

DOI: 10.20103/j.stxb.202305141008

王桃妮, 张子莲, 全为民. 牡蛎礁生境: 海岸带可持续发展的潜在碳汇. 生态学报, 2024, 44(7): 2706-2716.

Wang T N, Zhang Z L, Quan W M. Oyster reef habitat: a potential carbon sink for sustainable development of coastal zone. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2706-2716.

牡蛎礁生境: 海岸带可持续发展的潜在碳汇

王桃妮^{1,2,3}, 张子莲^{1,2}, 全为民^{3,*}

1 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

2 厦门大学海洋微生物与地球圈层研究所 福建省海洋碳汇重点实验室, 厦门 361102

3 中国水产科学研究院东海水产研究所农业农村部渔业遥感重点实验室, 上海 200090

摘要: 牡蛎礁生境是指由聚集的牡蛎和其他生物及环境堆积形成的复合生态系统, 其固碳和储碳潜力巨大, 在海岸带生态系统中发挥着重要的作用。然而, 目前对牡蛎礁生境碳源与汇的认识仍存在不足, 主要在于牡蛎钙化和呼吸作用都释放 CO₂, 而碳源与汇的评估忽视了钙化、同化和沉积过程带来的整体碳汇价值及牡蛎礁生态系统功能带来的碳汇效应。因此, 有必要重新认识牡蛎礁生境的碳汇价值。一方面, 牡蛎礁生境的碳源和碳汇需要从牡蛎礁自身的整体碳循环中进行评估, 包括牡蛎礁系统中的沉积、钙化、呼吸作用及侵蚀、再悬浮和再矿化作用; 另一方面, 牡蛎礁生态系统服务引起的碳汇效应需从牡蛎礁的生态系统服务价值角度进行评估, 将生态系统服务价值及碳价值进行关联, 从而纳入碳汇核算体系。从实现海岸带可持续增汇角度出发, 综述了牡蛎礁生境中碳的源与汇; 阐述了容易被人们忽视的微生物在牡蛎礁生境碳汇中的作用; 以保护和生态修复为目的, 进一步提出可实现牡蛎礁生境最大潜在碳汇的策略, 以期为实现海洋负排放及践行“国家双碳战略”提供理论和技术支撑。

关键词: 牡蛎礁; 碳汇; 负排放; 生态修复; 可持续发展

Oyster reef habitat: a potential carbon sink for sustainable development of coastal zone

WANG Taoni^{1,2,3}, ZHANG Zilian^{1,2}, QUAN Weimin^{3,*}

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

2 Institute of Marine Microbes and Ecospheres, Fujian Key Laboratory of Marine Carbon Sequestration, Xiamen University, Xiamen 361102, China

3 Key Laboratory of Fishery Remote Sensing, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: Oyster reef habitat is a complex ecosystem composed of clustered oysters, other organisms, and environments, with great potential of carbon fixation and storage, which makes oysters reef systems play critical roles in coastal ecosystems. However, there is currently insufficient understanding of the carbon sources and sinks in oyster reef habitats. The main issue is that both oyster calcification and respiration release CO₂, and the assessment of carbon sources and sinks overlooks the overall carbon sink value brought about by the processes of calcification, assimilation, and deposition, as well as the carbon sink effects from oyster reef ecosystem functions. Therefore, it is necessary to recognize the carbon sink value of oyster reef habitat again. On the one hand, the carbon source and sink of oyster reef habitats need to be evaluated from the overall carbon cycle of the oyster reef itself, including sedimentation, calcification, respiration, erosion, resuspension and remineralization in the oyster reef system; On the other hand, the carbon sequestration effect caused by oyster reef ecosystem services needs to be evaluated from the perspective of the ecosystem service value of oyster reefs, linking

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42141003, 42188102, 41861144018)

收稿日期: 2023-05-14; 网络出版日期: 2024-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: quanweim@163.com

ecosystem service value and carbon value, and thus incorporating it into the carbon sequestration accounting system. In order to systematically assess the carbon "source-sink" of oyster reef habitats and effectively promote the ecological restoration of oyster reefs, starting from the perspective of achieving sustainable carbon sequestration in coastal ecosystems, this study firstly proposes a strategy for the overall evaluation of carbon sources and sinks, then explores the coupling effects of oyster reef habitats with other blue carbon, briefly discusses the role of carbon sequestration and storage driven by microorganisms, and finally emphasizes the technical system for the sustainable development of oyster reef habitats. To sum up, a system strategy is proposed to protect the ecological restoration of oyster reefs, including (1) to clarify the source and sink of carbon in oyster reef habitat from the perspective of combining the three pumps of BP, CCP, and MCP with ecosystem functions; (2) establishing the coupling between oysters and other blue carbon systems to regulate the increase of coastal ecosystems from the perspective of material circulation and energy flow; (3) to study the living environment to increase the survival rate of oysters and change the attachment base of oysters to complete the protection and restoration of oyster reefs. These measures can provide theoretical and technical support for ocean negative carbon emission and the implementation of the "Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals".

Key Words: oyster reef; carbon sink; negative emissions; ecological restoration; sustainable development

中国海岸带及近海的固碳能力、储碳潜力远大于相同气候带的陆地和大洋生态系统^[1-2]。其中,海岸带蓝碳生态系统的固持碳量达到全球海洋活体生物的一半。然而,由于生态系统改变和被破坏,导致了全球每年多出近 20% 的 CO₂ 排放。众多研究表明通过保护和恢复蓝碳生态系统来增加生态碳汇已成为海岸带增汇的主要策略^[3-6]。因此,为支撑 ONCE 计划,服务国家“双碳”战略和应对由 CO₂ 带来的全球变暖问题,中国应该加强海岸带生态系统的保护和修复,并且在增加海岸带整体碳汇的同时提高生态系统服务功能。

牡蛎(Ostreidae)是软体动物门双壳纲牡蛎科动物的总称。牡蛎礁生境是指由聚集的牡蛎和其他生物及环境组成的复合生态系统^[7],包括养殖牡蛎、牡蛎礁(oyster reef)、牡蛎床(oyster bed)和牡蛎聚集体(oyster aggregation)。其中,牡蛎礁是牡蛎常见的聚集形式,生命周期大概 3 年以上(图 1)。

