



國立臺灣大學理學院海洋研究所

碩士論文

Institute of Oceanography, College of Science

National Taiwan University

Master thesis

南海內波對自營性超微浮游生物24小時

週期分布之影響研究

Internal wave impacts on the diel patterns of
picophytoplankton in the South China Sea

傅韋堃

Wei-Kun Fu

指導教授：夏復國 博士

Adviser:Fuh-Kwo Shiah, Ph.D.

中華民國 103 年 7 月

June 2014

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

南海內波對自營性超微浮游生物 24 小時
週期分佈之影響研究

Internal waves impacts on the diel patterns of
picophytoplankton in the South China Sea

本論文係 傅韋堃 君 (R01241215) 在國立臺灣大學海洋研究所完成之碩士學位論文，於民國 103 年 6 月 30 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

夏俊國

(指導教授)

陳仲吉

蔣國平

系主任、所長

戴昌鳳

致謝



花了好大的心力終於完成了這一篇論文，到此仍覺得非常不可思議，我想這就是平時努力耕耘，然後水到渠成的感覺吧！首先我要感謝我的指導老師 夏復國教授，老師不僅知識淵博、行事幽默風趣，與老師聊天的過程中常常會心一笑，在碩士班兩年的過程中不僅在學術上與做人處事上都受益良多，是學生學習的典範。感謝口試委員 陳仲吉老師與蔣國平老師，謝謝老師對論文仔細審閱，並提供了許多寶貴的建議，讓我能有更宏觀的觀點來檢視我的研究，使得論文更加完整。

謝謝兩年來在研究室陪伴我的夥伴們，從最初的陌生到最後就像是一家人一樣，使我在碩班生活裡從不寂寞，謝謝宗樂、昭呈、谷威、香怡、小嫻、國源、于芳、Jessie在學術研究上給予我的想法，謝謝大家都很有耐心的指點我這個慧根不好的學弟。也謝謝學長、學姐們生活經驗的分享，讓我對學術以外的事情有更多的了解。研究室出海採樣的過程雖然辛苦，每趟的航程都是我碩班生活刻骨銘心的回憶，航程結束時都有種人生處處充滿希望的感覺，正面能量滿滿阿。我也會懷念定期翡翠水庫的採樣，與學長、學姊們及台大的夥伴一起努力拉水，累的時後就互相打嘴砲，講一些垃圾話忘記疲勞，然後中午再開心的一起午餐。能夠與實驗室的大家共同奮鬥，是我一直很享受的事情，也感謝實驗室讓我有這種難得的出海經驗。謝謝佩蓉、欽舟、樂竹、絮涵、Lisa、文軒、戴博、潘博，感謝你們在研究與生活上所給予的協助，真的非常謝謝大家對我照顧。

最後感謝我親愛的家人們，謝謝老爸老媽辛苦的教育，對於我生活上的支持以及包容，讓我可以專心的完成學業，沒有你們在背後的支持，我可能無法順利完成這個階段的學位成就，對你們...真的有太多太多說不完感謝了。

摘要



本研究主要探討南海內波對自營性超微浮游生物包括 *Prochlorococcus*, *Synechococcus* 及 Picoeukaryotes 之 24 小時週期分佈之影響。本研究在 2012~2013 年間在南海有不同物理特性的測點進行了 7 個 24 小時週期研究。分別是上舉型內波影響區 (4 站)，沉降型內波影響區 (1 站)，以及無內波或弱內波影響 (2 站)，其中後兩區物理環境條件相似，被歸類為控制組，其餘為內波影響組。結果發現 *Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 在內波影響組其深度積分平均值的總平均值 (19.92×10^3 及 3.76×10^3 cells ml⁻¹) 為控制組 (4.05×10^3 及 1.53×10^3 cells ml⁻¹) 數量的三倍以上；而 *Prochlorococcus* 的豐度變化則是與上述兩者呈現相反的情形，在上舉型內波影響區數量減少 (28.68×10^3 cells ml⁻¹)，於控制組有較高的數量分布 (52.17×10^3 cells ml⁻¹)。上述結果和前人的觀點相似，在光照與溫度條件充足時，*Synechococcus* 於富營養鹽區有較多的數量，*Prochlorococcus* 則在營養鹽低的環境數量較多，Picoeukaryotes 生物量之空間變動與 *Synechococcus* 類似，但 Picoeukaryotes 組成複雜，何種生態因子影響其生物變動尚未解明。空間分布上，自營性生物主要分布於躍層之上 (溫度高於 20 °C)，*Synechococcus* 棲息偏向表層，*Prochlorococcus* 主要棲息於次表層，推測可能與光強度抵禦機制有關。整體而言，在內波影響組受到上舉型內波帶來富營養鹽海水的影響，使得偏好高營養鹽的 *Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 有較高的數量分佈，為東沙環礁附近的主要優勢物種。本篇研究結果顯示東沙環礁受南海內波的影響，超微浮游生物的組成與南中國海時間序列站 (SEATS 站) 呈現完全不同的情形，說明內波活動對於東沙環礁生態系有著相當重要的影響力。

關鍵詞: 南海內波、超微浮游生物、東沙環礁、營養鹽、南中國海時間序列站

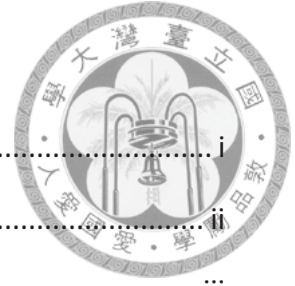
Abstract



The South China Sea (SCS) is famous for its internal waves (IWs). To explore its impacts on the diel distribution patterns of picophytoplankton, including *Synechococcus*, *Prochlorococcus* and Picoeukaryotes, a total of seven anchored studies were conducted during the period of 2012~2013 in the SCS areas with different physical conditions. These are areas subjected to elevation IWs (4 sites), depression IWs (1 site) and weak or no IWs (2 sites). The latter two areas serve as the control sites. Results indicated that *Synechococcus* and Picoeukaryotes showed higher abundance in elevation IWs sites (19.92×10^3 and 3.76×10^3 cells ml⁻¹, respectively) than in depression and no IWs sites (4.05×10^3 and 1.53×10^3 cells ml⁻¹, respectively). The depth-integrated averaged abundance values of *Synechococcus* and Picoeukaryotes increased 5- and 2.5-fold higher than control sites, respectively. *Prochlorococcus* showed a contrast pattern with much lower abundance in the elevation IWs sites. Our moored buoy data indicated that the IWs occurred mostly during the flood-tide period. *Synechococcus* and Picoeukaryotes abundance showed similar pattern with the tide cycle, suggesting that the limiting inorganic nutrients brought up to the upper-water column by the elevation IWs might have stimulated the growth of *Synechococcus* and Picoeukaryotes.

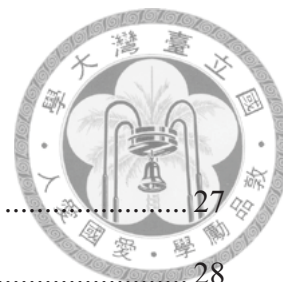
Key word : South China Sea , picophytoplankton , internal waves , *Synechococcus* , *Prochlorococcus* , Picoeukaryotes

目錄



口試委員會審定書	i
致謝	ii
摘要	iii
英文摘要	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
附錄	viii
前言	1
材料與方法	4
結果	8
討論	15
結論	21
參考文獻	22
表列	27
圖列	37
附錄	49

表目錄



表一：各站之生物參數深度積分平均值與變方分析檢定結果。.....	27
表二：各站之水文參數深度積分平均值與變方分析檢定結果。.....	28
表三：各測站溫度與其他參數之相關分析表。.....	29
表四：各測站葉綠素與其他參數之相關分析表。.....	30
表五：各測站硝酸鹽與各參數之相關分析表。.....	31
表六：各測站磷酸鹽與其他參數之相關分析表。.....	32
表七：各測站 <i>Synechococcus</i> 與其他參數之相關分析表。.....	33
表八：各測站 <i>Prochlorococcus</i> 與其他參數之相關分析表。.....	34
表九：各測站 Picoeukaryotes 與其他參數之相關分析表。.....	35
表十：各測站浮游植物生物量表。.....	36

圖目錄

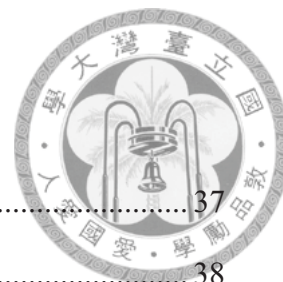



圖 一：本研究地點之地理位置圖。.....	37
圖 二：各站之溫度時序深度變化情形圖。.....	38
圖 三：各站之葉綠素-a 時序深度變化情形圖。.....	39
圖 四：各站之硝酸鹽時序深度變化情形圖。.....	40
圖 五：各站之磷酸鹽時序深度變化情形圖。.....	41
圖 六：各站之 <i>Synechococcus</i> 時序深度變化情形圖。.....	42
圖 七：各站之 <i>Prochlorococcus</i> 時序深度變化情形圖。.....	43
圖 八：各站之 Picoeukaryotes 時序深度變化情形圖。.....	44
圖 九：各測站參數之深度積分平均值圖。.....	45
圖 十：各測站浮游植物豐度之深度積分平均圖。.....	46
圖 十一：各測站浮游植物生物量之深度積分平均圖。.....	46
圖 十二：深水站各參數深度積分平均值與潮汐分布情形圖。.....	47
圖 十三：淺水站各參數深度積分平均值與潮汐分布情形圖。.....	48

附錄

附錄 一： 內波由深水區行進至淺水區型態轉變示意圖。	49
附錄 二：(A) 錨錠作業與水溫時序深度變化圖。(B) 壓力與潮汐模式圖。	50
附錄 三:相關文獻生物量整理表。	51



前言



自營性超微浮游生物為一群普遍存在於世界各大海洋並擁有最大生物量之自營性生物 (Scanlan *et al.*, 2009), 體型主要介於0.2~2 μm 之間 (Sieburth *et al.*, 1978), 為微生物食物網 (Microbial food chain) 重要的一環 (Sherr & Sherr, 1988)。超微浮游植物體型雖小, 但因其生物量多 (Campbell *et al.*, 1995), 在海洋生態系中貢獻很重要的初級生產力, 視為碳循環调控的主要來源 (Worden *et al.*, 2004)。超微浮游植物在熱帶、亞熱帶貧營養鹽的海域中, 為主要的初級生產者, 常佔海域初級生產力的50 %以上 (Agawin *et al.*, 2000), 在全球總初級生產力上可佔70%以上 (Stockner & Antia, 1986)。超微浮游植物成員主要分為三大群, 包括:*Synechococcus* (聚球藻)、*Prochlorococcus* (原核綠球藻) 及 Picoeukaryotes (真核超微藻類) 三類, 分別敘述如下:

*Synechococcus*屬藍綠藻門, 體型大小介於0.6~1.6 μm 之間, 擁有獨特之藻膽色素 (Rippka *et al.*, 1979), 其對營養鹽可利用的形式相當廣 (Moore *et al.*, 1995), 對於光照強度的適應與營養鹽受限的應變有完整的生理機制 (Beardall *et al.*, 2013)。由於*Synechococcus*對於環境溫度的忍受性高, 故其分布的範圍相當廣泛, 除了在三大洋皆有分佈外, 在高緯地區、貧營養鹽的洋流中心、高鹽低鹽環境中皆有發現其蹤跡 (Charpy & Blanchot, 1998; Gradinger & Lenz, 1989; Jochem, 1988)。通常在近岸海域與湧升流等營養鹽高的海域有較高的數量分布, 為當地主要的優勢種 (Partensky *et al.*, 1996)。

*Prochlorococcus*於1986年透過流式細胞儀的技術被發現 (Chisholm *et al.*, 1988), 是目前已知世界上體型最小並能行光合作用的浮游生物 (細胞大小介於0.5-0.7 μm (Morel *et al.*, 1993))。對於大氣中氧氣含量有相當大的調節功能 (Raven, 1994)。分布的範圍受到溫度的限制, 主要分布於南北緯40度之間。*Prochlorococcus*能夠棲息在有光層 (表面光強度1%之深度) 的底部, 分佈水深可介於100米至200米間 (Partensky *et al.*, 1999), 為貧營養鹽海域主要的優勢物種。




Picoeukaryotes係指體型小於 $2\mu\text{m}$ 的真核藻類，豐度在三類超微浮游植物中占的比例最少，介於 10^2 到 10^4 cells ml^{-1} 之間。但其體型較*Synechococcus* 及*Prochlorococcus*兩類大，其族群組成多樣性較高，在沿岸地區有時會取代*Synechococcus*成為主要的優勢種 (Lefort & Gasol, 2013)。

南海 (South China Sea ; SCS) 位於赤道至北緯 23.8° 、東經 99.1° 至 121.1° 之間，是位於東南亞的陸緣海，被中國大陸、台灣本島、菲律賓群島、馬來群島及中印半島所環繞，為西太平洋的一部分。南海海域總面積約 3.5×10^6 平方公里，平均水深約為 $1,212$ 公尺，最大深度約為 $5,567$ 公尺，為世界第二大邊緣海。

南海擁有全球最顯著的內波活動 (Internal waves ; IWs) (Hsu & Liu, 2004; Yang *et al.*, 2004)。內波是一種海洋內部的波動現象，因海水密度垂直分層所引發的一種重力波，各種類型的內波，其振幅、週期、傳波速度和存在深度都有很大的不同，其中一種大振幅、非線性、孤立的波稱為內孤立波 (Internal solitary wave)，其可以在傳遞相當遠的距離而不散失其能量，並且有兩波相碰而不會改變外型及傳遞的特殊性質 (Liang, 2010)。南海地理環境上為擁有廣大的陸棚而且又是半封閉的海盆，海域水文複雜，海水分層明顯，此海域是內波相當活躍的區域，南海內波起源於呂宋海峽，向西行近南海北部，然後消散在南海西側的大陸棚上 (Chang *et al.*, 2006; Chao *et al.*, 2007)。根據前人研究 (Hsu & Liu, 2004) 如附錄1所示，當內波在深海傳遞 ($H_1 < H_2$)；附錄1)，混合層厚度小於底層厚度時，此為下沉型內波，會將上層暖水送入底層；當經過turn point ($H_1 = H_2$) 時，內波會由下沉型轉變成上舉型，行進至淺海區 ($H_1 > H_2$)，混合層厚度大於底層厚度時，就會產生上舉形內波。同時傳播過程中產生的紊流，對水體內部流場在垂直結構上會產生強大的剪應力，增加上層海水與下層海水的混合及擴散作用，形成短暫的湧升流現象。

東沙環礁 (Dongsha atoll) 位於北緯 20.35° 至 22.47° 、東經 116.43° 至 116.55° 之間，為南海北部最大的環礁 (Dai, 2005)。東沙環礁直徑約 25 公里、環礁面積約 500 平方



公里，呈馬蹄狀，地勢低平。東沙島位於環礁西側，於東沙島南北邊各有一航道口，為環礁內外水體主要交換孔道，屬於半封閉性環礁。東沙環礁為南海內波直接衝擊之處，內波傳遞至東沙陸棚時，向上舉升造成底部冷水團湧升 (Duda *et al.*, 2004)。先前研究 (Wang *et al.*, 2007) 在東沙環礁東北邊水深20公尺處佈置一底碇式ADCP (*RDI WH 300*) 之長期觀測站，用以觀測溫度、潮汐、葉綠素、溶氧、營養鹽及海流等參數是否受到內波的影響而產生改變。其結果發現環礁外緣部分有低溫富營養鹽的冷水湧升現象，細菌利用了深層冷水所帶上來的營養鹽，分解有機碎屑後再將營養鹽釋出給浮游植物所利用，使得該區域光合作用強烈。在遙測觀察中發現東沙環礁周圍有高濃度的葉綠素分佈 (Wang *et al.*, 2007)。但內波作用對自營性浮游生物豐度是如何反應與族群間變動的機制究竟如何，至今尚未有明確結果。

內波伴隨著潮汐週期而至，且侵襲時間短暫而強烈，來襲時間約10~20分鐘 (Colosi *et al.*, 2001)。因此如果要觀察內波影響必須進行高頻率採樣。近年來內波活動對於生地化的研究逐漸興起 (Colosi *et al.*, 2001; Klymak & Moum, 2003; Stevens *et al.*, 2005)，而內波在對深水層時的沉降波影響也方興未艾 (Stevens *et al.*, 2012)。本研究目的係觀察與探討內波對浮游生物之影響，針對南海內波通過前後，造成自營性超微浮游生物生物量變動情形作描述。採樣區域包括受到上舉型內波影響區 (Elevation IWs)、沉降型內波影響區 (Depression IWs) 以及受到無 (弱) 內波影響區 (weak/no IWs)，在不同環境條件的測站裏進行24小時的週期調查，探討生物的動態變動情形，用以瞭解當地生物短時間尺度內的數量變化，並推估南海內波活動對於自營性超微浮游生物之影響。

材料與方法



研究區域與採樣

本研究利用 OR1-CR1010 (2012/8 月；調查站位代號：SEATS-1)、OR1-CR1034 (2013/4 月；調查站位代號：SEATS-2)和 OR1-CR1015 (2012/10/13~10/19；調查站位代號：ED、ES1、ES2、SS1、SS2) 共三航次於東沙環礁外環之東側與南側以及南海北部中央 SEATS 站一共進行 7 次 24 小時週期研究。OR1-CR1015 航次時並在東沙深水站 (ED 站) 放置錨碇 (moored buoy)，於特定深度架設溫度計，每分鐘接收一筆溫度變化資料，用此觀察內波現象。並在東沙環礁東部與南部各分別選兩處深度不同測站 (圖一) 進行採樣。SEATS 站位於南海北部中央，較不易受到陸源以及內波的影響，又 ED 深水站為受到沉降型內波影響之地區，並未受到上舉型內波所帶來湧升現象的影響，因此將 SEAT-1、SEAT-2 以及 ED 三站調查規劃為控制組，用以比較其與受抬升型內波影響站(ES1、ES2、SS1、SS2) 之差異。

