

海洋藍碳及其國際發展趨勢

國立臺灣海洋大學海洋環境與生態研究所教授 周文臣

前言

2050淨零碳排是達成《巴黎協定》目標的必要步驟，而欲達成2050淨零碳排，不僅必須快速減少人為二氧化碳排放，還必須進行二氧化碳移除(Carbon Dioxide Removal, CDR)。然而，過去關於CDR的討論幾乎都集中在以陸地為基礎的思考架構上，對於以海洋為基礎CDR的瞭解與關注皆明顯不足。本文旨在向讀者介紹海洋藍碳與《巴黎協定》和2050淨零碳排的關係、藍碳概念的源起、科學原理與潛在價值，以及國際現況與發展趨勢。

海洋藍碳與《巴黎協定》和 2050 淨零碳排的關係

人為二氧化碳排放被認為是全球暖化的主因，因此降低人為二氧化碳排放是抑制全球暖化的主要對策。然而，二氧化碳一旦排放到大氣裡，會隨著大氣環流輸送擴散至全球。因此，欲以抑制人為二氧化碳排放為手段來達到減緩全球暖化的目標，勢必是全球所有國家共同進行方能竟其功。在這樣的思維脈絡下，全球195個國家於2015年在法國巴黎召開的《聯合國氣候變遷綱要公約》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)第21次締約方會議(COP21)，共同簽訂了《巴黎協定》(Paris Agreement)，其主要的目標是希

望將地球氣溫的上升幅度，控制在與工業革命前相比最多2°C內的範圍，且應努力追求前述升溫幅度減至1.5°C內更具挑戰性的目標。

為了提供《巴黎協定》後續談判與執行必要的科學基礎，COP21同時也籲請聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)，針對在本世紀內達成上述目標所需的溫室氣體排放情境進行評估。IPCC隨後在2018年正式發布了《全球升溫1.5°C 特別報告》。(注1)該報告明確指出為了避免不可逆轉的極端風險，全球必須在2050年達到二氧化碳淨排放量為零(net-zero CO₂ emissions, 簡稱淨零碳排)，而且2050年之後二氧化碳淨排放量必須持續降低到負值(負排放, negative emissions)，才能使得溫度升幅控制在1.5 °C 以內。此外，該報告亦明確指出要達成2050淨零碳排的目標，光靠減少二氧化碳排放是不夠的，必須同步發展將二氧化碳直接從大氣中移除(CDR，又可稱為負排放)的技術。為此，美國國家科學院、工程院和醫學科學院在2019年聯合發表了《負排放技術與可靠碳封存：研究議程》報告。(注2)該報告除了提出了對美國政府發展CDR技術路徑的具體建議，同時亦明確指出目前所知的CDR方法，皆無法滿足達成《巴黎協定》目標所需的二氧化碳移除量，而海洋具有巨大的二氧化碳吸收潛能(海洋

碳匯)。因此，該報告呼籲美國政府應積極投入以海洋為基礎CDR技術的研發。在此認知下，美國國家科學院、工程院和醫學院在2022年進一步發表了《以海洋為基礎的二氧化碳移除與封存研究策略》報告。(注3)至此，海洋的碳匯功能引起世界各國政策制定者的高度關注，被視為達成2050淨零碳排的關鍵戰略之一。

藍碳概念的源起與發展

藍碳的概念首先出現於聯合國環境規劃署(United Nations Environment Programme, UNEP) 2009年所發布的《藍碳：健康海洋固碳作用的評估》報告(以下簡稱《藍碳報告》)。(注4)在《藍碳報告》中，藍碳概念主要特指紅樹林(mangroves)、鹽沼(salt marshes)與海草床(seagrass beds)等濱海植被生態系所吸收、儲存的碳。何以這三類濱海生態系會最早形塑藍碳的概念？主要是因為有別於傳統陸地植物透過光合作用所固定的二氧化碳(被稱為綠碳)，這三類沿岸植被生態系皆生活在受海水影響的環境中，科學家發現除了其生產力高於陸地植物的特性外，在海水覆蓋的影響下，其沉積物多處於厭氧狀態，故有機質較不易分解，因此更容易被保存下來，使得濱海植被生態系的儲碳能力較陸地森林高出了數十倍。因此，《藍碳報告》中將紅樹林、鹽沼與海草床這三類濱海植被生態系所吸收、儲存的碳稱為藍碳，並呼籲各國政府應積極推動濱海藍碳生態系的保育，並將其納入減緩(mitigation)與調適(adaptation)氣候變化的政策工具中。