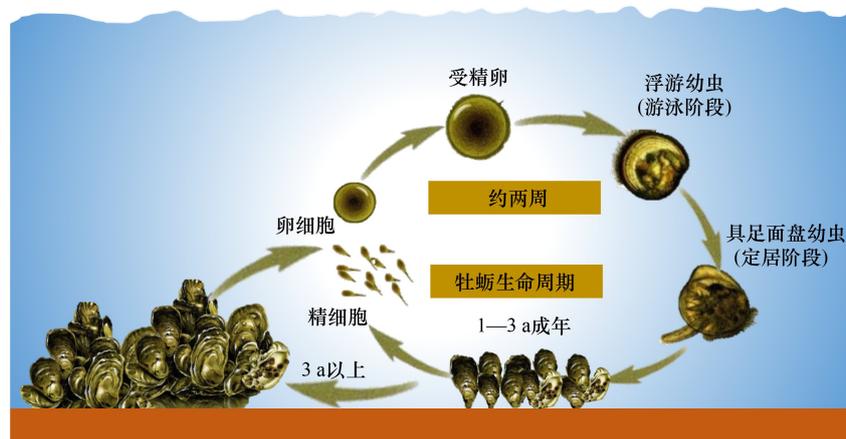


图 1 牡蛎礁生命周期(改自^[8])

Fig.1 Oyster reef life cycle

牡蛎礁生境广泛分布于全球河口、海湾和滨海区域,具有净化水体^[9-10]、耦合能量^[11-12]、提供栖息地^[11,13-14]、防止海岸侵蚀^[13,15]和碳汇^[16-18]等多种生态系统服务功能。研究发现,牡蛎礁的生态系统服务价值(10.6 万美元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)远高于永久湿地(2.1 万美元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)、海草场(3.1 万美元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)和红树林(8.2 万美元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)(以 2017 年市价计算)^[19]。在碳汇方面,牡蛎的钙化过程会固定部分碳,活体牡蛎沉积作用

会加速有机碳沉降及运输^[20]。然而,由于人为活动的影响,目前全球 85%的牡蛎礁已经消失^[19,21-22]。研究显示自 1700 年至今,美国北卡罗莱纳州牡蛎礁被破坏后,氧化作用加强,释放的有机碳(organic carbon, OC)达到 $3.71 \times 10^8 \text{ Mg}$ ^[23]。因此,保护和修复牡蛎礁生境,有望使其成为大气碳的汇^[24]。另外,由于牡蛎的钙化和呼吸作用释放碳,使得对牡蛎礁生境碳源与汇的认识存在不足。因此,本研究围绕牡蛎礁生境生态系统,通过梳理和归纳国内外对牡蛎礁生境碳源与汇的研究,从其碳赋存形态与循环过程、牡蛎礁生境自身的碳汇作用、牡蛎礁生境与海洋“蓝碳”的耦合作用、碳源与汇需整体评估和微生物对牡蛎礁生境固碳和储碳影响的角度探讨了牡蛎礁生境的可持续发展碳汇价值,最后强调牡蛎礁生境可持续发展的技术体系,以期服务于海岸带增汇策略。

1 牡蛎礁生境中碳的源与汇

1.1 碳赋存形态及和碳循环过程

在牡蛎礁生境中,碳存在于牡蛎(壳、组织)、海水和沉积物中。牡蛎壳由外向里可分为角质层、棱柱层(白垩层)和珍珠层;牡蛎壳白垩层主要由比霏石/文石结构稳定的方解石型碳酸钙组成,在生物和非生物矿化下更容易沉积成岩。牡蛎壳中无机碳(inorganic carbon, IC)含量和有机碳含量分别约为 11.1%和 0.5%(干重)^[25],牡蛎软体组织中有有机碳含量为 44%—46%(干重)^[26]。与其他生境相同,海水和沉积物中无机碳由颗粒无机碳(particulate inorganic carbon, PIC)和溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)组成,有机碳则由颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)组成。

由牡蛎主导的碳循环过程主要包括钙化过程(calcification)、同化过程(assimilation)和生物沉积过程(biodeposition)(图 2)。钙化过程是指牡蛎利用水体中的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 形成壳体(CaCO_3);生物同化是指牡蛎滤食水体中的 POC,加速生物沉降,从而将部分 OC 同化进软体组织;生物沉积是指牡蛎滤食悬浮颗粒物和 POC 后通过粪便和假粪便输入海底,同时把部分 OC 和 IC 埋藏并储存于沉积物中。此外,还包括侵蚀、再悬浮和矿化作用等过程。

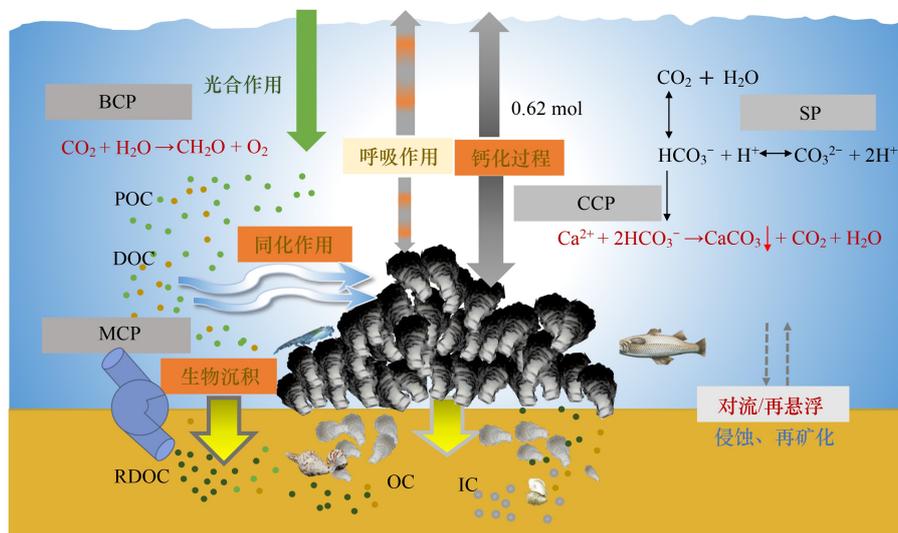


图 2 牡蛎礁生境的碳循环过程(改自^[20,23,27])

Fig.2 Carbon cycling process of oyster reef habitats

BCP: 生物碳泵; SP: 溶解泵; CCP: 碳酸盐泵; MCP: 微型生物碳泵; OC: 有机碳; IC: 无机碳; DOC: 溶解有机碳; POC: 颗粒有机碳; RDOC: 惰性溶解有机碳

