



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

高屏峽谷與南海浮游性有孔蟲殼體面積密度之變化

Variations of the Planktonic Foraminiferal Area Density

from the Gao-ping Submarine Canyon and Northern South

China Sea

研究生：張伯壬

Bo-Ren Chang

指導教授：林慧玲 博士

Dr. Hui-Ling Lin

中華民國 104 年12月

December 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

研究生張伯壬 (學號：M025090011) 所提論文

高屏峽谷與南海浮游性有孔蟲殼體面積密度之變化

Variations of the Planktonic Foraminiferal Area Density from the Gao-ping
Submarine Canyon and Northern South China Sea

於中華民國 104 年 11 月 27 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 劉祖乾 劉祖乾

委員 林慧玲 林慧玲

委員 陳建勳 陳建勳

委員 張詠斌 張詠斌

指導教授(林慧玲) 林慧玲 (簽名)

致謝

論文工作至今告一段落，最首要感謝的人就是林老師，感謝老師對於我們課業工作上的包容及耐心，還有生活上的照顧，平常時提供我們人生的建議及想法，都很受益匪淺。感謝詠斌老師、國童老師、James 老師、麵條老師、陳老師對我論文想法上的幫助以及建議，讓我在對論文一籌莫展的時候，可以有想法上的突破，得到不同以往的觀點。同時要感謝出海採樣的研究船海研一、三、五號，及帶隊出海的老師們：洪國璋老師、溫良碩老師、許樹坤老師、龔國慶老師、陳建勳老師，還有實驗室辛苦出海採樣的學長姐、學弟妹們。

每天除了家裡之外最常去的就是實驗室，因此要感謝在實驗室生活給我很大幫助的黛君姊，對我不管是課業上還是生活上的建議，都受益無窮。感謝兩年來一同努力的好朋友們江胖、貴楨、豬油、小月、阜益、佳恩、基姊、瑞龍、家維，感謝學長姊凱哥、雷博士、婷婷學姊、馨儀學姊、思瑜學姊，感謝系辦的秀梅姐、宜均、小瑋學姊以及院辦的蓮珠姊，感謝海科系的學弟妹們，系籃、03 級、04 級、05 級的大家。感謝我的高中好朋友們，高一的 3 班好朋友，高三的 9 班，還有我球隊的好兄弟，感謝大家陪我灰心喪志又陪我開懷大笑。

最後要感謝的人就是我的家人，感謝你們默默的支持與付出，老爸老媽可以好好休息了，老姊跟我要好好努力工作了，我愛你們。

摘要

本研究目的為觀察浮游性有孔蟲殼體面積密度之變化，並探討變化的原因以及與環境參數的關係。透過國內研究船採集 2003 年夏季、2007 及 2012 年秋季、2013 年春季及夏季位於南海北部及台灣西南海域所採集的拖網樣本，以及相同區域藉由沉積物收集器取得的六個串列樣品，其中一個佈放在南海 SEATS (South-East Asian Time-series Study) 站，其餘五個則在南海東北部靠近台灣西南海域的位置。浮游性有孔蟲主要挑選 *Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinoides ruber*、*Neoglobobulimina dutertrei*、*Orbulina universa*、*Globigerinella aequilateralis* 共五種種屬，以殼體面積密度和沉積物收集器串列的參數及現場 CTD 量測的水文參數進行討論，並透過 EOF 分析觀察殼體面積密度與參數的關係及造成變化的原因。

分析的結果顯示 *O. universa* 及 *G. aequilateralis* 兩種浮游性有孔蟲種屬雖然殼室的形狀不同，但殼體面積密度變化皆會同時受到殼體大小的影響，而殼體側影的拍攝結果顯示殼體厚度亦會影響面積密度的變化。以三天為單位的沉積物收集器所採集的樣本則顯示 *G. sacculifer* 的殼體面積密度與殼體大小有相同的變化趨勢，殼體較大及數量較多時，面積密度呈現高值，反之殼體較小及數量也較少時，面積密度則呈現低值。*G. ruber* 的殼體面積密度則呈現類似半月週期的變化趨勢，隨著月亮的朔望週期而有明顯變化。面積密度與串列參數進行 EOF 分析的結果顯示 *G. sacculifer* 的殼體面積密度會與數量通量正相關；*G. ruber* 的殼體面積密度則未與其他串列參數有相同變化趨勢。

同航次在上層水體由水平拖網採集的樣本顯示浮游性有孔蟲 *G. sacculifer* 及 *G. ruber* 的殼體面積密度未與採樣的緯度呈現明顯關連性；同一海域，但不同年份所採集的 *G. sacculifer* 的殼體面積密度數據，則反映隨間隔 5 年和 10 年的時間而減少的現象，與利用經驗公式計算的海水 pH 值呈現類似的變化，可能是海水酸化的佐證之一。拖網樣本與既有水文參數進行 EOF 分析的結果則顯

示 *G. sacculifer* 的殼體面積密度與 pH 值和螢光值積分呈現正相關。以在上層水體水深 100 公尺的拖網所採集的有孔蟲標本，與沉積物收集器於 2000 公尺和 3500 公尺所取得三種不同深度的浮游性有孔蟲殼體樣本比較面積密度的測量結果：除了 *G. aequilateralis* 之外，另外分析的三種浮游性有孔蟲殼體面積密度並未隨採樣深度不同而有明顯變化趨勢，此結果不足以驗證水體中碳酸鈣的溶解效應。

關鍵字：浮游性有孔蟲、殼體面積密度、南海北部、台灣西南海域



Abstract

The shell area density of planktonic foraminifera, together with seawater parameters, collected from area off southwestern Taiwan and northern South China Sea were measured in this study. Plankton tows were conducted in 2003 summer, 2007 and 2012 autumn, 2013 spring and winter. In addition, shells collected from six sediment trap moorings were also adapted from at the same area. Totally five species of planktonic foraminifera *Globigerinoides sacculifer*, *Globigerinoides ruber*, *Neogloboquadrina dutertrei*, *Orbulina universa*, *Globigerinella aequilateralis* were analyzed for this work.

Different shape of chambers between *G. aequilateralis* and *O. universa* prove that area density could be affected by shell size. Their silhouette area suggest that area density also is affected by shell thickness. Specimens obtained from sediment traps indicate that area density of *G. sacculifer* shows same tendency with shell size change, while that of *G. ruber* has a pattern similar to semi-lunar cycle. Results of EOF statistical analysis prove that area density of *G. sacculifer* varies as its shell abundance changes. The area density of *G. ruber*, however doesn't show any evident pattern that can be correlated with hydrographic parameters.

Comtempoary samples from plankton tows conducted between 13°~22° N in the SCS indicate that planktonic foraminiferal area density doesn't display any corresponding change along with latitude. The area density of *G. sacculifer* shows evident waning for the last 10 years. Results of EOF statistical analysis prove that area density of *G. sacculifer* is directly proportional to pH value and fluorescence in the water column, but that of *G. ruber* does not have any corresponding change with hydrological parameters. Comparisons among samples collected from water depth at 100 meter and sediment traps deployed at 2000 and 3500 meter indicate that except

for *G. aequilateralis*, other planktonic foraminifera doesn't show any significant change with different sampling water depth.

Key word: foraminifera, area density, northern South China Sea, southwestern Taiwan

目錄

致謝.....	i
中文摘要.....	ii
英文摘要.....	iv
目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
表目錄.....	x
壹、前言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 前人研究.....	3
1.3 研究區域.....	5
1.4 研究目的.....	8
貳、材料及方法.....	9
2.1 有孔蟲之採集.....	13
2.1.1 浮游生物拖網.....	13
2.1.2 沉積物收集器.....	13
2.2 有孔蟲之前處理.....	13
2.2.1 浮游生物拖網.....	13
2.2.2 沉積物收集器.....	13
2.3 有孔蟲分析.....	14
2.3.1 鑑種.....	14

2.3.2 殼體大小挑選	14
2.3.3 殼體清洗	15
2.3.4 殼體面積密度測量	16
2.3.5 殼體面積密度 EOF 分析	17
參、結果與討論	18
3.1 有孔蟲殼體面積密度實驗	18
3.1.1 殼體有機質去除效果實驗	18
3.1.2 殼體面積密度隨殼體大小變化影響	21
3.1.3 面積密度與殼體重量之對比	23
3.2 沉積物收集器的有孔蟲殼體面積密度之比較	25
3.2.1 殼體面積密隨時間變化之趨勢	25
3.2.2 殼體面積密度 EOF 分析	32
3.3 浮游生物拖網的有孔蟲面積密度之比較	39
3.3.1 殼體面積密度隨緯度之變化	39
3.3.2 殼體面積密度隨採樣時間間隔之變化	40
3.3.3 殼體面積密度與水文參數之 EOF 分析	41
3.4 浮游生物拖網與沉積物收集器的有孔蟲面積密度之比較	44
肆、結論	47
伍、參考文獻	48
中文部分	48
英文部分	48

圖目錄

圖 1.1、近兩世紀海洋中 pH 值、碳酸鹽、溶解態二氧化碳隨深度變化圖.....	3
圖 1.2、高屏峽谷海底地形圖.....	7
圖 1.3、夏冬兩季台灣鄰近海域表水海流圖.....	7
圖 2.1、採樣站位圖.....	10
圖 3.1、有孔蟲殼體重量浸泡次氯酸鈉的實驗結果.....	19
圖 3.2、有孔蟲殼體重量浸泡雙氧水的實驗結果.....	20
圖 3.3、有孔蟲殼體有機質去除效果量化比較.....	20
圖 3.4、浮游性有孔蟲 <i>G. aequilateralis</i> 面積密度隨殼體大小變化	22
圖 3.5、浮游性有孔蟲 <i>G. aequilateralis</i> 殼體側影面積拍攝	22
圖 3.6、浮游性有孔蟲 <i>O. universa</i> 面積密度隨殼體大小變化.....	23
圖 3.7、浮游性有孔蟲 <i>O. universa</i> 殼體側影面積拍攝.....	23
圖 3.8、四種浮游性有孔蟲殼體面積密度與重量對比圖.....	24
圖 3.9、沉積物收集器所收集之 <i>G. sacculifer</i> 殼體面積密度變化.....	27
圖 3.10、沉積物收集器所收集之 <i>G. ruber</i> 殼體面積密度變化.....	28
圖 3.11、 <i>G. sacculifer</i> 殼體面積密度與 BP1 串列參數的 EOF 分析結果	33
圖 3.12、 <i>G. sacculifer</i> 殼體面積密度與 BP2 串列參數的 EOF 分析結果	34
圖 3.13、 <i>G. ruber</i> 殼體面積密度與 BP1 串列參數的 EOF 分析結果	34
圖 3.14、 <i>G. ruber</i> 殼體面積密度與 BP2 串列參數的 EOF 分析結果	34
圖 3.15、 <i>G. sacculifer</i> 殼體面積密度與 BP3 串列參數的 EOF 分析結果	35
圖 3.16、 <i>G. sacculifer</i> 殼體面積密度與 BP4 串列參數的 EOF 分析結果	36

圖 3.17、 <i>G. ruber</i> 殼體面積密度與 BP3 串列參數的 EOF 分析結果	36
圖 3.18、 <i>G. ruber</i> 殼體面積密度與 BP4 串列參數的 EOF 分析結果	36
圖 3.20、 <i>G. sacculifer</i> 殼體面積密度與 T9-KP 串列參數的 EOF 分析結果	37
圖 3.20、 <i>G. ruber</i> 殼體面積密度與 T9-KP 串列參數的 EOF 分析結果	38
圖 3.21、浮游性有孔蟲面積密度隨緯度變化趨勢.....	39
圖 3.22、浮游性有孔蟲面積密度隨採樣時序變化趨勢.....	41
圖 3.23、拖網採集之 <i>G. sacculifer</i> 面積密度與水文參數 EOF 分析結果	42
圖 3.24、拖網採集之 <i>G. ruber</i> 面積密度與水文參數 EOF 分析結果	42
圖 3.25、 <i>G. sacculifer</i> 面積密度與螢光值積分之相關性對比結果.....	43
圖 3.26、拖網及沉積物收集器之有孔蟲面積密度比較圖.....	46

表目錄

表 2-1 拖網採樣資料	11
表 2-2 沉積物收集器串列資料	12
表 2-3 有孔蟲殼體有機質去除效果實驗控制變因彙整	16
表 2-4 殼體大小影響面積密度實驗控制變因彙整	16
表 2-5 浮游性有孔蟲殼體面積密度與重量相關性實驗變因彙整	17
表 3-1 沉積物收集器串列的收集時間	26
表 3-2 SEATS 沉積物收集器之收集時間	44

壹、前言

1.1 研究背景

浮游生物拖網以及沉積物收集器是研究海洋的重要採樣工具，現代科學家也常用這兩者來採集浮游性有孔蟲樣本。浮游生物拖網(plankton tow)主要用來採集水體中的現生浮游生物，透過固定大小的網目採集不同種類的浮游生物，亦可分成水平深度採樣和垂直水層採樣兩種，藉以瞭解不同深度浮游生物的變化或水平分布，同時與現場量測的溫度、鹽度、螢光值等水文資料做比較，可以在瞭解浮游生物族群季節性或區域性變化的同時，進一步探討其生長環境與水文參數的關係(Mortyn and Charles, 2003; Schiebel *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2011; Ren *et al.*, 2012; Retailleau *et al.*, 2012; Henehan *et al.*, 2013)。沉積物收集器(sediment trap)主要用來收集海水的沉降顆粒，藉由長時間佈放在特定水深，可以得知沉積物收集器佈放深度以上水層的顆粒總和，提供探討顆粒物質在沉降的過程中，受到哪些生地化反應影響，並透過設定每個收集單位的時間，提供不同解析度的沉降顆粒的通量以及季節性變化，是現在科學家想要瞭解海水中顆粒的沉降通量或是收集長時間、連續性資料的重要工具(Anand *et al.*, 2003; Žarić *et al.*, 2005; Marshall *et al.*, 2012; Sagawa *et al.*, 2013; Lin, 2014; Liu *et al.*, 2014)。

有孔蟲 (foraminifera)是一種生活在海洋中的單細胞生物，被歸類在原生生物界，因為殼體上有細小的孔供細胞質進出而稱之為有孔蟲。個體可藉由吸收海水中的鈣離子(Ca^{2+})及碳酸根離子(CO_3^{2-})結合成碳酸鈣(CaCO_3)造殼，可依照棲息環境的不同，分為底棲性及浮游性兩大類。底棲性有孔蟲主要依附在海底的砂泥和水藻的莖葉上，或是棲息在表層以下的沉積物中生活，但缺乏自身漂浮的能力，所以活動範圍比較小，各種屬有特定的適應環境，因此不同的海域各有其特定的種屬組成。浮游性有孔蟲亦不具備游泳的能力，僅透過殼室的浮力在海水中進行移動，主要生活在海水表層五百公尺以淺的水域，攝食方式是靠細胞質的偽足順著殼體上的小刺針向外放射，以黏捕周邊的微小生物為食(魏國彥, 2003)。

浮游性有孔蟲的種屬組成會因不同海洋環境而有差異，種屬的分佈模式主要受控於海水溫度、鹽度、葉綠素值、營養鹽等水團特性，因此可以透過分析種屬組成來分辨不同海洋的環境(Field, 2004; Kuroyanagi and Kawahata, 2004; Moy *et al.*, 2009; Hemleben *et al.*, 2012; Sagawa *et al.*, 2013)。此外，浮游性有孔蟲在造殼的過程中，殼體的穩定同位素會和周圍的海水達成同位素平衡(Isotopic equilibrium)，保存了造殼當時海水的同位素組成，科學家可以藉由分析不同的穩定同位素，重建過去的海水環境。其中穩定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)可用來重建表水的初級生產力和探討大氣與海水二氧化碳交換情形(Spero *et al.*, 1997; Bemis *et al.*, 2000; Kennett *et al.*, 2000; Rohling and Cooke, 2003)。穩定氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)組成則被用來推估古海水溫度或冰棚體積的改變，而河川的輸入量、海面上的降雨和蒸發都會造成海水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的變化(Bemis *et al.*, 1998; Bar-Matthews *et al.*, 2003; Lin *et al.*, 2004)。雖然碳酸鈣是組成有孔蟲殼體最主要成分，但馬契原理(Marcet Principle)指出海水中主要離子組成的相對百分比會固定(陳鎮東, 1994)，因此有孔蟲造殼時除了鈣離子之外，也同時利用了海水中的鎂、鎘、鋅等其它離子，透過測量鈣離子与其它離子比值並帶入前人推導的經驗公式，亦可回推古海水溫度的變化(Lear *et al.*, 2002; Anand *et al.*, 2003; Barker *et al.*, 2003)。

現生浮游性有孔蟲約有四十多種，主要生活在環境變化多端的上層海水，有些種屬喜好居住在較暖的環境，有些則喜歡較冷的海域(魏國彥, 2003)。浮游性有孔蟲的廣泛分布以及長久的地質演化記錄，加上能透過殼體保存過去海水環境的資訊，因此若能更詳細瞭解現今海洋中，浮游性有孔蟲各種屬的生長條件與海水水文環境參數之間的關係，可以更有效的利用在重建古海洋環境。

過去兩個世紀以來由於人為活動製造了大量的二氧化碳排放到大氣中，當海氣交換時，海水吸收了比正常情況下更大量的二氧化碳，海水中的二氧化碳分壓(pCO_2)受到變化，並產生化學反應導致海水 pH 值降低，而間接影響海水中的碳酸根離子濃度($[\text{CO}_3^{2-}]$)，即為海水酸化(Ocean Acidification；圖 1.1；Chen *et al.*, 2012; Hönisch *et al.*, 2012; Zeebe, 2012; Kroeker *et al.*, 2013)。海水酸化意即海洋吸

收了過量的二氧化碳，使得海水中的溶解態無機碳(Dissolved Inorganic Carbon；DIC)改變了原本平衡的狀態，導致 pH 值跟碳酸根離子濃度降低的情況發生，間接造成海水中方解石(calcite)及霏石(aragonite)的飽和狀態跟著下降，進而影響浮游性有孔蟲、珊瑚等透過碳酸鈣造殼的水中生物，殼體因為溶解作用的影響，而有破碎的可能(Wolf-Gladrow *et al.*, 1999; Riebesell *et al.*, 2000; Broecker and Clark, 2002, 2003; Lombard *et al.*, 2010; Manno *et al.*, 2012; Zamelczyk *et al.*, 2013)。

