



國立中山大學海洋科學系

碩士論文

Department of Oceanography

National Sun Yat-sen University

Master Thesis

北南海碳氮磷主動垂直傳輸之探討

Active Fluxes of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the

Northern South China Sea

研究生：董憬翰 撰

Ching-Han Tung

指導教授：洪佳章 博士

Dr. Jia-Jang Hung

中華民國 104 年 10 月

October 2015

國立中山大學研究生學位論文審定書

海洋科學系碩士班

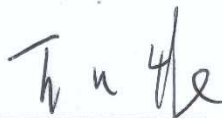
研究生董憬翰 (學號：M015030015) 所提論文

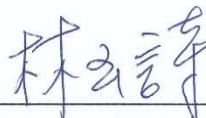
北南海碳氮磷主動垂直傳輸之探討
Active Fluxes of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the Northern South China Sea

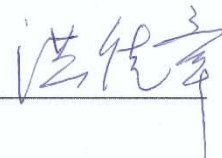
於中華民國 104 年 9 月 11 日經本委員會審查並舉行口試，
符合碩士學位論文標準。

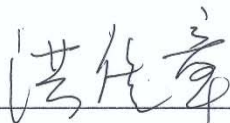
學位考試委員簽章：

召集人 羅文增 

委員 王玉懷 

委員 林玉詩 

委員 洪佳章 

指導教授(洪佳章)  (簽名)

致謝

本論文的完成，學生最感謝指導教授洪佳章博士三年多來的教導。從對海洋化學觀念與論文的方向、架構到錯別字和語法修正，一次又一次嚴謹與耐心的修改，也感謝指導老師提供給學生參與 PAMS 國際研討會的機會，讓學生能出國增廣見聞，在此獻上由衷的謝意。另外，感謝羅文增教授、王玉懷副教授與林玉詩助理教授對學生論文細心審閱和內容上的修正及意見，使本論文更加充實完整。還要感謝海科系老師們，在求學期間給予學生對海洋的知識及觀念上的啟發，讓學生在海洋領域上有更紮實的基礎與想法。

另外，感謝實驗室夥伴們與學長姐。怡婷與婉慈學姐及鎮宇與彥麟學長，一開始實驗上的教導；感謝實驗室助理美惠姐與紹宏學長在研究期間給予的實驗支援及意見；感謝系辦的陳兄、瓊雯與秀梅姐提供行政上的協助；感謝一起出海的王玉懷與李玉玲老師實驗室的學長姐，讓學生在海上還能學到海洋化學以外的觀念與採樣方法；感謝班上同學，不定期的聚餐，增加大家的友宜。

最後，最感謝我的父母、哥哥與親友，特別是爸媽，你們從我小時候一路的栽培與支持，造就了今天的我，讓我能夠在一個無憂無慮的求學環境下取得碩士學位，真的很感謝你們，在此致上十二萬分的謝意。

中文摘要

主動傳輸(Active transport)為生物幫浦(Biological pump)中的一部分，主要由遷移性浮游動物在夜間遷移至表層進行捕食，到黎明時再潛至深海進行呼吸、排泄及代謝作用，將上層捕獲的碳氮磷帶入深層。主動傳輸通量包括呼吸通量(Respiration flux)、死亡通量(Mortality flux)、腸道通量(Gut flux)和排泄代謝通量(Excreting flux)。雖然主動傳輸在溫帶海域已有相當多的研究及報導，但在熱帶邊緣海如北南海則尚未有學者進行研究，本研究是首次在北南海進行主動傳輸之探討，並與西北太平洋不同海域比較。

研究結果顯示，浮游動物在200m以淺日夜生物貯存(inventory)量有明顯差異，確實有日夜垂直遷移現象。浮游動物垂直遷移生物量在北南海常態夏季、內波特殊事件、反渦流事件與西北太平洋分別為376 mg DW m⁻²、997 mg DW m⁻²、635 mg DW m⁻²與158 mg DW m⁻²；主動傳輸碳通量於上述條件分別為25.6 mg C m⁻² d⁻¹、93.4 mg C m⁻² d⁻¹、50.0 mg C m⁻² d⁻¹與10.9 mg C m⁻² d⁻¹；氮通量分別為2.68 mg N m⁻² d⁻¹、7.26 mg N m⁻² d⁻¹、4.09 mg N m⁻² d⁻¹與1.40 mg N m⁻² d⁻¹；磷通量分別為0.37 mg P m⁻² d⁻¹、0.99 mg P m⁻² d⁻¹、0.57 mg P m⁻² d⁻¹與0.16 mg P m⁻² d⁻¹。主動傳輸碳氮磷通量與垂直遷移生物量於北南海特殊事件高於常態夏季，最低為西北太平洋，呼吸通量貢獻主動傳輸約佔一半以上。另比較加那利群島(Canary Island)的研究報導，結果顯示在常態夏季與反渦流事件之主動傳輸結果與本研究結果有相同趨勢。

另外，主動傳輸碳氮磷通量與浮游動物垂直遷移生物量有顯著正相關，而透光層葉綠素貯存量與垂直遷移浮游動物生物量和透光層營養鹽(DIN)貯存量成正比，而主動傳輸碳通量也與透光層之葉綠素和DIN貯存量有顯著相關性。因此，主動傳輸碳氮磷通量的多寡，應是受到海洋基礎生產力強弱的影響。主動傳輸佔生物幫浦碳氮磷通量比例於北南海常態夏季分別為34.5±3.75%、38.6±8.25%與36.7±2.62%；在內波特殊事件為28.6%、31.3%與26.2%；在西北太平洋則分別為32.4%、25.8%與32.8%。由此看來，主動傳輸在生物幫浦中佔有不可忽略角色。

關鍵字：主動傳輸、碳氮磷、生物幫浦、內營力、北南海與西北太平洋

Abstract

Zooplanktons play a critical role in the biological pump by acquiring organic material in the euphotic zone at night, and release part of the assimilated material including organic and inorganic matters below the euphotic zone during the day. This diet vertical migration drives the active fluxes of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P). Active fluxes are composed of respiratory flux, mortality flux, excretion flux and gut flux, which have been reported in the previous studies but are not yet reported in the northern South China Sea (NSCS) where is generally thought as tropical and oligotrophic. This study is the first to explore the active fluxes of CNP in the NSCS, and the results are also compared with those found in the northwest Pacific.

The active migrant biomass were 376 mg m^{-2} in regular summer, but varied from 635 mg m^{-2} in an anticyclonic event to 997 mg m^{-2} in an internal-waves induced event. Active fluxes of C, N, and P were respectively estimated to be $25.6 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $2.68 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and $0.37 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in regular summer, about $50.0 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $4.09 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and $0.57 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in an anticyclonic event, and about $93.4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $7.26 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and $0.99 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in an internal-waves induced event. The migrant biomass and active fluxes of CNP were significantly higher in special ocean events than in regular summer. Comparing to other studies at Canary Island in regular summer and anticyclonic event, our results show similar ranges and trends in fluxes. Furthermore, our studies in the northwest Pacific show that the magnitude of migrant biomass (158 mg m^{-2}) and active fluxes of CNP ($10.9 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $1.40 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and $0.57 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) in regular summer were much lower than those in summer in the NSCS.

The proportion of active CNP fluxes to the sum of biological pump in the NSCS are $34.5 \pm 3.75\%$, $38.6 \pm 8.25\%$ and $36.7 \pm 2.62\%$, respectively, in the regular summer, about 28.6% , 31.3% and 26.2% , respectively, in an internal-waves induced event, and

about 32.4%, 25.8% and 32.8%, respectively, in the northwest Pacific. The active transport obviously plays an important role in the downward fluxes of CNP in the NSCS.

Key words: Active flux; CNP; Biological pump; Internal forcings; Northern South China Sea



目錄

論文審定書	i
致謝	ii
中文摘要	iii
Abstract	iv
目錄	vi
圖目錄	viii
表目錄	xii
第一章、前言	1
1.1 二氧化碳對人類影響	1
1.2 海洋碳循環	1
1.3 研究目的	4
第二章、材料與方法	8
2.1 研究區域	8
2.2 採樣位置及方法	13
2.2.1 採樣位置及時間	13
2.3 浮游動物日夜遷移取樣及分析	16
2.3.1 浮游動物取樣	16
2.3.2 浮游動物分析	16
2.4 海水取樣及分析	21
2.4.1 海水取樣方法	21
2.4.2 實驗方法	22
第三章、結果與討論	24
3.1 各航次水文概況	24
3.1.1 ORI-1039 航次水文概況	24
3.1.2 ORI-1059 航次水文概況	31

3.1.3 ORI-1074 航次水文概況	44
3.1.4 ORI-1082 航次水文概況	51
3.1.5 ORIII-1773 航次水文概況	60
3.1.6 ORV-0035 航次水文概況	63
3.2 主動傳輸	67
3.2.1 浮游動物日夜垂直遷移	67
3.2.2 浮游動物時間序列之生物量與豐度	71
3.2.3 浮游動物日間、夜間與垂直遷移生物量	74
3.2.4 主動傳輸通量	88
第四章、結論	105
第五章、參考文獻	107
網站	107
中文部份	107
英文部份	108

圖目錄

圖 1- 1、大氣中二氧化碳氣體濃度 (取自美國國家大氣海洋局，NOAA；National Oceanic and Atmospheric Administration)。	5
圖 1- 2、物理幫浦示意圖 (取自網站 http://serc.carleton.edu/eslabs/carbon/lab_6a_test_pag.html)。	6
圖 1- 3、生物幫浦示意圖 (取自 Ducklow et al., 2001)。	7
圖 2- 1、南海季風風速和風向季節平均變化圖，DJF(代表冬季 December, January, February)、MAM(代表春季 March, April, May)、JJA(代表夏季 June, July, August) 和 SON(代表秋季 September, October, November) (取自 Qiu et al., 2012)。	10
圖 2- 2、南海冬季(a)及(b)夏季南海表面環流圖(取自 Morton and Blackmore, 2001)。	11
圖 2- 3、南海表層海水水溫月平均變化圖(取自 Liang et al., 2000)。	12
圖 2- 4、1992 年 10 月至 2009 年 10 月南海發生渦流(eddy)個數 (取自 Chen et al., 2011)。	13
圖 2- 5、研究期間各航次拖網位置圖。	14
圖 3- 1、ORI-1039 航次採樣位置測站點。	25
圖 3- 2、ORI-1039 航次採樣期間(06/08/2013-06/09/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。	26
圖 3- 3、ORI-1039 航次採樣期間(06/10/2013-06/11/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。	27
圖 3- 4、ORI-1039 航次測站(St. A 與 St. B)之日夜溫鹽圖。	28
圖 3- 5、ORI-1039 航次航行期間(06/07/2013-06/11/2013)表面海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值。	29
圖 3- 6、ORI-1039 航次測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈，左圖為 A 測站，右圖為 B 測站。	30
圖 3- 7、ORI-1059 航次採樣位置測站點。	33

圖 3- 8、ORI-1059 航次採樣期間(12/04/2013-12/05/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。	34
圖 3- 9、ORI-1059 航次採樣期間(12/06/2013-12/07/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。	35
圖 3- 10、ORI-1059 航次採樣期間(12/08/2013-12/09/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。	36
圖 3- 11、ORI-1059 航次測站(St. 8A 與 St. B4)之日夜溫鹽圖。	37
圖 3- 12、ORI-1059 航次航行期間(12/05/2013-12/09/2013)測站 St. C5 至 St. 8A 至 St. B4 表面海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值。	38
圖 3- 13、ORI-1059 航次南北測線(St. C1 - St. C5) 0-200m 之溫度與鹽度剖面圖。	39
圖 3- 14、ORI-1059 航次南北測線(St. C1 - St. C5) 0-200m 之葉綠素螢光值與溶氧剖面圖。	40
圖 3- 15、ORI-1059 航次東西測線(St. S5 - St. C4) 0-200m 之溫度與鹽度剖面圖。	41
圖 3- 16、ORI-1059 航次東西測線(St. S5 - St. C4) 0-200m 之葉綠素螢光值與溶氧剖面圖。	42
圖 3- 17、ORI-1059 航次測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈，8A 測站(左圖)，B4 測站(右圖)。	43
圖 3- 18、ORI-1074 航次採樣位置測站點。	45
圖 3- 19、ORI-1074 航次採樣期間(05/18/2014-05/19/2014)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。	46
圖 3- 20、ORI-1074 航次採樣期間(05/20/2014-05/21/2014)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。	47
圖 3- 21、ORI-1074 航次測站(St. A 與 St. B)之日夜溫鹽圖。	48
圖 3- 22、ORI-1074 航次航行期間(05/18/2014-05/20/2014)測站 St. A 與 St. B 表面	

海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值。·····	49
圖 3- 23、ORI-1074 航次測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈， St. A 測站(左圖)，St. B 測站(右圖)。·····	50
圖 3- 24、ORI-1082 航次採樣位置測站點。·····	52
圖 3- 25、ORI-1082 航次出發前由 APDRC(Asia-Pacific Data-Research Center)衛星 資料取得海平表高與測站點規劃。·····	53
圖 3- 26、ORI-1082 航次採樣期間(07/11/2014-07/12/2013)海表面高度變化圖(資料 來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。·····	54
圖 3- 27、ORI-1082 航次採樣期間(07/13/2014-07/14/2013)海表面高度變化圖(資料 來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。·····	55
圖 3- 28、ORI-1082 航次採樣期間(07/15/2014-07/16/2013)海表面高度變化圖(資料 來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。·····	56
圖 3- 29、ORI-1082 航次測站(St. B、St. C 與 St. D)之日夜溫鹽圖。·····	57
圖 3- 30、ORI-1082 航次航行期間(07/11/2014-07/16/2014)測站 St. A、St. B、St. C 與 St. D 表面海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值。·····	58
圖 3- 31、ORI-1082 航次測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈， St. B 測站(左圖)，St. C 測站(右圖)。·····	59
圖 3- 32、ORIII-1773 航次採樣位置測站點。·····	61
圖 3- 33、東沙島東部受上舉型、下沉型內波影響與常態無內波之溫度、鹽度及葉 綠素螢光值對深度的垂直分佈。·····	62
圖 3- 34、ORV-0035 航次採樣位置測站點。·····	63
圖 3- 35、ORV-0035 航次採樣期間(03/29/2014-03/30/2013)海表面高度變化圖(資料 來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。·····	64
圖 3- 36、ORV-0035 航次東西測線(St. 1 - St. 8) 0-500m 之溫度剖面圖。·····	65
圖 3- 37、ORV-0035 航次測站(St. 6)之日夜溫鹽圖。·····	65
圖 3- 38、ORV-0035 航次 St. 6 測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直	

分佈。·····	66
圖 3-39、北南海常態夏季夜間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖， (a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。·····	68
圖 3-40、北南海常態夏季日間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖， (a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。·····	68
圖 3-41、北南海冬季反渦流夜間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖， (a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。·····	69
圖 3-42、北南海冬季反渦流日間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖， (a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。·····	69
圖 3-43、北南海夏季東沙內波夜間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖， (a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。·····	70
圖 3-44、北南海夏季東沙內波日間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖， (a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。·····	70
圖 3-45、浮游動物 0-200m 時間序列採樣之生物量，圖(a)為各體型大小生物量與圖(b)為總生物量。·····	72
圖 3-46、浮游動物 0-200m 時間序列採樣之個體豐度，圖(a)為各體型大小生物豐度與圖(b)為總生物豐度。·····	73
圖 3-47、北南海常態夏季之各體型大小日夜浮游動物體內碳氮磷含量。·····	84
圖 3-48、北南海反渦流事件之各體型大小日夜浮游動物體內碳氮磷含量。·····	85
圖 3-49、北南海內波事件之各體型大小日夜浮游動物體內碳氮磷含量。·····	86
圖 3-50、西北太平洋之各體型大小日夜浮游動物體內碳氮磷含量。·····	87
圖 3-51、主動傳輸碳氮磷通量在本研究不同條件之結果。·····	96
圖 3-52、主動傳輸碳氮磷通量與垂直遷移浮游動物生物量相關性圖。·····	97
圖 3-53、北南海常態夏季、反渦流事件與東沙內波 200m 以淺之日夜葉綠素螢光 值對深度的垂直分佈。·····	98
圖 3-54、透光層葉綠素積分與垂直遷移浮游動物生物量和營養鹽(DIN)積分相關	

性圖。·····	99
圖 3-55、主動傳輸碳通量與透光層中營養鹽和葉綠素積分相關性圖。·····	100
圖 3-56、呼吸通量、死亡通量、腸道通量與代謝溶解態有機碳通量佔主動傳輸總 碳通量百分比。·····	101

表目錄

表 2-1、研究期間各航次拖網詳細日期與採樣位置經緯度。·····	15
表 3-1、北南海常態夏季之 0-200m 各體型大小日夜浮游動物平均生物量±標準偏 差、夜日比值與垂直遷移生物量。·····	77
表 3-2、北南海特殊事件與西北太平洋之 0-200m 各體型大小日夜浮游動物平均生 物量、夜日比值與垂直遷移生物量。·····	79
表 3-3、北南海常態夏季、特殊事件與西北太平洋之各體型大小日夜浮游動物體 內平均碳氮磷含量平均±標準偏差與 C:N、C:P、N:P 莫爾比。·····	81
表 3-4、本研究於北南海常態夏季、特殊事件與西北太平洋之各體型大小主動傳 輸通量。·····	92
表 3-5、本研究於北南海常態夏季、內波事件與西北太平洋之主動傳輸碳氮磷通 量於生物幫浦比例。·····	102
表 3-6、本研究浮動動物垂直遷移生物量與主動傳輸碳通量結果與其他學者之主 動傳輸碳通量結果做比較。·····	103

第一章、前言

1.1 二氧化碳對人類影響

自工業革命以來，人類活動所燃燒的化石燃料（fossil fuel）釋放大量的二氧化碳並累積於大氣中。根據美國國家大氣海洋局(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)在夏威夷茂納羅亞火山上的大氣觀測站(Mauna Loa, Hawaii)得到的最新觀測資料，大氣中二氧化碳已快增加到 400 ppm (圖 1-1)。人類活動仍將持續干擾著大氣中化學組成，而世界各國政府承諾保住 2°C 增溫幅度的美夢可能破滅(Monastersky, 2013)。由於大氣中二氧化碳伴隨引發的「溫室效應 (greenhouse effect)」現象，使得地表的溫度，變得愈來愈高，造成了今天大家熟知的「全球暖化」。全球溫度的上升會造成氣候的劇烈變化，而區域性的氣候變化會改變森林生態、農獲量及水供應量，並威脅人類居住及危害當地生態體系(Houghton et al., 2001)。地表溫度的增加，除了造成冰山的快速融化，而導致海平面上升，沿海陸地與部份島嶼被海水淹沒；甚至改變了現今的氣候型態，如颱風強度增加、雨季變化及沙漠化日益嚴重等現象。這些變化不但直接影響人類的生命安全，更間接引起社會、經濟等種種問題。因此，人類活動產生二氧化碳所造成的問題，需要我們即時重視與防範。

1.2 海洋碳循環

根據 Quéré et al. (2009)研究指出，1959 年至 2008 年間，人類活動所產生的二氧化碳，約 43% 積累至大氣中，剩餘二氧化碳被吸收在陸地和海洋中。而自 1800 年來，海洋已吸收 1180 億噸(billion tons)二氧化碳，約 55% 大氣中二氧化碳總碳量(Sabine et al., 2004)，可見海洋足以牽動大氣中二氧化碳濃度大幅度的改變。因此，海洋吸收大氣中二氧化碳是降低大氣中二氧化碳極為重要的一環。但要瞭解大氣中二氧化碳濃度的改變趨勢與輸送至深海的狀況，就必須從海洋碳循環變化作用和機制著手。

海洋吸收二氧化碳主要是透過「物理幫浦(physical pump)」與「生物幫浦(biological pump)」將碳傳送至深海。物理幫浦是指大氣中二氧化碳可以透過海氣

交換作用進入表水，讓海水二氧化碳濃度增高，再藉由大規模海洋溫鹽環流(thermohaline circulation)運送(圖 1-2)，將二氧化碳輸入深海並儲存於深層水中，此機制可降低大氣中二氧化碳濃度(Feely et al., 2001)。而生物幫浦是指浮游植物在透光層中行光合作用，將溶解於海水中的無機碳，轉化為有機碳，大部分光合作用所生成的有機碳，會在上層海水中再循環分解，但仍有少部分的有機質會沉降至深層水中才分解，甚至被永遠埋藏於沉積物中。因物理幫浦存碳最終隨溫鹽環流還是會回到大氣中，其停留時間約 500 年(Wanninkhof and McGillis, 1999; Nightingale et al., 2000)，所以對儲存大氣中二氧化碳的效益而言，“生物幫浦”的機制相對來說較為重要，二氧化碳可被上層海水中浮游植物所吸收利用，然後垂直向下輸出儲存在深海中埋藏。

生物幫浦一般被視為邊緣海或大洋中碳垂直傳輸最有效過程(Falkowski et al., 1998; Ducklow et al., 2001)，生物幫浦包含了被動傳輸 (passive transport)、主動傳輸 (active transport) 與溶解有機物向下擴散與垂直對流傳輸(Hidaka et al., 2001)(圖 1-3)。

被動傳輸主要來自於透光層浮游植物進行光合作用吸收海水中營養鹽及二氧化碳轉換成有機物質/有機碳，有機物質向下沉降過程中部份顆粒物質會被分解成溶解態或再次形成無機物質及二氧化碳(Hedges, 1987)，而最後脫離循環往下輸送的顆粒態碳稱為被動傳輸。

本研究主要是探討主動傳輸，而主動傳輸主要藉由海洋浮游動物將表層碳氮磷往深層傳送的過程。浮游動物是指自身的游泳能力無法對抗水流的一群動物(Nybakken, 1993)，根據文獻指出，海洋中浮游動物大多以橈足類(copepod)為數量最豐富的組成份子，個體數約占浮游動物族群的 60 ~ 80 % (Huys and Boxshall, 1992 ; Turner, 2000)。

主動傳輸主要由具有日夜遷移特性之浮游動物於夜間遷移至海洋上層進行捕食，白天則停留於上層或往深層遷移，並將上層捕食的可機物質以呼吸作用或排空方式將 DIC 及有機物質於深層釋出。這類具有日夜遷移特性的浮游動物能將碳

氮磷傳輸至深層，稱為主動傳輸(Longhurst and Harrison 1988, 1989; Dam et al. 1995; Hays et al. 1997; Borgne and Rodier 1997; Zhang and Dam 1997; Steinberg et al. 2000; Al-Mutairi and Landry 2001)。根據若干學者(Hays, 2003; Pearre, 2003; Zaret and Suffern, 1976)提出，浮游動物有垂直遷移現象，最常見原因是受到陽光強度影響和躲藏掠食天敵(predators)出現之因素，而造成浮游動物有遷移現象。本研究所探討主動傳輸通量包括呼吸通量(Longhurst and Harrison, 1988, 1989 and Longhurst et al., 1990)、排便通量(Morales et al., 1993; Atkinson et al., 1996; Morales, 1999; Schnetzer and Steinberg, 2002)、死亡通量(Longhurst and Williams, 1992; Dam et al., 1995 and Zhang and Dam, 1997)與代謝排放通量(Steinberg et al., 2000)。

呼吸通量(Respiration flux):代表浮游動物排放出二氧化碳形成溶解無機碳(DIC)。根據不同學者(Longhurst et al., 1990; Al-Mutairi and Landry, 2001; Hidaka et al., 2001; Yebra et al., 2005; Steinberg et al., 2008; Hannides et al., 2009; Kobari et al., 2013; Stukel et al., 2013)研究主動傳輸結果顯示，呼吸通量佔主動傳輸 50%以上，而呼吸通量相較於被動傳輸中為更能直接將二氧化碳直接輸送至深海中。

腸道通量(Gut flux):代表浮游動物排放出顆粒碳物質(Angel, 1985 and Hu, 1978)。此通量是指浮游動物所排放出的糞粒(fecal pellets)，因不易測量實際所產生出糞粒，而測定浮游動物日夜體內 Chl. *a* 含量變化，並將 Chl. *a* 值轉換成碳含量，推估浮游動物夜間在上層海水攝食浮游植物並儲存至消化道，而於日間遷移至深層排泄所產生的向下傳輸碳通量；Chl. *a* 含量以螢光酸化方法測定，此方法源自於測定水體中 Chl. *a* (Richards and Thompson, 1952 ; Strickland and Parsons, 1968)，後經修改並廣泛應用在測定浮游動物體內 Chl. *a* 含量，由於被浮游動物攝食後之 Chl. *a* 多數會轉化為 Paeopigments，因此測定值包含 Chl. *a* 及 Paeopigments (Dagg and Wyman, 1983 ; Morales et al., 1990)。

死亡通量 (Mortality flux):代表浮游動物死亡而產生的顆粒有機碳氮磷物質(POM)。

代謝排放通量(Excretion flux):代表浮游動物所釋放出溶解態之碳氮磷物質

(DOM)。

1.3 研究目的

海洋生物幫浦在海洋碳循環中扮演關鍵角色，在 Walsh (1991)研究中發現，大陸邊緣海在海洋生地化循環中佔重要地位，因邊緣海比大洋中有較豐富的營養鹽可刺激浮游植物生長，同時也使得更多二氧化碳被浮游植物吸收，間接使得邊緣海成為大氣中二氧化碳的匯(sink)。由於邊緣海域是全球海洋碳循環中最重要的一環，因此在西太平洋最大邊緣海的南海進行生物幫浦的研究具有重要意義，生物幫浦的強弱則取決於碳的被動傳輸、主動傳輸以及溶解有機碳垂直傳輸通量的大小。國內海洋學者大多對台灣附近海域之被動傳輸和溶解有機物向下擴散和垂直對流傳輸已有若干研究報導(Chou et al., 2006; Hung et al., 2007; Ho et al., 2009; Hung and Gong, 2010; Wei et al., 2011, 2014)，但對主動傳輸尚未有報導。根據前人研究，主動傳輸之輸送至深海過程，相較被動傳輸與溶解有機物向下擴散和垂直對流傳輸是更明顯而且有效途徑(Dam et al., 1995; Le Borgne and Rodier, 1997; Steinberg et al., 2000)。過去全球海洋有關主動之研究均以碳通量為標地，對於氮與磷結果相當缺乏，而北南海更無針對主動傳輸之碳氮磷研究。本研究是國內首次在台灣附近海域探討熱帶邊緣海(北南海)主動傳輸之研究，此研究除有助於了解北南海碳氮磷循環及其傳輸通量外，更能了解主動傳輸在生物幫浦的特徵及其在海洋碳循環之重要性，也同時獲得相當寶貴的熱帶海洋主動傳輸資料。

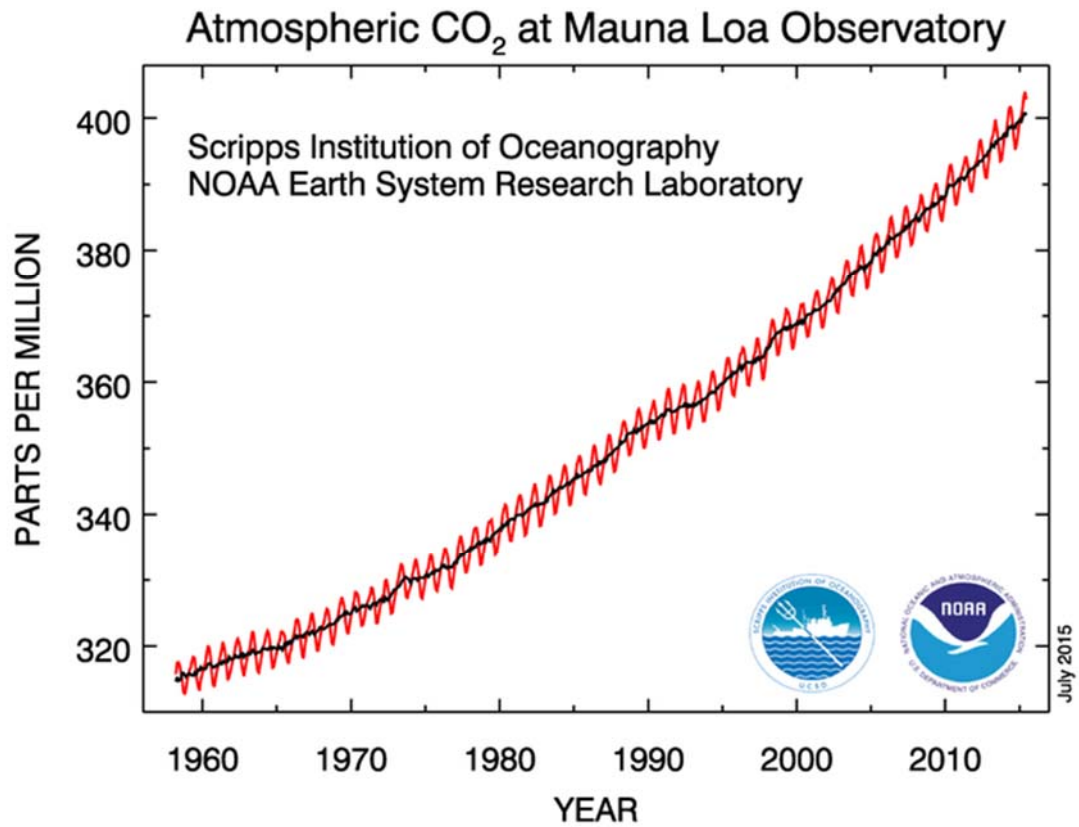


圖 1-1、大氣中二氧化碳氣體濃度 (取自美國國家大氣海洋局，NOAA；National Oceanic and Atmospheric Administration)。

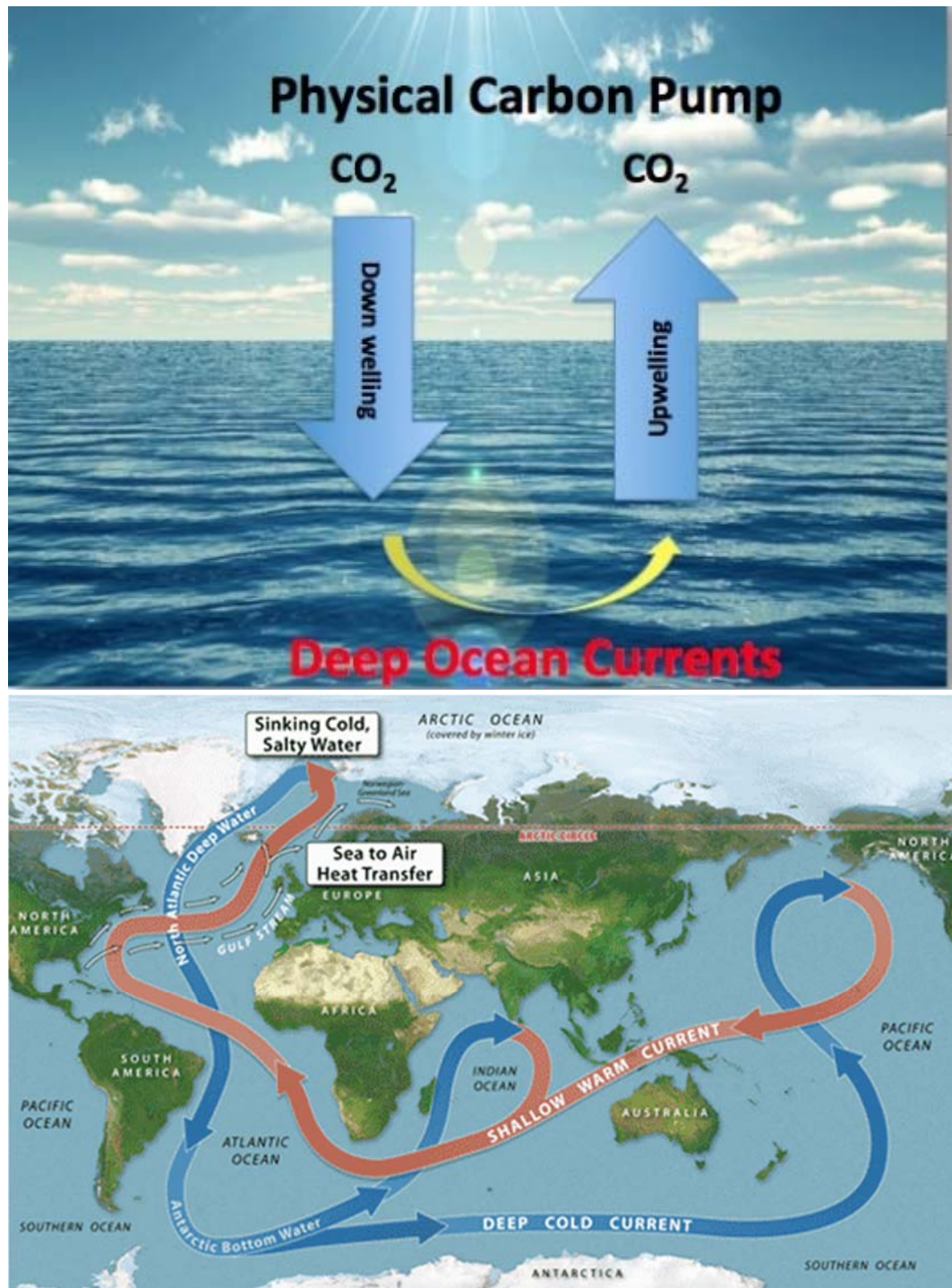


圖 1-2、物理幫浦示意圖 (取自網站

http://serc.carleton.edu/eslabs/carbon/lab_6a_test_pag.html)。

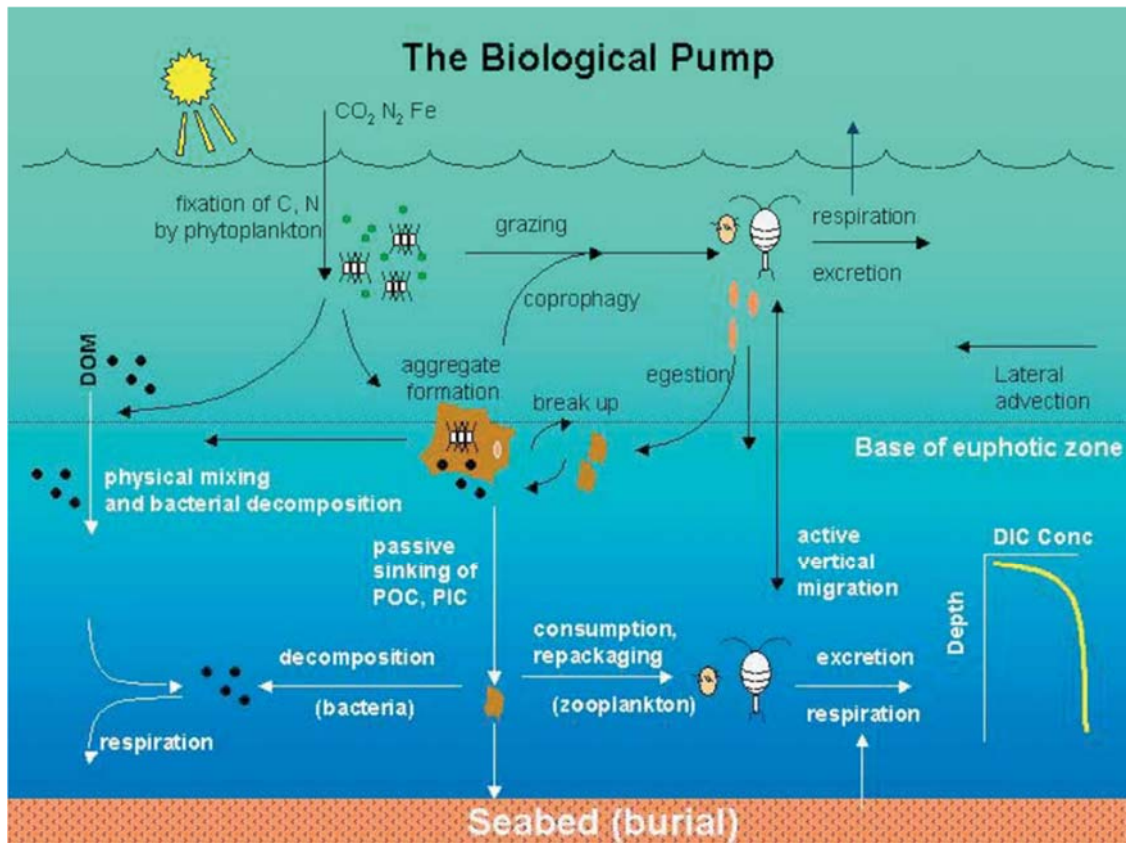


圖 1-3、生物幫浦示意圖 (取自 Ducklow et al., 2001)。

第二章、材料與方法

2.1 研究區域

南海，又稱為南中國海(South China Sea, SCS)，位於赤道海域，是世界上最大邊緣海 (marginal sea)，面積為 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，平均水深為 1350m，為東北-西南走向的半封閉海盆。南海西臨馬來西亞，分別有珠江和湄公河主要河川注入。

南海位於亞洲季風氣候區，表面受到季風驅動影響。冬季時，大陸高壓冷氣團由北向南吹，但受到地球自轉偏向西影響，形成東北季風，而夏天正好相反，形成西南季風(圖 2-1) (Jing et al., 2007)。在東北季風時期，由於強風區位於菱形海盆縱軸略微偏西的位置上，故南海西部形成強大的漂流；而東部海區的風力相對較弱，有利於形成北上的逆流，有補償流的性質，可對南海北部海區進行部分水量的補償，而此西部漂流及東部逆流即形成冬季為逆時鐘流之環流系統(圖 2-2(a)，Shaw and Chao, 1994; Hu et al., 2000; Morton and Blackmore, 2001)。在西南季風時期，因受季風影響，使南海的表層環流從西南往東北流(圖 2-2(b))。此外，除季風風向外，黑潮的入侵亦對南海北部海域之流場變化有顯著的影響。冬季時，受東北季風影響，黑潮會入侵南海，形成一南海黑潮分支；夏季時，黑潮則間歇性的入侵南海(Wang and Chern, 1987; Shaw, 1991)。而表水溫度，冬夏季明顯不同，冬季雖東北季風讓高溫黑潮分支經由呂宋海峽進入南海北部(Fan and Yu, 1981; Shaw, 1989; 1991)，但受東北季風溫度低影響，使南、北部表水溫度差達 7°C 以上。夏季溫暖印度洋表水在西南季風吹送下進入南海，使南海海域溫度分佈平均，大約為 29°C 左右(圖 2-3)(Liang et al., 2000)。

過去研究結果顯示南海基礎生產力冬季高於夏季，原因為冬季溫度較低使混合層深化，營養鹽抬升至表層，而提供較高基礎生產力(Chen and Chen, 2006)。南海也是眾多中尺度渦流(mesoscale eddy)發生的場所(圖 2-4)，此現象猶如海洋裡的颱風，在大洋中是普遍且到處存在的物理現象，其充滿能量的物理特性，能夠傳遞熱量、鹽度及其它的生地化物質。一般而言，渦流依其性質可概分為反時針渦旋及順時針渦旋，可分別讓溫躍層(thermocline)之淺化及深化(Chen et al., 2011)，進

階使表層營養鹽濃度發生改變。另外，南海北部亦為內波活躍區域，根據前人研究指出，北南海內波運動源於呂宋海峽(Zheng et al., 2007, Alford et al., 2010, Ramp et al., 2010, Lien et al., 2012; 2014)，然後向西傳播，當內波碰到東沙環礁時，分裂成南北兩群內波。這兩群內波在東沙環礁西方會合後，繼續向西北進行，最後碎波(breaking)而消失不見。內波運動及破碎時都會加強上層海水與下層海水的混合，對於上舉型內波將營養鹽從下層海水湧升至表層有很大的貢獻，藉此會增強基礎生產力。綜合上述，南海有許多物理作用發生，這些物理作用皆可能會造成上層海水營養鹽分佈的改變，影響基礎生產力，從而影響生物幫浦之強度與主動傳輸。

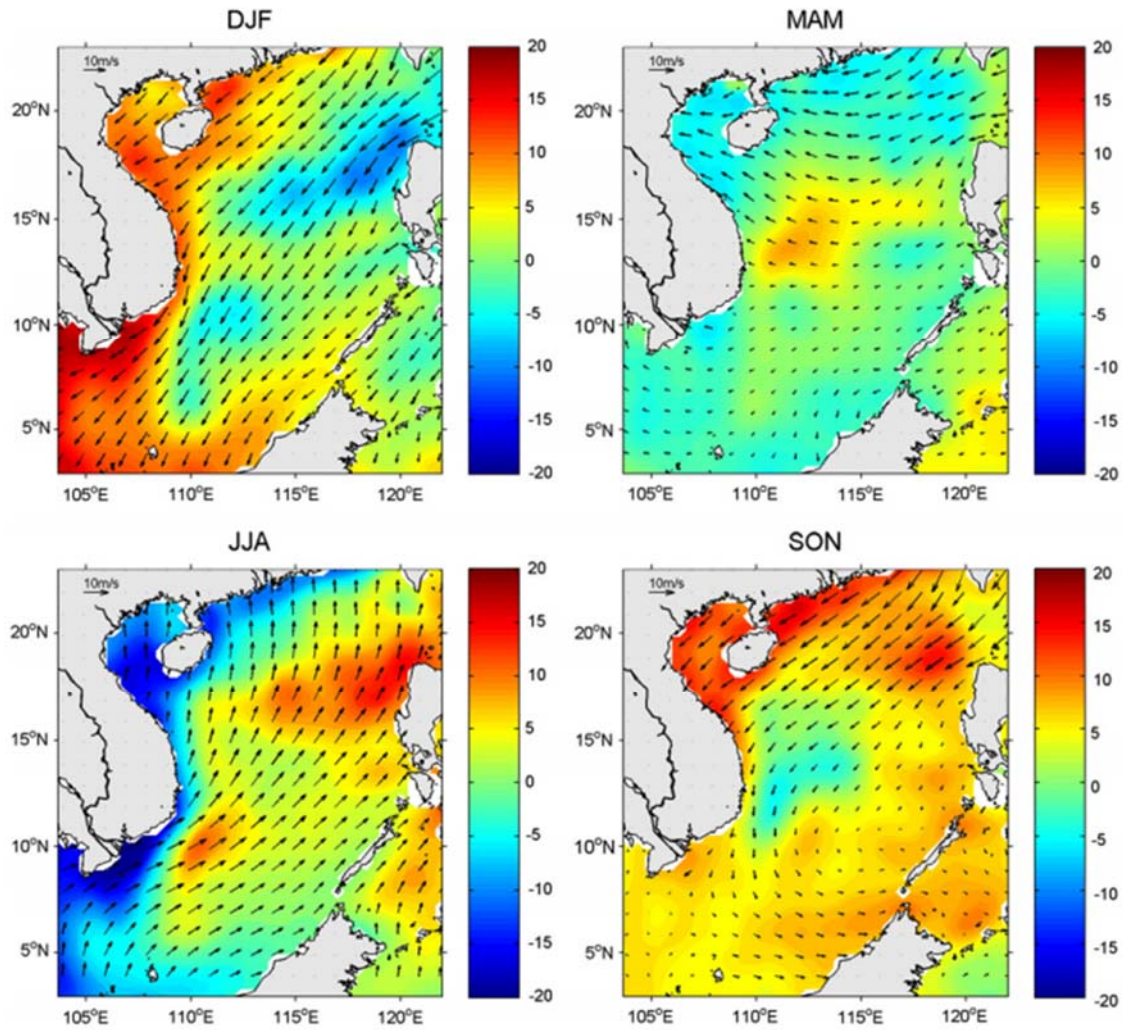


圖 2- 1、南海季風風速和風向季節平均變化圖，DJF(代表冬季 December, January, February)、MAM(代表春季 March, April, May)、JJA(代表夏季 June, July, August)和 SON(代表秋季 September, October, November) (取自 Qiu et al., 2012)。

