夜間採水,每個測站皆採兩水層,即 A 水 層(5 m,代表透光度 100%,即 LDP = 100%)和 C 水層(白天採水培養時採透光度 38 %(LDP = 38%)水層;夜間採水培養時採固定 15 m 深度)。此次培養每測站、水層皆採 2 重複(n = 2)。



圖 5-1 Nanoflagellates 在各航次的平均數量及各類型 Nanoflagellate 組成百分比。(A) 各別航次中,平均每個「Control」組的總 nanoflagellates 豐度,(B) 各別航次中,平均每個「< 10 μ m」組的總 nanoflagellates 豐度,(C)平均每個「Control」組中,各類型 nanoflagellates 的組成比例,其中 PNF 表示色素型 nanoflagellates;HNF 表示非色素型 nanoflagellates。下標 2 μ m 表示 nanoflagellates 體型小於 2 μ m;下標 2-5 μ m 表示 nanoflagellates 體型介於 2-5 μ m;下標 5-10 μ m 表示 nanoflagellates 體型介於 5-10 μ m,(D)平均 每個「< 10 μ m」組中,各類型 nanoflagellates 的組成比例。



圖 5-2 三類超微浮游植物生長率與被捕食率間之關係。其中被捕食率計算為「Control」 培養組全天生長率 $(K_{<2 \ \mu m})$ 減去「<10 μm 」培養組全天生長率 $(K_{<10 \mu m})$ 。



圖 5-3 Synechococcus 全天(白天+夜晚)生長率與培養前海水溫度間之關係。

表 3-1 各重點航次採樣日期、採樣測站、進行培養實驗之測站及培養項目。○:表示僅採垂直水體(Profile)生物量。●:表示除採 垂直水體生物量外,並進行培養實驗。培養實驗以上標 G 表示捕食實驗,上標 N 表示為添加 NH4Cl 實驗,上標 F 表示添加 FeCl3 實驗。

			South China Sea								V			
Cruise	Time		Shelf		Slope			Basin			Kurosnio			
		S1	S2	\$2-3****	S 3	S 4	S5	S6	S 7	M1 ^{***}	KK1 ^{**}	K1	K2	A^*
CR910	2009/8/14-20	0	0			0	0	0	0	0		0	0	0
CR1455	2010/5/12-17	• GF	0		0	● ^G		• GF	0			● ^G	● ^G	
CR1487	2010/9/4-10	0	• ^{GN}		0	0	0	• GN	0				0	
CR950	2010/12/2-11	0	• ^{GN}	0	• GNF	0	• ^{GN}	0	0		• GN		• GNF	

*A 測站在黑潮經常流經海域,但表水(5 m)CTD 測得 PSU = 33.6,可能受 Morakot 淡水輸入之影響。此測站在本研究中只出現一次。

** KK1 測站為 Southeast Asia Time-series Station (SEATS, 18°N; 116°E)。在本研究中僅出現一次。

*** M1 測站在本研究僅出現一次。

**** S2-3(2010年12月9日)站為 S2(2010年12月6日)站之第二次採樣 (時間間隔差三天)。

表 3-2 CRITOP 各測站之三類超微浮游植物生物量及水文資料。透過美國海軍實驗室(Naval Research Laboratory, NRL)針對台灣附近海域海流數值模擬結果(Taiwan Nowcast/Forecast System, TNFS, Ko et al., 2008)。將測站區分為 12 個逆時針渦流(Cyclonic eddy)測站, 4 個順時針渦流(Anti-cyclonic eddy)測站, 5 個夾在順、逆時針渦流間(Between)之測站,以及 2 個黑潮(Kuroshio)測站。生物量資料包括 *Prochlorococcus* 生物量([Pro],×10⁴ Cells ml⁻¹), *Synechococcus* 生物量([Syn],×10⁴ Cells ml⁻¹)及 Picoeukaryotes 生物量([Eurk],×10⁴ Cells ml⁻¹)。水文資料包括混合層深度(D_{mi},m),硝酸躍層深度(D_{ni},m),表水溫度(SST,°C),表水鹽度(SSS),硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N],nM),磷酸鹽濃度([SRP],nM)及葉綠素 a 濃度([T Chl], μ g m⁻³)。下標 S 表示表水資料,下標 200 表示 200 m 平均資料。

Area	Kuroshio		Pacific Ocean	
Eddy		Cyclonic	Anti-cyclonic	Between
Dni	94.2 ± 24.1	92.8 ± 23.0	93.9 ± 16.5	84.6 ± 27.5
Dmi	60.0 ± 9.9	47.3 ± 11.1	64.0 ± 13.7	53.4 ± 13.3
SST	29.30 ± 0.27	29.42 ± 0.14	29.51 ± 0.43	29.44 ± 0.18
SSS	34.17 ± 0.02	34.28 ± 0.14	34.28 ± 0.05	34.26 ± 0.05
[Pro]S	16.38 ± 1.03	13.07 ± 4.24	15.04 ± 3.32	14.32 ± 5.25
[Pro]200	11.21 ± 2.36	9.71 ± 2.42	9.94 ± 2.31	8.41 ± 1.80
[Syn]S	0.19 ± 0.10	0.14 ± 0.06	0.49 ± 0.54	0.22 ± 0.12
[Syn]200	0.15 ± 0.06	0.14 ± 0.05	0.23 ± 0.13	0.16 ± 0.05
[Eurk]S	0.05 ± 0.00	0.07 ± 0.02	0.09 ± 0.03	0.08 ± 0.04
[Eurk]200	0.10 ± 0.01	0.11 ± 0.05	0.12 ± 0.04	0.10 ± 0.03
[N+N]S	13 ± 1	19 ± 11	20 ± 13	24 ± 14
[N+N]200	1085 ± 277	1048 ± 299	808 ± 126	1409 ± 25
[SRP]S	20 ± 1	20 ± 6	21 ± 7	30 ± 3
[SRP]200	102 ± 23	102 ± 18	94 ± 14	108 ± 13
[T Chl]S	77 ± 26	73 ± 18	112 ± 0.039	88 ± 33
[T Chl]200	113 ± 2	116 ± 16	116 ± 3	111 ± 19

表 3-3 各類培養實驗進行之航次,日出、日落時間,測站,項目,培養時間,採樣時間與採樣水溫(Temp),混合層深度(D_{mi}), 硝酸躍層深度(D_{ni}),硝酸鹽濃度([N+N]),磷酸鹽濃度([SRP])。各測站名稱字尾為D表示白天採水培養,字尾為N表示夜晚採 水培養。每次培養皆採A及C兩個水層,A水層即5m,代表透光度100%(LDP=100%),而C水層若白天採水培養時為透光度 38%(LDP=38%)水層;若夜間採水培養時則採固定15m深度。培養項目包括捕食實驗(Grazer)、添加FeCl3實驗(Fe)及添加NH4Cl 實驗(NH4)。

Cruise	Sunrise	Sunset	Station	Item	Starting time	Culture period (hr)	Sampling time during incubatim
CR1455	05:20	18:27	K1D	Grazer	A : 14:30 C : 14:30	26.5	14:30 • 19:00 • 6:30 • 19:00 ·
			K2D	Grazer	A:06:30 C:06:30	24	6:30 × 18:30 × 6:30 °
			SED	Crosser y Fa	A: 12:30	29.5	12:30 • 18:00 • 6:00 • 18:00 •
			30D	Glazer re	C: 13:00	29	13:00 • 18:00 • 6:00 • 18:00 •
			S6N	Grazer • Fe	A : 20:30 C : 20:30	24	20:30 • 7:30 • 20:30 •
			S4D	Grazer	A: 11:30 C: 11:30	24	11:30 • 11:30 •
			S1D	Grazer • Fe	A: 09:30 C: 09:30	20.5	9:30 • 17:00 • 6:00 •
			S1N	Grazer Fe	A : 20:00 C : 20:00	21.5	20:00 · 6:00 · 17:30 ·
CR1487	05-41	18-11	\$6D	Grazer > NH	A: 11:00	18.5	11:00 • 18:30 • 5:30 •
01(1407	05.41	10.11	SOL	Grazer Tring	C: 10:20	19.2	10:20 • 18:30 • 5:30 •
			S6N	Grazer NH4	A : 21:00	21.5	21:00 • 5:30 • 18:30 •
			5011	orazor 1414	C: 20:30	22	20:30 • 5:30 • 18:30 ·
			S2N	Grazer $\ NH_4$	A : 21:30 C : 21:30	21	21:30 \$ 5:30 \$ 18:30 \$
CR950	06:20	17:13	K2D	Grazer $\$ NH ₄ $\$ Fe	A : 10:30 C : 10:30	19.5	10:30 • 14:30 • 17:30 • 21:30 • 6:00 •
			S5D	Grazer ${\scriptstyle \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! $	A:08:00 C:08:00	22	8:00 \ 12:00 \ 16:00 \ 18:00 \ 0:00 \ 6:00 \
			CON.	с	A:02:00	16	2:00 \$ 6:00 \$ 10:00 \$ 14:00 \$ 18:00 \$
			83IN	Grazer VNH ₄ V Fe	C:01:00	17	1:00 \$ 6:00 \$ 10:00 \$ 14:00 \$ 18:00 \$
			S2D	Grazer $\$ NH ₄	A: 08:30 C: 08:30	13	8:30 × 14:00 × 18:00 × 21:30 °
			KK1D	Grazer $\ NH_4$	A:09:00 C:09:00	21	9:00 • 14:00 • 18:00 • 6:00 •