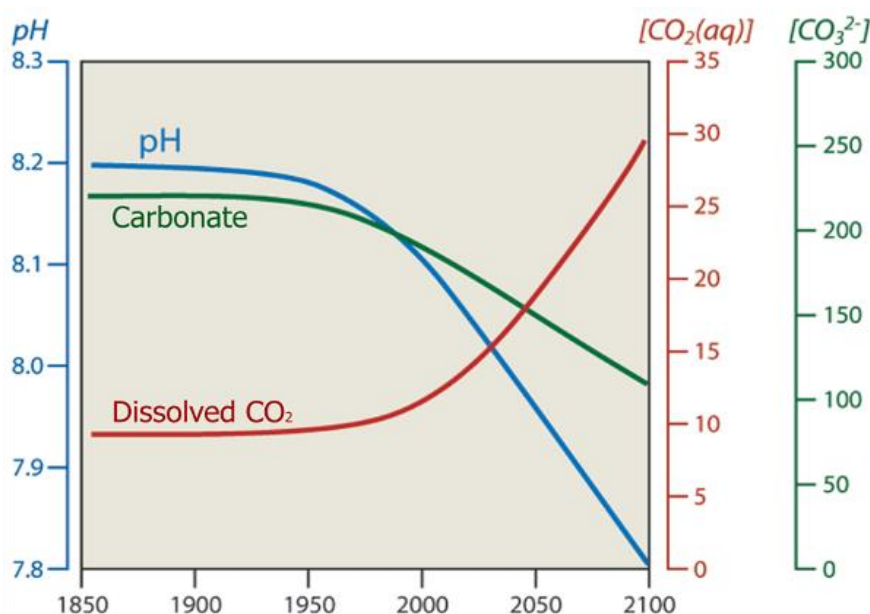


圖 1.1、近兩世紀海洋中 pH 值、碳酸鹽、溶解態二氧化碳隨深度變化圖。圖片來源：Beam Reach Marine Science and Sustainability School。

1.2 前人研究

前人在實驗室養殖有孔蟲的實驗中顯示，碳酸根離子濃度的降低會使得有孔蟲的造殼速率下降(Bijma *et al.*, 1999)，讓整個生命週期的造殼過程及幼體存活率受到影響。雖然浮游性有孔蟲的豐度在整個浮游生物群體之中並不算高，但全球海洋中的碳酸鈣約 32~80%，是以浮游性有孔蟲殼體的形態從海表沉降到海底(Schiebel, 2002)。科學家們開始探討海水酸化所造成碳酸根離子濃度的降低，對有孔蟲殼體的影響程度，並尋找碳酸根離子濃度與有孔蟲殼體的關係。有研究發現浮游性有孔蟲的標準化殼體重量(Size-Normalized shell weight；SNW)與生長環境海水的碳酸根離子濃度呈現正相關(Barker and Elderfield, 2002; Barker *et al.*,

2004; Schiebel *et al.*, 2007)，因此若水體中的碳酸根離子濃度上升，會使有孔蟲造殼速率提高，導致殼體的厚度增加、殼體重量變大(Bijma *et al.*, 2002; Russell *et al.*, 2004)。

瞭解碳酸根離子濃度以及浮游性有孔蟲殼體標準化重量之間的關係之後，科學家們試著透過現生的浮游性有孔蟲殼體探討碳酸根離子濃度的改變，藉以研究沉積物記錄中的有孔蟲殼體和其生長環境海水之碳酸根離子濃度的關係。有孔蟲的造殼效率以及殼體厚度變化在測量的執行上較為困難，因此大部分的研究透過有孔蟲標準化殼體重量來分析。就現有文獻資料顯示，有孔蟲標準化殼體重量可以細分為兩種不同秤量方法：第一種方法是 Broecker and Clark (2001)提出來的 sieve-based weight (SBW)，將有孔蟲殼體按照不同的直徑大小範圍區分，通常是 50 μ m 為一個區間，秤量單一區間的全部殼體重量，再除以整個區間的殼體數量，得到的平均值即為 SBW (Broecker and Clark, 2001; De Villiers, 2004)；第二種是 Barker and Elderfield (2002)提出的 measurement-based weight (MBW)，MBW 需先透過顯微鏡及電腦軟體測量，再利用公式算出由殼體側影面積及最大直徑主導的有孔蟲標準化重量：MBW_{側影面積}、MBW_{最大直徑}。側影面積為主導的公式：

$$MBW_{側影面積} = \frac{\text{平均SBW}_{總樣本數} \times \text{平均側影面積}_{欲測量殼體範圍}}{\text{平均側影面積}_{總樣本數}}$$
，側影面積亦可以改為用最大直徑帶入，即為以最大殼體直徑主導的 MBW_{最大直徑} (Barker and Elderfield, 2002; Beer *et al.*, 2010)。

儘管大部分的研究探討浮游性有孔蟲標體準化殼重量時都發現會有種屬之間的差異性，但大多都顯示有孔蟲的SNW與碳酸根離子濃度呈現線性正相關 (Aldridge *et al.*, 2012)。反之，也有某些研究結果顯示兩者呈現負相關或沒有相關性，而是溫度、營養鹽等其他環境參數的影響有孔蟲的標準化殼體重量(De Villiers, 2004; Gonzalez-Mora *et al.*, 2008)。同時根據Hemleben *et al.* (2012)的研究顯示，浮游性有孔蟲的殼體大小，會因為造殼時生活環境水溫的變化而有所不同，進而影響到標準化殼體重量。Barker and Elderfield (2002)利用在北大西洋岩

芯樣本中的浮游性有孔蟲*Globigerina bulloides*進行殼體鎂鈣比測量推得古海水溫度，發現在末次冰期時，雖然表水溫度低，但是可能因為此時碳酸根離子濃度高，而*G.bulloides*的殼體重量與間冰期比是相對較重的，推論造殼過程主要的影響因子還是碳酸根離子濃度。除了溫度以外，浮游性有孔蟲的殼體大小也會隨著月亮的朔望週期(lunar cycle)而有變化，推測是因為繁殖期的關係，為了增加有孔蟲配子成功的機率，因此成年的殼體數量會急遽上升，進而造成殼體大小及通量上的改變(Bijma *et al.*, 1990; Jonkers *et al.*, 2014; Jonkers *et al.*, 2015)。Schiebel *et al.* (2001)在北大西洋採水及拖網採樣，分析有孔蟲的殼體通量及大小與海水環境參數的關係，發現除了有孔蟲的殼體之外，葉綠素值、硝酸鹽等環境參數，以及海水的溫躍層範圍都會隨著月亮週期的改變而有所變化。為了更直接的瞭解有孔蟲整個造殼過程與其生長海水碳酸根離子濃度的關係，Marshall *et al.* (2013)提出以面積密度(ρ_A ; $\mu\text{g}/\mu\text{m}^2$)量化兩個參數之間的關聯性。利用測量單隻有孔蟲殼體重量及側影面積，再計算兩者的比值即為有孔蟲的面積密度，兩種浮游性有孔蟲*Globigerinoides ruber* (pink)和*Globigerinoides sacculifer*的面積密度與碳酸根離子濃度，根據線性迴歸分別得到 $R^2 = 0.89$ 、 0.86 的相關性，因此可將面積密度視為碳酸根離子濃度的替代指標。

1.3 研究區域

高屏峽谷位於台灣西南部海域，約 120°E 、 21.8°N 的位置，從高屏溪口向外延伸至南海海盆東北部海域，同時被視為高屏溪入海後的延伸。峽谷西北方有澎湖水道連接台灣海峽，東南方有巴士海峽與太平洋相連，西南方為南海，小琉球則位於峽谷南方。高屏海底峽谷主軸距離海岸約1公里，近海地區為陡峭的V型峽谷，至小琉球以西之後坡度漸緩，而變成底部較為寬廣的U型峽谷。峽谷邊緣至底部高度落差可達600公尺，水深變化劇烈。峽谷以東北-西南走向為主，外觀上呈現S字型。最大寬度約8公里，最狹窄處則不到1公里(圖1.2; Yu *et al.*, 1991; Yu *et al.*, 1993)。高屏峽谷本身由於其陡峭及狹窄之地形而構成了特有之水文、地質及生物性質，是陸源物質傳輸至深海的重要天然管道，同時也是一

個高濃度懸浮顆粒聚集處，導致沉積物易堆積在此(Hale *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012)。

就地理位置而言，南海涵蓋的經緯度範圍約為 $5^{\circ}\text{S}\sim 22^{\circ}\text{N}$ ， $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 之間，南起赤道，北至台灣海峽南端，平均水深1350公尺，水深最深處位於呂宋島西側，約為5567公尺；海域的總面積約為350萬平方公里(陳鎮東, 2001)，周圍有中國大陸西南部、菲律賓及越南與眾多大小島嶼，為呈現半封閉狀態的海盆。南海對外的通道多為水深不到100公尺的陸棚區，除巴士海峽(約2200公尺)及蘇祿海(平均約1570 公尺)較深外，其餘深度皆未超過500公尺，因此以巴士海峽作為和外界海水交換的主要通道(Shaw, 1989; Hsiao *et al.*, 2011; Gong *et al.*, 2012)。南海位於亞熱帶及熱帶地區，屬於氣溫高、熱量足的海域，且位於東亞季風區，冬季11月~3月時盛行東北季風，西南季風則盛行於夏季6月~8月。圖1.3為1991年~2008年間夏冬兩季台灣鄰近海域表水海流圖，由圖可觀察出海水流向會受到風的影響，南海表面環流受到東亞季風區的風向所控制，而東北季風的強度明顯比西南季風強(Liang *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2004)。由於表面環流流向的差異，南海表水溫度的分布特徵呈現明顯的季節性變化。冬季時，表水溫度梯度最大，以一月為例表水溫度可由海盆南方的 28°C 向北遞減到 21°C ，溫差達 7°C ；夏季時，以七月為例整個海域的表水溫度分布平均，約 28 、 29°C 左右(Levitus and Boyer, 1994)。

南海北部海域除了受到東亞季風的影響外，還受到北太平洋西方邊界流之一的黑潮所影響，帶來高溫、高鹽、低營養鹽的海水。夏季時，黑潮會入侵到呂宋海峽的西側，僅有細小的分支會影響到南海北部的海流，而冬季時，黑潮向西的海流分支增強，使其通過呂宋海峽入侵南海，入侵的原因主要受到呂宋海峽南北兩側的海平面高度差結果所致(Liang *et al.*, 2008)。

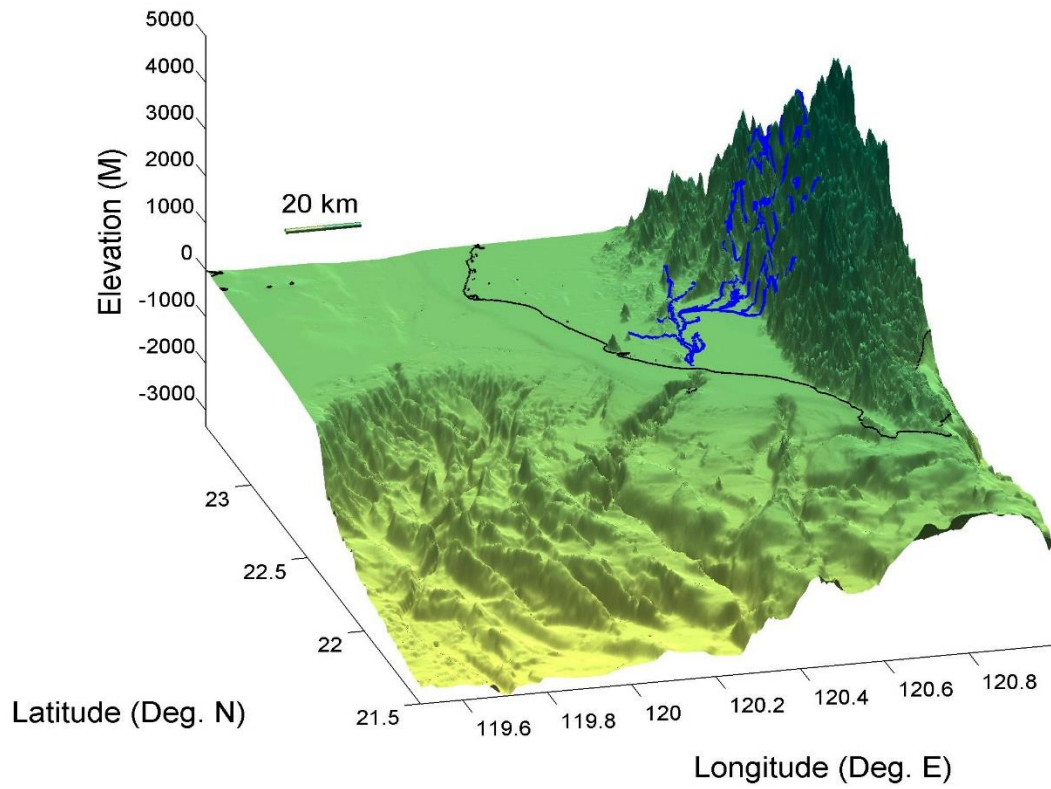


圖 1.2、高屏峽谷海底地形圖。圖片來源：Liu *et al.*, 2009。

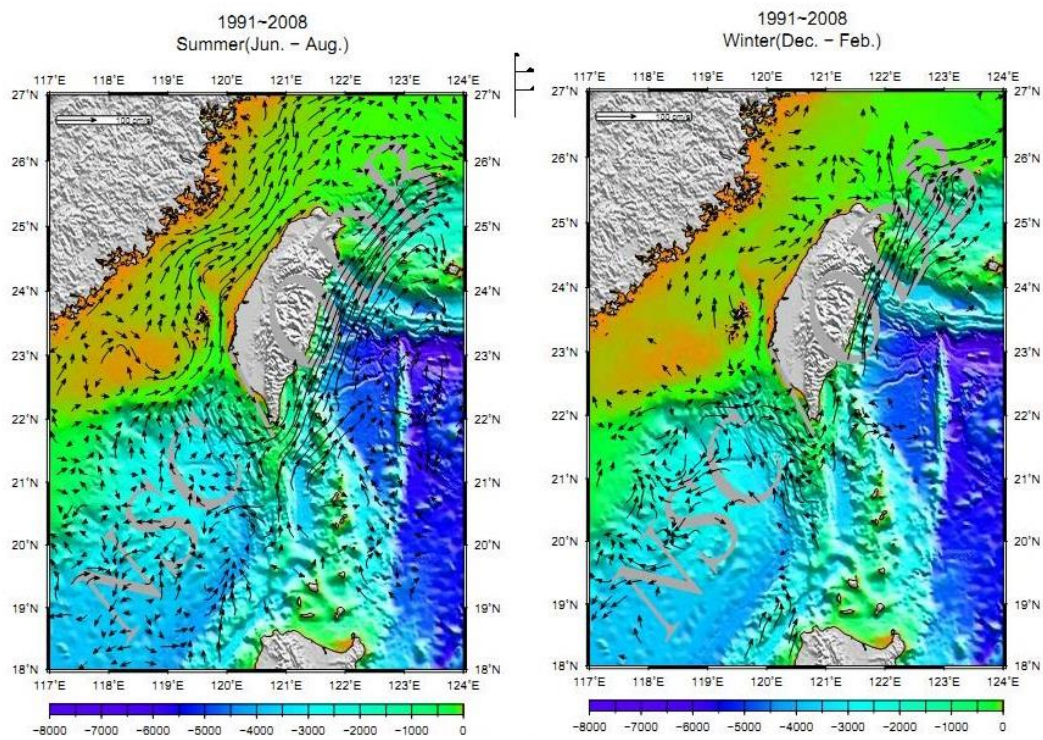


圖 1.3、夏冬兩季台灣鄰近海域表水海流圖。圖片來源：國科會海洋學門資料庫。

1.4 研究目的

在台灣西南海域及北南海，關於現生浮游性有孔蟲殼體重量與海水生地化參數之間關聯性的研究並不多，Kuroyanagi and Kawahata (2004)及梁華升 (2012)皆提到浮游性有孔蟲殼體的豐度與葉綠素值呈現正相關，Marshall et al. (2013)在北大西洋研究的結果亦提出以有孔蟲殼體面積密度取代殼體重量，成為海水碳酸根離子濃度替代指標的新概念，因此本研究利用在西南海域佈放的沉積物收集器串列，觀察有孔蟲殼體面積密度在不同的時空環境下，變化的機制是否相同，亦或是有其他的影響機制：季節性變化、月亮週期等；並與同一海域不同時間的拖網做比較，觀察相隔十年所取得的有孔蟲面積密度變化情形。

貳、材料及方法

本論文研究利用國內研究船海研三號在 2009~2010 年間佈放的沉積物收集器收集沉降顆粒，以及海研一、三、五號在南海進行拖網採樣的樣本，拖網樣本採集時間分別為：2003 年夏季、2007 及 2012 年秋季、2013 年春季及夏季，採樣區域位於東經 $116^{\circ}28' \sim 120^{\circ}19.8'$ ，北緯 $13^{\circ}48.35' \sim 21^{\circ}57'$ 的範圍內，每個航次水平拖網作業的水深主要分為 50、100、150、200 公尺，視當地水深或當時採樣的計畫，針對不同深度進行拖網採樣。本實驗為簡化後續變數的討論，拖網樣本分析皆使用採樣水深 100 公尺的拖網標本，拖網採樣的資料參閱表 2-1。拖網作業進行之前或結束後半小時內佈放 CTD，用以測量採樣當地的水溫、鹽度、螢光值等相關水文參數，以進行後續分析。另一部分藉由沉積物收集器取得的樣品共有六個串列，其中一個佈放地點在高屏峽谷區域、一個在南海 SEATS (South-East Asian Time-series Study) 站，其餘四個則在南海北部經緯度約為東經 $119^{\circ}24'$ 、北緯 $22^{\circ}24'$ 的範圍之間。高屏峽谷區域與四個在南海北部的沉積物收集器串列，佈放時間為 2009 年 10 月至隔年 7 月，收集杯佈放的深度為 230 公尺到 815 公尺左右，採樣間隔為每 3 天一次，連續採樣 36 天；南海 SEATS 站串列的佈放時間為 2013 年 9 月至隔年 3 月，收集深度為 2000 公尺及 3500 公尺深，採樣間隔為每 8 天一次，詳細採樣位置如圖 2-1，沉積物收集器資料參閱表 2-2。