水文參數

基本水文參數資料的取得是使用海鳥牌溫鹽深儀 (CTD profiling instrument, Sea-Bird Electronics, Inc. SBE 911 plus) ，並加掛溶氧探針 (Dissolved oxygen sensor, Sea-Bird Electronics, Inc. SBE 43)、螢光探針 (Fluorimeter, Chelsea Instruments Ltd. AQUA^{tracka} III)、穿透率探針 (Transmissometer, Chelsea Instruments Ltd. ALPHA^{tracka} II)，及水下光度計 (PAR; Photosynthesis available radiation sensor, Biospherical Instrument Inc. QSP200L) 。手測水樣採集係利用輪盤採水器 (General Oceanic Inc. Model 1015 Rosette) 上加掛 20-liter Go-Flo 採水瓶，在深水站 100 米以淺水層，選擇 6 個深度採集水樣，淺水站則於底深 10 米之上，選擇 3 到 6 個深度進行採樣。採樣頻度為每 3 小時採樣一次，為期二十四小時，調查內波活動對不同水文測站之生態影響。



自營性生物豐度樣本

自營性生物樣本水樣主要透過研究船上所附載的輪盤式採水器及採水瓶採集，由採水器採得水樣，迅速取水樣 4 ml 放入 5 ml 抗凍管 (Cryogenic Vials, Nalgene, USA) 中，並加入 0.04 ml 10% 的 PFA (Paraformaldehyde, Sigma, USA ; 最終濃度為 0.2%) 固定，固定後標示樣品號碼再將樣本置於液態氮桶中保存，樣本帶回實驗室後再將其放置於 -80°C 冰箱保存。

樣本以流式細胞儀分析細胞數量。於分析當天將樣本自 -80°C 冷凍庫取出解凍，將解凍之樣本取出置入流式細胞儀專用試管中，加入 0.01 ml 大小為 1 μ m 螢光標示珠子作為定量標準。三類超微浮游植物，在經過流式細胞儀藍光雷射 (波長 488 nm) 激發後，會因其細胞大小及自營色素產生出不同螢光而被區分出來。*Synechococcus* 除含有葉綠素外，另含有藻膽素 (Rippka *et al.*, 1979)，會產生橘紅色螢光，使其在流式細胞儀中，可被偵測器接收，與 *Prochlorococcus* 和 Picoeukaryotes 兩者區分開來；而 *Prochlorococcus*、Picoeukaryotes 因含無藻膽素，主要藉由激發葉綠素-a 進行辯認，被藍光激發產生暗紅色螢光，故可被流式細胞儀偵測器接收。除了細胞色素外，利用 Forward scatter (FSC) 及 Side scatter (SSC) 參數來區分細胞的外型、大小。因 *Prochlorococcus* 體型較小 (其細胞直徑大約在 0.7 μ m)，Picoeukaryotes 體型較大 (約 >1 μ m)，可由上述兩參數中區分出來，利用以上方法，即可區分出此三類細胞經流式細胞儀偵測所得之訊號，將訊號以專用軟體 (FloMax) 進行圈選和計數，得到單位水樣體積所含的細胞數。

葉綠素-a (Chlorophyll a) 濃度

葉綠素-a (Chlorophyll a) 濃度取得水樣後，置入 2 公升之 polyethylene 瓶內，棕色瓶潤洗海水兩次後收集水樣，利用玻璃纖維 (GF/F) 濾紙過濾，抽氣過濾時壓力小於 100 mmHg。將過濾後濾紙置於包埋盒中，編號後置於冷凍於 -4°C 冰箱中保存攜回。將所收集的樣品真空冷凍乾燥 24 小時，加入 5 毫升濃度為 90% 丙酮定量萃取。於超音波震盪 1 小時，期間須加入碎冰以預防因震盪導致水溫攀高影響色



素裂解。再以半徑 13mm 孔徑為 0.2 μ M 鐵氟龍材質濾膜 (PTFE Syringe filter) 加裝在玻璃針筒上過濾樣品，取得澄清液於樣品分析瓶內，再以高效能液相層析系統分析。此一數據由中央研究院環境變遷中心何東垣老師實驗室提供。

營養鹽濃度

無機營養鹽參數包括硝酸鹽 (NO_3^-) 及磷酸鹽 (PO_4^{3-})，硝酸鹽 (NO_3^-) 使用三同步營養鹽分析裝置 (Trident-222 Simultaneous Nutrient Analyzer) 注入分析 (Gong, 1992)，分別以 Cadmium, ascorbic acid/oxalate 及 Ascorbic acid 還原比色法測定濃度 (Maita *et al.*, 1984) 偵測極限為 0.05 nM。磷酸鹽的測量是先使用 MAGIC 法 (Magnesium Induced Coprecipitation) (Karl & Tien, 1992; Rimmelin & Moutin, 2005) 將樣本濃縮後，再使用磷銻鉬藍複合物法 (Phosphoantimony molybdenum blue complex method) (Maita *et al.*, 1984; Valderrama, 1981)，營養鹽數據由中央研究院環境變遷中心黃天福老師實驗室提供。

浮游植物生物量

自營性浮游植物生物量估計主要係利用相關文獻之結果對本研究進行估計，三類族群生物量分別如下：*Synechococcus* 為 $250 \pm 91 \text{ fgC cell}^{-1}$ 、*Prochlorococcus* 為 $52 \pm 19 \text{ fgC cell}^{-1}$ 、Picoeukaryotes 為 $730 \pm 226 \text{ fgC cell}^{-1}$ (Campbell & Vaultot, 1993; Casey *et al.*, 2013; Grob *et al.*, 2007)。計算方法為流式細胞儀所得之細胞數量 \times 單位細胞所含之碳量。

統計分析

深度積分平均值 (Depth-integrated averaged values) 是將實際水體中自表水至最深深度所量測之各項參數值，以梯形積法 (Trapezoidal method) 所得的積和，再除上最深深度即是水深度積平均值即得。統計項目包括變方分析 (Analysis of Variance; ANOVA)、相關性分析 (Correlation Analysis) 與複合比較檢定 (Multiple comparison test)。本研究統計分析主要使用 MATLAB 2010 軟體來分析，等值圖採用 Surfer 10 繪製，曲線分布與回歸圖使用 Grapher 9 繪製。

潮汐訊號

於 OR1-CR1015 (2012/10/13~10/19) 航次在環礁東側底深約一千米之深水 ED 站施放錨碇。溫度測計最深置於水深五百米處，觀察不同深度之溫度變化，用以調查內波活動之訊號，每分鐘獲得一筆溫度數據。其他測站之潮汐訊號則是利用奧勒岡州立大學潮汐模式 (Oregon State University Tidal Inversion Software, OTIS) 之推算作為潮汐訊號。



結果




水文生化參數與深度分布

錨錠數據

附錄二為 OR1-CR1015 航次時在 ED 站進行錨錠作業 (moored buoy) 與水溫時序深度變化圖。圖 A 為水深 25 米至 500 米之各水層之溫度變化圖，溫度週期性的變化是為潮汐之訊號，於滿潮之前溫度急遽改變的訊號即代表內波之訊號。圖 B 為利用實測資料與潮汐模式預報進行比對 (藍色線；OSU Tidal Inversion Software 模式所推算)，結果大致上為同步的，水溫隨著潮汐週期改變，溫度急遽變化出現於高潮之前。因 ED 站是為深水站 (底深約 1000 m) 受到沉降型內波影響，使得表層較暖水會沉降至深水區，在水深 300 米處發現內波活動可溫度瞬間產生 10°C 左右之變化，能見其混合作用之巨大，根據前人 St Laurent, *et al.* (2011) 之研究顯示波多發生於滿潮來臨前，本次錨錠數據上是與過去研究是相符合的。

水文參數

SEATS 站 (控制組) 水溫分佈:夏季航次 (OR1-CR1010;圖二-A) SEAT 站溫度介於 $20.40\sim 29.40^{\circ}\text{C}$ ，平均水溫為 $26.72\pm 3.16^{\circ}\text{C}$ ，鹽度平均為 33.52 ± 0.47 psu。春季航次 (OR1-CR1034;圖二-B) SEATS 站溫度介於 $20.54\sim 28.42^{\circ}\text{C}$ ，平均水溫為 $25.79\pm 3.01^{\circ}\text{C}$ ，鹽度平均為 33.74 ± 0.33 psu。在 SEATS 站兩次調查中，溫度變化分層明顯，鹽度變化甚小，水溫隨著深度遞減，溫躍層介於 40 米之 80 米之間。下沉型內波影響測站 (ED 站;圖二-C) 溫度介於 $20.59\sim 27.43^{\circ}\text{C}$ ，平均水溫為 $25.56\pm 2.43^{\circ}\text{C}$ ，鹽度平均為 33.71 ± 0.49 psu。50 米以淺海水溫度變化甚小，呈現均勻混和的現象，在水深 80 米處底層水受到潮汐週期的影響呈現三個波峰的圖形。東沙環礁周邊 (內波影響組) 水溫分佈:ES1 站 (圖二-D) 溫度介於 $22.75\sim 26.60^{\circ}\text{C}$ ，平均水溫為 $25.91\pm 0.88^{\circ}\text{C}$ ，鹽度平均為 33.46 ± 0.21 psu。ES2 站 (圖二-E) 溫度介於 $22.97\sim 26.59^{\circ}\text{C}$ ，平均水溫為 $26.01\pm 0.90^{\circ}\text{C}$ ，鹽度平均為 33.42 ± 0.17 psu。SS1 站 (圖二-F) 溫度介於 $18.17\sim 26.44^{\circ}\text{C}$ ，平均水溫為 $24.52\pm 2.28^{\circ}\text{C}$ ，鹽度平均為 33.63 ± 0.32



psu。SS2 站 (圖二-G) 溫度介於 22.83~26.44°C，平均水溫為 25.85±0.72°C，鹽度平均為 33.43±0.11 psu。水溫變化在內波影響組與控制組並無明顯差異。控制組的水溫變化穩定，溫度隨深度遞減少，在 40m 以淺呈現均勻混合 (homogenous) 狀態，且無明顯日夜週期變化。在內波影響組表水水溫普遍高於 26°C。中層水受潮汐作用的影響，水溫溫度隨著潮汐呈週期性的變化。在淺水站高頻採樣的過程中發現有冷水(溫度低於 24°C)入侵至 30 米以淺區域的現象。

葉綠素-a (Chlorophyll a)

葉綠素-a (Chlorophyll a) 濃度在夏季航次 SEATS-1 站 (圖三-A) 平均為 0.21±0.04 $\mu\text{g L}^{-1}$ ，高值主要分布於水深 40 米至 80 米。春季航次 SEATS-2 站 (圖三-B) 平均為 0.20±0.02 $\mu\text{g L}^{-1}$ ，高值主要分布於水深 80 米。東沙環礁東部深水區 ED 站 (圖三-C) 平均為 0.23±0.09 $\mu\text{g L}^{-1}$ ，高值出現於白天，水深 50 米處。東部淺水區 (內波影響組) 葉綠素-a 分佈: ES1 站 (圖三-D) 平均為 0.21±0.03 $\mu\text{g L}^{-1}$ 。ES2 站 (圖三-E) 平均為 0.20±0.04 $\mu\text{g L}^{-1}$ 。南部淺水區 (內波影響組) 葉綠素-a 分佈: SS1 站 (圖三-F) 平均為 0.31±0.06 $\mu\text{g L}^{-1}$ 。SS2 站 (圖三-G) 平均為 0.32±0.05 $\mu\text{g L}^{-1}$ ，兩測站白天濃度皆較晚間高。葉綠素-a 濃度 (圖九-A) 在 SEATS 站，ED 站及東沙東部 ES1、ES2 站相當接近；而東沙南部 SS1、SS2 站葉綠素-a 濃度則是顯著高於東沙環礁其他測站，其他測站間葉綠素-a 濃度差異並無顯著 (表二)。

硝酸鹽 (NO_3^-)

硝酸鹽 (NO_3^-) 濃度深度積分平均值在夏季航次 SEATS-1 站 (圖四-A) 介於 2.14~3.66 μM ，平均為 2.82±0.60 μM 。春季航次 SEATS-2 站 (圖四-B) 介於 1.92~2.98 μM ，平均為 2.40±0.38 μM 。東沙環礁東部深水區 ED 站 (圖四-C) 介於 1.43~3.19 μM ，平均為 2.45±0.55 μM 。東部淺水區 (上舉型內波影響組) 硝酸鹽分佈: ES1 站 (圖四-D) 介於 0.77~1.89 μM ，平均為 1.29±0.41 μM 。ES2 站 (圖四-E) 介於 0.73~2.98 μM ，平均為 1.22±0.75 μM 。東部兩淺水站硝酸鹽濃度十分相近。南部淺水區 (上舉型內波影響組) 硝酸鹽分佈: SS1 站 (圖四-F) 介於 1.09~4.29 μM ，



平均為 $2.74 \pm 1.16 \mu\text{M}$; SS2 站 (圖四-G) 介於 $0.73 \sim 2.76 \mu\text{M}$, 平均為 $1.28 \pm 0.62 \mu\text{M}$ 。SS1 站硝酸鹽濃度高於 SS2, 有顯著差異。整體硝酸鹽濃度在東沙淺水系統 (除 SS1 站外) 普遍低於 SEATS 站與 ED 站 (表二)。

磷酸鹽 (PO_4^{3-})

磷酸鹽 (PO_4^{3-}) 濃度深度積分平均值在夏季航次 SEATS-1 站 (圖五-A) 介於 $0.12 \sim 0.25 \mu\text{M}$, 平均為 $0.20 \pm 0.05 \mu\text{M}$ 。春季航次 SEATS-2 站 (圖五-B) 介於 $0.11 \sim 0.19 \mu\text{M}$, 平均為 $0.15 \pm 0.03 \mu\text{M}$ 。東沙環礁東部深水區 ED 站 (圖五-C) 介於 $0.09 \sim 0.22 \mu\text{M}$, 平均為 $0.17 \pm 0.04 \mu\text{M}$ 。東部淺水區 (內波影響組) 磷酸鹽分佈: ES1 站 (圖五-D) 介於 $0.03 \sim 0.13 \mu\text{M}$, 平均為 $0.08 \pm 0.04 \mu\text{M}$; ES2 站 (圖五-E) 介於 $0.02 \sim 0.24 \mu\text{M}$, 平均為 $0.07 \pm 0.07 \mu\text{M}$ 。東部兩淺水站磷酸鹽濃度十分接近並無顯著差異, 南部淺水區 (內波影響組) 磷酸鹽分佈: SS1 站 (圖五-F) 介於 $0.08 \sim 0.35 \mu\text{M}$, 平均為 $0.22 \pm 0.10 \mu\text{M}$; SS2 站 (圖五-G) 介於 $0.02 \sim 0.22 \mu\text{M}$, 平均為 $0.09 \pm 0.06 \mu\text{M}$ 。SS1 站的磷酸鹽濃度較 SS2 高。硝酸鹽與磷酸鹽在空間上的分布十分相近, 在控制組的變化與溫度呈現相反情形, 營養鹽濃度隨著深度遞增。在 SEATS 站所做的兩次觀察中, 營養鹽於 50 米以下濃度較高, 無明顯的週期變化。而在 ED 站則是受潮汐影響在底層呈現出兩個高峰。在內波影響組的變化趨勢也和控制組相同, 皆與溫度呈現相反趨勢。在淺水區 (內波影響組) 底部營養鹽會隨著潮汐週期變動, 隨著冷水入侵一同影響淺水區域。

生物參數

Synechococcus 數量分布情形

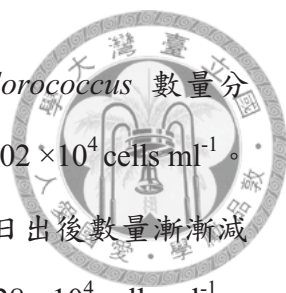
Synechococcus 數量在夏季航次 SEATS-1 站 (圖六-A) 數量介於 $0.01 \sim 9.04 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $3.62 \pm 0.91 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。數量高值主要出現於表水, 水深低於 50 米後數量減少。無明顯日夜週期變化。春季航次 SEATS-2 站 (圖六-B) 數量介於 $0.13 \sim 10.56 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $4.38 \pm 0.67 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。本航次於白天 10 時於表水有些微高值, 但日夜週期變化不明顯。東沙環礁東部深水區 ED 站 (圖

六-C) 數量介於 $0.01\sim 17.86 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ ，平均為 $4.15 \pm 1.62 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ ，數量高值主要出現於水深 50 米處並在午後 4 時有數量略為下降的現象；無明顯日夜週期變化。東部淺水區 (內波影響組) *Synechococcus* 數量分佈:ES1 站 (圖六-D) 數量介於 $2.74\sim 31.43 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ ，平均為 $17.80 \pm 5.52 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ ，ES2 站 (圖六-E) 數量介於 $10.33\sim 34.11 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ ，平均為 $19.60 \pm 5.49 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。

Synechococcus 在整個水層分布較均勻，並在晚間有較多的生物數量。南部淺水區 (內波影響組) *Synechococcus* 數量分佈:SS1 站 (圖六-F) 數量介於 $3.07\sim 43.89 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ ，平均為 $19.21 \pm 8.93 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ ；SS2 站 (圖六-G) 數量介於 $10.66\sim 45.94 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ ，平均為 $23.06 \pm 9.85 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。空間分布與數量變化情形與東部淺水站相似。整體而言，在 SEATS 兩站 *Synechococcus* 主要分布於表水，並無明顯之日夜週期變化。ED 站 *Synechococcus* 數量高值出現於次表層，約水深 50 米處，深度分布較 SEATS 站深。東沙環礁淺水區數量分布受溫躍層影響較小，*Synechococcus* 在各水層皆有分布，日夜變化明顯，在晚間有較白天高的數量分布。此外，四組受上舉型內波影響組 *Synechococcus* 之數量深度積分平均值 (圖九-E) 皆顯著高於控制組 (表一)。