表 4-1 CR910 不同海域間水文環境及生物量。水文環境包括表水溫(SST)、表水鹽度 (SSS)、混合層深度(D_{mi})、硝酸躍層深度(D_{ni})、硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N])、磷酸鹽 濃度([SRP])及葉綠素 a 濃度([T Chl])。生物量包括 *Prochlorococcus* 生物量([Pro])、 *Synechococcus* 生物量([Syn])及 Picoeukaryotes 生物量([Eurk.]),下標 S 表示表水、下標 mix 表示混合層平均、下標 200 表示 200 公尺平均。

		South Ch	77 11			
Area	Shelf	Slope	Basin		Kurosh	10
Variables	Mean±SD	S4	Mean±SD	M1*	Mean±SD	A**
SST (°C)	29.2 ± 0.2	29.3	29.5 ± 0.1	29.5	29.2±0.1	29.5
SSS (PSU)	$\textbf{33.6} \pm \textbf{0.0}$	33.2	$\textbf{33.2} \pm \textbf{0.1}$	33.4	34.2±0.1	33.6
D _{mi} (m)	58 ± 16	39	69 ± 12	64	71±19	33
D _{ni} (m)	42 ± 21	40	49 ± 30	57	89 ±7	56
[N+N] _S (nM)	11 ± 4	12	15 ± 7	9	15 ± 8	6
[N+N] _{Mix} (µM)	$0.24\pm\!0.24$	0.01	$\textbf{0.23} \pm \textbf{0.22}$	0.03	$\textbf{0.02} \pm \textbf{0.00}$	0.16
[N+N] ₂₀₀ (µM)	$\textbf{6.64} \pm \textbf{2.22}$	7.86	$\textbf{3.60} \pm \textbf{1.63}$	2.00	$\textbf{0.65} \pm \textbf{0.04}$	1.95
[SRP] _S (nM)	20 ± 6	33	26 ± 10	38	18 ± 4	20
[SRP] _{Mix} (µM)	$\textbf{0.05} \pm \textbf{0.02}$	0.03	$\textbf{0.04} \pm \textbf{0.02}$	0.08	$\textbf{0.02} \pm \textbf{0.00}$	0.05
[SRP] ₂₀₀ (µM)	$\textbf{0.45} \pm \textbf{0.03}$	0.63	$\textbf{0.25} \pm \textbf{0.08}$	0.41	$\textbf{0.06} \pm \textbf{0.00}$	0.17
[T Chl] _S (µg m ⁻³)	75 ± 13	90	81 ± 12	105	$\textbf{98} \pm \textbf{21}$	76
[T Chl] _{Mix} (mg m ⁻³)	$\textbf{0.24} \pm \textbf{0.16}$	0.09	$\textbf{0.15} \pm \textbf{0.04}$	0.13	$\textbf{0.14} \pm \textbf{0.03}$	0.20
[T Chl] ₂₀₀ (mg m ⁻³)	$\boldsymbol{0.17 \pm 0.02}$	0.09	$\textbf{0.12} \pm \textbf{0.02}$	0.13	$\textbf{0.15} \pm \textbf{0.04}$	0.13
[Pro] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	10.63 ± 7.81	15.27	12.36 ± 2.25	10.44	10.87 ± 3.13	9.73
$[Pro]_{Mix}$ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	7.30 ± 4.79	16.08	13.06 ± 0.99	11.74	12.97 ± 0.17	11.18
[Pro] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\pmb{2.97 \pm 2.10}$	6.54	$\textbf{6.19} \pm \textbf{0.44}$	5.50	$\textbf{7.32} \pm \textbf{0.21}$	4.63
[Syn] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	1.11 ± 0.34	1.13	$\textbf{0.98} \pm \textbf{0.05}$	0.93	$\boldsymbol{0.68 \pm 0.17}$	1.11
[Syn] _{Mix} (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	1.16 ± 0.42	1.06	$\textbf{1.17} \pm \textbf{0.20}$	0.76	0.30 ± 0.42	0.01
[Syn] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.45} \pm \textbf{0.10}$	0.41	$\textbf{0.57} \pm \textbf{0.15}$	0.36	$\textbf{0.30} \pm \textbf{0.06}$	0.57
[Eurk] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\boldsymbol{0.06 \pm 0.06}$	0.11	$\textbf{0.12} \pm \textbf{0.04}$	0.09	$\boldsymbol{0.07 \pm 0.02}$	0.04
[Eurk] _{Mix} (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\boldsymbol{0.12\pm0.08}$	0.12	$\textbf{0.18} \pm \textbf{0.04}$	0.10	0.06 ± 0.00	0.11
[Eurk] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\boldsymbol{0.07 \pm 0.04}$	0.14	0.16 ± 0.05	0.12	$\textbf{0.06} \pm \textbf{0.00}$	0.07

* M1 測站在本研究僅出現一次。

**A 測站在黑潮經常流經海域,但表水(5 m)CTD 測得 PSU=33.6,可能受 Morakot 淡水輸入之影響。此測站在本研究只出現一次。

表 4-2 CR910 三類超微浮游植物生物量與環境因子之相關係數。[Pro]表示 *Prochlorococcus* 生物量、[Syn]表示 *Synechococcus* 生物量、[Eurk]表示 Picoeukaryotes 生物量。環境因子包括表水溫(SST)、表水鹽度(SSS)、硝酸躍層深度(D_{ni})、混合層深度 (D_{mi})、硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N])、磷酸鹽濃度([SRP])、葉綠素 a 濃度([T Chl]),下 標 S 表示表水資料、下標 Mix 表示混合層平均資料、下標 200 表示 0-200 m 平均資料。 (A)表水, n=8。

Variables	[Pro] _S	[Syn] _S	[Eurk.] _S	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N] _S	[SRP] _S
[Syn] _S	0.67								
[Eurk.] _S	0.78*	0.49							
Dmi	0.17	-0.02	0.26						
Dni	-0.06	-0.44	-0.29	0.58					
SST	-0.36	-0.25	0.03	-0.18	-0.16				
SSS	-0.27	-0.57	-0.51	0.30	0.66	-0.61			
[N+N] _S	-0.11	-0.13	0.18	0.61	0.24	0.03	0.06		
[SRP] _S	0.24	0.16	0.25	-0.58	-0.59	0.36	-0.60	-0.27	
[T Chl] _S	-0.37	-0.70	-0.12	-0.22	0.13	0.10	0.37	0.12	-0.19

(B)混合層平均,n=8。

Variables	[Pro] _{Mix}	[Syn] _{Mix}	[Eurk.] _{Mix}	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N] _{Mix}	[SRP] _{Mix}
[Syn] _{Mix}	-0.36								
[Eurk.] _{Mix}	0.25	0.45							
D _{mi}	0.09	-0.15	0.29						
D _{ni}	0.27	-0.76*	-0.37	0.58					
SST	0.12	0.26	0.20	-0.18	-0.16				
SSS	-0.18	-0.74*	-0.69	0.30	0.66	-0.61			
[N+N] _{Mix}	-0.57	0.71*	0.32	-0.06	-0.71*	0.16	-0.33		
[SRP] _{Mix}	-0.54	0.82*	0.40	-0.20	-0.84**	0.13	-0.48	0.96**	
[T Chl] _{Mix}	-0.93**	0.40	-0.28	-0.20	-0.36	0.05	0.12	0.71*	0.65

(C)200 m 平均, n = 8。

Variables	[Pro] ₂₀₀	[Syn] ₂₀₀	[Eurk.] ₂₀₀	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N] ₂₀₀	[SRP] ₂₀₀
[Syn] ₂₀₀	-0.20								
[Eurk.] ₂₀₀	0.35	0.66							
D _{mi}	0.35	0.11	0.01						
D _{ni}	0.49	-0.66	-0.52	0.58					
SST	0.01	0.37	0.34	-0.18	-0.16				
SSS	0.16	-0.66	-0.77*	0.30	0.66	-0.61			
[N+N] ₂₀₀	-0.713*	0.15	-0.05	-0.62	-0.53	0.17	-0.54		
[SRP] ₂₀₀	-0.56	0.09	0.07	-0.64	-0.52	0.04	-0.56	0.96**	
[T Chl]200	-0.57	-0.02	-0.45	-0.14	-0.19	-0.25	0.42	-0.06	-0.17

