

小生物大貢獻

中山大學海洋科學系 洪慶章

一、浮游植物-海洋食物鏈的磐石

台灣一年四季有不同的海鮮，大家也知道海洋的食物鏈是大魚吃小魚，小魚吃更小的魚蝦，而這些小魚蝦是吃更小的浮游動物，而浮游動物就捕食肉眼看不見的單細胞浮游植物。那海洋裡要有多少浮游植物才能支撐數以億噸的魚類？隨便到海邊用雙手撈海水，裡面就有數百隻以上的浮游植物，海洋裡這些數不盡的浮游植物是如何建立此龐大帝國？她們靠何物質來傳承生命？並供應給全球的海洋生物，她們主要是仰賴陽光、營養鹽、適當的水溫及穩定的水體，就會讓浮游植物生生不息並大量繁衍，因此稱浮游植物是海洋食物鏈的磐石，絕對是無庸置疑。浮游植物除了提供了人類生養活命的泉源外，還有一項很大的貢獻，就是她們會影響地球的氣候。

二、海洋的吸碳機制

從工業革命以來，人們過度使用石化燃料與砍伐森林，使溫室氣體不斷在大氣層中累積，造成全球暖化，使得海平面上升與冰帽面積縮減，導致全球氣候變遷與異常的氣候。科學界雖有不同的看法，但事實是大氣中溫室氣體的濃度不斷升高，而這一連串事件的主角之一就是「碳」。目前全球大多數的國家都致力於「減碳」，希望能為地球盡一份世界公民的責任。而臺灣是一個四面環海的國家，「減碳」除了自身做起之外，這裏要與大家分享的是開闊的大海是如何透過肉眼看不見的小生命來減碳與儲碳。

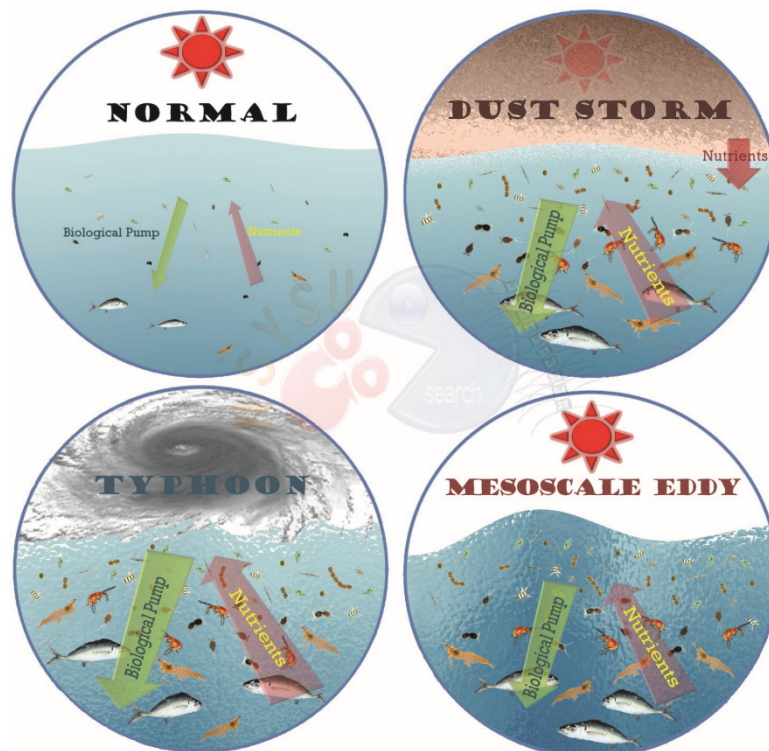
在海洋有光層中（海表面到 150±30 米左右），單細胞浮游植物利用溶於表層海水的二氧化碳與營養鹽來進行光合作用，將無機的二氧化碳轉變為碳水化合物（海洋學家通稱為顆粒有機碳），就會降低海水中二氧化碳的分壓，導致更多大氣中的二氧化碳在海水中溶解，這些顆粒碳被帶離有光層，會因重力慢慢下沉至深海（有光

