

知識天地

海洋生物地球化學與全球環境變遷

何東垣副研究員（環境變遷研究中心）

摘要

臺灣是一個海島，不論由氣候、生態、及環境變遷的角度來審視，臺灣都深受海洋影響，海洋科學研究對臺灣人民生活的重要性，不言而喻。然而，臺灣在海洋科學的發展起步相當晚，相關師資不足，學校自然科學教學對於海洋學著墨有限，因此絕大多數人對海洋學認識亦相對有限，藉此機會，以科普語調及簡單的舉例來簡介海洋生物地球化學及個人研究內容。若對相關主題有興趣，可進一步參見我們實驗室的科普網站：<http://www.rceec.sinica.edu.tw/~tyho/lab/popscience.htm>。

海洋科學的內涵（The Feature of Oceanography）

海洋學並不僅是在研究海裏的生物，物質及能量的循環過程及機制才是海洋科學的核心問題！我們以碳的循環為例來說明物質循環過程及海洋科學所具有獨特的多學科本質。目前地球最嚴重的環境問題之一為大氣二氧化碳大量增加所造成的全球增溫問題，大氣二氧化碳濃度的逐年增加主要是由於人類過度燃燒石化燃料所造成，二氧化碳由於分子光譜吸收的特性，是控制地表溫度最重要的溫室效應氣體之一；而調節大氣二氧化碳循環最重要因素之一就是光合作用，海洋中的浮游植物所占有的光合作用量約為全球光合作用量的一半，此外，浮游植物生長及其變動十分快速，控制其變動的最重要因素之一為其限制性營養鹽的供應速率，而影響這些限制性營養鹽的供應速率的因素卻又與氣候、海水及洋流的變動息息相關。地球自轉及公轉帶來光照及溫度的日夜及季節性的規律變化，這周而復始的規律變化同時也控制了海洋水溫及光照強度的時間變化，加上地球的球形形狀及其偏轉角度影響，不同海域表面溫度及光照強度在同一天或同一季的變化十分巨大，表水溫度的變化進一步決定了水的密度，由於密度的差異，如上層水的密度高於或低於下層水的密度，形成水的垂直移動或分層現象，密度差異所造成的移動便成為驅動溫鹽環流（Thermalhaline circulation）的力量；此外，大氣氣壓由日照及表水溫度變化所造成的風將引起表層海洋的風吹流（Wind-driven circulation），也是大氣循環及表層海水循環的主要驅動力之一（如季風、颱風）。風又影響了表面海水的流動（如黑潮）及水體中物質的混合，如黑潮深水的營養物質可因物理混合作用或地形變化而被傳送或湧升至表層水中，這一表水與深水的混合正是造成營養物質輸入表層海水的主要途徑，如宜蘭基隆外海的魚場，正是具有營養物質較深層黑潮水抬升至有光層的結果，造成浮游生物的大量生長並將傳遞至食物鏈較高階的生物。由上可知，物質在海洋中的循環和生物地球化學及物理及大氣循環等作用緊密相連，大氣中的二氧化碳經由浮游植物光合作用吸收轉換成有機物及碳酸鈣殼體，這些有機物質及生物殼體大部分會在海洋中循環，有一小部分將沉降轉移至深海或海底沉積物中，當這些有機碳及無機碳生物性顆粒被傳送入海底後，要重見天日（回到表面海洋），就要等到深海海水循環至表層海洋（約500-1000年）或甚至更長時間尺度的地質作用或是火山爆發了。由以上的例子可知，研究海洋物質循環過程的機制與生物、化學、物理、地球科學中各領域的知識環環相扣。此外，海洋中物質的循環也將影響全球環境變動及氣候變化。因此，海洋學是在探索全球尺度物質及能量循環的問題！鯨（魚）雖然大，對於全球物質循環的影響卻比浮游生物小很多；浮游生物雖然小，卻生養眾多、變動快速，是海洋生物地球化學家的最愛！

海洋生物地球化學（Marine Biogeochemistry）

海洋中生物體內組成物質在海洋中的循環是透過生物的生長及分解作用、海洋物理作用的傳送、地球化學反應、地質活動等等作用的連結而在海洋中、海洋與大氣的介面、及海洋及沉積物的介面中循環進行；研究這些生命相關化學物質透過以上這些反應及作用在海洋中的循環，正是海洋生物地球化學的研究主題。因此，海洋生物地球化學的兩大主角分別是浮游生物及其所需的營養物質及其供應條件，浮游生物需要這些營養物質才得以生