***Prochlorococcus* 數量分布情形**

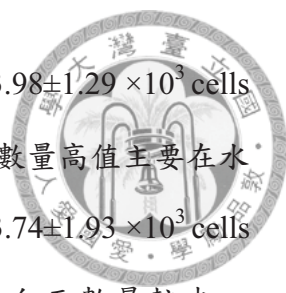
Prochlorococcus 數量在夏季航次 SEATS 站 (圖七-A) 數量介於 $0.13\sim 13.43 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ ，平均為 $6.63 \pm 1.67 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ 。在空間分布上數量高值分布深度較 *Synechococcus* 深，介於水深 30 米至 80 之間。在白天時最高數量分布於 80 米，晚間最高數量則分布於 50 米，深度有略為上升的現象。此航次數量的日夜週期變化分別於早晚 7 時有下降的現象。春季航次 SEATS 站 (圖七-B) 介於 $1.35\sim 11.41 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ ，平均為 $5.97 \pm 1.45 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ 。春季數量較夏季略低，空間分布與夏季亦無太大變化，數量高值主要分布於 40~80 米。東沙環礁東部深水區 ED 站 (圖七-C) *Prochlorococcus* 數量介於 $0.19\sim 6.92 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ ，平均為 $3.05 \pm 1.06 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ 。此站 *Prochlorococcus* 分布高值介於水深 30 米至 60 米間，深度略淺於



SEATS 站兩航次。東部淺水區 (上舉型內波影響組) *Prochlorococcus* 數量分佈:ES1 站 (圖七-D) 介於 $1.61\sim 5.97 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $3.36 \pm 1.02 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ 。垂直空間分布呈均勻分布之情形, 由表水至底部皆有分布, 從日出後數量漸漸減少, 於晚間 6 時後數量漸漸增加。ES2 站 (圖七-E) 介於 $1.51\sim 5.28 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $3.32 \pm 0.72 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ 。本站白天數量變化較小, 高值主要出現於凌晨 5 時, 日出後數量下降。南部淺水區 (上舉型內波影響組) *Prochlorococcus* 數量分佈:SS1 站 (圖七-F) 介於 $0.85\sim 3.49 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $2.49 \pm 0.42 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$; SS2 站 (圖七-G) 介於 $1.59\sim 4.49 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $2.30 \pm 0.98 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ 。於此兩站中 *Prochlorococcus* 在中午 12 時後有數量下降之情形, 平均數量在晚間較高。數量經深度積分平均後 (圖九-F) 顯示在無內波與非上舉型內波影響區 *Prochlorococcus* 的數量較高, 受上舉型內波影響組數量較少。統計結果上 SEATS 航次 *Prochlorococcus* 數量與東沙淺水區域 (內波影響組) 數量上有顯著差異。

Picoeukaryotes 數量分布情形

Picoeukaryotes 數量在夏季航次 SEATS-1 站 (圖八-A) 介於 $0.08\sim 4.50 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $1.11 \pm 0.40 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。主要分布於水深 30 米至 70 米處, 在白天分布情形較深, 晚間高值分布於水深 50 米處。SEATS-2 站春季航次 (圖八-B) 介於 $0.07\sim 6.63 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $1.44 \pm 0.93 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。分佈主要介於 60 米至 100 米之間。於晚間 4 時至 10 時數量較多, 高值出現於水深 80 米處。東沙環礁東部深水區 ED 站 (圖八-C) 介於 $0.05\sim 11.12 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $2.04 \pm 1.03 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。白天數量分布較高, 分別於晚間 7 時與下午 1 時有高值分布。主要分布於水深 50 米處。東部淺水區 (內波影響組) Picoeukaryotes 數量分佈:ES1 站 (圖八-D) 介於 $1.18\sim 10.63 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $3.65 \pm 1.63 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$; ES2 站 (圖八-E) 介於 $1.50\sim 7.88 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $3.69 \pm 1.35 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。此兩站 Picoeukaryotes 空間分布相近, 整個水層皆有分布, 高值主要出現於底層, 日夜週期分布上於晚間有較高的數量分布情形。南部淺水區 (內波影響組) Picoeukaryotes

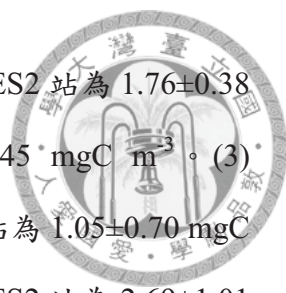


數量分佈:SS1 站(圖八-F) 介於 $1.25\sim 7.32 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $3.98 \pm 1.29 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。垂直空間分布上表水層數量於 7 時後有數量減少之現象。數量高值主要在水較深處。SS2 站 (圖八-G) 介於 $1.04\sim 7.55 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$, 平均為 $3.74 \pm 1.93 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 。數量垂直分布上為均勻分布之情形, 日夜週期分布在白天數量較少。Picoeukaryotes 數量深度積分平均 (圖九-G) 在 ES1、ES2、SS1、SS2 四處淺水區 (上舉型內波影響組) 數量較高, 與 SEATS 站夏季航次數目差異為顯著的, 但與 SEATS 站春季及深水 ED 站的數量差異並無顯著 (表一)。

SEATS 站時空分佈上 *Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 兩類物種並無明顯的日夜週期變化。*Synechococcus* 主要分布於水深 30 米之上 (圖六), *Prochlorococcus* 分布較深, 數量高值主要出現於 30 米至 80 米之間 (圖七)。Picoeukaryotes 在夏季 SEATS-1 航次數目高值分布於 50 米處, 春季 SEATS-2 航次主要分布於水深 80 米處 (圖八)。東沙深水站 (ED 站) 三類物種主要皆分佈於水深 50 米處。東部淺水處 (ES1、ES2) 因水深較淺, 受溫躍層影響小, 混和較為均勻。*Synechococcus* 與 *Prochlorococcus* 在各水層分布平均, Picoeukaryotes 高值在兩站皆分布於水深 30 米以下。南部淺水處 (SS1、SS2) 物種分佈與東部淺水區相似, 三類族群於各水層皆有分布。淺水測站生物數量整體在晚間的數量分布情形是高於白天的。

浮游植物生物量

自營性浮游植物生物量估計主要係利用相關文獻之結果對本研究進行估計, 三類族群生物量分別如下:*Synechococcus* 為 $250 \pm 91 \text{ fgC cell}^{-1}$ 、*Prochlorococcus* 為 $52 \pm 19 \text{ fgC cell}^{-1}$ 、Picoeukaryotes 為 $730 \pm 226 \text{ fgC cell}^{-1}$ (Campbell & Vaultot, 1993; Casey *et al.*, 2013; Grob *et al.*, 2007)。三類超微浮游植物生物量之深度積分平均值分別如下:(1) *Synechococcus* 在 SEATS-1 站為 0.91 ± 0.23 。SEATS-2 站為 $1.10 \pm 0.17 \text{ mgC m}^{-3}$ 。ED 站為 $1.04 \pm 0.40 \text{ mgC m}^{-3}$ 。ES1 站為 $4.45 \pm 1.38 \text{ mgC m}^{-3}$ 。ES2 站為 $4.90 \pm 1.37 \text{ mgC m}^{-3}$ 。SS1 站為 $4.80 \pm 2.23 \text{ mgC m}^{-3}$ 。SS2 站為 $5.77 \pm 2.46 \text{ mgC m}^{-3}$ 。(2) *Prochlorococcus* 在 SEATS-1 站為 $3.51 \pm 0.89 \text{ mgC m}^{-3}$ 。SEATS-2 站為 $3.16 \pm 0.77 \text{ mgC m}^{-3}$ 。



m^{-3} 。ED 站為 $1.62 \pm 0.56 \text{ mgC m}^{-3}$ 。ES1 站為 $1.78 \pm 0.54 \text{ mgC m}^{-3}$ 。ES2 站為 $1.76 \pm 0.38 \text{ mgC m}^{-3}$ 。SS1 站為 $1.32 \pm 0.22 \text{ mgC m}^{-3}$ 。SS2 站為 $1.22 \pm 0.45 \text{ mgC m}^{-3}$ 。(3) Picoeukaryotes 在 SEATS-1 站為 $0.81 \pm 0.30 \text{ mgC m}^{-3}$ 。SEATS-2 站為 $1.05 \pm 0.70 \text{ mgC m}^{-3}$ 。ED 站為 $1.49 \pm 0.78 \text{ mgC m}^{-3}$ 。ES1 站為 $2.66 \pm 1.22 \text{ mgC m}^{-3}$ 。ES2 站為 $2.69 \pm 1.01 \text{ mgC m}^{-3}$ 。SS1 站為 $2.91 \pm 0.97 \text{ mgC m}^{-3}$ 。SS2 站為 $2.73 \pm 1.44 \text{ mgC m}^{-3}$ 。整體浮游植物於各測站中生物量深度積分平均值分別為:SEAT-1 站為 $5.23 \pm 1.41 \text{ mgC m}^{-3}$ 、SEAT-2 站為 $5.31 \pm 1.64 \text{ mgC m}^{-3}$ 、ED 站為 $4.14 \pm 1.74 \text{ mgC m}^{-3}$ 、ES1 站 $8.90 \pm 3.14 \text{ mgC m}^{-3}$ 、ES2 站為 $9.35 \pm 2.77 \text{ mgC m}^{-3}$ 、SS1 站為 $9.03 \pm 3.43 \text{ mgC m}^{-3}$ 、SS2 站為 $9.71 \pm 4.35 \text{ mgC m}^{-3}$ (表十)，在有受到上舉型內波影響之東沙環礁週邊有較高的浮游植物生物量 (Biomass)，在無 (弱) 內波與非上舉型內波影響處水層的生物量深度積分平均值較低 (圖十一)。

討論



南海及東沙環礁水文特性

南海 SEATS 站位於南海北部中央，較不易受到陸源以及內波活動的影響，在 SEATS 站兩次 24 小時連續採樣的過程中，溫度與鹽度並無太大變化，可能肇因於全日潮之緣故。顯示 SEATS 站屬於一個相對穩定的環境。Shaw and Chao (1994) 指出南海海域主要受到東亞季風系統的控制，在冷季與暖季溫度差異較大。在本研究僅 24 小時的錨定期間內水文資料並無發現太大變化。東沙環礁屬於一半封閉式瀉湖，環礁半徑約 25 公里、平均深度小於 10 公尺。水體交換主要利用漲退潮時在環礁西側的南北航道口進行交換，漲潮時海水由環礁外流入，退潮時向外流出。此外，整個東沙環礁內水體總體積遠小於周圍貧營養鹽之海水。環礁水交換後將會很快速的被周圍海水稀釋。因此環礁內部物質對於本研究在環礁東側與南側採樣地點的影響是非常小的。

近年來許多衛星遙測觀察到南海擁有非常活躍的內波活動 (Liu *et al.*, 2004)。海水表面粗糙度成像顯示內波由呂宋海峽往向西側行進，東沙環礁為內波直接衝擊之處。依其水文特性在環礁陸棚處向上抬升造成底部冷水團湧升 (Duda *et al.*, 2004)。根據前人研究當內波在深水處傳遞時，屬沉降型波型而本研究之 ED 即為此波型之影響區。雖然受到沉降型內波影響但並沒有受到冷水湧升影響，因此 ED 站之水文參數與 SEATS 站相似。在 ED 站所得錨定資料在各水層溫度時序圖中，可觀察到內波行進前後所造成的溫度差別 (附錄二 A 圖)，作用是非常急遽的。與潮汐資料比對後顯示內波多發生於大潮之前 (附錄二 B 圖)，此項結果先前人研究互相吻合 (St Laurent *et al.*, 2011)。由於空間限制，本航次只於 ED 進行錨定作業，其他測站系利用奧勒岡大學所提供之模式軟體，對內波抵達時間進行模擬，以探討內波活動的影響。環礁周邊測站之溫度時序分佈圖可觀察到環礁測站會受到潮汐活動造成底層水有規律的週期變化。潮汐活動在物理性質上屬於正壓運動，其垂直流速甚小，底部營養鹽與上層水混和之現象影響有限，而內波活動屬於斜壓




運動，垂直作用力大，能夠使內波行經過的區域產生強烈的混合作用。

超微浮游植物豐度之動態變化

本研究結果顯示出在內波影響組與控制組間三種自營性生物組成相當不同，在 SEATS 站兩次採樣中 *Prochlorococcus* 是主要優勢物種，擁有最高的豐度，*Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 數量較少。此與其他貧營養鹽海域族群組成相似。然而在環礁東側與南側區域之 *Prochlorococcus* 數量分佈較 SEATS 站少，數量下降約 50%，*Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 數量上升，分別提高約四倍與兩倍（圖十）。環礁外側整體水層分布較淺，營養鹽深度積分平均值除 SS1 站外其他皆小於 SEATS 站於 ED 站，造成上述情形原因以下分別討論。

影響浮游植物生長與數量的因子主要有光、溫度、營養鹽、攝食壓力影響、病毒裂解...等等。在溫度與數量分布上 *Synechococcus* 在各站皆和溫度顯示正相關（表八）。在 SEATS 站 *Synechococcus* 主要分佈於表層，數量隨著深度減少，在 22°C 等溫線下分布相當稀少。東沙環礁周邊水溫普遍高於 22°C，*Synechococcus* 分布較為同質分佈 (Homogenous)，並無集中於特定水層。根據 (Partensky *et al.*, 1999) 整理全球的 *Synechococcus* 分佈文獻顯示 *Synechococcus* 主要分布在水溫 22°C 至 29°C 間的地區 (Moore *et al.*, 1995)。本研究中溫度影響並非 *Synechococcus* 生長的限制因子。根據前人研究指出 *Synechococcus* 主要於沿岸及營養鹽較充足的地區有較高之數量分布 (Partensky *et al.*, 1996)，在東沙環礁週邊由於受到上舉行內波所帶來營養鹽的影響，使得 *Synechococcus* 相對於無內波影響組有較高的數量分布。*Synechococcus* 與 *Prochlorococcus* 在本篇研究中皆與營養鹽呈現負相關（表六、七），其原因為營養鹽主要分布在水深較深處，所受到的生物消耗較少，然而表層水營養鹽大部分已被生物利用完畢，因此生物數量與營養鹽濃度多呈負相關的情形。

Prochlorococcus 在環境中棲息深度較深，能夠存活於表面光照 1% 的水層處，常在次表層有數量大值出現。SEATS 站之 *Prochlorococcus* 數量主要分布於水深 40 米之 80 米之間，淺水站 *Prochlorococcus* 於各水層皆有分佈。造成東沙環礁區



Prochlorococcus 數量下降之情形，可能原因為該處水深深度過淺，不適合 *Prochlorococcus* 生存所致。Vaulot 和 Marie (1999) 在赤道區觀察到在表層 *Prochlorococcus* 會因為紫外線的影響，使得細胞死亡造成族群數量受到抑制。另外，*Prochlorococcus* 的細胞構造較 *Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 簡單。Sommaruga et al. (2005) 研究指出 *Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 對於光照有較複雜的防禦機制，能夠支持牠們在紫外線量高的地方仍能生長。*Prochlorococcus* 的細胞體型小，有相對較大的表面積 (Surface to volume ratio, S/V ratio)，對於營養鹽的攝取具有優勢。先前研究指出在赤道與熱帶地區等貧營養鹽海域有較高的 *Prochlorococcus* 數量分布，然而在富營養鹽與接近河口處等地方就幾乎不見 *Prochlorococcus* 的分佈 (Partensky et al.,1999)。可能 *Prochlorococcus* 本身對於營養鹽的需求並不高，只需要些微的營養鹽即可支持其生長。Vaulot et al.(1990)在地中海的研究中顯示氮鹽並非 *Prochlorococcus* 的限制因子，大部份的海洋主要為氮限制的環境，營養鹽多分佈於水深較深的地方，然而 *Prochlorococcus* 族群卻於表水層至有光層底部皆有分佈。Parpais et al.(1996)認為磷酸鹽才是 *Prochlorococcus* 主要的限制生長因子。在細胞分裂週期上，*Synechococcus* 可在一日內分裂一次或一次以上，*Prochlorococcus* 的分裂週期約二到三天分裂一次 (Partensky et al.,1999)。Picoeukaryotes 組成較為多樣，不同藻種的分裂時間皆不盡相同。而內波來時所造成環境在短時間的改變是快速且短暫的，*Prochlorococcus* 可能無法在短時間的環境改變下立即作出反應。綜合以上結果，紫外光的影響與細胞本身的生理特性，可能是造成 *Prochlorococcus* 在淺水區數量變化並未與其他兩者相同的原因。

Picoeukaryotes 與 *Synechococcus* 分佈組成相當類似。在東沙環礁淺水區也有數量增加的現象，但因為組成變異數較大，數量上僅在夏季 SEATS-1 站與東沙環礁淺水站有顯著差異 (表一)。在許多中營養型海域研究顯示 Picoeukaryotes 會取代 *Synechococcus* 與 *Prochlorococcus* 成為主要的優勢物種 (Jacquet et al., 2002)。但 Picoeukaryotes 組成複雜 (Massana et al., 2004)，對於環境改變所造成的影響程度並




不如 *Synechococcus* 與 *Prochlorococcus* 來的了解，須在未來更進一步釐清。

日週分佈與潮汐模式變化情形

依照先前文獻 (St Laurent *et al.*, 2011) 與本篇研究錨錠資料結果顯示內波出現於滿潮之前，然而內波作用相當強烈且短暫。在本研究中每 3 小時採樣為期一天的過程中，並未於淺水站觀測到明顯內波活動之訊號。ED 站錨錠數據為每分鐘所接收一筆之溫度資料，有偵測到水溫快速變動之情形。然而兩者時間尺度並不相同，礙於海上採樣作業與現場水樣處理的時間，無法再縮短採樣的頻率。因此對於內波水的採樣未來需要更精確的採樣方法。本研究各測站潮汐變化係利用奧勒岡大學所提供潮汐模式進行模擬，藉由模擬潮汐的變化來討論內波活動對於生物族群的影響。圖十二與圖十三為各站潮汐模式與參數深度積分平均變化情形。SEATS 站主要受到全日潮的影響，在一日內各有一次高潮與低潮。東沙系統主要受到半日潮的影響，會於一日內出現兩次滿潮與低潮 (圖十五)。SEATS 站與 ED 站屬於無 (弱) 內波及沉降型內波影響的區域，此區中三種自營性浮游生物數量與潮汐並無相關變化情形。在 SEATS 站中 *Prochlorococcus* 有最高的數量分佈，*Synechococcus* 數量穩定，無明顯日夜變化。Picoeukaryotes 在 SEATS-2 與 ED 站午後有數量增加的現象。在東沙環礁周圍測站由於受到上舉型內波之影響，會在大潮時有營養鹽注入的情形，此區的 *Synechococcus* 及 Picoeukaryotes 數量與潮汐有相似的變化情形。在大潮前後有數量上升的現象。*Prochlorococcus* 與潮汐相關變化則較不明顯。根據先前研究 (Liu *et al.*, 1995) 表示 *Synechococcus* 與 *Prochlorococcus* 主要在白天生長，晚間進行細胞分裂。然而本研究在環礁周邊進行 24 小時週期錨定採樣時，恰巧滿潮時段皆出現在晚上，究竟是細胞自體分裂還是受內波影響其生理機能並使得在大潮前後有較高分裂速率，兩者無法清楚解明。未來可利用分子生物技術，檢測不同環境下控制細胞分裂基因的表現情形。