*P < 0.05; **P < 0.01

表 4-3 CR1455 不同海域間水文環境及生物量。水文環境包括表水溫(SST)、表水鹽度 (SSS) 、混合層深度(D_{mi})、硝酸躍層深度(D_{ni})、硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N])、磷酸鹽 濃度([SRP])及葉綠素 a 濃度([T Chl])。生物量包括 *Prochlorococcus* 生物量([Pro])、 *Synechococcus* 生物量([Syn])及 Picoeukaryotes 生物量([Eurk.]),下標 S 表示表水、下標 mix 表示混合層平均、下標 200 表示 200 公尺平均、-表示無資料。

4		5	South Cl	hina Sea		Kana kia
Area	Shelf		Slo	ре	Basin	Kurosnio
Variables	Mean+SD	S3**	S4***	Mean+SD	Mean+SD	Mean+SD
SST (°C)	27.3±0.5	27.6	27.2	27.4±0.3	28.3±0.3	28.3±0.5
SSS (PSU)	34.2±0.1	34.3	34.2	34.3±0.1	33.8±0.1	34.6±0.1
D _{mi} (m)	37±25	11	103	57±65	26±4	53±27
D _{ni} (m)	40±23	75	41	58±24	55 ±7	134±21
[N+N] _S (nM)	23 ± 3	5	13	9 ± 6	16 ± 11	16 ± 11
[N+N] _{Mix} (µM)	$\textbf{0.09} \pm \textbf{0.03}$	0.01	2.73	$\textbf{1.37} \pm \textbf{1.92}$	$\textbf{0.01} \pm \textbf{0.00}$	$\textbf{0.02} \pm \textbf{0.00}$
[N+N] ₂₀₀ (µM)	$\textbf{7.64} \pm \textbf{1.00}$	-	5.03	-	$\textbf{7.38} \pm \textbf{0.42}$	$\textbf{0.34} \pm \textbf{0.37}$
[SRP] _S (nM)	30 ± 4	26	35	31 ± 6	29 ± 2	55 ± 30
[SRP] _{Mix} (µM)	$\textbf{0.05} \pm \textbf{0.00}$	0.03	0.24	$\textbf{0.14} \pm \textbf{0.15}$	$\textbf{0.04} \pm \textbf{0.00}$	$\textbf{0.06} \pm \textbf{0.03}$
[SRP] ₂₀₀ (µM)	$\textbf{0.52} \pm \textbf{0.08}$	-	0.38	-	$\textbf{0.47} \pm \textbf{0.01}$	$\textbf{0.07} \pm \textbf{0.02}$
[T Chl] _S (μg m ⁻³)	126 ± 48	134	159	147 ± 18	91 ± 3	103 ± 4
[T Chl] _{Mix} (mg m ⁻³)	$\textbf{0.19} \pm \textbf{0.04}$	0.13	0.27	$\textbf{0.20} \pm \textbf{0.10}$	$\textbf{0.10} \pm \textbf{0.02}$	$\textbf{0.10} \pm \textbf{0.01}$
[T Chl] ₂₀₀ (mg m ⁻³)	$\textbf{0.13} \pm \textbf{0.02}$	-	0.18	-	$\textbf{0.15} \pm \textbf{0.04}$	$\textbf{0.10} \pm \textbf{0.03}$
[Pro] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	14.06 ± 2.99	21.10	15.50	18.30 ± 3.96	10.36 ± 2.81	7.48 ± 2.15
[Pro] _{Mix} (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	15.02 ± 5.73	21.10	8.39	14.75 ± 8.98	11.82 ± 4.33	$\textbf{8.44} \pm \textbf{2.50}$
$[Pro]_{200}$ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{5.47} \pm \textbf{3.82}$	-	4.90	-	$\textbf{7.19} \pm \textbf{0.19}$	6.97 ± 0.55
[Syn] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\boldsymbol{1.63 \pm 1.10}$	1.94	1.72	$\textbf{1.83} \pm \textbf{0.16}$	$\textbf{0.75} \pm \textbf{0.05}$	$\boldsymbol{0.37 \pm 0.14}$
[Syn] _{Mix} (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\boldsymbol{1.81 \pm 0.97}$	1.85	0.77	$\textbf{1.31} \pm \textbf{0.77}$	$\textbf{0.83} \pm \textbf{0.09}$	$\textbf{0.25} \pm \textbf{0.35}$
[Syn] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.49} \pm \textbf{0.09}$	-	0.40	-	$\textbf{0.63} \pm \textbf{0.026}$	$0.21\pm\!0.02$
[Eurk] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.24} \pm \textbf{0.17}$	0.15	0.18	$\boldsymbol{0.17\pm0.02}$	$\textbf{0.15} \pm \textbf{0.01}$	0.12 ± 0.01
[Eurk] _{Mix} (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.41} \pm \textbf{0.07}$	0.15	0.28	$\textbf{0.22} \pm \textbf{0.09}$	$\textbf{0.14} \pm \textbf{0.01}$	$\textbf{0.14} \pm \textbf{0.02}$
[Eurk] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.25} \pm \textbf{0.07}$	-	0.17	-	$\textbf{0.26} \pm \textbf{0.23}$	$\textbf{0.13} \pm \textbf{0.02}$

*有內波通過。

**S3 站採樣水深最深至 127 m, 故無 200 m 平均資料。

***S4 站有湧升。

表 4-4 CR1455 三類超微浮游植物生物量與環境因子之相關係數。[Pro]表示 *Prochlorococcus* 生物量、[Syn]表示 *Synechococcus* 生物量、[Eurk]表示 Picoeukaryotes 生物量。環境因子包括表水溫(SST)、表水鹽度(SSS)、硝酸躍層深度(D_{ni})、混合層深度 (D_{mi})、硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N])、磷酸鹽濃度([SRP])、葉綠素 a 濃度([T Chl]),下 標 S 表示表水資料、下標 Mix 表示混合層平均資料、下標 200 表示 0-200 m 平均資料。 (A)表水, n=8。

Variables	[Pro] _S	[Syn] _S	[Eurk.] _S	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N] _S	[SRP] _S
[Syn] _S	0.62								
[Eurk.] _S	0.08	0.80*							
Dmi	-0.11	-0.18	-0.25						
Dni	-0.43	-0.67	-0.60	0.03					
SST	-0.60	-0.84**	-0.71*	-0.05	0.54				
SSS	-0.14	-0.05	-0.03	0.23	0.67	-0.16			
[N+N] _S	-0.05	-0.11	0.16	-0.53	-0.10	-0.33	0.01		
[SRP] _S	-0.61	-0.43	-0.24	0.46	0.484	0.48	0.49	-0.36	
[T Chl] _S	0.42	0.88**	0.72*	0.180	-0.43	-0.82	0.27	-0.14	-0.12

(B)混合層平均,n=8。

Variables	[Pro] _{Mix}	[Syn] _{Mix}	[Eurk.] _{Mix}	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N] _{Mix}	[SRP] _{Mix}
[Syn] _{Mix}	0.49								
[Eurk.] _{Mix}	0.12	0.65							
D _{mi}	-0.45	-0.55	0.08						
D _{ni}	-0.22	-0.63	-0.60	0.03					
SST	-0.27	-0.74*	-0.81*	-0.05	0.54				
SSS	-0.20	-0.15	0.05	0.23	0.67	-0.16			
[N+N] _{Mix}	-0.31	-0.12	0.20	0.77*	-0.32	-0.43	0.02		
[SRP] _{Mix}	-0.41	-0.22	0.20	0.87**	-0.24	-0.36	0.11	0.98**	
[T Chl] _{Mix}	-0.02	0.43	0.72*	0.49	-0.62	-0.86**	0.04	0.79*	0.75*

(C)200 m 平均, n = 7。

Variables	[Pro] ₂₀₀	[Syn] ₂₀₀	[Eurk.] ₂₀₀	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N] ₂₀₀	[SRP] ₂₀₀
[Syn] ₂₀₀	-0.18								
[Eurk.] ₂₀₀	-0.19	0.60							
D _{mi}	-0.03	-0.48	-0.43						
D _{ni}	0.50	-0.81*	-0.40	0.03					
SST	0.68	-0.11	-0.04	-0.05	0.54				
SSS	-0.16	-0.92**	-0.47	0.23	0.67	-0.16			
[N+N] ₂₀₀	-0.26	0.93**	0.58	-0.39	-0.91**	-0.40	-0.80*		
[SRP] ₂₀₀	-0.34	0.89**	0.54	-0.33	-0.94**	-0.49	-0.746	0.99**	
[T Chl]200	-0.32	0.52	0.65	-0.00	-0.50	-0.34	-0.45	0.52	0.51

*P < 0.05 ; **P < 0.01

表 4-5 CR1487 不同海域間水文環境及生物量。水文環境包括表水溫(SST)、表水鹽度 (SSS)、混合層深度(D_{mi})、硝酸躍層深度(D_{ni})、硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N])、磷酸鹽 濃度([SRP])及葉綠素 a 濃度([T Chl])。生物量包括 *Prochlorococcus* 生物量([Pro])、 *Synechococcus* 生物量([Syn])及 Picoeukaryotes 生物量([Eurk.]),下標 S 表示表水、下標 mix 表示混合層平均、下標 200 表示 200 公尺平均。