牡蛎礁生境的储碳机制涉及到溶解“泵”(solubility pump, SP)、碳酸盐“泵”(carbonate pump, CCP)、生物碳“泵”(biological carbon pump, BCP)及微型生物碳“泵”(microbial carbon pump, MCP)。其中,SP 是指大气

CO₂溶解在海水中,通过物理化学反应产生 CO₃²⁻、HCO₃⁻ 和 H⁺。海水中 DIC 不稳定,部分以 CO₂形式释放回大气,部分以 HCO₃⁻形式参与钙化。CCP 则是牡蛎利用植物光合作用产生的能量来驱动和固定海水中 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺形成牡蛎壳的钙化过程。与其他生境相同,钙化过程为光合作用提供了必需的 CO₂和 H⁺(质子泵)。BCP 则指在光合作用下,CO₂被转化成 POC、大分子 DOC 或有机生物体的过程。在牡蛎礁生境中,牡蛎通过滤食浮游植物和 POC,将呼出的 CO₂供给 BCP 以增加光合作用原料,从而加速 BCP。MCP 是指在微型生物(浮游植物、细菌、古菌、病毒、原生动物等)介导下,活性溶解有机碳(labile dissolved organic carbon, LDOC)被周转成惰性溶解有机碳(recalcitrant dissolved organic carbon, RDOC)的过程和机制^[28-31]。MCP 机制不仅适用于水体,也可解释牡蛎礁生境中沉积环境的储碳过程^[32-34]。

1.2 牡蛎礁生境自身的碳汇作用

牡蛎自身属性的碳汇主要来源于钙化、同化、沉积三种碳循环过程。在钙化固碳方面,沈新强等发现长江口牡蛎礁恢复工程的固碳量达 2700 g/m²,相当于营造 1110 hm²热带森林,指出固碳潜力巨大^[16]。公丕海等的研究表明,莱州湾海洋牧场圆管型增殖礁体上附着牡蛎总固碳量约为 297.5 t,相当于固定封存 1071 t CO₂^[35]。在同化方面,牡蛎软体组织固定的部分碳是生物和微生物的能量供给,随着牡蛎礁的生长,剩余未被利用的成为有机埋藏碳的一部分^[17]。Phillip 等评估了牡蛎礁沉积物岩心的总碳,发现深水牡蛎礁含碳达 2.13%,浅水牡蛎礁达 8.92%,而潮下沉积物中含碳为 3.09%,并指出牡蛎礁没有提高埋藏率,牡蛎礁栖息地对大气碳的减少可能来自于生物同化^[36]。在碳沉降和沉积方面,牡蛎介导的生物沉积速度是自然沉积速度的 40 倍^[37]。研究还发现,长牡蛎摄入的 POC 能量仅 11%被机体吸收,绝大部分以粪便或假粪的形式排放到沉积物中^[38]。在沉积速率方面,研究发现新建牡蛎礁体周边沉积物的有机碳含量相对较高^[39-40]。Lee 等从生物沉降和物理沉积过程量化了模拟实验中沉积物的 OC 与 IC,发现活体牡蛎在运输悬浮颗粒物沉积和有机碳沉降速率方面是死亡牡蛎的 2.9 倍和 3 倍^[20]。另外,与其他蓝碳相比,牡蛎礁周边的碳累积速率未低于平均水平,可达 131 g m⁻² a⁻¹^[41-42]。在碳埋藏效率方面,Fodrie 指明牡蛎礁埋藏活动带下的有机碳可以脱离上覆水或大气相互作用而实现埋藏^[23]。此外,牡蛎礁的三维稳定结构,有利于减缓水流、波浪和沉积再悬浮,从而促进沉积积累^[43]。且随着海平面的上升,沿岸沉积物厚度的上升,浅水或潮下带有礁区域都有助于牡蛎礁生境的可持续碳埋藏^[44-45]。

1.3 牡蛎礁生境与海洋“蓝碳”的耦合作用

牡蛎礁生境除自身碳循环碳汇价值外,对其他蓝碳系统也具有增加固碳和储碳的作用。首先,牡蛎礁生境可提高浮游动物、底栖生物及鱼类的多样性和丰富度^[19,46-49],从而直接增加渔业碳汇。另外,牡蛎的粪便和排泄物作为底栖营养物质,可充当有机肥(organic fertilizer, OF)供给其他蓝碳。例如,牡蛎可以通过滤食水体悬浮物和稳定沉积物促进水下海草的生长及恢复^[50],进而增加海草的固碳和储碳效益。其次,牡蛎礁生境也可影响盐沼的生长与存活。如 Fodrie 等发现修复的美洲牡蛎(*Crassostrea virginica*)礁体附近的盐沼面积正在变大^[23]。针对这个现象,通常认为牡蛎礁可防护盐沼湿地不受海浪侵蚀^[51]。但也有另一种解释是牡蛎礁生境附近的沉积物增长到了盐沼的生存潮位^[52-53],间接促进了盐沼的生存能力、固碳能力及沉积物积累。另外,研究发现牡蛎礁的物理沉积作用可以助力盐沼植物碳埋藏^[53]。

此外,其他蓝碳系统也具有促进牡蛎礁生境固碳和储碳的能力。研究表明海草生物量的增加可提高牡蛎的生长速率,最高生物量的海草可使牡蛎稚贝的生长速率提高 40%^[54]。类似地,研究还发现在海带养殖区附近牡蛎外壳与软体组织的生长速度明显更快,说明了其他蓝碳通过影响年轻牡蛎的生长,来贡献较多的固碳量及较少的 CO₂溢出^[55]。在其他蓝碳对牡蛎礁生境的储碳影响方面,Fodrie 的研究结果表明盐沼边缘礁起到了净碳汇作用^[23]。另外,牡蛎与藻类的协同作用对提高整个系统的生态效益具有显著影响。例如,研究发现牡蛎礁群和海底藻林共生生态系统的生物量、初级生产力和总生产力分别是单系统的 44.04 倍、5.03 倍和 5.34 倍^[56]。总之牡蛎礁生境与其他蓝碳的有机结合,不仅可以促进其他蓝碳的恢复,还能提高牡蛎礁生境的可持续固碳和储碳潜力,从而可持续增加大气 CO₂的吸收。

