

有機碳之外：在人煙罕至的潟湖中追尋碳循環的十年探索

—研究背後的故事（Behind the Paper）

臺灣海洋大學 周文臣

每一篇科學論文，都早在動筆之前便已開始。我們的故事，始於一片與所有人預期截然不同的潟湖海草床。原本看似典型的藍碳生態系，卻挑戰了我們對大氣二氧化碳調控機制的理解，也開啟了一段長達十年的探索旅程，最終促成了這篇發表於《Communications Earth & Environment》的 Perspective (<https://www.nature.com/articles/s43247-026-03805-4>)。

第一次站在東沙環礁淺海海草床上，我被眼前的景象深深吸引。清澈透明的海水、茂密搖曳的海草，以及潔白耀眼的珊瑚砂，共同構成一幅宛如熱帶天堂的景色。身為一名化學海洋學研究者，我來到東沙，是想研究一個教科書般的藍碳生態系。和許多研究者一樣，我相信海草透過光合作用吸收大氣中的 CO_2 ，再將有機碳埋藏於沉積物中，因此成為重要的天然碳匯。這似乎是一個再簡單不過、也早已有答案的故事。

東沙內潟湖夕照



然而，東沙卻有自己的劇本。

2015 年第一次野外調查時，我們比較了兩處相距僅數公里的海草床。一處直接

面向外海；另一處則隱匿於相對封閉、平靜的內瀉湖。結果立刻引起我們的注意。瀉湖中的 CO₂ 濃度始終遠低於外海，同時具有更高的 pH 值以及顯著較高的總鹼度（Total Alkalinity）。起初，我們欣喜若狂，以為自己發現了一片生產力特別旺盛的海草床。但興奮很快轉變成疑惑。

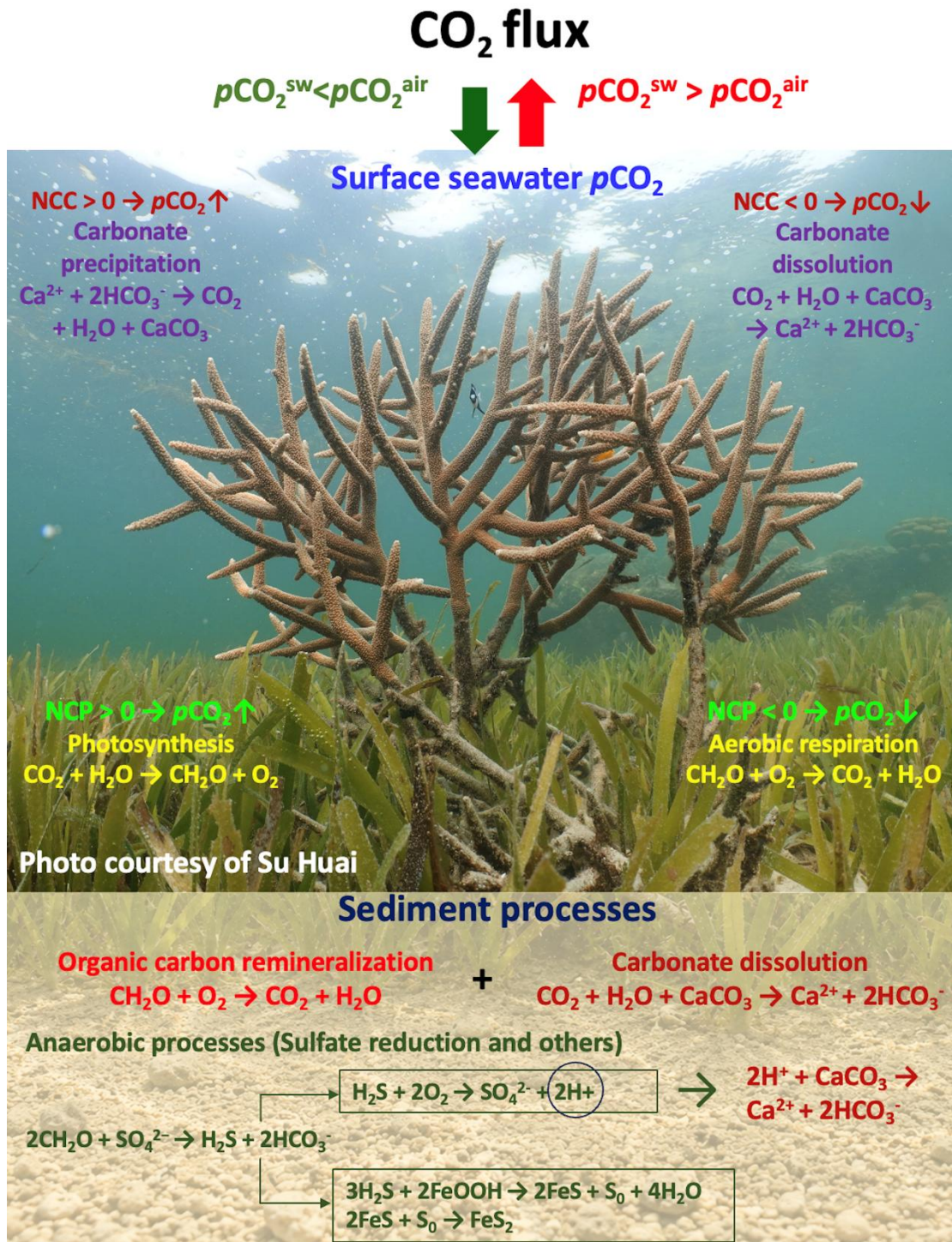
無論我們重新計算碳酸鹽系統多少次、反覆校正儀器，甚至重新檢視所有假設，答案始終沒有改變：光合作用本身，無法解釋這片瀉湖特殊的化學環境。這個生態系一定還存在著另一個我們尚未理解的機制。2018 年，我們發表了第一篇相關研究（<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.06.006>）。當時我們提出，瀉湖受限的水體交換，使沉積物中產生的鹼度得以累積於水體之中，進而提升了海水緩衝 CO₂ 的能力。這項研究成功解釋了我們看見了什麼，卻仍沒有回答最重要的一個問題：這些鹼度，究竟從哪裡來？