A	S	South China Se	a	Vuusahia	
Area	Shelf	Slope	Basin	Kurosnio	
Variables	Mean+SD	Mean+SD	Mean+SD	K2	
SST (°C)	29.0±0.2	29.3±0.0	29.1±0.1	30.2	
SSS (PSU)	33.4±0.1	33.5±0.0	33.5±0.1	34.4	
D _{mi} (m)	35±13	43±3	80±22	52	
D _{ni} (m)	44±11	65±1	103±22	181	
[N+N] _S (nM)	63 ± 21	23 ± 16	34 ± 11	15	
[N+N] _{Mix} (µM)	$\textbf{0.08} \pm \textbf{0.04}$	$\textbf{0.02} \pm \textbf{0.01}$	0.05 ± 0.01	0.01	
[N+N] ₂₀₀ (µM)	$\textbf{7.83} \pm \textbf{0.31}$	$\textbf{4.99} \pm \textbf{0.63}$	2.56 ± 1.02	0.26	
[SRP] _S (nM)	17 ± 1	18 ± 1	26 ± 8	27	
[SRP] _{Mix} (µM)	$\textbf{0.03} \pm \textbf{0.00}$	$\textbf{0.02} \pm \textbf{0.00}$	$\textbf{0.03} \pm \textbf{0.01}$	0.03	
[SRP] ₂₀₀ (µM)	$\textbf{0.42} \pm \textbf{0.02}$	$\textbf{0.33} \pm \textbf{0.04}$	$\textbf{0.18} \pm \textbf{0.10}$	0.07	
$[T Chl]_S$ (µg m ⁻³)	129 ± 13	127 ± 3	238 ± 47	56	
[T Chl] _{Mix} (mg m ⁻³)	$\textbf{0.20} \pm \textbf{0.01}$	$\textbf{0.15} \pm \textbf{0.01}$	0.26 ± 0.06	0.06	
[T Chl] ₂₀₀ (mg m ⁻³)	$\textbf{0.13} \pm \textbf{0.00}$	$\textbf{0.10} \pm \textbf{0.01}$	$\textbf{0.20} \pm \textbf{0.03}$	0.11	
$[\mathbf{Pro}]_{\mathbf{S}} \qquad (\mathbf{x} \ 10^4 \ \mathbf{Cells} \ \mathbf{ml}^{-1})$	$\textbf{6.71} \pm \textbf{1.60}$	$\textbf{7.83} \pm \textbf{0.63}$	16.91 ± 5.12	2.99	
$[Pro]_{Mix}$ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	13.06 ± 2.05	$\textbf{8.09} \pm \textbf{0.46}$	16.68 ± 5.33	2.80	
[Pro] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{4.36} \pm \textbf{2.15}$	$\textbf{4.23} \pm \textbf{0.56}$	$\textbf{8.95} \pm \textbf{1.43}$	4.48	
[Syn] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\boldsymbol{1.38 \pm 0.63}$	1.42 ± 0.57	$\boldsymbol{1.20\pm0.29}$	0.15	
[Syn] _{Mix} (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{2.18} \pm \textbf{0.34}$	$\textbf{1.21} \pm \textbf{0.28}$	$\textbf{1.08} \pm \textbf{0.17}$	0.13	
[Syn] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.50} \pm \textbf{0.23}$	$\textbf{0.42} \pm \textbf{0.07}$	$\textbf{0.57} \pm \textbf{0.09}$	0.09	
[Eurk] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.11} \pm \textbf{0.01}$	$\textbf{0.11} \pm \textbf{0.01}$	$\textbf{0.10} \pm \textbf{0.02}$	0.10	
[Eurk] _{Mix} (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.30} \pm \textbf{0.03}$	$\textbf{0.15} \pm \textbf{0.01}$	$\textbf{0.16} \pm \textbf{0.08}$	0.08	
[Eurk] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.23} \pm \textbf{0.04}$	$\textbf{0.12} \pm \textbf{0.02}$	$\textbf{0.18} \pm \textbf{0.03}$	0.08	

表 4-6 CR1487 三類超微浮游植物生物量與環境因子之相關係數。[Pro]表示 *Prochlorococcus* 生物量、[Syn]表示 *Synechococcus* 生物量、[Eurk]表示 Picoeukaryotes 生物量。環境因子包括表水溫(SST)、表水鹽度(SSS)、硝酸躍層深度(D_{ni})、混合層深度 (D_{mi})、硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N])、磷酸鹽濃度([SRP])、葉綠素 a 濃度([T Chl]),下 標 S 表示表水資料、下標 Mix 表示混合層平均資料、下標 200 表示 0-200 m 平均資料。

(A)表水, n=8。

Variables	[Pro] _S	[Syn] _S	[Eurk.] _S	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N]s	[SRP] _S
[Syn] _S	0.35								
[Eurk.] _S	0.14	0.42							
Dmi	0.55	-0.16	-0.39						
Dni	-0.00	-0.70	-0.33	0.53					
SST	-0.40	-0.74*	-0.28	-0.06	0.78*				
SSS	-0.33	-0.73*	-0.39	0.09	0.88**	0.96**			
[N+N]s	-0.05	0.279	0.15	-0.02	-0.45	-0.67	-0.54		
[SRP] _S	0.13	-0.44	-0.75*	0.82*	071*	0.32	0.45	-0.22	
[T Chl] _S	0.98**	0.36	-0.11	0.60	-0.77	-0.53	-0.45	0.08	0.15

(B)混合層平均, n=8。

Variables	[Pro] _{Mix}	[Syn] _{Mix}	[Eurk.] _{Mix}	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N] _{Mix}	$[SRP]_{Mix}$
[Syn] _{Mix}	0.45								
[Eurk.] _{Mix}	0.32	0.88**							
D _{mi}	0.21	-0.50	-0.37						
D _{ni}	-0.37	0.89**	-0.72*	0.53					
SST	-0.63	-0.78*	-0.74*	-0.06	0.78*				
SSS	-0.57	-0.80*	-0.67	0.09	0.88**	0.96**			
[N+N] _{Mix}	0.60	0.78*	0.71*	-0.26	-0.54	-0.55	-0.54		
[SRP] _{Mix}	-0.11	-0.13	-0.05	0.63	0.38	-0.04	0.09	0.13	
[T Chl] _{Mix}	0.98**	0.38	0.26	0.34	-0.33	-0.67	-0.60	0.50	-0.04

(C)200 m 平均, n = 8。

Variables	[Pro] ₂₀₀	[Syn] ₂₀₀	[Eurk.] ₂₀₀	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N] ₂₀₀	[SRP] ₂₀₀
[Syn] ₂₀₀	0.54								
[Eurk.] ₂₀₀	0.21	0.78*							
D _{mi}	0.73*	0.47	0.15						
D _{ni}	0.27	-0.42	-0.50	0.53					
SST	-0.25	-0.86**	-0.82*	-0.06	0.78*				
SSS	-0.10	-0.73*	-0.66	0.09	0.88**	0.96**			
[N+N] ₂₀₀	-0.50	0.27	0.56	-0.64	-0.92**	-0.65	-0.72*		
[SRP] ₂₀₀	-0.42	0.20	0.38	-0.74*	-0.93**	-0.59	-0.68	0.94**	
[T Chl]200	0.86**	0.29	0.29	0.67	0.24	-0.31	-0.17	-0.42	-0.42

* P < 0.05 ; ** P < 0.01

表 4-7 CR950 不同海域間水文環境及生物量。水文環境包括表水溫(SST)、表水鹽度 (SSS) 、混合層深度(D_{mi})、硝酸躍層深度(D_{ni})、硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N])、磷酸鹽 濃度([SRP])及葉綠素 a 濃度([T Chl])。生物量包括 *Prochlorococcus* 生物量([Pro])、 *Synechococcus* 生物量([Syn])及 Picoeukaryotes 生物量([Eurk.]),下標 S 表示表水、下標 mix 表示混合層平均、下標 200 表示 200 公尺平均。