IPCC於2013年所發布的《對2006 IPCC國家溫室氣體清冊指南的2013增補：濕地》報告，(注5)補充了紅樹林、鹽沼與海草床溫室氣體清冊的編制方法，這標誌著濱海藍碳已正式納入了《聯合國氣候變遷綱要公約》相關的機制中。隨後2014年國際藍碳倡議聯盟(the Blue Carbon Initiative)提出了《濱海藍碳：紅樹林、鹽沼和海草床碳儲量與排放係數評估方法》報告，(注6)確立了濱海藍碳計量國際

通用的標準方法學。近年來，隨著研究的進展，生活在海洋中的大型藻類(macroalgae)以及占海洋生物總量90%以上微型浮游植物(phytoplankton)的固碳能力也逐漸受到重視。此外，海洋中一些物理、化學的過程亦有助於大氣二氧化碳的溶解與吸收。因此，廣義而言，藍碳應泛指海洋透過各種生物、物理及化學過程所吸收、儲存在海洋環境中的二氧化碳。但截至目前為止，除前述的濱海藍碳外，其餘型態的藍碳皆尚未被列入IPCC國家溫室氣體清冊指南當中，相關的測量方法學也正在積極發展當中，尚未建立全球統一的準則。不過由於其量體龐大，發展潛力深受世界各國高度重視。

海洋藍碳的科學原理與潛在價值

海洋可以透過生物、物理及化學等作用來吸收二氧化碳。各作用的運作原理簡要說明如下。(注7)

生物作用：在海洋的生態環境中以生物或生物行為為動力，將碳從海洋表面向深層垂直傳輸的過程。此過程起始於生活在透光層中的浮游植物進行光合作用，將溶解於海水中的二氧化碳轉化為顆粒態的有機碳。雖然大部分光合作用所生成的有機碳，會在上層海水中被分解再循環使用，但仍有少部分的顆粒態有機碳可以透過膠結作用轉化成較大的有機顆粒。由於大顆粒有機物的沉降速度較快，因此可以在被微生物完全分解前沉降至深海，乃至沉積物中儲藏起來。由於深層海水的駐留時間長達千年，這些封存在深層海水中的碳，可以在千年的時間尺度內與大氣隔絕，因此被視為有效的碳匯。上述海洋環境中由有機物生產(光合作用)、消費、傳遞、沉降和分解等一系列生物地球化學作用所構成的碳，從表層向深層的轉移過程被稱為「生物幫浦」。

物理作用：大氣中的二氧化碳可以透過海氣交換作用溶入海水中。由於二氧化碳氣體在海水中的溶解度與溫度成反比，高緯度海域的海水溫度較低、溶解度較高，因而可以溶入較多的二氧化碳；

而又因海水密度與溫度成反比，這些二氧化碳含量較高的冷水同時也具有較高的密度，故會逐漸下沉至深海，藉由大規模溫鹽環流的輸送，便可將溶入高緯度表層海水的二氧化碳輸送至全球深海中儲存。上述藉由海氣交換與海水垂流，將碳從表層向深海傳送的過程被稱為「物理幫浦」。

化學作用：岩石礦物的化學風化反應是地球系統本身移除大氣中過量二氧化碳最重要的自然過程。大氣中的二氧化碳溶入雨水後會生成碳酸，再與岩石產生化學風化反應後，可將二氧化碳氣體轉化為溶解態的碳酸根或碳酸氫根離子，藉由河流的輸送，碳酸根與碳酸氫根離子最終會被輸入到海洋中造成海水鹼度的增加，而海水鹼度的提升，會增強海洋吸收大氣二氧化碳的能力。因此，「化學風化」和「海洋鹼化」等化學反應亦具有移除大氣二氧化碳的功效。