Prochlorococcus 可能因本身對營養鹽的需求即不高，對於內波注入營養鹽的反應不如 *Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 靈敏，而導致細胞數量並未與其他兩者



隨潮汐有共同的變化情形。Picoeukaryotes 藻種組成複雜，不同藻種分裂的時間並不一致 (Monnier *et al.*, 2010)。但本研究結果顯示 Picoeukaryotes 在大潮前的數量上升，隨後下降，與潮汐的變化相當一致。我們認為內波活動或潮汐週期能夠間接調控東沙環礁周邊超微自營性浮游生物的細胞分裂行為。如果只靠基因調控 (Johnson *et al.*, 1996) 細胞於每日特定的時間進行，將無法解釋生物數量與潮汐的共同變化情形。赤潮 (red tide) 與藻華 (bloom) 皆是藻類數量於短時間快速增長的例子，水溫的快速改變、特殊微量元素的補充或是某種因子影響使得藻類快速的分裂，可為內波活動在未來階段的研究課題。


浮游植物豐度與生物量

圖十、十一為各站之浮游植物豐度與生物量分布情形 (單位為 $\times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 與 mgC m^{-3})。在 SEATS 站與 ED 站深水系統中 *Prochlorococcus* 分別佔有約九成的豐度與五成五的生物量，*Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 佔有約一成豐度 (8%與 3%) 與四成五的生物量 (21%與 24%)。雖然 *Prochlorococcus* 在深水區佔了幾乎全部的生物豐度，但因其體型小，體內所含的碳量較少，在生物量上只佔了 55%，*Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 雖然數量很少，但體型較大，體內的碳含量較高，在深水區中分別提供了 21%與 24%的生物量。在東沙環礁淺水系統中 *Prochlorococcus* 佔有約五成四的豐度與一成六的生物量，*Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 佔有約四成五的豐度 (38% 與 7%) 與八成四的生物量 (54% 與 30%)。在受上舉型內波影響之環礁周邊淺水站 *Synechococcus* 豐度所佔的比例上升，由 8%增加為 38%。Picoeukaryotes 所佔比例則是由 3%增加為 7%。兩者豐度比例分別增加為五倍與兩倍。生物豐度上 *Prochlorococcus* 為深水站中最多的浮游植物，在淺水區 *Prochlorococcus* 所佔的比例約減少了約四成。在受上舉型內波影響之淺水站 *Synechococcus* 所佔的生物量大量增加，佔了約一半以上 (54%) 的生物量，*Prochlorococcus* 僅佔了 16%的生物量。結果顯示出在東沙環礁周邊有較高的生物量分布情形，然而在營養鹽的深度積分平均值上並未在淺水區顯示出營養鹽濃度

較高的現象，此區生物很有可能受到上舉型內波所帶來營養鹽的補充，支持著生物在該區的生長所需，使得淺水區有低營養鹽 (SS1 站除外)，生物量深度積分平均值卻高於深水組的情形。

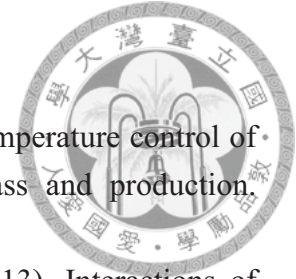


結論

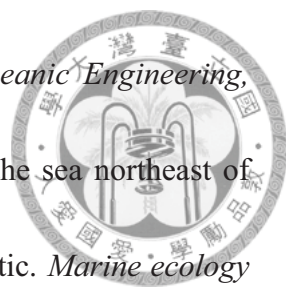



自營性超微浮游生物在東沙環礁周邊與 SEATS 站的組成相當不同。SEATS 中 *Prochlorococcus* 佔有最多的數量，其次為 *Synechococcus*，最後為 Picoeukaryotes。東沙環礁測站中整體 *Prochlorococcus* 數量深度積分平均值下降約百分之五十，*Synechococcus* 數量深度積分平均增加約為 SEATS 站之五倍，Picoeukaryotes 數量深度積分平均增加約為 SEATS 站之二倍半。*Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 主要偏好營養鹽較高的環境，然而在營養鹽的深度積分平均值上東沙環礁周邊卻是低於深水站 (SEATS 站與 ED 站) 的，造成此結果原因可能為東沙環礁受到內波活動所帶來的營養鹽之影響，支持了當地生物的生長所需。使得環礁周圍自營性超微浮游生物族群與 SEATS 站組成不同有特別的分布情形。東沙環礁邊的 *Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 會於大潮前後有數量增加的情形。日夜週期數量分布與潮汐的變化情形相當吻合。而內波出現的時間大致於滿潮之前，是否為內波活動或潮汐變化使得 *Synechococcus* 與 Picoeukaryotes 在滿潮時有較高的分裂速率還需在未來進行更深入的考證。本研究結果顯示東沙環礁受到南海內波的影響，超微浮游生物的組成與南海時間序列 (SEATS 站) 呈現截然不同的情形，說明內波活動對於東沙環礁生態系有著相當重要的影響力。

參考文獻



- Agawin, N. S., Duarte, C. M., & Agusti, S. (2000). Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnology and Oceanography*, 45(3), 591-600.
- Beardall, J., Sanchez-Baracaldo, P., Larkum, A., & Raven, J. (2013). Interactions of photosynthesis with genome size and function. *Phil. Trans. R. Soc.*, 368. doi: 10.1098/rstb.2012.0264
- Campbell, L., Nolla, H., & Vaultot, D. (1995). The importance of Prochlorococcus to community structure in the central North Pacific Ocean. *Oceanographic Literature Review*, 42(5).
- Campbell, L., & Vaultot, D. (1993). Photosynthetic picoplankton community structure in the subtropical North Pacific Ocean near Hawaii (station ALOHA). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 40(10), 2043-2060.
- Casey, J. R., Aucan, J. P., Goldberg, S. R., & Lomas, M. W. (2013). Changes in partitioning of carbon amongst photosynthetic pico-and nano-plankton groups in the Sargasso Sea in response to changes in the North Atlantic Oscillation. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 93, 58-70.
- Chang, M. H., Lien, R. C., Tang, T. Y., D'Asaro, E. A., & Yang, Y. J. (2006). Energy flux of nonlinear internal waves in northern South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 33(3).
- Chao, S.-Y., Ko, D.-S., Lien, R.-C., & Shaw, P.-T. (2007). Assessing the west ridge of Luzon Strait as an internal wave mediator. *Journal of Oceanography*, 63(6), 897-911.
- Charpy, L., & Blanchot, J. (1998). Photosynthetic picoplankton in French Polynesian atoll lagoons: estimation of taxa contribution to biomass and production by flow cytometry. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 162, 57-70.
- Chisholm, S. W., Olson, R. J., Zettler, E. R., Goericke, R., Waterbury, J. B., & Welschmeyer, N. A. (1988). A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone. *Nature*, 334, 340 - 343. doi: 10.1038/334340a0
- Colosi, J. A., Beardsley, R. C., Lynch, J. F., Gawarkiewicz, G., Chiu, C. S., & Scotti, A. (2001). Observations of nonlinear internal waves on the outer New England continental shelf during the summer Shelfbreak Primer study. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 106(C5), 9587-9601.
- Dai, C. (2005). *Dongsha atoll in the South China Sea: Past, present and future*. Paper presented at the 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa, Japan.
- Duda, T. F., Lynch, J. F., Irish, J. D., Beardsley, R. C., Ramp, S. R., Chiu, C.-S., Tang, T. Y., & Yang, Y.-J. (2004). Internal tide and nonlinear internal wave behavior at

- 
- the continental slope in the northern South China Sea. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 29(4), 1105-1130.
- Gong, G. (1992). Chemical hydrography of the Kuroshio front in the sea northeast of Taiwan. *National Taiwan University*.
- Gradinger, R., & Lenz, J. (1989). Picocyanobacteria in the high Arctic. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 52(1), 99-101.
- Grob, C., Ulloa, O., Claustre, H., Huot, Y., Alarcon, G., & Marie, D. (2007). Contribution of picoplankton to the total particulate organic carbon concentration in the eastern South Pacific. *Biogeosciences*, 4(5), 837-852.
- Hsu, M.-K., & Liu, A. K. (2004). Nonlinear internal waves in the South China Sea: DTIC Document.
- Jacquet, S., Prieur, L., Avois-Jacquet, C., Lennon, J.-F., & Vaultot, D. (2002). Short-timescale variability of picophytoplankton abundance and cellular parameters in surface waters of the Alboran Sea (western Mediterranean). *Journal of Plankton Research*, 24(7), 635-651.
- Jochem, F. (1988). On the distribution and importance of picocyanobacteria in a boreal inshore area (Kiel Bight, Western Baltic). *Journal of plankton research*, 10(5), 1009-1022.
- Johnson, C. H., Golden, S. S., Ishiura, M., & Kondo, T. (1996). Circadian clocks in prokaryotes. *Molecular microbiology*, 21(1), 5-11.
- Karl, D. M., & Tien, G. (1992). MAGIC: a sensitive and precise method for measuring dissolved phosphorus in aquatic environments. *Limnology and Oceanography*, 37(1), 105-116.
- Klymak, J. M., & Moum, J. N. (2003). Internal solitary waves of elevation advancing on a shoaling shelf. *Geophysical Research Letters*, 30(20).
- Lefort, T., & Gasol, J. M. (2013). Short-time scale coupling of picoplankton community structure and single-cell heterotrophic activity in winter in coastal NW Mediterranean Sea waters. *Journal of Plankton Research*, 36(1), 243-258. doi: 10.1093/plankt/fbt073
- Liang, J.-r. (2010). Estimates of turbulent mixing in the seas off the Southwestern Taiwan from Lowered ADCP and CTD profiles. *Taiwan: National Sun Yat-sen University*.
- Liu, A. K., Ramp, S. R., Zhao, Y., & Tang, T. Y. (2004). A case study of internal solitary wave propagation during ASIAEX 2001. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 29(4), 1144-1156.
- Liu, H., Campbell, L., & Landry, M. R. (1995). Growth and mortality rates of Prochlorococcus and Synechococcus measured with a selective inhibitor technique. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 116(1), 277-287.

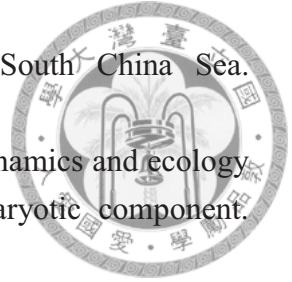
- 
- Maita, Y., Parsons, T., & Lalli, C. M. (1984). *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*: Pergamon press.
- Massana, R., Balagué, V., Guillou, L., & Pedrós-Alió, C. (2004). Picoeukaryotic diversity in an oligotrophic coastal site studied by molecular and culturing approaches. *FEMS Microbiology Ecology*, *50*(3), 231-243.
- Monnier, A., Liverani, S., Bouvet, R., Jesson, B., Smith, J. Q., Mosser, J., Corellou, F., & Bouget, F.-Y. (2010). Orchestrated transcription of biological processes in the marine picoeukaryote *Ostreococcus* exposed to light/dark cycles. *BMC genomics*, *11*(1), 192.
- Moore, L. R., Goericke, R., & Chisholm, S. W. (1995). Comparative physiology of *Synechococcus* and *Prochlorococcus*: influence of light and temperature on growth, pigments, fluorescence and absorptive properties. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, *116*(1), 259-275.
- Morel, A., Ahn, Y.-H., Partensky, F., Vault, D., & Claustre, H. (1993). *Prochlorococcus* and *Synechococcus*: A comparative study of their optical properties in relation to their size and pigmentation. *Journal of Marine Research*, *51*(3), 617-649.
- Parpais, J., Marie, D., Partensky, F., Morin, P., & Vault, D. (1996). Effect of phosphorus starvation on the cell cycle of the photosynthetic prokaryote *Prochlorococcus* spp. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, *132*(1), 265-274.
- Partensky, F., Blanchot, J., Lantoine, F., Neveux, J., & Marie, D. (1996). Vertical structure of picophytoplankton at different trophic sites of the tropical northeastern Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *43*(8), 1191-1213.
- Partensky, F., Blanchot, J., Lantoine, F., Neveux, J., & Marie, D. (1996). Vertical structure of picophytoplankton at different trophic sites of the tropical northeastern Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res Pt I*, *43*(8), 1191-1213. doi: Doi 10.1016/0967-0637(96)00056-8
- Partensky, F., Blanchot, J., & Vault, D. (1999). Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. *Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco*, 457-476.
- Partensky, F., Hess, W., & Vault, D. (1999). *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, *63*(1), 106-127.
- Raven, J. A. (1994). Why are there no picoplanktonic O₂ evolvers with volumes less than 10– 19 m³? *Journal of plankton research*, *16*(5), 565-580.
- Rimmelin, P., & Moutin, T. (2005). Re-examination of the MAGIC method to determine low orthophosphate concentration in seawater. *Analytica chimica acta*, *548*(1),

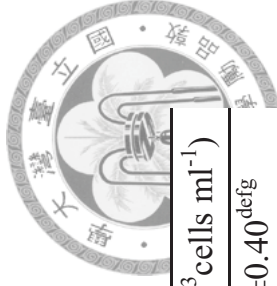
- 174-182.
- Rippka, R., Deruelles, J., Waterbury, J. B., Herdman, M., & Stanier, R. Y. (1979). Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria. *Journal of General Microbiology*, 111(1), 1-61.
- Scanlan, D. J., Ostrowski, M., Mazard, S., Dufresne, A., Garczarek, L., Hess, W. R., Post, A. F., Hagemann, M., Paulsen, I., & Partensky, F. (2009). Ecological genomics of marine picocyanobacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 73(2), 249-299.
- Shaw, P.-T., & Chao, S.-Y. (1994). Surface circulation in the South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 41(11), 1663-1683.
- Sherr, E., & Sherr, B. (1988). Role of microbes in pelagic food webs: a revised concept. *Limnology and oceanography*, 33(5), 1225-1227.
- Sieburth, J., Smetacek, V., & Lenz, J. (1978). Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and oceanography*, 23(6), 1256-1263.
- Sommaruga, R., Hofer, J. S., Alonso-Sáez, L., & Gasol, J. M. (2005). Differential sunlight sensitivity of picophytoplankton from surface Mediterranean coastal waters. *Appl. Environ. Microbiol.*, 71(4), 2154-2157.
- St Laurent, L. C., Simmons, H. L., Tang, T. Y., & Wang, Y. (2011). Turbulent properties of internal waves in the South China Sea. *Oceanography*, 24(4), 78-87.
- Stevens, C. L., Abraham, E. R., Moore, C. M., Boyd, P. W., & Sharples, J. (2005). Observations of Small-Scale Processes Associated with the Internal Tide Encountering an Island. *Journal of physical oceanography*, 35(9), 1553-1567.
- Stevens, C. L., Sutton, P. J., & Law, C. S. (2012). Internal waves downstream of Norfolk Ridge, western Pacific, and their biophysical implications. *Limnology and Oceanography*, 57(4), 897-911.
- Stockner, J. G., & Antia, N. J. (1986). Algal picoplankton from marine and freshwater ecosystems: a multidisciplinary perspective. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 43(12), 2472-2503.
- Valderrama, J. C. (1981). The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Marine chemistry*, 10(2), 109-122.
- Vaulot, D., & Marie, D. (1999). Diel variability of photosynthetic picoplankton in the equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)*, 104(C2), 3297-3310.
- Vaulot, D., Partensky, F., Neveux, J., Fauzi, R., Mantoura, C., & Llewellyn, C. (1990). Winter presence of prochlorophytes in surface waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Limnology and Oceanography*, 35(5), 1156-1164.
- Wang, Y. H., Dai, C. F., & Chen, Y. Y. (2007). Physical and ecological processes of

internal waves on an isolated reef ecosystem in the South China Sea.
Geophysical Research Letters, 34(18).

Worden, A. Z., Nolan, J. K., & Palenik, B. (2004). Assessing the dynamics and ecology of marine picophytoplankton: the importance of the eukaryotic component.
Limnology and Oceanography, 49(1), 168-179.

Yang, Y.-J., Tang, T. Y., Chang, M., Liu, A. K., Hsu, M.-K., & Ramp, S. R. (2004). Solitons northeast of Tung-Sha Island during the ASIAEX pilot studies. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 29(4), 1182-1199.