			South China Se	ea		Kuroshio
Area	Shelf	ī	Slope	Basi	n	
Variables	Mean+SD	S2-3*	Mean+SD	Mean+SD	KK1**	K2
SST (°C)	25.7±0.2	24.6	25.6±0.9	26.5±0.4	26.9	26.0
SSS (PSU)	34.0±0.1	34.0	33.9±0.1	33.9±0.3	33.3	34.7
D _{mi} (m)	97±11	78	114±8	69±29	37	120
D _{ni} (m)	77±1	54	57±2	93±20	42	92
[N+N] _S (nM)	50 ± 22	280	125 ± 91	189 ± 105	27	10
[N+N] _{Mix} (µM)	$\textbf{0.79} \pm \textbf{0.82}$	1.32	$\textbf{1.72} \pm \textbf{0.38}$	0.23 ± 0.15	0.26	0.54
[N+N] ₂₀₀ (µM)	$\textbf{6.56} \pm \textbf{0.66}$	7.29	5.45 ± 0.35	$\textbf{2.83} \pm \textbf{1.16}$	12.87	1.37
[SRP] _S (nM)	64 ± 8	82	67 ± 17	69 ± 3	31	27
[SRP] _{Mix} (µM)	$\textbf{0.10} \pm \textbf{0.04}$	0.14	$\textbf{0.16} \pm \textbf{0.01}$	$\textbf{0.08} \pm \textbf{0.01}$	0.14	0.07
[SRP] ₂₀₀ (µM)	$\textbf{0.43} \pm \textbf{0.01}$	0.48	$\textbf{0.37} \pm \textbf{0.04}$	$\textbf{0.22} \pm \textbf{0.07}$	0.80	0.12
$[T Chl]_S$ (µg m ⁻³)	$\textbf{369} \pm \textbf{4}$	376	$\textbf{498} \pm \textbf{47}$	349 ± 36	131	159
[T Chl] _{Mix} (mg m ⁻³)	$\textbf{0.29} \pm \textbf{0.09}$	0.31	$\textbf{0.27} \pm \textbf{0.05}$	$\textbf{0.33} \pm \textbf{0.03}$	0.20	0.20
[T Chl] ₂₀₀ (mg m ⁻³)	$\textbf{0.14} \pm \textbf{0.03}$	0.14	$\textbf{0.17} \pm \textbf{0.03}$	$\textbf{0.18} \pm \textbf{0.02}$	0.10	0.13
[Pro] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{4.19} \pm \textbf{1.52}$	2.65	$\textbf{5.86} \pm \textbf{5.73}$	$\textbf{4.53} \pm \textbf{1.08}$	1.52	4.30
$[Pro]_{Mix}$ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{3.12} \pm \textbf{2.10}$	2.04	$\textbf{2.71} \pm \textbf{1.98}$	$\textbf{4.40} \pm \textbf{1.28}$	3.97	4.46
[Pro] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{1.48} \pm \textbf{0.76}$	0.96	$\textbf{1.67} \pm \textbf{1.23}$	$\textbf{2.37} \pm \textbf{0.25}$	2.43	3.06
[Syn] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	5.88 ± 1.65	6.63	$\textbf{6.15} \pm \textbf{4.65}$	$\textbf{3.98} \pm \textbf{1.00}$	1.43	1.18
[Syn] _{Mix} (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{4.33} \pm \textbf{0.36}$	5.56	$\textbf{3.68} \pm \textbf{2.52}$	$\textbf{3.68} \pm \textbf{0.70}$	1.90	0.60
[Syn] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{2.11} \pm \textbf{0.10}$	2.30	$\textbf{2.14} \pm \textbf{1.36}$	$\textbf{1.93} \pm \textbf{0.37}$	0.70	0.37
[Eurk] _S (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.73} \pm \textbf{0.25}$	0.85	1.02 ± 0.64	$\textbf{0.59} \pm \textbf{0.05}$	0.16	0.41
[Eurk] _{Mix} (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.57} \pm \textbf{0.04}$	0.69	$\textbf{0.69} \pm \textbf{0.38}$	0.55 ± 0.09	0.31	0.34
[Eurk] ₂₀₀ (x 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	$\textbf{0.28} \pm \textbf{0.02}$	0.29	$\textbf{0.42} \pm \textbf{0.21}$	$\textbf{0.30} \pm \textbf{0.07}$	0.15	0.22

*S2-3 站為 S2 站之第二次採樣 (時間間隔差三天)。第一次採樣在 12 月 6 日標示 S2, 第二次採樣在 12 月 9 日標示 S2-3。

**KK1 測站為 Southeast Asia Time-series Station (SEATS, 18°N; 116°E)。在本研究中僅 出現一次。 表 4-8 CR950 三類超微浮游植物生物量與環境因子之相關係數。[Pro]表示 *Prochlorococcus* 生物量、[Syn]表示 *Synechococcus* 生物量、[Eurk]表示 Picoeukaryotes 生物量。環境因子包括表水溫(SST)、表水鹽度(SSS)、硝酸躍層深度(D_{ni})、混合層深度 (D_{mi})、硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N])、磷酸鹽濃度([SRP])、葉綠素 a 濃度([T Chl]),下 標 S 表示表水資料、下標 Mix 表示混合層平均資料、下標 200 表示 0-200 m 平均資料。

(A)表水, n=8。

Variables	[Pro] _S	[Syn] _S	[Eurk.] _S	D _{mi}	D _{ni}	SST	SSS	[N+N] _S	[SRP] _S
[Syn] _S	-0.56								
[Eurk.] _S	-0.54	0.93**							
Dmi	0.03	0.02	0.13						
Dni	-0.02	-0.46	-0.49	-0.76*					
SST	0.38	-0.72*	-0.75*	-0.48	0.57				
SSS	-0.18	-0.27	-0.24	0.35	0.16	-0.23			
[N+N] _S	-0.39	0.34	0.28	-0.16	-0.19	0.15	-0.19		
[SRP] _S	-0.24	0.64	0.53	-0.49	-0.17	-0.04	-0.70	0.57	
[T Chl] _S	0.39	0.50	0.47	0.04	-0.60	-0.28	-0.63	0.21	0.59

(B)混合層平均, n=8。

Variables	[Pro] _{Mix}	[Syn] _{Mix}	[Eurk.] _{Mix}	D _{mi}	D _{ni}		SST	SSS	[N+N] _{Mix}	[SRP] _{Mix}
[Syn] _{Mix}	-0.41									
[Eurk.] _{Mix}	-0.50	0.77*								
D _{mi}	-0.53	-0.35	-0.19							
D _{ni}	0.70	-0.21	-0.29	-0.76*						
SST	0.68	-0.44	-0.51	-0.48		0.57				
SSS	0.16	-0.38	-0.38	0.35		0.16	-0.23			
[N+N] _{Mix}	-0.59	0.06	0.14	0.67		-0.77*	-0.54	-0.2	1	
[SRP] _{Mix}	-0.63	0.16	0.38	0.54		-0.80*	-0.56	-0.3	8 0.96**	
[T Chl] _{Mix}	0.32	0.68	0.45	-0.74*		0.28	0.19	-0.2	.6 -0.60	-0.39

(C)200 m 平均, n=8。

Variables	[Pro] ₂₀₀	[Syn] ₂₀₀	[Eurk.] ₂₀₀	D _{mi}	\mathbf{D}_{ni}		SST	SSS	[N+N] ₂₀₀	[SRP] ₂₀₀
[Syn] ₂₀₀	-0.78*									
[Eurk.] ₂₀₀	-0.63	0.75*								
D _{mi}	-0.19	-0.38	-0.08							
D _{ni}	0.56	-0.20	-0.32	-0.76*						
SST	0.75*	-0.47	-0.49	-0.48		0.57				
SSS	0.32	-0.47	-0.35	0.35		0.16	-0.23			
[N+N] ₂₀₀	-0.72*	0.39	0.15	0.42		-0.74*	-0.55	-0.43		
[SRP]200	-0.79*	0.50	0.31	0.38		-0.76*	-0.60	-0.44	0.98**	
[T Chl]200	0.09	0.53	0.50	-0.80*		0.40	0.30	-0.35	-0.42	-0.31

* P < 0.05 ; ** P < 0.01

表 4-9 重點航次資料合併後,三類超微浮游植物生物量與環境因子間之相關係數。[Pro] 表示 Prochlorococcus 生物量,[Syn]表示 Synechococcus 生物量,[Eurk]表示 Picoeukaryotes 生物量。環境因子包括表水溫(SST),表水鹽度(SSS),硝酸躍層深度(D_{ni}),混合層深度 (D_{mi}),硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N]),磷酸鹽濃度([SRP]),葉綠素 a 濃度([T Chl]),下 標 S 表示表水資料,下標 200 表示 0-200m 平均資料,下標 Mix 表示混合層平均資料, 下標 30/200 表示水表至 30 m 累計生物量占水表至 200 m 累計生物量之百分比。除有光 層深度外,表水及混合層平均生物量與各類環境因子間之關係其 n=32。0-200m 平均及 水表至 30 m 累計生物量占 200 m 累計至水表生物量之百分比與環境因子間之關係 n= 31。表水及混合層平均生物量與有光層深度間之關係 n=16。平均 200 m 及水表至 30 m 累計生物量占 200 m 累計至水表生物量之百分比與有光層深度間之關係 n=15。