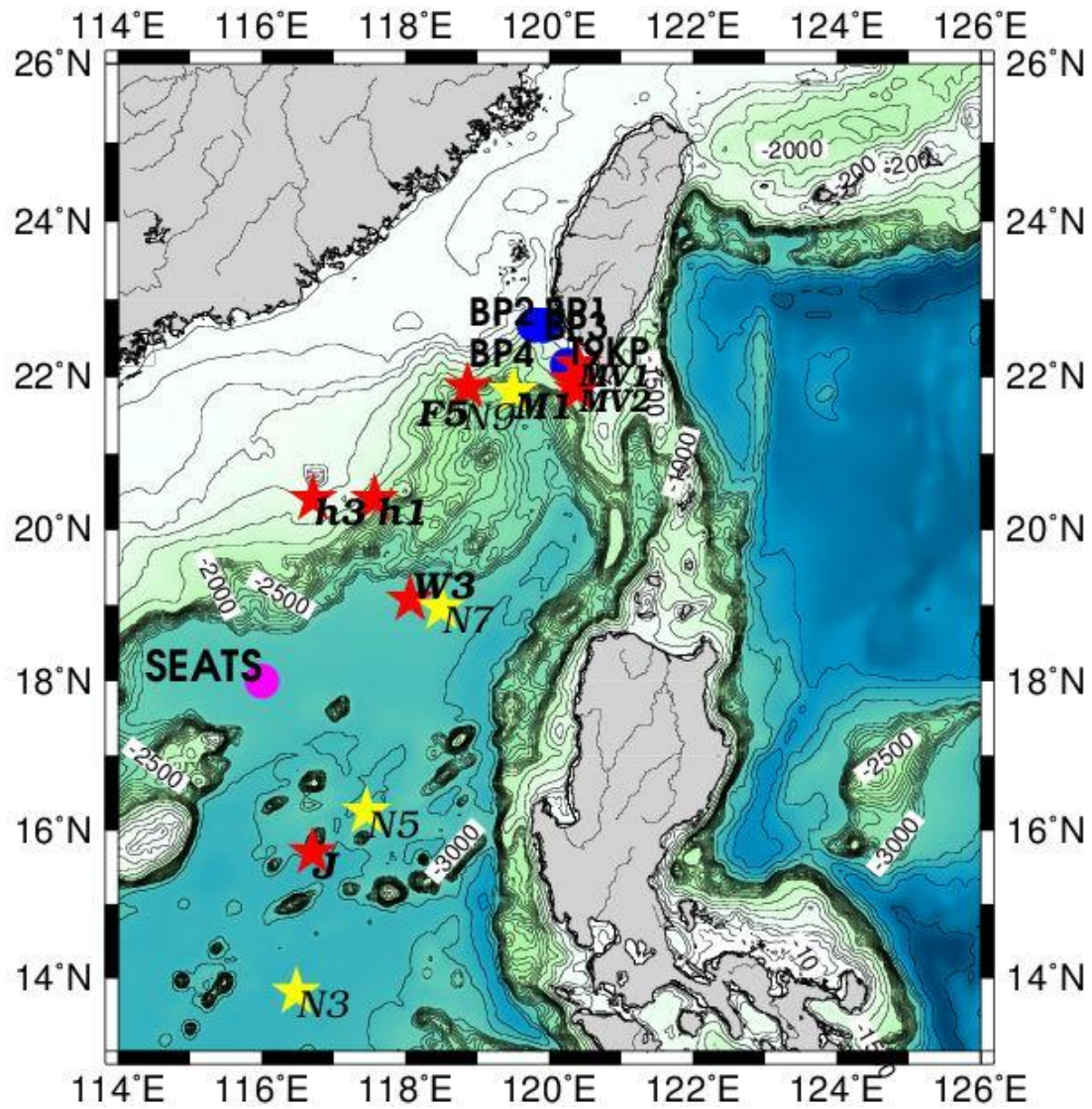


表 2-1 拖網採樣資料

航次	站位	日期	農曆	經緯度	採樣深度
OR1-688	J	2003/7/14	14	15°42'N、116°42'E	100m
OR1-845	W3	2007/10/28	18	19°48'N、118°36'E	100m
OR3-1651	M1	2012/10/29	14	21°57'N、120°19.8'E	100m
OR5-1302	h1	2013/2/19	10	20°23.97'N、117°34.11'E	100m
	h3	2013/2/23	14	20°23.97'N、116°42.63'E	100m
OR5-1306	N3	2013/6/26	18	13°48.35'N、116°28.88'E	100m
	N5	2013/6/27	19	16°14.69'N、117°27.34'E	100m
	N7	2013/6/28	20	18°58.25'N、118°29.56'E	100m
	N9	2013/6/29	21	21°48.43'N、119°29.80'E	100m
OR3-1785	MV1	2014/8/2	6	22°09.595'N、120°23.294'E	100m
	MV2	2014/8/2	7	21°49.605'N、120°23.665'E	100m
OR3-1804	F5	2014/10/20	27	21°52.128'N、118°52.014'E	100m

表 2-2 沉積物收集器串列資料

	佈放日期	收集間隔	經緯度	水深	佈放水深	探針深度
T9-KP	2009/10/29~ 2009/12/04	3 天/杯	22°09.147'N 120°14.991'E	848m	816.1m	810m
BP1	2010/03/15~ 2010/04/20	3 天/杯	22°39.817'N 119°55.342'E	261.3m	234.1m	227.2m
BP2	2010/03/15~ 2010/04/20	3 天/杯	22°39.963'N 119°47.506'E	293.2M	266m	259.1m
BP3	2010/07/09~ 2010/08/14	3 天/杯	22°39.792'N 119°55.246'E	263.6m	236.4m	243.3m
BP4	2010/07/09~ 2010/08/14	3 天/杯	22°40.402'N 119°47.348'E	296.6m	269.4m	276.3m
SEATS-Trap1	2013/9/20~ 2014/03/31	8 天/杯	17°59.6857'N 116°00.1408'E	3800m	2000m、 3500m	

2.1 有孔蟲之採集

2.1.1 浮游生物拖網

現生浮游性有孔蟲拖網是利用網目 300 μ m，直徑 60cm 的浮游生物採集拖網，並在拖網前方加掛流速儀，以記錄採集樣本過程的水體流量。在不影響航次中其他採樣工作的情況下，採樣方式係將拖網下放到航次預計採樣的深度，以船速 2 節水平前進 30 分鐘，上收至甲板後先記錄流速儀的數值，再用當地海水將拖網由外而內沖洗，此目的為把附著在拖網上的樣本沖到樣本瓶中，將樣本沖到樣本瓶中收集起來後放入冰箱冷藏保存，避免生物作用影響日後實驗分析結果。

流速計的流量計算是根據 Digital Flow Meter (Models 438 115)所發表的校正公式：流速儀紀錄的差值 $\times 0.3 \times$ 浮游生物採集網面積(m^2) = 水流量的體積(m^3)

2.1.2 沉積物收集器

本研究使用的沉積物收集器型號皆為PPS 3/3 (Piege a Particules Sequentiel, Model 3/3)柱狀時序收集器。PPS-3/3主要由流線型外層保護殼(protection hull)、內層收集殼(collecting hull)、時序(time-series)控制器、錨錠桿(mooring bar)、轉盤(carousel)與收集杯等主要原件構成(蔡康齡, 2002)。整個串列除了沉積物收集器本體，還有流速儀裝置(Nortek current meter)及聲學釋放儀(acoustic release)等裝置。

2.2 有孔蟲之前處理

2.2.1 浮游生物拖網

將船上利用拖網所採集到的浮游生物樣本，帶回實驗室用去離子水沖洗並濕篩過 63 μ m 大小的篩網，此目的為稀釋附著在樣本之間的海水鹽分，藉以避免殘留的鹽分結晶影響日後的挑蟲作業。濕篩完後留下大於 63 μ m 的樣本，放入冷凍庫冷凍之後，再用冷凍乾燥機去除樣本中的水分，再進行後續分析。

2.2.2 沉積物收集器

從沉積物收集器串列中，將收集杯所收集到的沉積物與海水樣本倒入離心管中，放入離心機中以轉速3000rpm離心5分鐘，取出後將離心管中的上層液抽掉並保留下層的沉積物，目的是將海水與沉積物完全分離，重覆此步驟直到確定沉積

物完全收集，之後再重覆清洗拖網樣本的步驟，洗掉樣本內的鹽分，並透過冷凍乾燥的方式去除水分，再記錄樣品乾燥的重量。

2.3 有孔蟲分析

2.3.1 鑑種

*G. sacculifer*和*G. ruber*兩種浮游性有孔蟲是前人重建熱帶地區的古海洋最常使用的種屬(Wang *et al.*, 1999; Huang *et al.*, 2003)，而Marshall *et al.* (2013)的文章也是以這兩種有孔蟲分析面積密度，但除了這兩種種屬之外，本文中還另外取三種同樣為熱帶區域常見的浮游性有孔蟲種屬*Neoglobobulimina dutertrei*、*Orbulina universa*、*Globigerinella aequilateralis*共五種浮游性有孔蟲作為研究材料。

將乾燥過後大於 63 μ m 的樣本，透過解剖顯微鏡挑出所有完整殼體的浮游性有孔蟲，並進行數量計算以及種屬鑑定，種屬鑑定是採用 Parker (1962)、Kipp (1976)兩篇文獻的分類方法。*G. sacculifer* 在整個生命週期可以細分為有袋型有孔蟲(sac-like chamber)及無袋型有孔蟲(sac-less chamber)，為避免在測量側影面積時有誤差，因此使用無袋型 *G. sacculifer* 作為研究材料，關於有袋型及無袋型殼體的差異，會在後續的章節做介紹。

2.3.2 殼體大小挑選

挑選無袋型*G. sacculifer*、*G. ruber* 種屬進行分析，Marshall *et al.* (2013)的研究中使用的殼體大小分別為425~800 μ m、355~600 μ m，以南海地區拖網樣本鑑種的結果顯示，*G. sacculifer*、*G. ruber*的豐度高值分別出現在殼體大小約300~500 μ m及250~355 μ m的範圍內，因此本研究拖網樣本採用的殼體大小無袋型*G. sacculifer*為300~355 μ m及355~425 μ m，*G. ruber*為250~300 μ m及300~355 μ m。沉積物收集器樣本用來分析的殼體大小則主要是以250~355 μ m (*G. sacculifer*)及150~250 μ m (*G. ruber*)居多，因此挑選這兩個大小範圍的有孔蟲作為研究材料(Lin, 2014)。*O. universa*的殼體大小則挑選425~500、500~600、600~710、710~850 μ m四個範圍，以凸顯殼體大小對於面積密度的差異性。為了同時比較拖網及沉積物收集器樣本的差異，*G. aequilateralis*和*N. dutertrei*兩種種屬則是挑選殼體大小為

300~355 μm 範圍的有孔蟲。

2.3.3 殼體清洗

1. 區分殼體大小後，每個樣品挑選有孔蟲 15 隻，若數量不足則依該範圍大小的數量為主，置入標本瓶中；
2. 加入甲醇(CH_3OH)溶液至標本瓶內，必須讓殼體完全被浸泡，並使用超音波震盪 5 秒。此程序是為了將有孔蟲殼體上附著的浮游生物碎屑清除，震盪後再浸泡 20 分鐘；
3. 利用針筒將標本瓶中的甲醇溶液抽取乾淨，再加入次氯酸鈉溶液，目的為去除有孔蟲殼體中的有機質，此步驟需浸泡 24 小時；
4. 抽取次氯酸鈉溶液，並加入去離子水稀釋掉殼體周遭的次氯酸鈉，由於次氯酸鈉蒸發後會形成白色結晶體，對於後續的秤重實驗上會產生誤差，因此此項步驟會重複 2~3 次，以確保次氯酸鈉溶液完全被清除；
5. 吸取去離子水，再次加入甲醇溶液清除浮游生物碎屑；
6. 吸取甲醇溶液，加入去離子水，再抽取標本瓶中多餘的水分，並確認有孔蟲殼體清洗乾淨；
7. 將有孔蟲樣品放置 50 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱之下，直至標本瓶內的水分完全蒸發，也確保有孔蟲殼體樣品完全不含有水分，即完成清洗動作。

本實驗清洗流程參照 De Villiers (2004)之方法，但為確保清洗完畢後，能最有效的去除有孔蟲殼體內的有機質，因此設計實驗檢測不同方法去除有孔蟲殼體有機質的效果差異。進行方式係將有孔蟲殼體在兩種不同濃度的化學試劑中，浸泡不同時間長度，觀察化學試劑及浸泡時間的不同是否會改變有孔蟲殼體有機質的去除效果。殼體經過前處理和浸泡完甲醇及超音波震盪，並放入 50 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱直到完全去除水分後，秤量原始重量，並重複測量三次取平均值，再開始進行後續的浸泡結果測量，每段時間浸泡完後，皆清洗烘乾並秤重，比較重量的差異。測試的化學試劑分別為次氯酸鈉(NaOCl ；4%)以及雙氧水(H_2O_2 ；3%、7%、10%)，利用雙氧水去除殼體有機質的方法為 Moy *et al.* (2009)所提出。各項實驗設計控制

變因整理如表 2-3。

表 2-3 有孔蟲殼體有機質去除效果實驗控制變因彙整

試劑	次氯酸鈉(NaOCl)	雙氧水(H ₂ O ₂)		
濃度	4%	3%	7%	10%
材料	OR3-1804、355~425 μ m、無袋型 <i>G. sacculifer</i> 15 隻	OR3-1804、355~425 μ m、無袋型 <i>G. sacculifer</i> 15 隻		
浸泡時間	12、24、36、48 (單位：小時)	0.5、1、1.5、2、2.5、3 (單位：小時)		

2.3.4 殼體面積密度測量

挑選完整殼體的有孔蟲樣本 15 隻，在挑蟲盤上排放整齊，將解剖顯微鏡連接 Axio Pixel 程式並設定顯微鏡倍率，接著拍攝有孔蟲殼體的側影面積並記錄下來，再按照順序將對應的有孔蟲殼體放到微量天秤秤量重量，每隻有孔蟲秤量三次，並取平均值及標準差，再計算每隻有孔蟲殼體的平均重量(μ g)及所對應側影面積(μ m²)的比值，即得到有孔蟲殼體的面積密度(μ g/ μ m²)。微量天秤型號為 Mettler XP-26，最小偵測重量為 1 μ g。

為瞭解有孔蟲的殼體大小是否會影響殼體面積密度的變化，因此設計了一個實驗，測量不同殼體大小的兩種有孔蟲 *G. aequilateralis*、*O. universa* 殼體，並觀察殼體面積密度是否會隨著大小改變，實驗設計的控制變因呈現在表 2-4。

浮游性有孔蟲面積密度為殼體重量與側影面積的商，因此為了要瞭解面積密度與殼體重量的差異性，另設計了一個實驗，觀察四種有孔蟲 *G. sacculifer*、*G. rube*、*N. dutertrei*、*G. aequilateralis* 殼體重量與面積密度的相關性，而實驗設計的控制變因呈現於表 2-5。

表 2-4 殼體大小影響面積密度實驗控制變因彙整

種屬	<i>O. universa</i>	<i>G. aequilateralis</i>
----	--------------------	--------------------------

航次	OR5-1302-h1；水深 100m	OR3-1804-F5；水深 100m
殼體大 小(μm)	425~500、500~600、600~710、 710~850 各 15 隻。	300~355、355~425、425~500 各 15 隻。

表 2-5 浮游性有孔蟲殼體面積密度與重量相關性實驗變因彙整

材料	殼體大小為 300~355 μm 的四種有孔蟲種屬 <i>G. sacculifer</i> 、 <i>N. dutertrei</i> 、 <i>G. ruber</i> 、 <i>G. aequilateralis</i> 各 15 隻。	
採樣 方式	沉積物收集器	航次 OR5-1309；串列編號 SEATS-trap1； 收集杯編號：1-11、1-12、2-11、2-12
	拖網	航次 OR5-1302-h1、1302-h3；水深 100 公尺

2.3.5 殼體面積密度 EOF 分析

EOF (Empirical Orthogonal Function)經驗正交函數是一種以統計學為基礎的多變數分析方法，藉由資料本身在空間或時間方面的相關性，呈現資料的統計特徵，統計結果經由研究者的經驗，判斷其所代表的物理意義，因此稱為經驗正交函數。過去廣泛應用在氣象學、物理學及地質學上，主要用來分析不同環境因子相對於時空的分佈型態。EOF 分析的方式是透過將資料以矩陣的形式運算後，會得到 5 組特徵模態(eigen mode)，每個特徵模態中都會有一組矩陣的特徵值(C, eigen value)和特徵向量(V, eigen vector)，每組特徵模態對於資料的解釋程度是由百分比表示。第一組特徵模態能解釋的最多，通常研究中前三個特徵模態即可解釋資料百分比已超過 80%，因此主要取前三個特徵模態來解釋資料上的變化(楊仁凱, 2010)。

參、結果與討論

3.1 有孔蟲殼體面積密度實驗

3.1.1 殼體有機質去除效果實驗

由於有孔蟲的殼體面積密度必須個別測量，因此殼體重量的精準度相當重要，有孔蟲的整體重量除了殼體本身之外還包含殼體內的有機質，秤量重量前會經過前處理，去除附著在殼體上的雜質以及有機質，雜質的量不多，且經由浸泡甲醇去除雜質為常見的方法，而去除有機質的方法則有浸泡次氯酸鈉(NaOCl)及雙氧水(H_2O_2 ；過氧化氫)兩種，因此本實驗欲分析在清洗過程中，哪種化學試劑可以較有效率的清洗有孔蟲的殼體，將有機質對殼體重量的影響降到最低。

梁華升 (2012)說明在前處理清洗有孔蟲殼體的過程中，浸泡化學試劑甲醇及次氯酸鈉皆不會對後續秤量殼體重量造成影響，而本實驗所用的雙氧水呈現弱鹼性，理論上對碳酸鈣殼體也不會造成侵蝕或溶解的作用。實驗的目標是觀察將有孔蟲殼體浸泡兩種化學試劑，分別需要多長的時間可以去除殼體內的有機質。殼體樣本採用 OR3-1804 航次中，在水深 100 公尺的位置拖網採集的無袋型浮游性有孔蟲 *G. sacculifer*，同時為凸顯重量變化而選擇殼體大小範圍為 355~425 μm 的有孔蟲。殼體先進行清洗且浸泡甲醇去除雜質，假設此步驟已將殼體雜質去除乾淨，而有孔蟲浸泡兩種化學試劑(次氯酸鈉、雙氧水)後殼體重量若有減少，減少的幅度越大則代表此化學試劑清洗有孔蟲殼體的效果越好。

De Villiers (2004)的研究方法係以浸泡次氯酸鈉 24 小時以去除有機質，因此本實驗以 12 小時為一個單位，將浸泡次氯酸鈉的時間調整為 12、24、36、48 小時。實驗結果如圖 3.1 所示，殼體重量在開始浸泡的前 12 小時，下降的幅度最劇烈，在浸泡 12 小時到 24 小時的這段時間則只有些微的下降，到了 24 到 36 小時以及 36 到 48 小時的這兩段時間，殼體重量幾乎沒有變化，改變幅度低於秤量天秤的標準偏差值(0.1 μg)。實驗重複三次得到的結果相同，因此推論浸泡次氯酸鈉 24 小時，清洗有孔蟲殼體的效果最好。

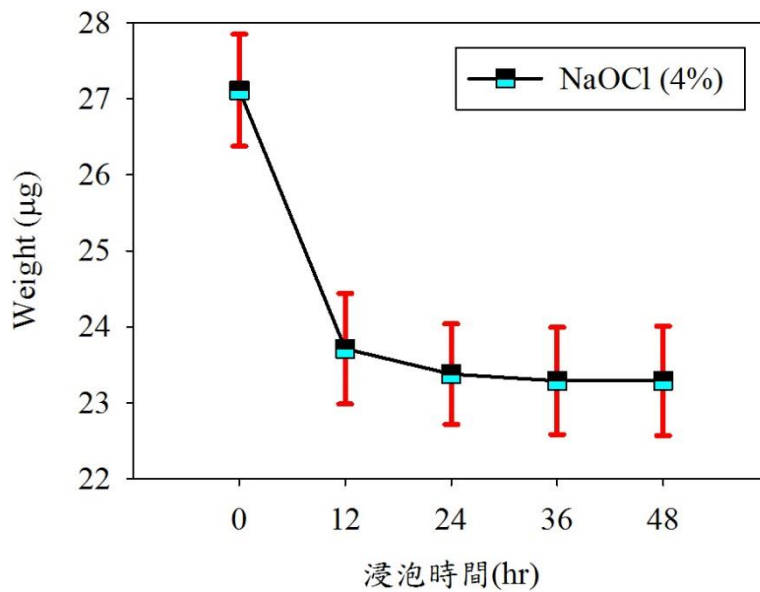


圖 3.1、有孔蟲殼體重量浸泡次氯酸鈉的實驗結果。

Moy *et al.* (2009) 中提及將有孔蟲浸泡在 3% 的雙氧水 1 個小時以內，即可去除殼體內的有機質，因此本實驗浸泡雙氧水的時間以 0.5 個小時為一個單位，並將雙氧水的濃度提高近乎 2 倍(7%)及 3 倍(10%)，測試方法與次氯酸鈉相同，浸泡時間分別為 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5 個小時，實驗進行三重覆取平均值並繪於圖 3.2。雖然測量的重量初始值不同，但有孔蟲的殼體在浸泡三種不同濃度的雙氧水後，重量的變化情形卻相同，開始浸泡後的 2 小時之內，每個單位時間之中重量皆呈現相同的下降趨勢，到了浸泡 2 小時到 3.5 小時之間則趨於平緩，殼體重量在浸泡 2.5 小時之後，殼體重量幾乎沒有變化，幅度也低於秤量天秤的標準偏差值。因此浸泡雙氧水 2.5 小時，能最有效清洗有孔蟲殼體，三種濃度的變化趨勢一致。