1.4 牡蛎礁生境碳源与汇的评估

除呼吸作用排放 CO_2 外,受大气 CO_2 分压的影响,钙化过程吸收 2 mol HCO_3^- ,生成 1 mol 碳酸钙壳的同时也会产生 0.62 mol 的 CO_2 并最终排放到大气中^[57]。从海洋无机碳的循环角度看钙化是固碳过程,而碳源与汇的格局并不能单从钙化作用进行定论,而应该是对整个生境的碳吸收与释放进行评估^[58](图 2)。在牡蛎养殖生境中,国内有很多的研究案例仍然将钙化结果直接视为碳汇^[59-65],公式为贝类固碳=软体组织固碳+贝壳固碳,而忽视了钙化与呼吸释碳。基于此方法,计算出 2016—2021 年全国牡蛎养殖固碳可达 $4.0 \times 10^5 \text{ t}$ (图 3),但实际上钙化过程释放了超过一半的 CO_2 (图 3),所以此方法高估了钙化固碳量。唐启升等用能量收支方法^[66]评估了近 20 年来我国养殖贝类的碳汇潜力,可表示为:使用碳=移出碳+储存碳+释放碳,当移除碳和储存碳之和大于呼吸和钙化释放碳,就是碳汇,其结果显示牡蛎的移出和储存碳占使用碳的 64.3% ^[34](图 3)。但移出碳中的有机碳若没有被完全埋藏,在气候变化的影响下,依然会发生氧化而进行碳释放,视为碳转移。在牡蛎礁生境中,Fodrie 等纳入了 1 mol 碳酸钙壳生成时释放 0.62 mol CO_2 的影响,根据公式:储存碳=有机碳-无机碳 $\times 0.62$,认为有机碳库大于与 CO_2 排放相关的无机碳库时,牡蛎礁生境就是碳汇,反之则是碳源。该研究发现近十年的北卡罗莱纳州浅水潮下带牡蛎礁有净碳汇作用,每公顷牡蛎礁的年储碳量可达 $(1.0 \pm 0.4) \text{ MgC}$,而位于潮间带沙地的牡蛎礁则是净碳源,其碳酸盐的沉积量可达 $(7.1 \pm 1.2) \text{ MgC}$ ^[23]。此方法未将呼吸释放碳纳入其中,且忽视了已沉积的碳酸盐。

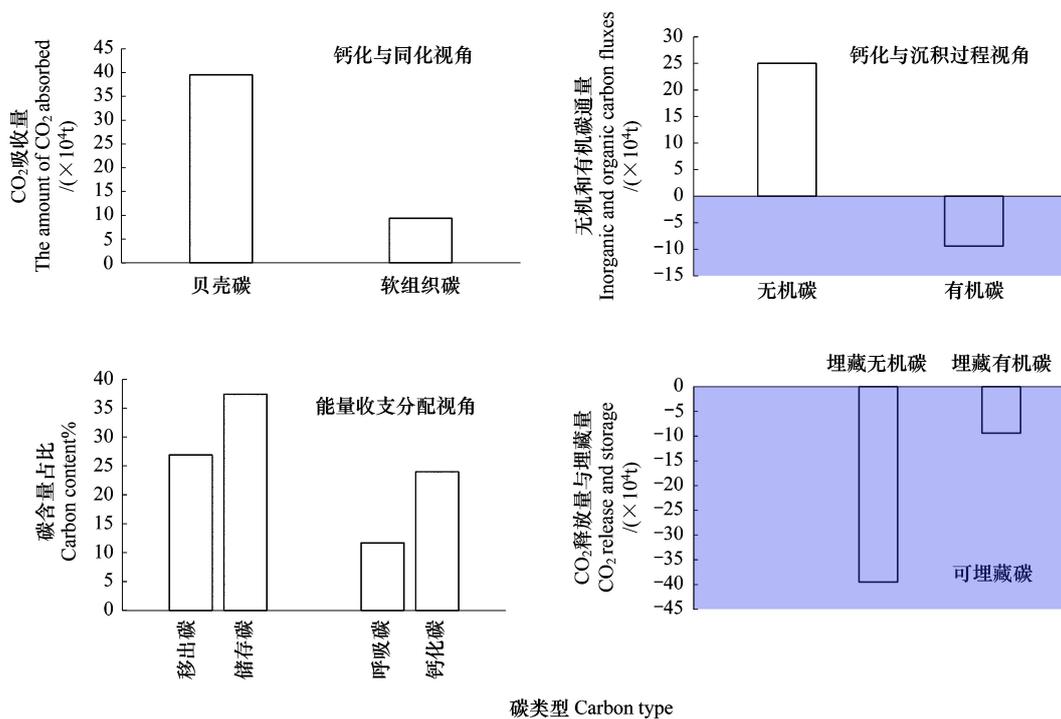


图 3 牡蛎礁生境的碳汇评估方法

Fig.3 Carbon sink assessment methods for oyster reef habitats

数据来源:2016—2022《中国渔业统计年鉴》,图中蓝色区域代表埋藏

因此,牡蛎礁生境碳源与汇需要从牡蛎礁自身整体碳循环^[20]和由牡蛎礁生态系统服务价值引起的碳汇效应进行评估。牡蛎礁自身的碳收支:净储存碳=(生物沉降作用+沉积作用+钙化作用)-(呼吸作用 CO_2 +钙化作用 CO_2)-(侵蚀作用+再悬浮作用+矿化作用)(图 1)。且牡蛎礁碳的源与汇需因地制宜,当储存的有机和无机埋藏量大于释放碳量,即总储存碳大于 0,则为碳汇。对于新建牡蛎礁,在建礁周期内总储碳为始末储碳差值,若为正值,则为碳汇^[58]。另外,在不考虑侵蚀、再悬浮和矿化的情况下,2016—2020 年的养殖牡蛎被

全部埋藏或以牡蛎礁的形式生长,到目前为止是大气碳的汇(图 3)。之所以如此,是因为牡蛎个体钙化释放碳大于呼吸释放碳^[34](图 3),且表观 IC 和 OC 埋藏碳量 4.9×10^5 t 远大于释放碳。另一方面,牡蛎礁生态系统服务引起的碳汇效应需从牡蛎礁的生态系统服务价值角度进行评估,将生态系统服务价值及碳价值进行关联,从而纳入碳汇核算体系。

