

藍碳生態系的潛力與挑戰：從碳埋藏到甲烷排放

莊佩涓

國立中央大學地球科學學系

Email: peichuanhuang@cc.ncu.edu.tw

摘要:藍碳生態系統 (BCEs) 如紅樹林、鹽沼與海草床，是全球重要的碳匯，能長期儲存大量有機碳。研究發現，紅樹林的淨初級生產率 (NPP) 極高，每年可固定大量碳，其中部分輸出至海洋，部分則長期埋藏。然而，紅樹林不僅是碳匯，也可能成為碳源。沉積物中的有機碳會因氧化還原反應被微生物分解，產生二氧化碳與甲烷，而甲烷的全球暖化潛能遠高於二氧化碳，其排放可能抵消紅樹林藍碳埋藏量的 20%。本文作者過去的研究顯示，人類活動與污染可能使紅樹林相關水體的甲烷通量增加數十倍，影響碳循環與氣候變遷。儘管紅樹林在碳循環中扮演關鍵角色，但其沉積物中碳、硫、氮等元素的循環機制尚未被完整量化。目前針對紅樹林沉積物與水體的甲烷排放研究仍有限，本文作者認為未來應進一步量化相關元素的生物地球化學循環，以精確評估紅樹林對氣候變遷的影響，並建議台灣投入更多研究資源。

■ 前言

藍碳生態系統 (Blue Carbon Ecosystems, BCEs) 如紅樹林、鹽沼與海草床，是全球重要的碳匯，雖占海洋面積不到 1%，卻貢獻超過 50% 的海洋沉積碳埋藏量。本文整理了過去針對紅樹林生態系統的重要性，以及沉積物中碳的埋藏與分解相關研究進行回顧，希冀未來台灣也能夠投入更多相關研究。紅樹林淨初級生產率 (Net Primary Productivity, NPP) 達每年 92 至 280 億公噸碳，沉積物碳儲存量高達每公頃 956 公噸碳，使其成為熱帶地區碳含量最高的生態系統之一。然而，紅樹林亦可能成為碳源。有機碳分解受氧化還原條件影響，當氧氣耗盡後，微生物利用錳氧化物中的四價錳 (Mn^{4+})、硝酸鹽 (NO_3^-)、鐵氧化物中的三價鐵 (Fe^{3+}) 與硫酸鹽 (SO_4^{2-}) 進行厭氧氧化還原反應分解有機碳，最終可能產生甲烷 (CH_4)，其全球暖化潛能遠高於二氧化碳。研究顯示，紅樹林 NPP 約每年 200 億公噸碳，其中 34.1 億公噸碳 (20%) 回到大氣，117.9 億公噸碳 (60%) 輸出至海洋，僅 18.4 至 34.4 億公噸碳能長期埋藏。此外，甲烷排放可能抵消紅樹林藍碳埋藏的 20%。未來研究應進一步量化紅樹林沉積物中碳、硫、氮等元素循環，以精確評估其氣候變遷影響。

■ 藍碳生態系統重要性

氣候變化主要由大氣中二氧化碳濃度增加所驅動，是地球面臨的最重大全球環境問題之

一 (Nellemann et al., 2009)，減緩策略包括減少排放以及保護和增強自然碳儲存 (Rosentreter et al., 2018)。大多數保育計畫著重於恢復陸地生態系統，如熱帶雨林，並增強農業耕地中的碳儲存 (Pan et al., 2011; Agrawal et al., 2011)。近年來，沿海植被生態系統因其為重要的天然碳匯也開始受到重視 (Mcleod et al., 2011; Duarte et al., 2013)。如 2009 年「藍碳」一詞的提出，主要是因為人們日漸意識到海洋生態系統在氣候變化緩解中可能具有的量化重要性 (Nellemann et al., 2009; Lovelock and Duarte, 2019)。藍碳 (BC, Blue Carbon) 由海洋生物捕獲大氣二氧化碳並被封存在海洋環境，包含沿岸藍碳生態系 (BCEs, Coastal Blue Carbon Ecosystems) 及開放海洋藍碳生態系 (Open Ocean Blue Carbon Ecosystems)。沿岸藍碳生態系包含鹽沼、紅樹林和海草床構成濱海碳循環熱點，是地球生物圈最大碳匯之一。鹽沼、海草床、紅樹林，僅占海洋和海岸面積不到 1%，但它們儲存了海床中大部分自然生成的碳且具許多生態系統功能，它們的碳埋藏速率比熱帶雨林高出 40 倍，並且佔海洋沉積物中碳埋藏量的一半以上 (Duarte et al., 2005; Macreadie et al., 2021)。