有孔蟲殼體浸泡次氯酸鈉及雙氧水的結果，分別在 24 個小時以及 2.5 個小時，可以最有效的清洗有孔蟲殼體，兩種化學試劑去除有機質的效果不相同，次氯酸鈉除了殼體內有機質之外，同時也去除了附著在殼體上的金屬氧化物，浸泡雙氧水時則有可能會因為氧化反應的中間產物附著在殼體上，而造成清洗殼體的效果較差(Gaffey and Bronnimann, 1993)。透過量化實驗的結果，觀察哪一種化學

試劑清洗殼體的效果較好，試將浸泡完後所下降的殼體重量除以初始重量，即得到去除物質的重量佔有孔蟲殼體重量的比例，此比例高代表化學試劑清洗有孔蟲殼體的效果較好。圖 3.3 即為量化的結果，次氯酸鈉：14.2%；雙氧水(3%)：4.66%；雙氧水(7%)：9.74%；雙氧水(10%)：7.10%，由量化結果可確認，浸泡次氯酸鈉 24 小時去除的重量最多、能最有效的清洗有孔蟲殼體。

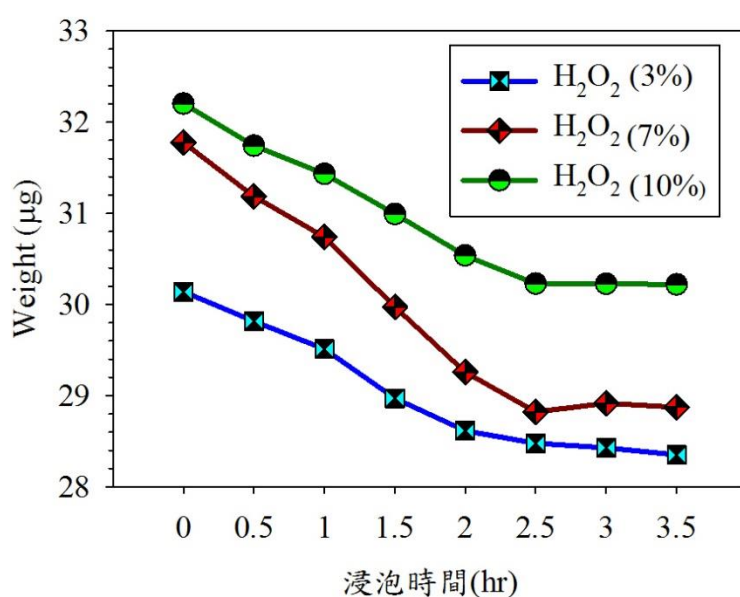


圖 3.2、有孔蟲殼體重量浸泡雙氧水的實驗結果。

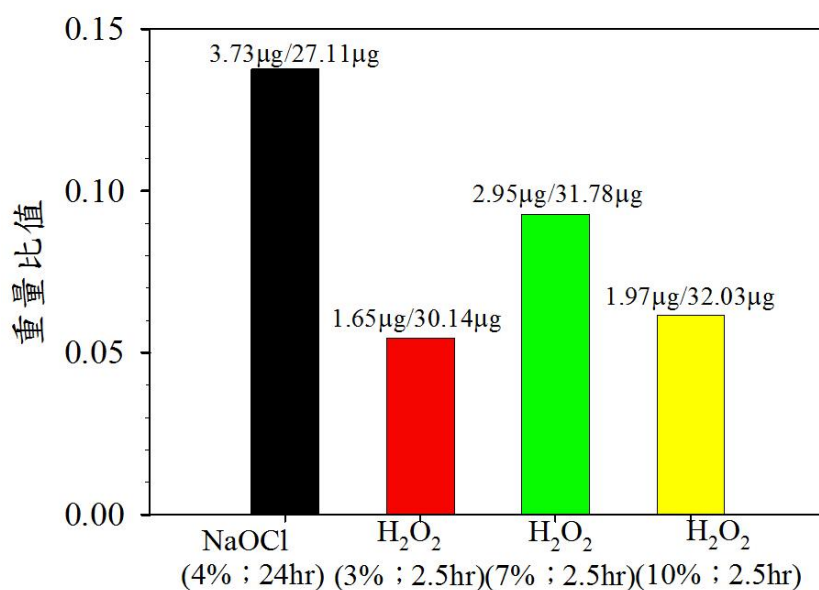


圖 3.3、有孔蟲殼體有機質去除效果量化比較。

3.1.2 殼體面積密度隨殼體大小變化影響

面積密度的算法為有孔蟲的殼體質量除以側影面積，側影面積是藉由體積投影所得，因此殼體大小的差異有可能直接影響側影面積，進而改變面積密度的值。為觀察殼體大小是否會對殼體面積密度造成影響，實驗中測量兩種殼體差異性大的有孔蟲，一種是形體構造為一個單純球體的 *O. universa*，另一種 *G. aequilateralis* 則結構較複雜有多個連續生長房室，比較兩種有孔蟲分別在不同殼體大小範圍的面積密度變化。

G. aequilateralis 測量的殼體大小為 300~355 μm 、355~425 μm 、425~500 μm 三種，測量結果繪於圖 3.4。面積密度隨殼體大小改變情況並不明顯，300~355 μm 範圍的殼體面積密度最小，其次為 425~500 μm ，355~425 μm 範圍的殼體面積密度最大。在測量的過程中還觀察到面積密度受到殼體厚度的影響，圖 3.5 為四個大小皆在 355~425 μm 範圍的 *G. aequilateralis*，因為殼體厚度些微不同，縱使側影面積相差不多，重量卻有明顯的差距。

O. universa 的部分則是量測了 425~500 μm 、500~600 μm 、600~710 μm 、710~850 μm 四個大小範圍的殼體重量與面積，重量變化的結果呈現於圖 3.6，面積密度隨殼體範圍變大而有增加的趨勢，殼體範圍 425~500 μm 的時候面積密度有最小值，增加到 710~850 μm 的時候為最大值。但是在測量 *O. universa* 的面積密度時，也發現了與 *G. aequilateralis* 相同的情形，面積密度明顯受到殼體厚度的影響，圖 3.7 同樣為三個 600~710 μm 的 *O. universa*，雖然側影面積相差不多，但殼體厚度的差異導致重量有明顯的差距。

如前言所述，面積密度為殼體重量及側影面積之商，而重量為三維的單位，面積為二維單位，因此面積密度隨著殼體大小增加而變大是可以預期的結果。因此可以推論，浮游性有孔蟲的面積密度皆會受到殼體厚度和大小的改變受到而影響，但不同的殼體構造對面積密度的影響情況不相同，每一種有孔蟲有個別的種屬差異。另外，兩種影響因子中，殼體大小的範圍為實驗的可控制變因，而殼體厚度則無法控制，亦即可以在實驗中測量並固定殼體大小的範圍，但殼體厚度則

無法預先測量，因此若研究中把殼體範圍的限制縮小，減少殼體大小對於面積密度的影響，即可更準確觀察到殼體厚度的變化。前言中所提到有孔蟲殼體的重量測量，通常沒有探究殼體厚度的部分，而 MBW 及面積密度皆可以觀察到殼體厚度對於重量變化的影響。

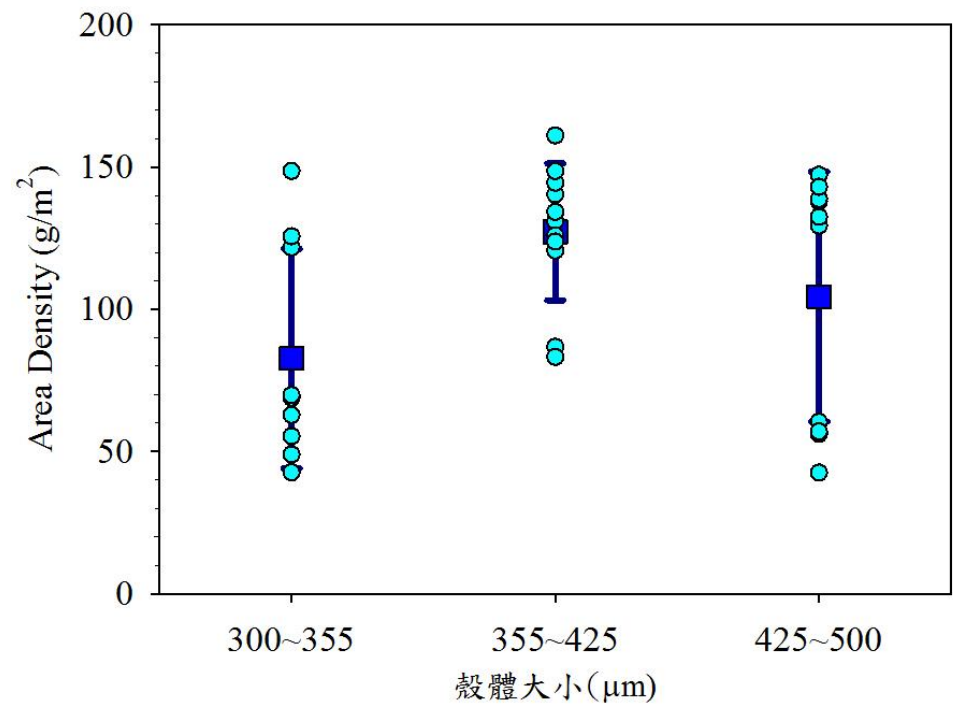


圖 3.4、浮游性有孔蟲 *G. aequilateralis* 面積密度隨殼體大小變化。

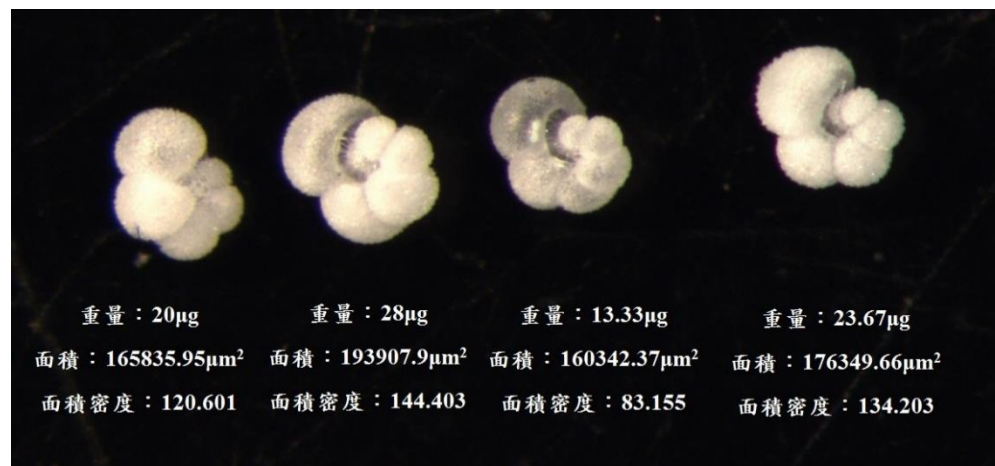


圖 3.5、浮游性有孔蟲 *G. aequilateralis* 殼體側影面積拍攝。

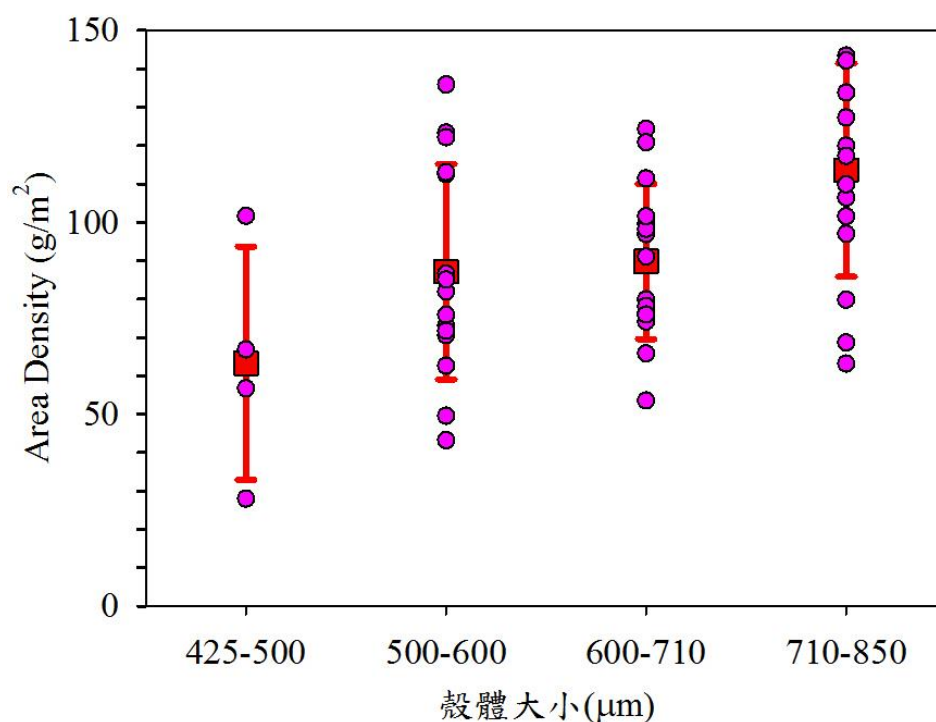


圖 3.6、浮游性有孔蟲 *O. universa* 面積密度隨殼體大小變化。

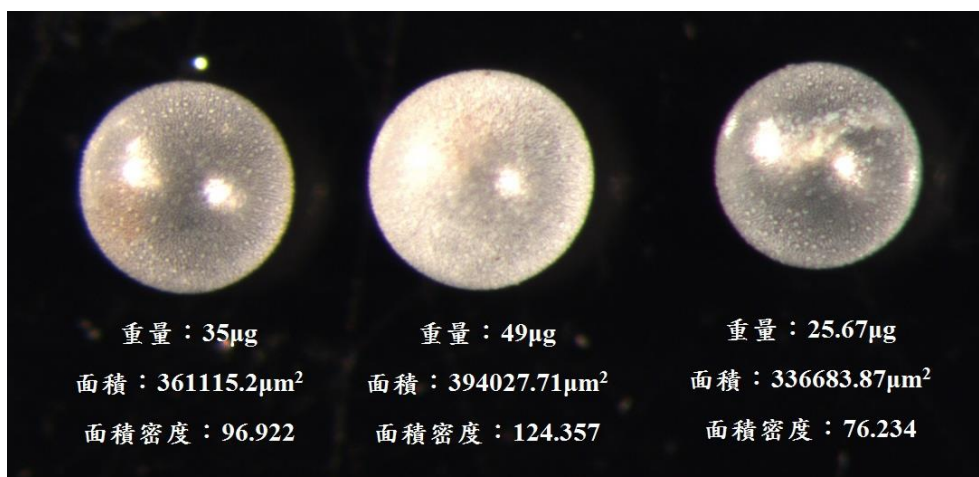


圖 3.7、浮游性有孔蟲 *O. universa* 殼體側影面積拍攝。

3.1.3 面積密度與殼體重量之對比

有孔蟲的面積密度與殼體重量為兩種不同的分析方法，為了區別面積密度與重量的差異，進而分析兩者的相關性，然而有孔蟲面積密度的值必定會與殼體重量有顯著的正相關，而兩者的相關性低的種屬，即表示此種屬的側影面積對於面積密度的效應比其他種屬大，分析殼體面積密度時不易只受重量影響，而更能凸

顯面積密度與殼體重量兩種分析方法的差異。四種有孔蟲種屬計算出來的結果呈現於圖 3.8，分別為：*G. aequilateralis* ($r^2=0.95$)、*N. dutertrei* ($r^2=0.84$)、*G. sacculifer* ($r^2=0.77$)、*G. ruber* ($r^2=0.61$)。

有孔蟲種屬之間明顯會因為殼體構造的不同，而受到的側影面積效應也大不相同。*G. aequilateralis* 和 *N. dutertrei* 的殼體房室排列構造較固定，在測量側影面積時，並無太大差異，因此面積密度受側影面積影響較少。而 *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 則是因殼體的厚薄度變異較大，所以受到側影面積的效應影響較明顯。

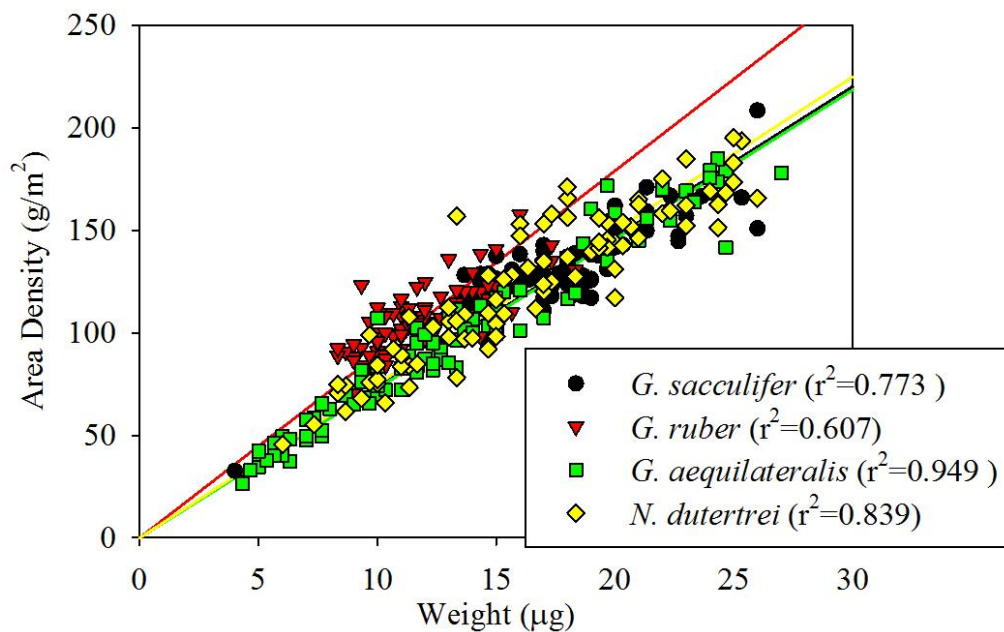


圖 3.8、四種浮游性有孔蟲殼體面積密度與重量對比圖。黑色圓為 *G. sacculifer*；紅色倒三角為 *G. ruber*；綠色正方為 *G. aequilateralis*；黃色菱形 *N. dutertrei*。