2 微生物对牡蛎礁生境碳汇的作用

2.1 牡蛎改善河口富营养化,促进有机固碳和储碳

微生物主导的碳循环过程控制着环境中碳的来源及去向,其对牡蛎礁生境的碳转化和储存效果与牡蛎改善富营养化的作用相关。在富营养化河口区域,营养盐浓度相对较高,C:N 和 C:P 比例降低,微生物呼吸作用加强,且活化的溶解有机碳较多,容易将富营养化河口区域变成 CO_2 的源^[30,67]。牡蛎礁生境主要是通过牡蛎滤食藻类来控制富营养化,牡蛎日滤水量高达 189 L(我国牡蛎产业发展报告)。此外,牡蛎滤食之后的排泄物沉积到海底,刺激底栖微生物发生反硝化作用,将硝酸盐及亚硝酸盐还原为气态氮化物和氮气,也可缓解富营养化并增加碱度^[68-70]。另外,适宜的牡蛎容纳量不会添加额外的营养物质,因为底栖的营养物质和能量可支持植物的初级生产和系统的有效利用^[71-72]。同时,牡蛎礁与牡蛎养殖具有相似的生物地球化学功能^[72]。牡蛎礁生境在河口富营养化区域发挥作用后,微生物主要是通过以下 4 个过程参与固碳、转化和封存碳。第一,底栖环境的改善和营养物质的供给可能会提高其周边的植被多样性,影响微生物群落和功能,进而提升微生物的固碳能力^[45]。第二,营养盐浓度相对降低有助于增加 C:N 和 C:P 的比例,使得有机碳的周转明显,可能增加 RDOC。另外,营养物质降低后,微生物呼吸作用减弱,有机碳积累增加,有利于沉积储碳^[30](图 4)。第三,随着底栖牡蛎的生长,会增加有机埋藏。因为底部表层微生物好氧分解有机物会造成底栖环境的厌氧性,而厌氧是硫化物促使碳封存的主要条件^[73]。第四,底栖微生物的厌氧呼吸代谢可产生较少的 CO_2 和更多的碳酸氢盐,来增加额外的碳汇^[70,73]。综上所述,牡蛎礁生境不仅扩大了水体净化和渔业碳汇的可持续发展,同时间接促进了微生物对碳的有机转化效率和储存能力。

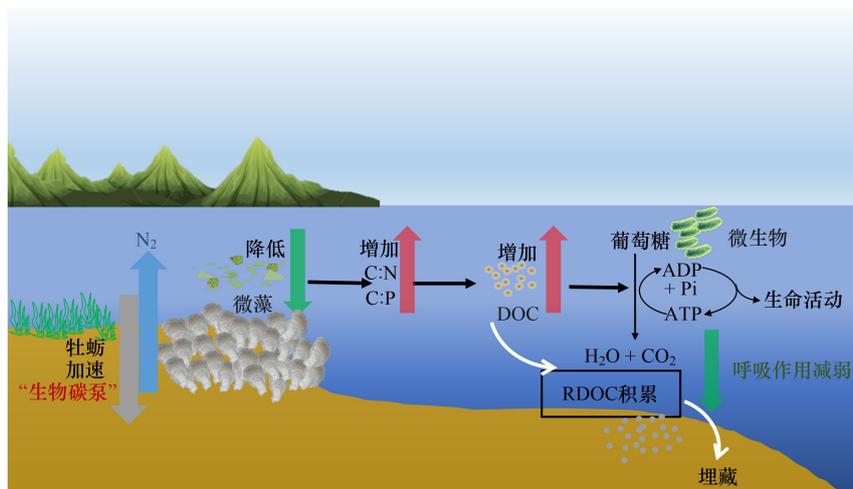


图 4 富营养化河口牡蛎礁生境 N_2 去除对 MCP 的正反馈及增汇机制

Fig.4 Positive feedback on MCP from oyster reef habitats with N_2 removal in eutrophic estuaries

2.2 牡蛎发生侵蚀、溶解增加碱性和无机固碳

牡蛎礁是典型的生物礁碳酸盐岩,在生物及非生物作用下,经过不断的堆积和沉积可形成不同类型石灰岩。碳酸盐风化是生物地球化学循环的关键过程,可在千年到数百万年的时间尺度上来调节 CO_2 吸收和释放^[74-75]。牡蛎礁发生的侵蚀、溶解作用与碳酸盐风化过程相似,同样影响着地球的碳循环进程^[76]。比如,红

树林区域碳酸盐沉积物溶解是大气 CO_2 的常年汇,是红树林储存有机碳的 23 倍^[77]。据 Fodrie 统计,北卡罗来纳州区域的牡蛎礁若有超过 50% 的贝壳被溶解,将有助于二氧化碳排放的减少^[23]。这给从时间尺度上的依靠牡蛎壳溶解增加碳汇提供了证据。在非生物作用中, CaCO_3 与 CO_2 和 H_2O 反应生成的 HCO_3^- 离子,由于水解作用大于电离且产生碱性,使得部分 CO_2 被中和,从而减少排放(图 5)。与微生物相关的风化速率比非生物高几个数量级,包括微生物代谢铁载体或有机酸、细菌生长生物膜破坏矿物表面的稳定性,促进风化。这些可以提高礁体表面及沉积物-水界面的酸化并加速 CaCO_3 溶解,从而增加钙离子释放率^[78-79],可以给新生碳酸钙的形成提供成核或附着位点^[76,80],比如有孔虫、贝类、颗石藻和珊瑚等的形成。另外,微生物分泌的有机基质或胞外聚合物(Extracellular polymeric substance, EPS)也可以结合这部分钙离子,产生的 CO_2 以 HCO_3^- 的形式溶解在基质中,使得该过程产生碱性,为 CaCO_3 析出创造有利条件,即促进了 CaCO_3 沉淀,此过程叫微生物诱导碳酸盐沉淀(microbiological induced calcium carbonate precipitation, MICP)^[66-68](图 5)。在牡蛎礁生境的沉积环境中,较高浓度的 Ca^{2+} 会增加微生物诱导形成沉积碳酸盐的机率,而改变土壤的孔隙度和混凝土裂缝、压力强度、减缓沉积环境被扰动^[81-84]。总之,牡蛎礁生境下微生物参与的侵蚀、溶解作用与局部碱度增加、修复基底裂缝和固化沉积环境密切相关,进而增加牡蛎礁生境可持续埋藏效率。