表一：各站之[@]生物參數深度積分平均值與變方分析 (ANOVA) 檢定結果。

Station	Physical narrative	<i>Syn.</i> (10 ³ cells ml ⁻¹)	<i>Pro.</i> (10 ⁴ cells ml ⁻¹)	<i>Peuk.</i> (10 ³ cells ml ⁻¹)
SEAT-1	Deep-water station	Ave. 3.62±0.91 ^{cdefg}	6.63±1.67 ^{cdefg}	1.11±0.40 ^{defg}
	with weak or no IWs	Range 2.62~5.07	3.15~8.24	0.41~1.72
SEAT-2	Deep-water station	Ave. 4.38±0.67 ^{cdefg}	5.97±1.45 ^{defg}	1.44±0.93
	with weak or no IWs	Range 3.41~5.24	3.87~7.51	0.41~2.69
ED	Deep-water station	Ave. 4.15±1.62 ^{defg}	3.05±1.06 ^a	2.04±1.03
	with depression IWs	Range 2.5~7.06	1.72~5.19	0.94~3.79
ES-1	Shallow station with elevated IWs	Ave. 17.80±5.52 ^{abc}	3.36±1.02 ^{ab}	3.65±1.63
	Shallow station with elevated IWs	Range 11.42~25.31	1.84~5.18	1.45~5.89
ES-2	Shallow station with elevated IWs	Ave. 19.60±5.49 ^{abc}	3.32±0.72 ^{ab}	3.69±1.35
	Shallow station with elevated IWs	Range 13.14~28.89	2.36~4.74	2.04~5.96
SS-1	Shallow station with elevated IWs	Ave. 19.21±8.93 ^{abc}	2.49±0.42 ^{ab}	3.98±1.29
	Shallow station with elevated IWs	Range 9.14~33.97	1.65~3.16	2.27~5.73
SS-2	Shallow station with elevated IWs	Ave. 23.06±9.85 ^{abc}	2.30±0.98 ^{ab}	3.74±1.93
	Shallow station with elevated IWs	Range 12.46~44.73	1.87~4.36	1.29~6.58

[@] *Syn.*、*Pro.*、*Peuk.* 分別代表 *Synechococcus*、*Prochlorococcus* 及 Picoeukaryotes。

上標 a、b、c、d、e、f、g 分別代表與 SEAT-1(a)、SEAT-2(b)、ED(c)、ES1(d)、ES2(e)、SS1(f)及 SS2(g)之間 ANOVA 分析有顯著差異。

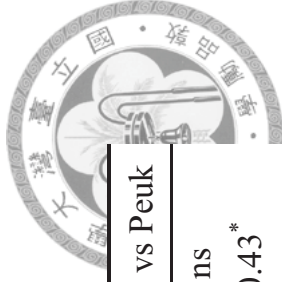


表二：各站之[@]水文參數深度積分平均值與變方分析 (ANOVA) 檢定結果。

Station		Chla($\mu\text{g/L}$)	NO_3^- (μM)	PO_4^{3-} (μM)
SEAT-1	Ave.	0.21 \pm 0.04 ^{fg}	2.81 \pm 0.60 ^{deg}	0.20 \pm 0.05 ^{deg}
	Range	0.14~0.28	2.14~3.66	0.12~0.25
SEAT-2	Ave.	0.20 \pm 0.02 ^{fg}	2.40 \pm 0.38	0.14 \pm 0.03
	Range	0.18~0.23	1.92~2.98	0.11~0.19
ED	Ave.	0.23 \pm 0.09 ^{fg}	2.45 \pm 0.55 ^{de}	0.16 \pm 0.04 ^e
	Range	0.13~0.38	1.43~3.19	0.09~0.22
ES-1	Ave.	0.21 \pm 0.03 ^{fg}	1.29 \pm 0.41 ^{acf}	0.07 \pm 0.04 ^{af}
	Range	0.16~0.25	0.77~1.89	0.03~0.13
ES-2	Ave.	0.20 \pm 0.04 ^{fg}	1.21 \pm 0.75 ^{acf}	0.06 \pm 0.07 ^{acf}
	Range	0.14~0.25	0.73~2.98	0.02~0.24
SS-1	Ave.	0.31 \pm 0.06 ^{abcde}	2.73 \pm 1.16 ^{deg}	0.22 \pm 0.10 ^{deg}
	Range	0.24~0.40	1.09~4.29	0.08~0.35
SS-2	Ave.	0.23 \pm 0.05 ^{abcde}	1.27 \pm 0.62 ^{af}	0.08 \pm 0.06 ^{af}
	Range	0.23~0.40	0.73~2.76	0.02~0.22

[@]Chla、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 分別代表葉綠素-a、硝酸鹽、磷酸鹽。

上標 a、b、c、d、e、f、g 分別代表與 SEAT-1(a)、SEAT-2(b)、ED(c)、ES1(d)、ES2(e)、SS1(f)及 SS2(g)之間 ANOVA 分析有顯著差異。

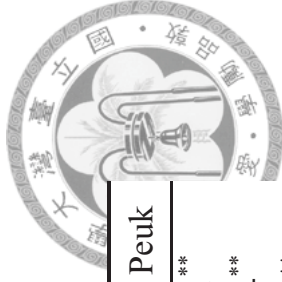


表三:各測站溫度與[@]其他參數之相關分析表。

	Temp vs Chla	Temp vs NO ₃ ⁻	Temp vs PO ₄ ³⁻	Temp vs <i>Syn.</i>	Temp vs <i>Pro.</i>	Temp vs Peuk
SEAT-1	ns	-0.95 ^{**}	-0.97 ^{**}	0.86 ^{**}	0.68 ^{**}	ns
SEAT-2	-0.45 [*]	-0.94 ^{**}	-0.95 ^{**}	0.85 ^{**}	ns	-0.43 [*]
ED	ns	-0.98 ^{**}	-0.95 ^{**}	0.58 ^{**}	0.77 ^{**}	ns
ES-1	-0.48 ^{**}	-0.96 ^{**}	-0.97 ^{**}	0.53 ^{**}	ns	-0.33 [*]
ES-2	ns	-0.98 ^{**}	-0.98 ^{**}	0.48 ^{**}	0.42 [*]	-0.84 ^{**}
SS-1	0.56 ^{**}	-0.98 ^{**}	-0.99 ^{**}	0.66 ^{**}	0.76 ^{**}	0.28 [*]
SS-2	ns	-0.92 ^{**}	-0.95 ^{**}	0.31 [*]	ns	0.30 [*]

^{**}表示 P<0.01、^{*}表示 P<0.05、ns 表示為不顯著。

[@]Temp、Chla、NO₃⁻、PO₄³⁻、*Syn.*、*Pro.*、Peuk 分別代表溫度、葉綠素-a、硝酸鹽、磷酸鹽、*Synechococcus*、*Prochlorococcus* 及 Picoeukaryotes。



表四：各測站葉綠素與@其他參數之相關分析表。

	Chla vs Temp	Chla vs NO ₃ ⁻	Chla vs PO ₄ ³⁻	Chla vs <i>Syn.</i>	Chla vs <i>Pro.</i>	Chla vs Peuk
SEAT-1	ns	-0.38*	-0.32*	ns	0.35*	0.71**
SEAT-2	-0.45*	ns	ns	ns	0.47*	0.74**
ED	ns	ns	ns	0.60**	ns	0.88**
ES-1	-0.48**	0.47**	0.54**	-0.37*	ns	ns
ES-2	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SS-1	0.56**	-0.57**	-0.54**	0.28*	0.36*	-0.29*
SS-2	ns	ns	ns	ns	ns	ns

** 表示 P<0.01、* 表示 P<0.05、ns 表示為不顯著。

@Temp、Chla、NO₃⁻、PO₄³⁻、*Syn.*、*Pro.*、Peuk 分別代表溫度、葉綠素-a、硝酸鹽、磷酸鹽、*Synechococcus*、*Prochlorococcus* 及 Picoeukaryotes。



表五：各測站硝酸鹽與[@]其他參數之相關分析表。

	NO ₃ ⁻ vs Temp	NO ₃ ⁻ vs Chla	NO ₃ ⁻ vs PO ₄	NO ₃ ⁻ vs Syn.	NO ₃ ⁻ vs Pro.	NO ₃ ⁻ vs Peuk
SEAT-1	-0.95 ^{**}	-0.38 [*]	0.99 ^{**}	-0.82 ^{**}	-0.76 ^{**}	ns
SEAT-2	-0.94 ^{**}	ns	0.99 ^{**}	-0.81 ^{**}	ns	ns
ED	-0.98 ^{**}	ns	0.94 ^{**}	-0.62 ^{**}	-0.76 ^{**}	ns
ES-1	-0.96 ^{**}	0.47 ^{**}	0.99 ^{**}	-0.45 ^{**}	ns	0.49 ^{**}
ES-2	-0.98 ^{**}	ns	0.98 ^{**}	-0.45 ^{**}	-0.47 ^{**}	0.81 ^{**}
SS-1	-0.98 ^{**}	-0.57 ^{**}	0.99 ^{**}	-0.69 ^{**}	-0.76 ^{**}	0.29 [*]
SS-2	-0.92 ^{**}	ns	0.98 ^{**}	-0.36 [*]	ns	ns

^{**}表示 P<0.01、^{*}表示 P<0.05、ns 表示為不顯著。

[@]Temp、Chla、NO₃⁻、PO₄³⁻、Syn、Pro、Peuk 分別代表溫度、葉綠素-a、硝酸鹽、磷酸鹽、Prochlorococcus、Prochlorococcus 及 Picoeukaryotes。



表六：各測站磷酸鹽與[@]其他參數之相關分析表。

	PO ₄ ³⁻ vs Temp	PO ₄ ³⁻ vs Chla	PO ₄ ³⁻ vs NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻ vs Syn.	PO ₄ ³⁻ vs Pro.	PO ₄ ³⁻ vs Peuk
SEAT-1	-0.97 ^{**}	-0.32 [*]	0.99 ^{**}	-0.85 ^{**}	-0.75 ^{**}	ns
SEAT-2	-0.95 ^{**}	ns	0.99 ^{**}	-0.82 ^{**}	ns	ns
ED	-0.95 ^{**}	ns	0.94 ^{**}	-0.53 ^{**}	-0.71 ^{**}	ns
ES-1	-0.97 ^{**}	0.54 ^{**}	0.99 ^{**}	-0.46 ^{**}	ns	0.46 ^{**}
ES-2	-0.98 ^{**}	ns	0.98 ^{**}	-0.48 ^{**}	-0.46 ^{**}	0.82 ^{**}
SS-1	-0.99 ^{**}	-0.54 ^{**}	0.99 ^{**}	-0.70 ^{**}	-0.77 ^{**}	0.27 [*]
SS-2	-0.95 ^{**}	ns	0.98 ^{**}	-0.36 [*]	ns	ns

^{**} 表示 P<0.01、^{*} 表示 P<0.05、ns 表示為不顯著。

[@]Temp、Chla、NO₃⁻、PO₄³⁻、Syn、Pro、Peuk 分別代表溫度、葉綠素-a、硝酸鹽、磷酸鹽、磷酸鹽、*Synechococcus*、*Prochlorococcus* 及 Picoeukaryotes。

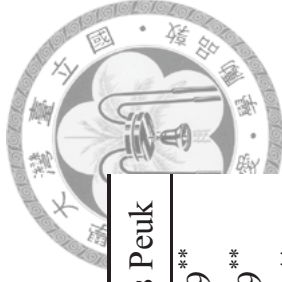


表七：各測站 *Synechococcus* 與[@]其他參數之相關分析表。

	<i>Syn.</i> vs <i>Temp</i>	<i>Syn.</i> vs <i>Chla</i>	<i>Syn.</i> vs NO_3^-	<i>Syn.</i> vs PO_4^{3-}	<i>Syn.</i> vs <i>Pro.</i>	<i>Syn.</i> vs <i>Peuk</i>
SEAT-1	0.86 ^{**}	ns	-0.82 ^{**}	-0.85 ^{**}	0.76 ^{**}	ns
SEAT-2	0.85 ^{**}	ns	-0.81 ^{**}	-0.82 ^{**}	ns	ns
ED	0.58 ^{**}	0.60 ^{**}	-0.62 ^{**}	-0.53 ^{**}	0.43 ^{**}	0.58 ^{**}
ES-1	0.53 ^{**}	-0.37 [*]	-0.45 ^{**}	-0.46 ^{**}	0.37 [*]	0.28 [*]
ES-2	0.48 ^{**}	ns	-0.45 ^{**}	-0.48 ^{**}	ns	ns
SS-1	0.66 ^{**}	0.28 [*]	-0.69 ^{**}	-0.70 ^{**}	0.52 ^{**}	ns
SS-2	0.31 [*]	ns	-0.36 [*]	-0.36 [*]	0.32 [*]	0.32 [*]

^{**} 表示 $P < 0.01$ 、^{*} 表示 $P < 0.05$ 、ns 表示為不顯著。

[@]Temp、Chla、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、*Syn*、*Pro*、*Peuk* 分別代表溫度、葉綠素-a、硝酸鹽、磷酸鹽、磷醣鹽、*Synechococcus*、*Prochlorococcus* 及 Picoeukaryotes。

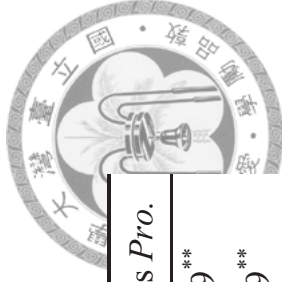


表八：各測站 *Prochlorococcus* 與[@]其他參數之相關分析表。

	<i>Pro.</i> vs <i>Temp</i>	<i>Pro.</i> vs <i>Chla</i>	<i>Pro.</i> vs NO_3^-	<i>Pro.</i> vs PO_4^{3-}	<i>Pro.</i> vs <i>Syn.</i>	<i>Pro.</i> vs <i>Peuk</i>
SEAT-1	0.68**	0.35*	-0.76**	-0.75**	0.76**	0.39**
SEAT-2	ns	0.47*	ns	ns	ns	0.49**
ED	0.77**	ns	-0.76**	-0.71**	0.43**	0.40**
ES-1	ns	ns	ns	ns	0.37*	0.38**
ES-2	0.42*	ns	-0.47**	-0.46**	ns	ns
SS-1	0.76**	0.36*	-0.76**	-0.77**	0.52**	ns
SS-2	ns	ns	ns	ns	0.32*	0.44**

** 表示 $P < 0.01$ 、* 表示 $P < 0.05$ 、ns 表示為不顯著。

[@]Temp、Chla、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、*Syn*、*Pro*、*Peuk* 分別代表溫度、葉綠素-a、硝酸鹽、磷酸鹽、*Synechococcus*、*Prochlorococcus* 及 Picoeukaryotes。



表九：各測站 Picoeukaryotes 與[@]其他參數之相關分析表。

	Peuk vs Temp	Peuk vs Chla	Peuk vs NO ₃ ⁻	Peuk vs PO ₄ ³⁻	Peuk vs Syn.	Peuk vs Pro.
SEAT-1	ns	0.71 ^{**}	ns	ns	ns	0.39 ^{**}
SEAT-2	-0.43 [*]	0.74 ^{**}	ns	ns	ns	0.49 ^{**}
ED	ns	0.88 ^{**}	ns	ns	0.58 ^{**}	0.40 ^{**}
ES-1	-0.33 [*]	ns	0.49 ^{**}	0.46 ^{**}	0.28 [*]	0.38 ^{**}
ES-2	-0.84 ^{**}	ns	0.81 ^{**}	0.82 ^{**}	ns	ns
SS-1	0.28 [*]	-0.29 [*]	0.29 [*]	0.27 [*]	ns	ns
SS-2	0.30 [*]	Ns	ns	ns	0.32 [*]	0.44 ^{**}

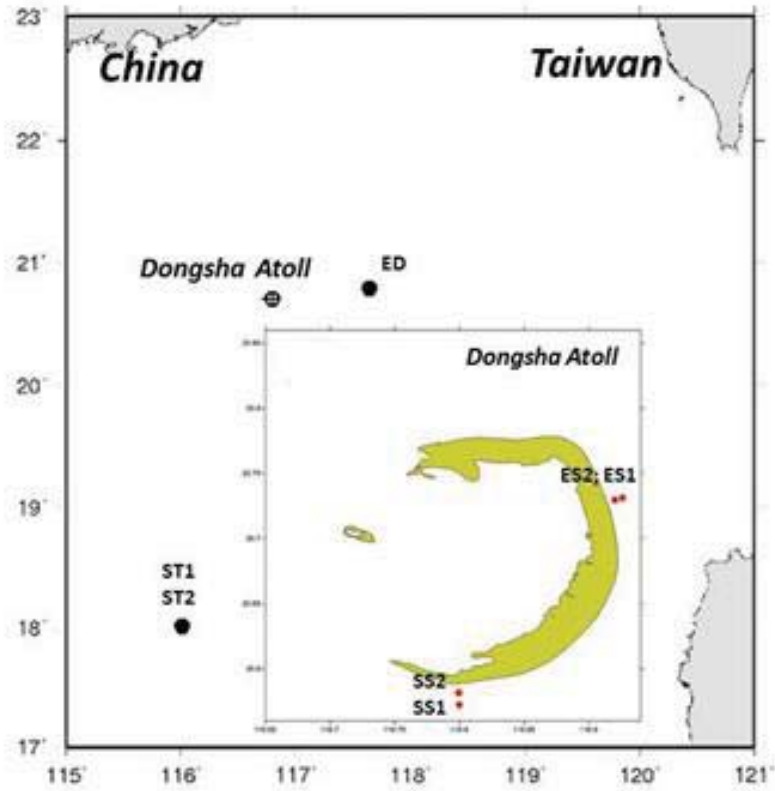
^{**} 表示 P<0.01、^{*} 表示 P<0.05、ns 表示為不顯著。

[@]Temp、Chla、NO₃⁻、PO₄³⁻、Syn、Pro、Peuk 分別代表溫度、葉綠素-a、硝酸鹽、磷酸鹽、*Synechococcus*、*Prochlorococcus* 及 Picoeukaryotes。