層以下）被儲存，稱為「生物幫浦」（biological pump，也稱為顆粒有機碳輸出通量），雖然這些被帶至深海儲藏的有機碳最終也會被分解成溶解性無機碳或有機碳，但深層海水的循環與流動非常慢，加上深海停留時間較長，因此這些被帶至深層海洋的碳要約五百年後才能再回到大氣中[1]。除了透過「生物幫浦」減碳外，另一「物理幫浦」也可以協助把大氣中的二氧化碳透過海氣交換溶解到海水，再透過低溫水的下沉作用，將二氧化碳帶至深海，這主要是發生在較寒冷的極區海域，總計海洋透過「生物幫浦」及「物理幫浦」兩項作用，扮演減碳大功臣的角色，約能吸收地球的總碳排放量 1/4~1/3[1]。

「生物幫浦」的“電力”那裡來？海洋浮游植物行光合作用需要光照、營養鹽及適當的水溫。但在夏日的表層海洋（50 米以淺的海水），光照適合但水溫有一些高，在冬季因海水垂直混合被帶至有光層的營養鹽在春末夏初時就被大量消耗，雖然有部分的營養鹽可以透過再循環利用，但遠遠不夠浮游植物生長需要，水體藻類稀少，海水更加透明，宛如海洋沙漠，因此營養鹽就成為浮游植物生長的重要限制因素之一。

三、大自然對營養鹽的供應機制

夏季的台灣東部西太平洋與南海海域表水相當溫暖，此時的海水層化明顯，寡營養的高溫水（密度小）分布在上層（50~100 米），富營養的低溫水（密度大）留在有光層底部，夏季的浮游植物此時嗷嗷待哺。除了上述冬天有大量營養鹽被攪動帶至有光層外，大自然也會在不同季節或海域補充營養鹽，如春季的沙塵暴(dust storm)、夏天的颱風(typhoon)、中尺度的渦流(mesoscale eddy，指半徑 100~200 公里的渦流)、內波(internal waves)及某些藻類的固氮作用都是可以把新的營養鹽帶至有光層供藻類使用（圖一）。



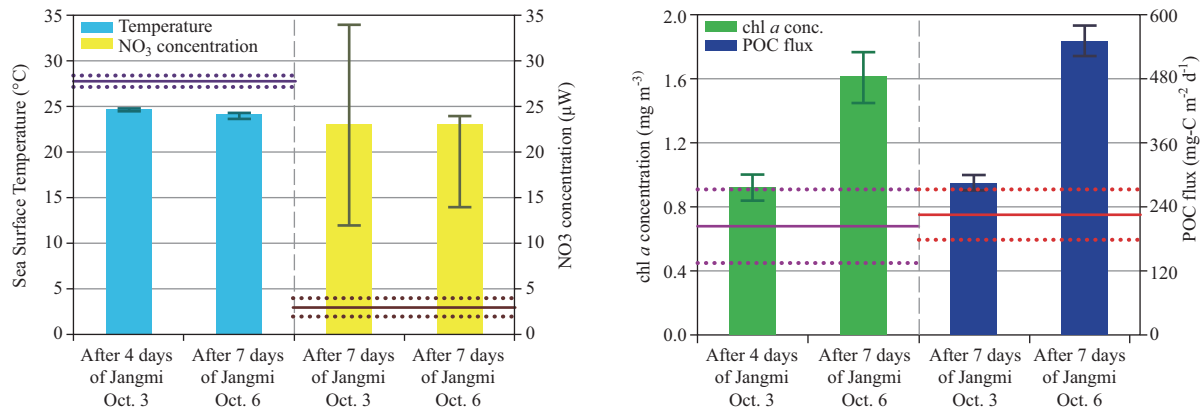
圖一 四種海洋的營養鹽供應及生物幫浦的示意圖。營養鹽的箭頭越大指供應量越大，生物幫浦的箭頭越大指顆粒有機碳輸出越多。以颱風為例，強風與巨浪擾動平靜的海洋，使深層營養鹽被載送至有光層，颱風過後浮游植物得到豐富的營養鹽而大量繁殖，一周以後浮游動物也會大量繁衍，而颱風過後所引發的海洋生物大繁衍持續大約 2 個星期以上，海洋餌料生物會吸引魚類前來覓食，海洋生物幫浦也因此大大增加，會降低空氣中二氧化碳的濃度（Normal：平靜的海洋；Dust Storm：沙塵暴影響下的海洋；Typhoon：颱風影響下的海洋；Mesoscale Eddy：中尺度渦流影響下的海洋）