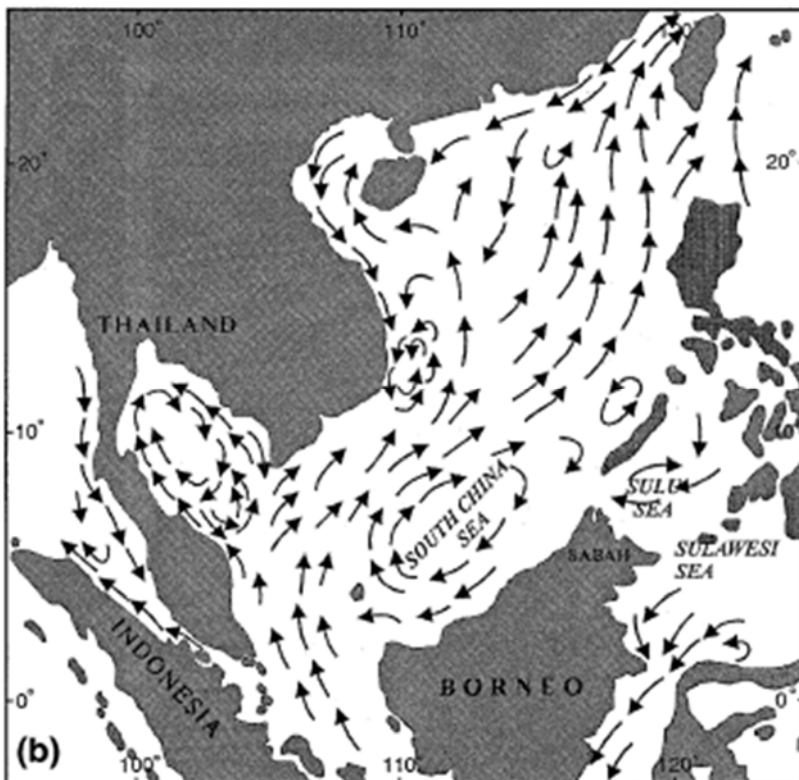
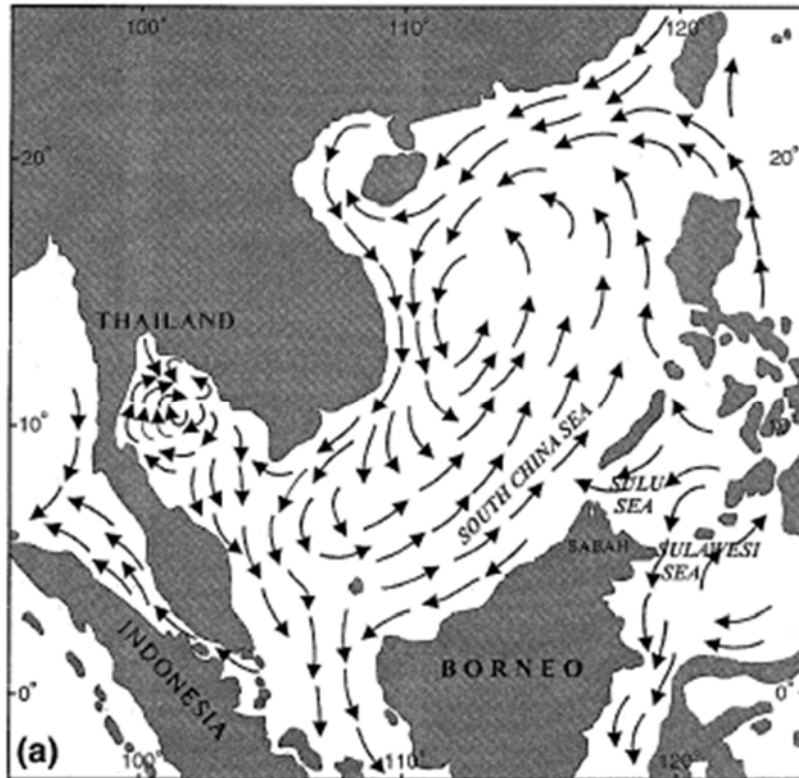


圖 2-2、南海冬季(a)及(b)夏季南海表面環流圖(取自 Morton and Blackmore, 2001)。

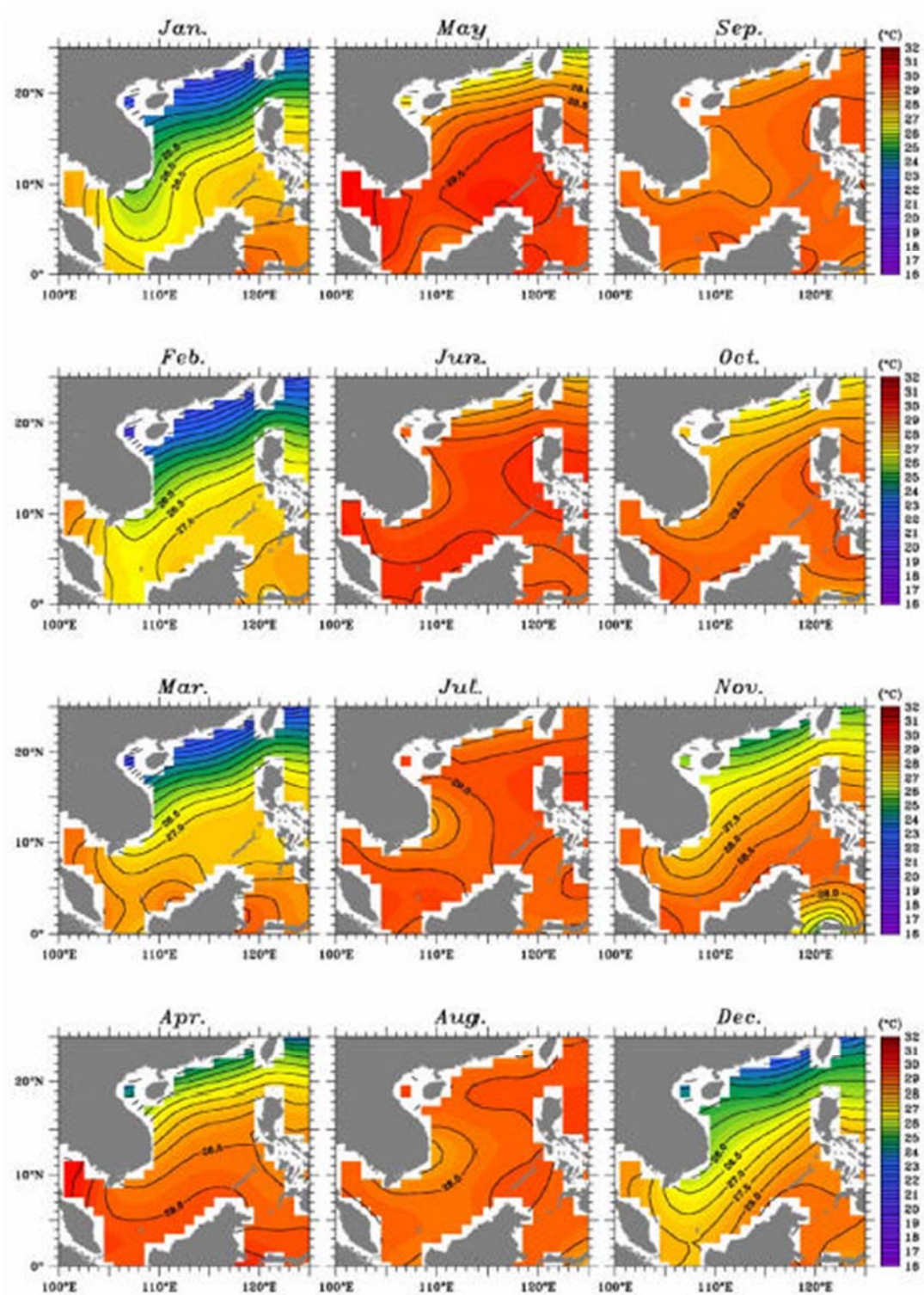


圖 2-3、南海表層海水水溫月平均變化圖(取自 Liang et al., 2000)。

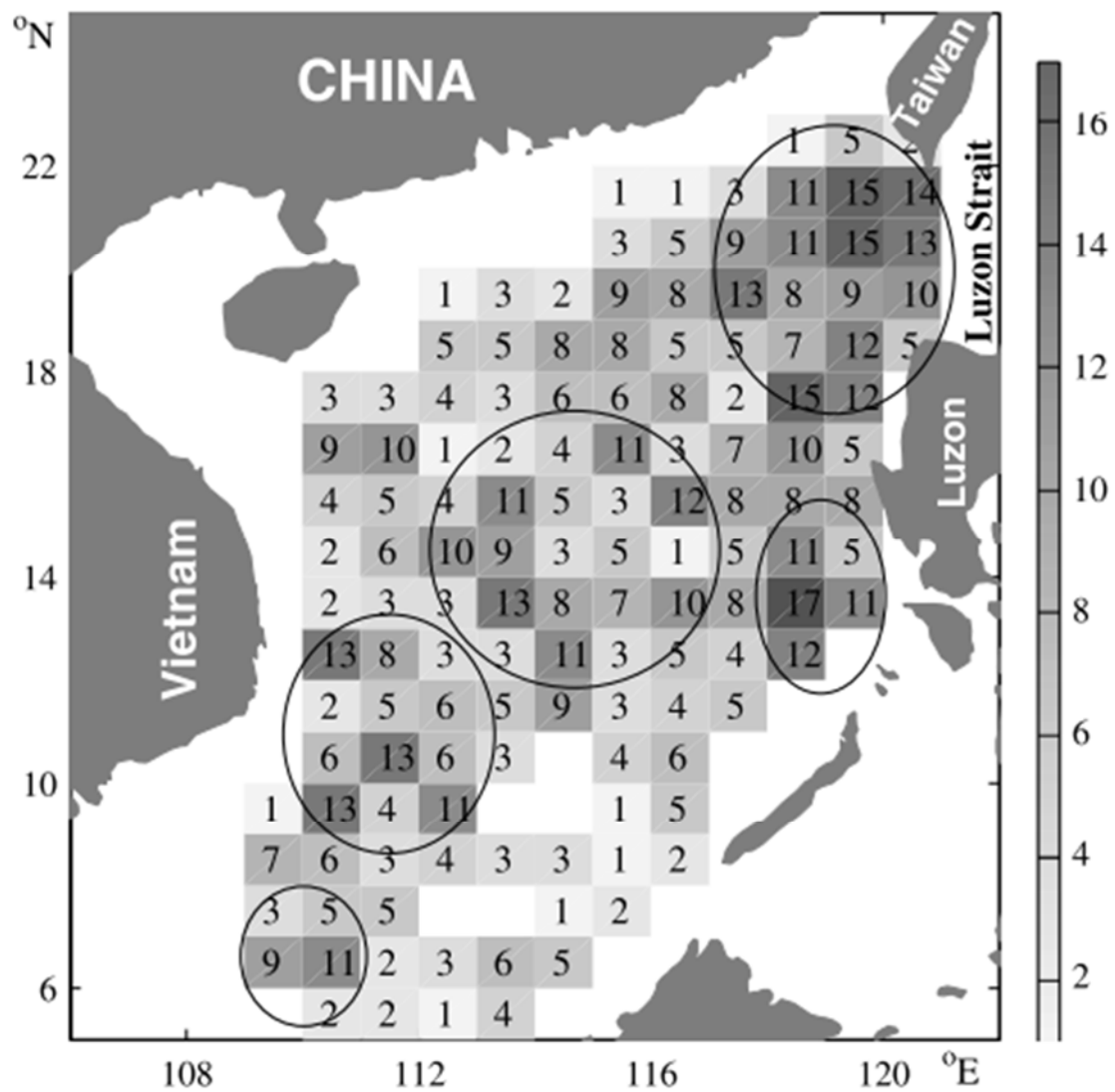


圖 2-4、1992 年 10 月至 2009 年 10 月南海發生渦流(eddy)個數 (取自 Chen et al., 2011)。

2.2 採樣位置及方法

2.2.1 採樣位置及時間

本研究利用海研一號、海研三號以及海研五號於南海北部及西北太平洋(圖 2-5)進行浮游動物拖網與海水採樣及分析，採樣時間共 6 次，介於 2013 年 6 月至 2014 年 7 月。涵蓋常態夏季與海洋特殊事件(反渦流和內波)，各航次詳細浮游動物採樣日期及位置如表 2-1。

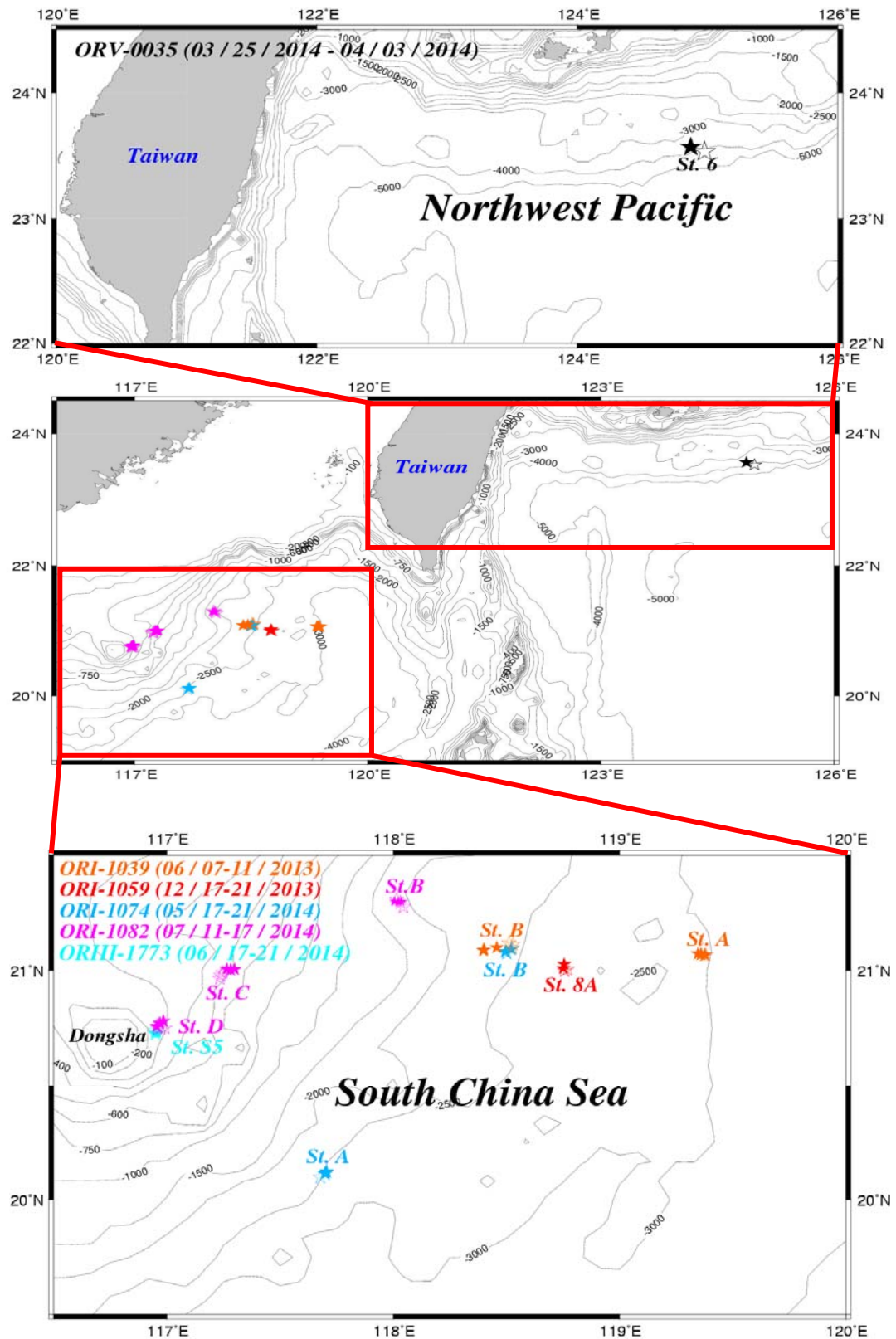


圖 2-5、研究期間各航次拖網位置圖。

表 2- 1、研究期間各航次拖網詳細日期與採樣位置經緯度。

Cruise	Station No.	Longitude (E)	Latitude (N)	Date	Event
ORI-1039	A	119°22.67'	21°04.08'	06/08/2013	常態夏季
	B	118°23.86'	21°05.26'	06/10/2013	常態夏季
ORI-1059	8A	118°45.08'	21°00.56'	12/06/2013	冬季反渦流
ORV-0035	6	124°58.57'	23°32.00'	03/29/2014	西北太平洋-常態春季
ORI-1074	A	117°02.33'	20°07.22'	05/19/2014	常態夏季
	B	118°29.71'	21°04.96'	05/20/2014	常態夏季
ORIII-1773	S5	116°57.15'	20°43.84'	06/19/2014	夏季東沙內波
	B	118°00.92'	21°18.47'	07/12/2014	常態夏季
ORI-1082	C	117°15.88'	21°00.39'	07/13/2014	常態夏季
	D	116°57.58'	20°45.00'	07/15/2014	夏季東沙內波

2.3 浮游動物日夜遷移取樣及分析

2.3.1 浮游動物取樣

浮游動物取樣以北太平洋標準浮游動物網(NORPAC net)，網目大小為 200 μm mesh、網口直徑 45cm，網長 180cm，網口中央加掛 Hydrobios 公司生產的單向式流速流量計(Mechanical Flow Meter)，藉以估算總過濾水體體積並換算浮游動物生物量與個體豐度。拖網分別於日間(10:00-13:00)及夜間(22:00-01:00)由 200 m 往表層斜拖各三次，採樣時船速相對水流約為兩節，上收時以緩速起網，拖一次網總時間約為 20 分鐘。採集之樣本先以海水清洗集中至封口袋，接著以液態氮急速冷凍並存放於零下 20°C 科學冰櫃，再攜回實驗室待進一步分析。

*水體體積計算方式如下：

水體體積轉換公式： $V = \text{INR} \times 0.3 \times \pi r^2$

V：通過網口之水體體積 (m^3)

INR: Indicated number of revolutions (流速流量計迴轉次數)

0.3：Hydrobios 公司提供之流量計轉換係數

πr^2 ：網口截面積

2.3.2 浮游動物分析

浮游動物樣品攜回實驗室分析前，先將樣品放置常溫黑暗地方退冰，用 4°C 乾淨去離子蒸餾水(D.D.W)進行分樣。分樣後樣品以不同體型大小(200、500、1000、2000、5000 μm)過篩進行豐度、生物量、與腸道葉綠素等實驗分析。

2.3.2.1 浮游動物豐度(Abundance)計算

浮游動物經二分儀分樣出適當生物量並以不同體型大小過篩後，由顯微鏡下數出不同體型大小的浮游動物個體數。

豐度(inds m^{-3}) = $\text{inds} \times V^{-1}$

V：通過網口之水體體積 (m^3)

inds：individuals，浮游動物個體數

2.3.2.2 浮游動物生物量(Biomass)計算

浮游動物經二分儀分樣出一半生物量並過篩得到不同體型大小浮游動物，倒入已秤前重之 PC 濾紙 ($5\mu\text{m}$ 的 47mm) 後再過濾浮游動物，並置於烘箱 60°C 環境下烘乾 3 天並秤乾重(DW)，再用過濾後濾紙重量扣前重得到各體型大小之浮游動物乾重。

$$\text{Biomass (mg m}^{-3}\text{)} = \text{浮游動物乾重 (mg)} \times V^{-1}$$

V：通過網口之水體體積 (m^3)

垂直遷移總生物量(migrant biomass)為各體型大小乾重生物量夜間扣減日間之總和。

2.3.2.3 腸道葉綠素分析

浮游動物經二分儀分樣出 $\frac{1}{4}$ 生物量並過篩得到不同體型大小浮游動物將分篩過的浮游動物置入離心管（外層須包住鋁箔紙避光）內注入 12ml 的 90%丙酮。離心管存放 4°C 環境一天後再取出垂直震盪 20 分鐘與離心 15 分鐘 3000rpm，以 10-AU 測定加酸前後螢光值。測定方法為將丙酮萃取液倒入體積約為 8ml 之儀器專用試管，測定螢光值，再加 $200\mu\text{l}$ 的 5%HCl 酸測加酸後螢光值。本研究利用 Dagg and Wyman(1983)的公式得到體內 Chl. *a* 結果，Phaeopigment 計算方式則是參考 Dam and Peterson (1988)，浮游動物消化腸道內之葉綠素計算公式如下：

$$\text{Chl. } a = K \times (R_b - R_a) \times v / n$$

$$\text{Phaeopigment} = K \times (\tau \times R_a - R_b) \times v / n$$

$$\text{total gut content} = \text{Chl. } a + 1.51 \times \text{Phaeopigment}$$

k = 螢光光度測定儀與分光光度計間測量值的校正常數

v = 丙酮體積(12ml)

n = 實驗使用浮游動物的濕重

R_b = 加酸前的螢光值

R_a = 加酸後的螢光值

τ = 酸化作用的比率公式 (檢量線加酸前/加酸後螢光值, 再將比值平均),
(Dagg and Wyman, 1983)。

$K=Fs[\tau/(\tau-1)]$, $Fs=C/R$, C =葉綠素 a 濃度, R =葉綠素 a 濃度在螢光測出讀值。
(USA - EPA)。

係數 1.51 : Chlorophyll-*a* 在生物體體內會分解為 Phaeopigment, 分解過程中, 會有約 34% 的誤差, 因此必須在 Phaeopigment 公式所算出的值再乘上一個 1.51 的轉換常數(Dam and Peterson, 1988)。

Gut flux : 換算為 Gut flux 時後, 葉綠素對碳的轉換係數為 30 Carbon / Chl. *a* =30) (Vidal, 1980)

2.3.2.4 排泄通量(Excretion flux)

排泄通量(Excretion flux)包含 DIN、DIP、DOC、DON 及 DOP 通量計算, 直接取用 Hannides et al. (2009)由 Hawaii Ocean Time-series (HOT)所得經驗公式求得:

$$\ln R_o = -0.2512 + 0.7886 \ln DW + 0.0490T$$

$$\ln E_{DIN} = -2.8900 + 0.7616 \ln DW + 0.0511T$$

$$\ln E_{DIP} = -4.3489 + 0.7983 \ln DW + 0.0258T$$

R_o (μLO_2 consumed $\text{indiv}^{-1} \text{h}^{-1}$)、 E_{DIN} (μgN $\text{indiv}^{-1} \text{h}^{-1}$)及 E_{DIP} (μgP $\text{indiv}^{-1} \text{h}^{-1}$)

DW =浮游動物日夜垂直遷移乾重生物量。

T =白天 300-500m 平均水溫。

有機碳(DOC)、氮(DON)和磷(DOP)之排泄通量則依序分別假設為 DIC、DIN

和 DIP 為 0.24 (Steinberg et al., 2000)、0.53 (Borgne and Rodier, 1997)和 0.47 (Pomeroy et al., 1963)估算。

$$E_{DOC} = \frac{0.24}{1-0.24} R_O$$

$$E_{DON} = \frac{0.53}{1-0.53} E_{DIN}$$

$$E_{DOP} = \frac{0.47}{1-0.47} E_{DIP}$$

有機氮磷加無機氮磷通量總和則為碳氮磷之排泄通量。

2.3.2.5 呼吸通量(Respiratory flux)

用已發表文獻中的經驗公式計算：

$$Fr = Ld \times Ni \times RCi \text{ (Takahashi et al., 2009)}$$

Fr : downward flux of respiratory carbon (mg C m⁻² d⁻¹)

Ld : length of the daytime(h)，本研究都以 12 小時去計算

Ni : abundance of migrators (inds m⁻² d⁻¹)

RCi : carbon respiration rate(µg C ind⁻¹ h⁻¹)

$$RCi = RO \times RQ \times 12 / 22.4$$

RCi : carbon respiration rate (µg C ind⁻¹ h⁻¹)

RQ : respiratory quotient = 0.97 (Gnaiger, 1983)

RO : oxygen consumption rate (µL O₂ ind⁻¹ h⁻¹)

$$\ln RO = 0.124 + 0.78 \times \ln CW + 0.073 T \text{ (Ikeda et al., 2001)}$$

RO : oxygen consumption rate (µL O₂ ind⁻¹ h⁻¹)

CW : carbon weight (mg C ind⁻¹)

T : ambient temperature (°C)

2.3.2.6 死亡分解通量(Mortality flux)

死亡分解通量(Mortality flux)使用經驗公式(Takahashi et al., 2009)求得：

$$F_m = B_i \times M_{\text{deep}}$$

B_i ：浮游動物通過 200m 通量 ($\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

M_{deep} ：遷移物種日死亡率，約 0.01

2.3.2.7 浮游動物體內 CNP 含量之分析

將秤重後之 PC 濾紙上的浮游動物取下以瑪瑙研磨均勻磨碎後，置入小膠瓶內後進行體內 CNP 分析。

2.3.2.7.1 浮游動物顆粒態有機碳氮(POC 與 PON)分析

將已均勻磨碎的浮游動物取適當乾重(約 2-3 mg)置入銀盒(需經高溫 550°C ，6 小時去碳)，加入 2N 的 HCl 將無機碳/氮去除。加酸後之銀盒以置入烘箱 60°C 去除殘留 HCl，最後將烘乾樣品上機進行分析。分析儀器使用 FLASH 2000 CHNS 元素分析儀，藉由 950°C 的高溫及催化劑，將樣品中的有機質氧化成碳和氮氣，再經由載流氣體(He)送入層析管柱中分離，最後藉由熱傳導偵測儀(thermal conductivity detector)測量濃度。

2.3.2.7.2 浮游動物顆粒態有機磷(POP)分析

浮游動物顆粒態有機磷(particulate organic phosphorus, POP)是用總顆粒態磷(total particulate phosphorus, TPP)減掉顆粒態無機磷(particulate inorganic phosphorus, PIP)所得出。

顆粒態無機磷(PIP)是利用萃取之方法(Aspila et al., 1976)，取均勻研磨後的浮游動物 2-3 mg，置於 10 ml 玻璃離心試管中(需經高溫 550°C ，6 小時)，加入 5 ml 1N HCl 萃取試劑，將加酸後之樣品使用 SHAKER 水平搖晃 24 小時(150 rpm)，均勻

混合後再以 3000 轉離心 15 分鐘，取上層液 1 ml 於 30 ml PP 樣本瓶，以 24 ml 之 Milli-Q 稀釋，均勻混合後依序加入 2.38 ml 酸性鉬酸銨(R21)混合試劑及 1ml 抗壞血酸試劑(R22)，每一種試劑添加後必須加以充份搖晃，等所有試劑添加完成後靜置 30 分鐘待反應完全後，再以分光光度計波長 880 nm 上機測之。

顆粒態總有機磷(TPP)的測定，是將已均勻磨碎浮游動物置於 10 ml 玻璃離心試管中經由高溫（550℃，6 小時）將浮游動物中的有機磷灰化成無機磷，再依據 Aspila et al. (1976)的方法萃取無機磷，以分光光度計波長 880nm 來測定。

2.4 海水取樣及分析

本研究中除了收集浮游動物並分析日夜垂直遷移(Vertical migrations)所產生碳氮磷向下傳輸之主動通量(active flux)外，仍需收集水體並分析海水化學特性。

利用海洋研究船在南海北部與西北太平洋進行採樣，在研究船上用輪盤式採水器，輪盤上掛上 10L 之 Niskin 採水瓶採集水樣，基本水文參數測量包括溫度、鹽度、密度、深度、螢光以及穿透度，其中溫度、鹽度、密度與深度利用溫鹽深儀來測量，而穿透度與螢光則利用穿透度與螢光探針來測量。

2.4.1 海水取樣方法

本研究之海水取樣前，PE 瓶先在實驗室以 DW(deionized water)沖洗、浸泡 3% 鹽酸(以 37-38% HCl, Merck,GR 級配製)24 小時，再以 DW 洗淨後用 DDW(distilled deionized water)潤洗瓶內，防塵晾乾。

營養鹽採樣：分裝 2 瓶 500ml 棕色塑膠瓶共 1L 水樣，並立即放置研究船冷凍庫於溫度-20℃以防止生物作用影響，並攜帶回實驗室進行分析。

溶解態有機碳(DOC)採樣：收集海水 100ml 於玻璃瓶並加入超純濃鹽酸(Super Pure, Merck)，帶回實驗室進行 DOC 之分析。

葉綠素 *a* (chlorophyll *a*, Chl. *a*)採樣：將 1 公升海水進行抽氣過濾在直徑 25 mm

玻璃纖維濾紙(Whatman, GF/F 預先以 450°C 鍛燒 3 小時)，滴入 2-3 低飽和碳酸鎂 (MgCO_3)。再將濾紙對折以鋁箔紙包覆避光置於研究船科學冷凍庫於溫度 -20°C 下保存。

2.4.2 實驗方法

2.4.2.1 營養鹽分析:

(a) 溶解態無機氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN) ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$)

硝酸鹽(NO_3^-)分析方法為鎘銅還原呈色法，使鎘線在酸性條件下鍍上銅將水樣中硝酸根(NO_3^-)還原成亞硝酸根(NO_2^-)，再用呈色法測定亞硝酸根，濃度測定是利用半自動流動注入分析儀(Flow Injection Analyzer, FIA)配合分光光度計(型號：Hitachi U-2000、1cm 光路徑石英槽)進行(Pai and Yang, 1990)。呈色原理是採用 pink azo dye 呈色原理，將亞硝酸鹽加入磺胺和 NED 試劑使其溶液呈粉紅色，再利用分光光度計測定吸光值(Strickland and Parson, 1972; Pai and Yang, 1990)。

亞硝酸鹽(NO_2^-)分析方法為採用 Trident-223 三同步營養鹽測定系統，將亞硝酸鹽、磷酸鹽與矽酸鹽同時添加好呈色劑測定。亞硝酸鹽再利用分光光度計測定吸光值。

(b) 溶解態反應性磷，SRP (PO_4^{3-})

Soluble reactive phosphorus(SRP)亦可稱為 DIP，表層極低的 SRP 測定方法是採用 Magic 濃縮法和氫鉬酸還原法(Karl and Tien, 1992)兩者並用。Magic 濃縮法是將氫氧化鈉加入海水中使產生氫氧化鎂與磷共沉澱($\text{Mg}^{2+}_{(\text{aq})} + 2\text{OH}^{-}_{(\text{qu})} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_{2(\text{s})}$)，此時 PO_4^{3-} 會與 $\text{Mg}(\text{OH})_{2(\text{s})}$ 產生共沉澱再用 0.1M 鹽酸將此共沉澱溶解並得到 PO_4^{3-} 。將水樣濃縮液以氫鉬酸還原法求得磷酸根濃度後回推水樣中磷酸根濃度。

實驗步驟乃取 30ml 水樣至離心管加入 0.75ml 之 1M NaOH，充分搖盪靜置 5 分鐘後再震盪(主要需充分混合)再靜置 10 分鐘使白色物沉澱。之後使用高速離心機以每分鐘 5000 轉離心 30 分鐘 20°C，離心之後倒出上層液並加入 3ml 之 HCl。

依序加入體積為 1ml : 1ml : 0.38ml 的硫酸試劑、鉬酸鉍試劑與銻試劑及 1ml 抗壞血酸，每種試劑添加後必須充分搖晃，所有試劑添加完成需靜置 30 分鐘以上待完全反應完全，再以分光光度計(型號:Hitachi U-3310、1cm 光路徑石英槽)波長 880nm 測量。

(c)溶解態矽酸鹽 (dissolved silicate)

將水樣注入迴圈的同時與酸性鉬酸鉍溶液混合並以水浴加熱至 50°C，而後依序注入酒石酸及抗壞血酸，最後同亞硝酸鹽測定方法一樣以 FIA 的原理，採用 Trident-223 三同步營養鹽測定系統用分光光度計(型號:Hitachi U-3310、1cm 光路徑石英槽)測之。

2.4.2.2 葉綠素 *a* 之測定 (chlorophyll *a*, Chl. *a*)

取已過濾並加入飽和碳酸鎂之濾紙放入包有鋁箔紙的離心管，加入 90 %的丙酮 10 ml 萃取(Strickland and Parsons, 1972)，用垂直震盪器震盪二十分鐘後（加速濾紙中葉綠素 *a* 的萃取），放入冷藏櫃中冷藏 1 小時，再取出離心管放於 SHAKER 水平搖晃混合二分鐘後，放入冷藏櫃內冷藏二十四小時。次日取出離心管，以 3000 r.p.m 速度離心十五分鐘處理後，將離心管上層澄清液放入螢光儀(Turner Designs, model10-AU) 測量，本分析方法用非酸化方法(non-acidification technique, Welschmeyer, 1994)，直接量測其螢光值，無須量測及計算脫鎂葉綠素含量。

第三章、結果與討論

3.1 各航次水文概況

3.1.1 ORI-1039 航次水文概況

ORI-1039 航次是在 2013 年 6 月份進行採樣，以季節而言屬於夏季。圖 3-1 為此航次採樣點，位置於北南海 St. A ($119^{\circ}22.67' E$, $21^{\circ}04.08' N$) 與 St. B ($118^{\circ}23.86' E$, $21^{\circ}05.26' N$)，深度分別為 2920m 與 2460m。實心星形為夜間拖網，而空心星形為日間拖網。從網站(Colorado Center for Astroynamics Research, CCAR) 取得海水表面高度衛星資料(圖 3-2 與圖 3-3)，在測站 St. A 採樣期間(06/08/2013, 00:00 ~ 06/09/2013, 16:00 左右) 與 St. B 採樣期間(06/10/2013, 00:00 ~ 06/10/2013, 21:00 左右) 兩測站之海平面高度有高值，可能存在於一反渦流(暖渦)。從溫鹽圖顯示(圖 3-4)，採樣期間兩測站 St. A 及 St. B 水體皆屬典型南海水團(SCS)，並皆無受到河口沖淡水影響，水文特性略有不同，St. A 有偏向黑潮水(KW)的趨勢。進一步分析此行次航行期間表面海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值(SCTD)(圖 3-5)，可以發現停留於 St. A 測站的採樣期間，表水溫度大約介於 $30\sim 31^{\circ}C$ ；而航行至 St. B 水溫則為升高，停留於 St. B 測站的採樣期間，表水溫度大約皆在 $31^{\circ}C$ 以上，St. B 表水溫度明顯較高；而鹽度及葉綠素螢光值則呈現相反趨勢，測站 St. A 之鹽度及葉綠素螢光值明顯高於測站 St. B。除 SCTD 資訊外，分析 CTD 所得資料(溫度、鹽度及葉綠素螢光值)對深度的垂直分佈(圖 3-6)。表水至 150 公尺隨深度增加而鹽度遞增，150 公尺附近有個極大值，鹽度達 34.6，鹽度極小值出現在 500 公尺附近，為 34.4，此為典型南海中層水。500-2000 公尺鹽度隨深度增加而微微遞增。而表水水溫 $30.4\sim 31.2^{\circ}C$ 至 1000 公尺之間溫度梯度最大，1000-2000 公尺溫度隨深度遞增而緩慢遞減趨於一致，約達 $2.4^{\circ}C$ 。另外，混合層厚度在測站 St. B (31 公尺)深於 St. A (19 公尺)。綜合以上所述，兩測站皆為南海水但水文特性稍略為不同，且若受反渦流事件影響之下，混合層深度應更加深化，但在兩測站並無明顯看出。因此，此航次為北南海之常態夏季。

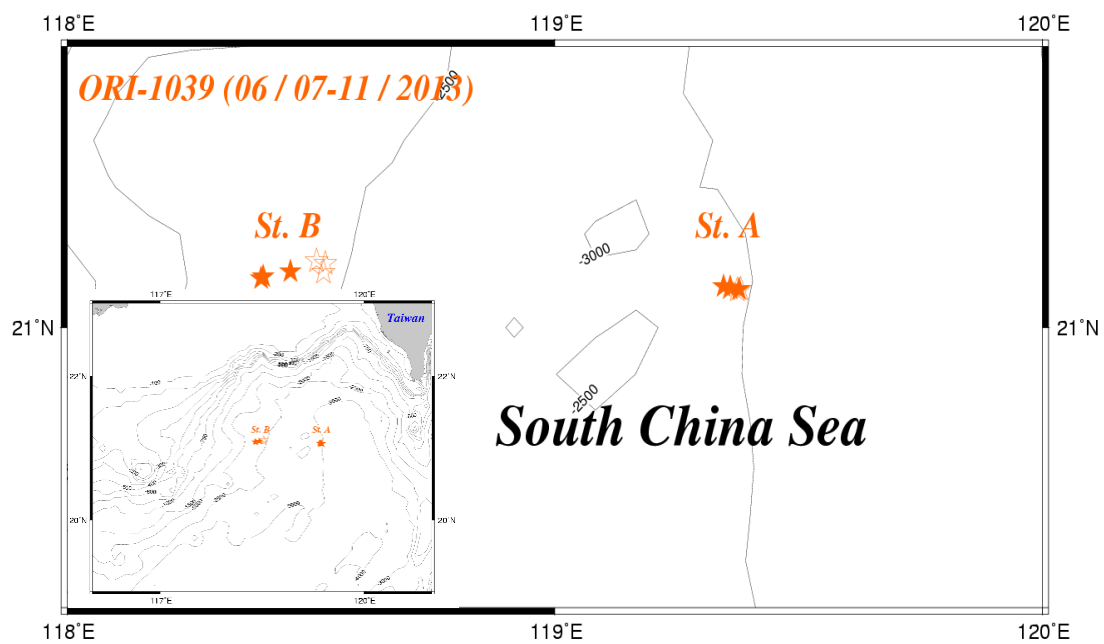


圖 3- 1、ORI-1039 航次採樣位置測站點。

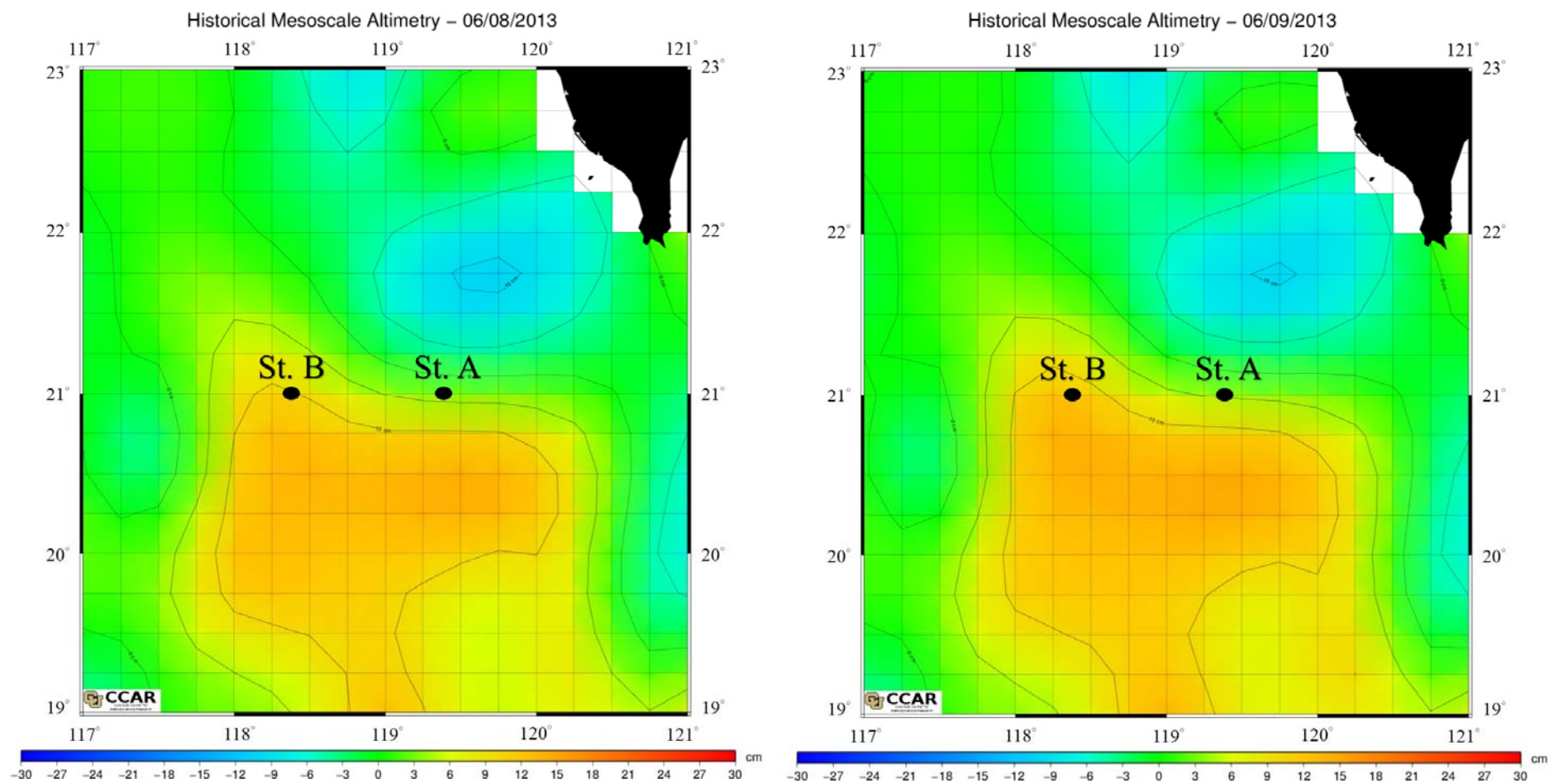


圖 3-2、ORI-1039 航次採樣期間(06/08/2013-06/09/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

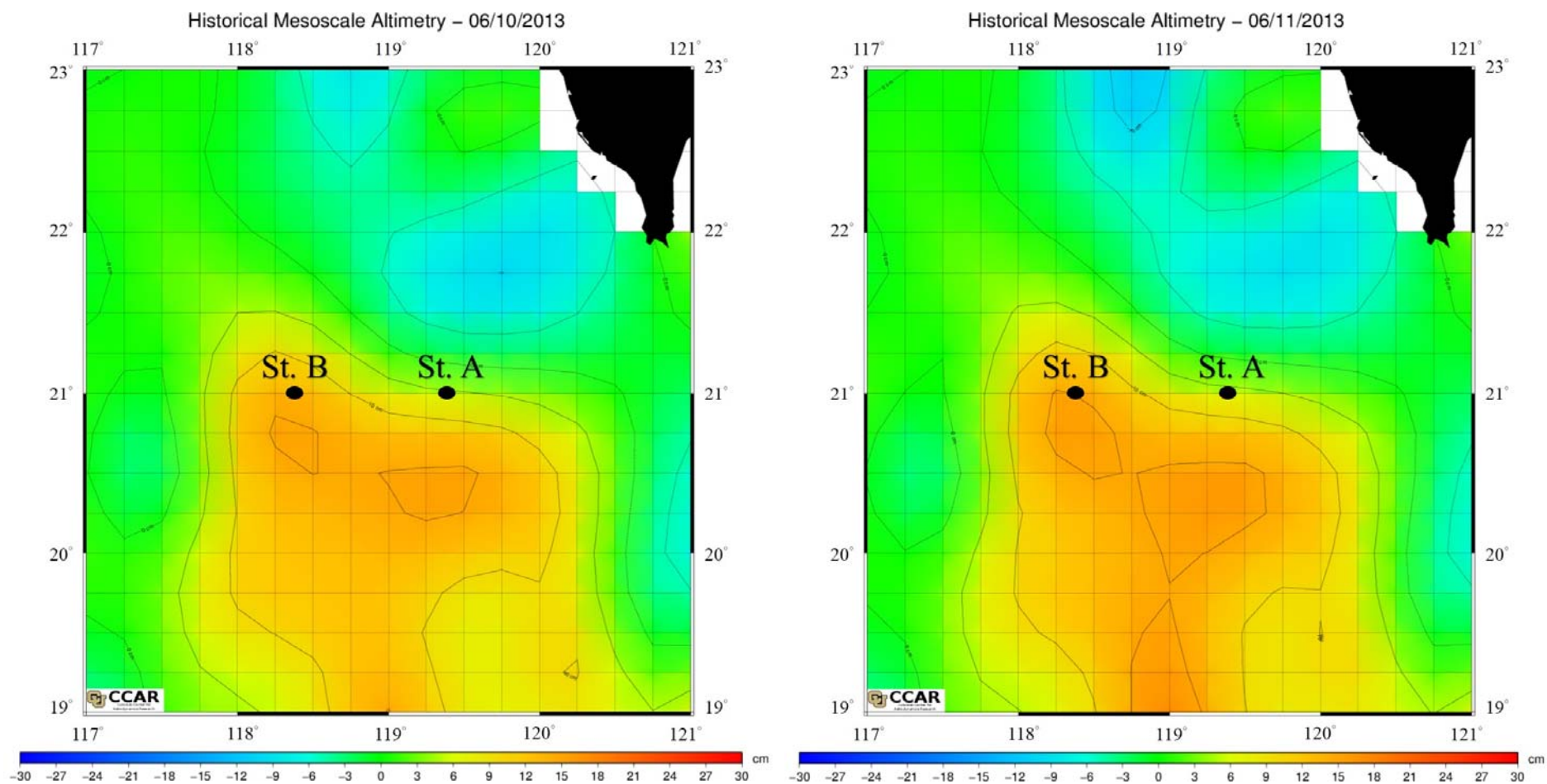


圖 3-3、ORI-1039 航次採樣期間(06/10/2013-06/11/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