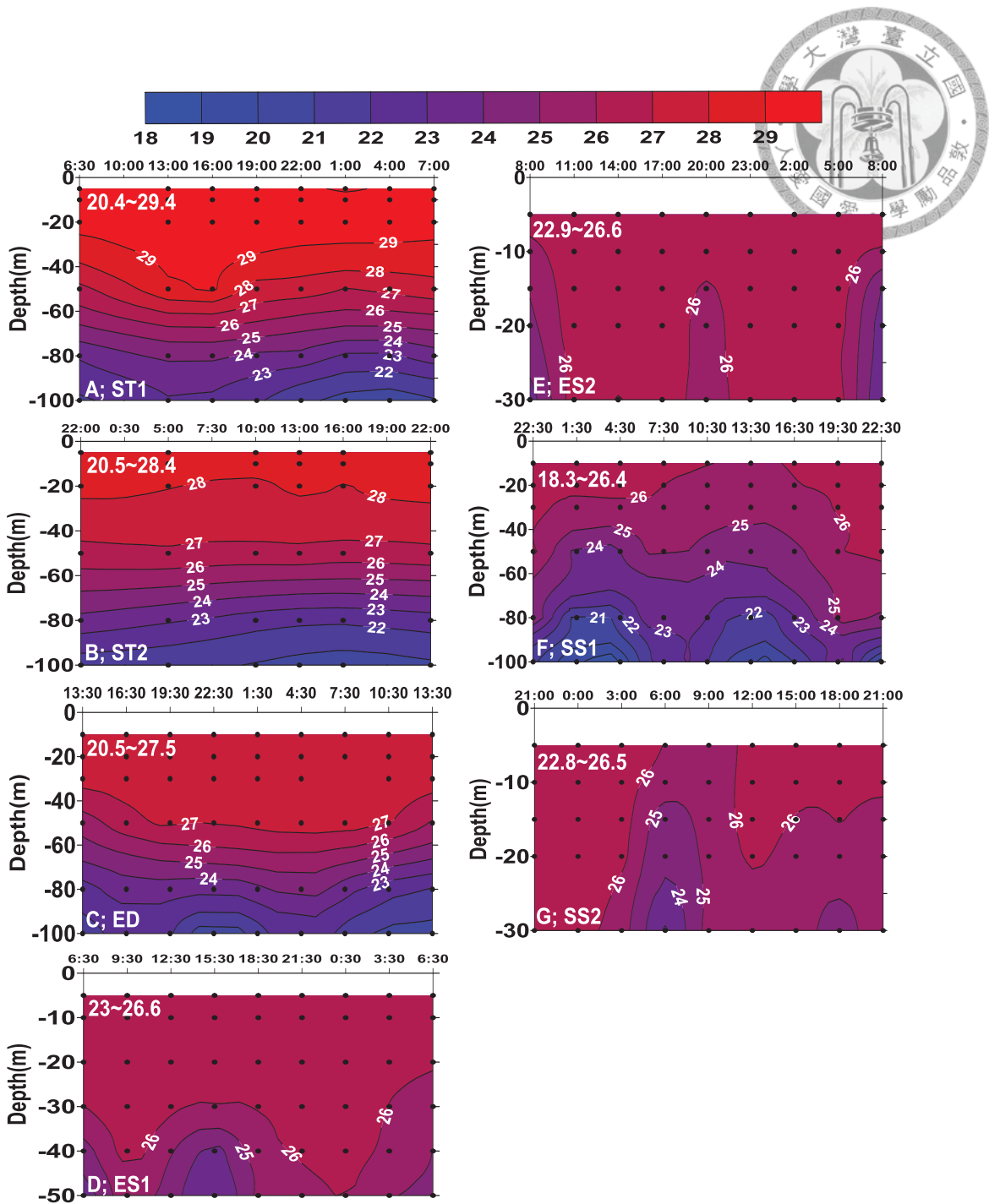


表十：各測站浮游植物生物量表。

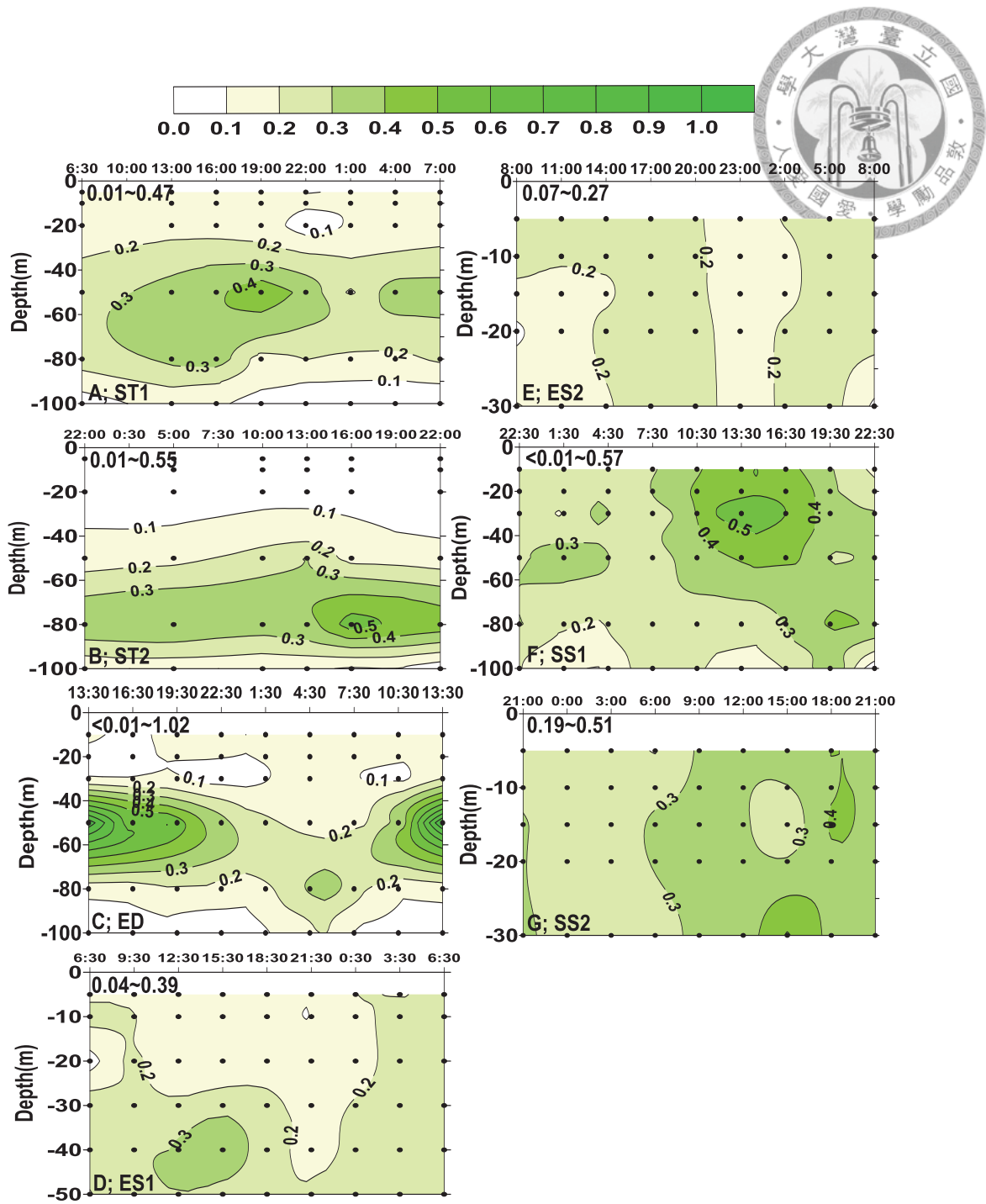
	SEAT-1	SEAT-2	ED	ES1	ES2	SS1	SS2
Carbon content(mgC m ⁻³)	5.23±1.41	5.31±1.64	4.14±1.74	8.90±3.14	9.35±2.77	9.03±3.43	9.71±4.35
<i>Synechococcus</i>	0.91±0.23	1.10±0.17	1.04±0.40	4.45±1.38	4.90±1.37	4.80±2.23	5.77±2.46
<i>Prochlorococcus</i>	3.51±0.89	3.16±0.77	1.62±0.56	1.78±0.54	1.76±0.38	1.32±0.22	1.22±0.45
Picoeukaryotes	0.81±0.30	1.05±0.70	1.49±0.78	2.66±1.22	2.69±1.01	2.91±0.97	2.73±1.44



圖一：本研究地點之地理位置圖。(弱(無)內波影響區 (SEATS-1、SEATS-2)、下沉型內波影響站 (ED)、上舉型內波影響站 (ES1、ES2、SS1、SS2)。



圖二：各站之溫度 (°C) 時序深度變化情形圖。測站縮寫代表為 SEAT-1(A)、SEAT-2(B)、ED(C)、ES1(D)、ES2(E)、SS1(F)及 SS2(G)。



圖三：各站之葉綠素-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) 時序深度變化情形圖。測站縮寫代表為 SEAT-1(A)、SEAT-2(B)、ED(C)、ES1(D)、ES2(E)、SS1(F)及 SS2(G)。

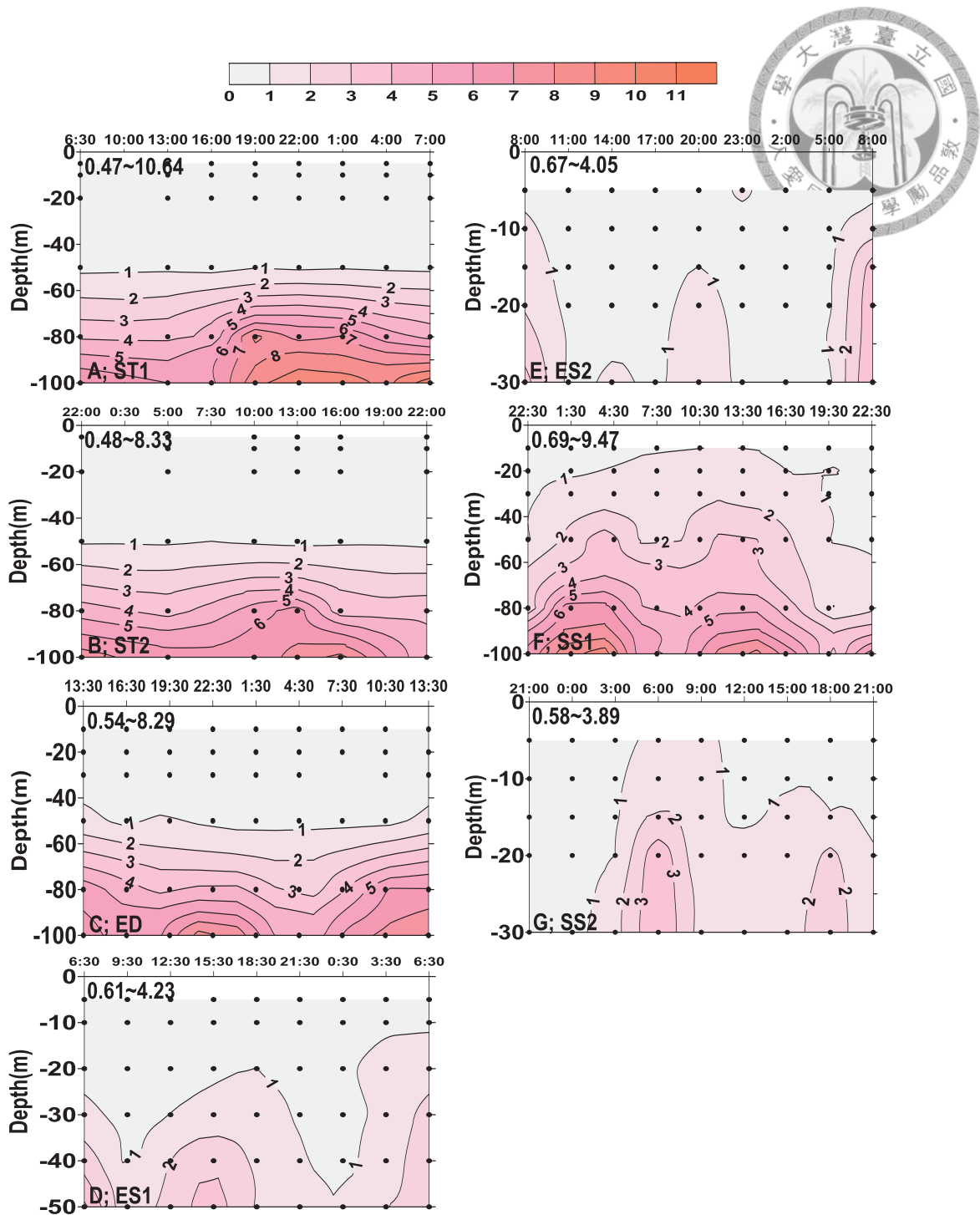


圖 四：各站之硝酸鹽 (μM) 時序深度變化情形圖。測站縮寫代表為 SEAT-1(A)、SEAT-2(B)、ED(C)、ES1(D)、ES2(E)、SS1(F)及 SS2(G)。

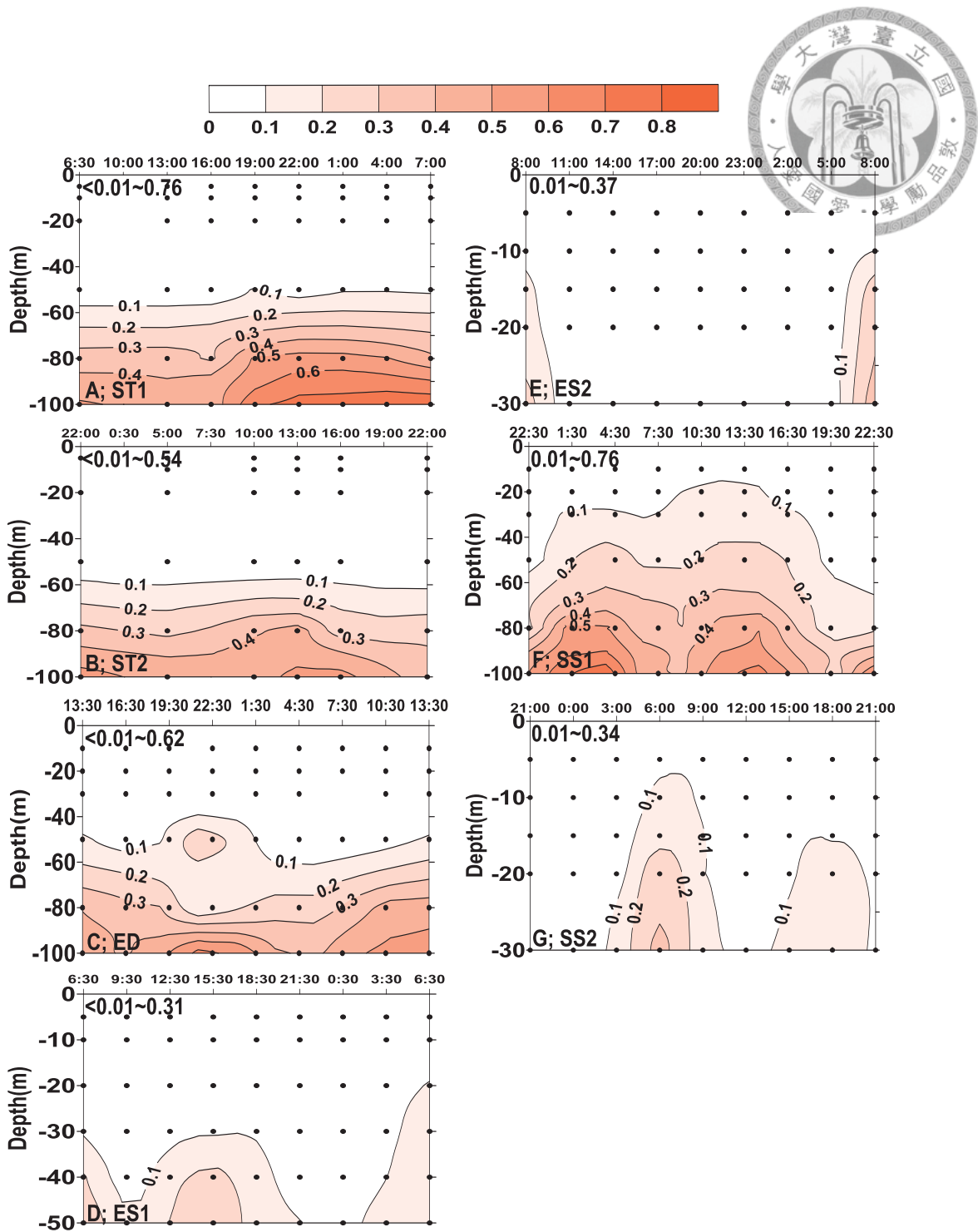
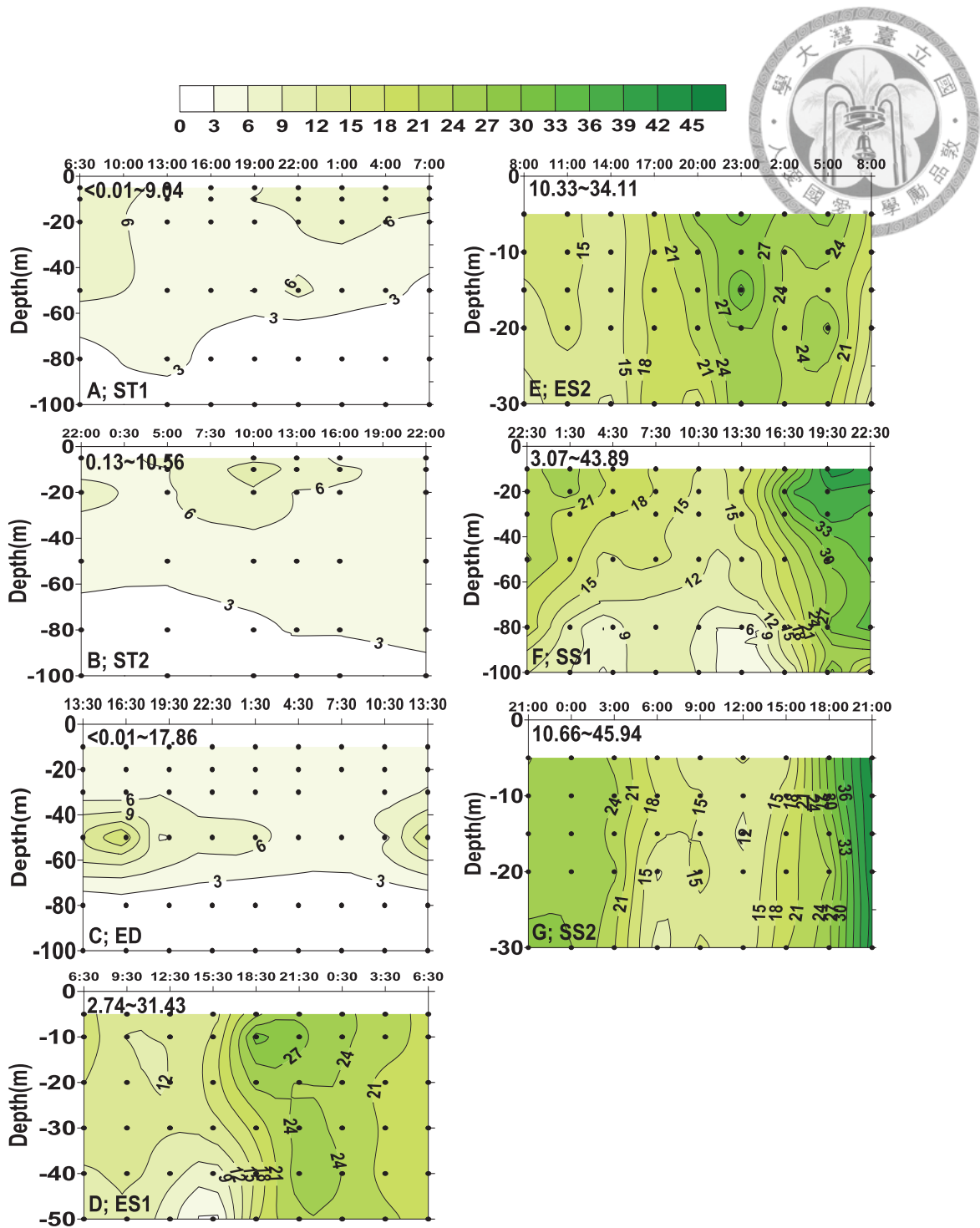
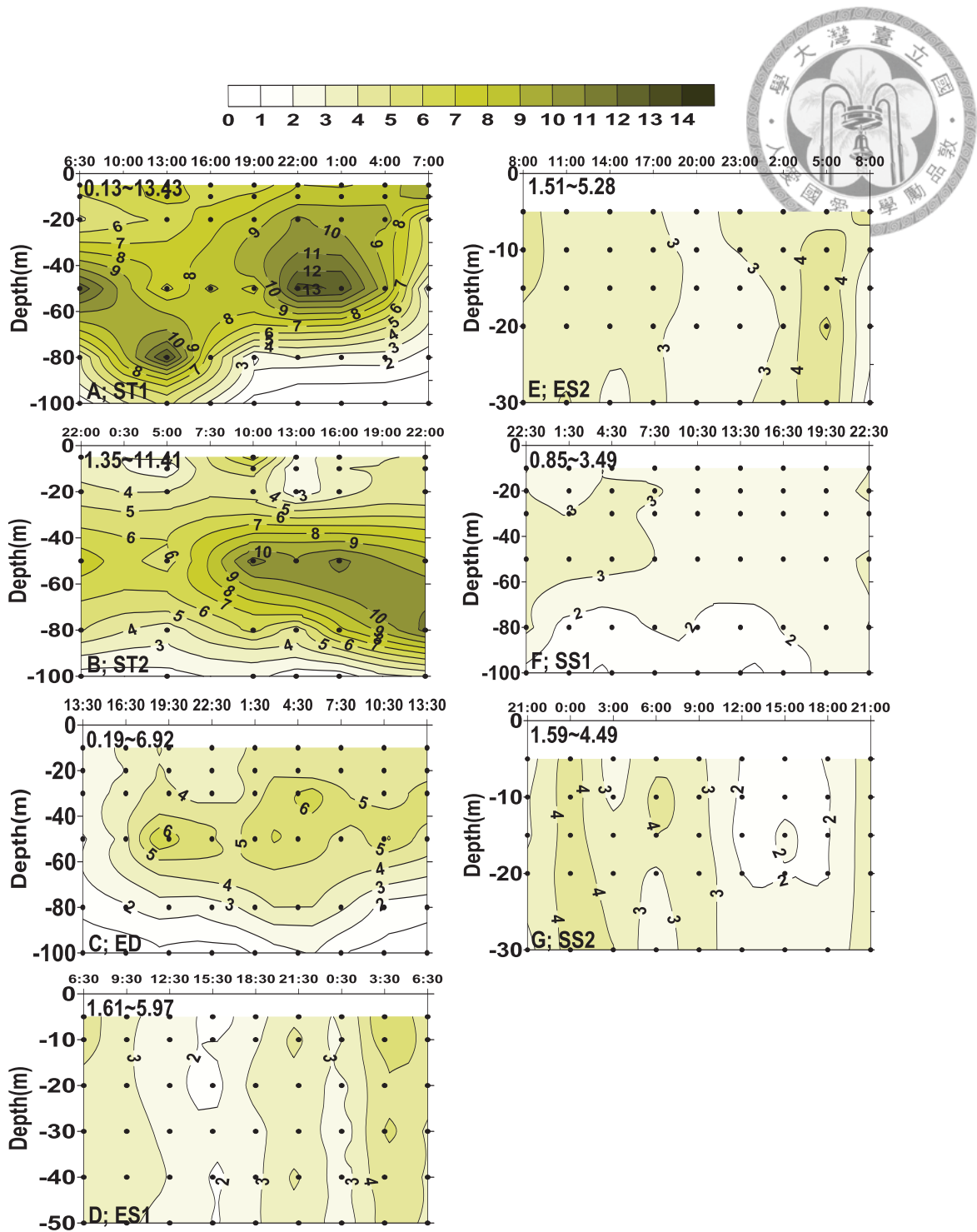