3.2 沉積物收集器的有孔蟲殼體面積密度之比較

本文以台灣西南海域在三個季節所佈放的五個串列：BP1、BP2、BP3、BP4、T9-KP，觀察在春、夏、冬三個不同的季節，浮游性有孔蟲殼體面積密度的連續性變化。有孔蟲種屬挑選熱帶海域最常見的其中兩種：*G. sacculifer* 與 *G. ruber*。Lin (2014)提到台灣西南海域的浮游性有孔蟲 *G. sacculifer* 在春季時有相對其他季節較高的豐度，而 *G. ruber* 的相對豐度高值則是在夏季，因此將兩種種屬區分開來討論。

G. sacculifer 在進入配子期之後，會有二次造殼的現象，通常會在第一個房室上方形成更厚實的殼，亦有可能在房室與房室之間長出另一層的碳酸鈣殼體，即為有袋型殼體，因此有袋型(sac-like)及無袋型(sac-less)殼體，分別代表 *G. sacculifer* 生命週期的兩個階段(Bé, 1965; Bijma and Hemleben, 1994)。通常在有孔蟲鑑定時，會將兩者區分開來，有袋型的殼體形狀較不固定，並且為了避免生機效應(vital effect)影響，故本文的工作不採用有袋型殼體。

3.2.1 殼體面積密隨時間變化之趨勢

本研究個別就 *G. sacculifer* 及 *G. ruber* 兩種種屬的殼體面積密度進行李節性的討論，每個收集杯秤量兩個種屬各 15 個完整殼體的面積密度。若完整殼體的數量未達 15 個則秤量全部的殼體，若該收集杯所含的完整殼體數量低於 7 個則不進行測量，因此缺乏面積密度數據的原因為完整殼體數量不足。而以 *G. sacculifer* 來說有可能是殼體數量足夠但以有袋型為主，因此無法測量研究中所需無袋型殼體的相關面積密度數據。有關沉積物收集器收集的收集杯日期詳列於表 3.1，以下依佈放日期為討論的基礎，結果依照種屬分別呈現於圖 3.9 及圖 3.10。

A. 春季(串列：BP1、BP2；收集日期為 2010/3/15~2010/4/20)

G. sacculifer 的分析結果如圖 3.9A 所示，BP1 串列中的第 4、9、10 這 3 個收集杯沒有數據，而第 3 杯及第 8 杯所測得的面積密度則呈現極大值，第 7 杯呈現極小值；BP2 的串列的第 12 個收集杯沒有面積密度資料，但在第 11 杯有極大

表 3-1 沉積物收集器串列的收集時間

杯數	春季串列(BP1、BP2)時間	夏季串列(BP3、BP4)時間	冬季串列(T9-KP)時間
1	2010/3/15~2010/3/18	2010/7/9~2010/7/12	2009/10/29~2009/11/1
2	2010/3/18~2010/3/21	2010/7/12~2010/7/15	2009/11/1~2009/11/4
3	2010/3/21~2010/3/24	2010/7/15~2010/7/18	2009/11/4~2009/11/7
4	2010/3/24~2010/3/27	2010/7/18~2010/7/21	2009/11/7~2009/11/10
5	2010/3/27~2010/3/30	2010/7/21~2010/7/24	2009/11/10~2009/11/13
6	2010/3/30~2010/4/2	2010/7/24~2010/7/27	2009/11/13~2009/11/16
7	2010/4/2~2010/4/5	2010/7/27~2010/7/30	2009/11/16~2009/11/19
8	2010/4/5~2010/4/8	2010/7/30~2010/8/2	2009/11/19~2009/11/22
9	2010/4/8~2010/4/11	2010/8/2~2010/8/5	2009/11/22~2009/11/25
10	2010/4/11~2010/4/14	2010/8/5~2010/8/8	2009/11/25~2009/11/28
11	2010/4/14~2010/4/17	2010/8/8~2010/8/11	2009/11/28~2009/12/1
12	2010/4/17~2010/4/20	2010/8/11~2010/8/14	2009/12/1~2009/12/4

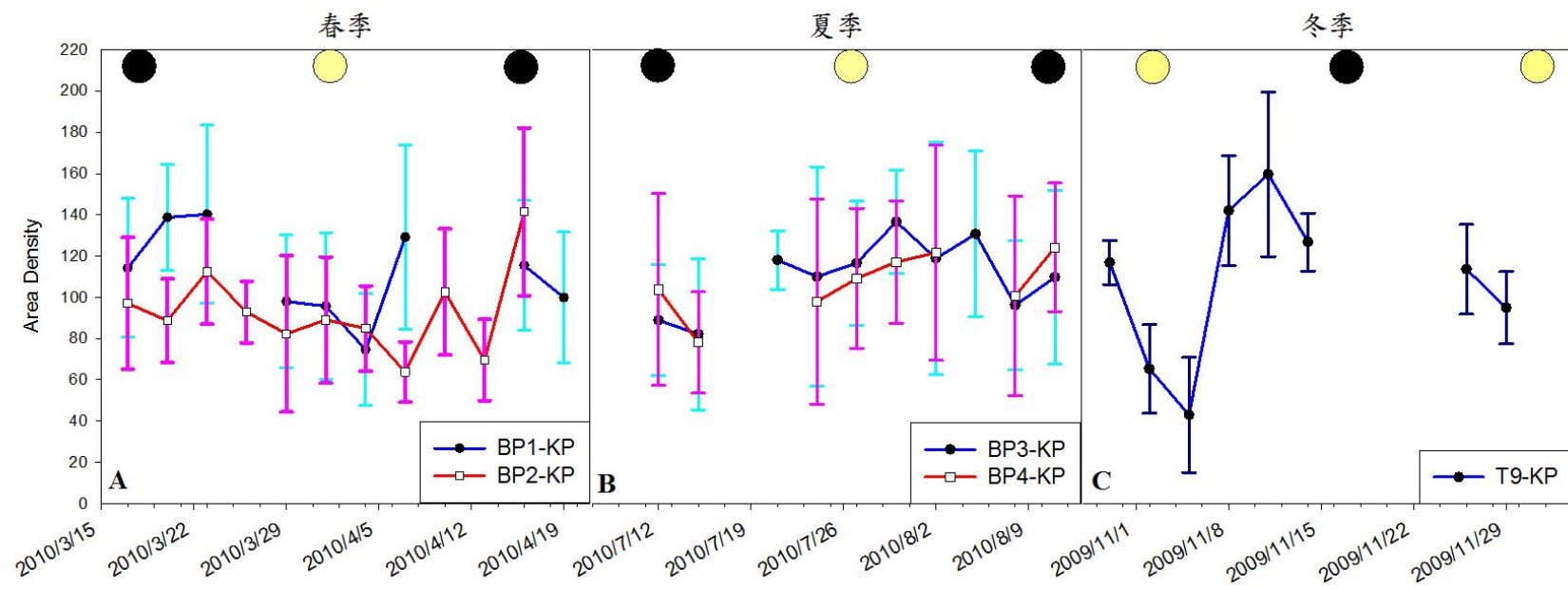


圖 3.9、沉積物收集器所收集之 *G. sacculifer* 殼體面積密度變化。黑色圓圈代表新月，黃色圓圈代表滿月。A 為春季(BP1、BP2)、B 為夏季(BP3、BP4)、C(T9-KP)為冬季時期。

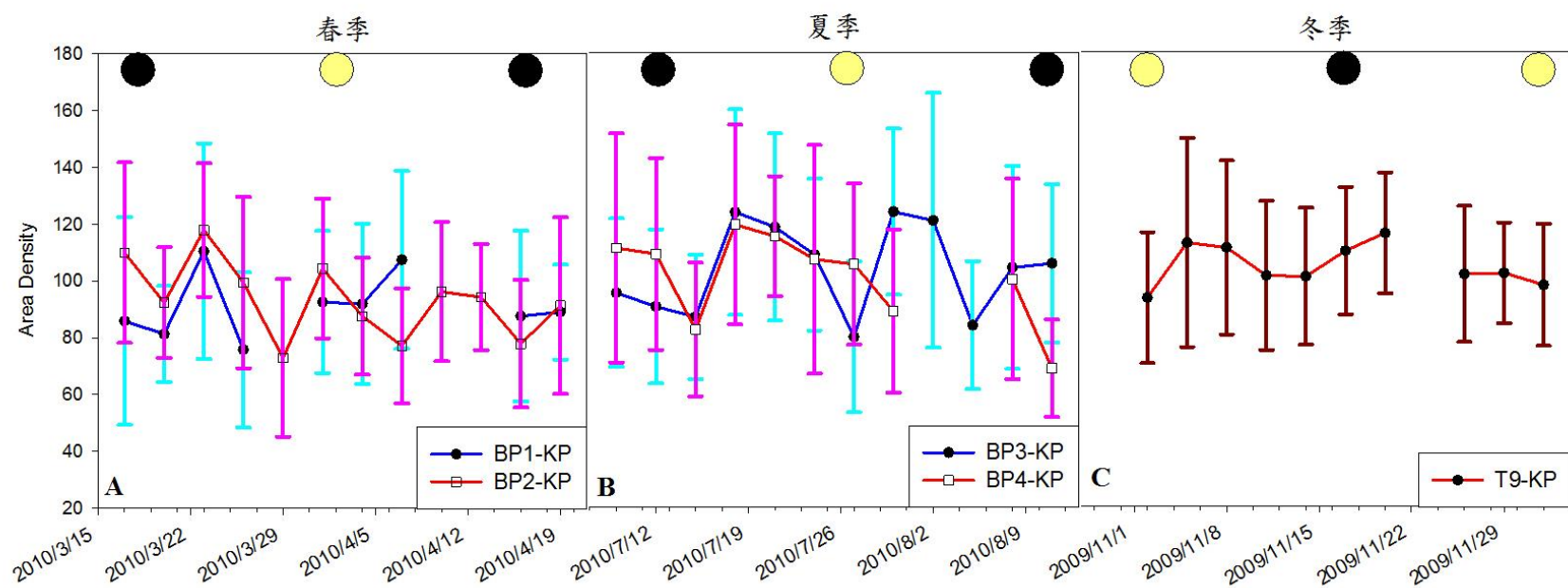


圖 3.10、沉積物收集器所收集之 *G. ruber* 殼體面積密度變化。黑色圓圈代表新月，黃色圓圈代表滿月。A 為春季(BP1、BP2)、B 為夏季(BP3、BP4)、C(T9-KP)為冬季時期。

值，在第 8、10 杯有極小值。BP1 及 BP2 兩個串列的 *G. sacculifer* 同時在第 2 杯及第 8 杯則呈現極大的差值。

G. ruber 的測量結果如圖 3.10A 所示，BP1 的第 5、9、10 杯缺乏面積密度的數據，第 3 杯跟第 8 杯有極大值；BP2 的串列中，*G. ruber* 的數據較齊全，在第 3 杯有極大值，第 5 杯跟第 8 杯有極小值。BP1 及 BP2 的 *G. ruber* 殼體面積密度在第 3 杯皆有極大值，而第 8 杯與 *G. sacculifer* 的春季數據相同皆有較大的差值。

如前小節實驗結果所述，浮游性有孔蟲的面積密度與殼體厚度及大小呈現正相關，因此透過測量殼體側影面積時所拍攝的殼體照片，觀察面積密度產生極值及同樣收集杯編號收集的殼體面積密度在同季節兩個串列有明顯差值的原因，是否由殼體厚度及大小的差異所造成。*G. sacculifer* 在 BP1 第 3 杯面積密度有極大值，側影面積所拍攝到的照片發現第 3 杯的殼體與其它收集杯的殼體相比較厚，推測為造成極大值的原因；在 BP2 第 7 杯則因為殼體呈現較薄較小的趨勢，因此測量到的面積密度呈現極小值；在 BP1 串列第 8 杯所收集到的 *G. sacculifer* 殼體明顯大於 BP2 第 8 杯，因此造成兩個串列在第 8 個收集杯的 *G. sacculifer* 殼體面積密度有明顯差值。*G. ruber* 在兩個串列的第 3 杯皆有極大值，照片上觀察到殼體略大於其他杯收集到的殼體；BP2 第 5 杯的 *G. ruber* 殼體面積密度則因為殼體與其他收集杯相比較小的關係而有極小值；*G. ruber* 同樣在兩個串列的第 8 杯的面積密度值有明顯差距，同樣也是 BP1 串列收集到的 *G. ruber* 殼體較 BP2 大，造成 *G. ruber* 面積密度在 BP1 有極大值，與 BP2 的極小值呈現明顯差距。

B. 夏季(串列：BP3、BP4；收集日期為 2010/7/9~2010/8/14)

圖 3.9B 為 *G. sacculifer* 在夏季收集標本的面積密度變化趨勢，BP3 的第 1、4 杯沒有數據，而第 8 杯有極大值，第 3 杯有極小值；BP4 則是在第 1、4、5、10 等 4 杯缺乏資料，同樣在第 3 杯有極小值，其他收集杯皆無顯著差距，並沒有極大值。兩個串列中 *G. sacculifer* 的面積密度沒有明顯差值。

G. ruber 在夏季的面積密度的測量如圖 3.10B 所示，BP3 串列的數據齊全，並在第 4、8、9 杯有極大值，第 3、7、10 杯有極小值；BP4 的第 9、10 杯因殼

體數量不足造成面積密度數據缺乏，在第 4 杯呈現極大值，第 3 杯及第 12 杯呈現極小值。*G. ruber* 的面積密度在 BP3 及 BP4 兩個串列分別在第 7 杯及第 12 杯有明顯的差距。

G. sacculifer 在夏季兩個串列第 3 杯的殼體面積密度都因為殼體較小而呈現極小值；BP3 的編號 6~10 收集杯皆因為殼體較其他收集杯的殼體大，而面積密度皆呈現高值，其中以第 8 杯為極大值。*G. ruber* 在夏季的兩個串列的第 3 杯殼體面積密度同樣也是都因為殼體較小而呈現極小值；第 4 杯殼體較厚較大而兩個串列的 *G. ruber* 殼體面積密度同時呈現極大值。BP4 串列的 *G. ruber* 在第 9、10 杯因殼體數量較少而缺乏面積密度的數據，但其它杯的面積密度趨勢與 BP3 串列的趨勢有一致性，兩個串列面積密度的趨勢都對應半月亮週期：在新月或滿月時有極小值，但極小值的下一個收集杯，即有極大值的出現。

Bijma *et al.* (1990)根據拖網採集的現生浮游性有孔蟲樣本分析指出，有孔蟲的生長在殼體大小與數量上有週期性，此週期可對應於月亮朔望的週期；其中 *G. ruber* 殼體數量呈現一個半月亮週期的現象，在滿月前 9 天有極大值，滿月後 3 天有極小值，而本研究 *G. ruber* 面積密度的結果也同樣有對應到半月亮週期。前人研究中同樣也有提到 *G. sacculifer* 在數量及殼體大小有類似月亮週期的現象 (Bijma *et al.*, 1990; Jonkers *et al.*, 2015)，但呈現的原因是因為配子過程造成 *G. sacculifer* 殼體數量大增，多為有袋型殼體，而實驗中測量的殼體僅為無袋型，因此排除掉 *G. sacculifer* 面積密度呈現月亮週期的可能。

C. 冬季(串列：T9-KP；收集日期為 2009/10/29~2009/12/4)

圖 3.9C 為 *G. sacculifer* 在冬季的面積密度分佈趨勢，T9-KP 的第 7、8、9、12 等 4 杯殼體數量較少，因此無法取得測量面積密度數據，整體在第 4、5、6 共 3 個收集杯有極大值，而在第 3 杯有極小值。*G. ruber* 在冬季的資料較齊全，僅缺乏第 1 杯跟第 9 杯的面積密度數據，沒有明顯的極大值或極小值(圖 3.10C)。 *G. sacculifer* 在冬季 T9-KP 的殼體數量較其他季節相比偏低，甚至有幾個收集杯並未發現該種屬，而面積密度在第 3 杯因為殼體較其他收集杯小而呈現極小值；第

5、6 也因為殼體較其他收集杯厚，而使得 *G. sacculifer* 面積密度有極大值。

春季夏季各有兩個串列，且佈放時間皆完全相同，距離相差都不到經度 1 度，理論上採集到的樣本應該不會有明顯差異，但 *G. sacculifer* 的面積密度不論在春夏兩個季節的哪一個季節，同季節兩個串列的變化趨勢都沒有有一致性，因此推論除了殼體的大小變化之外，*G. sacculifer* 的殼體面積密度還有受到其他因素所影響。相對的 *G. ruber* 則比較沒有差異，同樣春夏兩個季節，單一季節的兩個串列皆有相似的趨勢。冬季的串列只有 T9-KP 一個，且兩種種屬的殼體數量皆較其他季節缺乏，因此不容易在相關性得對比上顯現統計相關。

3.2.2 殼體面積密度 EOF 分析

由圖 3.9 及 3.10 的結果可以發現，浮游性有孔蟲的殼體面積密度與殼體大小正相關，為瞭解除了殼體大小之外，其他串列的收集資料與殼體面積密度的共變化趨勢，因此將殼體面積密度與其他參數以 EOF 的統計方式分析，觀察特徵向量與特徵值的分布趨勢。

沉積物收集器串列列入分析的變數為以下幾項：水溫(°C)、壓力(沉積物收集器的佈放深度，可觀察海水的潮汐變化)、質量總通量(單位時間單位面積收集到的沉積物重量；g/m²-day)、粗顆粒含量(> 63μm 顆粒重量佔全體重量的百分比；wt%)、殼體數量通量(單位時間單位面積收集到的有孔蟲數量；#/m²-day)、殼體大小百分比(單一般體大小範圍數量佔全部數量的百分比；%)，觀察以上沉積物收集器串列參數與浮游性有孔蟲殼體面積密度進行 EOF 分析的統計特徵。

本節主要透過 EOF 的特徵向量及特徵值兩個部分分析，任意兩個參數的特徵向量同向即為正相關，反之則為負相關，同一特徵模式中，特徵向量的絕對值越高，代表該參數在此模式中貢獻越大。EOF 分析出來後主要分為 5 個 Mode 共 100%，亦即 100%解釋了所有參數的趨勢變異量，而正常情況 Mode 1、2、3 的總和即會達到 80%，表示前 3 個 Mode 即可解釋 80%的趨勢，而剩餘 20%的趨勢因代表的統計意義低而不予解釋(楊仁凱, 2010)。

由於本論文工作主要是觀察 *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 的面積密度與其它分析的變數是否有相同趨勢性，因此會以此參數值為主做進一步的比對，藉由變化趨勢的檢視，可以瞭解可能與有孔蟲殼體面積密度同步變化的參數，再透過 EOF 分析可以更明確的了解哪些參數會跟殼體面積密度有相同的變化趨勢，哪些參數與面積密度的變化趨勢無顯著相關。如同前一小節討論，EOF 分析的結果也依照沉積物收集器佈放的季節分別敘述如下。

