

# 海洋“造林”的碳汇效率之争

王为磊, 高光, 戴民汉\*

厦门大学海洋与地球学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361102

\* 联系人, E-mail: mdai@xmu.edu.cn

## The debate of ocean afforestation as a means of carbon sequestration

Wei-Lei Wang, Guang Gao & Minhan Dai\*

State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China

\* Corresponding author, E-mail: mdai@xmu.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2023-1304

在21世纪末实现温控2~1.5°C的目标, 需要全球各国政府、企业和个人共同努力, 采取积极的减排和增汇措施。据Berger等人<sup>[1]</sup>研究, 在有效减排的前提下, 2050年之前每年还需从大气中去除160亿吨二氧化碳(CO<sub>2</sub>)方能实现温控2°C之内的目标。海洋覆盖约71%的地球表面积, 是地表系统中最大的碳储库, 吸收了自工业革命以来约25%的人为CO<sub>2</sub><sup>[2]</sup>, 发挥着不可替代的碳汇功能。海洋不仅有广度还有深度, 平均深度约3400 m, 如果能将海洋吸收的CO<sub>2</sub>输出至1000 m以下, 海洋对碳的封存时效可高达百年以上。因此, 海洋具有巨大的增汇潜力。虽然人为干预的海洋增汇方式目前还处于基础研究阶段, 但近年来受到学界和产业界的极大关注。

海洋“造林”是一种海洋增汇方式, 是指在海洋中进行大规模大型海藻养殖, 并将成体海藻沉入深海, 海藻通过光合作用固定的CO<sub>2</sub>就会被长期封存在海洋内部。但是, 任何人工干预的增汇方式, 包括海洋“造林”增汇, 在大规模应用实施之前, 除了应全面评估其固碳效率及其碳封存时效, 还应充分评估其可能的环境效应与生态风险。但是, 室内培养实验无法匹配具有气候影响力的实施规模; 大规模的现场试验在通过政策审批和环境评估之前, 无法有效实施。而自然界的对照物具有规模大和成本低等特点, 因此是很好的参考研究载体<sup>[3]</sup>。

Bach等人<sup>[4]</sup>利用泛大西洋周期性勃发的马尾藻带作为对照物研究马尾藻的固碳效率, 得出碳酸盐反向泵和营养盐再分配可以抵消几乎全部的固碳效率。然而由于他们选择性地使用了数据并忽略了一些重要的生物地球化学过程, 以至于其结果具有误导性。

碳酸盐反向泵是指附着在马尾藻上的浮游生物形成钙质外壳(主要是CaCO<sub>3</sub>等颗粒无机碳)的过程会增加水体中游离CO<sub>2</sub>的浓度, 从而促进CO<sub>2</sub>向大气的转移。因此, 它可以抵消

部分光合固碳效应。Bach等人<sup>[4]</sup>指出, 碳酸盐反向泵在泛大西洋马尾藻带最高可以抵消57%的碳汇效率。但他们在计算碳酸盐反向泵抵消作用的过程中, 存在3个问题, 导致该抵消作用被严重高估。(1) Bach等人<sup>[4]</sup>所使用的颗粒无机碳(particulate inorganic carbon, PIC)对马尾藻湿重的比例存在异常值, 并且他们引用的数据来自百慕大海滩, 而不是海水中。马尾藻被冲刷到海滩的过程会发生破碎而损失掉部分有机碳。通过异常值检验(中值法和四分位法, <https://github.com/weileiw/IsOutlier/blob/main/IsOutlier.m>), 并剔除异常值后, 碳酸盐反向泵的最高抵消作用从57%降低到了34.8%。Bach等人<sup>[5]</sup>提到他们所用数据经Grubbs检验无异常值, 但是Grubbs检验的前提是被检验数据呈正态分布, 而原始数据不符合这一前提条件, 因此, Grubbs检验不适用。最新的观测发现, 墨西哥沿岸海水中PIC对马尾藻湿重的比例远远低于Bach等人<sup>[4]</sup>所使用的数据<sup>[6]</sup>。根据Salter等人<sup>[6]</sup>的数据计算, 碳酸盐反向泵的抵消作用进一步降低到了3.1%(1.3%~4.5%)。(2) Bach等人<sup>[4]</sup>忽略了溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)的贡献。DOC也是马尾藻通过光合作用固定的有机碳的组成部分, 它在马尾藻生长过程中被主动或者被动地释放到海水中<sup>[7]</sup>。因此, 不会体现在马尾藻的湿重中, 如果考虑DOC的生产, 并按Bach等人<sup>[4]</sup>对DOC产量的估算, 碳酸盐反向泵的抵消作用进一步降低至0.9%~3.2%。需要指出的是, 马尾藻在生长过程中会释放出岩藻多糖, 这种多糖不含氮、磷元素, 因此, 它的生成不消耗氮、磷营养盐<sup>[8,9]</sup>; 同时海藻释放的腐殖类和长链类脂等化合物生物可利用性低, 因此可以长时间滞留在海洋中, 起到长期固碳的作用<sup>[10]</sup>。我国学者的研究也发现, 养殖类大型海藻能够产生相当数量的惰性溶解有机碳, 可长期存留在海洋中<sup>[11,12]</sup>。(3) 在马尾藻生长过程, 由于波浪的破碎作用, 会产生很多悬浮有机物; 这部分悬浮有机物也被Bach等人<sup>[4]</sup>在计