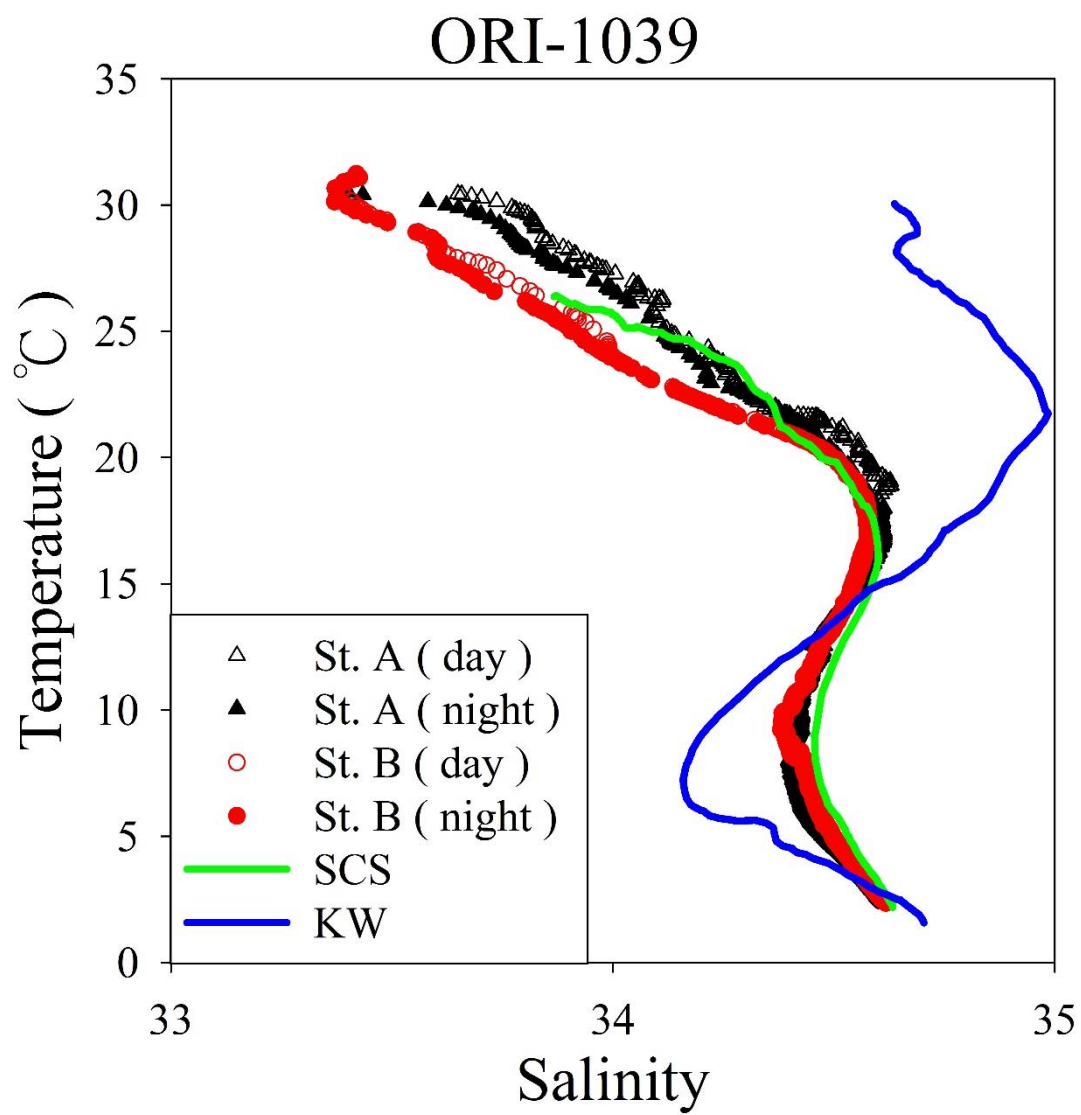


圖 3- 4 、 ORI-1039 航次測站(St. A 與 St. B)之日夜溫鹽圖。

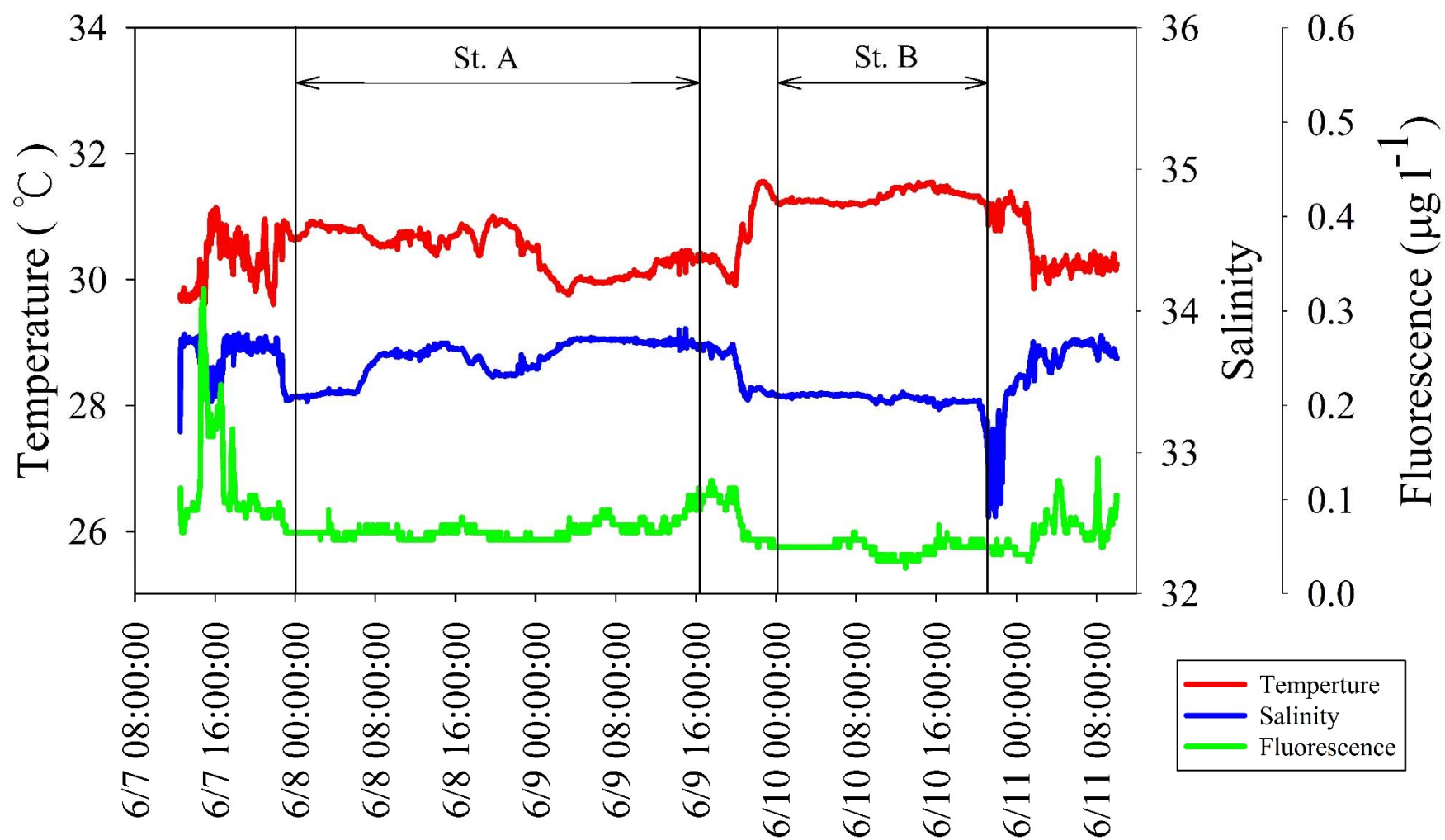


圖 3-5、ORI-1039 航次航行期間(06/07/2013-06/11/2013)表面海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值。

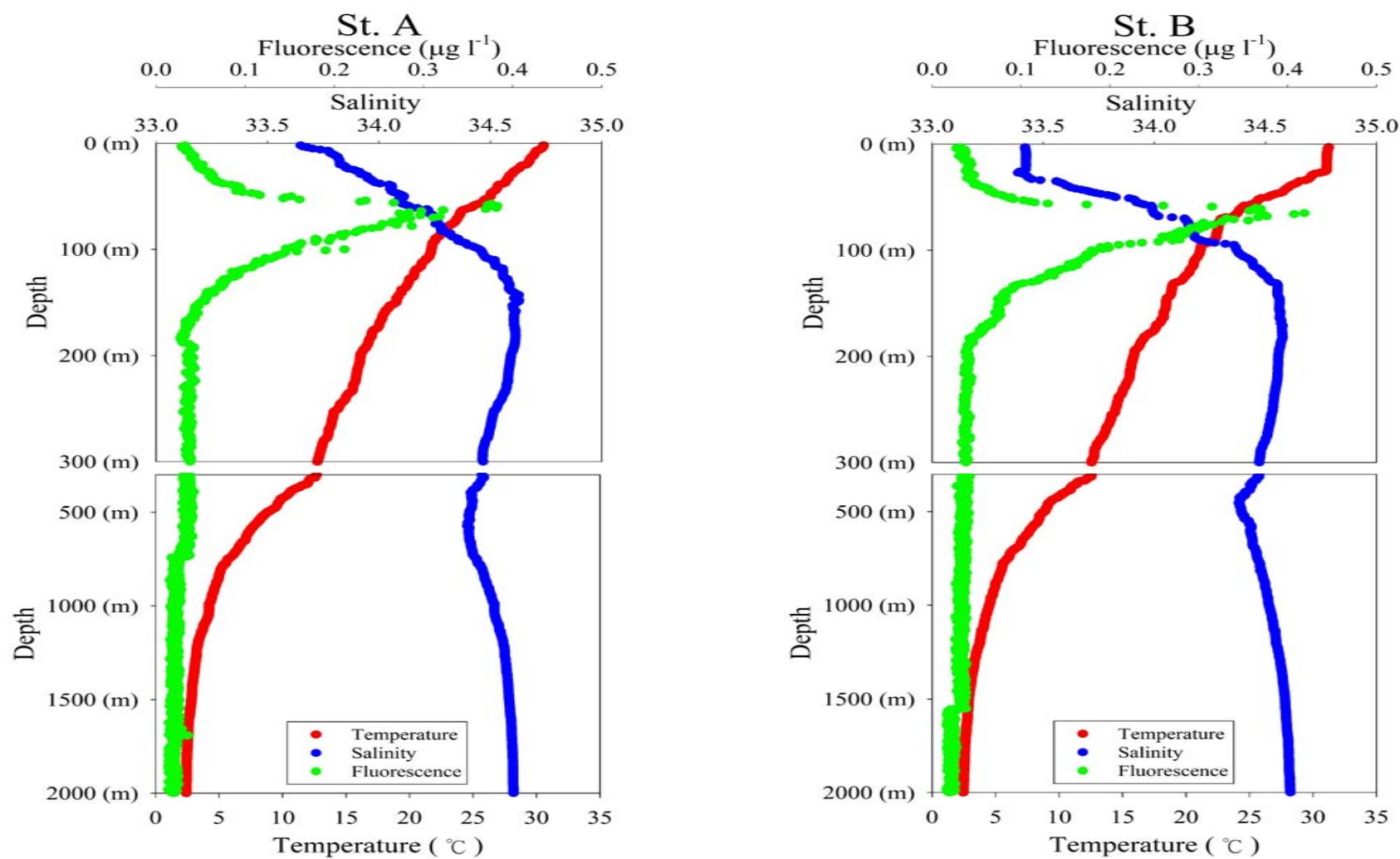


圖 3-6、ORI-1039 航次測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈，左圖為 A 測站，右圖為 B 測站。

3.1.2 ORI-1059 航次水文概況

ORI-1059 航次是在 2013 年 12 月份進行採樣，以季節而言屬於冬季，圖 3-7 為此航次採樣點。此航次主要以海洋特殊事件-反渦流(anticyclonic eddy)為主，測站 C1 由北往南至測站 C5，主要是下放 CTD 並現場看水文資料尋找渦流。測站 8A (118°45.08' E, 21°00' N)為反渦流特殊事件影響之下採樣測站點，水深為 2600m，也是浮游動物日夜拖網測站點。測站 B4 為反渦流特殊事件外的參考點，但因作業問題，在此航次之 B4 測站(118°00' E, 20°00' N)採樣失敗，因而少了反渦流特殊事件內與外比較。從網站(CCAR)取得海水表面高度衛星資料(圖 3-8 到圖 3-10)顯示在測站 St. 8A 採樣期間(12/05/2013, 10:00 ~ 12/07/2013, 2:00 左右)，海平面高度明顯較高，為存在一反渦流(暖渦)，測站 St. B4 採樣期間(12/08/2013, 2:00 ~ 12/09/2013, 2:00 左右)，海平面高度無明顯高低值，因此定義為無受反渦流特殊事件的參考點。由溫鹽圖顯示(圖 3-11)，採樣期間兩測站 St. 8A 及 St. B4 上層水有黑潮水訊號，表層水以深回到典型南海水團；原因乃根據王胄、陳慶生(1987)研究指出，在東北風作用下，南海北部海域之風驅流由於受到陸棚的限制，會發生水流輻合現象。此外，黑潮海域之表層暖水將不斷湧入南海而逐漸取代原地之南海表層水，由於水流輻合作用，這些湧入南海的太平洋暖水將在南海北部發展出順時鐘向的高壓型暖心渦。進一步分析此行次航行期間表面海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值(SCTD) (圖 3-12)，可以發現 St. C5 進入測站 St. 8A(反渦流內)海表溫逐漸上升，停留於此測站的採樣期間，溫度穩定於約 26.0°C、鹽度 34.0 與葉綠素螢光值為 0.4-0.8 $\mu\text{g l}^{-1}$ ，離開反渦流時，溫度略為下降而鹽度反之；而航行至 St. B4 (反渦流外參考點)前，表水溫度、鹽度與葉綠素螢光值顯現出不穩定狀態，推估可能是通過暖渦邊緣而造成，停留於 St. B4 測站的採樣期間，表水溫度逐漸上升、鹽度逐漸下降與葉綠素螢光值忽然高值，造成現象的原因不明。另外，經由此航次南北測線(St. C1 - St. C5, 圖 3-13 與圖 3-14)剖面圖可發現，溫度與鹽度在測站 St. C4 混合層深化明顯，推估可能受到反渦流事件影響，因此由測站 St. C4 向西邊做一條測線。東西測線(St.

S5 - St. C4, 圖 3-15 與圖 3-16)剖面圖與反渦流事件內(St. 8A)與外(St. B4)之 CTD 所得資料(溫度、鹽度及葉綠素螢光值)對深度的垂直分佈(圖 3-17); 明顯看出, 在測站 St. 8A 因受到反渦流事件影響之下, 混合層厚度約 160m, 混合層間海水溫度均為 25.8°C、鹽度為 34.0 與葉綠素螢光值為 0.2 $\mu\text{g l}^{-1}$, 水體混合相當均勻; 鹽度約 470 公尺附近有極小值, 約 34.4 之後隨深度增加而略微遞增。測站 St. B4 則無受到反渦流影響, 混合層厚度約 70m, 表水水溫 25.3°C 至 1000 公尺之間溫度梯度最大, 1000-1500 公尺溫度隨深度遞增而緩慢遞減趨於一致, 約至 2.7°C; 表水鹽度 33.9 至 85 公尺隨深度增加而鹽度遞增, 85 公尺附近有個極大值, 鹽度達 34.7, 鹽度極小值出現在 450 公尺附近, 為 34.4, 500-1500 公尺鹽度隨深度增加而略微遞增, 此水體為典型南海中層水訊號。綜合以上所述, 測站 St. 8A 上層水有黑潮水團訊號, 而以深水體又回到南海水, 而 St. B4 也有黑潮水訊號, 而表水溫鹽儀也看出有高溫高鹽, 此原因與暖渦生成原因有關, 另外, 受反渦流影響下, 混合層厚度於反渦流事件之測站(160m)明顯深化於事件外的測站(70m)。因此, 此航次為北南海冬季之反渦流。

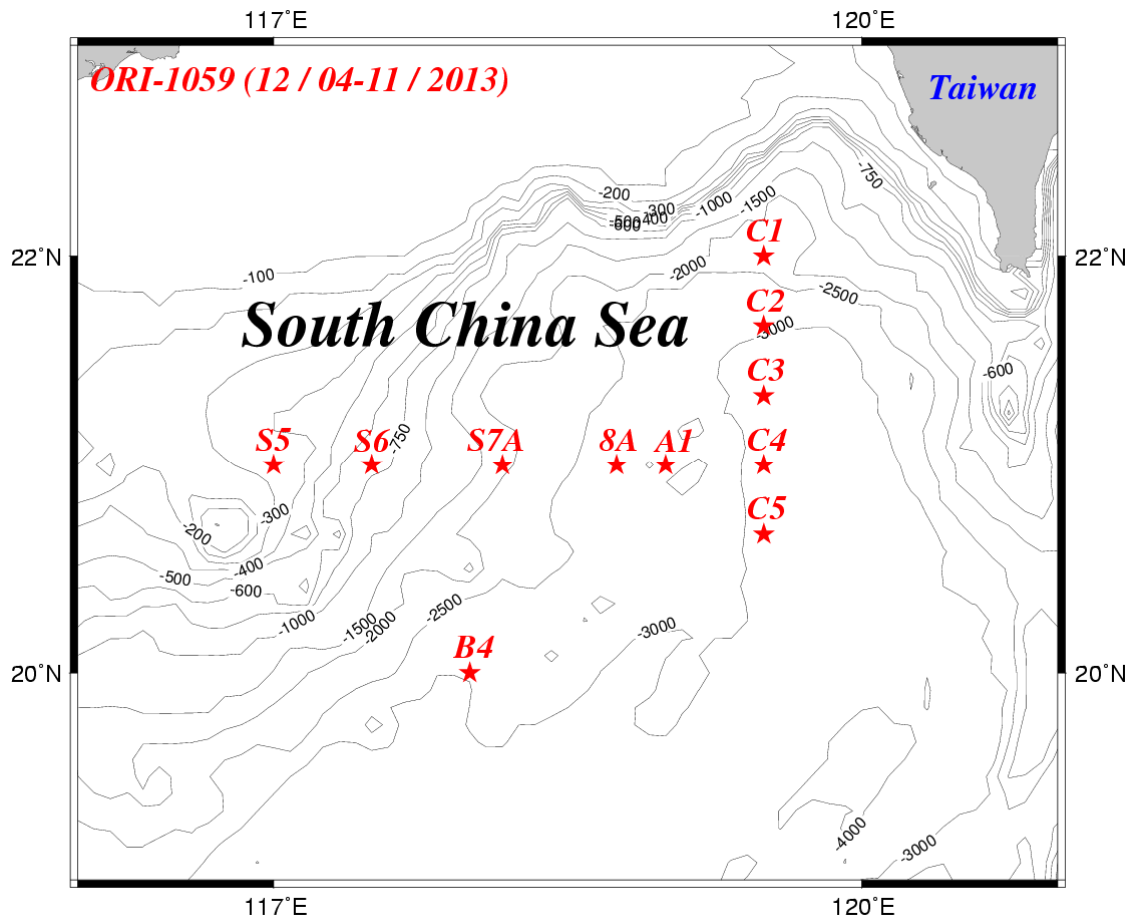


圖 3- 7、ORI-1059 航次採樣位置測站點。

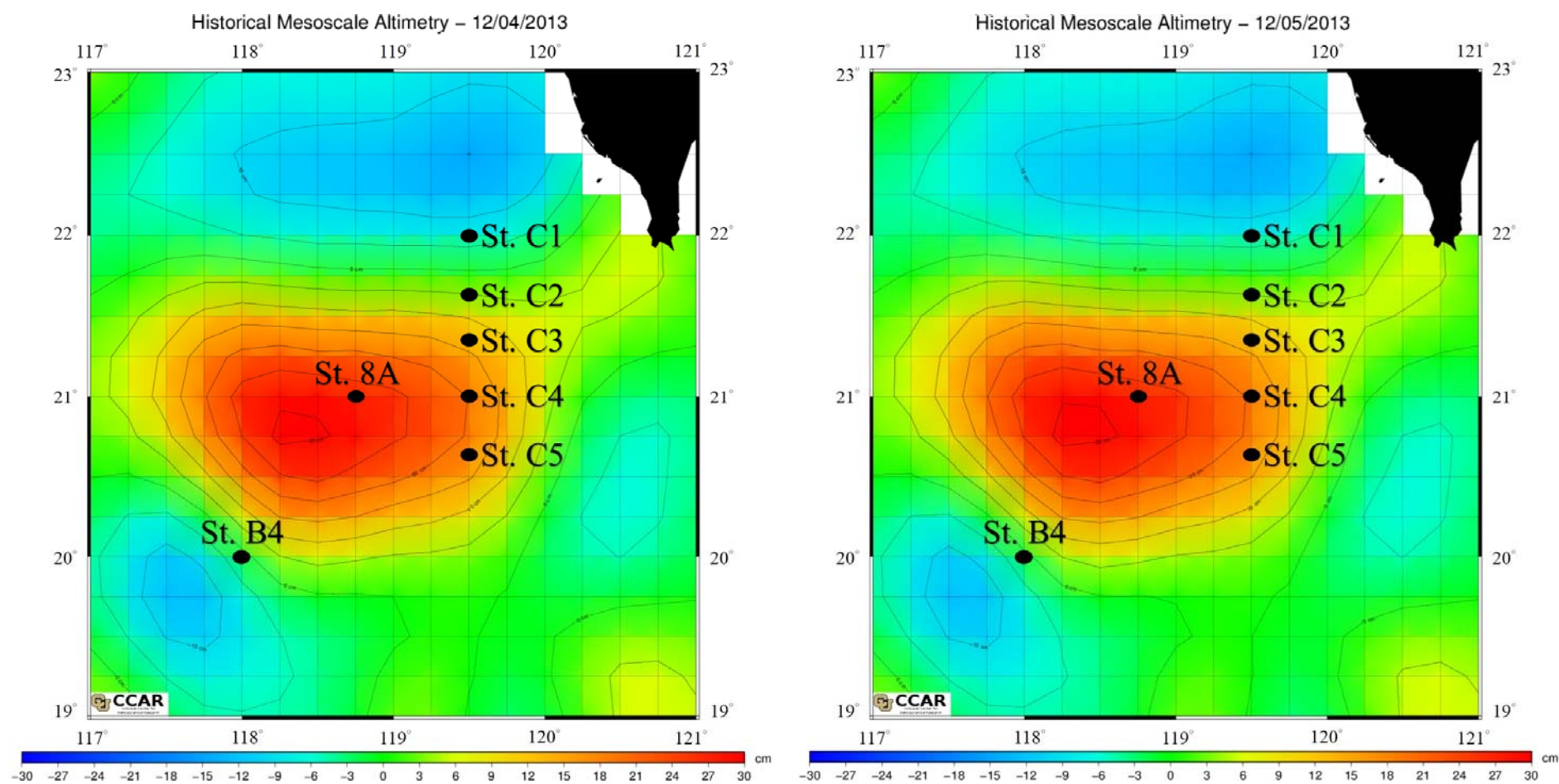


圖 3- 8、ORI-1059 航次採樣期間(12/04/2013-12/05/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

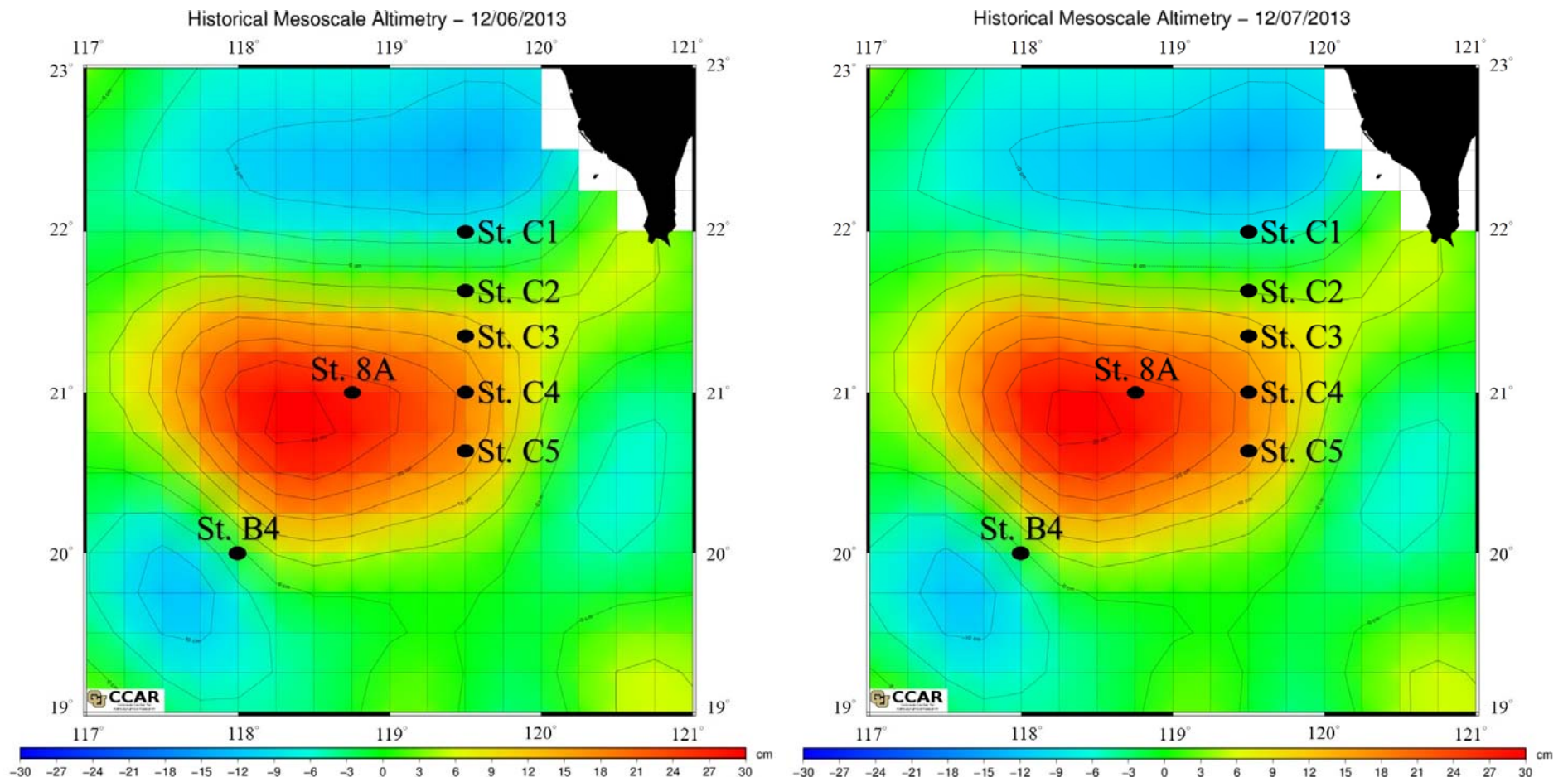


圖 3- 9、ORI-1059 航次採樣期間(12/06/2013-12/07/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

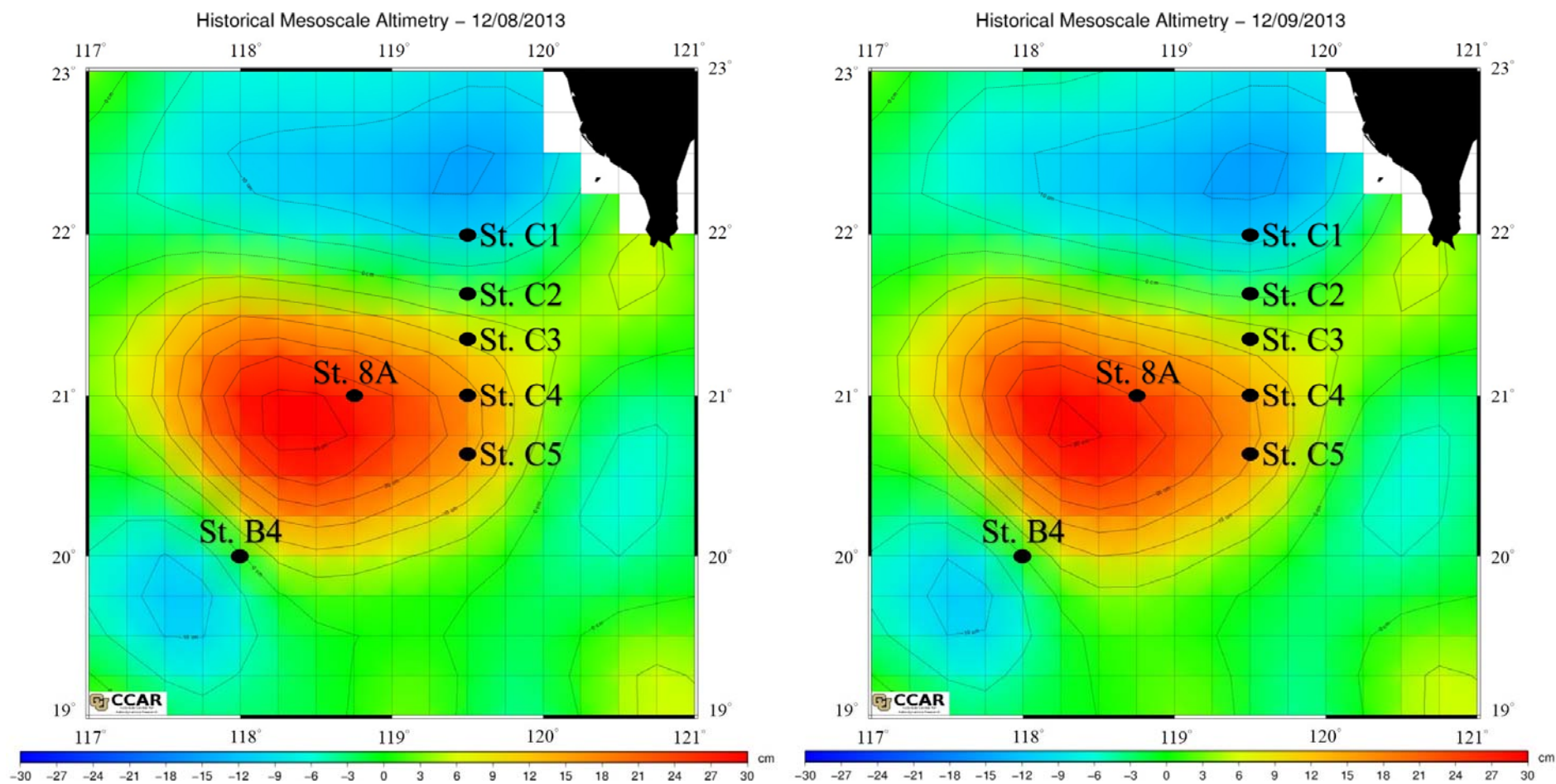


圖 3- 10、ORI-1059 航次採樣期間(12/08/2013-12/09/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

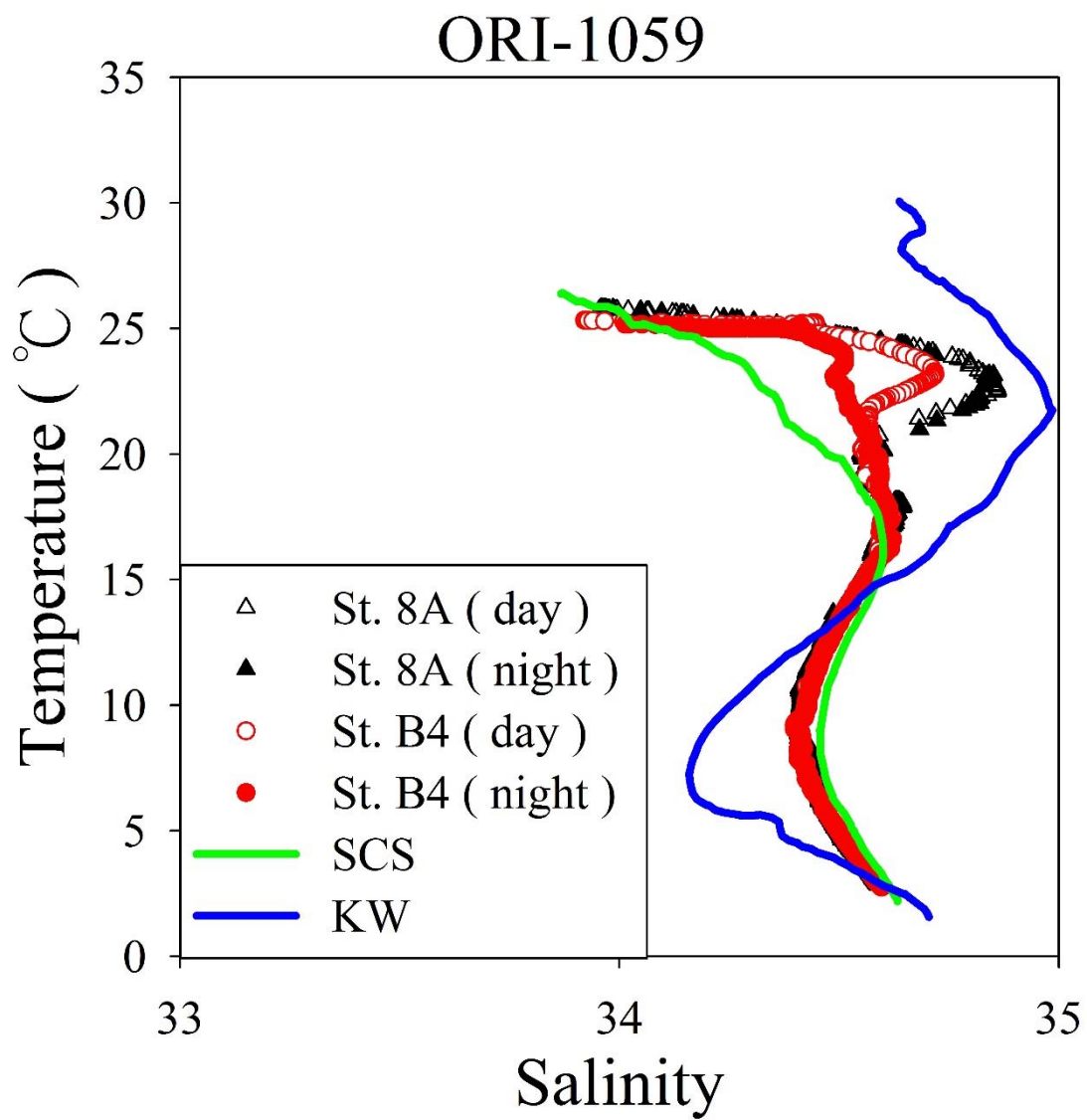


圖 3- 11 、ORI-1059 航次測站(St. 8A 與 St. B4)之日夜溫鹽圖。

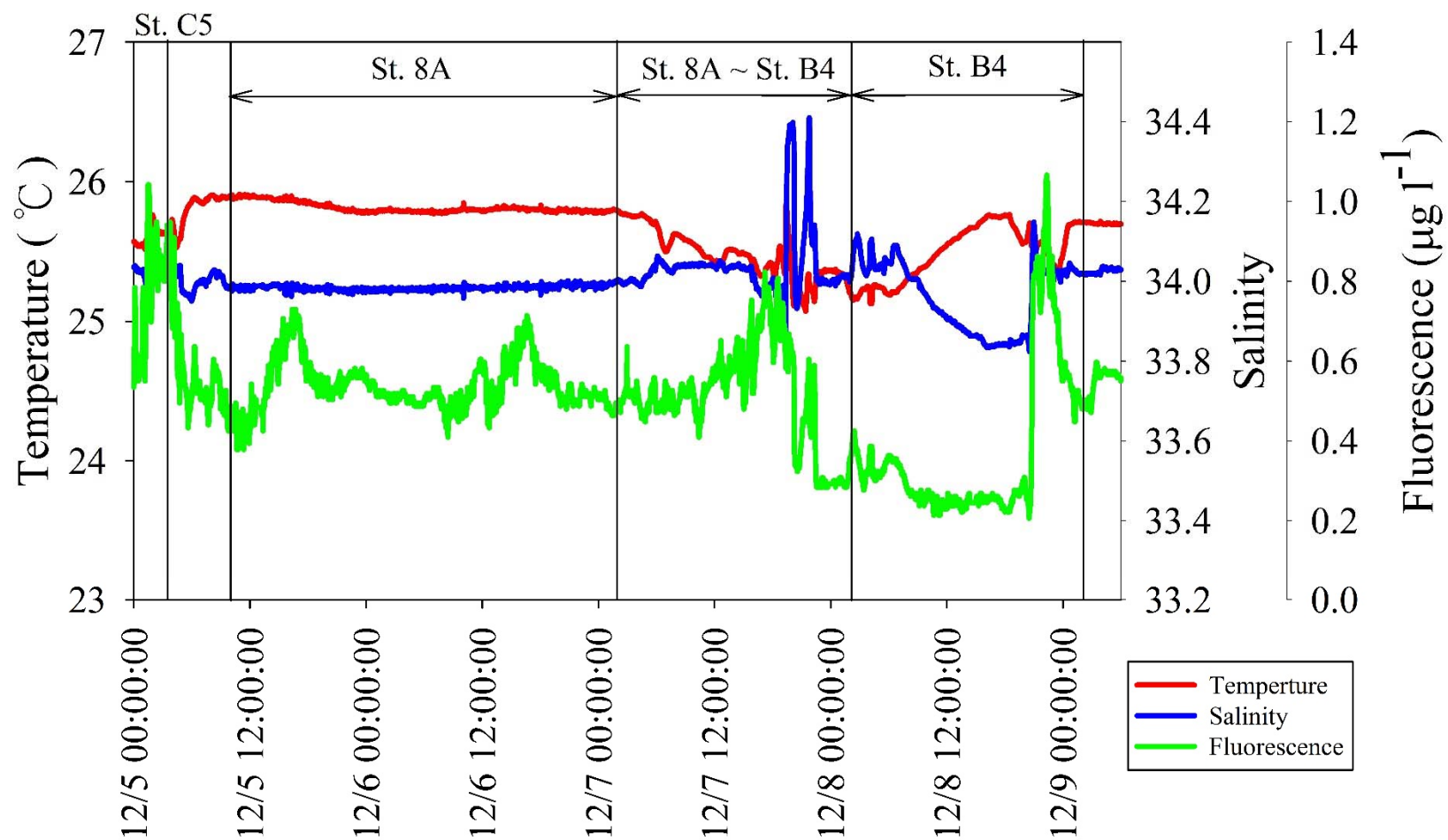


圖 3- 12、ORI-1059 航次航行期間(12/05/2013-12/09/2013)測站 St. C5 至 St. 8A 至 St. B4 表面海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值。

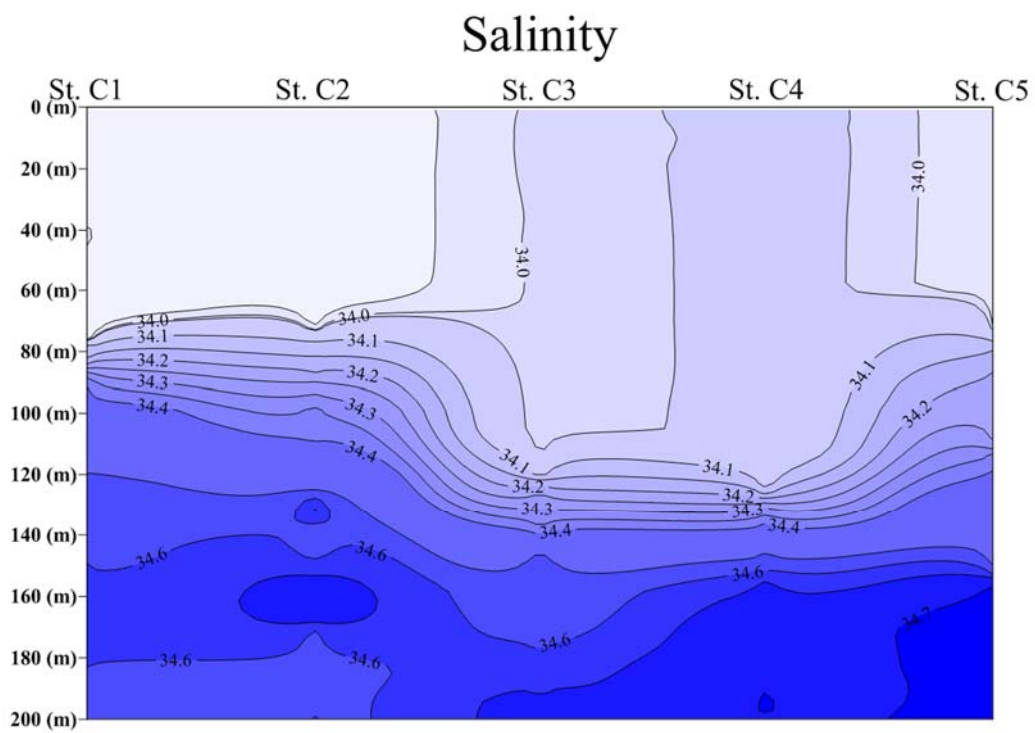
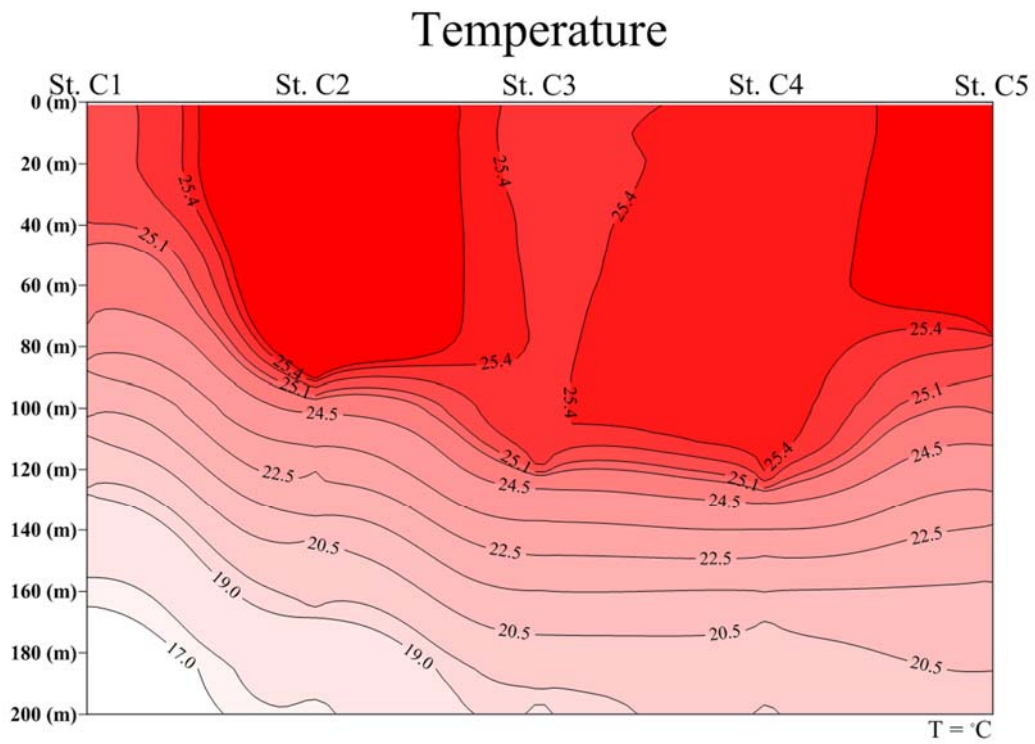