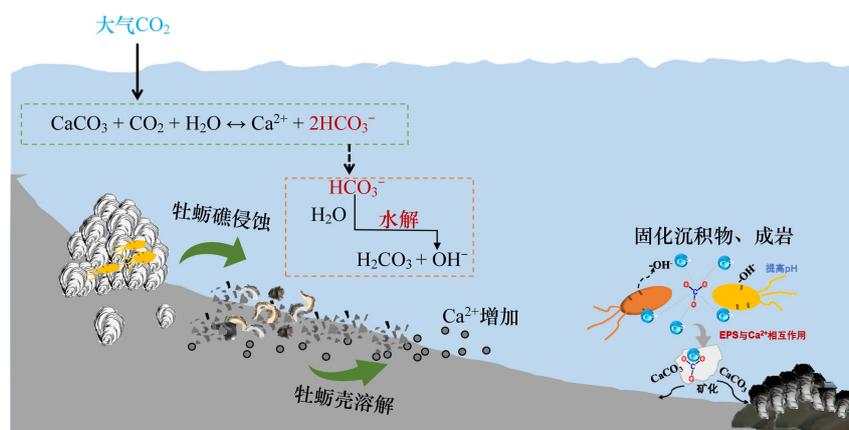


图 5 牡蛎礁侵蚀、溶解及固化过程

Fig.5 Erosion, dissolution and solidification processes of oyster reefs

3 研究展望

面对牡蛎礁生境被破坏的严峻现状,牡蛎礁生境保护和恢复措施受到广泛关注。快速厘清牡蛎礁生境 OC 和 IC 埋藏对大气 CO_2 的影响,发展与其他蓝碳生态系统的耦合增汇模式,加强对牡蛎礁生境的保护和修复意识,成为维持海岸带生态系统平衡的重要前提。因此,建议未来研究的着力点应重点围绕以下几个方面:

3.1 厘清牡蛎礁生境碳的源与汇

从整体上认识牡蛎礁生境碳“源-汇”是正确评估牡蛎礁生境价值的关键,也是推动保护并修复牡蛎礁生境的前提。首先,在不同气候纬度下,选择不同地区、不同潮区、不同牡蛎礁生境类型,建立物质循环和能量传递模型,比较分析碳流途径包括牡蛎自身及食物网和微食物网作用、碳收支及与 CO_2 直接相关的有机和无机碳通量。其次,应从 BP、CCP 和 MCP 三泵与生态系统功能相结合角度来建立牡蛎礁生境的碳汇计量体系,并且将微生物作用下的 RDOC 纳入其中。最后,将室内模拟与原位调查相结合,采取多因素调控的方法,研究牡蛎或牡蛎礁生境碳源引入其他蓝碳系统后,微生物对储存和释放碳过程的影响,进一步为牡蛎礁生境增汇的提供理论支撑。

3.2 发展牡蛎礁生境增汇模式

实践表明一个独立的生态系统是很难实现可持续增汇。研究发现将牡蛎礁生境与其他蓝碳系统耦合,是

发挥碳汇倍增有效的途径。从物质循环和能量流动角度来看,利用牡蛎与其他蓝碳系统耦合来调节海岸带生态系统增汇,是实现 BCP、CCP 和 MCP 结合的最佳模式。其中,加速 BCP 的模式主要有两种:一是在适宜海区扩大牡蛎-大型海藻型海洋牧场^[85-86],可采用挂式和礁石式牡蛎进行搭配;二是在不同潮区或海草床、红树林和盐沼区域,分别建立礁石式牡蛎、桩式牡蛎养殖、挂式牡蛎养殖等,从而实现多系统的协同增汇(图 6)。同时在不同情景下,评估牡蛎、底栖动物、鱼类和微生物群落结构及多样性,环境和碳汇效益及通量等方面,打造中国海岸带可持续发展增汇模式,从而进行各国海岸带可持续增汇合作。

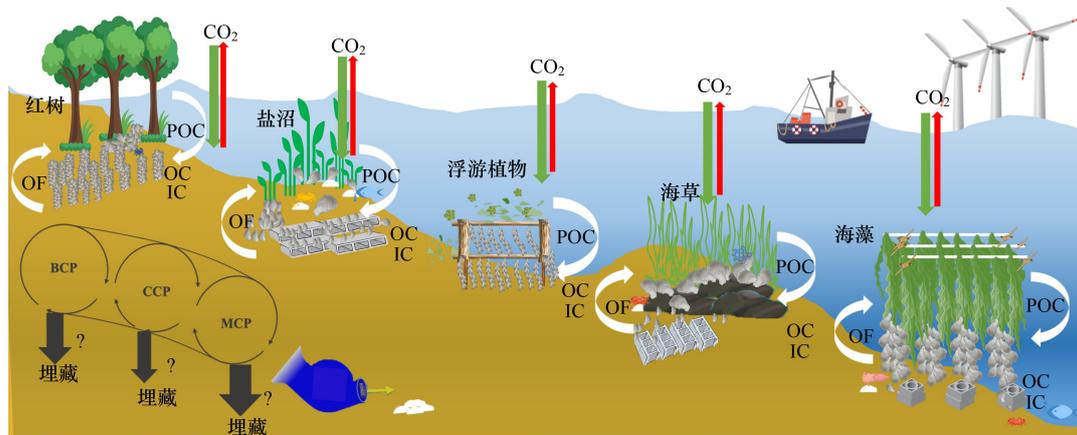


图 6 中国海岸带牡蛎礁生境增汇的概念图

Fig.6 Conceptual map of oyster reef habitats enrichment in coastal zones of China

OF:有机肥

3.3 加强牡蛎礁生境保护与修复

为实现牡蛎礁生境的可持续发展,在增汇背景下研究牡蛎礁的保护与修复成为未来的工作重点。牡蛎礁生境保护和修复的重点是营造牡蛎可生存及生活环境,从技术层面来讲,既可以增加牡蛎成活率又可以减排的附着基是增汇的关键。微生物可修复水泥石块和固化沉积物的特性给研究微生物、贝壳粉末和混凝土等材料结合的牡蛎礁基底提供了理论基础。其中可诱导碳酸盐沉淀的微生物包括 *Bacillus mucilaginous*, *Bacillus subtilis* 和 *Cyanobacteria* 等,代谢过程有反硝化途径,氨基酸途径,脲解途径,光合作用,硫酸盐还原和甲烷氧化^[80,87-88]。研究还发现由脲酶(urease)和碳酸酐酶(carbonic anhydrase)驱动的脲素水解是生物胶产生的关键,bioMASON 公司已经利用野生型芽孢杆菌这个特性产生了碳排放量少于传统水泥的基底材料^[89]。因此,迫切需要企业、微生物与牡蛎礁专家协同合作探究海洋材料对牡蛎礁生境碳减排和增汇方面的研究,特别是牡蛎稚贝附着效果及环境效应研究。