A. 春季(串列 BP1、BP2；收集日期為 2010/3/15~2010/4/20)

圖 3.11 為 *G. sacculifer* 的面積密度與 BP1 串列參數的 EOF 分析結果，在 BP1 的 Mode 1 殼體面積密度與粗顆粒含量、質量總通量、潮汐變化及殼體通量

有相同的特徵向量，並解釋了 53.07% 的變異；*G. sacculifer* 的面積密度與 BP2 串列參數的 EOF 分析結果繪於圖 3.12，雖然 Mode 1 解釋 41.63% 的變異強度，但 *G. sacculifer* 面積密度的特徵值偏低，因此先不參考 Mode 1 的統計特徵；而 Mode 2 則解釋 24.40% 的變異強度，*G. sacculifer* 的面積密度與殼體通量呈現正相關。BP1 串列在 Mode 1 就有很好的強度解釋，因此不參考 Mode 2 的統計特徵；BP2 串列則是以 Mode 2 為主，殼體面積密度與殼體通量的相關性最高，因此以兩個串列所做的 EOF 分析結果顯示：*G. sacculifer* 在春季時殼體面積密度與殼體通量在分佈趨勢方面最有關聯性。

圖 3.13 為 *G. ruber* 的面積密度與 BP1 串列參數的 EOF 分析結果，Mode 1 解釋了 54.08% 的變異強度，面積密度與粗顆粒含量、質量總通量、潮汐變化及殼體通量有相同的特徵向量；*G. ruber* 的面積密度與 BP2 串列參數的 EOF 分析結果繪於圖 3.14，Mode 1 在其他串列參數特徵值相關性良好的情況下，面積密度的特徵值卻很低，因此不參考 Mode 1 的統計特徵，Mode 2 則是在解釋了 21.11% 的變異強度下與溫度和殼體通量呈現正相關。*G. ruber* 的殼體面積密度在春季與 *G. sacculifer* 有相同的結果，在分佈趨勢方面與數量通量相關性最明顯。

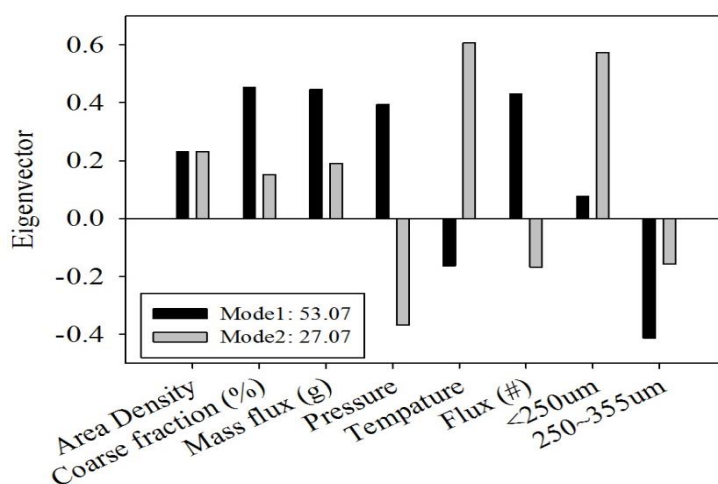


圖 3.11、*G. sacculifer* 殼體面積密度與 BP1 串列參數的 EOF 分析結果。

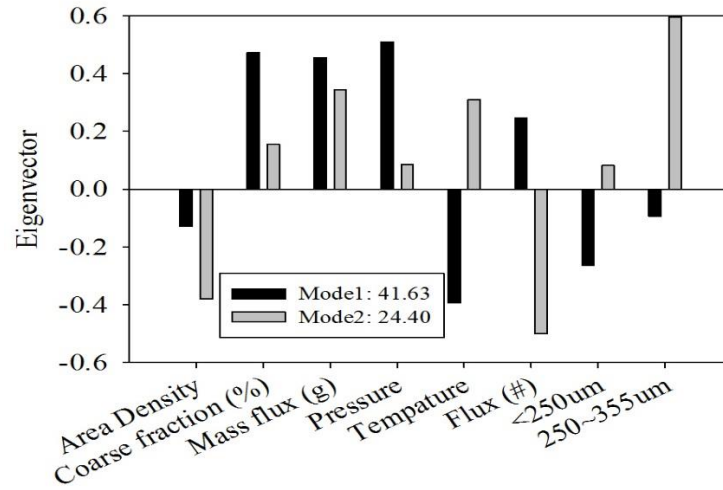


圖 3.12、*G. sacculifer* 殼體面積密度與 BP2 串列參數的 EOF 分析結果。

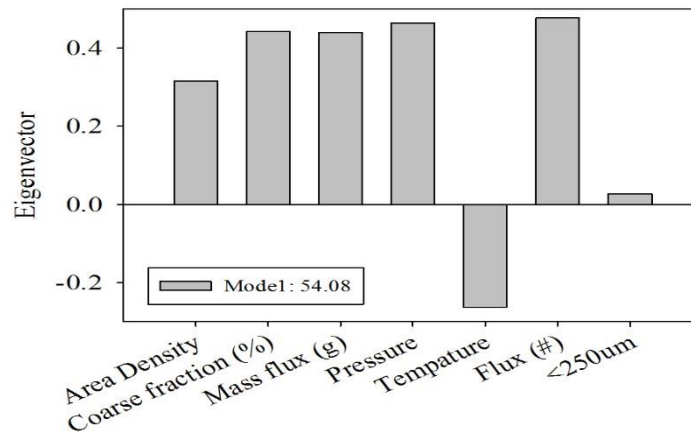


圖 3.13、*G. ruber* 殼體面積密度與 BP1 串列參數的 EOF 分析結果。

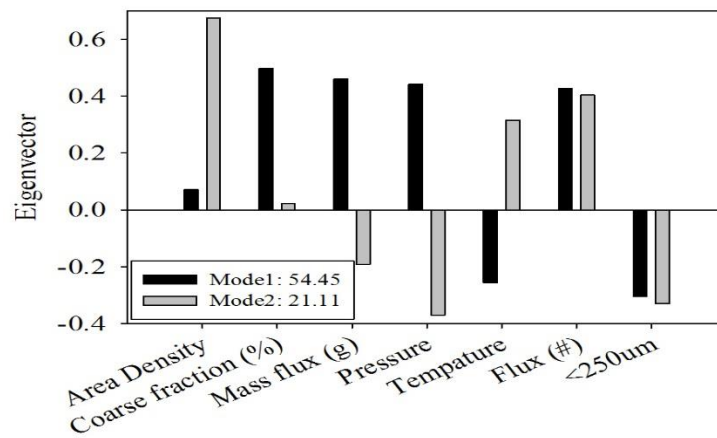


圖 3.14、*G. ruber* 殼體面積密度與 BP2 串列參數的 EOF 分析結果。

B. 夏季(串列：BP3、BP4；收集日期為 2010/7/9~2010/8/14)

圖 3.15 為 *G. sacculifer* 面積密度與 BP3 串列參數的 EOF 分析結果，BP3 在 Mode 1 解釋了 52.35%的變異強度，但同樣在其他串列參數的特徵值相關性良好的情況下，面積密度的特徵值很低，因此同樣不參考 Mode 1 的統計特徵，Mode 2 則是在解釋了 23%的變異強度下，面積密度與溫度和數量通量有相同的特徵向量；BP4 串列參數與 *G. sacculifer* 面積密度的 EOF 分析結果繪於圖 3.16，Mode 1 解釋 52.35%的變異強度，面積密度與粗顆粒含量、質量總通量、潮汐變化及殼體通量有相同的特徵向量。*G. sacculifer* 面積密度與 BP3 串列參數的 EOF 分析結果以 Mode 2 為主，與 BP4 串列參數的 EOF 分析結果則是以 Mode 1 為主，夏季得到的結果與春季相同，*G. sacculifer* 殼體面積密度與數量通量在分佈趨勢方面最有關聯性。

圖 3.17 為 *G. ruber* 的面積密度與 BP3 串列參數的 EOF 分析結果，Mode 1 解釋了 46.32%的變異強度，但面積密度的特徵值太低，因此改為參考 Mode 2 的分析結果，面積密度與質量總通量、溫度及殼體通量有相同特徵向量，變異強度為 18.80%；*G. ruber* 的面積密度與 BP4 串列參數 EOF 分析結果繪於圖 3.18，Mode 1 有 58.71%的變異強度，面積密度與質量總通量、粗顆粒含量、潮汐變化、數量

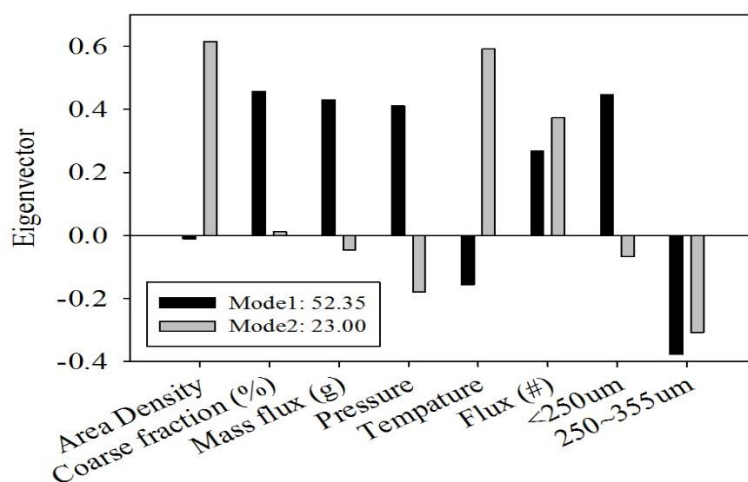


圖 3.15、*G. sacculifer* 殼體面積密度與 BP3 串列參數的 EOF 分析結果。

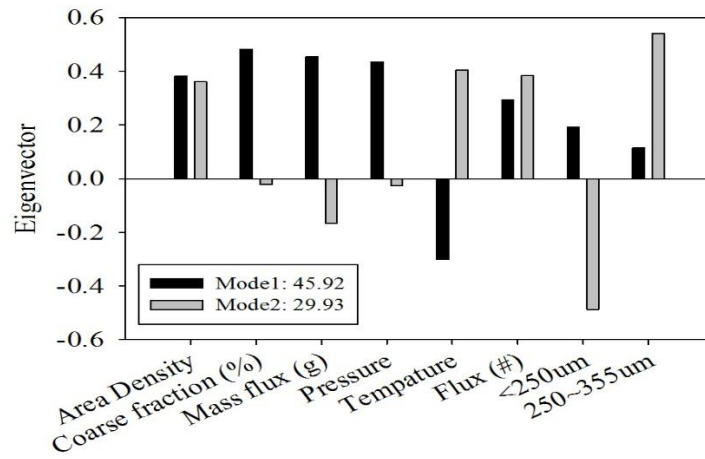


圖 3.16、*G. sacculifer* 殼體面積密度與 BP4 串列參數的 EOF 分析結果。

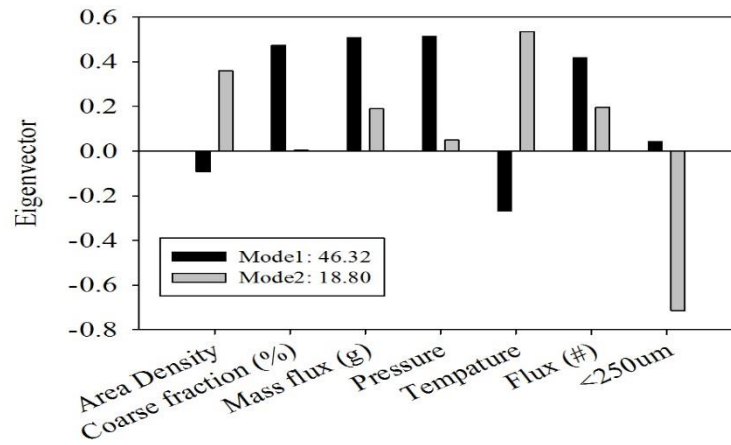


圖 3.17、*G. ruber* 殼體面積密度與 BP3 串列參數的 EOF 分析結果。

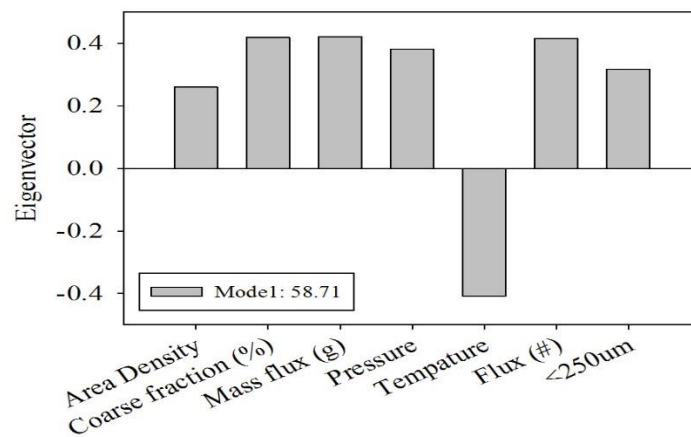


圖 3.18、*G. ruber* 殼體面積密度與 BP4 串列參數的 EOF 分析結果。

通量及殼體大小呈現正相關。*G. ruber* 的殼體面積密度與夏季兩個串列的參數進行 EOF 分析，面積密度與兩個串列參數的統計特徵沒有一致性，因此推斷 *G. ruber* 的殼體面積密度在夏季沒有與沉積物收集器串列參數相關。

C. 冬季(串列：T9-KP；收集日期為 2009/10/29~2009/12/4)

由於佈放期間加掛在 T9-KP 串列上的流速儀並不穩定，因此缺乏第 6 個收集杯以後的潮汐和溫度資料，因此在進行面積密度與 T9-KP 串列參數的 EOF 分析時，並未參考此兩項參數的值。圖 3.19 為 *G. sacculifer* 面積密度與 T9-KP 串列參數的 EOF 分析結果，T9-KP 在 Mode 1 解釋了 49.87% 的變異強度下，面積密度與粗顆粒含量、數量通量和殼體大小呈現正相關，Mode 2 則是與質量總通量、數量通量和殼體大小有相同的變化趨勢。*G. ruber* 的殼體面積密度與 T9-KP 串列參數的 EOF 分析結果繪於圖 3.18，Mode 1 的面積密度特徵值與其他參數特徵值相比較低，因此不參考 Mode 1 的統計特徵，Mode 2 解釋了 25.01% 的變異強度，面積密度與殼體大小呈現正相關。

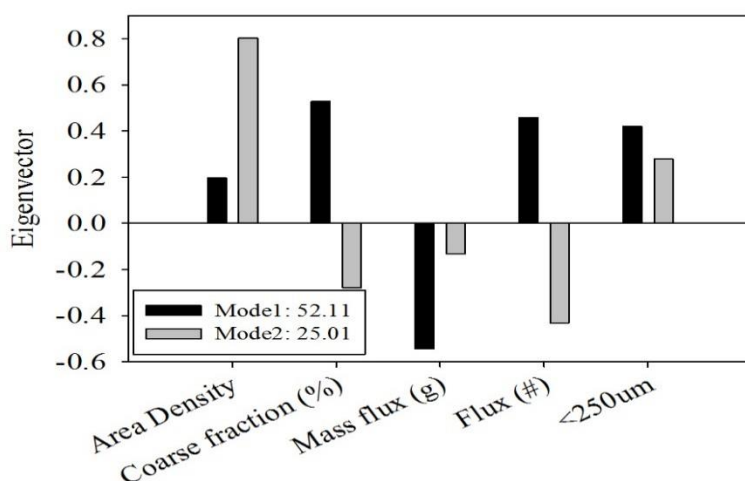


圖 3.20、*G. sacculifer* 殼體面積密度與 T9-KP 串列參數的 EOF 分析結果。

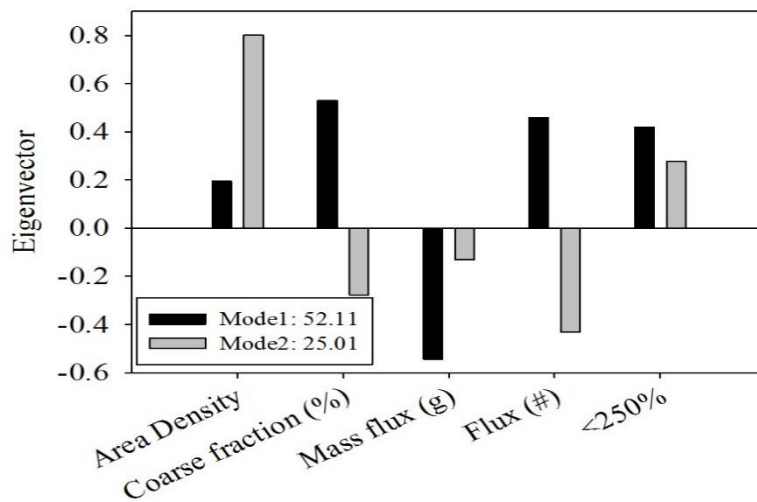


圖 3.20、*G. ruber* 殼體面積密度與 T9-KP 串列參數的 EOF 分析結果。

浮游性有孔蟲 *G. sacculifer* 透過三個季節共五個串列收集到的樣本，都發現殼體面積密度會受到殼體大小的影響而呈現正相關，而 *G. sacculifer* 面積密度與五個串列的參數進行 EOF 分析，結果顯示 *G. sacculifer* 的面積密度除了殼體大小之外，與數量通量也呈現正相關。*G. ruber* 透過五個串列收集到的樣本同樣也發現殼體面積密度與殼體大小呈現正相關，而 *G. ruber* 殼體面積密度與五個串列的參數進行 EOF 分析的結果則顯示，春季及冬季 *G. ruber* 殼體面積密度與數量通量和殼體大小有一致性的變化，但 *G. ruber* 在夏季殼體面積密度則沒有與沉積物收集器串列參數相關。另外，*G. ruber* 在夏季的殼體面積密度呈現半月亮週期的趨勢。

3.3 浮游生物拖網的有孔蟲面積密度之比較

3.3.1 殼體面積密度隨緯度之變化

Berger (1968)提到浮游性有孔蟲的通量會隨著生活區域的緯度變化而有所不同，喜好生活在高緯度的有孔蟲，殼體厚度通常較厚，棲息深度也較深。為了驗證緯度變化對有孔蟲通量的影響，利用 OR5-1306 航次從南海 13°N 的位置，緯度每往北約 3°進行一次拖網採樣，四天的時間共採樣四次，站位如圖 2.1 所示分別是 N3 (13°N)、N5 (16°N)、N7 (18°N)、N9 (21°N)，藉以觀察此四個站位的標本是否也有類似 Berger (1968)所提出的情形：殼體的厚度會隨著緯度偏高而變厚，進而造成殼體面積密度變大。拖網樣本分析的有孔蟲為 *G. sacculifer* 和 *G. ruber*，殼體大小分別是 355~425 μm 以及 300~355 μm 兩種範圍。

圖 3.21 為浮游性有孔蟲殼體面積密度隨緯度變化的趨勢，*G. sacculifer* 和 *G. ruber* 兩種種屬在變化上相差甚遠，*G. sacculifer* 的面積密度在 OR5-1306 航次除了 N5 之外的三個站位皆無明顯差距。*G. ruber* 的面積密度在四個站位都沒有顯著的差異和極值，因此我們可以推論 *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 兩種浮游性有孔蟲的殼體面積密度不會隨緯度而有遞增或遞減的線性變化。