圖 3- 13、ORI-1059 航次南北測線(St. C1 - St. C5) 0-200m 之溫度與鹽度剖面圖。

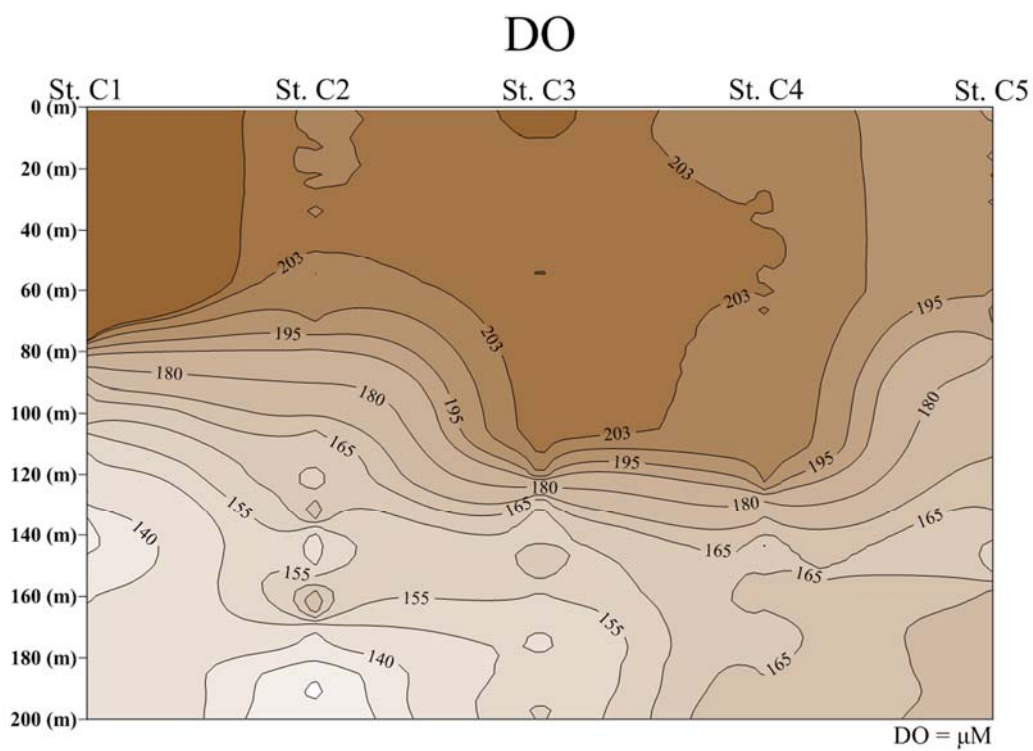
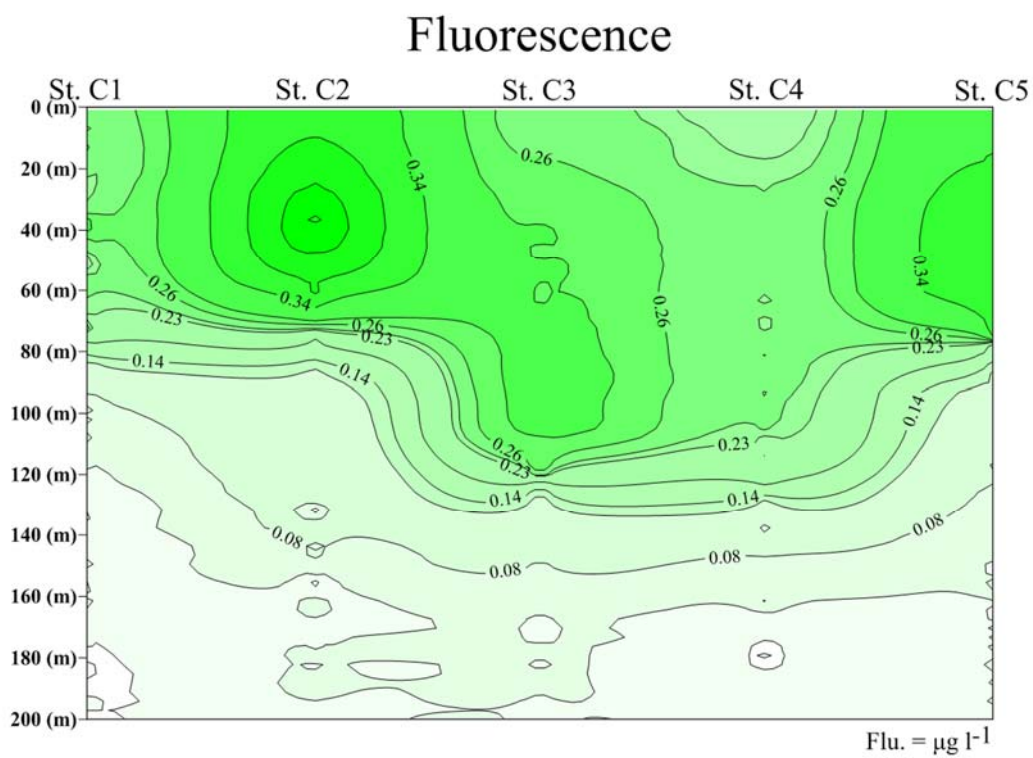


圖 3- 14、ORI-1059 航次南北測線(St. C1 - St. C5) 0-200m 之葉綠素螢光值與溶氧剖面圖。

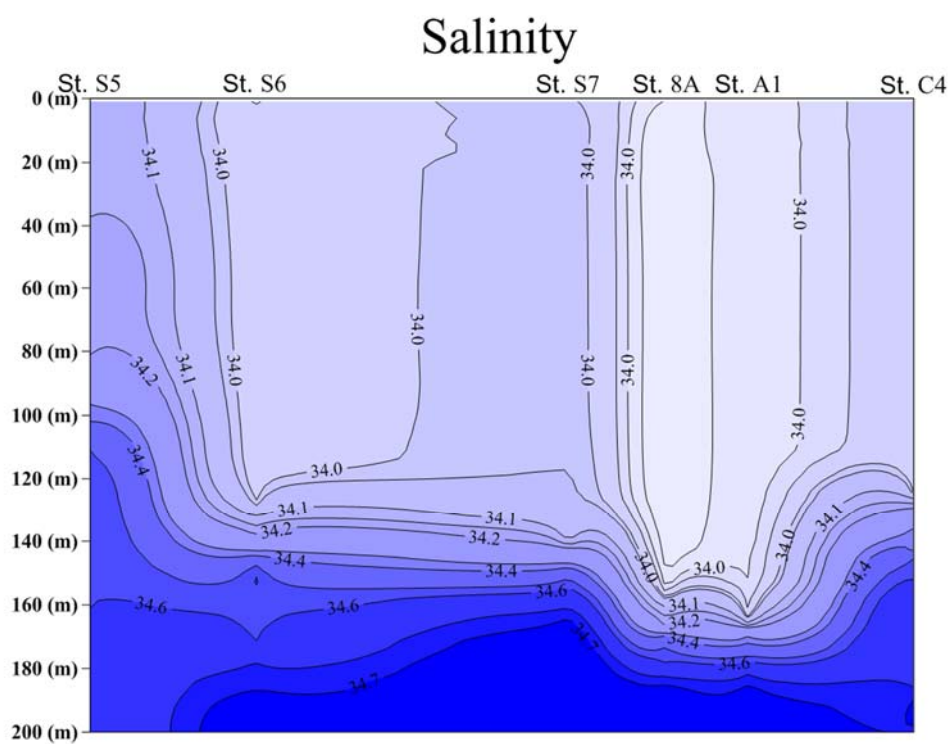
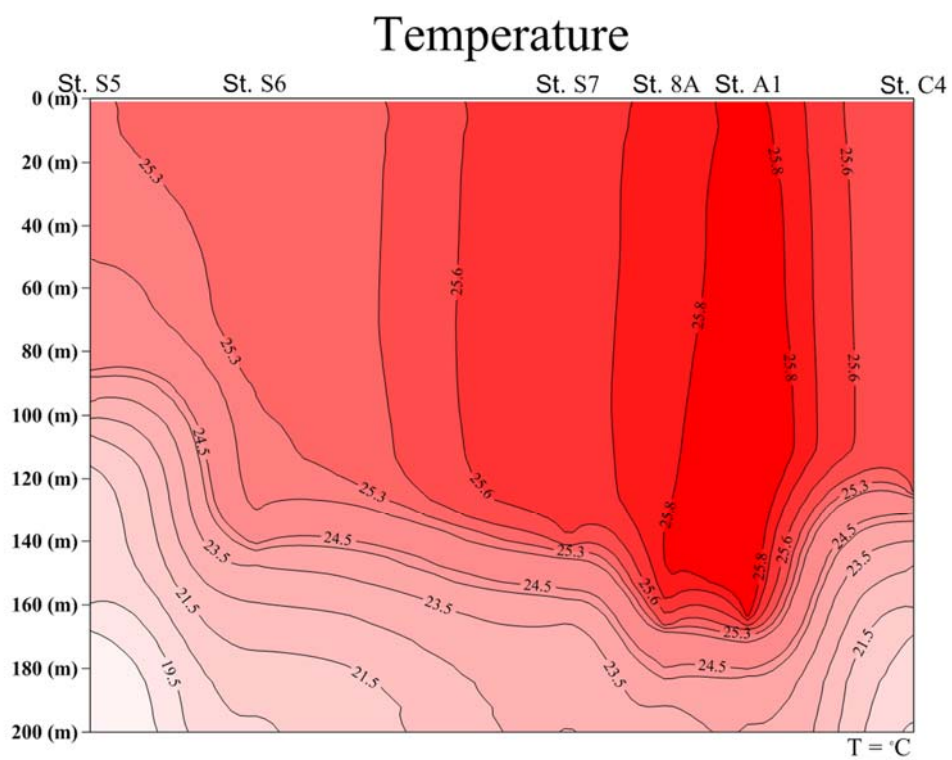


圖 3- 15、ORI-1059 航次東西測線(St. S5 - St. C4) 0-200m 之溫度與鹽度剖面圖。

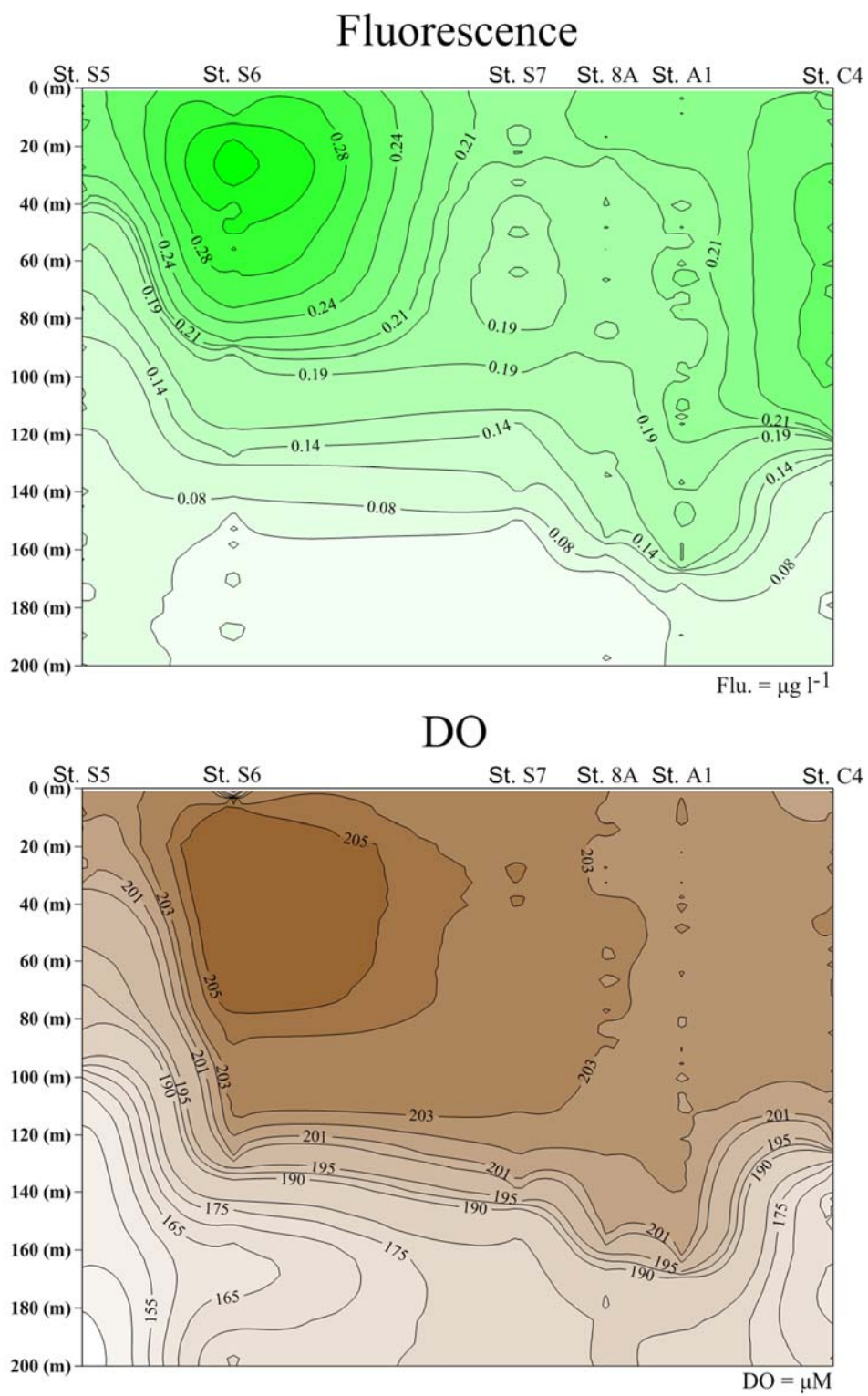


圖 3-16、ORI-1059 航次東西測線(St. S5 - St. C4) 0-200m 之葉綠素螢光值與溶氧剖面圖。

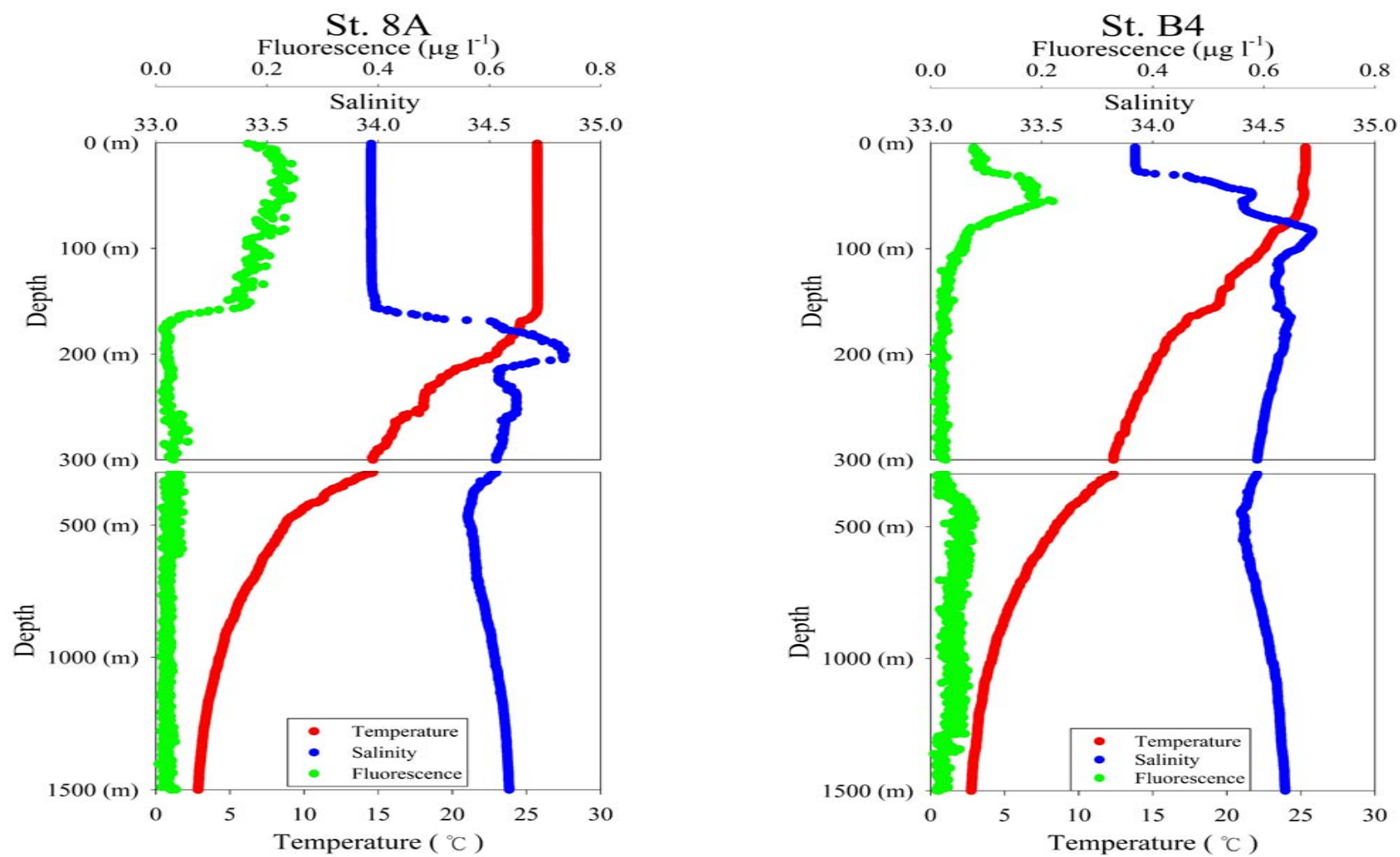


圖 3-17、ORI-1059 航次測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈，8A 測站(左圖)，B4 測站(右圖)。

3.1.3 ORI-1074 航次水文概況

ORI-1074 航次是在 2014 年 5 月份進行採樣，以季節而言屬於春末夏初。圖 3-18 為此航次採樣點，浮游動物拖網位置於北南海 St. A ($117^{\circ}02.33' E$, $20^{\circ}07.22' N$) 與 St. B ($118^{\circ}29.71' E$, $21^{\circ}04.96' N$)，深度分別為 2400m 與 2500m。從網站(CCAR) 取得海水表面高度衛星資料(圖 3-19 與圖 3-20)，在測站 St. A 採樣期間(05/18/2014, 10:00 ~ 05/19/2014, 09:40 左右) 與 St. B 採樣期間(05/19/2014, 16:35 ~ 05/20/2014, 17:40 左右) 海平面高度無明顯變化，此航次無受到海洋內部特殊事件影響，為常態夏季。溫鹽圖顯示(圖 3-21)，採樣期間兩測站 St. A 及 St. B 皆為南海水團訊號；由 SCTD 顯示(圖 3-22)，測站 St. A 與 St. B 海表溫度、鹽度與葉綠素螢光值差異不大，各參數分別介於 $28-30^{\circ}C$ 、 $33.8-34.0$ 與 $0.05-0.20 \mu g l^{-1}$ ；由 CTD 所得資料(溫度、鹽度及葉綠素螢光值)對深度的垂直分佈(圖 3-23)，測站 St. A 表水至 140 公尺隨深度增加而鹽度遞增，140 公尺附近有個極大值，鹽度達 34.7，鹽度極小值出現在 500 公尺附近，為 34.4，500-2000 公尺鹽度隨深度增加而微微遞增；而表水水溫 $29.0^{\circ}C$ 至 1000 公尺之間溫度梯度最大，1000-2000 公尺溫度隨深度遞增而緩慢遞減趨於一致，約達 $2.4^{\circ}C$ 。測站 St. B 表水至 100 公尺隨深度增加而鹽度遞增，100 公尺附近有個極大值，鹽度達 34.7，鹽度極小值出現在 450 公尺附近，為 34.4，500-2000 公尺鹽度隨深度增加而微微遞增；而表水水溫 $29.1^{\circ}C$ 至 1000 公尺之間溫度梯度最大，1000-1500 公尺溫度隨深度遞增而緩慢遞減趨於一致，約 $2.7^{\circ}C$ ；St. A 與 St. B 混合層厚度分別約為 15 公尺與 23 公尺，厚度差異不大。綜合以上資料來看，ORI-1074 之兩測站皆為南海水團，且並無受到海洋特殊事件影響，此航次為北南海之常態夏季。

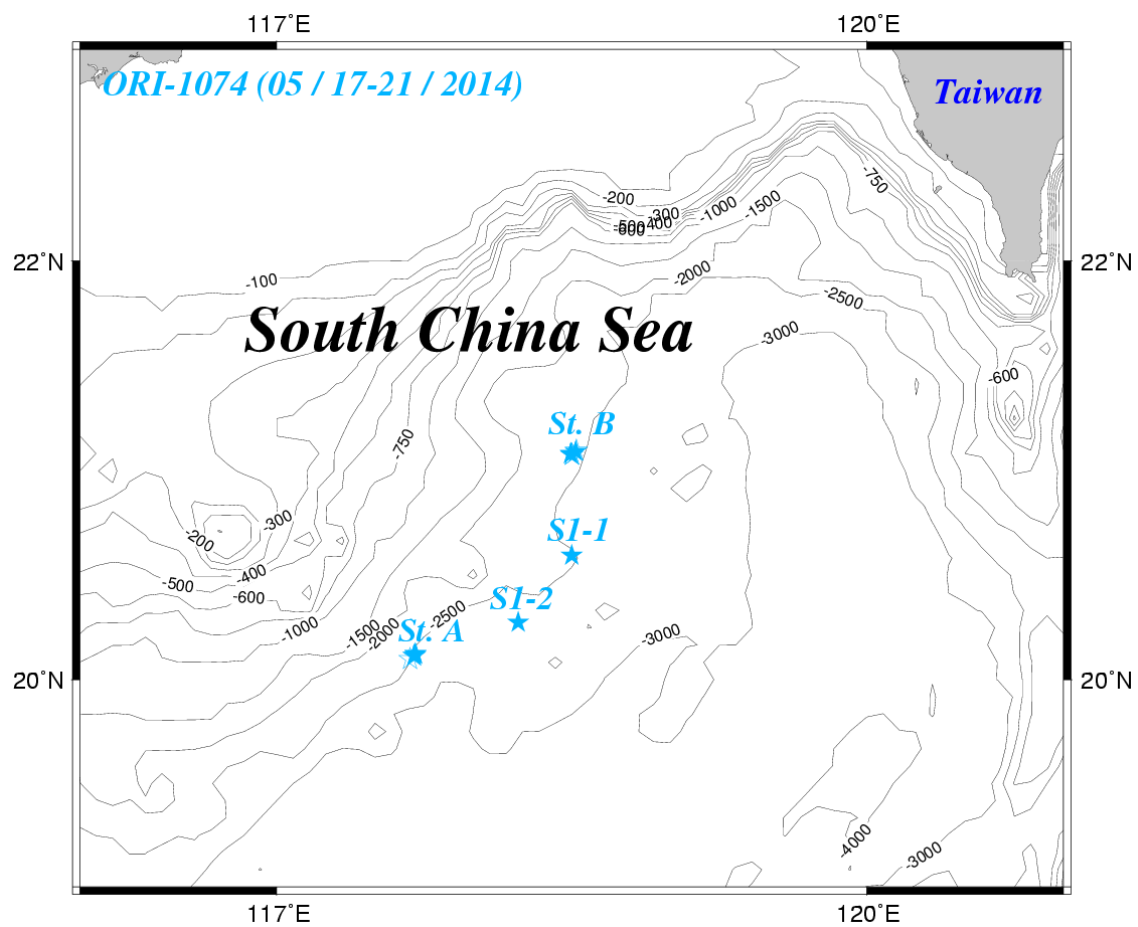


圖 3- 18、ORI-1074 航次採樣位置測站點。

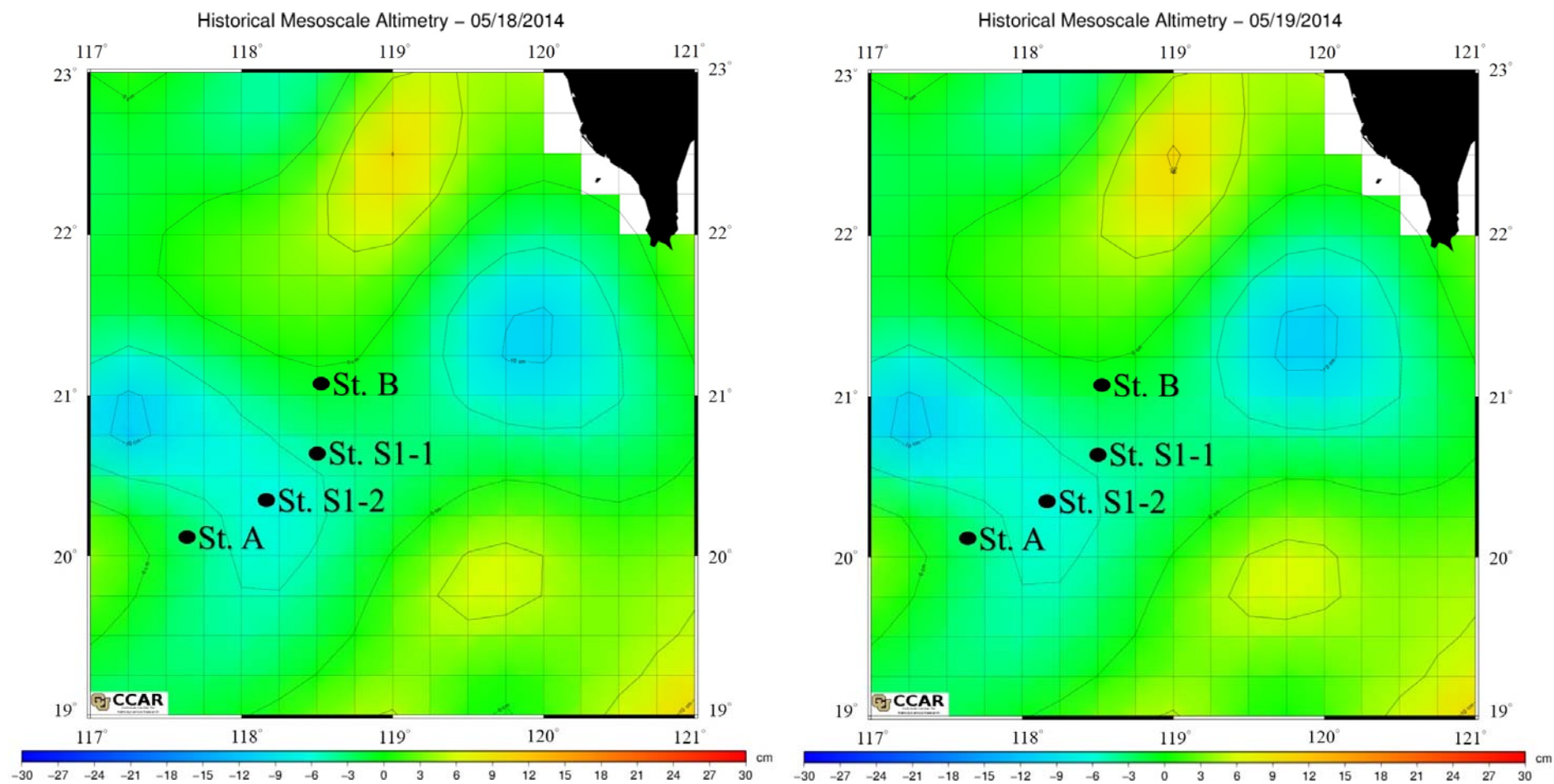


圖 3- 19、ORI-1074 航次採樣期間(05/18/2014-05/19/2014)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

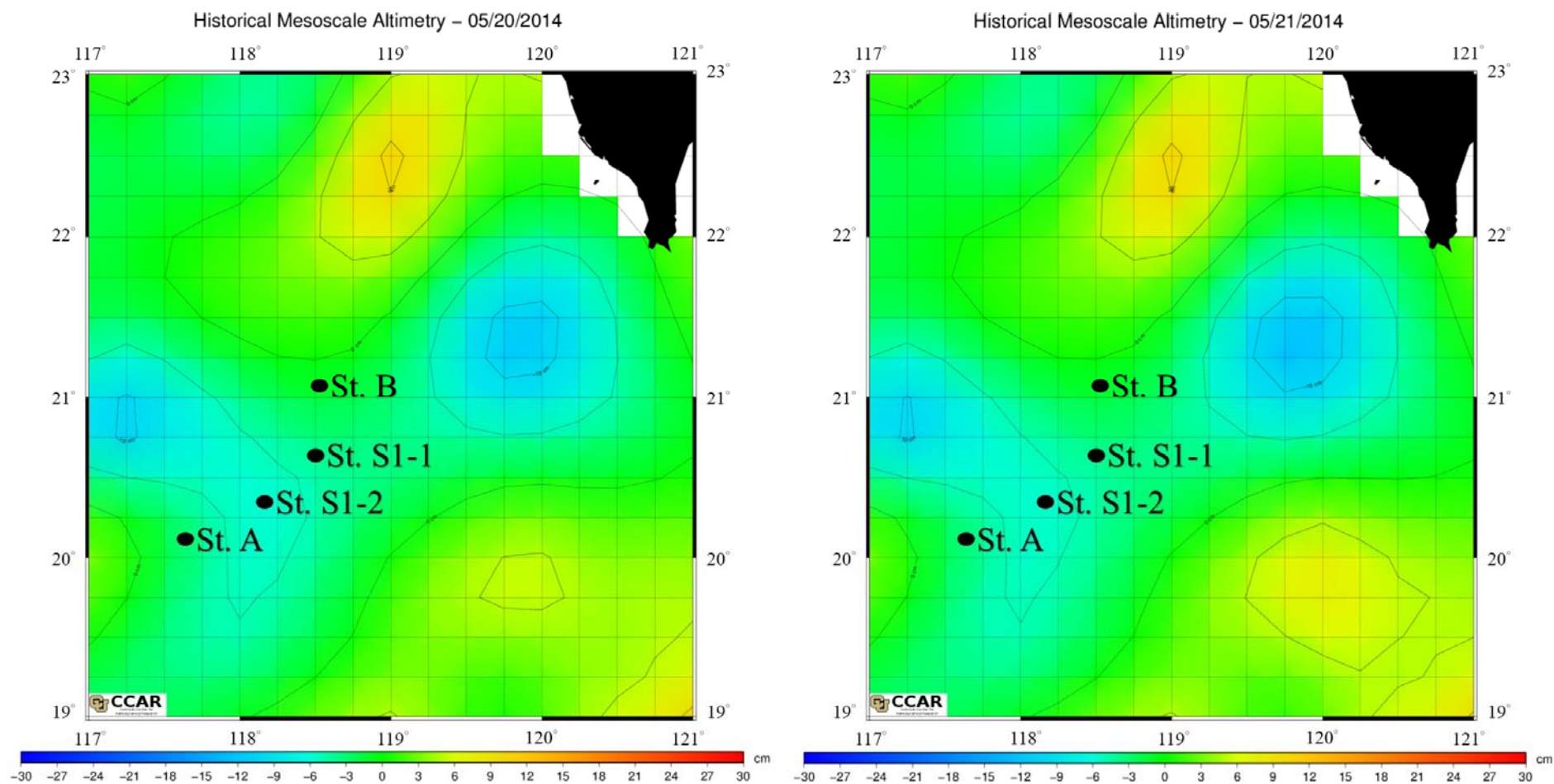


圖 3- 20、ORI-1074 航次採樣期間(05/20/2014-05/21/2014)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

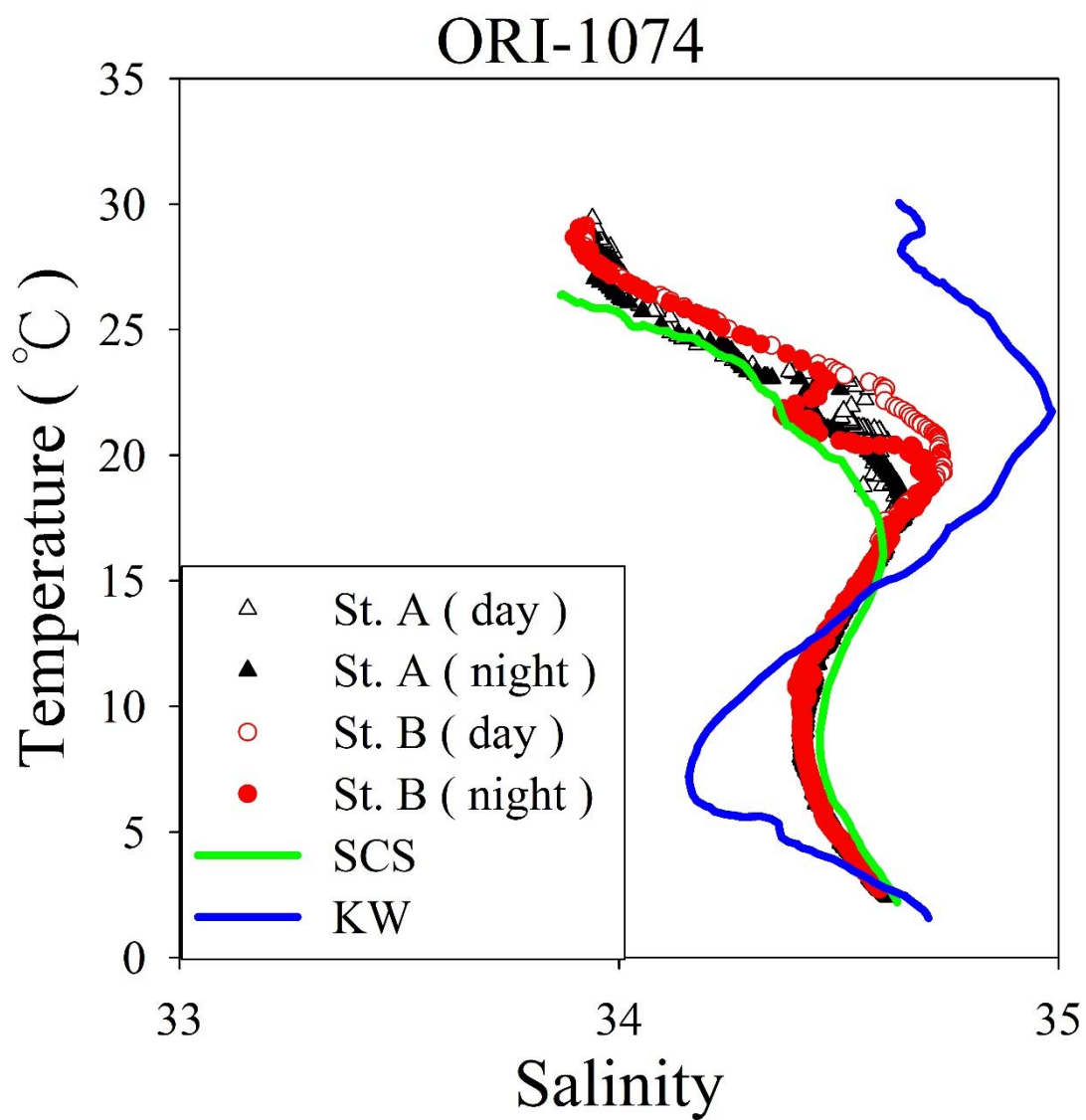


圖 3- 21、ORI-1074 航次測站(St. A 與 St. B)之日夜溫鹽圖。

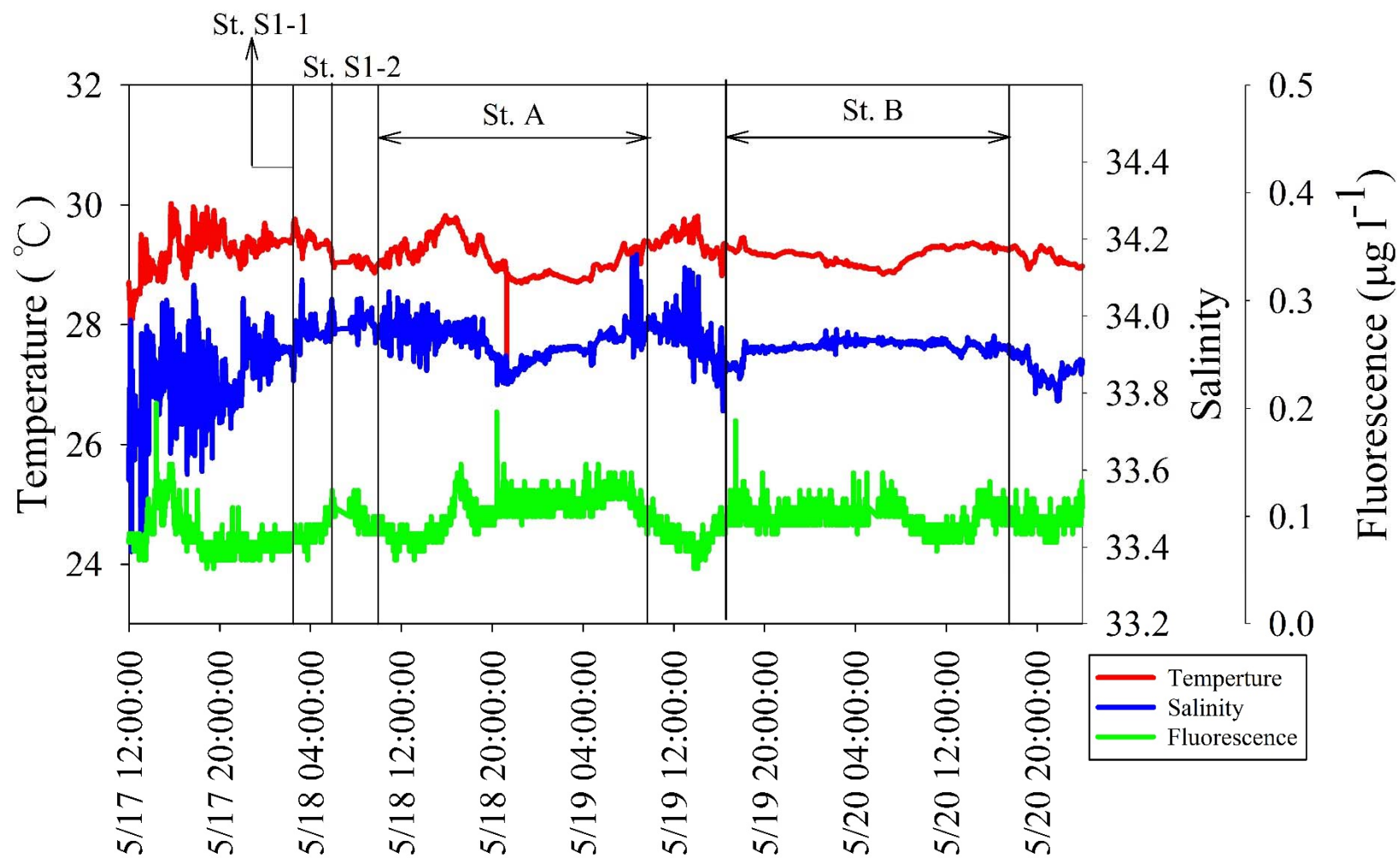


圖 3-22、ORI-1074 航次航行期間(05/18/2014-05/20/2014)測站 St. A 與 St. B 表面海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值。

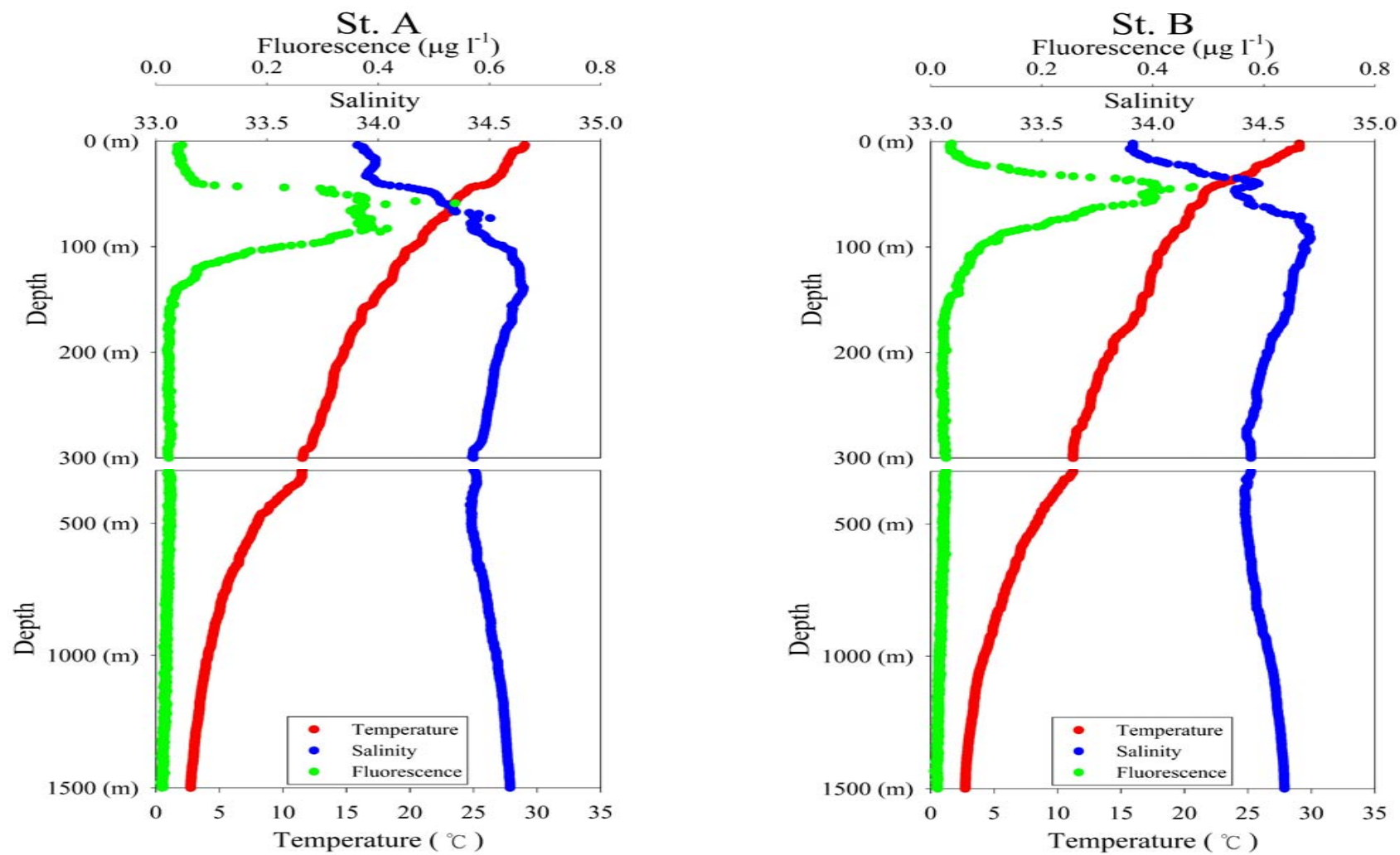


圖 3-23、ORI-1074 航次測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈，St. A 測站(左圖)，St. B 測站(右圖)。