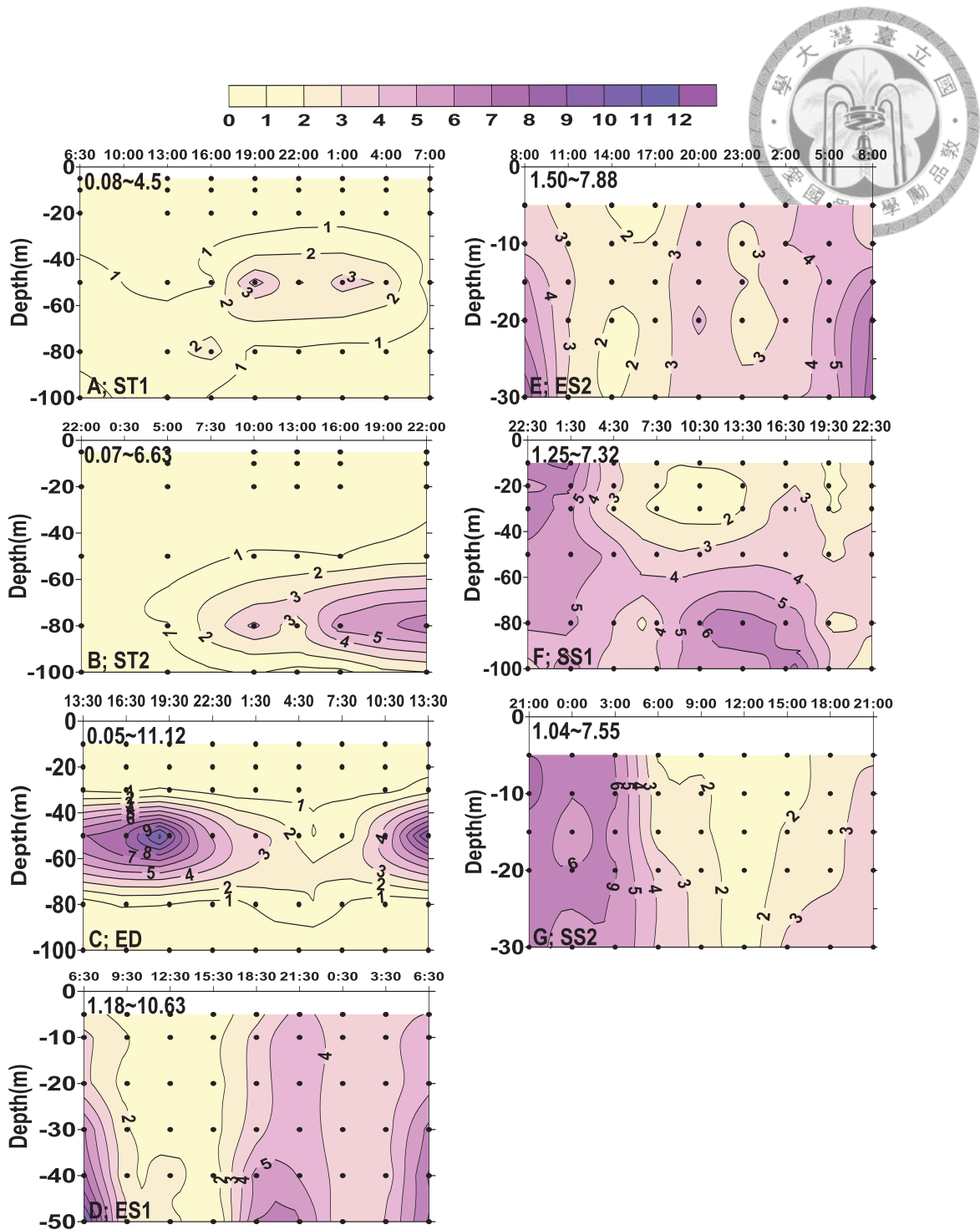
圖 五：各站之磷酸鹽 (μM) 時序深度變化情形圖。測站縮寫代表為 SEAT-1(A)、SEAT-2(B)、ED(C)、ES1(D)、ES2(E)、SS1(F)及 SS2(G)。



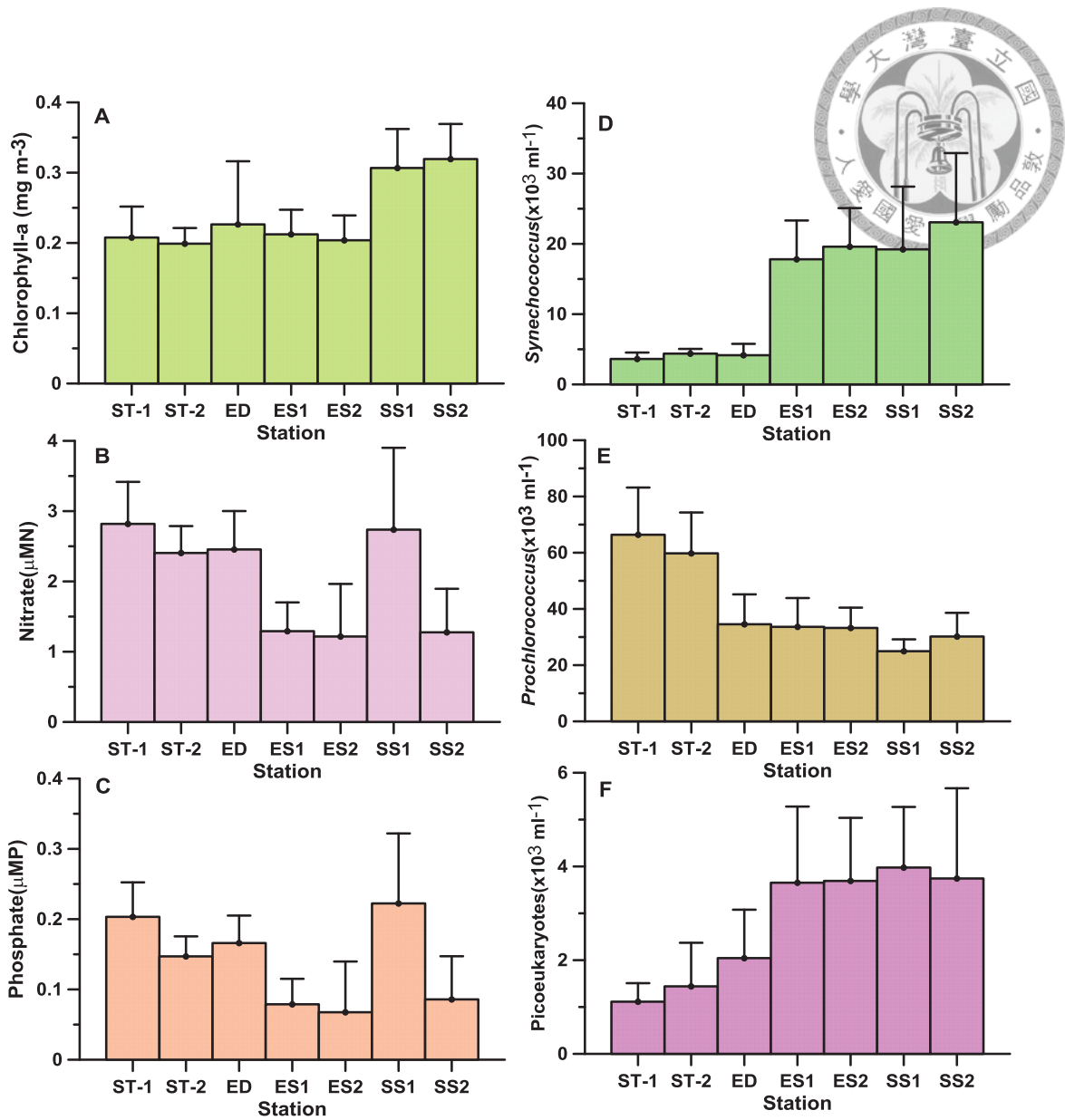
圖六：各站之 *Synechococcus* ($\times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$) 時序深度變化情形圖。測站縮寫代表為 SEAT-1(A)、SEAT-2(B)、ED(C)、ES1(D)、ES2(E)、SS1(F)及 SS2(G)。



圖七：各站之 *Prochlorococcus* ($\times 10^4$ cells ml^{-1}) 時序深度變化情形圖。測站縮寫代表為 SEAT-1(A)、SEAT-2(B)、ED(C)、ES1(D)、ES2(E)、SS1(F)及 SS2(G)。



圖八：各站之 Picoeukaryotes ($\times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$) 時序深度變化情形圖。測站縮寫代表為 SEAT-1(A)、SEAT-2(B)、ED(C)、ES1(D)、ES2(E)、SS1(F)及 SS2(G)。



圖九：各測站參數之深度積分平均值圖。(A;葉綠素-a、B;硝酸鹽、C;磷酸鹽、D;*Synechococcus*、E;*Prochlorococcus*、F; Picoeukaryotes。)

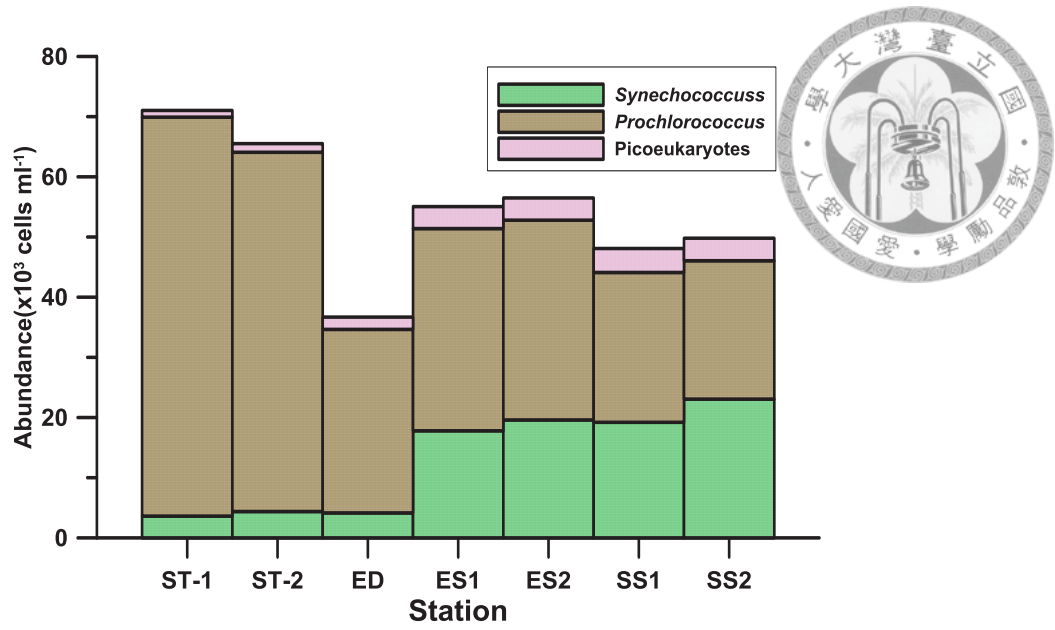


圖 十：各測站浮游植物豐度之深度積分平均圖。

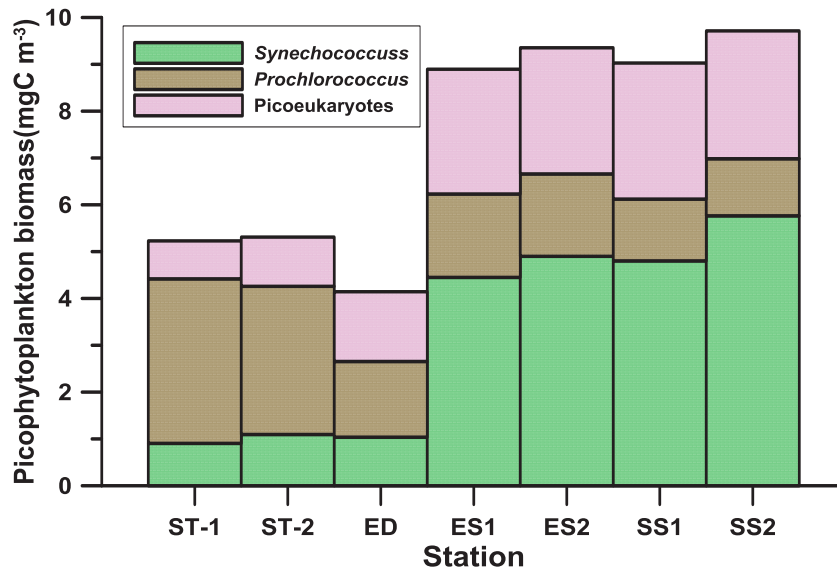


圖 十一：各測站浮游植物生物量之深度積分平均圖。

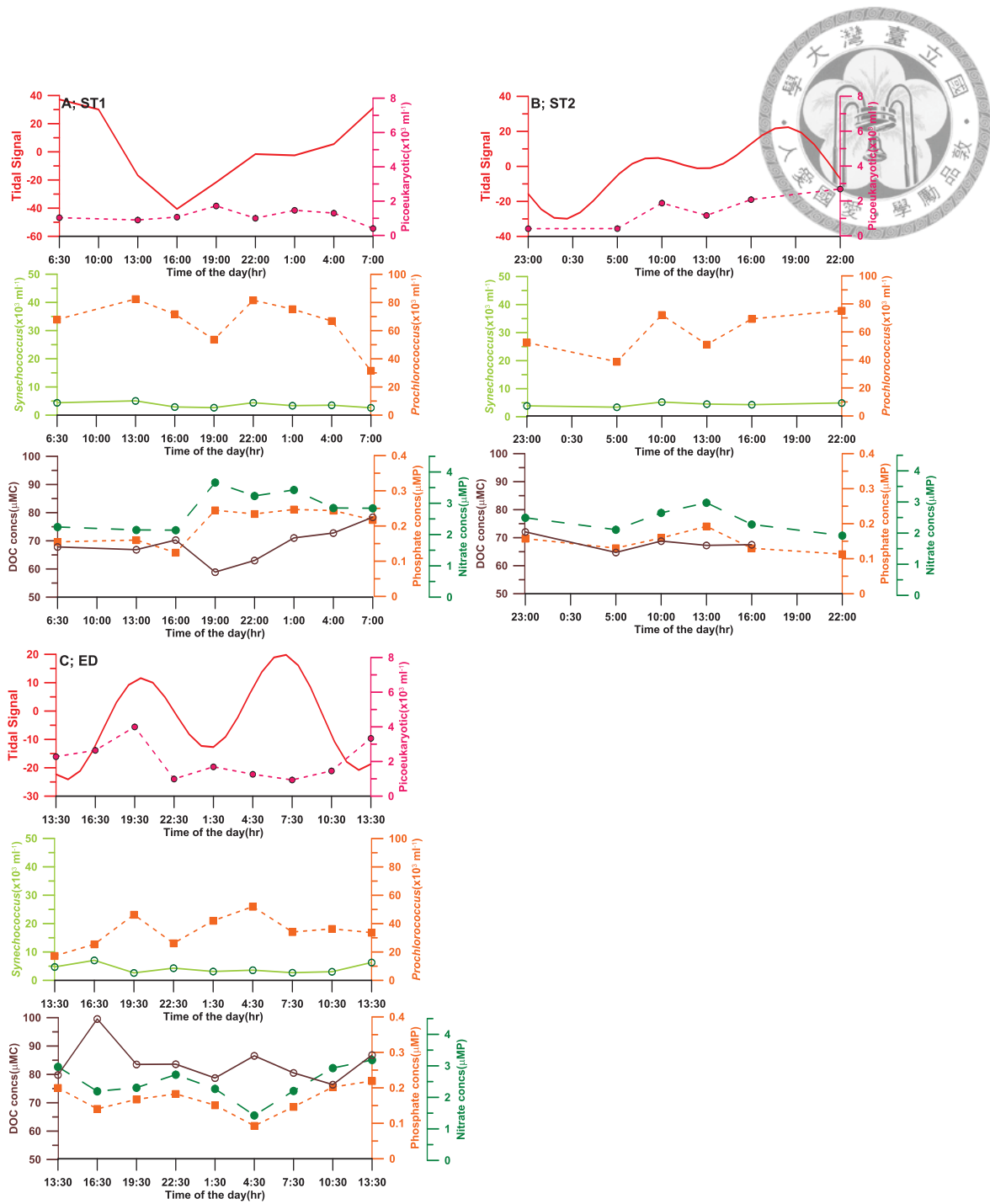


圖 十二：深水站（非上舉型內波影響組）各參數深度積分平均值與潮汐分布情形圖。(A;SEAT-1 夏季航次、B;SEATS-2 春季航次、C;ED 站東沙東部深水區。)