参考文献(References):

- [1] 王秀君,章海波,韩广轩.中国海岸带及近海碳循环与蓝碳潜力.中国科学院院刊,2016,31(10):1218-1225.
- [2] 焦念志,梁彦韬,张永雨,刘纪化,张瑶,张锐,赵美训,戴民汉,翟惟东,高坤山,宋金明,袁东亮,李超,林光辉,黄小平,严宏强,胡利民,张增虎,王龙,曹纯洁,罗亚威,骆庭伟,王南南,党宏月,王东晓,张德.中国海及邻近区域碳库与通量综合分析.中国科学:地球科学,2018,48(11):1393-1421.
- [3] 唐剑武,叶属峰,陈雪初,杨华蕾,孙晓红,王法明,温泉,陈少波.海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态恢复中的应用.中国科学:地球科学,2018,48(6):661-670.
- [4] 焦念志.研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求.中国科学院院刊,2021,36(2):179-187.
- [5] Wang F M, Sanders C J, Santos I R, Tang J W, Schuerch M, Kirwan M L, Kopp R E, Zhu K, Li X Z, Yuan J C, Liu W Z, Li Z A. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. National Science Review, 2021, 8(9): nwa296.
- [6] 焦念志,刘纪化,石拓,张传伦,张永雨,郑强,陈泉睿,汤凯,王誉泽,董海良,唐剑武,叶思源,董双林,高坤山,张继红,薛强,李琦,贺志理,屠奇超,王法明,黄小平,白雁,潘德炉.实施海洋负排放践行碳中和战略.中国科学:地球科学,2021,51(4):632-643.
- [7] Fitzsimons J A, Branigan S, Brumbaugh R D, Mcdonald T, Ermgassen P S E Z. Restoration guidelines for shellfish reefs; The Nature

- Conservancy, Arlington VA, USA, 2019.
- [8] The Nature Conservancy. Eastern Oyster (*Crassostrea virginica*). Loxahatchee River District. 2009. <http://www.loxahatcheeriver.org>.
- [9] Nelson K A, Leonard L A, Posey M H, Alphin T D, Mallin M A. Using transplanted oyster (*Crassostrea virginica*) beds to improve water quality in small tidal creeks; a pilot study. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 298(2): 347-368.
- [10] 全为民, 张锦平, 平仙隐, 施利燕, 李培军, 陈亚瞿. 巨牡蛎对长江口环境的净化功能及其生态服务价值. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 871-876.
- [11] Quan W M, Humphries A T, Shi L Y, Chen Y Q. Determination of trophic transfer at a created intertidal oyster (*Crassostrea ariakensis*) reef in the Yangtze River Estuary using stable isotope analyses. *Estuaries and Coasts*, 2012, 35(1): 109-120.
- [12] 全为民, 沈新强, 罗民波, 陈亚瞿. 河口地区牡蛎礁的生态功能及恢复措施. *生态学杂志*, 2006, 25(10): 1234-1239.
- [13] Quan W M, Zheng L, Li B J, An C G. Habitat values for artificial oyster (*Crassostrea ariakensis*) reefs compared with natural shallow-water habitats in Changjiang River Estuary. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(5): 957-969.
- [14] Quan W M, Zhu J X, Ni Y, Shi L Y, Chen Y Q. Faunal utilization of constructed intertidal oyster (*Crassostrea rivularis*) reef in the Yangtze River Estuary, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(10): 1466-1475.
- [15] Brumbaugh R D, Coen L D. Contemporary approaches for small-scale oyster reef restoration to address Substrate *Versus* Recruitment limitation; a review and comments relevant for the Olympia oyster, *Ostrea lurida* Carpenter 1864. *Journal of Shellfish Research*, 2009, 28(1): 147-161.
- [16] 沈新强, 全为民, 袁骥. 长江口牡蛎礁恢复及碳汇潜力评估. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2119-2123.
- [17] 唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 68-73.
- [18] 张继红, 刘毅, 吴文广, 王新萌, 仲毅. 海洋渔业碳汇项目方法学探究. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 151-159.
- [19] McLeod I M, zu Ermgassen P S E, Gillies C L, Hancock B, Humphries A. Can bivalve habitat restoration improve degraded estuaries?. *Coasts and Estuaries*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 427-442.
- [20] Lee H Z L, Davies I M, Baxter J M, Diele K R, Sanderson W G. Missing the full story: first estimates of carbon deposition rates for the European flat oyster, *Ostrea edulis*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2020, 30(11): 2076-2086.
- [21] Jackson J B C, Kirby M X, Berger W H, Bjorndal K A, Botsford L W, Bourque B J, Bradbury R H, Cooke R, Erlandson J, Estes J A, Hughes T P, Kidwell S, Lange C B, Lenihan H S, Pandolfi J M, Peterson C H, Steneck R S, Tegner M J, Warner R R. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 2001, 293(5530): 629-637.
- [22] Beck M W, Brumbaugh R D, Airoidi L, Carranza A, Coen L D, Crawford C, Defeo O, Edgar G J, Hancock B, Kay M C, Lenihan H S, Luckenbach M W, Toropova C L, Zhang G F, Guo X M. Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management. *BioScience*, 2011, 61(2): 107-116.
- [23] Fodrie F J, Rodriguez A B, Gittman R K, Grabowski J H, Lindquist N L, Peterson C H, Piehler M F, Ridge J T. Oyster reefs as carbon sources and sinks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, 284(1859): 20170891.
- [24] 奉杰, 张涛, 马培振, 白涛, 徐江玲, 王海艳, 宋浩, 赵伟, 赵亮, 杨美洁, 胡志, 周懿, 石璞, 胡朋朋, 李海州. 牡蛎礁碳源-汇功能研究进展与展望. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 115-125.
- [25] Badman D G. Quantitative studies on trehalose in the oyster, *Crassostrea virginica* Gmelin. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 1967, 23(2): 621-629.
- [26] 陈燕珊, 万萌萌, 林锟, 于贞贞, 王睿, 谭丽菊, 王江涛. 渤海湾渔业碳汇分析与预测初探. *海洋科学*, 2022, 46(9): 77-84.
- [27] 蔡阮鸿, 郑强, 陈晓炜, 徐大鹏, 王煜, 骆庭伟, 张锐. 微型生物碳泵研究进展. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2021, 60(2): 355-366.
- [28] Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Kirchman D L, Weinbauer M G, Luo T W, Chen F, Azam F. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8(8): 593-599.
- [29] Hansell D, Carlson C, Repeta D, Schlitzer R. Dissolved organic matter in the ocean: a controversy stimulates new insights. *Oceanography*, 2009, 22(4): 202-211.
- [30] Jiao N Z, Robinson C, Azam F, Thomas H, Baltar F, Dang H, Hardman-Mountford N J, Johnson M, Kirchman D L, Koch B P, Legendre L, Li C, Liu J, Luo T, Luo Y W, Mitra A, Romanou A, Tang K, Wang X, Zhang C, Zhang R. Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean-future research directions. *Biogeosciences*, 2014, 11(19): 5285-5306.
- [31] Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Kirchman D L, Weinbauer M G, Luo T W, Chen F, Azam F. The microbial carbon pump and the oceanic recalcitrant dissolved organic matter pool. *Nature Reviews Microbiology*, 2011, 9(7): 555.
- [32] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 17105.
- [33] Lian J, Zheng X X, Zhuo X C, Chen Y L, He C, Zheng Q, Lin T H, Sun J, Guo W D, Shi Q, Jiao N Z, Cai R H. Microbial transformation of distinct exogenous substrates into analogous composition of recalcitrant dissolved organic matter. *Environmental Microbiology*, 2021, 23(5): 2389-2403.
- [34] 唐启升, 蒋增杰, 毛玉泽. 渔业碳汇与碳汇渔业定义及其相关问题的辨析. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 1-7.
- [35] 公丕海, 李娇, 关长涛, 李梦杰, 刘超. 莱州湾增殖礁附着牡蛎的固碳量试验与估算. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 3032-3038.
- [36] Westbrook P, Heffner L, La Peyre M K. Measuring carbon and nitrogen bioassimilation, burial, and denitrification contributions of oyster reefs in Gulf coast estuaries. *Marine Biology*, 2019, 166(1): 4.
- [37] Giles H, Pilditch C A. Effects of diet on sinking rates and erosion thresholds of mussel *Perna canaliculus* biodeposits. *Marine Ecology Progress*