3.1.4 ORI-1082 航次水文概況

ORI-1082 航次是在 2014 年 7 月份進行採樣，以季節而言屬於夏季。圖 3-24 為此航次採樣點，浮游動物拖網位置於北南海 St. B (118°00.92' E, 21°18.47' N)、St. C (117°14.88' E, 21°00.39' N)與東沙之東部陸棚 St. D (116°57.58' E, 20°45.00' N)，深度分別為約 1800m、400m 與 250m。此航次出發前，已先由 APDRC(Asia-Pacific Data-Research Center)衛星資料取得海表面高(圖 3-25)，由衛星海表面高之結果可看出台灣西南方(120°00.00' E, 22°00.00' N)海表面高度有高值，疑似有反渦流(暖渦)出現；另外在東沙東北方(117°25.00' E, 21°25.00' N)海表面高度有低值，疑似有正渦流(冷渦)出現。上述原因而本航次規劃在暖渦(St. A)取得海水之溫度、密度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈，可與冬季暖渦之特性做比對；另取一參考點(St. B)做為冷暖渦外海水背景；及冷渦(St. C)測站；而測站 St. D 為東沙之東部陸棚受內波影響區域，可了解內波發生使水體垂直混合對主動傳輸之影響。此航次結束後，另以網站(CCAR) 取得海水表面高度衛星資料(圖 3-26 到圖 3-28)，結果與 APDRC 衛星資料完全不同。測站 St. A 採樣期間(07/11/2014, 16:30 左右)、St. B (07/12/2014, 06:00 ~ 9:20 左右) 與 St. C (07/12/2014, 18:00 ~ 07/14/2014, 02:20 左右)海平面高度無明顯變化。由溫鹽圖(圖 3-29)、SCTD(3-30)與 CTD 所得資料(溫度、鹽度及葉綠素螢光值)對深度的垂直分佈(圖 3-31)顯示，採樣期間三測站(St. B、St. C 與 St. D) 皆為南海水團訊號，無受到其他水團干擾與沖淡水影響；SCTD 顯示，測站 St. A 與 St. B 海表溫度、鹽度與葉綠素螢光值無太明顯差異，St. C 呈現較穩定狀態，海表溫約為 30°C、鹽度 33.8 與葉綠素 0.08 $\mu\text{g l}^{-1}$ ，St. D 極為不穩定，推估造成此原因為內波所引起；CTD 之垂直分佈結果為表水鹽度介於 33.6-33.9 至 100-140 公尺隨深度增加而鹽度遞增，100-140 公尺附近有個極大值，鹽度約達 34.6，鹽度極小值出現在 430 公尺附近，約為 34.4；而表水水溫介於 30.05-30.13°C，至底間溫度梯度最大，因底深之深度不同，而溫度變化有所差異；St. B 與 St. C 混合層厚度分別約為 26 公尺與 20 公尺。綜合以上資料來看，ORI-1082 之測站皆為南海水團，而除

東沙東部陸棚測站(St. D)外，測站 St. B 與 St. C 且並無受到海洋特殊事件影響，為北南海常態夏季。東沙之東部陸棚測站(St. D)由 ORIII-1773 航次再介紹。

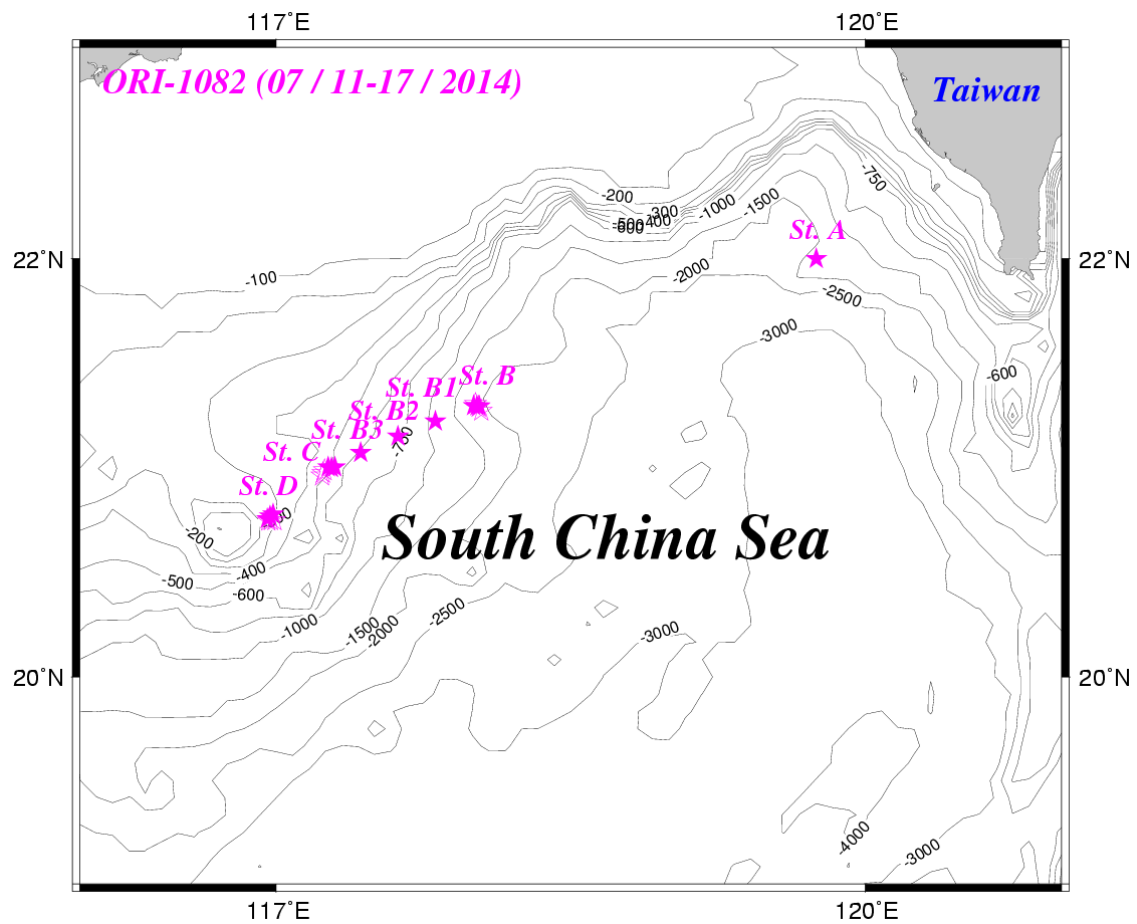


圖 3- 24、ORI-1082 航次採樣位置測站點。

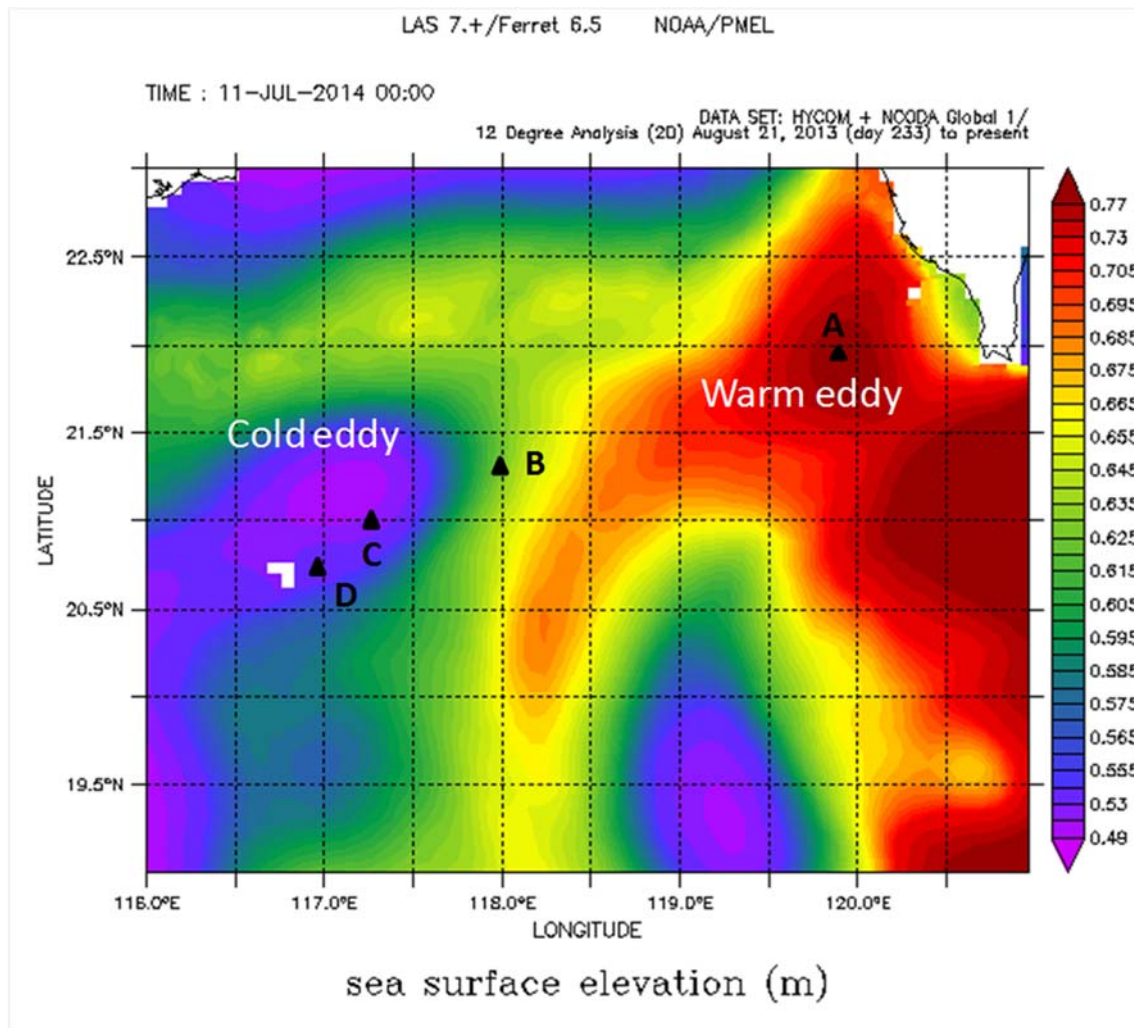


圖 3- 25、ORI-1082 航次出發前由 APDRC(Asia-Pacific Data-Research Center)衛星
資料取得海平表高與測站點規劃。

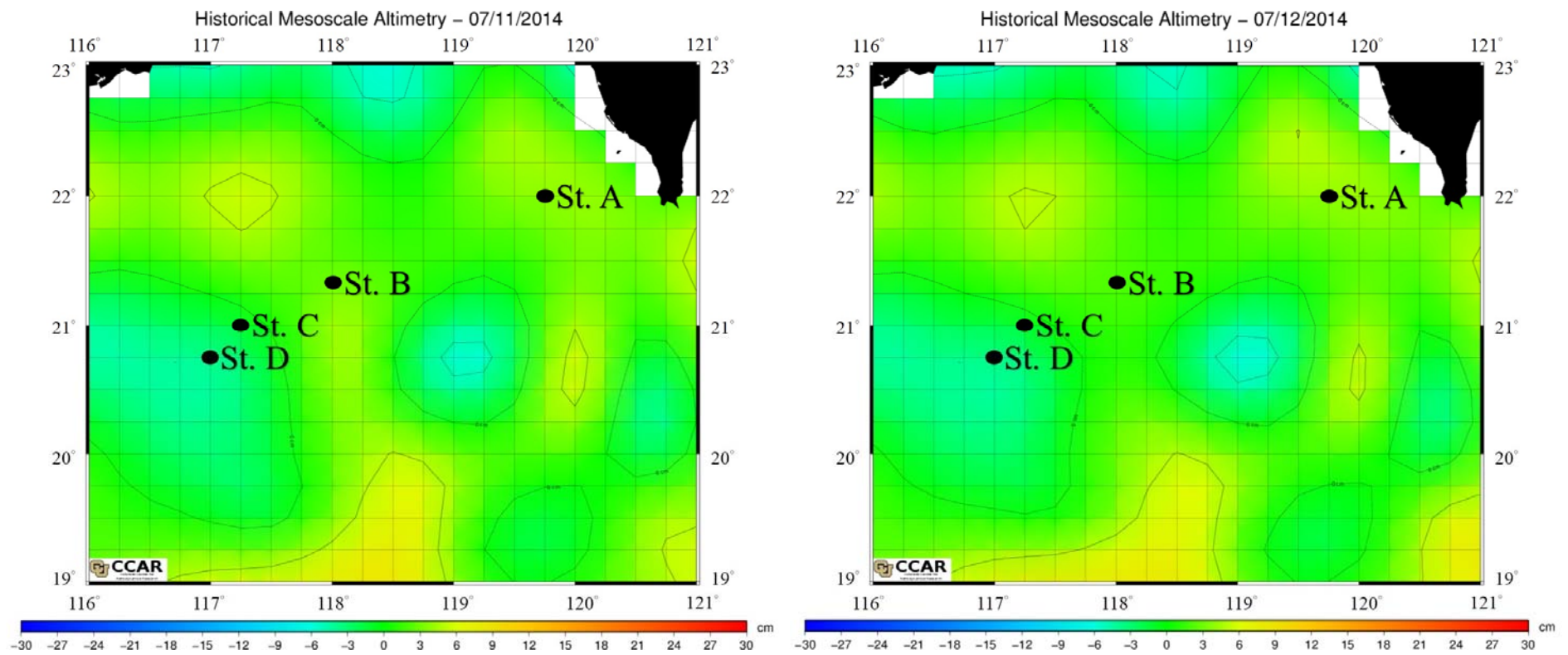


圖 3- 26、ORI-1082 航次採樣期間(07/11/2014-07/12/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

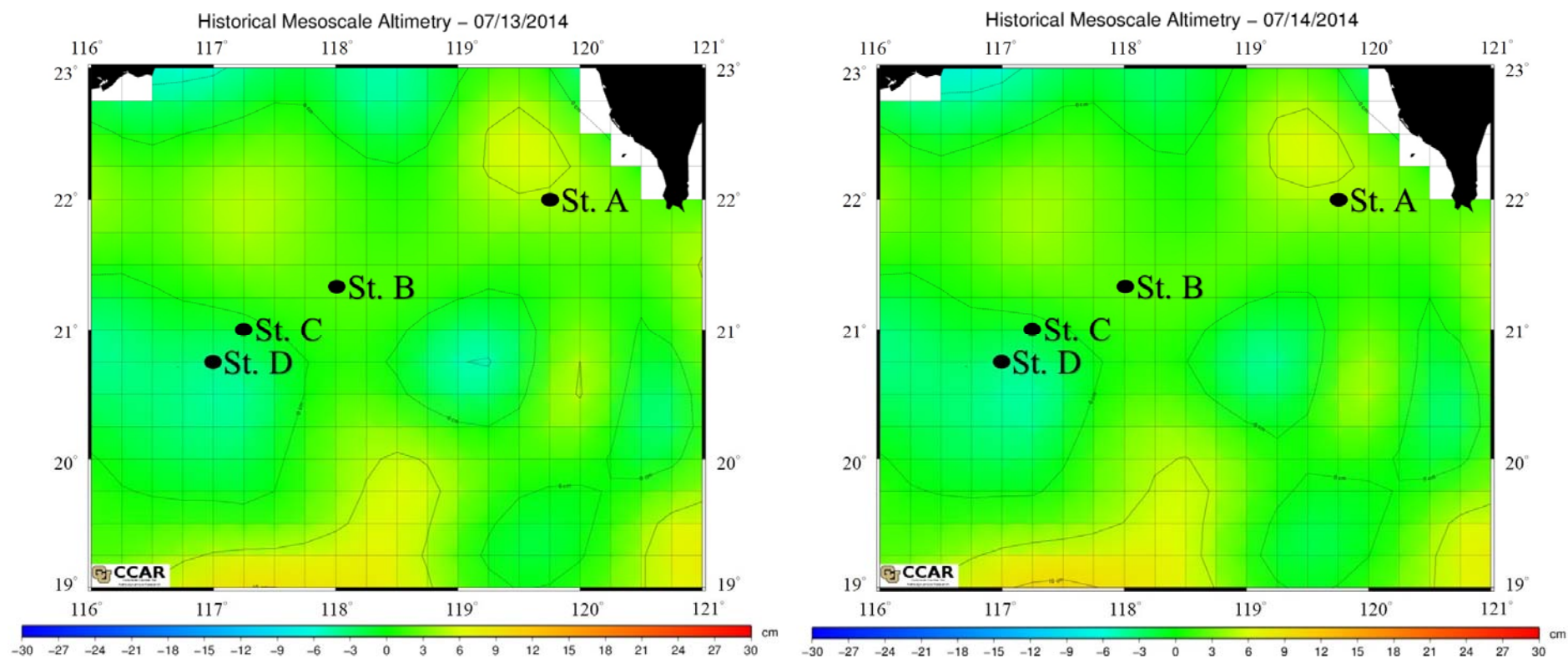


圖 3- 27、ORI-1082 航次採樣期間(07/13/2014-07/14/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

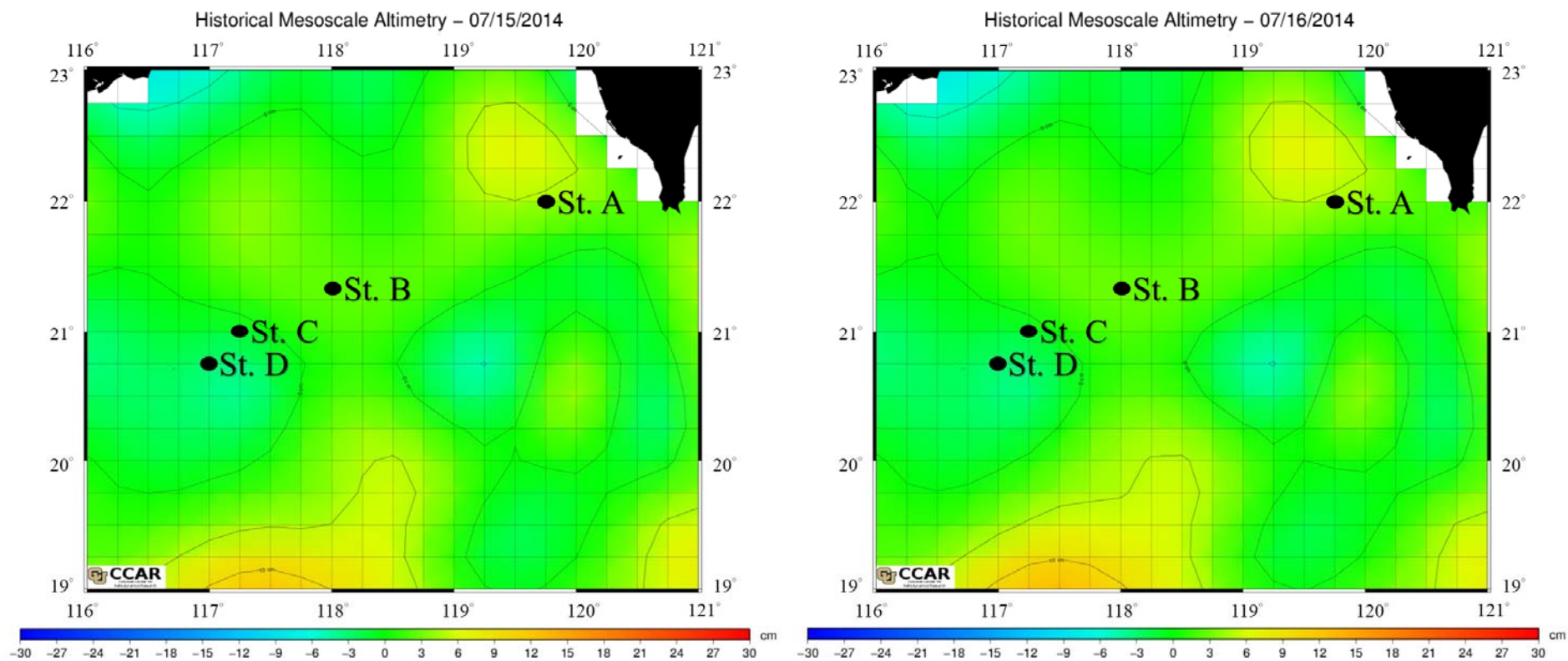


圖 3- 28、ORI-1082 航次採樣期間(07/15/2014-07/16/2013)海表面高度變化圖(資料來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

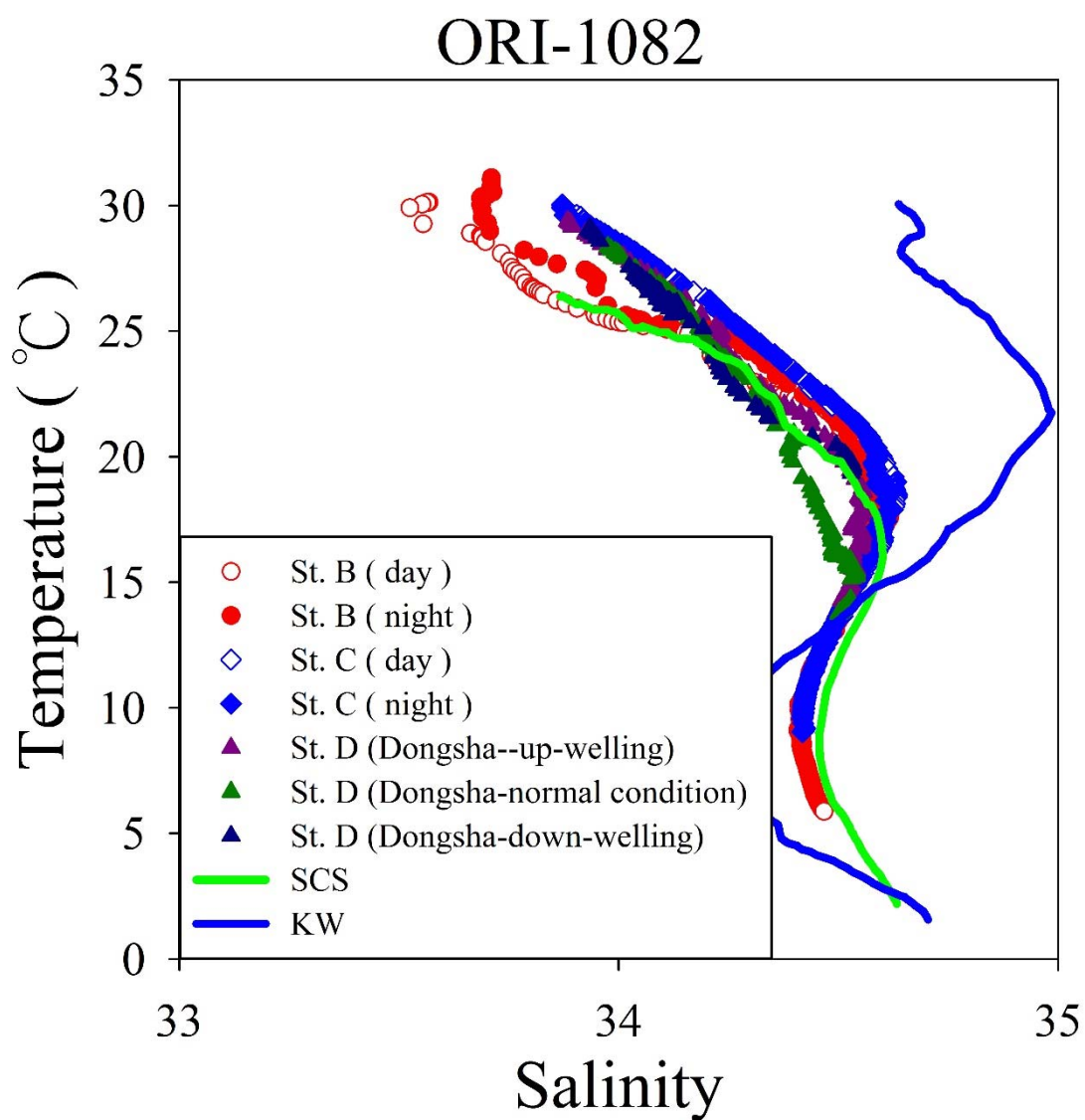


圖 3- 29、ORI-1082 航次測站(St. B、St. C 與 St. D)之日夜溫鹽圖。

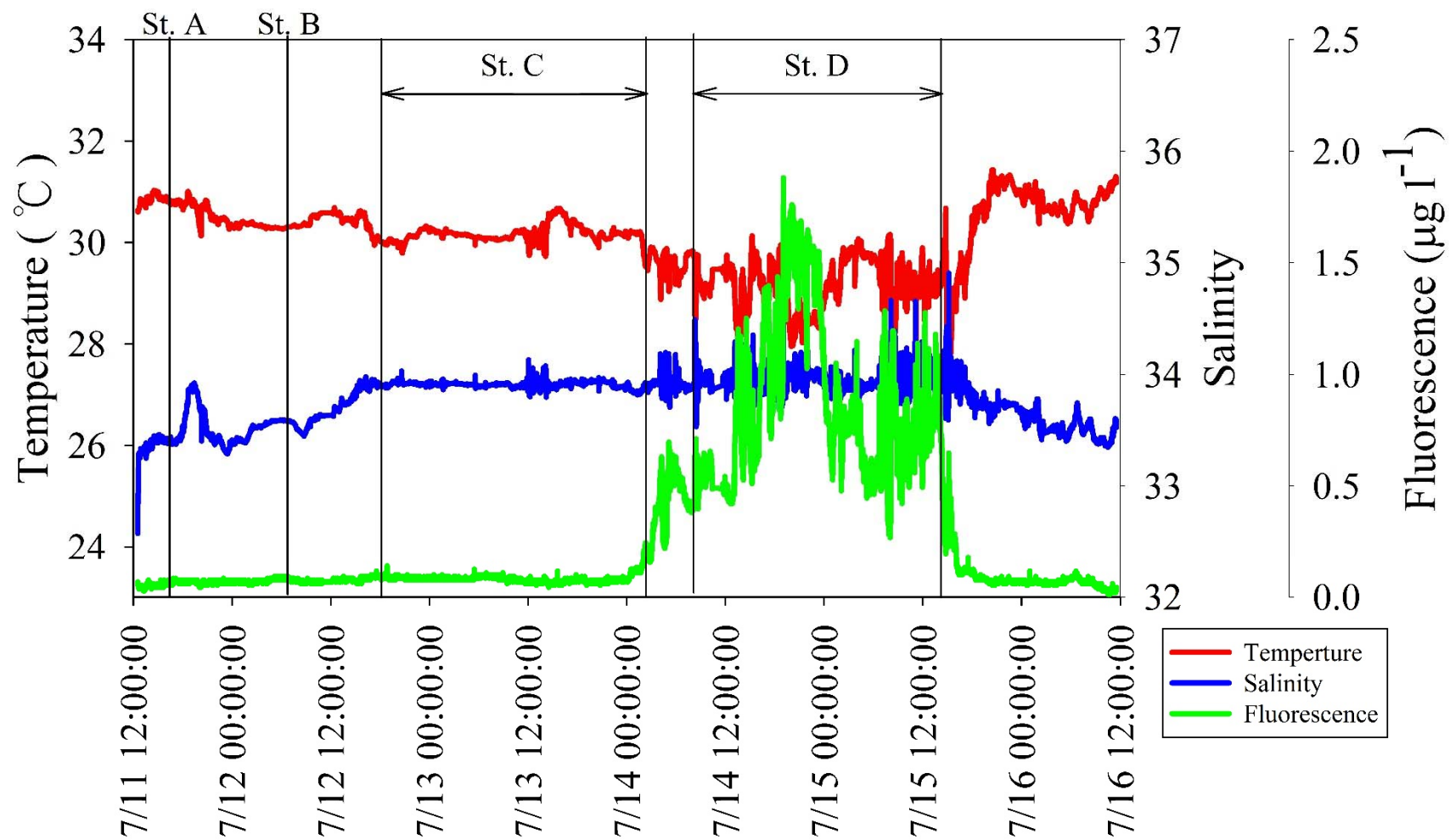


圖 3-30、ORI-1082 航次航行期間(07/11/2014-07/16/2014)測站 St. A、St. B、St. C 與 St. D 表面海水溫度、鹽度及葉綠素螢光值。

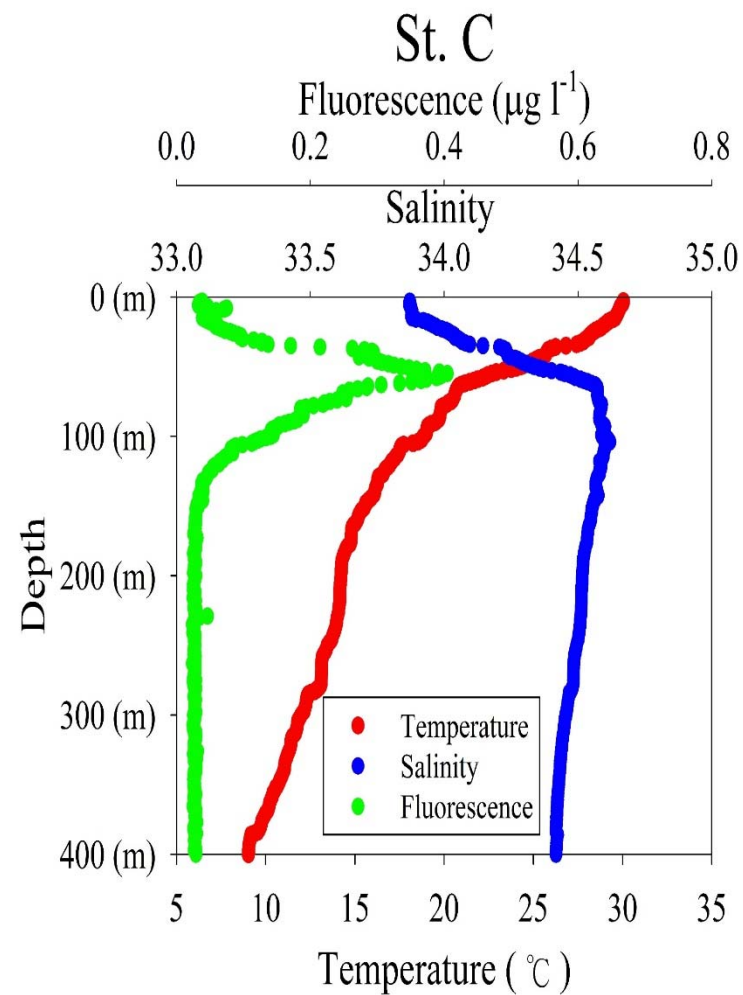
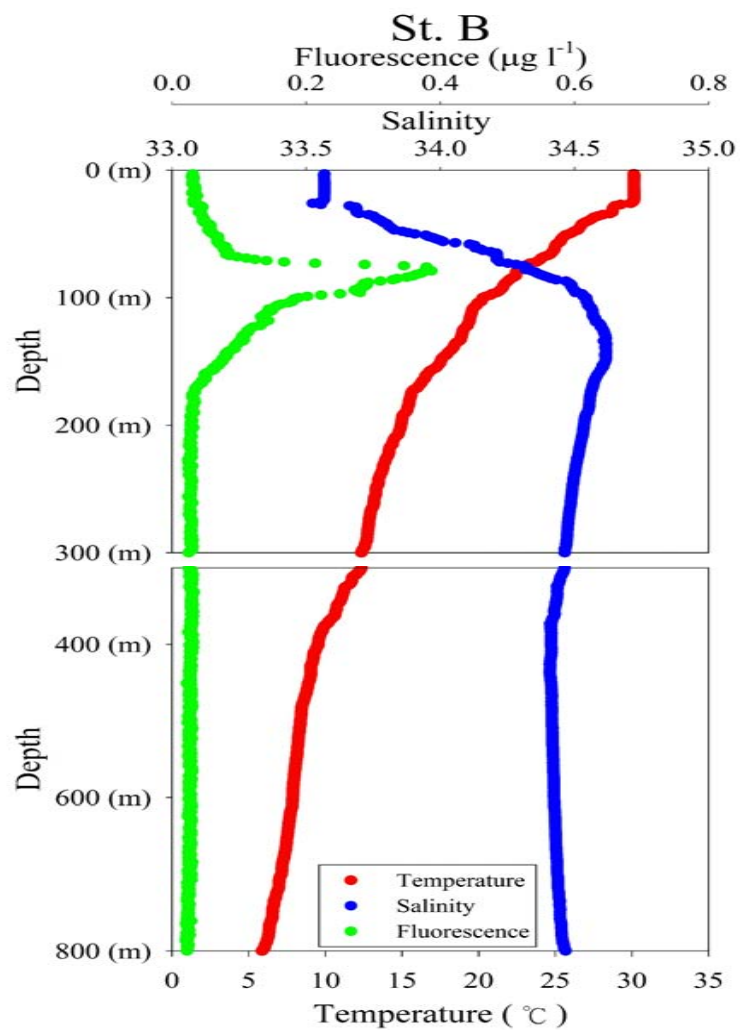


圖 3-31、ORI-1082 航次測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈，St. B 測站(左圖)，St. C 測站(右圖)。

3.1.5 ORIII-1773 航次水文概況

ORIII-1773 航次是在 2014 年 6 月份進行採樣，以季節而言屬於夏季。圖 3-32 為此航次採樣點，浮游動物拖網位置於東沙之東部陸棚 St. M3(116°57.15' E, 20°43.84' N)，水深約為 220m，與 ORI-1082 航次之 St. D 測站浮游動物拖網位置相距不遠。因南海常發生內波物理現象，而內波起源於呂宋海峽，向西傳入南海北部，然後消散在南海西側的大陸棚上，而東沙環礁位處於南海西北陸棚邊緣，內波在此被加強放大。由於內波造成強勁的內部流場，進而對水體產生垂直結構的變化。在 ORI-1082 之 St. D 測站下放 CTD 得到上舉型與下沉型不同類型內波，由 CTD 水文資料之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈(圖 3-33)，可看出內波對東沙之陸棚水文特性的差異。溫度與鹽度垂直結構顯示，下沉型(down-welling, 綠色圓點)內波能將表層水往下壓，造成溫度、鹽度與葉綠素螢光值垂直混合明顯，混合層厚度為 130 公尺；而上舉型(up-welling, 紅色圓點)內波則將底層水舉升，造成層化深度較淺，混合層厚度為 13 公尺；無內波時密度垂直結構顯示水體主要介於下沉型與上舉型內波間，混合層厚度為 42 公尺。因此，受內波影響並經混合及擴散，水體結構會呈現不同分佈，進一步影響基礎生產力。

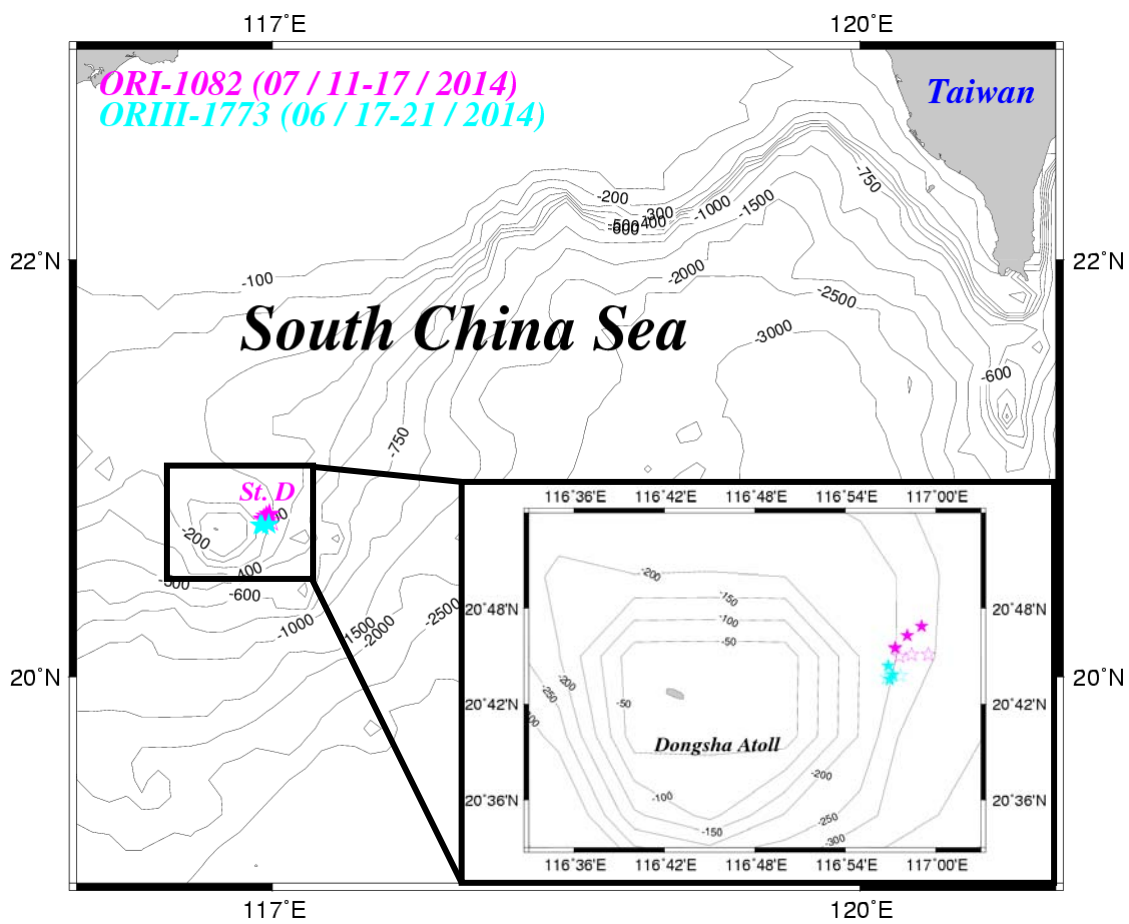


圖 3- 32、ORIII-1773 航次採樣位置測站點。

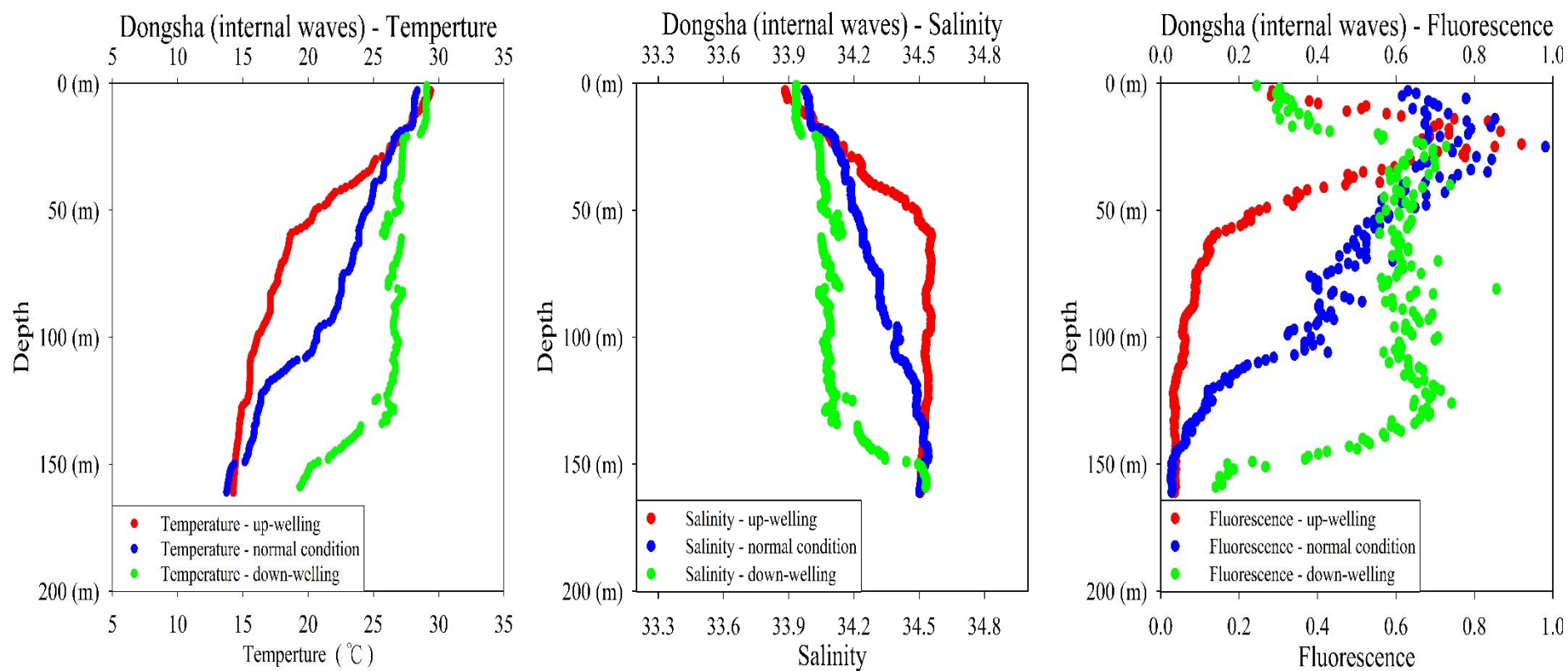


圖 3- 33、東沙島東部受上舉型、下沉型內波影響與常態無內波之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈。

3.1.6 ORV-0035 航次水文概況

另外，剛好有機會能在西北太平洋進行採樣並與北南海做比較。西北太平洋航次為 ORV-0035，時間是在 2014 年 3 至 4 月份進行採樣，以季節而言屬於春季。圖 3-34 為此航次之西北太平洋採樣點，浮游動物拖網位置於測站 St. 6 ($124^{\circ}58.57' E$, $23^{\circ}32.00' N$)，深度約為 4300m。從網站(CCAR)取得海水表面高度衛星資料(圖 3-35)，在測站 St. 6 採樣期間(03/29/2014, 2:00 ~ 03/30/2014, 16:00 左右) 於北緯 23 度，東經 124 度左右海表面高度較低，存在一冷渦(於 St. 5 正南方)；另外由此東西測線 0-500m 之溫度剖面圖可看出(圖 3-36)，St. 5 測站明顯有次表水湧升至表水現象，而 St. 6 測站並無受到此冷渦影響。溫鹽圖顯示(圖 3-37)，採樣期間測站 St. 6 為黑潮水團訊號；由 CTD 所得資料(溫度、鹽度及葉綠素螢光值)對深度的垂直分佈(圖 3-38)，表水至 170 公尺隨深度增加而鹽度遞增，170 公尺附近有個極大值，鹽度達 34.8，鹽度極小值出現在 600 公尺附近，為 34.2，600-2000 公尺鹽度隨深度增加而遞增，最終遞增趨於一致約 34.7；而表水水溫 $23.2^{\circ}C$ 至 1000 公尺之間溫度梯度最大，溫度可降至約 $4.0^{\circ}C$ ，1000-4000 公尺溫度隨深度遞增而緩慢遞減趨於一致，約 $1.6^{\circ}C$ 。