長，海洋中生物的營養物質卻又源自於浮游生物體的吸收及分解作用後的循環，他們相互依賴的關係不僅支持了生命的永續並且讓物質得以生生不息的在地球及海洋中循環。

浮游植物透過光合作用將二氧化碳及其他相關營養物質轉換成有機物以取得能量；除了二氧化碳，浮游植物還需要種種維持生命、進行繁殖或新陳代謝反應所需的養分吸收，例如蛋白質需要氮的吸收，DNA或RNA需要磷的吸收，諸多酵素還需要各種微量金屬元素的吸收。當所有必要的營養元素供應充足時，其繁殖複製速度將無比的快速，例如矽藻的分裂速度可高達每日一至二次。海洋中的二氧化碳（以碳酸氫根為主）的濃度及供應相對於其他生物所必要的主要營養物質高很多，很少成為浮游植物生長的限制因子；氮（硝酸根為主）及磷（磷酸根為主），不僅是浮游植物體內必要的主要元素，供應量相對於浮游植物體內需求量相對不足，因此最容易成為浮游植物生長的限制因子，因而成為限制浮游植物生長最主要的營養物質。目前所知海洋的三大限制性營養物質為氮、磷、鐵。簡單的說，如果你把這三種生物可利用的元素倒入表面海水裡，海洋中藻類就會長得滿山滿谷，也將有大量的二氧化碳受到光合作用轉換成有機物，由大氣傳遞至海洋。

這些浮游植物所需的營養鹽除了透過內部循環供應之外，還可以透過各式外來路徑進入海洋，可以透過大氣傳輸而沉降於海洋表面，例如火山爆發的火山灰、沙塵暴所帶來的岩石性顆粒、人為活動所產生的懸浮微粒（圖1）；此外，營養物質也可透過河水及地下水輸入至海洋中。在開放性海洋，藻類大部分利用內部循環的營養物質來生長，一小部份利用外來的營養鹽生長，因此大部分由光合作用產生的有機物質將在表層海洋來回的循環，僅有一小部分物質將輸入沉降至深海。這些外來的限制性的營養物質，主要為生物可用的氮、磷及必要微量金屬元素，將決定海洋中的新生產力。相對於內部循環營養鹽所產生的再生產力，新生產力是表示外來限制性營養鹽經光合作用所促進生成的有機物產量，如果表層海洋中的有機物質量保持相當穩定，這輸出的量將等於新生產力。這看起來不是很大的輸出量乘以海洋的面積及相對長的時間後，將可以成為一個十分巨大的量！

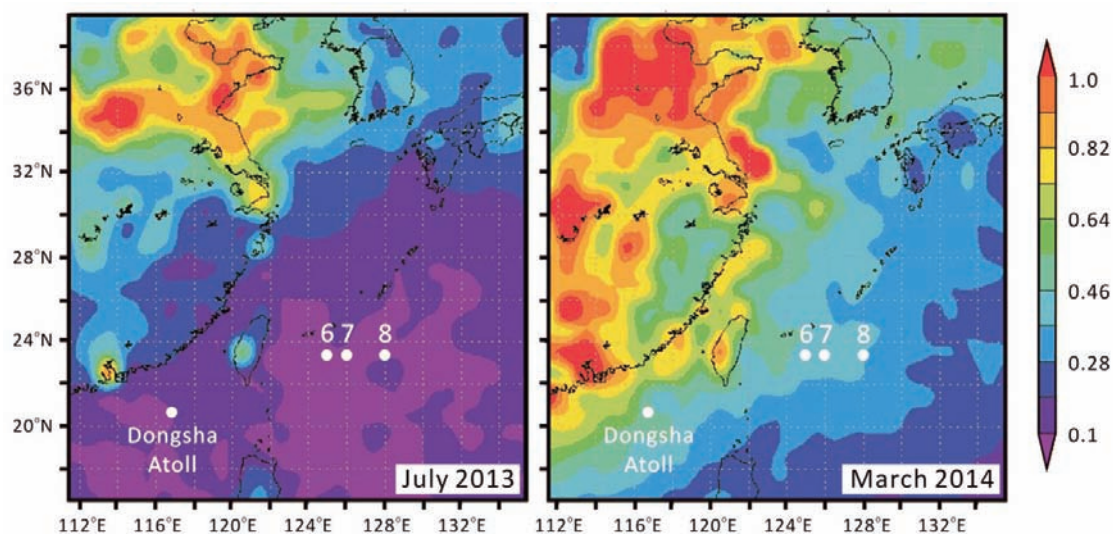


圖1. 臺灣週邊海域不同季節大氣氣膠相對濃度比較（王博賢及何東垣 MODIS 衛星資料），色溫較高表示氣膠濃度較高，冬季及春季由於東北季風傳送大量的人為活動及岩石性氣膠至西北太平洋，顯現極高濃度。我們實驗室在以上兩個季節利用研究船至西菲律賓海（6, 7, 8站）進行氣膠、海水、海水中懸浮及沉降顆粒採樣，探索人為活動及岩石性氣膠沉降對於微量元素的循環及海洋生物地球化學的影響。