鹽沼、海草床和紅樹林等藍碳所具有的生態系統功能包含：產生氧氣、過濾病原體、懸浮物、污垢和污染物質以及減緩海洋流動、波浪和風暴潮，因此面對海平面上升問題，藍碳系統能保護海岸免受侵蝕和積聚沉積物 (Krause-Jensen et al., 2018; Macreadie et al., 2019)。同時，它們還可提供食物 (魚、貝類、螃蟹)，有助於人們的休息和健康，吸引了眾多遊客，從而為沿海居民創造了額外的工作機會和收入來源。健康的植被，豐富的海岸生態系統有助於沿海居民最好地適應氣候變化 (Arkema et al., 2023; Macreadie et al., 2021)。因此，對現有的鹽沼、海草床、紅樹林進行恢復和擴建的投資具有多重好處。它們有助於降低大氣中的二氧化碳濃度 (減緩氣候變化)，在正確的方法下增強生物多樣性，並有助於降低氣候風險 (氣候適應) (Macreadie et al., 2019)。

■ 藍碳的紅樹林生態系統為重要大氣碳匯

藍碳的紅樹林生態系統在自然碳循環中扮演著關鍵角色，被視為一種高效的天然碳匯，在理想情況下，它們可以保存碳的時間長達數個世紀，甚至數千年 (Choudhary et al., 2024; Serrano et al., 2019)。這些生態系統位於陸地與海洋的交界區域，與周邊生態系統之間持續交換著營養鹽和有機物質，使它們成為生物圈中生物地球化學活動最為活躍的區域之一 (Mcleod et al., 2011; Duarte et al., 2005)。儘管紅樹林森林僅佔全球沿海地區的一小部分，但它們生產力很高，淨初級生產率為每年 92 至 280 億公噸碳 (Jennerjahn & Ittekkot, 2002; Bouillon et al., 2008; Alongi and Mukhopadhyay, 2015)。在紅樹林生態系統中，植物、生物量 (Biomass) 和沉積物共同儲存了大量的有機碳，也使其成為熱帶地區碳含量最高的生態系統之一 (Donato et al., 2011)。特別是在沉積物中，全球紅樹林的平均碳儲存量估計為每公頃高達 956 公噸碳，

遠高於熱帶雨林、泥炭沼澤、鹽沼和海草床 (Alongi, 2014)。與陸上森林相比，紅樹林在沉積物和土壤中的碳積累量更為顯著，這主要歸因於自生和異源輸入的量，以及缺氧條件下有機物分解速率較低的特點 (Donato et al., 2011; Kristensen, 2008)。目前估計紅樹林生態系統中有機碳累積的速率估計為每年 18.4 至 34.4 億公噸碳 (Jennerjahn & Ittekkot, 2002; Duarte et al., 2005)，貢獻了高達 15% 的海洋沉積物中的總碳累積量 (Jennerjahn & Ittekkot, 2002)。

■ 藍碳的紅樹林生態系統也可能是重要大氣碳源

紅樹林生態系統中的生物體死亡後，會以有機物質形式埋藏至沉積物中，有機物質是否能成為藍碳被保存或是被分解產生二氧化碳或甲烷流失(此為大氣碳源)，與沉積物所在環境的氧化還原條件有關，主要是因有機物質在沉積物中會經由微生物活動被分解，微生物分解有機物質將氧氣消耗後，沉積環境由有氧轉為厭氧狀態，在厭氧條件下，發酵或水解作用會將有機物質由大分子分解為小分子，之後由一系列厭氧微生物將它們氧化成二氧化碳，這些厭氧微生物根據能量產出依次利用以下電子接收者： Mn^{4+} 、 NO_3^- 、 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} ，電子接收者用盡後，才有機會生成甲烷，因此這一系列的氧化還原反應，也驅動著碳、錳、鐵、硫、氮、磷、氧等元素循環 (圖 1) (Froelich et al., 1979; Burdige, 2006; Kristensen et al., 2008)。硫酸鹽還原反應 (sulfate reduction; 圖 1)，無論是在有氧還是無氧條件下，通常被認為是紅樹林沉積物中微生物分解有機物質最重要的反應 (Kristensen et al., 2008)，佔總有機碳分解量的 75 至 125% (Alongi et al., 1998)，然而硫酸鹽還原反應卻產生大量危害紅樹林生態系統的可溶性物質-硫化氫 (Jacotot et al., 2023)。