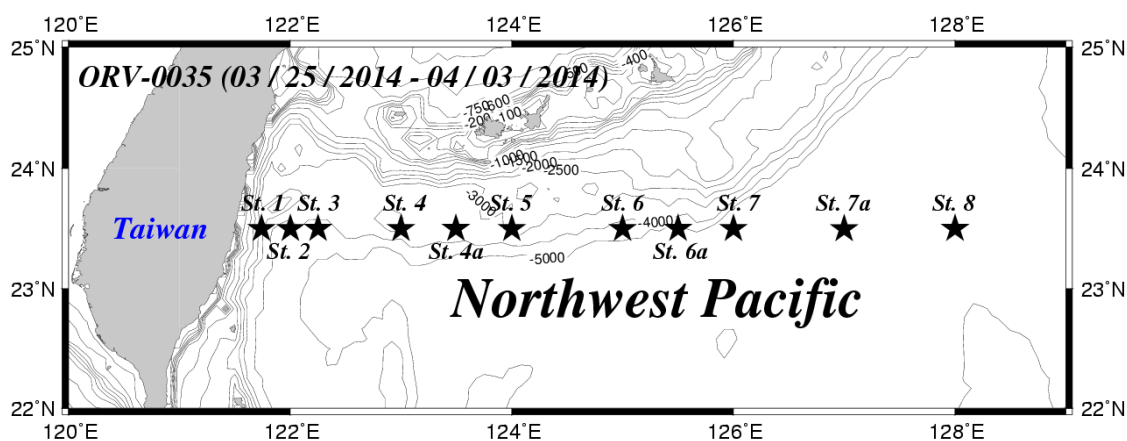


圖 3-34、ORV-0035 航次採樣位置測站點。

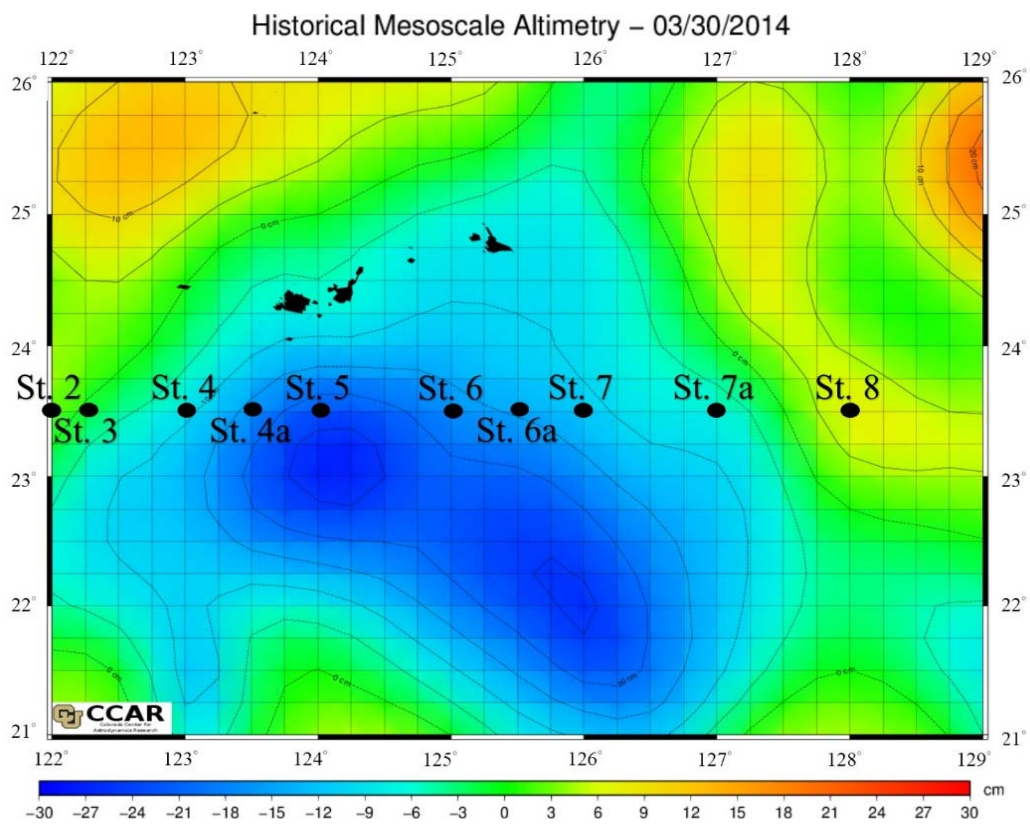
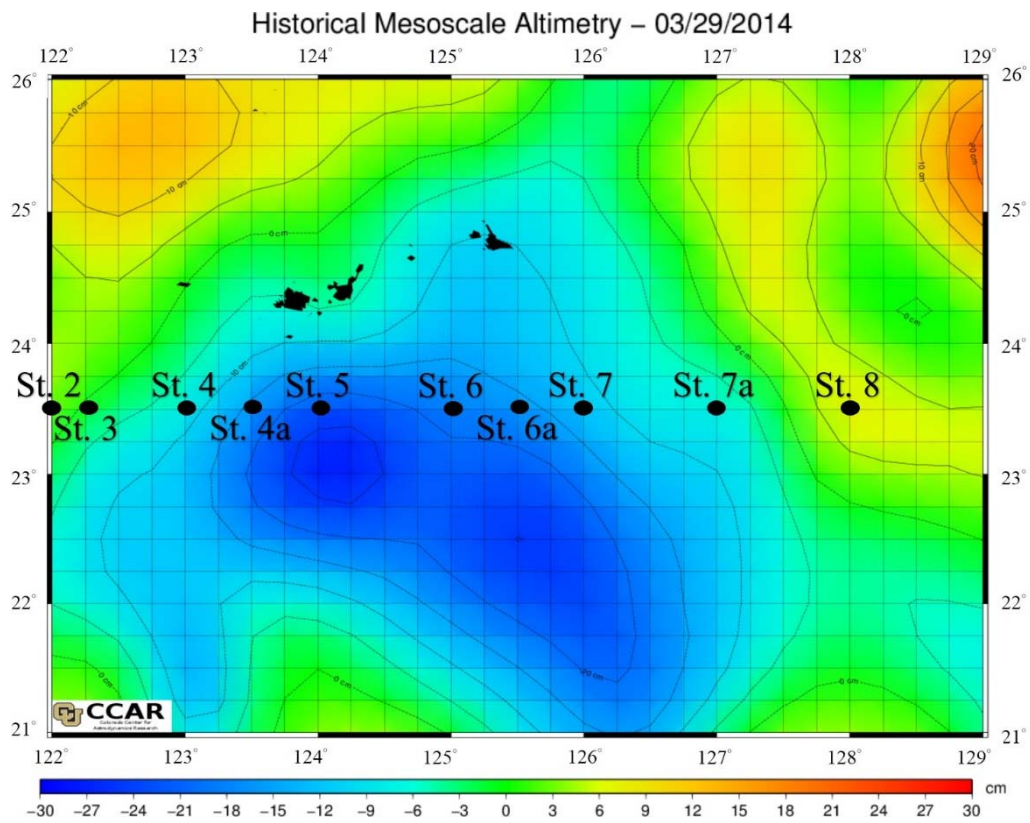


圖 3-35、ORV-0035 航次採樣期間(03/29/2014-03/30/2013)海表面高度變化圖(資料

來源: Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR)。

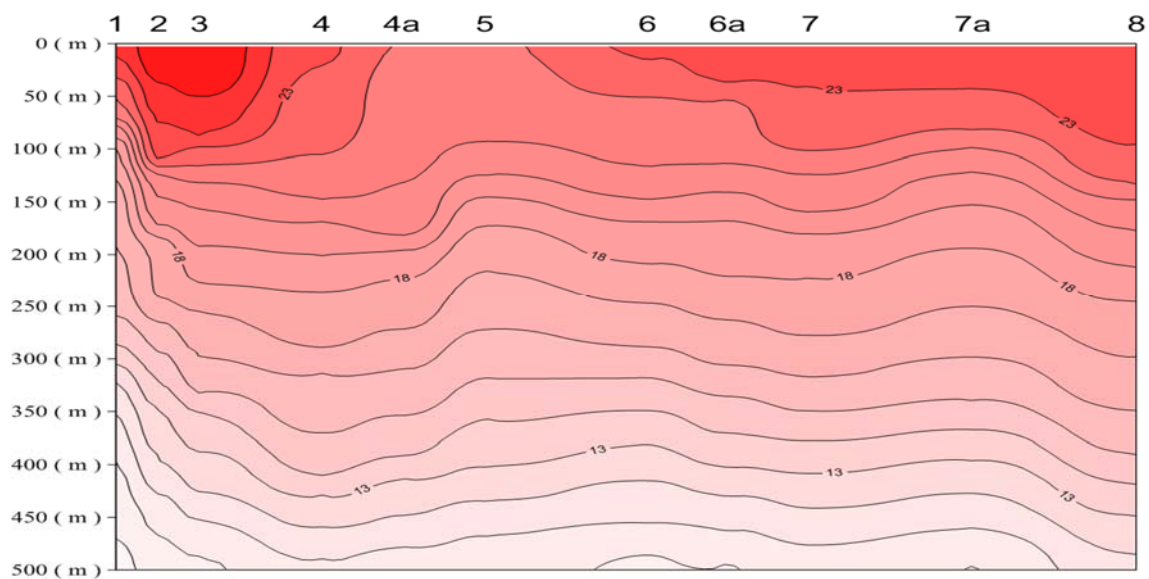


圖 3-36、ORV-0035 航次東西測線(St. 1 - St. 8) 0-500m 之溫度剖面圖。

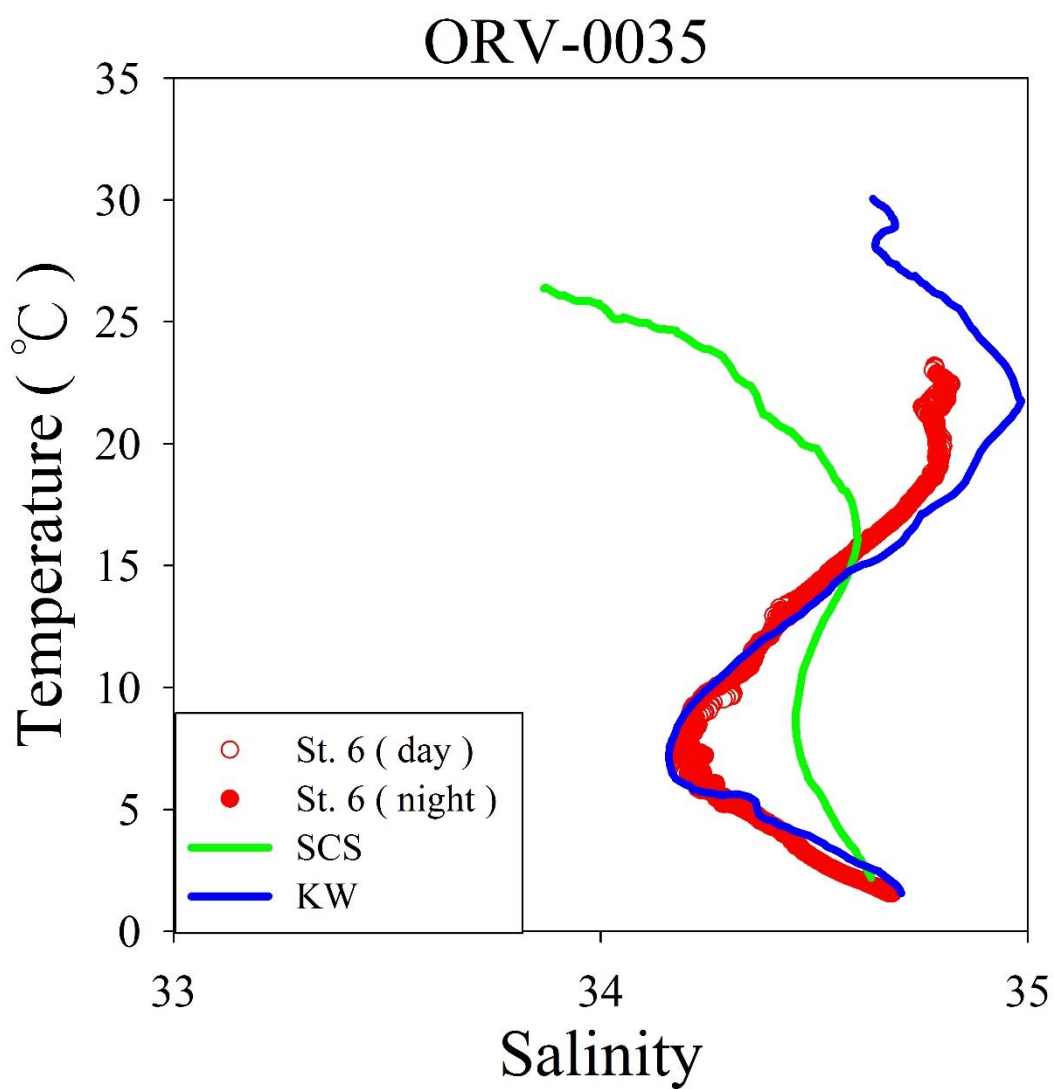


圖 3-37、ORV-0035 航次測站(St. 6)之日夜溫鹽圖。

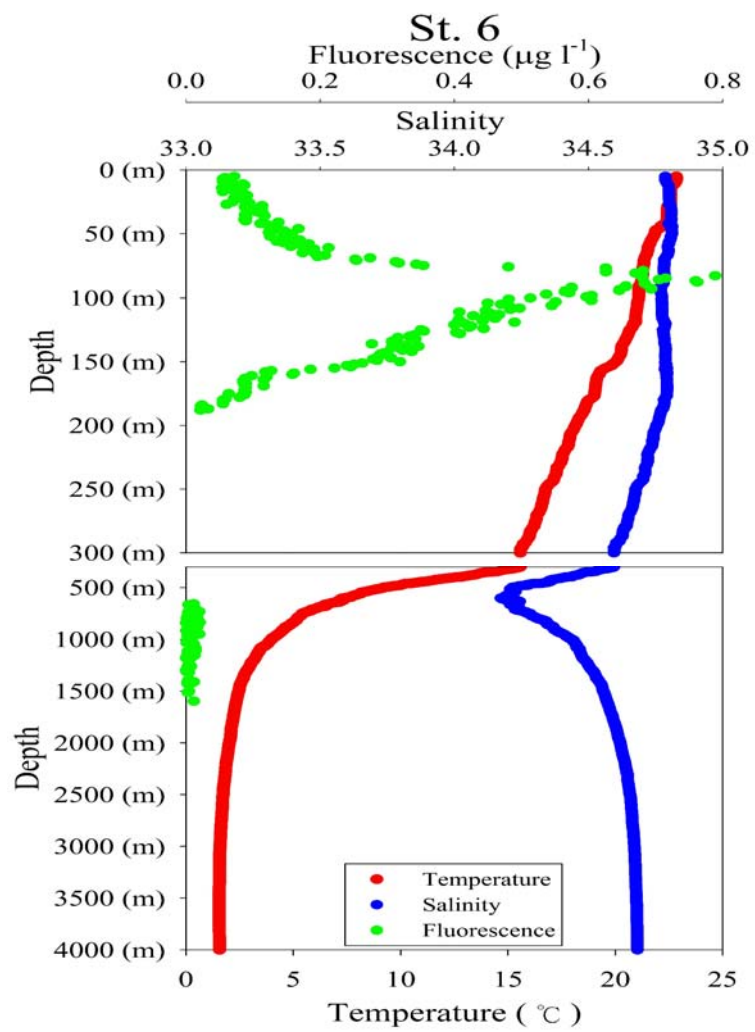


圖 3- 38、ORV-0035 航次 St. 6 測站點之溫度、鹽度及葉綠素螢光值對深度的垂直分佈。

3.2 主動傳輸

3.2.1 浮游動物日夜垂直遷移

各航次航行時皆有開啟研究船之魚探儀(EK60)，魚探儀顯示之結果對浮游動物日夜垂直遷移有明顯與直接證據(圖 3-39 到圖 3-44)。圖 3-39、圖 3-41 與圖 3-43 分別為北南海常態夏季、北南海冬季反渦流與北南海夏季東沙內波之夜間浮游動物拖網期間漁探儀(EK60)水下探測剖面圖，上圖(a)為 38kHz 頻率掃描結果，探測深度可超過 1000m，下圖(b)為 120kHz 頻率掃描結果，探測深度約在 300m 左右，藉以更精確判斷上層水體生物分佈。

在北南海常態夏季之夜間漁探儀(EK60)水下探測剖面圖顯示(圖 3-39)，38kHz 頻率掃描結果在 400m 左右獲得一斷斷續續的反射層，反射顆粒較大，推斷為微型弱泳生物(micronekton)的聚集，但北南海冬季反渦流與北南海夏季東沙內波(圖 3-41 與圖 3-43)並無微型弱泳生物聚集現象。北南海常態夏季、冬季反渦流與夏季東沙內波之夜間，上層水體於 100m 左右則得另一明顯反射層，反射顆粒較小，推測為浮游動物(zooplankton)，120kHz 頻率掃描結果顯示更明顯。

在日間，北南海常態夏季與冬季反渦流中之漁探儀(EK60)水下探測剖面圖顯示(圖 3-40 與圖 3-42)，上層水體 100m 反射層消失而 400m 之反射層更明顯，北南海夏季東沙內波白天掃描結果(圖 3-44)則是無浮游動物明顯反射層。由漁探儀結果可說明夜間時，浮游動物大多聚集至上層水體(多集中在 100m 左右)進行攝食，至日間時則遷移至下層水體或可能與 micronekton 同聚集於 400m 處，如此推算，浮游動物日夜垂直遷移距離可達 300m 左右。

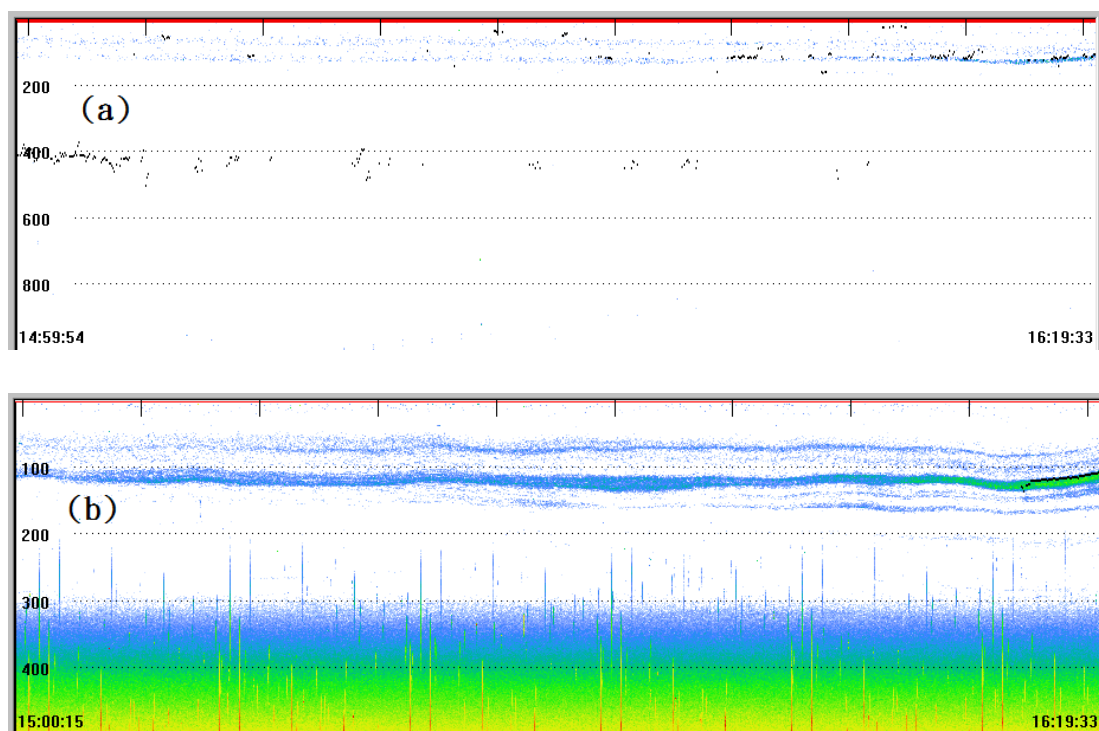


圖 3-39、北南海常態夏季夜間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖，
(a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。

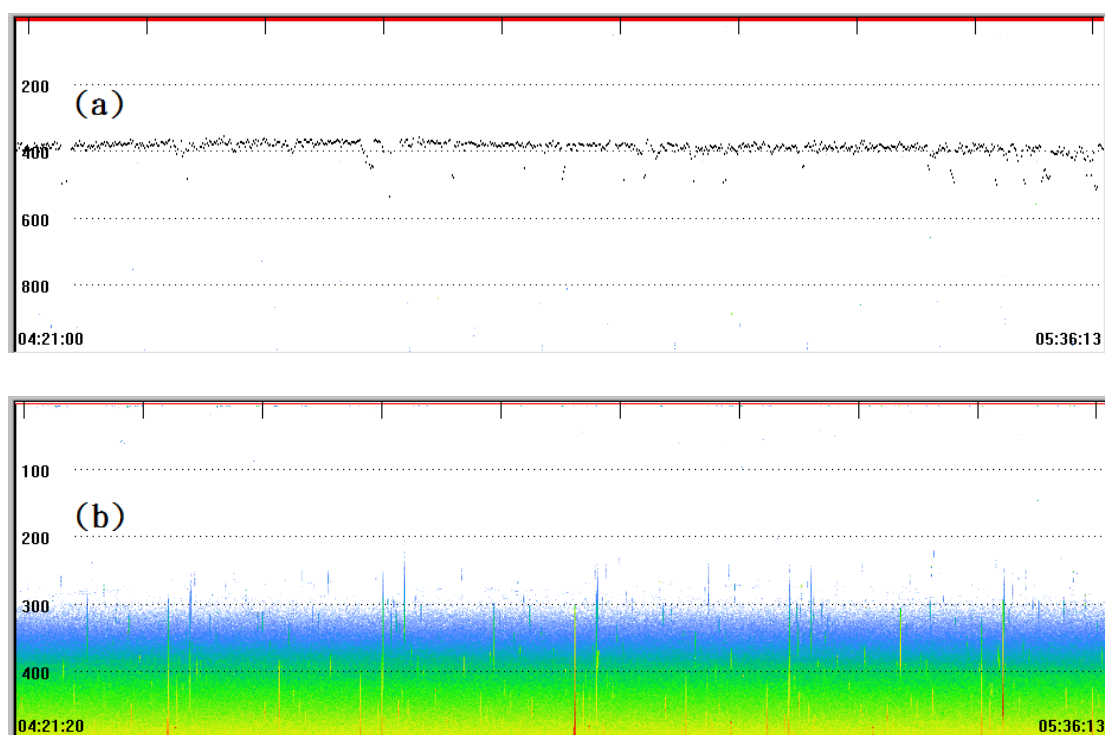


圖 3-40、北南海常態夏季日間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖，
(a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。

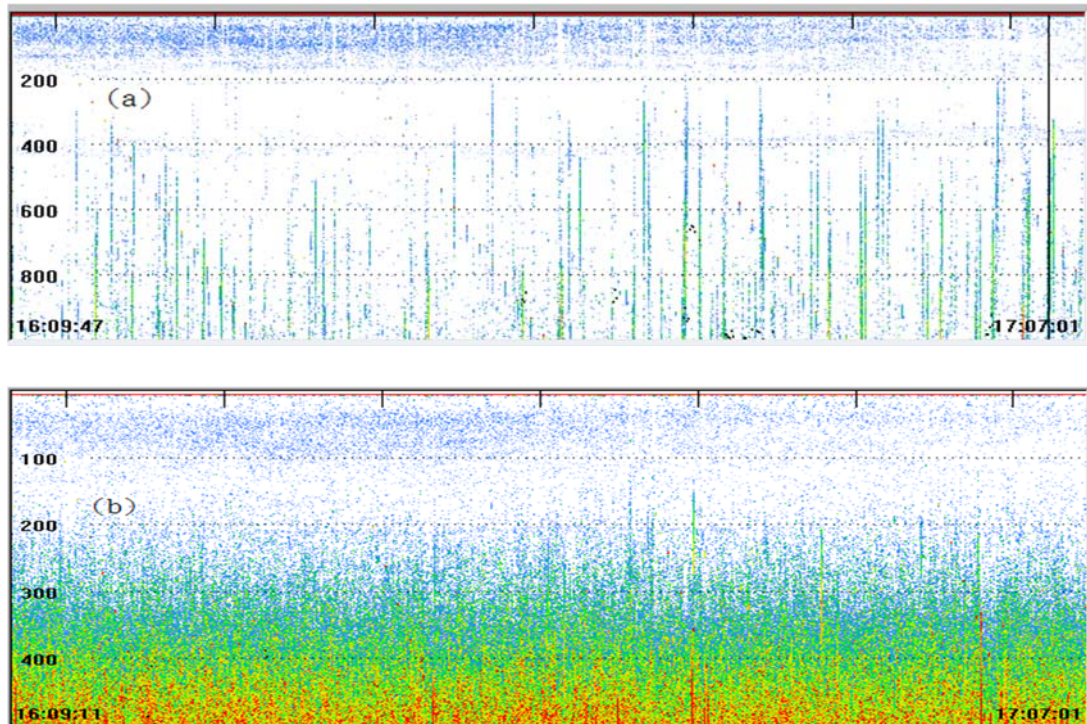


圖 3- 41、北南海冬季反渦流夜間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖，(a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。

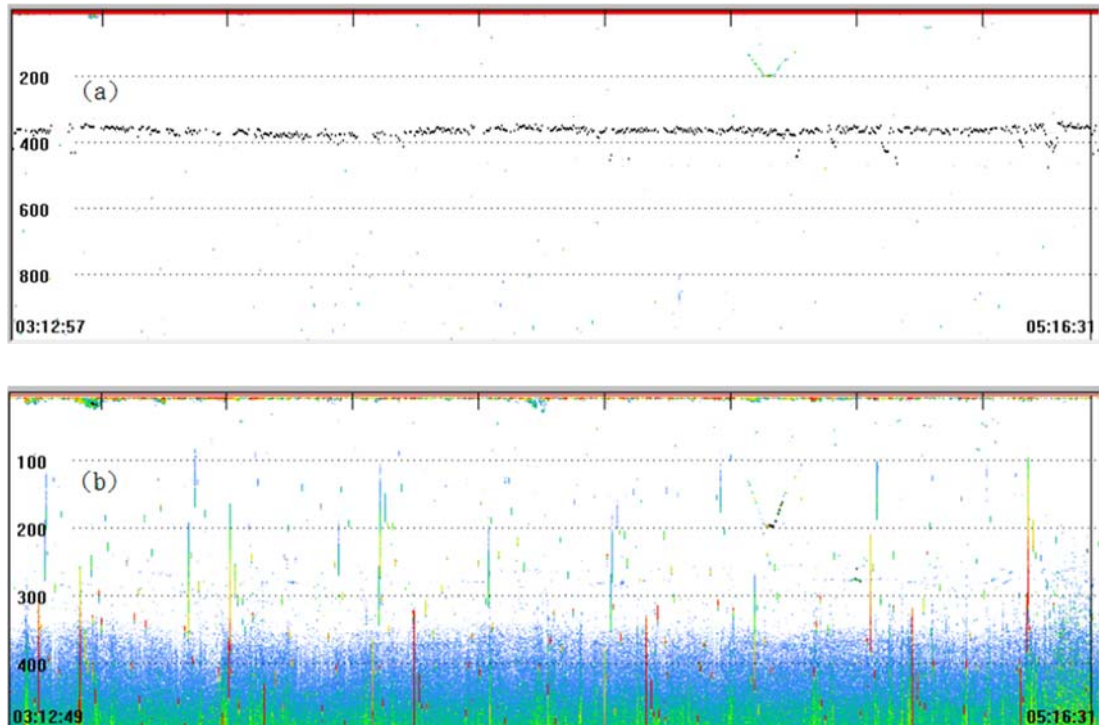


圖 3- 42、北南海冬季反渦流日間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖，(a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。

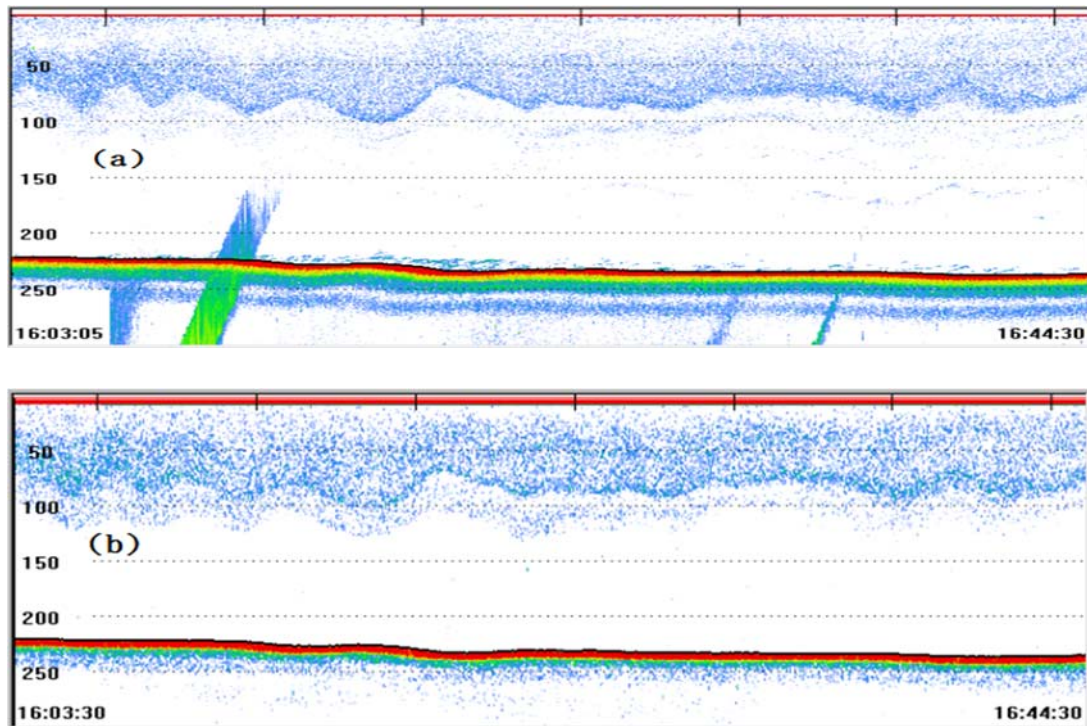


圖 3- 43、北南海夏季東沙內波夜間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖，(a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。

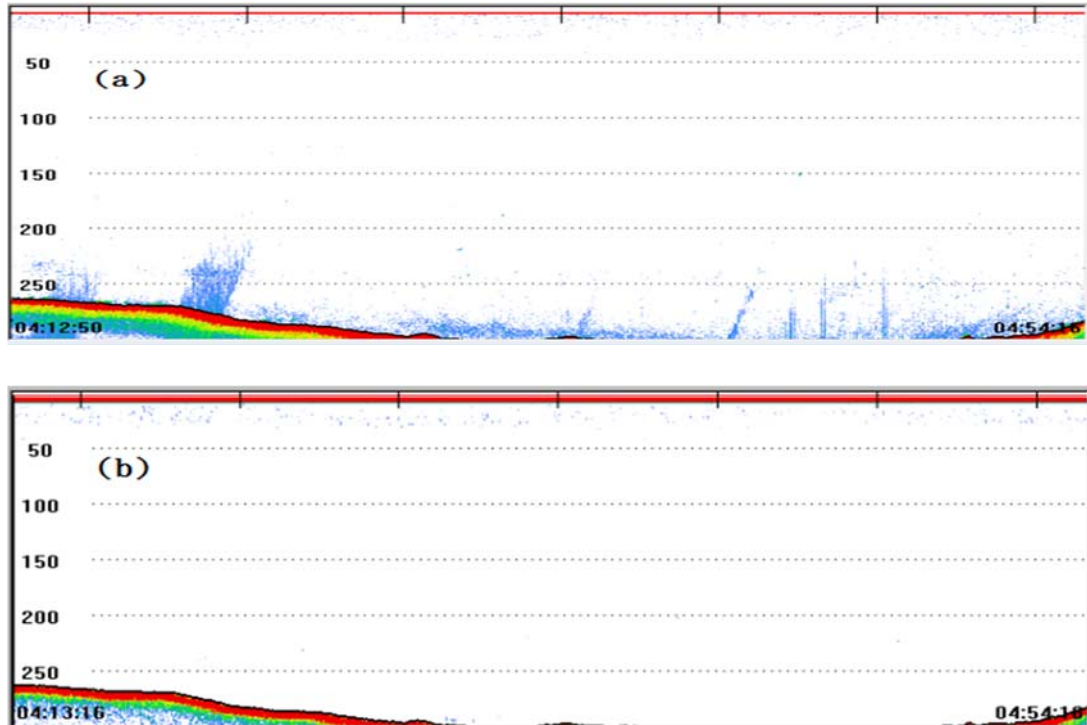


圖 3- 44、北南海夏季東沙內波日間浮游動物採樣期間，漁探儀(EK60)水下探測剖面圖，(a)為 38kHz 頻率掃描結果，(b)為 120kHz 頻率掃描結果。

3.2.2 浮游動物時間序列之生物量與豐度

根據先前研究報導，有學者認為浮游動物之生物量差異最大時間介於日間 10:00-14:00 與夜間 22:00-2:00(Al-Mutairi and Landry, 2001; Hannides et al., 2009)。而本研究開始設定為上層海水(0-200m)浮游動物之生物量差異最大時間點為日間(10:00-13:00)及夜間(22:00-01:00)，因此選定此時間拖網。為了印證此假設，我們做北南海浮游動物 0-200m 時間序列拖網(時間約 3-4 小時為一組)，分別為 17:00、21:00、01:00、03:00、06:00、09:00、12:00 與 15:00。浮游動物生物量(biomass)與生物豐度(abundance)結果顯示(圖 3-45 與 3-46)，在凌晨 01:00 左右，總生物量與生物豐度有最大值，約 2021 (mg m^{-2})與 354 (inds m^{-3})；中午 12:00 左右，總生物量與生物豐度有最小值，約 1480 (mg m^{-2})與 270 (inds m^{-3})。浮游動物體型大小組成則大至呈現倒金字塔型，體型越小豐度越多，體型越大則反之，符合一般群聚生態體型分佈；生物量大致呈現體型最大(2.0-5.0 mm)而生物量最少，體型 0.5-1.0 與 1.0-2.0(mm)之生物量最多，其次為 0.2-0.5 mm。

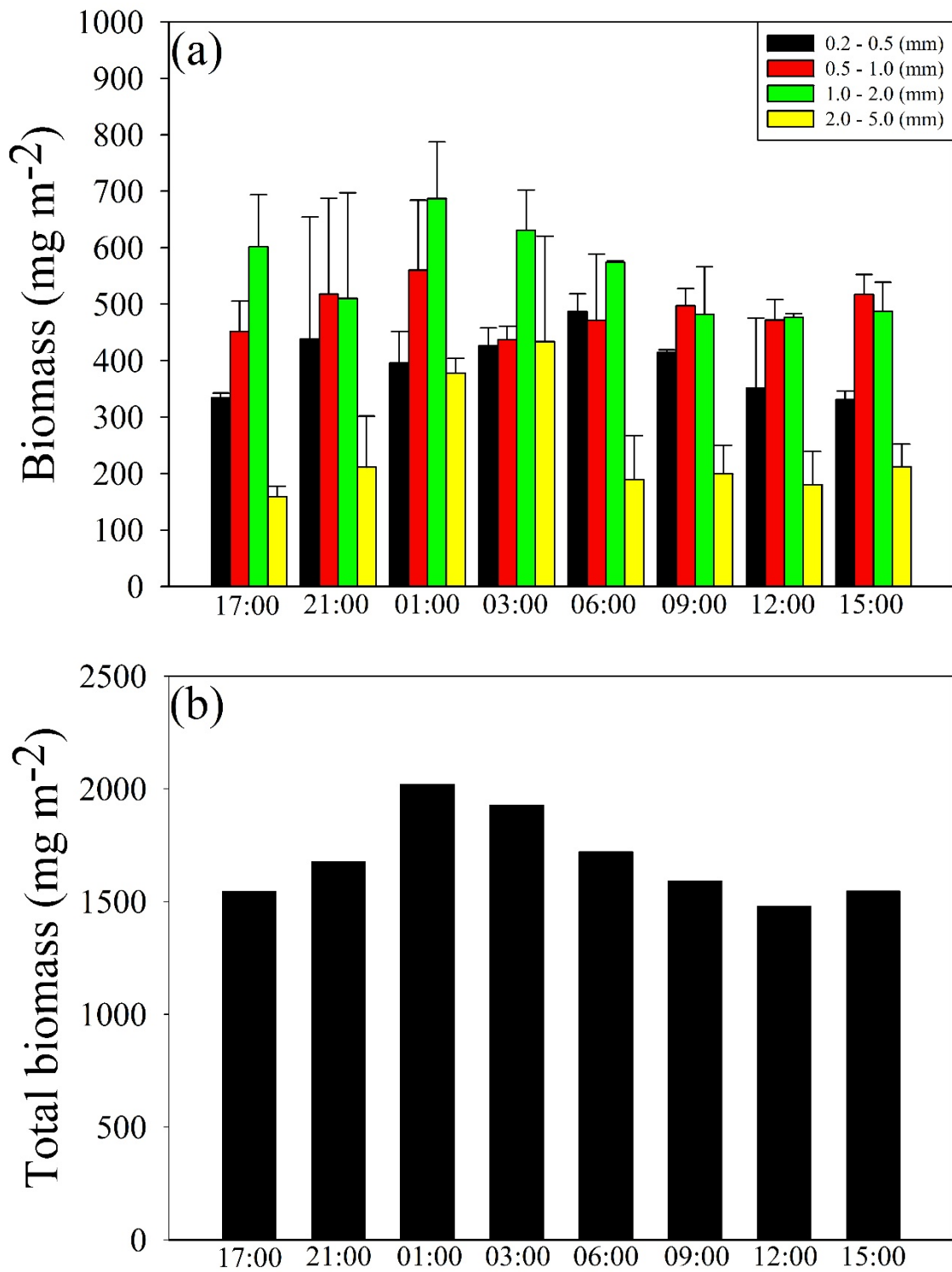


圖 3-45、浮游動物 0-200m 時間序列採樣之生物量，圖(a)為各體型大小生物量與圖(b)為總生物量。

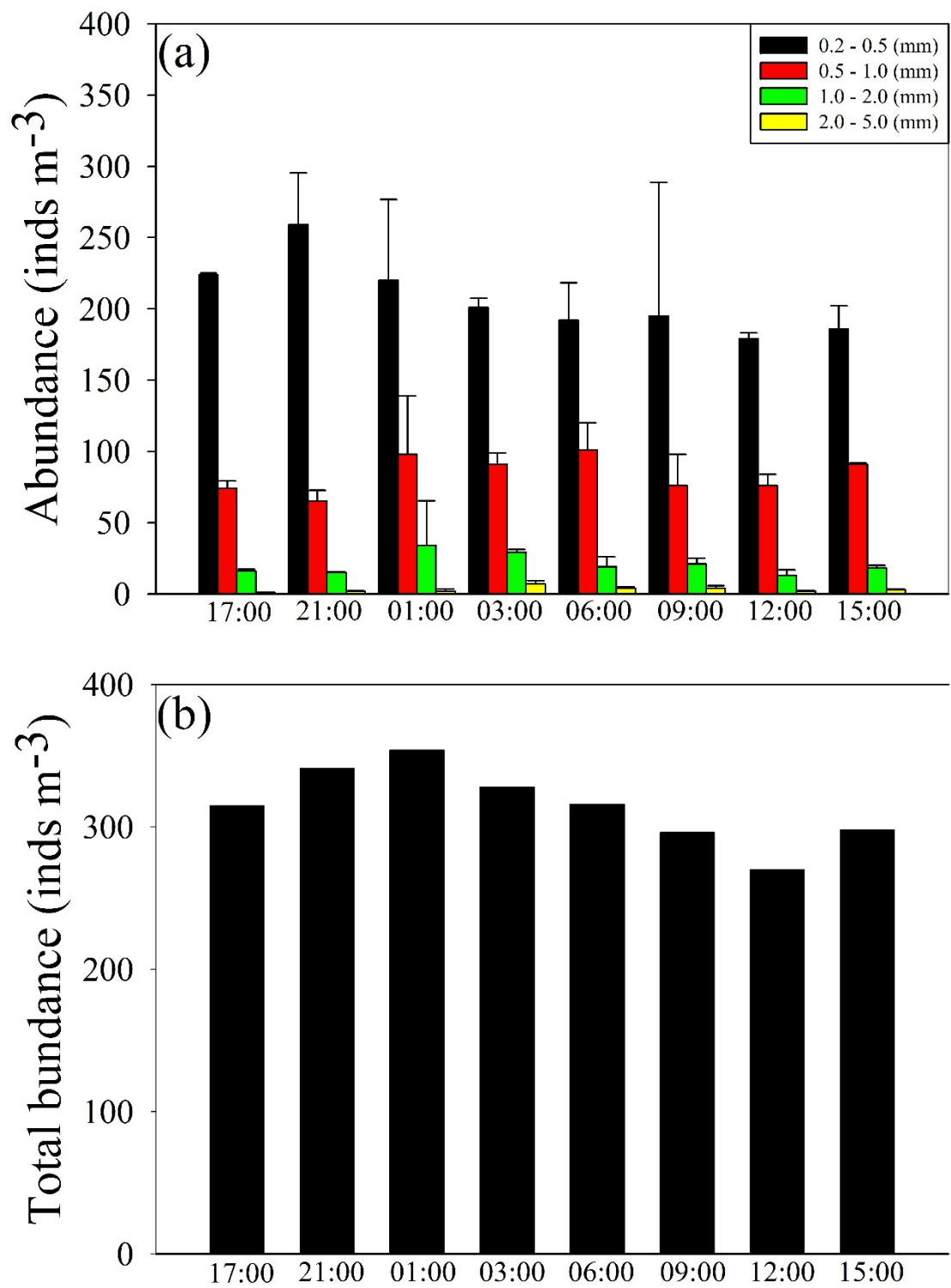


圖 3- 46、浮游動物 0-200m 時間序列採樣之個體豐度，圖(a)為各體型大小生物豐度與圖(b)為總生物豐度。

3.2.3 浮游動物日間、夜間與垂直遷移生物量

表 3-1 與 3-2 為北南海常態夏季、特殊事件與西北太平洋之 0-200m 各體型大小日夜浮游動物生物量、夜日比值與垂直遷移生物量，結果顯示北南海在常態夏季各航次夜間總浮游動物生物量介於 573-1690 mg DW m⁻²、日間介於 338-1216 mg DW m⁻² 和垂直遷移生物量介於 235-474 mg DW m⁻²；總平均北南海常態夏季結果為夜間總浮游動物生物量 1186mg DW m⁻²、日間 811 mg DW m⁻² 和垂直遷移生物量 376 mg DW m⁻²；反渦流事件(anticyclonic eddy)結果為夜間總浮游動物生物量 1070 mg DW m⁻²、日間 435 mg DW m⁻² 和垂直遷移生物量 635 mg DW m⁻²；東沙之內波影響(internal-waves)結果為夜間總浮游動物生物量 3554 mg DW m⁻²、日間 2557 mg DW m⁻² 和垂直遷移生物量 997 mg DW m⁻²；西北太平洋(northwest Pacific)結果為夜間總浮游動物生物量 403 mg DW m⁻²、日間 245 mg DW m⁻² 和垂直遷移生物量 158 mg DW m⁻²。此外，體型最大之浮游動物(2.0-5.0 mm)其生物量較少，體型 0.5-1.0 與 1.0-2.0(mm)之生物量較多，而夜間與日間生物量比值結果顯示，體型越大(2.0-5.0 mm 和 1.0-2.0)之浮游動物結果介於 1.37-4.93，高於體型較小(0.5-1.0 mm 和 0.2-0.5 mm)之浮游動物。

由浮游動物垂直遷移生物量結果可得知，北南海於海洋特殊事件(反渦流與內波)發生時，會明顯增強垂直遷移生物量。根據(Yebra et al., 2005)研究指出，受反渦流特殊事件影響之下，可強化垂直遷移生物量與主動傳輸通量；西北太平洋可能因水體中營養鹽條件概況不同，而使浮游動物垂直遷移生物量為最低。另外，由夜間與日間生物量比值結果可得知體型較大之浮游動物生物量雖較少，但對垂直遷移生物量貢獻是較顯著。