浮游植物可簡單分成原核浮游植物及真核浮游植物，由於原核及真核浮游植物在演化上起源的時間有先後之別，個別經歷了極為不同的環境生存條件，不同的浮游植物對於各種主要及微量營養物質的需求具有重大的差異，了解不同浮游植物的分布及其背後的控制因素，對於物質在海洋及地球上的循環十分重要，這也是我的一項研究主題。以矽藻為例，因其生長速度快，體積相對較大較重，在營養鹽供應充足的環境，可以快速的生長，死亡之後也比較快沉降至較深的海水中，受細菌分解後的營養物質便有較高比例會存在於較深的海中。隨著生態及

環境因子不斷變動，浮游植物為適應環境變動來生存，同時也能改變自身的適應能力及環境條件。由於環境因子和浮游植物的生態區位是互動而且是動態的，自然環境條件將難以長時間維持有利於單一物種的穩定平衡狀態，優勢物種隨時間的演替或改變將是必然的，將形成全球海洋不同環境下個別浮游植物族群各有其所佔領的山頭。

微量金屬生物地球化學 (Trace Metal Biogeochemistry)

由於生物體內許多關鍵的生化反應是由酶（酵素）在催化進行，其活化區多由金屬擔任必要的輔助因子，當生物缺乏這些特定金屬的吸收，生物的生長及繁殖將受到限制。現在我們知道全世界的海洋有約三分之一的區域的浮游植物的生長主要是受到鐵供應的限制，這些海域中的主要營養鹽（如氮、磷）的濃度相當高，但是浮游植物卻長得相當少。約在25年前，美國的海洋學家John Martin發現把鐵添加在這些高營養鹽低葉綠素的海域中（HNLC: High nutrient low chlorophyll），藻類則長得滿山滿谷。根據藻類體內的元素組成，提供一個原子的鐵至HNLC區域，浮游植物便可以固定10,000個原子的碳，南極洋的HNLC海域極為廣大，主要營養鹽濃度極高，John Martin據此計算，把相當量的鐵加入這南極洋HNLC海域，利用充足的主要營養鹽進行光合作用，將大氣中的二氧化碳轉化成有機碳並存留至海洋之中，大氣中的二氧化碳的含量將有可能下降至冰河時期時的濃度！此外，從南極或是格陵蘭的冰柱記錄發現，冰河時期時的沙塵及鐵對海洋的供應量遠高於間冰期的濃度及供應量，支持鐵在海洋的供應量影響了大氣二氧化碳濃度的因果關係，這就是鼎鼎有名的鐵假說！可是物質在海洋的循環可沒那麼簡單，例如光合作用在表層海洋所形成的有機碳究竟有多少可以沉降至深海並得以埋藏？但無論如何，鐵假說顯示了物質在海洋中循環對於全球氣候及環境變遷的重要性。相關的科普介紹可參見以下文章（<http://igtplus.wsm.ks.edu.tw/assets/documents/873/original/d41d8cd98f00b204e9800998ecf8427e.pdf?1392101618>）。

我個人的研究主題即為海洋微量金屬的生物地球化學，著重於探索微量金屬元素在海洋的循環過程及與浮游植物的互動關係。個人近年來的一個研究主題為了解鎳及其他金屬在浮游植物體內超氧化物歧化酶（SOD:superoxide dismutase）表現及與環境條件間的互動。直至今日為止，海洋學家對於微量金屬元素如何調控海洋浮游植物的生長了解有限，其中一個原因為這些微量元素在海洋中的濃度十分的低，溶解態的濃度低至nano至pico molar，其中溶解態的物種型態又受到各式有機螯合物的鍵結。海洋學家對其物種型態是否為浮游植物可利用、以及微量金屬元素如何調控浮游植物的族群結構，了解更是有限。此外，海洋浮游植物千奇百怪，例如矽藻竟然可以利用鎳來作為碳酸酐酶（carbonic anhydrase）的輔因子金屬。過去五年來，國際上也因而成立一個大型的海洋科學計畫（GEOTRACES，<http://www.geotraces.org/>），著重於了解全球海洋中微量元素及同位素海洋中的分布。臺灣是主要的參與國家之一，GEOTRACES研究也是我們實驗室的一項主要研究計畫（圖2）。就如同摘要所言，臺灣是一個海島，不論由氣候、生態、及環境變遷的角度來審視，臺灣都深受海洋影響，海洋科學研究對臺灣人民生活的重要性，不言而喻。期盼有志莘莘學子，一起投入臺灣海洋科學研究！