(A)生物量與環境因子間之相關係數

Variables	D_{mi}	D _{ni}	SST	D_{eu}	[N+N] _S	[N+N] _{Mix}	[N+N] ₂₀₀	[SRP] _S	[SRP] _{Mix}	[SRP] ₂₀₀	[T Chl] _S	[T Chl] _{Mix}	[T Chl]200
[Pro] ₈	-0.22	-0.20	0.36*	0.01	-0.45**	-0.11	0.008	-0.49**	-0.21	0.10	-0.30	-0.21	0.06
[Pro] _{Mix}	-0.47	-0.18	0.50**	-0.05	-0.44*	-0.42*	0.05	-0.60**	-0.51**	0.07	-0.46**	-0.32	-0.12
[Pro] ₂₀₀	-0.24	0.21	0.62**	0.15	-0.47**	-0.41*	-0.32	-0.51**	-0.48**	-0.30	-0.50**	-0.46**	-0.11
[Pro] _{30/200}	0.165	-0.57**	-0.41*	-0.51*	0.05	0.53**	0.56**	0.16	0.48**	0.56**	0.48**	0.47**	0.23
[Syn] _S	0.41*	-0.11	-0.79**	-0.10	0.65**	0.46**	0.20	0.69**	0.59**	0.25	0.80**	0.52**	0.32
[Syn] _{Mix}	0.22	-0.19	-0.73**	-0.34	0.70**	0.28	0.31	0.66**	0.39*	0.32	0.77**	0.69**	0.36*
[Syn] ₂₀₀	0.38*	-0.05	-0.77**	-0.22	0.70**	0.36*	0.13	0.78**	0.48**	0.15	0.83**	0.65**	0.43*
[Syn] _{30/200}	0.063	-0.42*	-0.35	0.17	0.07	0.45*	0.42*	-0.06	0.36*	0.43*	0.22	0.34	0.01
[Eurk] _S	0.47**	-0.03	-0.85**	0.06	0.65**	0.50**	0.09	0.75**	0.59**	0.15	0.82**	0.52**	0.31
[Eurk] _{Mix}	0.38*	-0.12	-0.85**	-0.03	0.65**	0.43*	0.19	0.73**	0.56**	0.24	0.79**	0.62**	0.35
[Eurk] ₂₀₀	0.19	-0.15	-0.69**	-0.01	0.51**	0.32	0.25	0.59**	0.43*	0.26	0.64**	0.39*	0.41*
[Eurk] _{30/200}	0.38*	-0.09	-0.85**	0.07	0.53**	0.48**	0.20	0.61**	0.53**	0.21	0.76**	0.49**	0.10

* P < 0.05 ; ** P < 0.01

(B)環境因子間之相關係數

Variables	D _{mi}	D _{ni}	SST	D _{eu}	[N+N] _S	[N+N] _{Mix}	[N+N] ₂₀₀	[SRP] _S	[SRP] _{Mix}	[SRP] ₂₀₀	[T Chl] _S	[T Chl] _{Mix}
D _{ni}	0.13											
SST	-0.44*	0.06										
D _{eu}	0.33	0.69**	-0.33									
[N+N] _S	0.33	0.03	-0.53**	-0.21								
[N+N] _{Mix}	0.61**	-0.25	-0.53**	0.35	0.19							
[N+N] ₂₀₀	-0.29	-0.74**	-0.14	-0.73**	0.01	0.15						
[SRP] _S	0.40*	0.18	-0.72**	0.06	0.61**	0.33	-0.11					
[SRP] _{Mix}	0.61**	-0.18	-0.65**	0.33	0.30	0.95**	0.11	0.55**				
[SRP] ₂₀₀	-0.27	-0.73**	0.18	-0.72**	0.01	0.17	0.96**	-0.05	0.15			
[T Chl]s	0.54**	0.05	-0.77**	0.11	0.64**	0.51**	0.03	0.72**	0.57**	0.04		
[T Chl] _{Mix}	0.38*	0.14	-0.54**	-0.09	0.54**	0.36*	0.11	0.45**	0.44*	0.09	0.71**	
[T Chl]200	0.19	0.01	-0.29	0.13	0.31	0.23	-0.08	0.21	0.28	-0.08	0.48**	0.71**

* P < 0.05; ** P < 0.01

表 4-10 生物量與環境因子之複迴歸分析。生物量包括 Prochlorococcus 生物量([Pro], ×10⁴ Cells ml⁻¹), Synechococcus 生物量([Syn],×10⁴ Cells ml⁻¹), Picoeukaryotes 生物量 ([Eurk],×10⁴ Cells ml⁻¹)。環境因子包括混合層深度(D_{mi} ,m),硝酸躍層深度(D_{ni} ,m), 有光層深度(D_{eu} ,m),表水溫(SST),硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N], μ M),磷酸鹽濃度 ([SRP], μ M)。下標 S 表示表水,下標 Mix 表示混合層平均,下標 200 表示 0-200 m 平均。而依變數(Response variable)為表水生物量時,其對應之硝酸鹽與磷酸鹽指標皆為混合層平均;依 變數為 200 m 平均生物量時,其對應之硝酸鹽與磷酸鹽指標皆為 200 m 平均。

Y	=	b ₀	+	bı	X1	+	b ₂	X2	R ²	Р	n
Prochlorococcus											
[Pro] _{Mix}	=	18.014	-	0.104	D_{mi}				0.36	0.011	17
[Pro] ₂₀₀	=	-19.530	+	0.881	SST				0.26	0.044	16
Synechococcus											
[Syn] _S	=	-1.584	+	87.146	[SRP] ₈	+	32.396	[N+N] _S	0.69	0.000	17
					(t = 3.87)			(t = 2.71)			
					(P = 0.002)			(P = 0.017)			
[Syn] _{Mix}	=	16.737	-	0.479	SST	-	0.02	\mathbf{D}_{eu}	0.52	0.006	17
					(t = -3.41)			(t = -2.86)			
					(P = 0.004)			(P = 0.013)			
Picoeukaryotes											
[Eurk] _S	=	2.541	-	0.091	SST	+	8.179	[SRP] _S	0.77	0.000	17
					(t = -3.43)			(t = 2.49)			
					(P = 0.004)			(P = 0.026)			
[Eurk] _{Mix}	=	2.577	-	0.083	SST				0.61	0.000	17
[Eurk] ₂₀₀	=	1.200	-	0.037	SST				0.41	0.008	16

表 4-11 生物量與環境因子之複迴歸分析環境因子不包括有光層深度。生物量包括 *Prochlorococcus* 生物量([Pro],×10⁴ Cells ml⁻¹),*Synechococcus* 生物量([Syn],×10⁴ Cells ml⁻¹), Picoeukaryotes 生物量([Eurk],×10⁴ Cells ml⁻¹)。環境因子包括混合層深度(D_{mi}, m),硝酸躍層深度(D_{ni},m),表水溫(SST),硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度([N+N], μ M),磷酸 鹽濃度([SRP], μ M)。下標 S 表示表水,下標 Mix 表示 0 m-混合層深度平均,下標 200 表示 0-200 m 平均。而依變數(Response variable)為表水生物量時,其對應之硝酸鹽與磷 酸鹽指標皆為表水;依變數為混合層平均生物量時,其對應之硝酸鹽與磷酸鹽指標皆為 混合層平均;依變數為 200 m 平均生物量時,其對應之硝酸鹽與磷酸鹽指標皆為 200 m 平均。

Y	=	b 0	+	bl	X1	+	b ₂	X2	R ²	Р	n
Prochlorococcus											
[Pro] _S	=	14.513	-	129.49	[SRP] _S				0.24	0.004	32
[Pro] _{Mix}	=	13.352	-	56.972	[SRP] _{Mix}				0.26	0.003	32
[Pro] ₂₀₀	=	-25.104	+	1.07	SST				0.38	0.000	31
Synechococcus											
[Syn] _S	=	25.953	-	0.87	SST	+	10.606	[N+N] _S	0.70	0.000	32
					(t = -5.13)			(t = 2.76)			
					(P = 0.000)			(P = 0.010)			
[Syn] _{Mix}	=	21.651	-	0.711	SST				0.54	0.000	32
[Syn] ₂₀₀	=	11.813	-	0.391	SST				0.60	0.000	31
Picoeukaryotes											
[Eurk] _S	=	4.409	-	0.149	SST	+	1.36	[N+N] _S	0.77	0.000	32
					(t = -6.72)			(t = 2.70)			
					(P = 0.000)			(P = 0.011)			
[Eurk] _{Mix}	=	3.744	-	0.123	SST				0.73	0.000	32
[Eurk] ₂₀₀	=	1.701	-	0.053	SST				0.47	0.000	31

表 4-12 CRITOP 西北太平洋測站(Pacific Ocean),與暖季三重點航次(CR910、CR1455、CR1487)之黑潮(Kuroshio)測站與南海(South Chain Sea)測站之各類生物量及水文資料。 生物量資料包括 Prochlorococcus 生物量([Pro]), Synechococcus 生物量([Syn])及 Picoeukaryotes 生物量([Eurk])。水文資料包括混合層深度(D_{mi}),硝酸躍層深度(D_{ni}),表 水溫度(SST),表水鹽度 SSS,硝酸鹽(NO_2+NO_3)濃度([N+N]),磷酸鹽濃度([SRP])及葉 綜素 a 濃度([T Chl])。下標 S 表示表水資料,下標 200 表示 200 m 平均資料,表中數據 為平均值±標準差。

