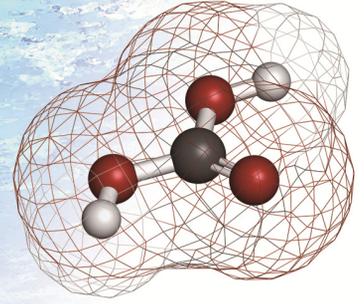


海洋酸化對於海洋固氮生物— 束毛藻之複合效應



荏家續、何源興摘譯

水產試驗所東部海洋生物研究中心

大氣、海洋和陸地是地球上的三大碳儲存庫，碳可透過各種作用與形式在三大儲存庫之間相互流通。大氣中的碳可直接溶解於海洋或自海洋逸散，或是經由海洋浮游植物的光合作用與呼吸作用，即所謂的「生物幫浦」(biological pump) 方式，在大氣與海洋之間移動。碳進入海洋生物體後所形成的有機碳可再溶解於海水而後逸散回大氣或沉降至深海，甚至被永久埋藏於沉積物中。

2017 年 4 月的 Science 期刊，登載了中國廈門大學、美國佛羅里達州立大學與普林斯頓大學合作團隊有關海洋固氮生物 *Trichodesmium* spp. 的研究發現。*Trichodesmium* 是一種具有固氮能力的藍綠菌，屬於絲狀的單細胞群體形態，由於聚集成束，因此稱之為「束毛藻」(如圖)。通常存在於熱帶或亞熱帶大洋的表層，在印度洋、墨西哥灣流以及臺灣周邊的西太平洋、南海及黑潮等貧營養鹽水層均有大量分布。在海洋環境中，能行固氮作用與光合作用之束毛藻對海洋生態系之基礎生產力頗為重要。

CO₂ 略溶於水，人為所排放的 CO₂ 中，約 1/3 為海水所吸收。CO₂ 溶解後形成碳酸 (H₂CO₃)，其解離過程中釋出氫離子 (H⁺) 導



束毛藻 (*Trichodesmium*) 的藻華現象
(圖片引自維基百科 Wikimedia Commons CC-BY-SA-3.0 User: Wexcan)

致海水 pH 值下降的現象稱為「海洋酸化」(ocean acidification)。據資料顯示，從工業革命以來，海洋表層海水的 pH 值已經下降了 0.1，而在海洋仍然不斷的吸收 CO₂ 的情況下，未來仍將持續酸化。因此，海洋酸化之相關議題已成為國際海洋科學研究的重要課題。

近年來國際上有許多關於海洋酸化對束毛藻的生長與固氮作用影響之研究，但結果卻眾說紛紜，有些研究顯示海水酸化將抑制束毛藻之固氮、光合作用與生長，有些則認為海水酸化可產生促進作用。有鑑於束毛藻是寡營養鹽海洋中最主要固氮生物之生態地位，廈門大學史大林 (Dalin Shi) 教授領導的團隊於是回顧過往文獻，分別在實驗室與野外進行系統性的實驗複製、創新設計與分析。

微量金屬 (trace metal) 是影響束毛藻固氮作用和生長之重要限制因子，其中以鐵 (Fe) 的影響最大。過去有關海洋酸化促進束毛藻固氮作用之試驗，均是使用富含營養鹽之人工海水培養液。史大林等人複製過去文獻的實驗方法，以不同的實驗組合並區隔海洋酸化過程中 CO₂ 上升和 pH 下降之影響，另加入可螯合金屬之乙二胺四乙酸 (Ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA)，以寡營養鹽的天然海水為培養液展開研究。實驗結果推論，人工海水培養液當中充足之微量金屬，以及實驗過程中銨鹽 (NH₄⁺) 污染這兩項因素，應該是造成當 CO₂ 上升和 pH 下降時，增進束毛藻固氮作用和生長的原因。

此外，CO₂ 本身是光合作用原料，實驗結果也顯示，當濃度增加時，會增強碳濃縮機制 (carbon-concentrating mechanisms, CCMs) 而有利於核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶 (Rubisco) 固碳作用，進而有利於束毛藻之生長。另，CO₂ 濃度增加，可節省原本用於碳濃縮的部分能量，重新配置能量於其他生理功能，包括提高固氮效率。

同樣地，CO₂ 濃度的增加雖然有利於束毛藻的碳固定，卻也會降低海水 pH 值，束

毛藻細胞內 pH 值會隨著海水 pH 值之下降而下降，因而必須耗損能量以維持細胞內 pH 恆定 (pH homeostasis) 及生理功能。

整體而言，本項研究發現，CO₂ 升高對束毛藻固氮之促進作用低於海水 pH 下降對其之抑制作用！所以海洋酸化的淨效應實為抑制束毛藻之固氮作用！而且由於固氮酶的合成和能量產生過程皆需要鐵，該負面效應會隨著海水中鐵濃度之下降而惡化。

本項研究也發現，如果鐵充足時，海水酸化造成的負面效應將會稍微和緩，惟大部分海洋表層透光區對束毛藻而言皆為鐵限制 (Fe-limited) 之供應不足狀態。束毛藻據估計可貢獻高達 50% 全球海洋總固氮量，在海洋基礎生產力中扮演著舉足輕重的角色。海水持續酸化的結果可能會降低海洋中新氮 (註) 的供應，進而透過食物鏈對海洋生態系或漁業資源造成不可預知的影響，也可能會對全球氣候調適造成衝擊。我們還不確定是否其他種固氮生物也會受到相同之影響，如果答案是肯定的，其影響可能更不容小覷。

註：

以氮鹽來源之不同，可將氮鹽概分為兩類：

1. 再生性氮鹽：是指有光區內經食物鏈循環，可被再利用的氮鹽，如氨、尿素等。
2. 新氮鹽：自有光區以外的水體帶入有光區內的氮鹽，來源可能有：(1)湧升流；(2)河流注入；(3)大氣輸入氮氣至有光區表水層，再被某些浮游生物如 *Trichodesmium* 行固氮作用利用之。

本文主要參考自：

H. Hong, R. Shen, F. Zhang, Z. Wen, S. Chang, W. Lin, S. A. Kranz, Y. Luo, S. Kao, F. M. M. Morel and D. Shi (2017) The complex effects of ocean acidification on the prominent N₂-fixing cyanobacterium *Trichodesmium*. *Science*, 356 (6337): 527-531.