因此近期的研究發現，在紅樹林生態系統中，儘管有機物質的埋藏可以移除大氣中的二氧化碳，並將其長期儲存，但因這一過程也伴隨著上述微生物活動的分解作用，導致固定的碳以其他形式流失 (Bouillon et al., 2008; Alongi & Mukhopadhyay, 2015)。若用每年 200 億公噸碳估算紅樹林的淨初級生產量 (NPP)，有一部分碳會透過二氧化碳通量流失或再次循環回到大氣中(每年約 34.1 億公噸碳，約占 20%)或以顆粒有機碳(POC)、溶解有機碳(DOC)和溶解無機碳 (DIC) 等形式輸出至海洋 (每年約 117.9 億公噸碳；約占 60%) (Alongi and Mukhopadhyay, 2015; Rosentreter et al., 2018)。因此，真正作為藍碳埋藏的量為每年 18.4 至 34.4 億公噸碳 (Bouillon et al., 2008; Mcleod et al., 2011; Alongi, 2014; Rosentreter et al., 2018) (圖 1)。更有研究指出，在紅樹林生態系統中的甲烷古菌在缺氧的沉積物中產生甲烷(CH_4)，將有機物轉化為甲烷後排放至大氣中 (Methanogenesis; 圖 1)。考慮到甲烷的全球暖化潛能遠高於二氧化碳，這種排放可能會抵消一部分透過碳埋藏移除的二氧化碳效果。如果考慮 20 年的全球暖化潛能，較高的甲烷排放率可能平均抵消紅樹林沉積物中藍碳埋藏率的 20% (Rosentreter et al., 2018)。