Cruise	CR910+CR14	55+CR1487	CRITOP
Area	South Chain Sea	Kuroshio	Pacific Ocean
	(n = 19)	(n = 5)	(n = 21)
D _{ni} (m)	58.1 ± 26.6	125.2 ± 39.8	91.0 ± 22.3
D _{mi} (m)	52.4 ± 16.5	59.8 ± 19.2	52.0 ± 13.2
SST (°C)	28.75 ± 0.83	29.02 ± 0.86	29.44 ± 0.21
SSS (PSU)	33.63 ± 0.36	34.39 ± 0.24	34.28 ± 0.10
$[Pro]_{S} (\times 10^{4} \text{ Cells ml}^{-1})$	12.57 ± 4.85	7.94 ± 3.76	13.74 ± 4.22
[Pro] ₂₀₀ (× 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	5.85 ± 2.29	6.61 ± 1.24	9.45 ± 2.24
$[Syn]_S$ (× 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	1.26 ± 0.48	0.45 ± 0.25	0.23 ± 0.26
[Syn] ₂₀₀ (× 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	0.51 ± 0.12	0.22 ± 0.09	0.16 ± 0.07
$[Eurk]_S$ (× 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	0.13 ± 0.07	0.09 ± 0.03	0.08 ± 0.03
[Eurk] ₂₀₀ (× 10 ⁴ Cells ml ⁻¹)	0.18 ± 0.09	0.09 ± 0.04	0.11 ± 0.04
[N+N] _S (nM)	23 ± 18	15 ± 7	20 ± 12
[N+N] ₂₀₀ (nM)	5572 ± 2258	449 ± 265	1003 ± 271
[SRP] _S (nM)	25 ± 7	34 ± 24	23 ± 9
[SRP] ₂₀₀ (nM)	369 ± 145	62 ± 9	102 ± 16
[T Chl] _S (nM)	128 ± 58	91 ± 23	85 ± 29
[T Chl] ₂₀₀ (nM)	141 ± 37	121 ± 33	114 ± 15

表 4-13 CR950 培養實驗中,生物之生長率與環境因子及捕食者數量之相關係數表。其中[Pro]_{K2 μm}、[Syn]_{K2 μm}、[Eurk]_{K2 μm}分別為「Control」組中 *Prochlorococcus、Synechococcus*與 Picoeukaryotes 全天生長率(d⁻¹);Light 為培養期間平均日照度(10³ μE m⁻² S⁻¹); Temp 為採水時水體溫度;[N+N]為硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度(μM);[SRP]為低磷酸鹽濃度(μM);捕食者 PNF 為「Control」組中色素型 nanoflagellates 數量;PNF 為「Control」組中異營型 nanoflagellates 數量;下標 2 μm 表 nanoflagellates 體型小於 2 μm;下標 2-5 μm 表 nanoflagellates 體型 2-5 μm。

					CR950					
	[Pro] _{K2 µm}	[Syn] _{K2 µm}	[Eurk.] _{K2 µm}	Light	[NO2+NO ₃]	[SRP]	Temp.	$PNF_{2 \ \mu m}$	PNF _{2~5 µm}	$HNF_{2 \ \mu m}$
[Syn] _{K2 µm}	0.586**									
[Eurk.] _{K2 µm}	-0.108	0.116								
Light	-0.026	0.228	-0.387							
[NO2+NO ₃]	0.273	0.649**	0.420	0.318						
[SRP]	0.491*	0.789**	0.430	0.196	0.937**					
Temp.	-0.316	-0.400	-0.123	-0.227	-0.482*	-0.526*				
$PNF_{2 \ \mu m}$	0.193	0.337	0.655**	-0.342	0.642**	0.625**	0.036			
PNF _{2~5 µm}	0.282	0.415	0.554*	-0.252	0.671**	0.667**	-0.047	0.969**		
$HNF_{2 \ \mu m}$	0.679**	0.641**	-0.075	-0.200	0.210	0.417	-0.269	0.297	0.459*	
$HNF_{2\sim 5 \ \mu m}$	0.341	0.117	-0.005	-0.088	-0.060	0.072	0.018	0.114	0.279	0.632**

P < 0.05; ** P < 0.01

表 4-14 CR1487 培養實驗中,生物之生長率與環境因子及捕食者數量之相關係數表。其中[Pro]_{K2μm}、[Syn]_{K2μm}、[Eurk]_{K2μm}分別 為「Control」組中 *Prochlorococcus、Synechococcus*與 Picoeukaryotes 全天生長率(d⁻¹);Light 為培養期間平均日照度(10³μE m⁻²S⁻¹); Temp 為採水時水體溫度; [N+N]為硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度(μM); [SRP]為低磷酸鹽濃度(μM); 捕食者 PNF 為「Control」組中色素 型 nanoflagellates 數量; PNF 為「Control」組中異營型 nanoflagellates 數量; 下標 2 μm 表 nanoflagellates 體型小於 2 μm; 下標 2-5 μm 表 nanoflagellates 體型 2-5 μm。

					CR1487					
	[Pro] _{K2 µm}	[Syn] _{K2 µm}	[Eurk.] _{K2 µm}	Light	[NO2+NO ₃]	[SRP]	Temp.	$PNF_{2 \ \mu m}$	$PNF_{2\sim 5 \ \mu m}$	$HNF_{2 \ \mu m}$
[Syn] _{K2 µm}	-0.059									
[Eurk.] _{K2 µm}	0.790**	0.133								
Light	-0.821**	-0.073	-0.696*							
[NO2+NO3]	-0.762**	-0.201	-0.750**	0.962**						
[SRP]	-0.178	0.804**	0.110	-0.128	-0.219					
Temp.	0.225	0.680*	0.263	-0.513	-0.474	0.783**				
$PNF_{2 \mu m}$	0.409	-0.901**	0.204	-0.190	-0.076	-0.827**	-0.597*			
PNF _{2~5 µm}	0.514	-0.215	0.330	-0.450	-0.454	-0.316	-0.156	0.504		
$HNF_{2 \ \mu m}$	0.359	-0.477	-0.042	-0.185	-0.016	-0.244	-0.074	0.527	0.383	
HNF _{2~5 µm}	-0.669*	0.313	-0.319	0.571	0.377	0.294	-0.261	-0.450	-0.152	-0.472

* P < 0.05 ; ** P < 0.01

表 4-15 CR1455 培養實驗中,生物之生長率與環境因子及捕食者數量之相關係數表。其中[Pro]_{K2μm}、[Syn]_{K2μm}、[Eurk]_{K2μm}分別 為「Control」組中 *Prochlorococcus、Synechococcus*與 Picoeukaryotes 全天生長率(d⁻¹);Light 為培養期間平均日照度(10³μE m⁻²S⁻¹); Temp 為採水時水體溫度; [N+N]為硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度(μM); [SRP]為低磷酸鹽濃度(μM); 捕食者 PNF 為「Control」組中色素 型 nanoflagellates 數量; PNF 為「Control」組中異營型 nanoflagellates 數量; 下標 2 μm 表 nanoflagellates 體型小於 2 μm; 下標 2-5 μm 表 nanoflagellates 體型 2-5 μm。

					CR1455					
	[Pro] _{K2 µm}	$[Syn]_{K2 \ \mu m}$	[Eurk.] _{K2 µm}	Light	[NO2+NO ₃]	[SRP]	Temp.	$PNF_{2 \ \mu m}$	$PNF_{2\sim 5 \ \mu m}$	$HNF_{2\mu m}$
[Syn] _{K2 µm}	0.415*									
[Eurk.] _{K2 µm}	0.170	0.209								
Light	-0.476**	-0.351*	0.076							
[NO2+NO ₃]	0.196	-0.039	0.020	0.520**						
[SRP]	-0.076	-0.072	-0.450**	-0.099	-0.414*					
Temp.	-0.028	-0.134	-0.369*	0.501**	0.523**	0.416*				
$PNF_{2 \ \mu m}$	-0.480**	-0.253	-0.366*	-0.063	-0.477**	0.276	-0.263			
PNF _{2~5 µm}	-0.448*	-0.134	-0.220	0.182	-0.164	0.180	0.027	0.452**		
$HNF_{2 \ \mu m}$	0.089	0.169	0.060	-0.389*	-0.373*	0.539**	0.174	0.020	-0.080	
$HNF_{2\sim 5 \ \mu m}$	-0.177	-0.057	-0.277	-0.065	-0.383*	0.830**	0.149	0.398*	0.286	0.378*