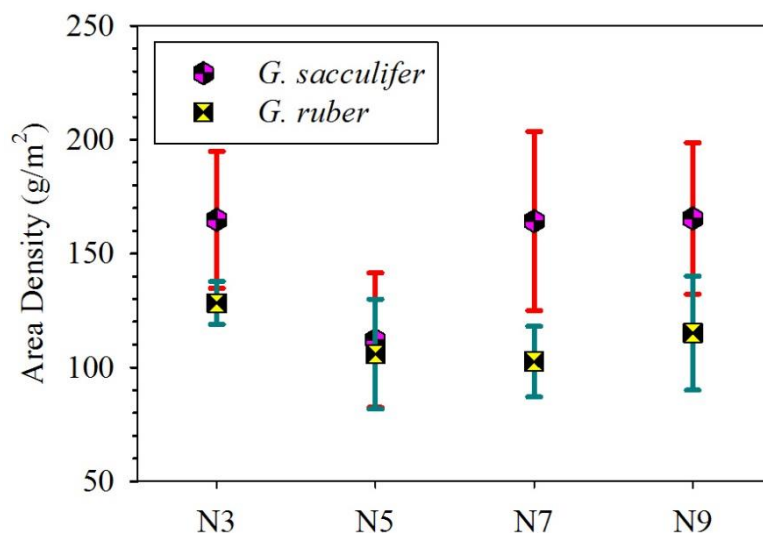


圖 3.21、浮游性有孔蟲面積密度隨緯度變化趨勢；縱軸為面積密度，橫軸為站位。

3.3.2 殼體面積密度隨採樣時間間隔之變化

海水酸化議題日益受到重視，海水 pH 值的降低亦對浮游性有孔蟲等碳酸鈣殼質生物的存活量造成威脅(圖 1.1)，同時也有可能對殼體的造殼效率以及保存度有影響(Chen *et al.*, 2012)，因此分別比較同一區域相隔 5 年及 10 年的拖網航次，觀察是否可以分別從殼體面積密度找到海水酸化對有孔蟲殼體的影響。OR1-845 航次在 2007 年 10 月 28 日的 W3 站位進行拖網採樣，OR3-1651 航次 2012 年 10 月 29 日的 M1 拖網，兩個站位採樣的時間皆在 10 月，因此可以對比南海 5 年前後的殼體面積密度差異；而 OR1-688 航次的站位 J 與 OR5-1306 航次的四個站位皆在夏季，兩者在時間上相差了 10 年，其中 OR5-1306 航次以 N5 的站位與站位 J 最接近，因此以 N5 站位的有孔蟲殼體面積密度跟站位 J 對比相隔 10 年採樣的結果。拖網樣本分析的有孔蟲同為 *G. sacculifer* 和 *G. ruber*，殼體大小分別是 355~425 μm 以及 300~355 μm 兩種範圍。

圖 3.22 為 *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 兩種種屬的殼體面積密度各間隔 5 年及 10 年採樣的結果，其中 OR3-1651 的 M1 站位沒有 *G. ruber* 的數據資料，因此 *G. ruber* 的殼體面積密度沒有 M1 與 W3 站位所比較間隔 5 年前後的差異。*G. ruber* 的殼體面積密度間隔 10 年的採樣結果，並沒有發現明顯變化；而間隔 5 年和 10 年的時間都發現 *G. sacculifer* 殼體面積密度有下降的現象。Lui and Chen (2015)利用太平洋及大西洋共 5 個時間序列測站的資料庫，建立可以藉由西元年份和現場水溫推算出海水 pH 值的經驗公式。研究中藉由此經驗公式推算出 J、N5 及 W3、M1 四個站位的海水 pH 值並標示於圖 3.22，推算出的 pH 值在間隔 5 年及間隔 10 年的時間都呈現下降的現象。因此我們可以由經驗公式推論出的 pH 值觀察到相隔 10 年海水受到酸化的改變，並透過間隔 5 年及 10 年拖網採樣取得的 *G. sacculifer* 殼體面積密度隨時間下降的現象印證海水酸化對浮游性有孔蟲殼體的影響。

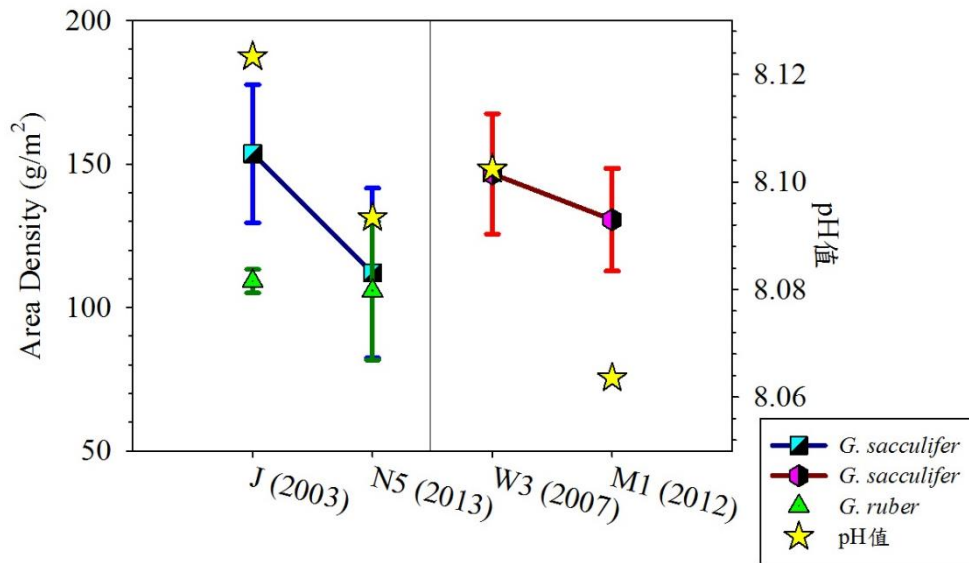


圖 3.22、浮游性有孔蟲面積密度隨採樣時序變化趨勢；左縱軸為面積密度，右邊縱軸為經驗公式推算之 pH 值，橫軸為站位。

3.3.3 殼體面積密度與水文參數之 EOF 分析

G. sacculifer 的殼體面積密度與環境水文參數之 EOF 分析結果如圖 3.23 所示，Mode 1 的特徵模態解釋了 44.16% 的變異強度，*G. sacculifer* 的面積密度與 pH 值和螢光值積分呈現正相關，與溫度和鹽度呈現負相關。*G. ruber* 的分析結果則是在圖 3.24，同樣只取 Mode 1，而解釋的資料百分比為 54.15%，但 *G. ruber* 殼體面積密度的特徵向量值太低，因此推測與其它水文參數沒有明顯的統計特徵。如前言所述，海水中的 pH 值若下降則導值碳酸鈣的飽和狀態隨之降低，造成浮游性有孔蟲殼體的生長及保存狀況受到影響，而面積密度的值有減少的趨勢，因此 EOF 分析印證了此結果顯示 *G. sacculifer* 的殼體面積密度與 pH 值呈現正相關。

藉由 CTD 船測的螢光值通常用來代表海水中葉綠素 a 值的濃度，同一深度若螢光值較高也代表葉綠素 a 值有高值產生。葉綠素 a 值代表的是浮游性有孔蟲的食物來源，前人研究認為浮游性有孔蟲在水體中的垂直分佈與葉綠素 a 濃度變畫有關(Fairbanks et al., 1982; Field, 2004; Kuroyanagi and Kawahata, 2004)。梁華升 (2012) 在南海針對 *G. sacculifer* 殼體大小及通量的研究證實了前人提出的結果，海

水中螢光值的積分會與 *G. sacculifer* 殼體大小呈現正相關，*G. sacculifer* 在螢光高值出現的深度也呈現殼體較大的情形。本論文工作則是在相同殼體大小與面積密度呈現正相關的情況下，推測海水中的螢光值積分越大，*G. sacculifer* 的殼體面積密度也會越大，兩者的相關性比較繪於圖 3.25，除了 N5 站位之外，其它站位所量測 *G. sacculifer* 的殼體面積密度與螢光值積分的相關性為 $r^2=0.76$ 。從既有的水文參數及 EOF 分析結果，皆無法推論 N5 站位的 *G. sacculifer* 殼體面積密度異常於其他站位之原因。

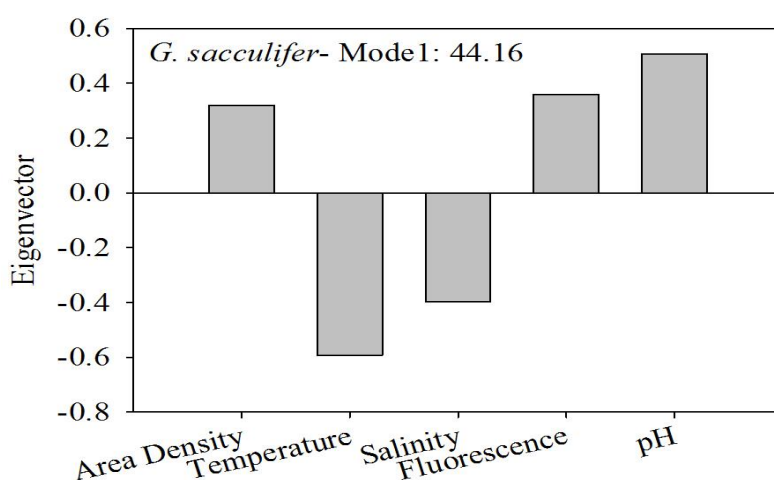


圖 3.23、拖網採集之 *G. sacculifer* 面積密度與水文參數 EOF 分析結果。

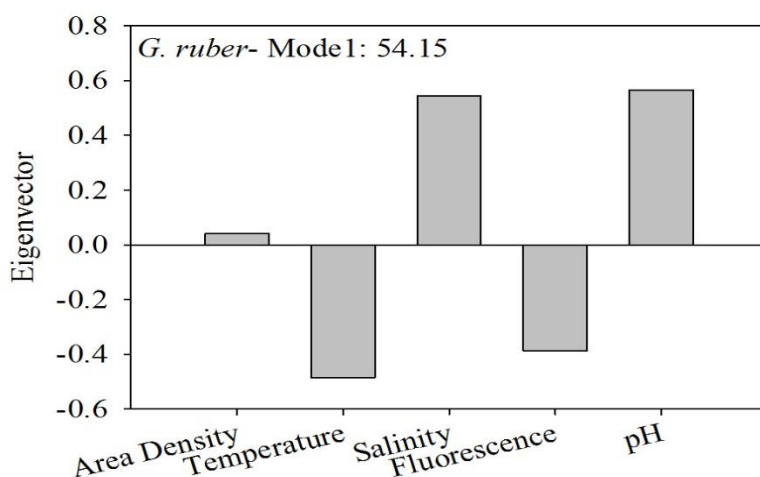


圖 3.24、拖網採集之 *G. ruber* 面積密度與水文參數 EOF 分析結果。

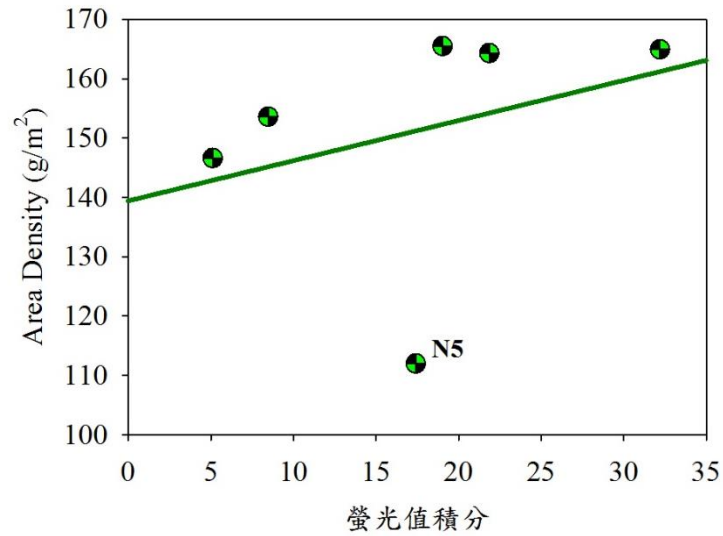


圖 3.25、*G. sacculifer* 面積密度與螢光值積分之相關性對比結果。

觀察 OR5-1306 航次四個站位的 *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 兩種浮游性有孔蟲殼體面積密度，發現除了 N5 站位之外，其餘三個站位皆沒有明顯差異，因此推測 *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 兩種浮游性有孔蟲殼體面積密度並不會隨緯度分佈而改變。間隔 10 年採集的 *G. ruber* 殼體面積密度樣本沒有隨時間變化的現象，但間隔 5 年或 10 年採樣取得的 *G. sacculifer* 殼體面積密度卻有明顯下降的現象，並且發現由經驗公式推算出的 pH 值也有相同變化。浮游性有孔蟲殼體面積密度與水文參數之 EOF 分析的結果顯示，*G. sacculifer* 的殼體面積與海水中的螢光值積分和經驗公式推算的 pH 值呈現正相關。

3.4 浮游生物拖網與沉積物收集器的有孔蟲面積密度之比較

拖網與沉積物收集器為兩種截然不同的有孔蟲採樣方式，一種是短暫且快速而採集到現生的有孔蟲殼體，另一種則是連續性較完整的採集剛結束生命週期的有孔蟲殼體，兩種採樣方式的差異性讓採集到的樣本在互相比較上有困難。

Marshall *et al.* (2013)提到有孔蟲的殼體面積密度可以作為古海水碳酸根離子濃度的替代指標，亦即海水中的碳酸根離子濃度會影響有孔蟲殼體面積密度的變化。Pälike *et al.* (2012)指出太平洋海水在副熱帶地區的飽和狀態約在水深 1000 公尺以淺，而碳酸鈣補償深度約為 3500 公尺左右。因此本研究中透過三個不同深度收集有孔蟲的殼體，分別是 OR5-1302 航次中所採集的水深 100 公尺水平拖網樣本，以及佈放在南海 SEATS 站水深 2000 公尺及 3500 公尺收集顆粒的沉積物收集器，觀察三個深度之間所收集的有孔蟲樣本，殼體面積密度會不會因為深度的差異而有所不同，詳細沉積物收集器之收集杯編號如表 3.2。

有孔蟲種屬挑選為 *G. sacculifer*、*N. dutertrei*、*G. ruber*、*G. aequilateralis* 四種，殼體大小皆為 355~425 μm ，分析結果繪於圖 3.26。*G. sacculifer* 和 *G. ruber* 的殼體面積密度在三個深度都沒有太大的差異。*N. dutertrei* 則在拖網 OR5-1302 航次的 h3 站位殼體面積密度呈現低值，其餘皆沒有明顯的變化。*G. aequilateralis* 的殼體面積密度差異最明顯，兩個拖網的樣本呈現極低值，而沉積物收集器 1-12 (2000 公尺的第 12 個收集杯)則呈現極高值。

表 3-2 SEATS 沉積物收集器之收集時間

	水深 2000 公尺	水深 3500 公尺
收集杯編號	1-11	2-11
(收集時間)	(2013/12/9~2013/12/17)	(2013/12/9~2013/12/17)
收集杯編號	1-12	2-12
(收集時間)	(2013/12/17~2013/12/25)	(2013/12/17~2013/12/25)

殼體側影拍攝結果顯示 *N. dutertrei* 在拖網 OR5-1302 航次的 h3 站位的殼體與其他站位和收集杯採集到的殼體相比較小且薄，因此在面積密度上呈現低值，但 *N. dutertrei* 在沉積物收集器的四個標本並沒有因為深度而有所變化，推測造成低值的原因應與採樣深度無關。沉積物收集器所採集到的 *G. aequilateralis* 殼體面積密度與拖網採集到的樣本相比明顯較大，推測拖網所採集到的標本仍處在生命週期，而沉積物收集器所採集到的樣本則是結束生命週期而沉降的成熟殼體，因此在重量及厚度上皆比拖網樣本大，進而造成沉積物收集器採集到殼體面積密度呈現較大的趨勢。

測量面積密度可以同時觀察殼體厚度及大小的變化，因此對於觀察有孔蟲殼體受到溶解效應的影響，理論上應該會是很好的方法，但推測本研究的採樣深度差距太小，而沒有看到顯著的面積密度變化，因此需要將採樣深度的範圍擴大，及更完整的實驗流程，以觀察有孔蟲殼體因為深度差距而受到溶解效應的影響。

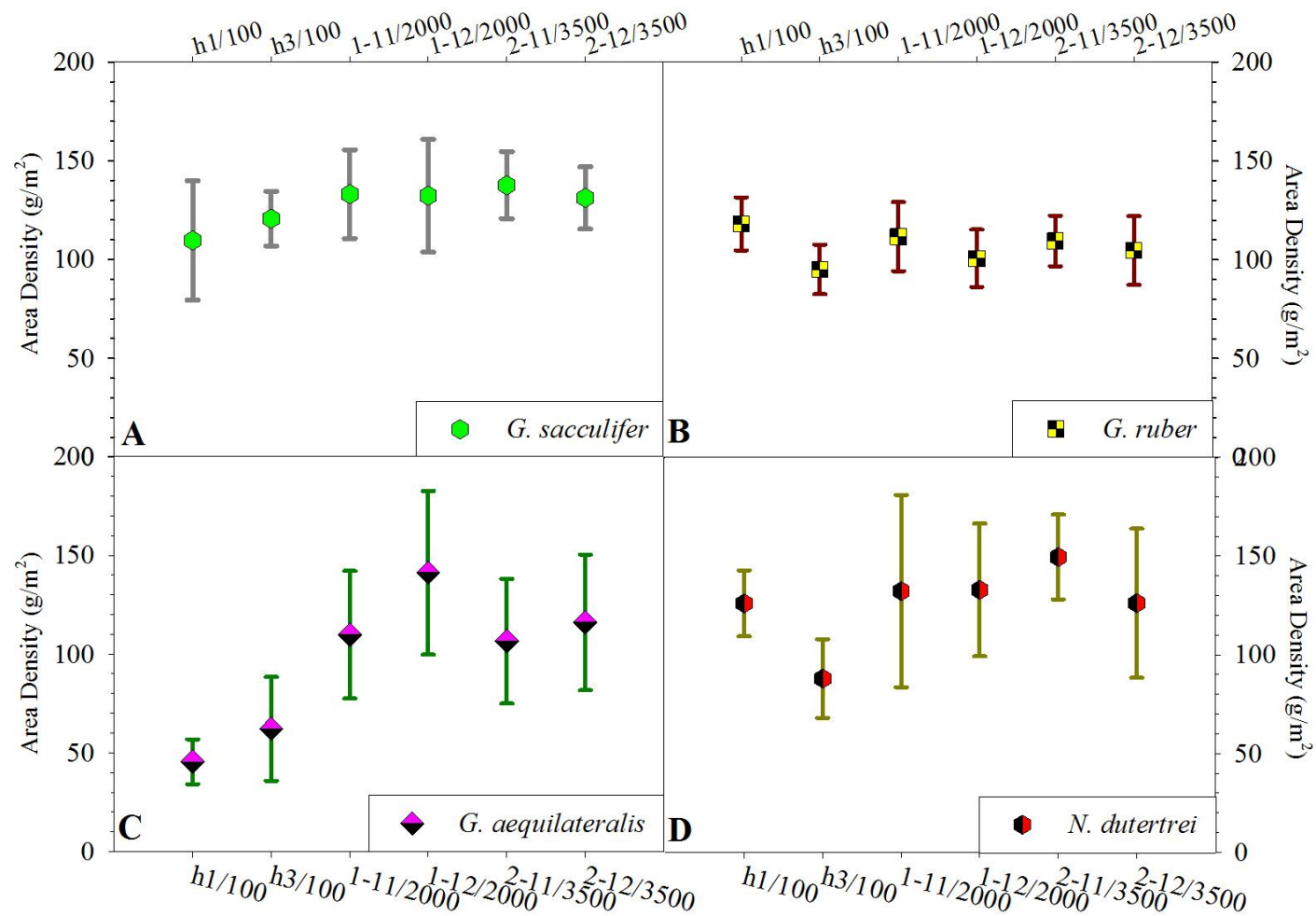


圖 3.26、拖網及沉積物收集器之有孔蟲面積密度比較圖；縱軸為面積密度的值，橫軸為站位點。圖 A 為 *G. sacculifer*；圖 B 為 *G. ruber*；圖 C 為 *G. aequilateralis*；圖 D 為 *N. dutertrei*。