浮游動物碳氮磷含量在北南海常態夏季日與夜無太明顯差異(表 3-3 與圖 3-47)，大致上為體型為 1.0-2.0 與 0.5-1.0mm 碳氮(C %, N %)含量較高，而體型最大 2.0-5.0 mm 含量最少；磷(P:DW)呈現隨體型越大而磷含量較高；日夜與各體型大小浮游動物碳氮磷百分比平均，碳氮磷含量百分比於北南海常態夏季貢獻浮游動物乾重

分別為 $37.4 \pm 4.34\%$ 、 $7.86 \pm 1.29\%$ 與 $0.76 \pm 0.43\%$ 。北南海反渦流特殊事件之浮游動物碳氮磷含量結果為(表 3-3 與圖 3-48)，白天時，體型最大(2.0-5.0 mm)之浮游動物碳與氮含量最低，其於體型大小差異不大，夜間之浮游動物體內碳含量差異不大，但含量呈現體型最大(2.0-5.0 mm)之浮游動物氮含量最高；浮游動物磷含量在白天時，體型 1.0-2.0 mm 為最少，其次為 2.0-5.0 mm，夜間磷含量呈現隨體型越大而含量較高；碳氮磷含量百分比於北南海反渦流特殊事件貢獻浮游動物乾重分別為 $33.2 \pm 10.3\%$ 、 $6.21 \pm 2.10\%$ 與 $1.06 \pm 0.69\%$ 。北南海內波特殊事件之浮游動物碳氮磷含量在日夜無太明顯差異(表 3-3 與圖 3-49)，大致上日夜之浮游動物體型為 1.0-2.0 mm 碳氮含量較高，而其餘體型之含量差異不大；浮游動物磷含量在夜間時，體型 2.0-5.0 為最高，其餘體型大小之磷含量差異不大；碳氮磷含量百分比於北南海內波特殊事件貢獻浮游動物乾重分別為 $39.4 \pm 3.67\%$ 、 $7.88 \pm 1.02\%$ 與 $0.91 \pm 0.36\%$ 。西北太平洋之浮游動物碳氮磷含量結果顯示(表 3-3 與圖 3-50)，日間之浮游動物體型為 2.0-5.0 mm 碳氮含量為最低，而其餘體型之含量差異不大，夜間之浮游動物體型為 1.0-2.0 mm 碳氮含量為最高；浮游動物磷含量在日夜時，浮游動物體型各大小之磷含量差異不大；碳氮磷含量百分比於西北太平洋貢獻浮游動物乾重分別為 $38.9 \pm 8.05\%$ 、 $8.18 \pm 1.84\%$ 與 $0.76 \pm 0.17\%$ 。

根據先前研究指出(Parsons et al., 1979; Peters and Downing, 1984; Bamstedt, 1986; Dam and Peterson, 1993)，浮游動物乾重約有 40%碳含量，Kobari et al. (2013)學者指出浮游動物乾重約有 35.6%碳含量；Peters and Downing, (1984)指出浮游動物乾重約有 9%氮含量。以上學者大多在大洋或時間序列測站所進行採樣，而大部份也只有碳含量，氮與磷在浮游動物體內佔多少含量結果報導幾乎沒有。整合本研究北南海常態夏季與受內波和反渦流事件影響之特殊事件的浮游動物體內碳氮磷含量，將浮游動物在日夜與各體型大小平均(樣品數=248)得碳氮含量分別為 $37.5 \pm 4.48\%$ 與 $7.76 \pm 1.36\%$ ，磷(樣品數=237)含量為 $0.81 \pm 0.45\%$ 。西北太平洋的浮游動物體內碳氮含量(樣品數=16)分別為 $38.9 \pm 8.05\%$ 與 $8.18 \pm 1.84\%$ ，磷(樣品數=13)含量

為 $0.76 \pm 0.17\%$ ，而本研究浮游動物碳氮含量與過去報導相當一致。

C:N、C:P 與 N:P 之莫爾比於北南海常態夏季日夜浮游動物各體型大小分別介於 5.29-5.80 (5.55 ± 0.16)、79.7-162 (131 ± 30.0)與 15.1-29.6 (23.6 ± 5.05)；北南海反渦流事件日夜浮游動物各體型大小分別介於 4.97-7.42 (6.33 ± 0.71)、45.3-211 (102 ± 50.6)與 9.12-35.3 (16.0 ± 8.20)；北南海內波事件日夜浮游動物各體型大小分別介於 5.31-6.23 (5.84 ± 0.27)、76.8-134 (111 ± 29.9)與 13.5-22.0 (18.9 ± 3.16)與西北太平洋日夜浮游動物各體型大小分別介於 5.04-5.99 (5.58 ± 0.34)、72.0-187 (135 ± 41.4)與 12.0-33.2 (24.2 ± 7.25)。

本研究浮游動物體內碳氮磷含量之莫爾比差異甚大，與 Redfield ratio 的 $C_{106}N_{16}P_1$ 有明顯差異。根據先前(Hannides et al., 2009)學者在 ALOHA 測站經由 1994 到 2005 年期間裡，所有進行浮動動物拖網並測量體內碳氮磷含量結果為 $C_{88}N_{18}P_1$ ；另外學者(Pertola et al., 2002)在波羅海(Baltic Sea)結果得到浮動物物體內碳氮磷含量結果為 ($C_{41}N_7P_1$ 至 $C_{144}N_{24}P_1$) 以及 (Gismervik, 1997)在挪威峽灣 (Norwegian fjord)觀察到浮動物物體內碳氮磷含量結果為 ($C_{63}N_8P_1$ 至 $C_{348}N_{38}P_1$)。以上結果在 C:P 與 N:P 間的莫爾比變化相較於 C:N 莫爾比的變化來的大。Sterner and Elser (2002)指出，生物體因本身生物化學做用與細胞等因素，造成身物體內磷的含量變化會比碳氮的含量變化來的更加明顯，因此造成 C:P 與 N:P 莫爾比變化較大。

表 3-1、北南海常態夏季之 0-200m 各體型大小日夜浮游動物平均生物量±標準偏差、夜日比值與垂直遷移生物量。

Cruise/size fraction	Dry biomass (mg m ⁻²)			
	Night	Day	N:D ratio	Migrant biomass
ORI-1039				
0.2-0.5 mm	193±4.07	142±29.4	1.36	51.6
0.5-1.0 mm	135±36.8	98.6±8.33	1.37	36.8
1.0-2.0 mm	138±91.5	63.7±29.0	2.17	74.2
2.0-5.0 mm	107±24.2	34.3±17.5	3.12	72.9
Total (>0.2 mm)	573±102	338±45.6	1.70	235
ORI-1074				
0.2-0.5 mm	349±65.8	290±86.8	1.21	59.7
0.5-1.0 mm	480±113	395±109	1.22	85.4
1.0-2.0 mm	509±251	369±153	1.38	140
2.0-5.0 mm	352±36.2	164±23.3	2.15	189
Total (>0.2 mm)	1691±286	1217±208	1.39	474

ORI-1082					
0.2-0.5 mm	381±46.6	314±2.72	1.21	66.6	
0.5-1.0 mm	342±8.44	264±23.2	1.30	78.5	
1.0-2.0 mm	302±3.08	201±10.2	1.50	101	
2.0-5.0 mm	270±72.9	97.9±15.4	2.76	172	
Total (>0.2 mm)	1295±87.0	877±28.8	1.48	418	
Grand average					
0.2-0.5 mm	308±96.8	249±93	1.24	59.3	
0.5-1.0 mm	319±164	252±142	1.27	66.9	
1.0-2.0 mm	316±205	211±153	1.50	105	
2.0-5.0 mm	243±118	98.6±59.6	2.47	145	
Total (>0.2 mm)	1186±304	811±236	1.46	376	

表 3-2、北南海特殊事件與西北太平洋之 0-200m 各體型大小日夜浮游動物平均生物量、夜日比值與垂直遷移生物量。

Cruise/size fraction	Dry biomass (mg m ⁻²)			
	Night	Day	N:D ratio	Migrant biomass
Anticyclonic eddy				
0.2-0.5 mm	271	132	2.05	139
0.5-1.0 mm	196	93.7	2.09	102
1.0-2.0 mm	267	68.9	3.87	198
2.0-5.0 mm	336	140	2.39	196
Total (>0.2 mm)	1070	435	2.46	635
Dongsha-internal waves				
0.2-0.5 mm	1061±387	811±388	1.31	250
0.5-1.0 mm	1008±401	775±416	1.30	233
1.0-2.0 mm	1018±393	742±313	1.37	276
2.0-5.0 mm	466±209	229±153	2.04	237
Total (>0.2 mm)	3554±713	2557±667	1.39	997

Northwest Pacific

0.2-0.5 mm	116	83.5	1.39	32.7
0.5-1.0 mm	84.4	67.8	1.25	16.7
1.0-2.0 mm	99.1	20.1	4.93	79.0
2.0-5.0 mm	103	73.4	1.41	30.0
Total (>0.2 mm)	403	245	1.65	158

表 3-3、北南海常態夏季、特殊事件與西北太平洋之各體型大小日夜浮游動物體內平均碳氮磷含量平均±標準偏差與 C:N、C:P、N:P 莫爾比。

Event/size fraction	C %	N %	P%	C:N (mol:mol)	C:P (mol:mol)	N:P (mol:mol)
Regular summer-day						
0.2-0.5 mm	37.4±2.82	7.60±9.61	0.63±0.24	5.73	154	18.6
0.5-1.0 mm	39.8±2.38	8.49±0.94	0.64±0.24	5.47	162	27.3
1.0-2.0 mm	38.9±4.59	8.19±1.28	0.67±0.24	5.55	151	29.6
2.0-5.0 mm	33.7±5.51	7.08±1.70	0.84±0.46	5.55	103	26.9
Regular summer-night						
0.2-0.5 mm	36.6±3.21	7.38±0.88	0.60±0.25	5.80	157	27.0
0.5-1.0 mm	38.0±2.33	7.97±0.74	0.74±0.32	5.56	132	23.8
1.0-2.0 mm	40.4±2.36	8.63±0.95	0.93±0.77	5.46	112	20.6
2.0-5.0 mm	34.2±5.08	7.54±1.72	1.11±0.47	5.29	79.7	15.1
Anticyclonic eddy-day						
0.2-0.5 mm	39.7±3.90	6.98±0.89	1.24±0.49	6.64	82.7	12.4

0.5-1.0 mm	40.8±6.45	7.40±1.20	1.23±0.36	6.43	85.9	13.4
1.0-2.0 mm	32.4±11.8	6.34±2.75	0.40±0.00	5.97	211	35.3
2.0-5.0 mm	18.0±10.6	3.21±1.73	0.56±0.01	6.55	83.1	12.7
Anticyclonic eddy-night						
0.2-0.5 mm	33.7±19.4	5.29±2.69	0.65±0.41	7.42	135	18.2
0.5-1.0 mm	34.6±7.41	6.09±1.06	0.90±0.60	6.62	99.6	15.0
1.0-2.0 mm	29.7±10.9	5.73±2.86	1.05±1.05	6.06	73.1	12.1
2.0-5.0 mm	36.8±2.29	8.65±0.67	2.10±1.05	4.96	45.3	9.12
Dongsha-internal waves-day						
0.2-0.5 mm	37.2±3.93	7.17±0.87	0.83±0.36	6.06	116	19.2
0.5-1.0 mm	39.0±1.69	7.88±0.66	0.85±0.10	5.77	119	20.6
1.0-2.0 mm	42.6±2.72	8.56±7.20	1.14±0.74	5.81	96.6	16.6
2.0-5.0 mm	38.3±3.20	8.41±1.01	1.15±0.31	5.31	85.8	16.2
Dongsha-internal waves-night						

0.2-0.5 mm	35.7±1.34	6.68±0.61	0.69±0.13	6.23	134	21.5
0.5-1.0 mm	40.6±1.72	8.00±0.60	0.81±0.14	5.9	130	21.9
1.0-2.0 mm	44.2±2.75	8.68±1.10	0.87±0.13	5.94	131	22.0
2.0-5.0 mm	37.5±2.86	7.69±0.98	1.26±0.43	5.68	76.8	13.5
Northwest Pacific-day						
0.2-0.5 mm	42.2±0.57	8.73±0.16	0.58±0.13	5.64	187	33.2
0.5-1.0 mm	43.6±0.02	8.91±0.39	0.74±0.00	5.71	153	26.8
1.0-2.0 mm	36.2±3.43	8.12±1.20	0.99±0.00	5.21	94.3	18.1
2.0-5.0 mm	25.6±21.1	4.98±4.34	0.92±0.00	5.99	72.0	12.0
Northwest Pacific-night						
0.2-0.5 mm	41.0±1.68	8.41±0.70	0.58±0.07	5.69	182	32.1
0.5-1.0 mm	39.9±0.73	7.85±0.69	0.81±0.04	5.93	127	21.4
1.0-2.0 mm	44.6±0.79	9.62±1.06	0.75±0.19	5.40	154	28.5
2.0-5.0 mm	38.1±0.16	8.83±0.71	0.90±0.18	5.04	109	21.7

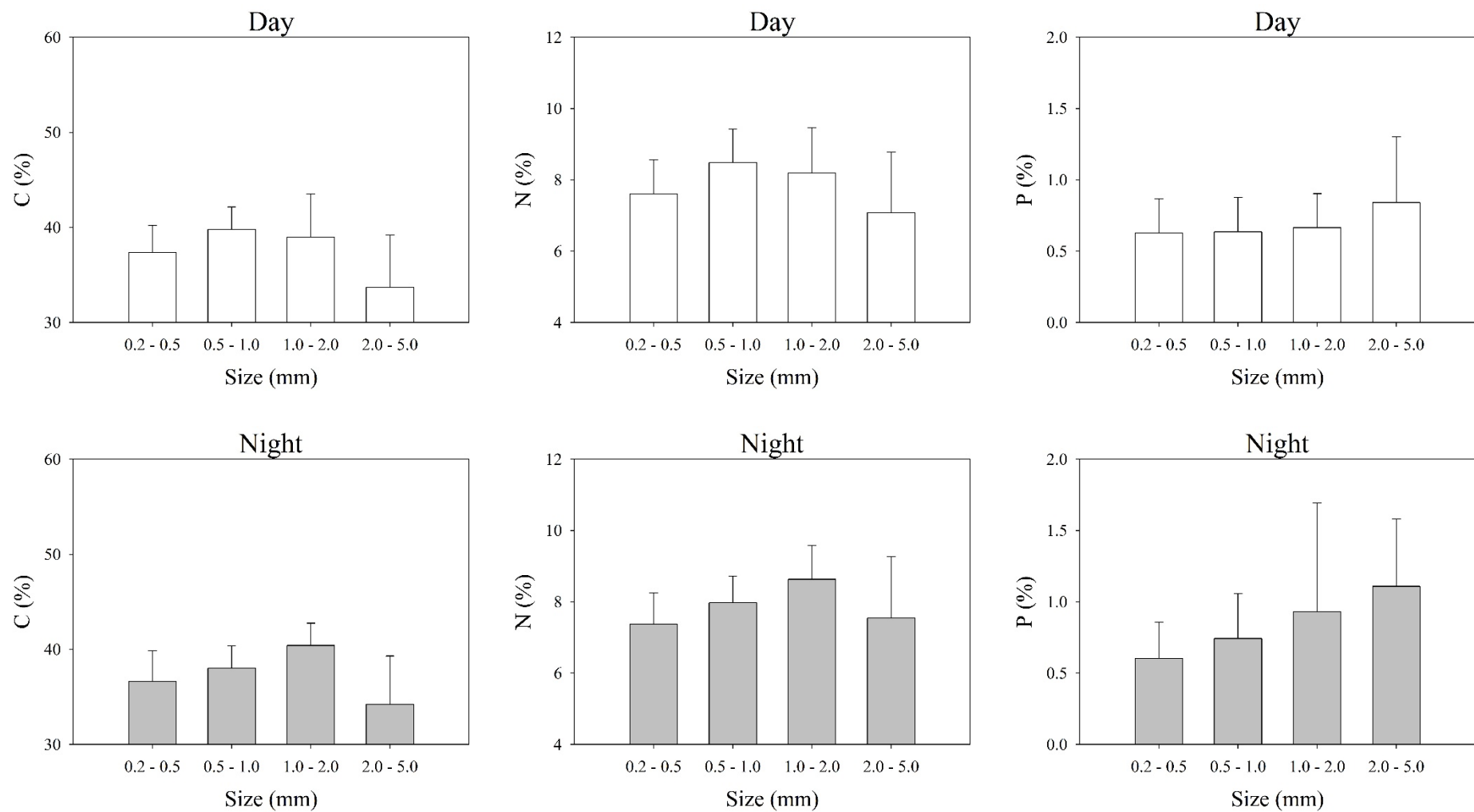


圖 3-47、北南海常態夏季之各體型大小日夜浮游動物體內碳氮磷含量。

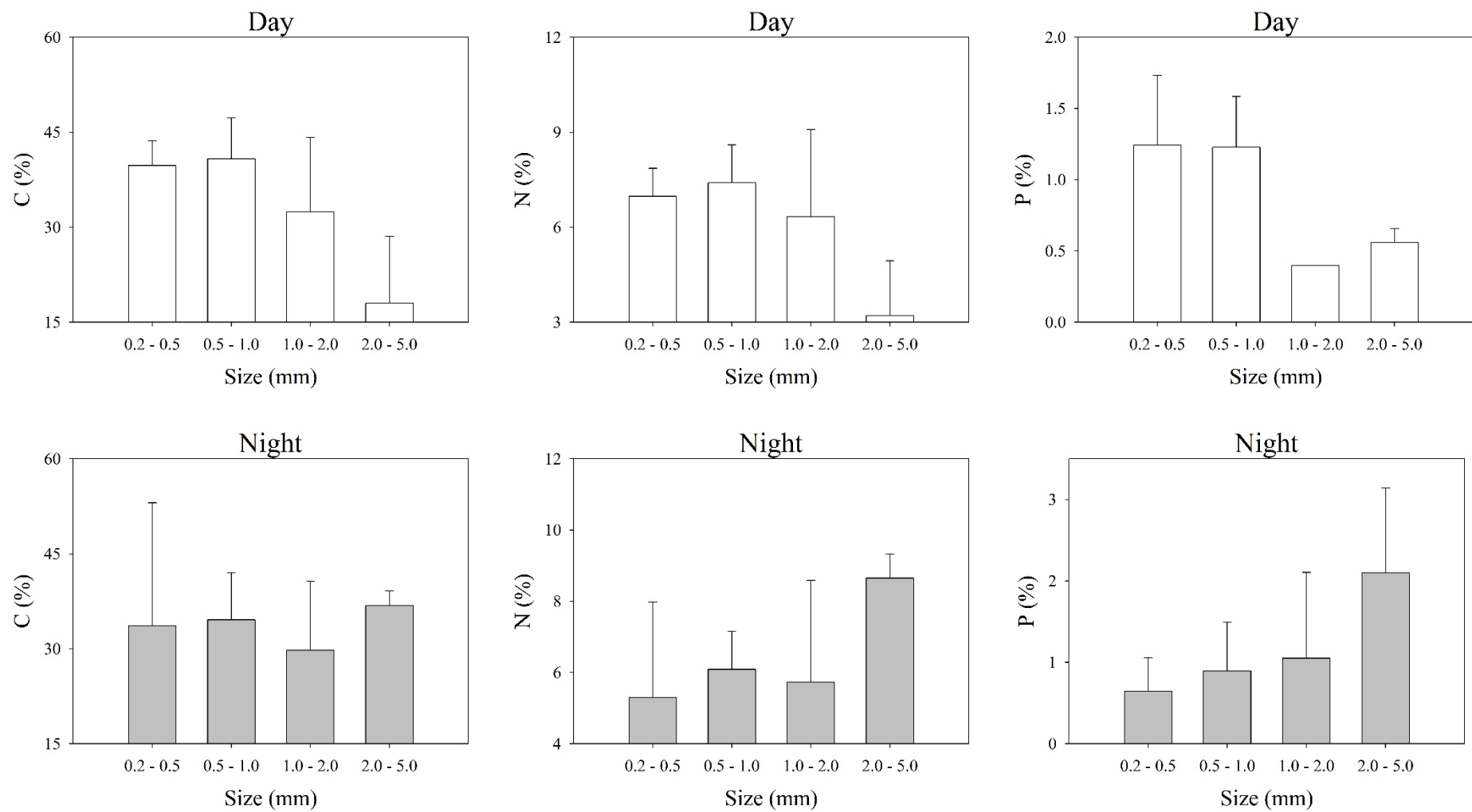


圖 3-48、北南海反渦流事件之各體型大小日夜浮游動物體內碳氮磷含量。

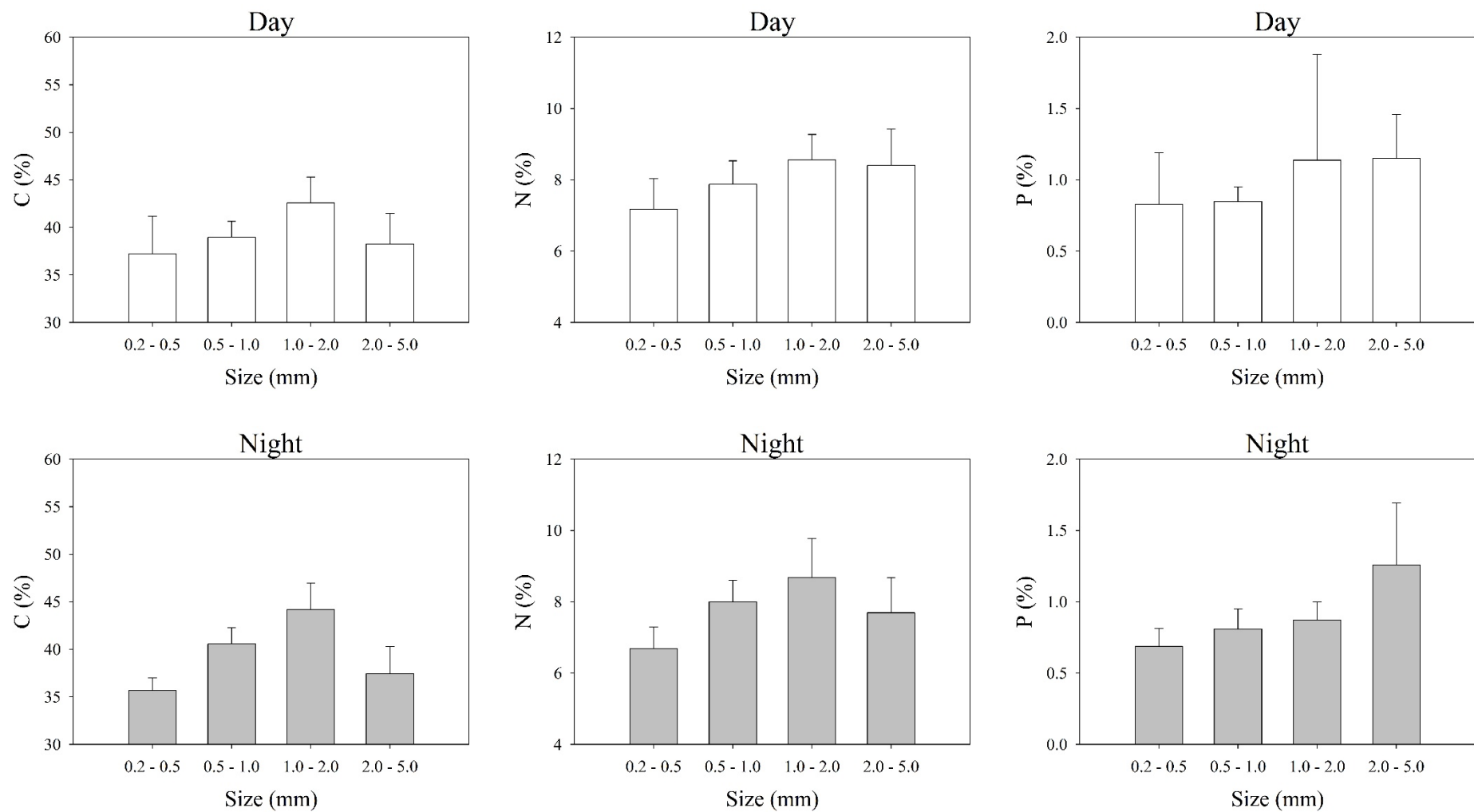


圖 3-49、北南海內波事件之各體型大小日夜浮游動物體內碳氮磷含量。

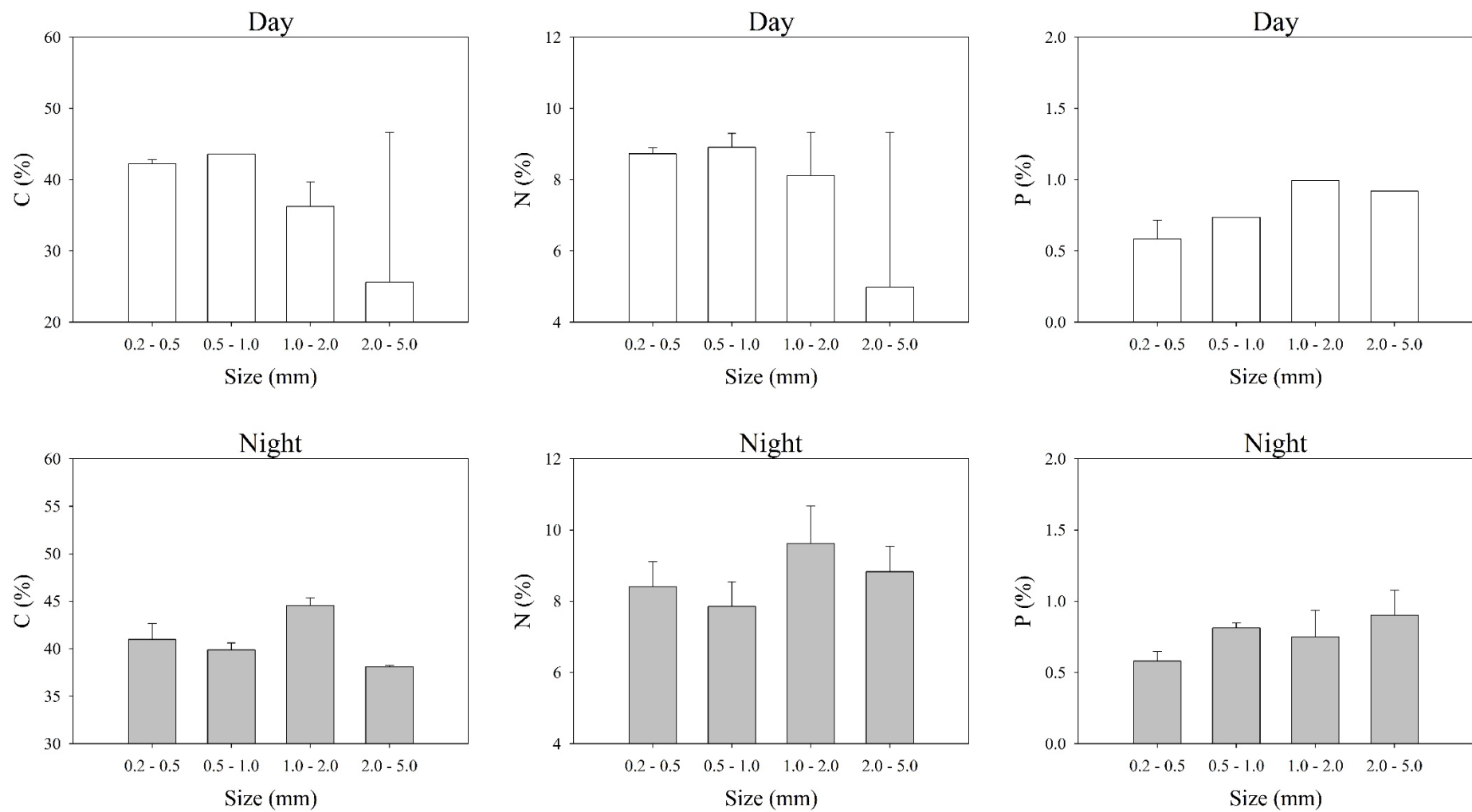


圖 3- 50、西北太平洋之各體型大小日夜浮游動物體內碳氮磷含量。

3.2.4 主動傳輸通量

表 3-4 為北南海常態夏季、特殊事件與西北太平洋之主動傳輸碳氮磷通量，主動傳輸通量包含呼吸碳通量(respiratory flux)、腸道碳通量(gut flux)、死亡碳氮磷通量(mortality flux)與代謝溶解態碳氮磷通量(excreting flux)。主動傳輸各通量於北南海常態夏季結果顯示，常態夏季(ORI-1039)航次結果都明顯低於(ORI-1074)與(ORI-1082)航次之主動傳輸通量，(ORI-1074)航次為常態夏季最高之主動傳輸通量結果。將北南海常態夏季主動傳輸平均並累加各體型大小結果，北南海常態夏季呼吸碳通量為 $13.0 \pm 4.8 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、腸道碳通量為 $6.07 \pm 2.56 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、死亡碳氮磷通量分別為 $2.82 \pm 1.31 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.64 \pm 0.33 (\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.08 \pm 0.06 (\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 與代謝溶解態碳氮磷通量分別為 $3.78 \pm 0.92 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $2.04 \pm 0.49 (\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.29 \pm 0.07 (\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ ；北南海反渦流特殊事件呼吸碳通量為 $37.9 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、腸道碳通量為 $1.46 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、死亡碳氮磷通量分別為 $4.61 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.91 (\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.09 (\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 與代謝溶解態碳氮磷通量分別為 $6.01 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $3.18 (\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.48 (\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ ；北南海內波特殊事件呼吸碳通量為 $59.0 \pm 5.43 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、腸道碳通量為 $17.8 \pm 1.86 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、死亡碳氮磷通量分別為 $8.38 \pm 0.99 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $1.59 \pm 0.26 (\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.26 \pm 0.12 (\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 與代謝溶解態碳氮磷通量分別為 $8.30 \pm 1.21 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $5.67 \pm 0.61 (\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.71 \pm 0.10 (\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 與西北太平洋呼吸碳通量為 $5.32 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、腸道碳通量為 $2.02 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、死亡碳氮磷通量分別為 $1.44 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.33 (\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.01 (\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 與代謝溶解態碳氮磷通量分別為 $1.99 (\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $1.08 (\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 、 $0.15 (\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 。

主動傳輸碳通量為呼吸碳通量、腸道碳通量、死亡碳通量與代謝溶解態有機碳總合；主動傳輸氮通量為死亡氮通量與代謝溶解態有機無機氮總合；主動傳輸磷通量為死亡磷通量與代謝溶解態有機無機磷總合。(圖 3-51)顯示主動傳輸碳氮磷結果，在海洋特殊事件中，主動傳輸明顯高於常態夏季，而在西北太平洋結果則

是最低；另外，(圖 3-52)顯示主動傳輸碳氮磷結果與浮游動物垂直遷移生物量有顯著正相關($P < 0.0001$)。由上述可知，垂直遷移浮游動物生物量較多，進而能增強主動傳輸碳氮磷通量。從食物鏈的觀點而言，海洋中浮游動物的多寡主要是受到海洋基礎生產力的影響，基礎生產力強弱受限於透光層中營養鹽，而將北南海常態夏季、反渦流事件與東沙內波 200m 以淺之日夜葉綠素螢光值對深度的垂直分佈畫圖(圖 3-53)，在北南海東沙內波海域之葉綠素螢光值有明顯最大值，反渦流事件因受特殊事件影響而讓葉綠素混合相當均勻，葉綠素螢光值的不同，可能改變游動物生物量的多寡。因此另外將本研究各測站點之透光層葉綠素與營養鹽(DIN)積分和透光層葉綠素積分與垂直遷移浮游動物生物量關係性圖(圖 3-54)，結果皆顯示為明顯正相關，而主動傳輸碳通量與透光層中的營養鹽和葉綠素積皆有顯著正相關(圖 3-55)。整合上述資訊，顯示北南海海域在常態夏季、內波和反渦流海洋特殊事件與西北太平洋的浮游動物垂直遷移行為中，主動傳輸碳氮磷通量的結果大致為內波特殊事件大於反渦流特殊事件且高於常態夏季，而西北太平洋之主動傳輸碳氮磷通量為最低。造成此結果原因為當透光層營養鹽存量較高，可促進浮游植物生長，而浮游動物隨之增加，浮游動物存量的增加而導致了主動傳輸之各通量增加。

呼吸通量、死亡通量、腸道通量與代謝溶解態有機碳通量佔主動傳輸總碳通量百分比結果為(圖 3-56)，由此結果可明顯看出，呼吸通量佔整體主動傳輸碳通量為主要貢獻(約 49.4-75.8%)，而死亡通量為最低(約 8.99-13.4%)。整理其他學者對呼吸通量佔主動傳輸總碳通量百分比之研究結果，根據前人研究，西太平洋赤道(western equatorial Pacific)附近其呼吸通量約佔 54.6% (Hidaka et al., 2001)、西北太平洋呼吸通量約佔 61.8-63.0% (Kobari et al., 2013)、BATS 測站之馬尾藻海(Sargasso Sea) 呼吸通量約佔 75% (Steinberg et al., 2000)、大西洋加那利群島(Canary Island) 在反渦流特殊事件呼吸通量佔 95.0% (Yebra et al., 2005)，而在晚冬藻華特殊事件呼吸通量佔 88.0% (Putzeys et al., 2011)。本研究所得呼吸通量佔主動傳輸總碳通量百

分比介於先前研究之範圍，差異不大。但本研究考慮更多種可能存在之碳通量(死亡通量、腸道通量與代謝溶解態有機碳)，當更能接近生物體存在之生理作用與真實主動傳輸碳通量。

本研究於北南海常態夏季、內波事件與西北太平洋之主動傳輸碳氮磷通量相對於生物幫浦所佔比例結果列於表 3-5，而生物幫浦包含了主動傳輸、被動傳輸與溶解物質垂直擴散之通量，因反渦流事件被動傳輸採樣失敗，而不列入。此結果來看，生物幫浦之總碳氮磷與主動傳輸在內波特殊事件各通量為最高，其次為北南海常態夏季，而最低為西北太平洋。主動傳輸佔生物幫浦碳氮磷通量百分比於北南海常態夏季分別為 $34.5 \pm 3.75\%$ 、 $38.6 \pm 8.25\%$ 與 $36.7 \pm 2.62\%$ ；在內波特殊事件主動傳輸碳氮磷百分比分別為 28.6% 、 31.3% 與 26.2% ；在西北太平洋，主動傳輸碳與磷百分比與北南海常態夏季差異不大，氮百分比略低。由北南海結果來看，生物幫浦中的被動傳輸與溶解有機物質的通量受特殊事件影響，比主動傳輸還來得更加明顯。因此可推估，在海洋特殊事件中，更能增加生物幫浦對碳氮磷之有效垂直輸送。

比較其他條件之浮游動物垂直遷移生物量、主動傳輸碳通量與主被動通量百分比結果(表 3-6)，由不同作者在 ALOHA 測站觀測結果顯示(Hernández-León et al., 2001; Steinberg et al., 2008)，在夏季時期，浮游動物垂直遷移生物量與呼吸通量結果差異不大，而冬季略為偏低；而本研究結果在北南海常態夏季與反渦流事件有兩倍的差距，此一方面可能與季節變化有關，另一方面可能受渦流效應影響。整合國外學者在 Canary Island 海域的相關研究可發現(Yebra et al., 2005)，在皆為夏季時期，無渦流特殊事件影響之下，垂直遷移生物量為 580 mg C m^{-2} 與呼吸通量為 $1.85 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ；受渦流特殊事件影響下，垂直遷移生物量增加至 1280 mg C m^{-2} ，呼吸通量增為 $8.28 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，渦流事件下差異明顯。本研究於常態夏季與反渦流事件所造成明顯垂直遷移生物量與呼吸通量差異，可能受反渦流事件下所帶來的影響大於季節性的影響；另外，在常態夏季與反渦流事件之腸道通量結果呈現

相反，為常態夏季高於反渦流事件，並非與垂直遷移生物量成正相關。若以浮游動捕食觀點來看，大致上我們常認定浮游動物是以浮游植物為食物來源並生長，而 Alldredge et al. (1998)發現浮游動物除了以浮游植物做為食物來源外，也會以”海洋雪(marine snow)”做為食物來源，包含了死亡之沉降藻類(algae)、糞便顆粒(fecal pellets)與生物殼體。反渦流特殊事件能更有效將海洋雪垂直輸送至深海中(Aristegui et al., 1994;1997)，進而提供給可垂直遷移與非垂直遷移浮游動物(migrant and non-migrant zooplankton)更多食物來源(Turner, 2002)。這些浮游動物攝食大量非浮游植物為主的食物來源，會造成腸道葉綠素值偏低，此原因乃為腸道通量主要是以測量動物腸道之浮游植物含量為主的推導方法(Angel, 1985)，若攝食浮游植物以外食物，會造成腸道通量被低估。本研究在北南海常態夏季或特殊事件與西北太平洋之主動傳輸碳通量結果皆高於其他太平洋區域之結果，而與被動傳輸總合之百分比(POC %)結果也高於太平洋與大西洋結果。在最大邊緣海之北南海中，主動傳輸在生物幫浦具有顯要影響力，但先前研究都忽略這問題，是有可能會低估生物幫浦對碳氮磷垂直向下傳輸之結果。

表 3-4、本研究於北南海常態夏季、特殊事件與西北太平洋之各體型大小主動傳輸通量。

Event/size fraction	Respiratory flux [*]	Gut flux [*]	Mortality carbon flux [*]	Mortality nitrogen flux [#]	Mortality phosphorus flux ⁺	Excreting DOC [*]	Excreting nitrogen flux [#]	Excreting phosphorus flux ⁺
Regular summer								
ORI-1039								
0.2-0.5 mm	3.55±1.67	0.97±0.63	0.26±0.23	0.04±0.01	0.008±0.002	1.29±0.10	0.73±0.04	0.10±0.01
0.5-1.0 mm	1.62±0.95	0.83±0.28	0.20±0.10	0.02±0.01	0.002±0.001	0.59±0.01	0.33±0.01	0.05±0.01
1.0-2.0 mm	2.17±2.19	0.52±0.06	0.63±0.53	0.13±0.02	0.011±0.004	0.63±0.44	0.33±0.12	0.05±0.02
2.0-5.0 mm	0.14±0.10	0.82±0.69	0.42±0.04	0.08±0.01	0.015±0.001	0.24±0.08	0.12±0.03	0.02±0.01
Total (>0.2 mm)	7.44±2.92	3.14±0.98	1.51±0.59	0.27±0.13	0.04±0.01	2.75±0.46	1.50±0.23	0.29±0.07
Regular summer								
ORI-1074								
0.2-0.5 mm	5.67±1.05	2.51±0.09	0.41±0.15	0.13±0.04	0.011±0.002	1.06±0.17	0.61±0.10	0.08±0.02
0.5-1.0 mm	5.45±0.41	1.73±0.98	0.75±0.02	0.15±0.06	0.013±0.006	1.21±0.12	0.67±0.06	0.09±0.01

1.0-2.0 mm	3.68±2.81	2.28±0.70	1.22±0.91	0.24±0.14	0.009±0.005	1.28±1.33	0.69±0.41	0.10±.001
2.0-5.0 mm	1.66±2.04	1.38±1.17	1.14±0.23	0.25±0.08	0.027±0.002	0.98±0.28	0.48±0.15	0.08±0.02
Total (>0.2 mm)	16.5±3.65	7.90±1.68	3.53±0.95	0.76±0.17	0.06±0.01	4.53±1.38	0.24±0.74	0.34±0.10
Regular summer								
ORI-1082								
0.2-0.5 mm	3.57±0.18	4.10±1.97	0.62±0.06	0.17±0.03	0.013±0.010	1.27±0.40	0.72±0.21	0.10±0.03
0.5-1.0 mm	5.30±0.26	2.19±1.95	0.49±0.28	0.14±0.04	0.019±0.008	1.08±0.28	0.59±0.15	0.08±0.02
1.0-2.0 mm	3.47±0.14	0.47±0.26	0.95±0.12	0.25±0.01	0.054±0.031	0.88±0.20	0.46±0.11	0.07±0.01
2.0-5.0 mm	2.68±2.39	0.41±0.47	1.34±0.47	0.33±0.06	0.054±0.026	0.85±0.56	0.41±0.28	0.07±0.04
Total (>0.2 mm)	15.0±2.41	7.17±2.82	3.40±0.57	0.89±0.08	0.14±0.05	4.07±0.77	2.18±0.40	0.31±0.06
Grand average								
Regular summer								
0.2-0.5 mm	4.25±1.23	2.52±1.56	0.43±0.18	0.11±0.07	0.010±0.003	1.21±0.13	0.69±0.07	0.09±0.01

0.5-1.0 mm	4.13±2.17	1.59±0.69	0.48±0.28	0.10±0.07	0.012±0.008	0.96±0.32	0.53±0.18	0.07±0.02
1.0-2.0 mm	3.11±0.82	1.09±1.03	0.93±0.29	0.21±0.07	0.025±0.020	0.93±0.33	0.49±0.18	0.07±0.02
2.0-5.0 mm	1.49±1.2	0.87±0.49	0.97±0.49	0.22±0.12	0.032±0.020	0.69±0.40	0.34±0.19	0.06±0.03
Total (>0.2 mm)	13.0±4.84	6.07±2.56	2.82±1.31	0.64±0.33	0.079±0.055	3.78±0.92	2.04±0.49	0.029±0.07
Anticyclonic eddy								
0.2-0.5 mm	17.8	0.81	1.05	0.14	0.01	2.49	1.39	0.19
0.5-1.0 mm	10.4	0.25	0.64	0.11	0.001	1.31	0.70	0.10
1.0-2.0 mm	8.92	0.18	0.93	0.16	0.02	1.45	0.74	0.12
2.0-5.0 mm	0.84	0.22	2.06	0.51	0.06	0.76	0.35	0.06
Total (>0.2 mm)	37.9	1.46	4.61	0.33	0.09	6.01	3.18	0.48
Dongsha-internal waves								
0.2-0.5 mm	17.97±0.86	5.31±0.71	1.78±0.34	0.32±0.09	0.08±0.05	2.53±1.14	2.01±0.56	0.23±0.10
0.5-1.0 mm	21.3±0.73	4.64±0.78	2.15±0.47	0.40±0.12	0.03±0.004	2.52±0.24	1.69±0.17	0.21±0.00

1.0-2.0 mm	15.9±1.01	3.62±1.51	2.77±0.66	0.55±0.19	0.10±0.08	2.29±0.31	1.43±0.18	0.19±0.01
2.0-5.0 mm	3.88±5.21	4.19±0.25	1.68±0.46	0.32±0.08	0.06±0.04	0.96±0.12	0.54±0.07	0.08±0.02
Total (>0.2 mm)	59.0±5.43	17.75±1.86	8.38±0.99	1.59±0.26	0.27±0.12	8.30±1.21	5.67±0.61	0.71±0.10
Northwest Pacific								
0.2-0.5 mm	2.46	0.48	0.25	0.05	0.004	0.69	0.39	0.05
0.5-1.0 mm	1.43	0.51	0.08	0.01	0.002	0.31	0.17	0.02
1.0-2.0 mm	0.73	0.32	0.74	0.16	0.001	0.65	0.34	0.05
2.0-5.0 mm	0.70	0.71	0.38	0.10	0.003	0.34	0.17	0.03
Total (>0.2 mm)	5.32	2.02	1.44	0.33	0.01	1.99	1.08	0.15