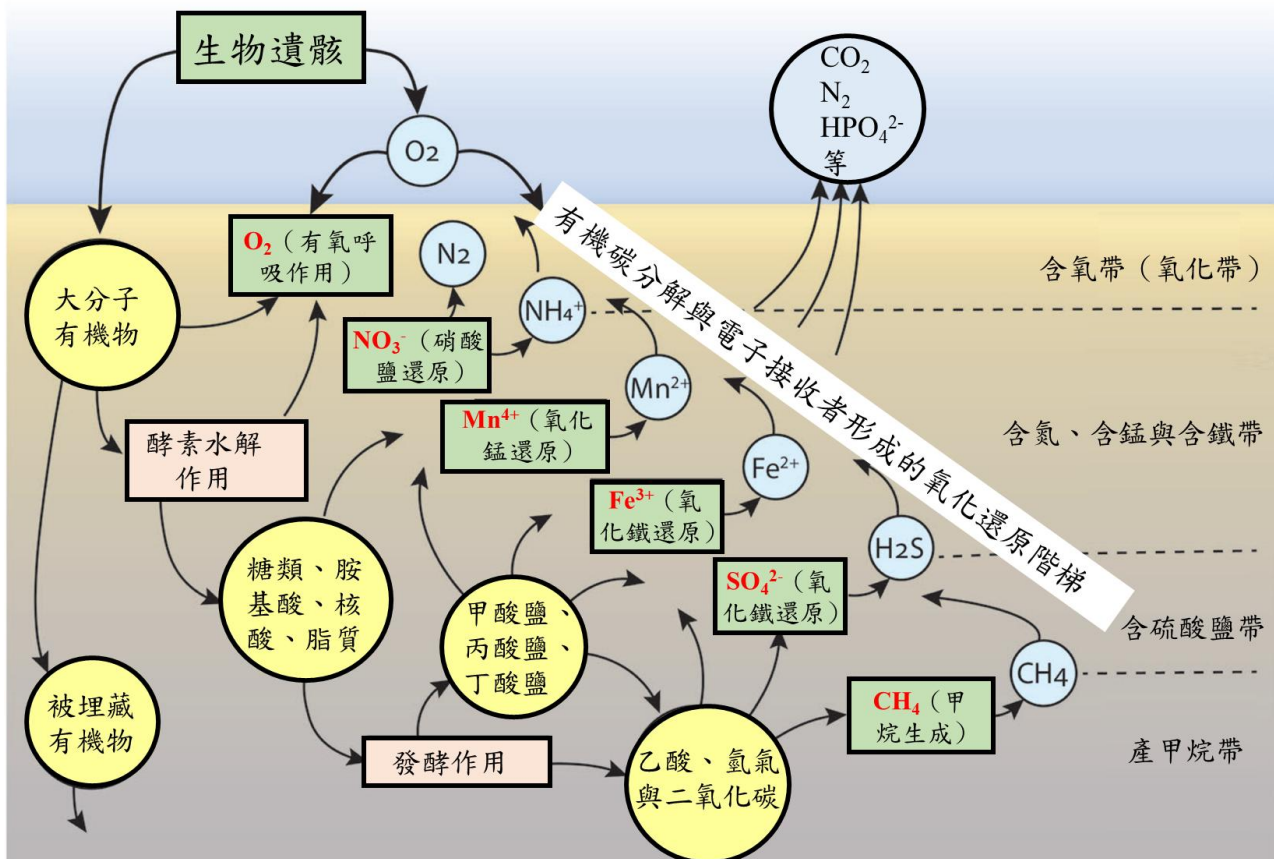


圖 1: 沉積物中微生物所驅動的有機物質分解，呈現出與深度相關的氧化還原序列，這反映了微生物分解有機物質依所獲得能量高低，會使用不同電子接收者，並可見隨深度釋放相關溶解有機基質 (修改自 Jørgensen et al., 2022)。

■ 結語

本文作者過去也定量討論了墨西哥 (Yucatán, Mexico) 鄰近紅樹林的潟湖生態系統中，甲烷生成機制及通量與其他微生物所驅動之生物地球化學反應的關係 (Chuang et al., 2016)。該區沿海潟湖中的甲烷生成與消耗受不同作用所控制，包括物理作用如與海水或地下水混合和潮汐，以及生物地球化學作用如硫酸鹽還原、甲烷生成和氧化等。這些因素也造成了甲烷濃度和通量在時間和空間上的顯著變化。儘管鹽度和硫酸鹽濃度高，Yucatán 紅樹林沉積物中的甲烷不但沒被硫酸鹽消耗殆盡 (甲烷厭氧氧化反應; AOM; $CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+ \rightarrow H_2S + TCO_2 + 2H_2O$)，還能在沉積物表層與硫酸鹽共存，且甲烷產生率仍然很高，這是因為沉積物中有機質含量高以及甲烷生成菌利用非競爭性基質，甲烷可在淺層孔隙水中累積。加上潟湖水淺以及潮汐調節的壓力變化，促成非常高的甲烷通量逸氣至水層與大氣 (Chuang et al., 2017)。如果這些地點的通量能代表其他與紅樹林相關的水體，這些系統的通量可能佔全球濕地排放到大氣中總量的相當大一部分。Chuang 等人 (2017) 的研究也顯示在 Yucatán 紅樹林潟湖生態系統，受人類活動和汙染影響的濕地環境會使甲烷通量相較自然濕地環境增加 10 至 100 倍，這項研

究對碳循環在紅樹林生態系帶來重要意義，也讓我們深入了解自然與人類活動因素所造成的環境變遷會對紅樹林潟湖生態系統碳循環產生顯著差異。然而，目前只有少數研究同時考慮到了紅樹林生態系統中沉積物和水體的甲烷排放 (Chuang et al., 2017)。未來對藍碳的評估中，各地紅樹林生態系統無論是自然和受人類活動汙染的環境，甲烷逸散至大氣通量，也需深入調查。淺水海洋環境 (即海灣、河口、潟湖、沙洲和大陸棚) 占海洋初級生產力的 14-30% 以及有機物質埋藏量的 80% (Gattuso et al., 1998)。目前尚未有研究定量估算紅樹林生態系統，有機物分解所驅動的各項主要以及二級氧化還原反應的反應速率，以及所參與沉積物生物地球化學循環的主要元素如碳、鎂、鐵、硫、氮、磷、氧等元素進出沉積物的通量。建議未來可在台灣投入相關研究。