這個問題，一直留在我們心中。

科學研究，很少是一夕之間的重大突破。更多時候，是一次又一次回到同一個問題，用更好的方法、更完整的觀點，以及承認原本理解並不完整的勇氣，重新思考。於是，在接近十年的時間裡，東沙成了我們最重要的天然實驗室。每一次野外調查，都讓拼圖多了一小塊。我們的研究，也從最初的海水碳酸鹽化學，逐步擴展到生態系代謝（<https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1076991>）、沉積物孔隙水、底棲鹼度通量（<https://doi.org/10.3390/jmse12112061>）、有機碳含量、礦物組成（<https://doi.org/10.1029/2024GL112373>），以及不同季節間的變化（<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.717685>）。每一篇論文，都提供了一個新的線索。

那些看似零散的發現，也逐漸拼湊成一個完整的故事。

直到有一天，我們突然意識到：過去，我們始終只研究了碳循環的一半。幾十年來，海草一直被譽為藍碳生態系的代表，原因在於它能大量固定並埋藏有機碳。然而，在海床之下，另一個碳循環其實一直默默運作著。當微生物分解沉積物中的有機質時，產生的 CO₂ 會促進古代珊瑚與貝殼碎屑等「地質源碳酸鹽」的被動溶解。而碳酸鹽溶解，又會持續釋放大量的鹼度，提高海水的緩衝能力，並維持瀉湖中異常低的 CO₂ 濃度。原來，有機碳循環與無機碳循環，並不是各自獨立，而是彼此緊密耦合。海草所扮演的角色，不只是固定碳，更驅動了一連串改變海水化學的地球化學反應（請參閱下頁圖片）。



這個體悟，也徹底改變了我們對藍碳的理解。因此，在這篇 Perspective 中，我們提出了一個核心觀點：海草床對氣候的貢獻，不能只依據有機碳埋藏來評估。

碳酸鹽形成（鈣化反應）會釋放 CO_2 ；碳酸鹽溶解則會透過產生鹼度而促進 CO_2 吸收。一片海草床究竟是大氣 CO_2 的長期碳匯，還是碳源，真正取決於這兩種作用之間的平衡。為了量化這個平衡，我們建立了一套新的診斷架構—

NCP/NCC 補償比值 (Compensation Ratio)。研究發現，在現今海洋環境下，海草生態系的淨群落有機碳生產 (NCP) 至少需要達到淨群落鈣化 (NCC) 的 0.63 倍 (約 63%)，才能維持淨吸收大氣 CO₂。若低於這個門檻，即使沉積物中埋藏了大量有機碳，現生生物鈣化所釋放的 CO₂ 仍可能抵銷光合作用帶來的效益。我們也發現，海草的減碳能力並非放諸四海皆準。真正的關鍵，在於海床底下沉積物碳源的背景與性質。不同來源、不同年代的沉積物背景，會決定有機碳與無機碳如何共同作用，也因此決定了一個海草床真正的氣候效益。

東沙，就是驗證這個想法最理想的天然實驗室。不同於許多海草床白天吸碳、夜晚釋碳的現象，東沙內潟湖全年都維持極低的 CO₂ 濃度。我們發現，海草本身並非減碳的唯一關鍵，而是海草、沉積物微生物代謝與珊瑚礁碳酸鹽地質背景三者相互作用，共同決定海洋是否能持續吸收大氣中的二氧化碳。海草產生的有機質，促進了來自珊瑚礁的古老碳酸鹽沉積物溶解，使整座潟湖彷彿一座天然的「鹼度工廠」，持續提升海水緩衝能力，增強大氣 CO₂ 的吸收。

回頭來看，這篇論文並不是某一次實驗的成果。它更像是一段長達近十年的追尋—追尋一個始終無法用傳統理論解釋的現象。而東沙教會我們最重要的一件事是：藍碳，遠遠不只是埋藏在沉積物中的有機碳。它來自植物、微生物、沉積物與海水之間彼此交織的作用。唯有理解有機碳與無機碳循環的耦合，以及沉積物來源與年代如何影響海水碳酸鹽系統，我們才能真正理解沿岸藍碳生態系如何調節地球氣候。

隨著世界各國持續投入海草復育，希望以自然為本解決方案因應氣候變遷，我們也期待這套架構能帶來新的思考。未來真正需要回答的問題，不再只是：「埋藏了多少碳？」而是：「整個碳循環如何運作？地質背景又如何塑造這個循環？」如果能找到那些有機碳代謝與鹼度生成相互增強的「最佳地點 (Sweet spots)」，將有助於最大化海草復育的氣候效益，也為未來藍碳評估與碳權制度建立更堅實的科學基礎。

有時候，最重要的發現，並不是找到一件全新的事物。而是發現，那些我們一直分開研究的過程，其實從來都緊密相連。

這是一段跨越十年的堅持。我想將這篇論文，獻給所有陪伴我走過這段探索旅程的每一位學生、研究助理，以及許許多多的合作夥伴們。在艱辛的野外調查與反覆的數據驗證中，因為有你們，我們才能突破傳統理論的框架。沒有你們，這項研究不可能走到今天。期待在未來的日子裡，我們能攜手同行，繼續這段充滿未知與驚喜的海洋奇幻旅程！