*Active carbon flux = mg C m⁻² d⁻¹

Active nitrogen flux = mg N m⁻² d⁻¹

⁺ Active phosphorus flux = mg P m⁻² d⁻¹

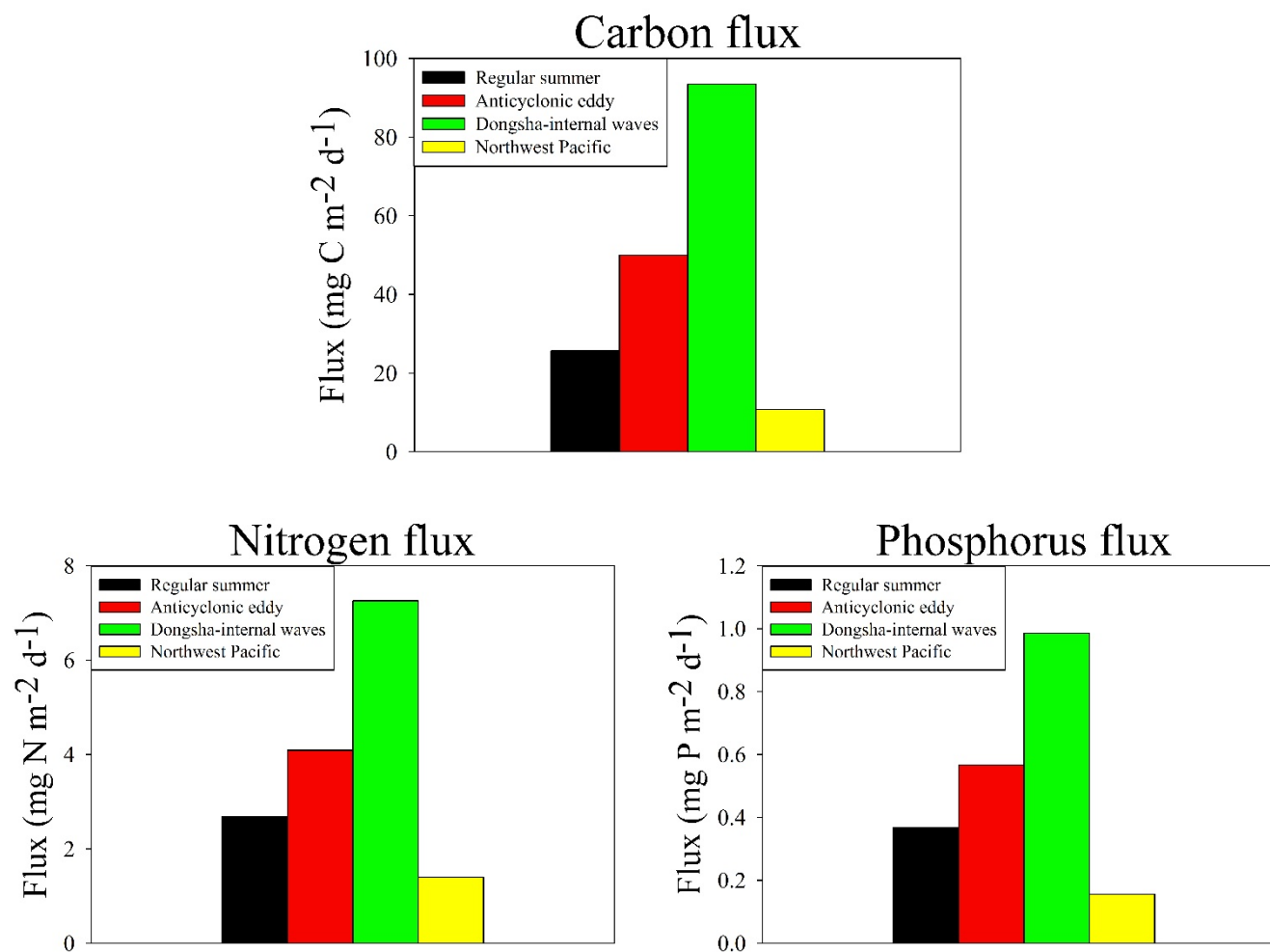


圖 3-51、主動傳輸碳氮磷通量在本研究不同條件之結果。

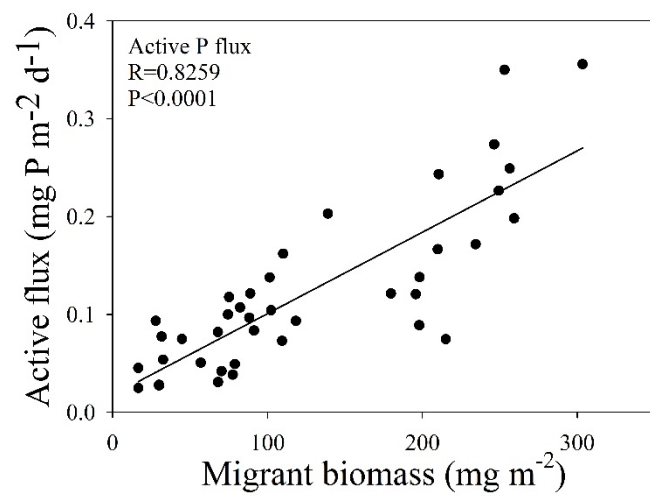
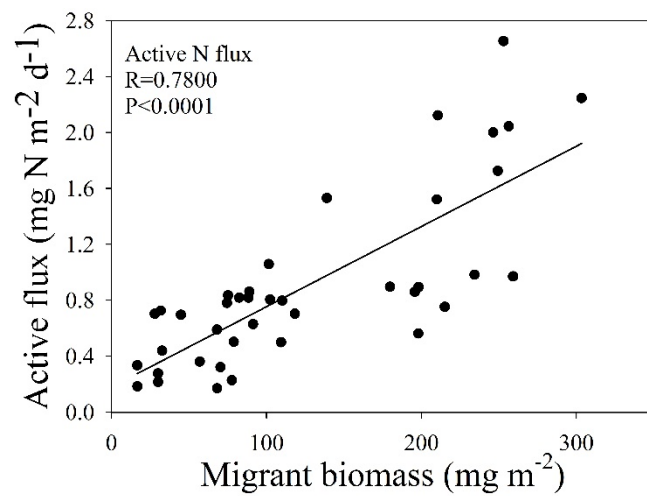
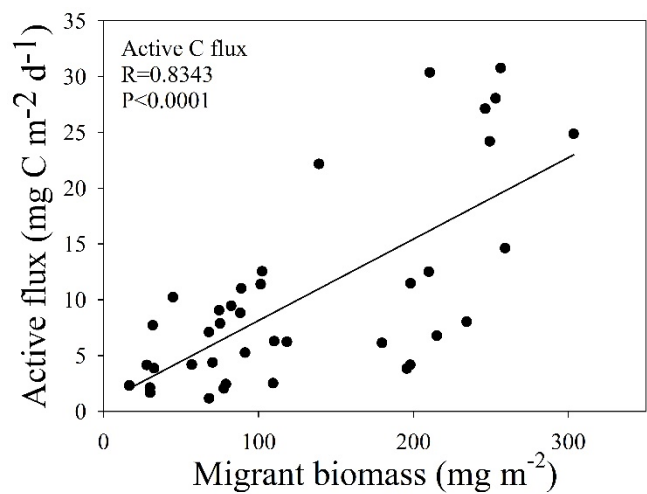


圖 3- 52、主動傳輸碳氮磷通量與垂直遷移浮游動物生物量相關性圖。

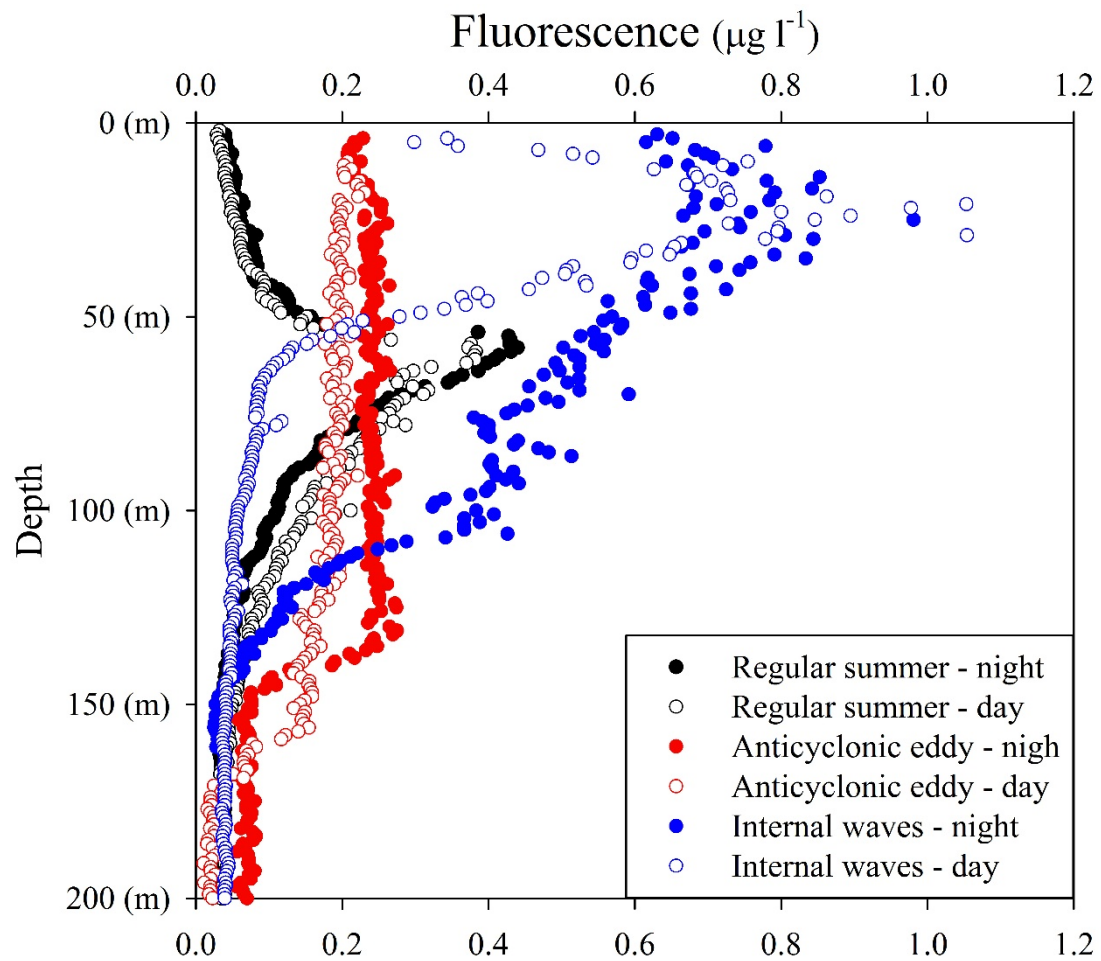


圖 3- 53、北南海常態夏季、反渦流事件與東沙內波 200m 以淺之日夜葉綠素螢光
值對深度的垂直分佈。

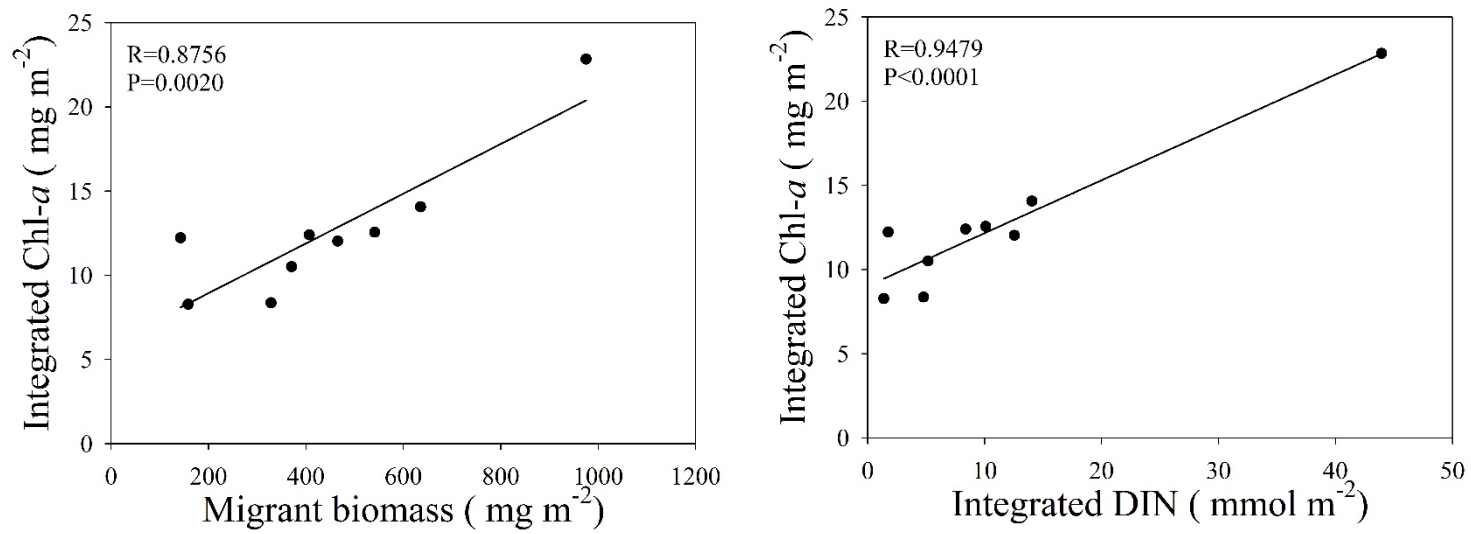


圖 3- 54、透光層葉綠素積分與垂直遷移浮游動物生物量和營養鹽(DIN)積分相關性圖。

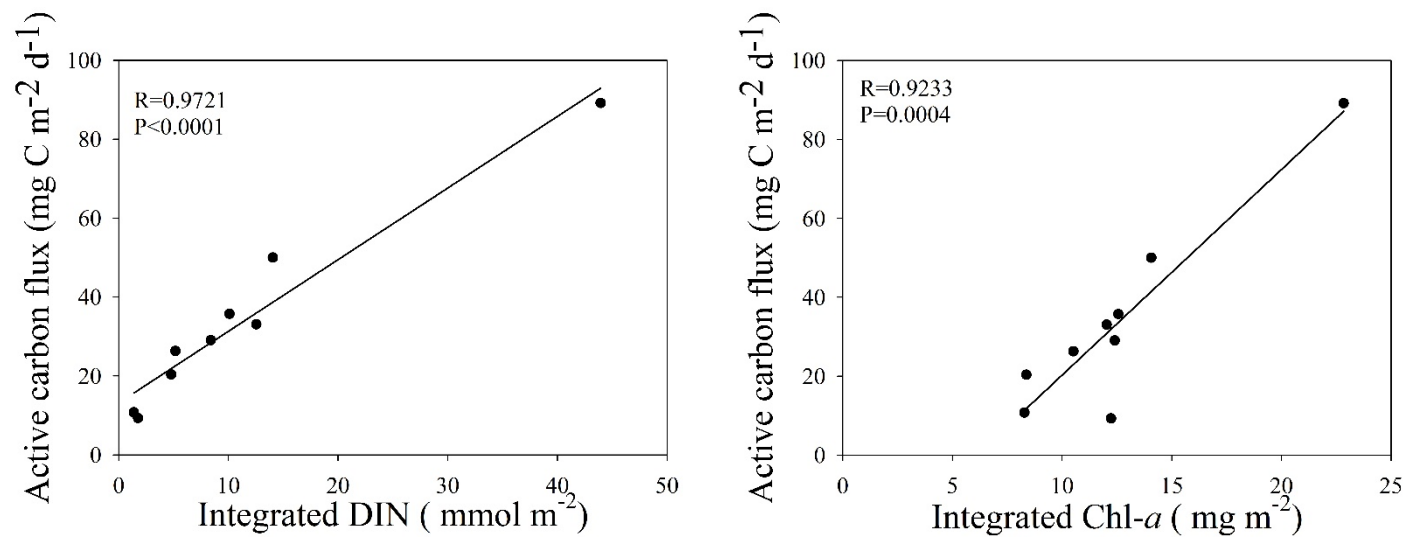


圖 3-55、主動傳輸碳通量與透光層中營養鹽和葉綠素積分相關性圖。

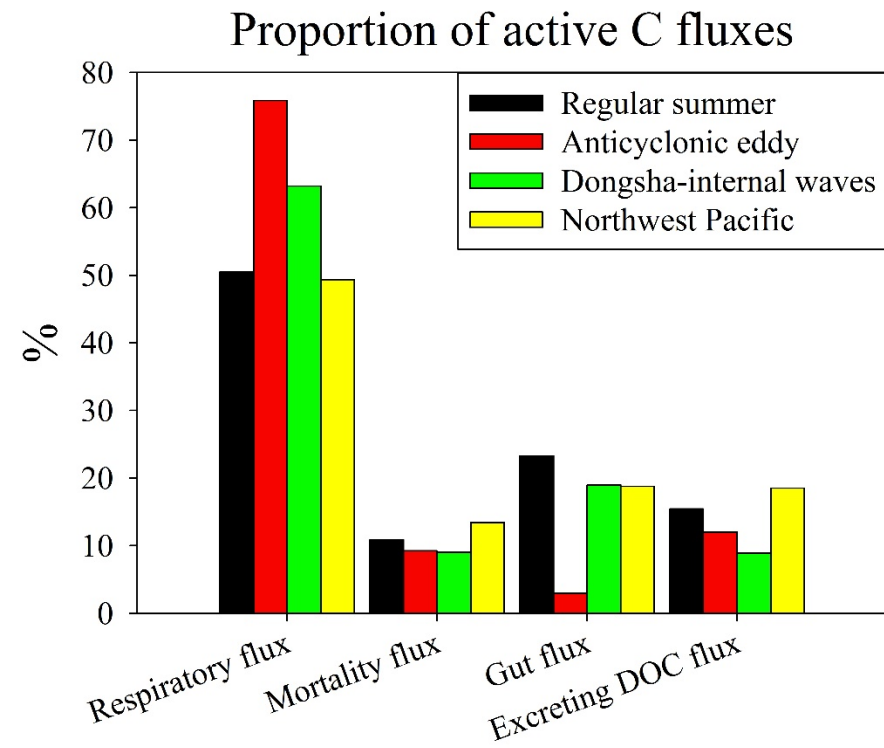


圖 3- 56、呼吸通量、死亡通量、腸道通量與代謝溶解態有機碳通量佔主動傳輸總碳通量百分比。

表 3-5、本研究於北南海常態夏季、內波事件與西北太平洋之主動傳輸碳氮磷通量於生物幫浦比例。

Event	Carbon flux (mg C m ⁻² d ⁻¹)		Nitrogen flux (mg N m ⁻² d ⁻¹)		Phosphorus flux (mg P m ⁻² d ⁻¹)	
	Total flux*	Active flux	Total flux	Active flux	Total flux	Active flux
Regular summer	72.8±20.9	25.6±9.45 (34.5±3.75%) [#]	6.90±1.25	2.68±0.79 (38.6±8.25%) [#]	1.00±0.28	0.37±0.11 (36.7±2.62%) [#]
Dongsha-internal waves	327	93.4 (28.6%) [#]	23.2	7.26 (31.3%) [#]	3.76	0.99 (26.2%) [#]
Northwest Pacific	33.4	10.9 (32.4%) [#]	5.44	1.40 (25.8%) [#]	0.48	0.16 (32.8%) [#]

*Total flux = Active flux (本研究) + Passive flux (林宗瑩數據) + Diffusion flux

[#] % Active flux = (Active flux) / (Total flux)*100

表 3-6、本研究浮動動物垂直遷移生物量與主動傳輸碳通量結果與其他學者之主動傳輸碳通量結果做比較。

Location (Reference)	Time of month	Migrant biomass*	Respiratory flux [#]	Gut flux [#]	Mortality flux [#]	Excreting DOC [#]	% of POC
ALOHA (Hussain Al-Mutairi and Landry, 2008)	Summer	157	3.80	-	-	-	14
	Winter	140	3.24	-	-	-	16
ALOHA (Steinberg et al., 2008)	June-July	158	3.65	-	-	-	18
BATS (Dam et al., 1995)	March/April	191	14.5	-	-	-	34
Canary Islands in anticyclonic eddy (Yebra et al., 2005)	July	1280	8.28	0.14	-	-	53
Canary Islands in summer (Yebra et al., 2005)	July	580	1.85	0.44	-	-	14

Northwest Pacific (Kobari et al., 2013)	February	98.5	1.7	0.5	-	-	9.78
Western Equator (Le Borgne and Rodier, 1997)	October	47.2	3	-	-	-	6
NSCS in regular summer (Present study)	Summer	141±58.1	13.0±4.84	6.07±2.56	2.82±1.13	3.78±0.92	49.3
NSCS in anticyclonic eddy (Present study)	December	231	37.9	1.46	4.61	6.01	-
Dongsha in internal waves (Present study)	June/July	419±3.29	59.0±5.43	17.8±1.86	8.38±0.99	8.30±1.21	35.9
Northwest Pacific (Present study)	March/April	72.2	5.32	2.02	1.44	1.99	36.9

* Migrant biomass = mg C m⁻²

Active carbon flux = mg C m⁻² d⁻¹

第四章、結論

一、浮游動物在此研究中確實有明顯的日夜遷移現象，經由魚探儀之掃描結果可得知浮游動物日夜垂直距離可達 300 公尺左右；時間序列之拖網結果亦明顯指出，在白天 12:00 時，200 公尺內之浮游動物生物量與個體豐度皆是最低，而凌晨 1:00 左右則是最高。

二、垂直遷移生物量結果顯示，北南海有特殊事件發生時(內波事件為 997 mg DW m^{-2} ，反渦流事件為 635 mg DW m^{-2})，其垂直遷移生物量高於北南海常態夏季 (376 mg DW m^{-2})，而西北太平洋之春季結果乃為最低(158 mg DW m^{-2})。而浮游動物各體型大小之夜日生物量比值結果顯示，體型越大(2.0-5.0mm 和 1.0-2.0mm)的浮游動物其貢獻垂直遷移生物量較為顯著。

三、浮游動物體內碳氮磷含量於北南海為 $37.5 \pm 4.48\%$ 、 $7.76 \pm 1.36\%$ 與 $0.81 \pm 0.45\%$ ($\text{C}_{120}\text{N}_{21}\text{P}_1$)，西北太平洋為 $38.9 \pm 8.05\%$ 、 $8.18 \pm 1.84\%$ 與 $0.76 \pm 0.17\%$ ($\text{C}_{132}\text{N}_{24}\text{P}_1$)。本次研究結果與先前研究浮游動物體內碳氮含量報導相當一致，而浮游動物體內磷含量差異較大，乃是生物體內生物化學因素造成生物體內磷的含量變化比碳氮更加顯著。

四、主動傳輸碳氮磷通量結果為北南海特殊事件高於北南海常態夏季，西北太平洋為最低；而主動傳輸碳通量可看出，呼吸碳通量在主動傳輸總碳通量為主要貢獻的途徑(約 49.4%-75.8%)，此結果介於先前研究報導範圍，差異不大。本研究進一步發現，主動傳輸碳氮磷通量與垂直遷移生物量有顯著正相關，表示各通量變化主要受遷移生物量所控制。而透光層中葉綠素貯存量與垂直遷移浮游動物生物量和透光層中營養鹽(DIN)貯存量皆成正相關；主動傳輸通量也與透光層之葉綠素和 DIN 貯存量有顯著相關性，暗示主動傳輸通量的多寡，是受到海洋基礎生產力強弱的影響。

五、北南海之主動傳輸碳通量結果皆高於 ALOHA 測站；而在 Canary Islands 研究結果中，反渦流特殊事件之垂直遷移生物量與呼吸碳通量皆為增加，而腸道

碳通量則反之，變化趨勢與北南海之結果有相同趨勢。而本次研究相較於先前研究報導有考慮更多種可能存在之通量，更能接近浮游動物真實的主動傳輸通量。

六、主動傳輸碳氮磷通量相對於生物幫浦所佔比例結果顯示，北南海常態夏季為 $34.5 \pm 3.75\%$ 、 $38.6 \pm 8.25\%$ 與 $36.7 \pm 2.62\%$ 、而內波事件為 28.6% 、 31.3% 與 26.2% 與西北太平洋為 32.4% 、 25.8% 與 32.8% 。主動傳輸所佔生物幫浦比例有明顯影響力，若忽略主動傳輸所帶來影響，極可能會低估生物幫浦對碳氮磷垂直向下輸送結果。本研究進一步發現，北南海於特殊事件發生時，主動傳輸所佔生物幫浦比例略為下降，暗示著海洋特殊事件的發生，被動傳輸與溶解物質垂直擴散通量可能比主動傳輸對碳氮磷之向下傳輸更為有效的傳輸途徑。

第五章、參考文獻

網站

Asia-Pacific Data-Research Center, APDRC

<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>

Colorado Center for Astrodynamics Research, CCAR

http://eddy.colorado.edu/ccar/ssh/nrt_global_grid_viewer

National Oceanic and Atmospheric Administration

<http://www.noaa.gov/>

中文部份

王胄、陳慶生，1987，南海北部之暖心渦流(一)對南海暖渦之初步觀測。臺灣大學海洋學刊，n.18:92-103。

向之郢，2006，呂宋海峽兩側有機碳化學之研究。中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，共 128 頁。

呂婉慈，2009，夏季東海與台灣海峽溶解態有機物質之分佈與光學特徵。中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，共 104 頁。

周文臣，2004，南海時間序列測站海水之碳化學參數與碳-13 之垂直分佈及其在混合層中的季節變化。國立中山大學海洋地質及化學研究所博士論文，共 211 頁。

施詠嚴，2004，南海時間序列測站 2002-2004 年間溶解態無機碳之時續變化；淨族群生產力之評估。國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，共 68

頁。

許家維，2010，南海時間序列測站沉降通量變化之研究。中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，共 62 頁。

陳鎮東，1994，海洋化學。國立編譯館，共 551 頁。

葉秀貞，2014，2011 年冬季及 2012 年夏季北南海碳化學參數之分布特徵。國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，共 84 頁。

蔡聖賢，2008，台灣東部黑潮海域氮與磷溶解態物種之分佈。國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，共 95 頁。

英文部份

Alford, M. H., Lien, R.-C., Simmons, H., Klymak, J., Ramp, S., Yang, Y. J., Tang, D. and Chang, M.-H. (2010) Speed and evolution of nonlinear internal waves transiting the South China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 40:1338-1355.

Allredge, A. L., Passow, U. and Haddock, S. H. D. (1998) The characteristics and transparent exopolymer particle (TEP) content on marine snow formed from thecate dinoflagellates. *Journal of Plankton Research*, 20:393-406.

Al-Mutairi, H. and Landry, M. R. (2001) Active export of carbon and nitrogen at Station ALOHA by diel migrant zooplankton. *Deep-Sea Research Part II*, 48:2083-2103.

Angel, M. V. (1985) Vertical migrations in the oceanic realm: possible causes and probable effects. *Contributions in Marine Science*, 27:45-70.

Arístegui, J., Sangrá, P., Hernández-León, S., Cantón, M., Hernández-Guerra, A. and Kerling, J. L. (1994) Island-induced eddies in the Canary Islands. *Deep-Sea Research Part I*, 41:1509-1525.

Arístegui, J., Tett, P., Hernández-León, A., Basterretxea, G., Montero, M. F., Wild, K., Sangrá, P., Hernández-León, S., Cantón, M., García-Braun, J. A., Pacheco, M.,

- Barton, E. D. (1997) The influence of island-generated eddies on chlorophyll distribution: a study of mesoscale variation around Gran Canaria. *Deep-Sea Research Part I*, 44:71-96.
- Aspila, K. I., Agemian, H. and Chau, A. S. Y. (1976) A semiautomated method for determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments. *Analyst*, 101:187-197.
- Atkinson, A., Ward, P. and Murphy, E. J. (1996) Diel periodicity of Subantarctic copepods: relationships between vertical migration, gut fullness, and evacuation rate. *Journal of Plankton Research*, 18:1387-1405.
- Bamstedt, U. (1986) Chemical composition and energy content. In Comer, E. D. S. and O'Hara, S. C. M. (eds). *The Biological Chemistry of Marine Copepods*. Clarendon Press, Oxford, 1-58.
- Borgne, R. L. and Rodier, M. (1997) Net zooplankton and the biological pump: a comparison between the oligotrophic and mesotrophic equatorial Pacific. *Deep-Sea Research Part II*, 44:2003-2023.
- Chen, C. T. A., Wang, S. L., Wang, B. J. and Pai, S. C. (2001) Nutrient budgets for the South China Sea basin. *Marine Chemistry*, 75:281-300.
- Chen, G., Ho, Y. and Chu, X. (2011) Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure. *Journal of Geophysical Research*, 116:C06018.
- Chen, Y.-l. L. and Chen, H.-Y. (2006) Seasonal dynamics of primary and new production in the northern South China Sea: The significance of river discharge and nutrient advection. *Deep-Sea Research Part I*, 53:971-986.
- Chou, W.-C., Chen, Y.-L., Sheu, D. D., Shih, Y.-Y., Han, C.-A., Cho, C. L., Tseng, C.-M. and Yang, Y.-J. (2006) Estimated net community production during the

- summertime at the SEATS time-series study site, northern South China Sea: Implications for nitrogen fixation. *Geophysical Research Letters*, 33:L22610, 5pp.
- Dagg, M. J., and Wyman, K. D. (1983) Natural ingestion rates of the copepods *Neocalanus plumchrus* and *N. cristatus* calculated from gut contents. *Marine Ecology Progress Series*, 13:37-46.
- Dam, H. G. and Peterson, W. T. (1988) The effect of temperature on the clearance rates constant of planktonic copepods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 123:1-14.
- Dam, H. G. and Peterson, W. T. (1993) Seasonal contrasts in the diel vertical distribution, feeding behavior, and grazing impact of the copepod *Temora Zongicornis* in Long Island Sound. *Journal of Marine Research*, 51:561-594.
- Dam, H. G., Roman, M. R. and Youngbluth, M. J. (1995) Downward export of respiratory carbon and dissolved inorganic nitrogen by diel-migrant mesozooplankton at the JGOFS Bermuda time-series station. *Deep-Sea Research Part I*, 42:1187-1197.
- Ducklow, H. W., Steinberg, D. K. and Buesseler, K. O. (2001) Upper Ocean Carbon Export and the biological pump. *Oceanography*, 14:50-58.
- Falkowski, P. G., Barber, R. T. and Smetacek, V. (1998) Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281:200-206.
- Fan, K.-L., and Yu, C.-Y. (1981) A study of water masses in the seas of southmost Taiwan. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 12:94-111.
- Feely, R. A., Sarbine, C. L., Takahashi, T. and Wanninkhof, R. (2001) Uptake and storage of carbon dioxide in the ocean: the global CO₂ survey. *Oceanography*, 14:18-32.
- Gismervik, I. (1997) Stoichiometry of some marine planktonic crustaceans. *Journal of*

- Plankton Research, 19:279-285.
- Gnaiger, E. (1983) Calculation of energetic and biochemical equivalents of respiratory oxygen consumption. Polarographic oxygen sensors, Springer-Verlag, Berlin, 337-345.
- Hannides, C. C. S., Landry, M. R., Benitez-Nelson, C. R., Styles, R. M., Montoya, J. P. and Karl, D. M. (2009) Export stoichiometry and migrant-mediated flux of phosphorus in the North Pacific Subtropical Gyre. Deep-Sea Research Part I, 56:73-88.
- Hays, G. C. (2003) A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations. Hydrobiologia, 503:163-170.
- Hays, G. C., Harris, R. P. and Head, R. N. (1997) The vertical nitrogen flux caused by zooplankton diel vertical migration. Marine Ecology Progress Series, 160:57-62.
- Hedges, J. I. (1987) Organic matter in sea water. Nature, 330:205-206.
- Hernández-León, S., Almeida, C., Gómez, M., Torres, S., Montero, I. and Portillo-Hahnefeld, A. (2001) Zooplankton biomass and indices of feeding and metabolism in island-generated eddies around Gran Canaria. Journal of Marine Systems, 30:51-66.
- Hidaka, K., Kawaguchi, K., Murakami, M. and Takahashi, M. (2001) Downward transport of organic carbon by diel migratory micronekton in the western equatorial Pacific: its quantitative and qualitative importance. Deep-Sea Research Part I, 48:1923-1939.
- Ho, T.-Y., You, C.-F., Chou, W.-C., Pai, S.-C., Wen, L.-S. and Sheu, D. D. (2009) Cadmium and phosphorus cycling in the water column of the South China Sea: The roles of biotic and abiotic particles. Marine Chemistry, 115:125-133.
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Nogueira, M., Linden, P. J. and Xiaosu, D. (2001)

- Climate Change 2001: The Scientific Basis contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 944PP.
- Hu, J. Y., Kawamura, H., Hong, H. and Qi, Y. Q. (2000) A review on the currents in the South China Sea: seasonal circulation, South China Sea Warm Current and Kuroshio intrusion. *Oceanography*, 56:607-624.
- Hu, V. J. H. (1978) Relationships between vertical migration and diet in four species of euphausiids. *Limnology and Oceanography*, 23:296-307.
- Hung, C.-C. and Gong, G.-C. (2010) POC/²³⁴Th ratios in particles collected in sediment traps in the northern South China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88:303-310.
- Hung, J. J., Wang, S.-M. and Chen, Y.-L. (2007) Biogeochemical controls on distributions and fluxes of dissolved and particulate organic carbon in the Northern South China Sea. *Deep-Sea Research Part II*, 54:1486-1503.
- Huys, R. and Boxshall, G. A. (1992). *Copepod evolution*. The Ray Society, London.
- Ikeda, T., Kannom Y., Ozaki, K. and Shinada, A. (2001) Metabolic rates of epipelagic marine copepods as a function of body mass and temperature. *Marine Biology*, 139:587-596.
- Jing, Z. Y., Hua, Z. L., Qi, Y. Q. and Zhang, H. (2007) Summer upwelling in the northern continental shelf of the South China Sea, 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Crown Plaza, Gold Coast, Australia, 2-7 December, 782-785.
- Karl, D. M. and Tien, G. (1992) A sensitive and precise method for measuring dissolved phosphorus in aquatic environments. *Limnology and Oceanography*, 37:105-116.
- Kobari, T., Kitamura, M., Minowa, M., Isami, H., Akamatsu, H., Kawakami, H.,

- Matsumoto, K., Wakita, M. and Honda, M. C. (2013) Impacts of the wintertime mesozooplankton community to downward carbon flux in the subarctic and subtropical Pacific Oceans. *Deep-Sea Research Part I*, 81:78-88.
- Liang, W. D., Jan, J. C., Tang, T. Y. (2000) Climatological wind and upper ocean heat content in the South China Sea. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 38:91-114.
- Lien, R.-C., D'Asaro E. A., Henyey, F., Chang, M.-H., Tang, T.-Y. and Yang, Y.-J. (2012) Trapped core formation within a shoaling nonlinear internal wave. *Journal of Physical Oceanography*, 42:511-525.
- Lien, R.-C., Henyey, F. and Yang, Y. J. (2014) Large-amplitude internal solitary waves observed in the northern South China Sea: properties and energetics. *Journal of Physical Oceanography*, 44:1095-1115.
- Longhurst, A. and Williams, R. (1992) Carbon flux by seasonal vertical migrant copepods is a small number. *Journal of Plankton Research*, 14:1495-1509.
- Longhurst, A. R. and Harrison, W. G. (1988) Vertical nitrogen flux from the oceanic photic zone by diel migrant zooplankton and nekton. *Deep-Sea Research*, 35:881-889.
- Longhurst, A. R. and Harrison, W. G. (1989) The biological pump: profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. *Prog Oceanogr*, 22:47-123.
- Longhurst, A. R., Bedo, A., Harrison, W. G., Head, E. J. H. and Sameoto, D. D. (1990) Vertical flux of respiratory carbon by oceanic diel migrant biota. *Deep-Sea Research*, 37:685-694.
- Monastersky, R. (2013) Global carbon dioxide levels near worrisome milestone. *Nature*, 497:13-14.
- Morales, C. E. (1999) Carbon and nitrogen fluxes in the oceans: the contribution by zooplankton migrants to active transport in the North Atlantic during the joint

- global ocean flux study. *Journal of Plankton Research*, 21:1799-1808.
- Morales, C. E., Bautista, B., and Harris, R. P. (1990) Estimates of ingestion in copepod assemblages: gut fluorescence in relation to body size. Trophic relationships in the marine environment, *Proceedings of the 24th European Marine Biology Symposium*, Aberdeen University Press, 565-577.
- Morales, C. E., Harris, R. P., Head, R. N. and Tranter, P. R. G. (1993) Copepod grazing in the oceanic northeast Atlantic during a 6 week drifting station: the contribution of size classes and vertical migrants. *Journal of Plankton Research*, 15:185-211.
- Morton, B. and Blackmore, G. (2001) South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 42:1236-1263.
- Nightingale, P. D., Malin, G., Law, C. S., Watson, A. J., Liss, P. S., Liddicoat, M. L., Boutin, J. and Upstill-Goddard, R. C. (2000). In situ evaluation of air-sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers. *Global Biogeochemical Cycles*, 14:373-387.
- Nybakken, J. W. (1993) *Marine Biology: An Ecological approach*. Third edition. Harper Collins College. New York. 276 pp.
- Pai, S. C. and Yang, C. C. (1990) Effects of acidity and molybdate concentration on the kinetics of the formation of the phosphoantimonylbdenum blue complex. *Analytica Chemica Acta*, 229:115-120.
- Parsons, T. R., Takahashi, M. and Hargrave, B. (1979) *Biological Oceanographic processes*. (2nd edition) Pergamon Press, Oxford, 332.
- Pearre, S. J. (2003) Eat and run? The hunger/satiation hypothesis in vertical migration: history, evidence and consequences. *Biological Reviews*, 78:1-79.
- Pertola, S., Koski, M. and Viitasalo, M. (2002) Stoichiometry of mesozooplankton in N- and P-limited areas of the Baltic Sea. *Marine Biology*, 140:425-434.

- Peters, R. S. and Downing, J. A. (1984) Empirical analysis of zooplankton filtering and feeding rates. *Limnology and Oceanography*, 29:763-784.
- Pomeroy, L. R., Mathews, H. M. and Min, H. S. (1963) Excretion of phosphate and soluble organic phosphorus compounds by zooplankton. *Limnology and Oceanography*, 8:50-55.
- Putzeys, S., Yebra, L., Almeida, C., Bécognée, P. and Hernández-León, S. (2011) Influence of the late winter bloom on migrant zooplankton metabolism and its implications on export fluxes. *Journal of Marine Systems*, 88:553-562.
- Qiu, D., Dang, W., Dang, Y. and Guo, P. (2012) Anomalous oceanic characteristics in the South China Sea associated with the large-scale forcing during 2006-2009. *Journal of Marine Systems*, 9-18.
- Quéré, L. C., Raupach, M. R., Canadell, J. G. and Marlandet, G. (2009) Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature geosciences*, 2:831-836.
- Ramp, S., Yang, Y. and Bahr, F. (2010) Characterizing the nonlinear internal wave climate in the northeastern South China Sea. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17:481-498.
- Richards and Thompson (1952) The estimation and characterization of plankton populations by pigment analyses. II. A spectrophotometric method for the estimation of plankton pigments. *Journal of Marine Research*, 11:156-172.
- Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee K., Bullister, J. L., Wanninkhof, R., Wong, C. S., Wallace, D. W. R., Tilbrook, B., Millero, F. J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T. and Rios, A. F. (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305: 367-371.
- Schnetzer, A. and Steinberg, D. K. (2002) Active transport of particulate organic carbon and nitrogen by vertically migrating zooplankton in the Sargasso Sea. *Marine*

- Ecology Progress Series, 234:71-84.
- Shaw, P. T. (1989) The intrusion of water masses into the sea southwest of Taiwan. *Journal of Geophysical Research*, 94:18213-18226.
- Shaw, P. T. (1991) The seasonal variation of the intrusion of the Philippine Sea Water into the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 96:821-827
- Shaw, P.T. and Chao, S.Y. (1994) Surface circulation in the South China Sea. *Deep-Sea Research Part I*, 41:1663-1683.
- Steinberg, D. K., Carlson, C. A., Bates, N. R., Goldwaith, S. A., Madin, L. P. and Madin, A. F. (2000) Zooplankton vertical migration and the active transport of dissolved organic and inorganic carbon in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Research Part I*, 47:137-158.
- Steinberg, D. K., Carlson, C. A., Bates, N. R., Johnson, R. J., Michaels, A. F. and Knap, A. F. (2001) Overview of the US JGOFS Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS): a decade-scale look at ocean biology and biogeochemistry. *Deep-Sea Research Part II*, 48:1405-1447.
- Steinberg, D. K., Cope, J. S., Wilson, S. E. and Kobari, T. (2008) A comparison of mesopelagic mesozooplankton community structure in the subtropical and subarctic North Pacific Ocean. *Deep-Sea Research*, 55:1615-1635.
- Sterner, R. W. and Elser, J. J. (2002) *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton University Press, Princeton.
- Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R. (1968) A practical handbook of seawater analysis. *Fisheries Research Board of Canada*, 167: 185-206.
- Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R. (1972) Inorganic micromutrients in sea water. In: *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Ed: Stevenson, J. C., Billingsley, L. W. & Wigmore, R. H. *Fisheries Research Board of Canada*, Ottawa, 49-77.

- Stukel, M. R., Ohman, M. D., Benitez-Nelson, C. R. and Landry, M. R. (2013) Contributions of mesozooplankton to vertical carbon export in a coastal upwelling system. *Marine Ecology Progress Series*, 491:47-65.
- Takahashi, K., Kuwata, A., Sugisaki, H., Uchikawa, K. and Saito, H. (2009) Downward carbon transport by diel vertical migration of the copepods *Metridiapacifica* and *Metridiaokhotensis* in the Oyashio region of the western subarctic Pacific Ocean. *Deep-Sea Research Part I*, 56:1777-1791.
- Turner, J. T. (2000). Feeding ecology of marine copepods: an overview of recent studies and emerging issues. *National Taiwan Museum Special Publication Series*, 10:37-57.
- Turner, J. T. (2002) Zooplankton fecal pellets, marine snow and sinking phytoplankton blooms. *Aquatic Microbial Ecology*, 27:57-102.
- Vidal, J. (1980) Physioecology of zooplankton. 1. Effects of phytoplankton concentration, temperature, and body size on the growth rate of *Calanus pacificus* and *Pseudocalanus sp.* *Marine Biology*, 32:99-110.
- Walsh, J.J. (1991) Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen. *Nature*, 350:53-55.
- Wang, J. and Chern, C. S. (1987) The warm-core eddy in the northern South China Sea, I. Preliminary observations on the warm-core eddy. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 18:92-103.
- Wanninkhof, R. and McGillis, W. R. (1999). A cubic relationship between air sea CO₂ exchange and wind speed. *Geophysical Research Letters*, 26:1889-1892.
- Wei, C.-L., Lin, S.-Y., Sheu, D. D.-D., Chou, W.-C., Yi, M.-C., Santschi, P. H. and Wen, L.-S. (2011) Particle-reactive radionuclides (²³⁴Th, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po) as tracers for the estimation of export production in the South China Sea. *Biogeosciences*,

8:3793-3808.

- Wei, C.-L., Yi, M.-C., Lin, S.-Y., Wen, L.-S. and Lee, W.-H. (2014) Seasonal distributions and fluxes of ^{210}Pb and ^{210}Po in the northern South China Sea. *Biogeosciences*, 11:6813-6826.
- Welschmeyer, N. A. (1994). Fluorometric analysis of chlorophyll *a* in the presence of chlorophyll *b* and pheopigments. *Limnology and Oceanography*, 39:1985-1992.
- Yebra, L., Almeida, C. and Hernández-León, S. (2005) Vertical distribution of zooplankton and active flux across an anticyclonic eddy in the Canary Island waters. *Deep-Sea Research Part I*, 52:69-83.
- Zaret, T. M. and Suffern, J. S. (1976) Vertical migration in zooplankton as a predator avoidance mechanism. *Limnology and Oceanography*, 21:804-813.
- Zhang, X. and Dam, H. G. (1997) Downward export of carbon by diel migrant mesozooplankton in the central equatorial Pacific. *Deep-Sea Research Part II*, 44:2191-2202.
- Zheng, Q., Susanto, R. D., Ho, C. R., Song, Y. T. and Xu, Q. (2007) Statistical and dynamical analyses of generation mechanisms of solitary internal waves in the northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 112:C3.