肆、結論

1. 浮游性有孔蟲 *O. universa* 及 *G. aequilateralis* 的殼體面積密度變化皆會同時受到殼體厚度及大小的影響，而限制殼體大小的效應即可以更準確的觀察到殼體厚度的變化。
2. 以 3 天為收集單位的沉積物收集器樣本顯示 *G. sacculifer* 的殼體面積密度會與殼體大小有相同的變化趨勢；*G. ruber* 的殼體面積密度則是呈現半月亮週期的變化趨勢。與串列參數進行 EOF 分析的結果發現 *G. sacculifer* 的殼體面積密度會與數量通量呈現正相關；*G. ruber* 的殼體面積密度則未和沉積物收集器串列參數呈現明顯關連性。
3. 水平拖網採集的浮游性有孔蟲 *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 的殼體面積密度並未隨緯度分佈而改變；但是相隔 5 年及 10 年同一海域採樣所取得的 *G. sacculifer* 殼體面積密度卻有明顯減小的變化。與既有水文參數進行 EOF 分析的結果顯示 *G. sacculifer* 的殼體面積密度與螢光值積分和 pH 值呈現正相關。
4. 比較在水深 100 公尺進行拖網及沉積物收集器佈放在 2000 公尺和 3500 公尺共三種不同深度收集的浮游性有孔蟲殼體，拖網採集的 *G. aequilateralis* 殼體面積密度比沉積物收集器的數據低；而另外三種浮游性有孔蟲的殼體面積密度則並沒有隨採樣深度不同而顯示明顯變化，無法觀察到水體中的溶解效應對有孔蟲殼體造成的影響。

伍、參考文獻

中文部分

- 梁華升，2012，台灣鄰近海域浮游性有孔蟲殼體重量與數量之變化，國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，共 58 頁。
- 陳鎮東，1994，海洋化學，國立編譯館，共 551 頁。
- 陳鎮東，2001，南海海洋學，渤海堂出版社，共 506 頁。
- 楊仁凱，2010，沖淡水中粒徑結構之時空變化，國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，共 160 頁。
- 蔡康齡，2002，南沖繩海槽西端顆粒物質中鉛-210 與鈾-210 之不平衡現象，國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文，共 57 頁。
- 魏國彥，2003，小化石記錄大氣候，科學發展，369，第 6-11 頁。

英文部分

- Aldridge, D., Beer, C., Purdie, D., 2012. Calcification in the planktonic foraminifera *Globigerina bulloides* linked to phosphate concentrations in surface waters of the North Atlantic Ocean. *Biogeosciences* 9, 1725-1739.
- Anand, P., Elderfield, H., Conte, M.H., 2003. Calibration of Mg/Ca thermometry in planktonic foraminifera from a sediment trap time series. *Paleoceanography* 18.
- Bé, A.W., 1965. The influence of depth on shell growth in *Globigerinoides sacculifer* (Brady). *Micropaleontology*, 81-97.
- Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Gilmour, M., Matthews, A., Hawkesworth, C.J., 2003. Sea-land oxygen isotopic relationships from planktonic foraminifera and speleothems in the Eastern Mediterranean region and their implication for paleorainfall during interglacial intervals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, 3181-3199.
- Barker, S., Elderfield, H., 2002. Foraminiferal calcification response to glacial-

- interglacial changes in atmospheric CO₂. *Science* 297, 833-836.
- Barker, S., Greaves, M., Elderfield, H., 2003. A study of cleaning procedures used for foraminiferal Mg/Ca paleothermometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4, 8407-8416.
- Barker, S., Kiefer, T., Elderfield, H., 2004. Temporal changes in North Atlantic circulation constrained by planktonic foraminiferal shell weights. *Paleoceanography* 19, 3008-3022.
- Beer, C., Schiebel, R., Wilson, P., 2010. Technical Note: On methodologies for determining the size-normalised weight of planktic foraminifera. *Biogeosciences* 7, 2193-2198.
- Bemis, E., Spero, H.J., Bijma, J., Lea, D.W., 1998. Reevaluation of the oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera: Experimental results and revised paleotemperature equations. *Paleoceanography* 13, 150-160.
- Bemis, B.E., Spero, H.J., Lea, D.W., Bijma, J., 2000. Temperature influence on the carbon isotopic composition of *Globigerina bulloides* and *Orbulina universa* (planktonic foraminifera). *Marine Micropaleontology* 38, 213-228.
- Berger, W.H., 1968. Planktonic foraminifera: selective solution and paleoclimatic interpretation, *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Elsevier, 31-43.
- Bijma, J., Erez, J., Hemleben, C., 1990. Lunar and semi-lunar reproductive cycles in some spinose planktonic foraminifers. *Journal of Foraminiferal Research* 20, 117-127.
- Bijma, J., Hemleben, C., 1994. Population dynamics of the planktic foraminifer *Globigerinoides sacculifer* (Brady) from the central Red Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 41, 485-510.
- Bijma, J., Spero, H., Lea, D., 1999. Reassessing foraminiferal stable isotope geochemistry: Impact of the oceanic carbonate system (experimental results), *Use*

- of proxies in paleoceanography. Springer, pp. 489-512.
- Bijma, J., Hönisch, B., Zeebe, R.E., 2002. Impact of the ocean carbonate chemistry on living foraminiferal shell weight: Comment on “Carbonate ion concentration in glacial-age deep waters of the Caribbean Sea” by WS Broecker and E. Clark. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 3, 1-7.
- Broecker, W., Clark, E., 2001. A dramatic Atlantic dissolution event at the onset of the last glaciation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 2, 1065-1015.
- Broecker, W.S., Clark, E., 2002. Carbonate ion concentration in glacial-age deep waters of the Caribbean Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 3, 1-14.
- Broecker, W.S., Clark, E., 2003. Holocene atmospheric CO₂ increase as viewed from the seafloor. *Global Biogeochemical Cycles* 17.
- Chen, C.-T.A., Huang, T.-H., Fu, Y.-H., Bai, Y., He, X., 2012. Strong sources of CO₂ in upper estuaries become sinks of CO₂ in large river plumes. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 179-185.
- De Villiers, S., 2004. Optimum growth conditions as opposed to calcite saturation as a control on the calcification rate and shell-weight of marine foraminifera. *Marine Biology* 144, 45-49.
- Fairbanks, R.G., Sverdløve, M., Free, R., Wiebe, P.H., Bé, A.W., 1982. Vertical distribution and isotopic fractionation of living planktonic foraminifera from the Panama Basin. *Nature* 298, 841-844.
- Field, D.B., 2004. Variability in vertical distributions of planktonic foraminifera in the California Current: Relationships to vertical ocean structure. *Paleoceanography* 19.
- Gaffey, S.J., Bronnimann, C.E., 1993. Effects of Bleaching on Organic and Mineral Phases in Biogenic Carbonates: Research Method Paper. *Journal of Sedimentary Research* 63, 752-754.
- Gong, C., Wang, Y., Peng, X., Li, W., Qiu, Y., Xu, S., 2012. Sediment waves on the

- South China Sea Slope off southwestern Taiwan: implications for the intrusion of the Northern Pacific Deep Water into the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology* 32, 95-109.
- Gonzalez-Mora, B., Sierro, F., Flores, J., 2008. Controls of shell calcification in planktonic foraminifers. *Quaternary Science Reviews* 27, 956-961.
- Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D.N., Thomas, E., Gibbs, S.J., Sluijs, A., Zeebe, R., Kump, L., Martindale, R.C., Greene, S.E., 2012. The geological record of ocean acidification. *science* 335, 1058-1063.
- Hale, R.P., Nittrouer, C.A., Liu, J.T., Keil, R.G., Ogston, A.S., 2012. Effects of a major typhoon on sediment accumulation in Fangliao Submarine Canyon, SW Taiwan. *Marine Geology* 326, 116-130.
- Hemleben, C., Spindler, M., Anderson, O.R., 2012. Modern planktonic foraminifera. Springer Science & Business Media.
- Henehan, M.J., Rae, J.W., Foster, G.L., Erez, J., Prentice, K.C., Kucera, M., Bostock, H.C., Martínez-Botí, M.A., Milton, J.A., Wilson, P.A., 2013. Calibration of the boron isotope proxy in the planktonic foraminifera *Globigerinoides ruber* for use in palaeo-CO₂ reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters* 364, 111-122.
- Hsiao, S.-H., Kâ, S., Fang, T.-H., Hwang, J.-S., 2011. Zooplankton assemblages as indicators of seasonal changes in water masses in the boundary waters between the East China Sea and the Taiwan Strait. *Hydrobiologia* 666, 317-330.
- Huang, B., Cheng, X., Jian, Z., Wang, P., 2003. Response of upper ocean structure to the initiation of the North Hemisphere glaciation in the South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 196, 305-318.
- Jonkers, L., Reynolds, C., Richey, J., Hall, I.R., 2014. Lunar periodicity in the shell flux of some planktonic foraminifera in the Gulf of Mexico. *Biogeosciences Discussions* 11, 17187-17205.

- Jonkers, L., Reynolds, C., Richey, J., Hall, I., 2015. Lunar periodicity in the shell flux of planktonic foraminifera in the Gulf of Mexico. *Biogeosciences* 12, 3061-3070.
- Kennett, J.P., Cannariato, K.G., Hendy, I.L., Behl, R.J., 2000. Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials. *Science* 288, 128-133.
- Kipp, N.G., 1976. New transfer function for estimating past sea-surface conditions from sea-bed distribution of planktonic foraminiferal assemblages in the North Atlantic. *Geological Society of America Memoirs* 145, 3-42.
- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., Gattuso, J.P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global change biology* 19, 1884-1896.
- Kuroyanagi, A., Kawahata, H., 2004. Vertical distribution of living planktonic foraminifera in the seas around Japan. *Marine Micropaleontology* 53, 173-196.
- Lear, C.H., Rosenthal, Y., Slowey, N., 2002. Benthic foraminiferal Mg/Ca-paleothermometry: A revised core-top calibration. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 3375-3387.
- Levitus, S., Boyer, T.P., 1994. *World Ocean Atlas 1994. Volume 4. Temperature*. National Environmental Satellite, Data, and Information Service, Washington, DC (United States).
- Liang, W.-D., Jan, J., Tang, T., 2000. Climatological wind and upper ocean heat content in the South China Sea. *Acta Oceanographica Taiwanica* 38, 91-114.
- Liang, W.D., Yang, Y.J., Tang, T.Y., Chuang, W.S., 2008. Kuroshio in the Luzon Strait. *Journal of Geophysical Research* 113, C08048.
- Lin, H.-L., Wang, W.-C., Hung, G.-W., 2004. Seasonal variation of planktonic foraminiferal isotopic composition from sediment traps in the South China Sea.

- Marine Micropaleontology 53, 447-460.
- Lin, H.-L., Sheu, D.D.-D., Yang, Y., Chou, W.-C., Hung, G.-W., 2011. Stable isotopes in modern planktonic foraminifera: Sediment trap and plankton tow results from the South China Sea. *Marine Micropaleontology* 79, 15-23.
- Lin, H.-L., 2014. The seasonal succession of modern planktonic foraminifera: Sediment traps observations from southwest Taiwan waters. *Continental Shelf Research* 84, 13-22.
- Liu, J.T., Huh, C.-A., You, C.-F., 2009. Fate of terrestrial substances in the Gaoping (Kaoping) shelf/slope and in the Gaoping submarine canyon off SW Taiwan. *Journal of Marine Systems* 76, 367-368.
- Liu, J.T., Wang, Y.H., Yang, R.J., Hsu, R.T., Kao, S.J., Lin, H.L., Kuo, F.H., 2012. Cyclone-induced hyperpycnal turbidity currents in a submarine canyon. *Journal of Geophysical Research* 117, C04033.
- Liu, J., Clift, P.D., Yan, W., Chen, Z., Chen, H., Xiang, R., Wang, D., 2014. Modern transport and deposition of settling particles in the northern South China Sea: Sediment trap evidence adjacent to Xisha Trough. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 93, 145-155.
- Lombard, F., da Rocha, R.E., Bijma, J., Gattuso, J., 2010. Effect of carbonate ion concentration and irradiance on calcification in planktonic foraminifera. *Biogeosciences* 7, 247-255.
- Lui, H.-K., Chen, C.-T.A., 2015. Deducing acidification rates based on short-term time series. *Scientific reports* 5, 1-8.
- Manno, C., Morata, N., Bellerby, R., 2012. Effect of ocean acidification and temperature increase on the planktonic foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma* (sinistral). *Polar Biology* 35, 1311-1319.
- Marshall, B., Thunell, R., Hennehan, M., McConnell, M., Astor, Y., 2012. Planktonic

- foraminiferal shell weight and boron isotopic composition as proxies for carbonate system parameters: Insight from sediment trap studies in the Cariaco Basin, Venezuela, AGU Fall Meeting Abstracts, 1983.
- Marshall, B.J., Thunell, R.C., Hennehan, M.J., Astor, Y., Wejnert, K.E., 2013. Planktonic foraminiferal area density as a proxy for carbonate ion concentration: A calibration study using the Cariaco Basin ocean time series. *Paleoceanography* 28, 363-376.
- Mortyn, P.G., Charles, C.D., 2003. Planktonic foraminiferal depth habitat and $\delta^{18}\text{O}$ calibrations: Plankton tow results from the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Paleoceanography* 18, 1037-1051.
- Moy, A.D., Howard, W.R., Bray, S.G., Trull, T.W., 2009. Reduced calcification in modern Southern Ocean planktonic foraminifera. *Nature Geoscience* 2, 276-280.
- Pälike, H., Lyle, M.W., Nishi, H., Raffi, I., Ridgwell, A., Gamage, K., Klaus, A., Acton, G., Anderson, L., Backman, J., 2012. A Cenozoic record of the equatorial Pacific carbonate compensation depth. *Nature* 488, 609-614.
- Parker, F.L., 1962. Planktonic foraminiferal species in Pacific sediments. *Micropaleontology*, 219-254.
- Ren, H., Sigman, D.M., Thunell, R.C., Prokopenko, M.G., 2012. Nitrogen isotopic composition of planktonic foraminifera from the modern ocean and recent sediments. *Limnology and Oceanography* 57, 1011-1024.
- Retailleau, S., Eynaud, F., Mary, Y., Abdallah, V., Schiebel, R., Howa, H., 2012. Canyon Heads and River Plumes: How Might They Influence Neritic Planktonic Foraminifera Communities In The SE Bay of Biscay? *Journal of Foraminiferal Research* 42, 257-269.
- Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortell, P.D., Zeebe, R.E., Morel, F.M., 2000. Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO_2 . *Nature* 407, 364-367.

- Rohling, E.J., Cooke, S., 2003. Stable oxygen and carbon isotopes in foraminiferal carbonate shells, Modern foraminifera. Springer, pp. 239-258.
- Russell, A.D., Hönisch, B., Spero, H.J., Lea, D.W., 2004. Effects of seawater carbonate ion concentration and temperature on shell U, Mg, and Sr in cultured planktonic foraminifera. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68, 4347-4361.
- Sagawa, T., Kuroyanagi, A., Irino, T., Kuwae, M., Kawahata, H., 2013. Seasonal variations in planktonic foraminiferal flux and oxygen isotopic composition in the western North Pacific: Implications for paleoceanographic reconstruction. *Marine Micropaleontology* 100, 11-20.
- Schiebel, R., Waniek, J., Bork, M., Hemleben, C., 2001. Planktic foraminiferal production stimulated by chlorophyll redistribution and entrainment of nutrients. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 48, 721-740.
- Schiebel, R., 2002. Planktic foraminiferal sedimentation and the marine calcite budget. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 3-1-3-21.
- Schiebel, R., Barker, S., Lendt, R., Thomas, H., Bollmann, J., 2007. Planktic foraminiferal dissolution in the twilight zone. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 54, 676-686.
- Shaw, P.T., 1989. The intrusion of water masses into the sea southwest of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 94, 18213-18226.
- Spero, H.J., Bijma, J., Lea, D.W., Bemis, B.E., 1997. Effect of seawater carbonate concentration on foraminiferal carbon and oxygen isotopes. *Nature* 390, 497-500.
- Wang, B., Zhang, Y., Lu, M., 2004. Definition of South China Sea Monsoon Onset and Commencement of the East Asia Summer Monsoon*. *Journal of Climate* 17, 699-710.
- Wang, L., Sarinthein, M., Erlenkeuser, H., Grimalt, J., Grootes, P., Heilig, S., Ivanova, E., Kienast, M., Pelejero, C., Pflaumann, U., 1999. East Asian monsoon climate

- during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology* 156, 245-284.
- Wolf-Gladrow, D.A., Bijma, J., Zeebe, R.E., 1999. Model simulation of the carbonate chemistry in the microenvironment of symbiont bearing foraminifera. *Marine Chemistry* 64, 181-198.
- Yu, H., Huang, C.S., Ku, J., 1991. Morphology and possible origin of the Kaoping submarine canyon head off southwest Taiwan. *Acta Oceanogr. Taiwanica* 27, 40-50.
- Yu, H.-S., Auster, P.J., Cooper, R.A., 1993. Surface geology and biology at the head of Kaoping Canyon off southwestern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 4, 441-455.
- Zamelczyk, K., Rasmussen, T.L., Husum, K., Hald, M., 2013. Marine calcium carbonate preservation vs. climate change over the last two millennia in the Fram Strait: Implications for planktic foraminiferal paleostudies. *Marine Micropaleontology* 98, 14-27.
- Žarić, S., Donner, B., Fischer, G., Mulitza, S., Wefer, G., 2005. Sensitivity of planktic foraminifera to sea surface temperature and export production as derived from sediment trap data. *Marine Micropaleontology* 55, 75-105.
- Zeebe, R.E., 2012. History of seawater carbonate chemistry, atmospheric CO₂, and ocean acidification. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 40, 141-165.