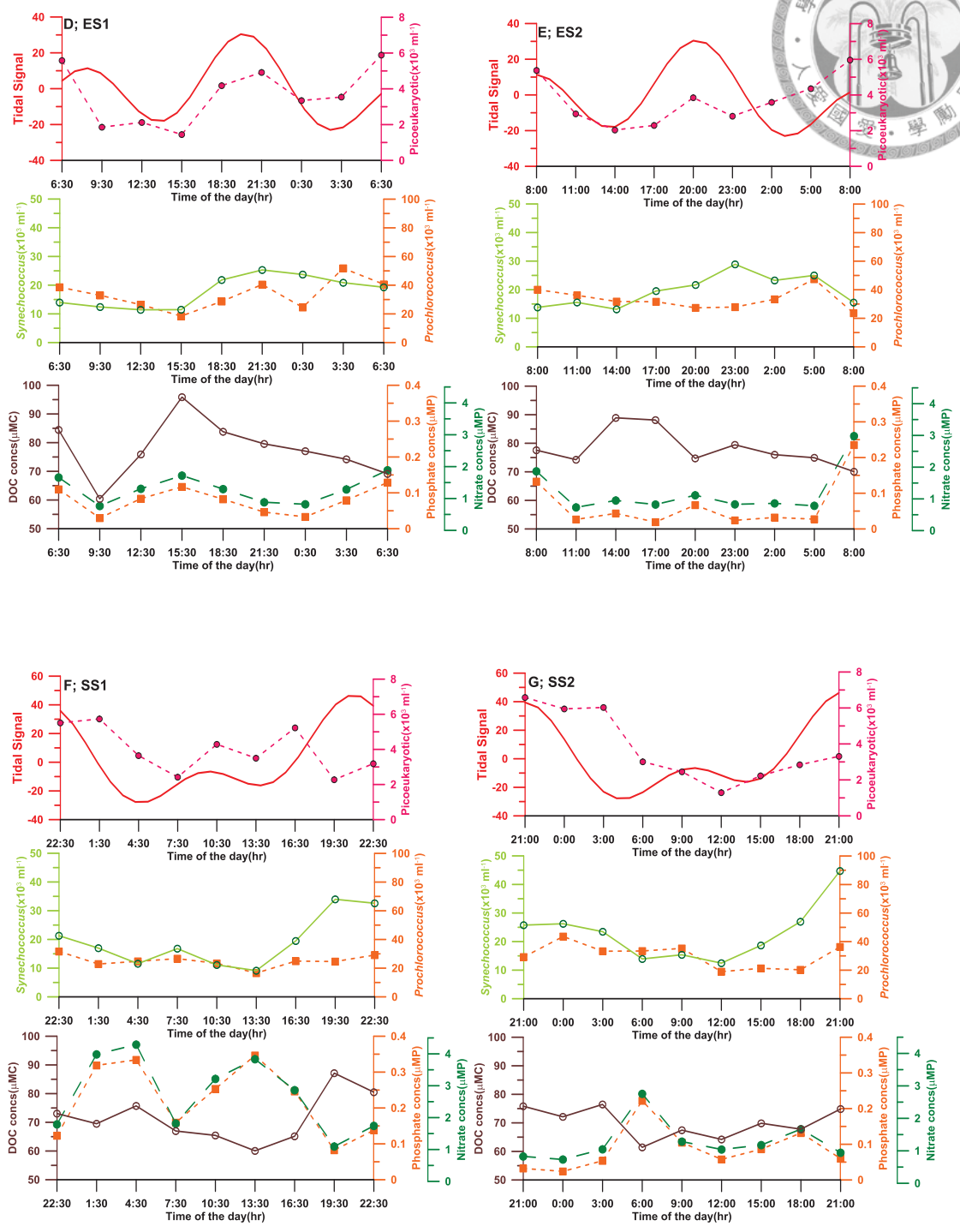
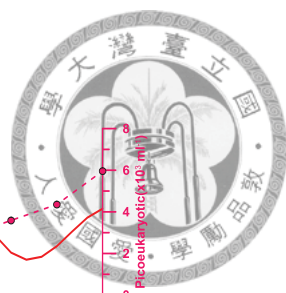
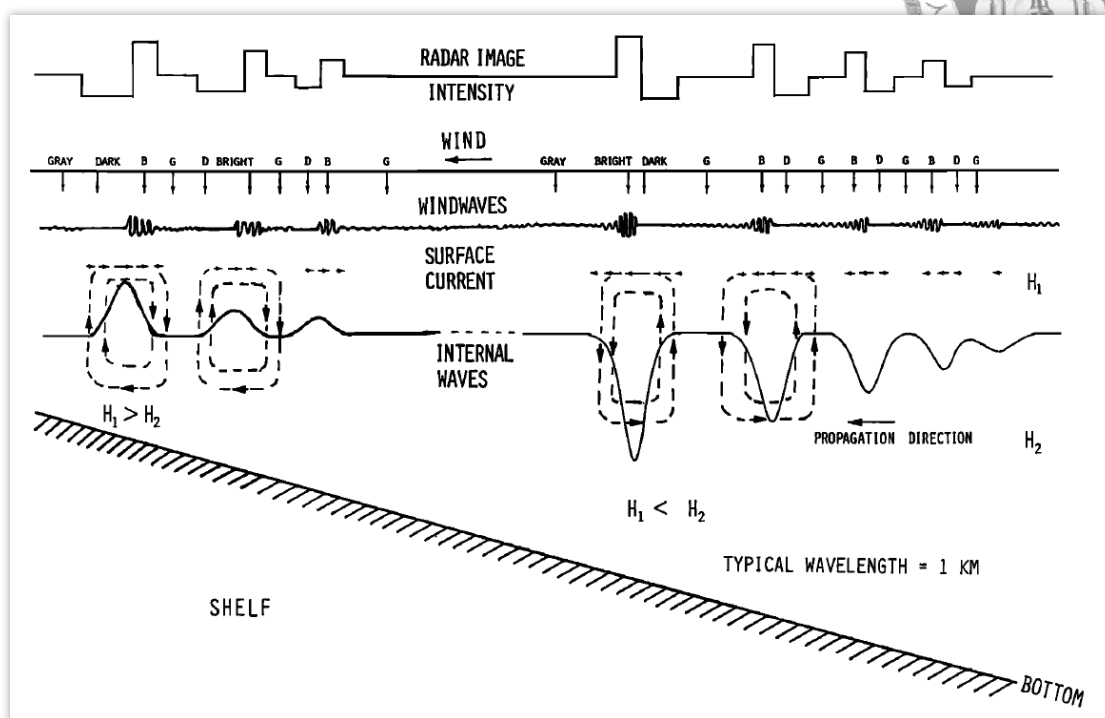
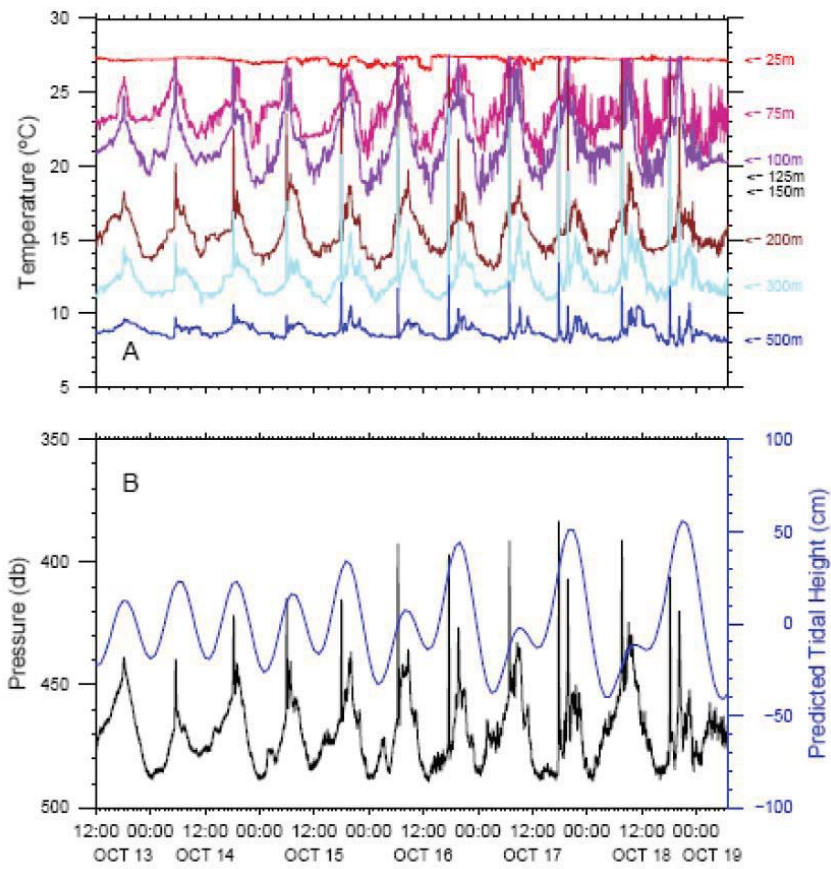
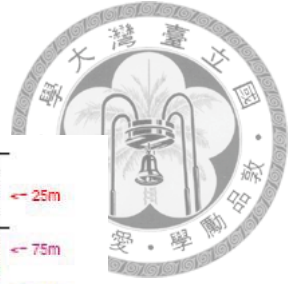


圖 十三：淺水站（上舉型內波影響組）各參數深度積分平均值與潮汐分布情形圖。
 (D;東沙東部 ES1 站、E;東沙東部 ES2 站、F;東沙南部 SS1 站、G;東沙南部 SS2 站。



附錄一：內波由深水區行進至淺水區型態轉變示意圖。(Liu et al., 1998)。
深水區內波介質面上層厚度小於下層厚度 ($H_1 < H_2$)，此時屬沉降型內波，行進於淺水區上層厚度大於下層厚度 ($H_1 > H_2$)，波型轉換成上舉內波。



附錄 二：(A) 錨錠作業與水溫時序深度變化圖。(B) 壓力與潮汐模式圖。

Algal group	Q_c [fg C cell ⁻¹]	Method	Conversion factor	Reference
Prochlorococcus				
	52 ± 19	FSC pulse height: Stratified period euphotic zone	none	This study
	78 ± 19	FSC pulse height: Mixed period	none	This study
	158 ± 27	FSC pulse height: Stratified period sub-euphotic zone	none	This study
	46 to 61	Particulate carbon, P-replete or P-limited axenic strain MED4	none	Bertilsson et al. (2003)
	61	Chlorophyll to carbon	55 g C (gChl a) ⁻¹	Blanchot and Rodier (1996)
	49 ± 9	POC non-axenic cultures, corrected for contaminating bacteria	none	Cailliau et al. (1996)
	53	Volume to carbon, assuming 0.6 μm diameter	470 fg C μm ⁻³	Campbell et al. (1994)
	17 to 38	POC, axenic culture (high irradiance)	none	Claustre et al. (2002)
	54	Volume to carbon (discrete size measurements from FCM)	325 fg C μm ⁻³	Durand et al. 2001
	32 to 72	Volume to carbon, flow cytometry sizing	235 fg C μm ⁻³	Garrison et al. (2000)
	29 ± 11	Volume to carbon, beam attenuation, sorting, impedance	none	Grob et al. (2007)
	6 to 90	TEM X-ray microanalysis of several strains	none	Heldal et al. (2003)
	30	Volume to carbon, microscopy, "Very small red fluorescing cells"	220 fg C μm ⁻³	Ishizaka et al. (1994)
	100	Volume to carbon, flow cytometry sizing	190 fg C μm ⁻³	Landry and Kirchman (2002)
	53 to 59	Volume to carbon, assuming 0.8 μm diameter	220 fg C μm ⁻³	Li et al. (1992)
	61 to 94	Based on P-I estimates for 6 HL isolates	(P ₇₀₀ ^{chl} × 14)/μ	Moore (1997)
	250 ± 56	Based on P-I estimates for 2 LL isolates	(P ₇₀₀ ^{chl} × 14)/μ	Moore (1997)
	15 to 152	Volume to carbon, Coulter and flow cytometry sizing	235 fg C μm ⁻³	Shalapyonok et al. (2001)
	78	Dry weight, based on strain MED4	50% of DW	Shaw (2001)
	92	Consumption of added nitrogen in batch culture	C:N ratio of 6	Veldhuis et al. (1997)
	35	Volume to carbon, size fractionation; PE negative cells	220 fg C μm ⁻³	Veldhuis and Kraay (2004)
	50	Volume to carbon, size fractionation; PE positive cells	220 fg C μm ⁻³	Veldhuis and Kraay (2004)
	29	Volume to carbon, size fractionation	200 fg C μm ⁻³	Zubkov et al. (2000)
	38 to 42	Volume to carbon, Coulter and flow cytometry sizing	240 fg C μm ⁻³	Worden et al. (2004)
Synechococcus				
	250 ± 91	FSC pulse height: Stratified period euphotic zone	none	This study
	305 ± 47	FSC pulse height: Mixed period	none	This study
	434 ± 141	FSC pulse height: Stratified period sub-euphotic zone	none	This study
	92 to 244	Particulate carbon, P-replete or P-limited axenic strain MED4	none	Bertilsson et al. (2003)
	104	Chlorophyll to carbon, volume ratio of Syn:Pro	Syn C = 1.7 × Pro C	Blanchot and Rodier (1996)
	112	Volume to carbon (discrete size measurements from FCM)	325 fg C μm ⁻³	Durand et al. 2001
	250	Volume to carbon, microscopy	250 fg C μm ⁻³	Fuhrman et al. (1989)
	101 to 152	Volume to carbon, flow cytometry sizing	235 fg C μm ⁻³	Garrison et al. (2000)
	60 ± 19	Volume to carbon, beam attenuation, sorting, impedance	none	Grob et al. (2007)
	40 to 550	TEM X-ray microanalysis, 2 strains, various growth media	none	Heldal et al. (2003)
	83	Volume to carbon, microscopy sizing	220 fg C μm ⁻³	Ishizaka et al. (1994)
	250	Particulate carbon	none	Kana and Glibert (1987)
	100	Volume to carbon, flow cytometry sizing	190 fg C μm ⁻³	Landry and Kirchman (2002)
	49 to 274	Volume to carbon, Coulter and flow cytometry sizing	235 fg C μm ⁻³	Shalapyonok et al. (2001)
	175	Nutrient consumption in culture	C:N ratio of 6	Veldhuis et al. (1997)
	59 to 78	Volume to carbon, Coulter and flow cytometry sizing	230 fg C μm ⁻³	Worden et al. (2004)
Picoeukaryotes				
	2587 ± 554	FSC pulse height: Stratified period euphotic zone	none	This study
	2301 ± 735	FSC pulse height: Mixed period	none	This study
	2732 ± 661	FSC pulse height: Stratified period sub-euphotic zone	none	This study
	3110	Volume to carbon, assuming 3.0 μm diameter	220 fg C μm ⁻³	Blanchot and Rodier (1996)
	3980 ± 732	Volume to carbon, microscopy	220 fg C μm ⁻³	Fuhrman et al. (1989)
	1011	Volume to carbon, assuming 1.5 μm diameter	0.94(log V) - 0.60	Garrison et al. (2000)
	730 ± 226	Volume to carbon, beam attenuation, sorting, impedance	none	Grob et al. (2007)
	436	Volume to carbon, microscopy, red fluorescing	220 fg C μm ⁻³	Ishizaka et al. (1994)
	1836	Volume to carbon, microscopy, orange fluorescing	220 fg C μm ⁻³	Ishizaka et al. (1994)
	1800 to 3000	Volume to carbon, size fractionation	220 fg C μm ⁻³	Veldhuis et al. (1997)
	162 to 488	Volume to carbon, Coulter and flow cytometry sizing	238 fg C μm ⁻³	Worden et al. (2004)

附錄 三: 相關文獻生物量整理表。(Casey et al., 2013 ; Table 1)