雖然科學家經常藉由衛星得到表面冷水的降溫程度、降溫面積與海洋水色來研究浮游植物大範圍的時空變化，首先估計海水可能傳送多少營養鹽至表水來供藻類使用，進而用不同光譜來推測表層海水浮游植物濃度（以葉綠素來表示）的數據，藉以推論上述自然現象（如沙塵暴、颱風、渦流）在某海域是否有誘發浮游植物增生現象？然而衛星推導的葉綠素數據並不容易證實其真偽。因為衛星看到的海水葉綠素濃是反應下述狀況：(1)營養鹽增加導致了藻類的增生；(2)海洋的懸浮顆粒也會造成葉綠素的反應；(3)海水中有色溶解有機物(colored dissolved organic matter)的干擾。而這些衛星資料大都缺乏現場海上觀測資料，無法充分證實上述自然現象對海洋植浮的真實影響，更遑論要測量浮游生物所固定的碳有多少會被帶至深海？因為衛星表

面的數據與整個水層的積分值並不是成線性關係，只能靠實際出海來蒐集這些自然現象發生前後的水文數據、營養鹽、葉綠素、藻類固碳量、顆粒有機碳輸出通量等，才能比較了解其對海洋的真實影響與更後端的生物地球化學（簡稱生地化）衝擊。這就好比在飯前與飯後多少時間內，需要實際測量一個人的血糖數據，才能瞭解攝食物種（糖類、蛋白質、脂肪）差異對血糖的影響。

四、颱風過後的吸碳作用

我們的研究團隊想了解沙塵暴及颱風對海洋生地化的衝擊，從 2007 年開始，我們搭乘海研二號研究船在東海南部及西北太平洋海域進行沙塵暴或颱風事件前後的海上觀測，歷經數個沙塵暴的大風大浪及大陸傳來的高 PM2.5，也趁颱風陸上警報未發布前，收集鳳凰(Fengwong)、



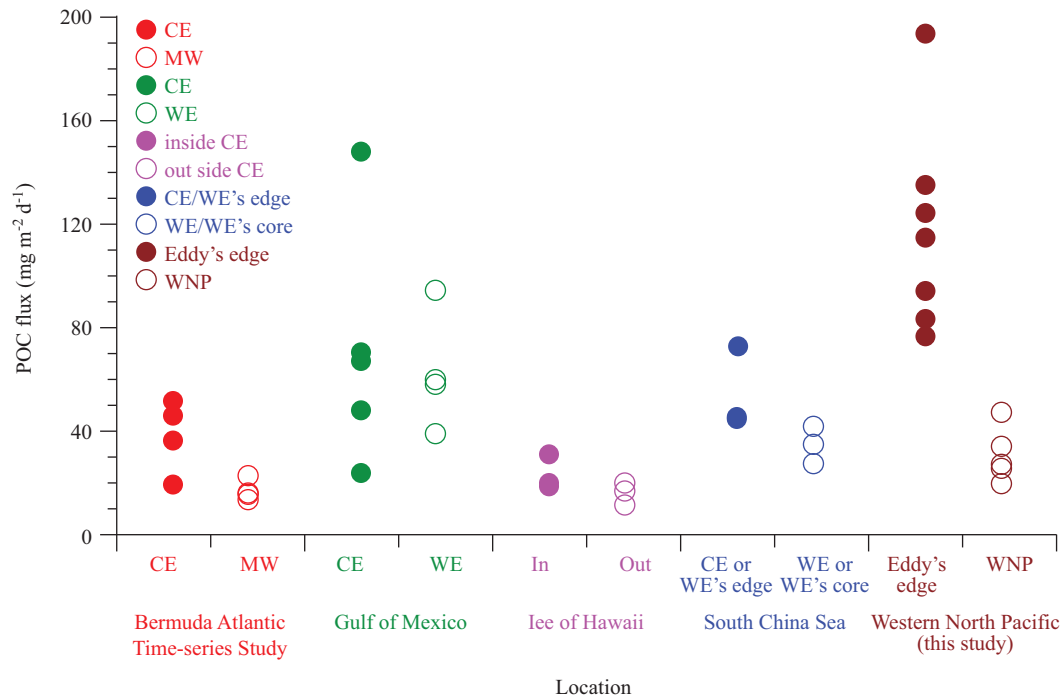
圖二 (左圖) Jangmi 颱風擾動海洋，使深層營養鹽(NO₃)被載送至有光層，此時浮游植物得到額外的營養補給而大量繁殖，(右圖) 海洋生物幫浦(POC flux)比颱風前大大增加了三倍(Shih *et al.*, 2013)