* P < 0.05 ; ** P < 0.01

表 4-16 CR1455+CR1487+CR950 培養實驗中,生物之生長率與環境因子及捕食者數量之相關係數表。其中[Pro]_{K2 μm}、[Syn]_{K2 μm}、 [Eurk]_{K2 μm}分別為「Control」組中 *Prochlorococcus、Synechococcus*與 Picoeukaryotes 全天生長率(d⁻¹);Light 為培養期間平均日照 度(10³ μE m⁻²S⁻¹);Temp 為採水時水體溫度;[N+N]為硝酸鹽(NO₂+NO₃)濃度(μM);[SRP]為低磷酸鹽濃度(μM);捕食者 PNF 為 「Control」組中色素型 nanoflagellates 數量;PNF 為「Control」組中異營型 nanoflagellates 數量;下標 2 μm 表 nanoflagellates 體型 小於 2 μm;下標 2-5 μm 表 nanoflagellates 體型 2-5 μm。

	CR1455+CR1487CR950													
	[Pro] _{K2 µm}	$[Syn]_{K2 \ \mu m}$	[Eurk.] _{K2 µm}	Light	[NO2+NO ₃]	[SRP]	Temp.	$PNF_{2 \ \mu m}$	$PNF_{2\sim 5 \ \mu m}$	$HNF_{2 \ \mu m}$				
[Syn] _{K2 µm}	0.455**													
[Eurk.] _{K2 µm}	0.138	0.260*												
Light	-0.395**	-0.404**	-0.173											
[NO2+NO ₃]	0.152	0.587**	0.270^{*}	-0.193										
[SRP]	0.106	0.438**	0.058	-0.168	0.763**									
Temp.	-0.031	-0.279*	-0.356**	0.268*	-0.604**	-0.544**								
$PNF_{2 \mu m}$	0.101	0.433**	0.307*	-0.372**	0.781**	0.629**	-0.399**							
$PNF_{2\sim 5 \ \mu m}$	0.150	0.484**	0.305*	-0.344**	0.801**	0.649**	-0.424**	0.978**						
$HNF_{2 \ \mu m}$	0.165	0.073	-0.004	-0.059	-0.031	0.367**	-0.107	0.032	0.096					
$HNF_{2\sim 5\ \mu m}$	-0.120	-0.102	-0.255*	0.071	-0.099	0.398**	0.035	-0.013	0.015	0.448**				

P < 0.05; ** P < 0.01

表 4-17 *Prochlorococcus* 之生長率與環境因子及捕食者之複迴歸分析。其中環境因子包括光線(10³ μE⁻² S⁻¹),水溫(Temp),硝酸鹽 [N+N]濃度(μM),磷酸鹽[SRP]濃度(μM),捕食者為「Control」組之 nanoflagellates 數量,其中 PNF 為色素型,HNF 為異營型; 下標 2μm 為 nanoflagellates 體型小於 2 μm,下標 2-5 μm 為 nanoflagellates 體型約 2-5 μm。

Multiple Regression of Prochlorococcus growth rate												
Curise		=	а	+	Ь	<i>x</i> ₁	+	с	<i>x</i> ₂	r	R ²	Р
	Y	=	1.039	-	0.733	Light				-0.48	0.23	0.006
	Y	=	0.924	-	0.034	PNF<2 µm				-0.48	0.23	0.005
	Y	=	0.58	-	0.164	PNF _{2-5 µm}				-0.45	0.20	0.010
	Y	=	0.976	-	0.033	PNF				-0.51	0.26	0.003
	Y	=	1.833	-	0.783	Light	-	0.036	PNF<2 µm		0.49	0.000
	t	=				-3.842			-3.817			
CR1455 (n=32)	Р	=				0.001			0.001			
	Y	=	1.214	-	0.629	Light	-	0.137	$PNF_{2-5 \ \mu m}$		0.36	0.001
	t	=				-2.705			-2.473			
	Р	=				0.011			0.020			
	Y	=	1.825	-	0.754	Light	-	0.033	PNF		0.50	0.000
	t	=				-3.743			-4.024			
	Р	=				0.001			0.000			
	Y	=	0.827	-	0.327	Light				-0.82	0.67	0.001
CR1487 (n=12)	Y	=	0.757	-	4.429	[NO ₂ +NO ₃]				-0.76	0.58	0.004
	Y	=	0.873	-	0.023	$HNF_{2-5 \ \mu m}$				-0.67	0.45	0.017
CP050 (n-10)	Y	=	-0.562	+	16.802	[SRP]				0.49	0.24	0.033
CR930 (II-19)	Y	=	-0.146	+	0.004	$HNF_{<2 \mu m}$				0.68	0.46	0.001
CR1455+CR1487+CR950(n=63)	Y	=	0.809	-	0.547	Light				-0.40	0.16	0.001

表 4-18 *Synechococcus* 之生長率與環境因子及捕食者之複迴歸分析。其中環境因子包括光線(10³ μE⁻² S⁻¹),水溫(Temp),硝酸鹽[N+N] 濃度(μM),磷酸鹽[SRP]濃度(μM),捕食者為「Control」組之 nanoflagellates 數量,其中 PNF 為色素型,HNF 為異營型;下標 2μm 為 nanoflagellates 體型小於 2 μm,下標 2-5 μm 為 nanoflagellates 體型約 2-5 μm。

Multiple Regression of Synechococcus growth rate												
Curise		=	а	+	Ь	<i>x</i> ₁	+	с	x 2	r	R^2	Р
CR1455 (n=32)	Y	=	0.278	-	0.221	Light				-0.35	0.12	0.049
	Y	=	-0.654	+	54.947	[SRP]				0.80	0.65	0.002
CR1487 (n=12)	Y	=	-27.455	+	0.961	Temp				0.68	0.46	0.015
	Y	=	1.518	-	0.023	$PNF_{<2 \ \mu m}$				-0.90	0.81	0.000
	Y	=	0.154	+	3.224	[NO ₂ +NO ₃]				0.65	0.42	0.003
CR950 (n=19)	Y	=	-0.440	+	18.132	[SRP]				0.79	0.62	0.000
	Y	=	0.271	+	0.002	$HNF_{<2 \mu m}$				0.64	0.41	0.003
	Y	=	0.583	-	0.348	Light				-0.40	0.16	0.001
	Y	=	0.104	+	3.423	[NO ₂ +NO ₃]				0.59	0.34	0.000
	Y	=	-0.089	+	9.878	[SRP]				0.44	0.19	0.000
	Y	=	3.122	-	0.103	Temp				-0.28	0.08	0.027
CR1455+CR1487+CR950(n=63)	Y	=	0.168	+	0.002	PNF<2 µm				0.43	0.19	0.000
	Y	=	0.179	+	0.007	PNF _{2-5 µm}				0.48	0.23	0.000
	Y	=	0.331	+	3.083	[NO ₂ +NO ₃]	-	0.260	Light		0.5	0.000
	t	=				5.327			-3.041			
	Р	=				0.000			0.003			

表 4-19 Picoeukaryotes 之生長率與環境因子及捕食者之複迴歸分析。其中環境因子包括光線(10³ μE⁻² S⁻¹),水溫(Temp),硝酸鹽[N+N] 濃度(μM),磷酸鹽[SRP]濃度(μM),捕食者為「Control」組之 nanoflagellates 數量,其中 PNF 為色素型,HNF 為異營型;下標 2μm 為 nanoflagellates 體型小於 2 μm,下標 2-5 μm 為 nanoflagellates 體型約 2-5 μm。

Multiple Regression of Picoeukaryotes growth rate												
Curise		=	а	+	Ь	<i>x</i> ₁	+	с	x 2	r	R^2	Р
	Y	=	0.207	-	24.039	[SRP]				-0.45	0.20	0.010
	Y	=	10.419	-	0.402	Temp				-0.37	0.13	0.038
CP1455(n-22)	Y	=	-0.154	-	0.024	PNF<2 µm				-0.37	0.13	0.039
CR1455 (II-52)	Y	=	15.001	-	0.544	Temp	-	0.032	PNF<2 µm		0.37	0.001
	t	=				-3.262			-3.247			
	Р	=				0.003			0.003			
CR1487 (n=12)	Y	=	-0.034	-	-1.078	Light				-0.70	0.49	0.012
	Y	=	-0.202	-	16.926	[NO ₂ +NO ₃]				-0.75	0.56	0.005
CP050(n-10)	Y	=	-0.426	+	0.001	$PNF_{<2 \mu m}$				0.65	0.43	0.002
CR950 (n=19)	Y	=	-0.375	+	0.004	PNF _{2-5 µm}				0.55	0.31	0.014
	Y	=	-0.632	+	2.244	[NO ₂ +NO ₃]				0.27	0.07	0.032
	Y	=	4.622	-	-0.188	Temp				-0.36	0.13	0.004
	Y	=	-0.638	+	0.002	PNF<2 µm				0.31	0.09	0.015
CR1455+CR1487+CR950(n=63)	Y	=	-0.613	+	0.006	PNF _{2-5 µm}				0.31	0.09	0.015
CR(1455) CR(1467) CR(550(II-05))	Y	=	-0.302	-	0.014	$HNF_{2-5\ \mu m}$				-0.26	0.07	0.044
	Y	=	4.689	-	0.183	Temp	-	0.013	HNF _{2-5 µm}		0.19	0.002
	t	=				-2.980			-2.083			
	Р	=				0.004			0.041			