算过程中忽略。悬浮有机物的生产尚没有可靠的估算,但可以肯定的是,如果考虑悬浮有机物的生产,碳酸盐反向泵的抵消量将进一步下降。

Bach等人<sup>[4]</sup>还指出,营养盐再分配会进一步抵消碳汇效率,其平均值为32%(7%~50%)。营养盐再分配的抵消作用分为两部分。(1)在没有外源营养盐补充的情况下,马尾藻的生长利用了原本可以被浮游植物利用的营养盐,从而抑制了浮游植物的光合固碳作用,降低了原有生物碳泵的作用;(2)浮游植物的PIC对总有机碳(total organic carbon, TOC)的比例比马尾藻更低,因此浮游植物的碳酸盐反向泵作用比马尾藻更弱。对自然生态系统而言,上述第一点是正确的。但是,能产生大规模气候效能的海洋“森林”是需要人为干预的,外部的营养盐(氮、磷、铁等)必须以某种形式补充。因此,营养盐再分配的第一点本身是个伪命题。第二点的核心为PIC:TOC的比值。但是Wang等人<sup>[13]</sup>发现,Bach等人<sup>[4]</sup>在计算过程中选择性地使用了已发表数据,他们选择了更低的浮游植物的PIC:

TOC值。上述错误被纠正之后,营养盐再分配的抵消作用也可以忽略不计。

由于大型海藻具有远高于海洋浮游植物的碳磷比和碳氮比,因此,其单位营养盐的固碳效率高于浮游植物,是海洋“造林”的极佳候选者。如果将部分海藻用于食品和饲料等产业,可以有效降低“造林”成本,使海洋“造林”具有潜在的经济可行性。研究发现,在动物饲料中添加大型藻类还会降低畜类的甲烷排放<sup>[14]</sup>。但是,海洋“造林”也可能会带来负面效应,比如沉降至深海的海藻再矿化可能会对深海生态系统造成潜在影响<sup>[15]</sup>。总之,对任何一种技术的评估应该是全面的和系统的,而不应该是片面的与曲解的。我们应充分认识海洋“造林”存在的不确定性和可能的负面效应,对这种增汇方式的推广应持谨慎乐观的态度。未来的研究需要对海洋“造林”的不确定性、碳足迹及其负面效应进行进一步研究,以全面评估其实施的可行性,为有效应对气候变化提供切实可行的解决方案。

**致谢** 国家自然科学基金重大项目(41890800)和福建省自然科学基金(2023J02001)资助。

## 推荐阅读文献

- Berger M, Kwiatkowski L, Ho D T, et al. Ocean dynamics and biological feedbacks limit the potential of macroalgae carbon dioxide removal. *Environ Res Lett*, 2023, 18: 024039
- Dai M, Su J, Zhao Y, et al. Carbon fluxes in the coastal ocean: Synthesis, boundary processes, and future trends. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2022, 50: 593–626
- Bach L T, Boyd P W. Seeking natural analogs to fast-forward the assessment of marine CO<sub>2</sub> removal. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118: e2106147118
- Bach L T, Tamsitt V, Gower J, et al. Testing the climate intervention potential of ocean afforestation using the Great Atlantic *Sargassum* Belt. *Nat Commun*, 2021, 12: 2556
- Bach L T, Tamsitt V, Gower J, et al. Reply to: Ocean afforestation is a potentially effective way to remove carbon dioxide. *Nat Commun*, 2023, 14: 4340
- Salter M A, Rodríguez-Martínez R E, Álvarez-Filip L, et al. Pelagic *Sargassum* as an emerging vector of high rate carbonate sediment import to tropical Atlantic coastlines. *Glob Planet Change*, 2020, 195: 103332
- Paine E R, Schmid M, Boyd P W, et al. Rate and fate of dissolved organic carbon release by seaweeds: A missing link in the coastal ocean carbon cycle. *J Phycol*, 2021, 57: 1375–1391
- Buck-Wiese H, Andskog M A, Nguyen N P, et al. Furoid brown algae inject furoidan carbon into the ocean. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2023, 120: e2210561119
- Robledo D, Vázquez-Delfín E, Freile-Pelegrín Y, et al. Challenges and opportunities in relation to *Sargassum* events along the Caribbean Sea. *Front Mar Sci*, 2021, 8: 699664
- Powers L C, Hertkorn N, McDonald N, et al. *Sargassum* sp. act as a large regional source of marine dissolved organic carbon and polyphenols. *Glob Biogeochem Cycle*, 2019, 33: 1423–1439
- Jiang M, Hall-Spencer J M, Gao L, et al. Nitrogen availability regulates the effects of a simulated marine heatwave on carbon sequestration and phycosphere bacteria of a marine crop. *Limnol Oceanogr*, 2024, 69: 339–354
- Li H, Zhang Z, Xiong T, et al. Carbon sequestration in the form of recalcitrant dissolved organic carbon in a seaweed (Kelp) farming environment. *Environ Sci Technol*, 2022, 56: 9112–9122
- Wang W L, Fernández-Méndez M, Elmer F, et al. Ocean afforestation is a potentially effective way to remove carbon dioxide. *Nat Commun*, 2023, 14: 4339
- Roque B M, Brooke C G, Ladau J, et al. Effect of the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* on methane production and rumen microbiome assemblage. *Anim Microbiome*, 2019, 1: 3
- Levin L A, Alfaro-Lucas J M, Colaço A, et al. Deep-sea impacts of climate interventions. *Science*, 2023, 379: 978–981