■ 參考文獻

- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6(1), 195–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Alongi, D. M., & Mukhopadhyay, S. K. (2015). Contribution of mangroves to coastal carbon cycling in low latitude seas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, 266–272. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.005>
- Alongi, D. M., Sasekumar, A., Tirendi, F., & Dixon, P. (1998). The influence of stand age on benthic decomposition and recycling of organic matter in managed mangrove forests of Malaysia. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 225(2), 197–218. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(97\)00223-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(97)00223-2)
- Agrawal, A., Nepstad, D., & Chhatre, A. (2011). Reducing emissions from deforestation and forest degradation. *Annual Review of Environment and Resources*, 36, 373–396. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-042009-094508>
- Arkema, K. K., Delevaux, J. M. S., Silver, J. M., Winder, S. G., Schile-Beers, L. M., Bood, N., Crooks, S., Douthwaite, K., Durham, C., Hawthorne, P. L., Hickey, T., Mattis, C., Rosado, A., Ruckelshaus, M., von Unger, M., & Young, A. (2023). Evidence-based target setting informs blue carbon strategies for nationally determined contributions. *Nature Ecology & Evolution*, 7(7), 1045–1059. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02081-1>
- Bouillon, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., Kristensen, E., Lee, S. Y., Marchand, C., Middelburg, J. J., Rivera-Monroy, V. H., Smith, T. J. III, & Twilley, R. R. (2008). Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2). <https://doi.org/10.1029/2007GB003052>
- Burdige, D. J. (2006). *Geochemistry of Marine Sediments*. Princeton University Press.
- Choudhary, B., Dhar, V., & Pawase, A. S. (2024). Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration: Its mechanisms, estimation, human impacts and conservation strategies for economic incentives. *Journal of Sea Research*, 199, 102504. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102504>
- Chuang, P.-C., Young, M. B., Dale, A. W., Miller, L. G., Herrera-Silveira, J. A., & Paytan, A. (2017). Methane fluxes from tropical coastal lagoons surrounded by mangroves, Yucatán,

- Mexico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(5), 1156–1174.
<https://doi.org/10.1002/2017JG003761>
- Chuang, P.-C., Young, M. B., Dale, A. W., Miller, L. G., Herrera-Silveira, J. A., & Paytan, A. (2016). Methane and sulfate dynamics in sediments from mangrove-dominated tropical coastal lagoons, Yucatán, Mexico. *Biogeosciences*, 13(10), 2981–3001. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2981-2016>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(11), 961–968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Duarte, C. M., Middelburg, J. J., & Caraco, N. (2005). Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2(1), 1–8. <https://doi.org/10.5194/bg-2-1-2005>
- Gattuso, J. P., Frankignoulle, M., Bourge, I., Romaine, S., & Buddemeier, R. W. (1998). Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Global and Planetary Change*, 18(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(98\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00035-6)
- Jacotot, A., Gayral, I., Robin, S. L., & Marchand, C. (2023). Soil concentrations and atmospheric emissions of biogenic hydrogen sulphide (H₂S) in a Rhizophora mangrove forest. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 291, 108439. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108439>
- Jennerjahn, T. C., & Ittekkot, V. (2002). Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins. *Naturwissenschaften*, 89(1), 23–30. <https://doi.org/10.1007/s00114-001-0283-x>
- Jørgensen, B.B., Wenzhöfer, F., Egger, M., and Glud, R.N. (2022). Sediment oxygen consumption: Role in the global marine carbon cycle. *Earth-Science Reviews*, 228, 103987. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103987>
- Krause-Jensen, D., Lavery, P., Serrano, O., Marbà, N., Masque, P., & Duarte, C. M. (2018). Sequestration of macroalgal carbon: The elephant in the blue carbon room. *Biology Letters*, 14(6), 20180236. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0236>
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T., & Marchand, C. (2008). Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 201–219. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.005>
- Lovelock, C. E., & Duarte, C. M. (2019). Dimensions of blue carbon and emerging perspectives. *Biology Letters*, 15(3), 20180781. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0781>
- Macreadie, P. I., Costa, M. D. P., Atwood, T. B., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Lovelock, C. E., Serrano, O., & Duarte, C. M. (2021). Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(12), 826–839. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>
- Macreadie, P. I., et al. (2019). The future of Blue Carbon science. *Nature Communications*, 10(1), 3998. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>

- McLeod, E., et al. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552–560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Nellemann, C., et al. (2009). *Blue Carbon: A Rapid Response Assessment* (Vol. 80). United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., & Sitch, S., Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Rosentreter, J. A., Maher, D. T., Erlen, D. V., Murray, R. H., & Eyre, B. D. (2018). Methane emissions partially offset “blue carbon” burial in mangroves. *Science Advances*, 4(6), eaao4985. <https://doi/10.1126/sciadv.aao4985>
- Serrano, O., Lovelock, C. E., Atwood, T. B., Macreadie, P. I., Canto, R., Phinn, S., Arias-Ortiz, A., Bai, L., Baldock, J., Bedulli, C., Carnell, P., Connolly, R. M., Donaldson, P., Esteban, A., Ewers Lewis, C. J., Eyre, B. D., Hayes, M. A., Horwitz, P., Hutley, L. B., ... Duarte, C. M. (2019). Australian vegetated coastal ecosystems as global hotspots for climate change mitigation. *Nature Communications*, 10(1), 4313. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12176-8>