辛勒克(Sinlaku)、薔蜜(Jangmi)、莫拉克(Morakot)等颱風來襲前或離開後的海上資料及使用沉積物收集器收集下沉的海洋顆粒碳。我們發現颱風通過東海南部後，表層水體至少降溫 2-3°C，而從次表層被帶至有光層的營養鹽比非颱風時期增加數倍[2]。狂風擾動海洋，使深層營養鹽被載送至有光層，此時浮游植物得到額外的營養補給而大量繁殖(圖二)，海水中的浮游植物主要族群由台風前的束毛藻與渦鞭毛藻，慢慢轉為羽狀矽藻，最後再由中心型矽藻(如角毛藻)稱霸，一公升海水中高達 17 萬隻角毛藻[3]。此時的表層浮游動物數量在颱風過後數天也開始爬升，所引發的基礎海洋生物大繁衍持續大約 2 個星期以上，排放的浮游動物糞粒(屬於顆粒有機碳)也快速上升，海洋生固碳量(又稱基礎生產率)與海洋「生物幫浦」(也就是顆粒有機碳輸出通量)雙雙增加。海洋「生物幫浦」比颱風前大大增加了三倍[4]，這作用也會大量釋放新鮮的氧氣，更能將碳帶至有光層以下儲存。然而在開闊的西北太平洋海域，颱風引發的海洋「生物幫浦」比平常要高出 1.6 倍以上，但其效應竟然比沙塵暴還小(圖三)[5]，這可能與採樣的季節及研究海域有關，因為颱風是在夏季而沙塵暴是在春季，另一個可能原因是颱風過後的採樣時間點與該海域的流場可能也會影響到「生物幫浦」的輸出量，這有待以後的研究來揭曉。簡言之，我們的研究顯示強烈颱風過後會海洋生產力(固碳作用)會被提升約 1.5 倍，這種海洋生產力

增加的現象也在南海開闊海域被報導[6]。而颱風造成的「生物幫浦」會比同海域的平常值增加至少三倍以上[4]，至於颱風對大氣二氧化碳究竟是碳源(carbon source)或碳匯(carbon sink)則是相當具有挑戰性的難題，因為缺乏颱風通過海域時的現場二氧化碳海氣交換通量，雖可以用海上浮標作定點的觀測，但整體面積的碳源或碳匯資料是不容易取得，因為陸上颱風警報期間是不容許出海的，此時生活在海洋中的浮游植物、浮游動物及魚、蝦而言，卻是酷夏的「盛宴」。因此當颱風警報發佈時，人們忙著準備防颱；海洋中的浮游生物則是摸拳擦掌，準備在颱風過後就啟動大規模的食物製造鏈，供餐給其他海洋生物，並同時進行吸碳任務。

五、非颱風期間的生物幫浦

前面提到在極端的天氣(如颱風或沙塵暴)是屬於短周期(數天到二周以上)，那非颱風時期的夏天營養鹽又從何來？海洋平常可以把碳送至光透層以下的深海儲存嗎？中尺度的渦流(mesoscale eddy)是可能答案之一，渦流範圍很大(半徑高達 200 公里以上)且是逐波而流，其自然的特性有極難掌握的憾恨，加上其出現海域有時橫跨鄰國的經濟海域，遂增加了渦流相關研究的困難度。有鑑於此，我們的研究團隊特於北太平洋西側(western North Pacific, WNP)開放性大洋的副熱帶寡營養鹽海域，展開了透光層底部測量「生物幫浦」的實驗工程，結果研究數據



圖四 中尺度渦流在世界不同海域的比較。其中北太平洋西側(WNP)有較高的 POC flux，主要顆粒成分為較大型藻類矽藻的殘骸及動物浮游的糞粒 (Shih *et al.*, 2015)