透過上述的各項作用，海洋每年大約可以吸收 10 GtCO₂/yr (1Gt=109噸)，約占人為活動所排放二氧化碳總量的25%。(注8)若以目前歐盟碳排放定價每噸二氧化碳約85美元來計算，藍碳的經濟價值高達每年8500億美元。此外，海洋是地球系統中最大的活躍碳庫，儲存了地球上約93%可交換的碳，倘若我們希望將大氣CO₂濃度由現今約410 ppm降低至工業革命前280 ppm的水平，大約需要自大氣中移除270 GtC，此量約僅占海洋碳儲量的0.7%，藍碳的巨大潛力由此可見一斑。

藍碳在「國家自主貢獻」方案的國際現況與發展趨勢

為了達成「將全球升溫限制在2°C內，並努力控制在1.5°C下」的目標，《巴黎協定》要求各締約方須提出「國家自主貢獻」方案(Nationally Determined Contributions, NDCs)，且每五年更新一次。所謂的NDCs係指各國衡量自身能力與經濟發展狀況下，所訂定減少溫室氣體排放，以及調適氣候影響的行動計畫。透過每五年一輪的更新，各國的NDCs被冀望制訂更大幅度的減排和更廣泛的調適策略來提升

其氣候行動的雄心，根據隨時間推移提高目標漸進機制的設計(ambition mechanism)，不斷提升雄心的NDCs遂構成了達成《巴黎協定》長期目標的具體行動方案。

在2016年第一輪各國所提交的NDCs方案中，全球共有151個國家包含至少一類濱海藍碳生態系，71個國家包含全部三類(紅樹林、鹽沼與海草床)。然而，在擁有濱海藍碳生態系的國家中，只有約一半的國家將其納入NDCs；其中28個國家將其列入緩解項目，59個國家將其列入調適項目。(注9)上述數據顯示，藍碳在具體的氣候行動中仍有相當大的發展空間。為進一步促進相關國家將濱海藍碳生態系列入NDCs，藍碳倡議聯盟2020年發布了《藍碳與「國家自主貢獻」：加強行動指引》(以下簡稱《藍碳行動指引》)，(注10)並於2023年7月發布更新版。(注11)該指引提出五個核心支柱作為各國將藍碳納入NDCs的可行方案，包括1. 就藍碳納入NDCs的準備情況和選項進行評估；2. 闡明藍碳在NDCs調適部分中所扮演的角色；3. 闡明藍碳對NDCs減緩目標的貢獻；4. 將藍碳納入國家溫室氣體報告清冊；5. 落實藍碳NDCs的實踐。

國際林業研究中心(Center for International Forestry Research, CIFOR)2019年針對13個亞太國家(孟加拉、柬埔寨、斐濟、印度尼西亞、馬來西亞、緬甸、巴布亞新幾內亞、菲律賓、薩摩亞、斯里蘭卡、泰國、瓦努阿圖和越南)的調查結果發現，(注12)儘管濱海藍碳的功能已得到各國的充分認可，但僅有三個國家(印度尼西亞、馬來西亞和菲律賓)在其政策中明確提到藍碳，並建立專責的國家機構來制訂藍碳戰略。該報告亦指出這13個亞太國家將藍碳納入NDCs所面臨的挑戰，包括缺乏數據和標準方法、技術能力薄弱、政府機構和部門之間協調不足、職責重疊和政策不一致、濱海藍碳生態系統日益劣化以及資金上的限制等因素。