後語：

人類利用石化燃料建立現代文明，事後卻又發現，原來大氣中的二氧化碳在過去幾十萬年內都在180到280 ppm內相當規律的來回震盪，但我們竟在短短兩百年內，將其濃度提高到400 ppm，並且難以停下來，導致全球增溫、海洋酸化、氣候及環境巨變。人類真的無所不能嗎？我們對地球運作的法則到底了解多少？我們究竟有多少信心能預測地球未來的環境變動？地球環境可以像操控車子一樣，要前進就前進、要倒車就倒車嗎？還是如同鐵達尼號，將來不及退車，再也回不到那個原來的地球？

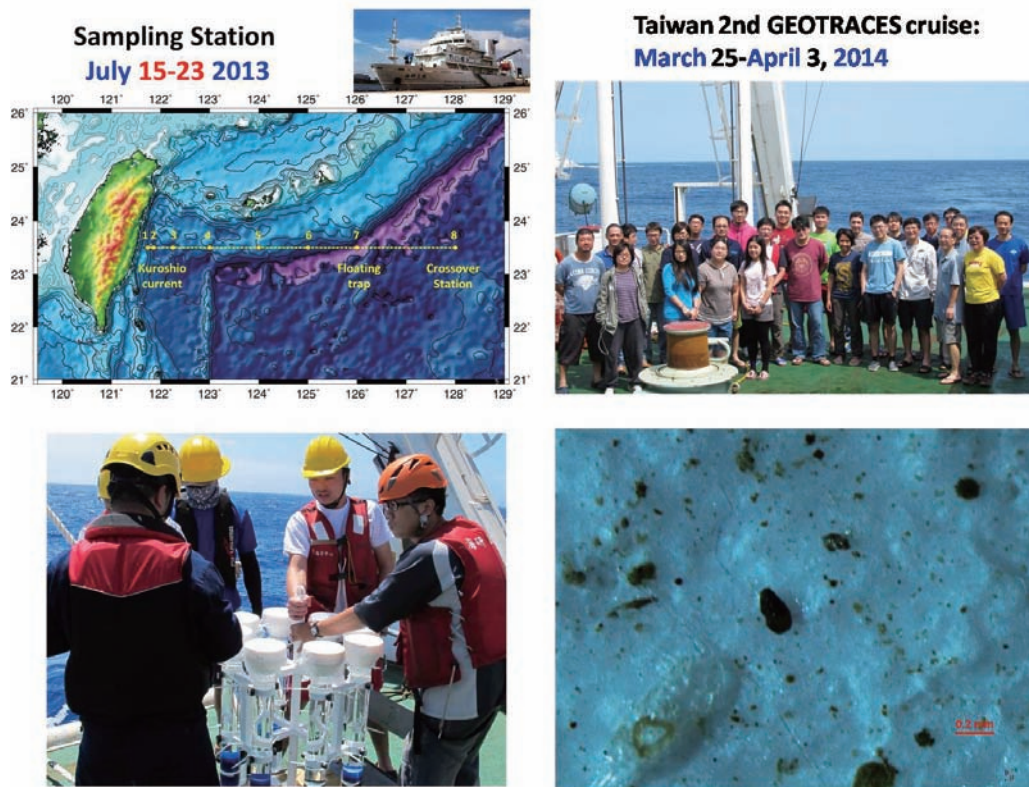


圖2. 臺灣GEOTRACES航次剪影。海洋研究大不易！不僅需要研究船遠赴採樣地點，還需各式特殊採樣設備及人力支援，挑戰更大的採樣工作經常受到天候極大的影響。左上角為採樣站，右上角為參與研究及技術人員；左下角為預備施放海水沉降顆粒採樣器；右下角為所採得的沉降顆粒。這些顆粒為生物碎屑、浮游動物糞粒等有機物質，透過浮游植物光合作用及食物鏈的傳遞，大氣中的二氧化碳因而傳遞至深海及海底，稱為生物幫浦（Biological pump），了解調控生物幫浦的機制及速度為海洋生物地球化學的重要課題之一。