顯示：暖渦(warm eddy)邊緣的「生物幫浦」，明顯高於北太平洋西側貧營養鹽海域的參考測站。另於 2010 年 6 及 7 月，在北太平洋西側的相似海域，亦仔細觀察到了渦流邊緣（包含 WE 及 CE、cold eddy、冷渦）測站中富含較高的營養鹽濃度及高基礎生產力。透過電子顯微鏡影像掃描顯示結果，證明出這些高「生物幫浦」測站，組成的主要顆粒泰半為較大型藻類的殘骸（如：矽藻）及動物浮游的糞粒。此結果顯示在 WNP 的渦流邊緣，大自然提供了相對較高營養鹽輸入至有光層的優質機制，加諸穩定的水團，使得較大型的藻類適合生長，並反向刺激了透光層中的生地化循環，產生了較高的「生物幫浦」（圖四）[7]。

六、結論與未來展望

颱風對人類是會造成威脅的，卻也為環境帶來新契機。風來與風去，其中的大利與大弊，在數字會說話的狀況下被發掘出來了。其癥結點就在風浪將營養鹽傳送到海洋表面的寶貴流程，數量大的營養鹽翻飛，讓這些生活在酷夏貧營養海域的藻類有如久旱逢甘霖，颱風提供微細藻大量繁殖的絕佳養分與降溫，轉過頭來微細藻以吸收

更多碳來回報大海，形成美好之良性循環。這些海上的實際觀測，提供了科學家在未來探討使用地球工程減碳的最佳範例。

過去科學家在南大洋的「鐵肥實驗」觀測到加鐵後海洋葉綠素濃度與基礎生產率增加，但「生物幫浦」卻沒有增加，使原先寄望用最便宜的海洋減碳研究者及決策者的信心大減，主要原因就是海洋生物固碳幾乎在有光層就被消耗殆盡，因為較大型的矽藻與動浮糞粒甚少被帶至有光層[8]。然而極區海域並不代表所有的海洋均有類似的反應，最近科學家的人工湧升流實驗也經模式或海上實測證實只要讓次表層海水的營養鹽提升至有光層，微細藻就會大量繁殖並固碳[9-10]，但後續的「生物幫浦」與相關觀測需要深入研究，才能從大自然中（如颱風）學以致用。期望未來將海洋科學知識與工程技術結合，為大自然減碳盡一份心力。

致謝

本研究感謝科技部海洋學門的經費支持與海研二、三號協助海上的採樣。也感謝龔國慶、周文臣、鍾至青老師與學生及助理的鼎力支持。

參考文獻

- [1] Sabine C.L. *et al.* (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305, 367, doi: 10.1126/science.1097403.
- [2] Hung, C.-C. *et al.* (2010) The effect of typhoon on particulate organic carbon flux in the southern East China Sea. *Biogeosciences*, 7, 3007-3018.
- [3] Chung, C.-C., G.-C. Gong and C.-C. Hung (2012) Effect of Typhoon Morakot on microphytoplankton population dynamics in the subtropical Northwest Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 448, 39-49.
- [4] Shih, Y.-Y. *et al.* (2013) Field observations of changes in SST, chlorophyll and POC flux in the southern East China Sea before and after the passage of Typhoon Jangmi. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 24(5), 899-910.
- [5] Chen, K.-S. *et al.* (2013) Enhanced POC export in the oligotrophic northwest Pacific Ocean after extreme weather events. *Geophysical Research Letters*, 40(21), 5728-5734.
- [6] Lin, I.-I. *et al.*, (2003) New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 13, 1718, doi:10.1029/2003GL017141, 2003.
- [7] Shih, Y.-Y., C.-C. Hung, G.-C. Gong, W.-C. Chung, Y.-H. Wang, I.-H. Lee, K.-S. Chen and C.-Y. Ho (2015) Enhanced Particulate Organic Carbon Export at Eddy Edges in the Oligotrophic Western North Pacific Ocean. *PLoS ONE*, 10(7): e0131538. doi:10.1371/journal.pone.0131538.
- [8] Buesseler, K.O. and P. W. Boyd (2003) Will ocean fertilization work? *Science*. 330, 67-68.
- [9] Pan, Y., W. Fan, T.-H. Huang, S.-L. Wang and C.T.A. Chen (2015) Evaluation of the sinks and sources of atmospheric CO₂ by artificial upwelling. *Science of the Total Environment*. 511, 692-702.
- [10] Zhang, D., W. Fan, J. Yang, Y. Pan, Y. Chen, H. Huang and J. Chen (2016) Reviews of power supply and environmental energy conversions for artificial upwelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 56, 659-668..