綜言之，目前國際上關於藍碳主要的發展趨勢為，鼓勵各國應積極將藍碳納入NDCs以進一步提升其氣候行動的雄心，而漸進式NDCs的實踐則是確保

達成《巴黎協定》目標的運作機制。在此認知下，有愈來愈多的國家將藍碳納入NDCs中。針對各國將藍碳納入NDCs過程中所可能遭遇的困難與挑戰，《藍碳行動指引》建議各國可將技術能力不足、資金限制等等需要協助的項目明列於NDCs中，透過《巴黎協定》支持發展中國家的機制（協定承認發展中國家面臨更大的氣候風險和挑戰，要求發達國家提供資金、技術和能力建設，以幫助發展中國家應對氣候變化），來助其達成藍碳在NDCs中的目標。

此外，2021年在格拉斯哥舉行的COP26會議上，各締約方要求附屬科學技術諮詢機構(Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, SBSTA)主席舉行年度《海洋與氣候變化對話》(Ocean and Climate Change Dialogue)，來加強以海洋為基礎的氣候行動，並要求第一次對話重點應聚焦在《聯合國氣候變化框架公約》的架構上，來強化與整合海洋-氣候行動，應包括實施《巴黎協定》，以及透過資金和能力的建構來實現海洋和氣候解決方案。2022年在沙姆沙伊赫舉行的COP27會議上進一步制訂了年度《海洋與氣候變化對話》的辦理機制，協議由各締約方每兩年選出的兩名共同主辦方來負責籌辦每次對話。《海洋與氣候變化對話》系列旨在形成一個以行動為導向的場域，讓各締約方可以在與《聯合國氣候變化框架公約》相關的進程與談判過程中，討論並制定具體的行動步驟，藉以消弭差距、建構能力來強化以海洋為基礎的氣候行動。在可以預見的未來，COP每年所舉行的《海洋與氣候變化對話》將會是形塑全球藍碳發展方向最重要的場域。因此，各締約方應積極參與並密切注意相關決議，方能掌握藍碳政策在國際上最新的發展趨勢。■

參考資料

1. IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-

industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>.

2. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda, Washington, DC: The National Academies Press, 2019, < <https://doi.org/10.17226/25259> >。
3. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration, Washington, DC: The National Academies Press, 2022, < <https://doi.org/10.17226/26278> >。
4. Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds), Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, 2009, < <https://www.grida.no/publications/145> >。
5. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds), 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Published: IPCC, Switzerland, 2014。
6. Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., & Telszewski, M. (eds). Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows.

- Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, 2014。
7. 周文臣、洪慶章、林幸助，〈海洋碳匯〉，陳綠蔚、盧虎生主編，《碳匯之發展趨勢及國內策略研析》，2022年，頁111-151。
8. Pierre Friedlingstein, Michael O'Sullivan, Matthew W. Jones, Robbie M. Andrew, Luke Gregor, Judith Hauck, Corinne Le Quéré, Ingrid T. Lujikx, Are Olsen, Glen P. Peters, Wouter Peters, Julia Pongratz, Clemens Schwingshackl, Stephen Sitch, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, Simone R. Alin, Ramdane Alkama, Almut Arneth, ..., Bo Zheng, Global Carbon Budget 2022, Earth Syst, 2022, <<https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>>。
9. Herr, D. and Landis, E., Coastal blue carbon ecosystems, Opportunities for Nationally Determined Contributions, Policy Brief, Gland, Switzerland: IUCN and Washington, DC, USA: TNC, 2016。
10. Blue Carbon Initiative, Blue Carbon and Nationally Determined Contributions: Guidelines on Enhanced Action, 2020。
11. Blue Carbon Initiative, Blue Carbon and Nationally Determined Contributions: Guidelines on Enhanced Action, Second Edition, 2023。
12. Pham Thu Thuy and Le Thi Thanh Thuy, Incorporating blue carbon into Nationally Determined Contributions: Current status, opportunities and challenges of 13 Asia-Pacific countries, CIFOR infobriefs No. 274, 2019, <<https://doi.org/10.17528/cifor/007554>>。



APEC 典藏 -2016 年 APEC 領袖峰會於秘魯利馬舉行。各經濟領袖身披羊駝披肩，象徵主辦國秘魯特色。我國當年領袖代表為宋楚瑜先生（後排右四）。（圖／秘魯外交部）