- Series, 2004, 282: 205-219.
- [38] Bernard F R. Annual biodeposition and gross energy budget of mature Pacific oysters, *Crassostrea gigas*. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1974, 31(2): 185-190.
- [39] Kellogg M L, Cornwell J C, Owens M S, Paynter K T. Denitrification and nutrient assimilation on a restored oyster reef. Marine Ecology Progress Series, 2013, 480: 1-19.
- [40] Feinman Sarah G, Farah Yuna R, Bauer Jonathan M, Bowen Jennifer L. The influence of oyster farming on sediment bacterial communities. Estuaries and Coasts, 2018, 41(3): 800-814.
- [41] Veenstra J, Southwell M, Dix N, Marcum P, Jackson J, Burns C, Herbert C, Kemper A. High carbon accumulation rates in sediment adjacent to constructed oyster reefs, Northeast Florida, USA. Journal of Coastal Conservation, 2021, 25(4): 1-11.
- [42] McLeod E, Chmura G, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte C, Lovelock C, Schlesinger W, Silliman B. 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, 2011, 9(10): 552-560.
- [43] Chowdhury M S N, Walles B, Sharifuzzaman S, Shahadat Hossain M, Ysebaert T, Smaal A C. Oyster breakwater reefs promote adjacent mudflat stability and salt marsh growth in a monsoon dominated subtropical coast. Scientific Reports, 2019, 9: 8549.
- [44] 范昌福, 王宏, 裴艳东, 刘志广, 王福, 田立柱, 商志文. 渤海湾西北岸滨海湖埋藏牡蛎礁古生态环境. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 33-41.
- [45] 韩广轩, 宋维民, 李远, 肖雷雷, 赵明亮, 初小静, 谢宝华. 海岸带蓝碳增汇: 理念、技术与未来建议. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 492-503.
- [46] Erngassen P S E, Grabowski J H, Gair J R, Powers S P. Quantifying fish and mobile invertebrate production from a threatened nursery habitat. Journal of Applied Ecology, 2016, 53(2): 596-606.
- [47] Wong M C, Peterson C H, Piehler M F. Evaluating estuarine habitats using secondary production as a proxy for food web support. Marine Ecology Progress Series, 2011, 440: 11-25.
- [48] Grabowski J H, Brumbaugh R D, Conrad R F, Keeler A G, Opaluch J J, Peterson C H, Piehler M F, Powers S P, Smyth A R. Economic valuation of ecosystem services provided by oyster reefs. BioScience, 2012, 62(10): 900-909.
- [49] Crawford C, Edgar G, Gillies C L, Heller-Wagner G. Relationship of biological communities to habitat structure on the largest remnant flat oyster reef (*Ostrea angasi*) in Australia. Marine and Freshwater Research, 2020, 71(8): 972.
- [50] Newell R I E, Koch E W. Modeling seagrass density and distribution in response to changes in turbidity stemming from bivalve filtration and seagrass sediment stabilization. Estuaries, 2004, 27(5): 793-806.
- [51] Scyphers S, Powers S, Heck K L, Byron D. Oyster reefs as natural breakwaters mitigate shoreline loss and facilitate fisheries. Plos One, 2011, 6(8): e22396.
- [52] Davis J L, Currin C A, O'Brien C, Raffenburg C, Davis A. Living shorelines: coastal resilience with a blue carbon benefit. PLoS One, 2015, 10(11): e0142595.
- [53] Ridge J T, Rodriguez A B, Fodrie F J. Salt marsh and fringing oyster reef transgression in a shallow temperate estuary: implications for restoration, conservation and blue carbon. Estuaries and Coasts, 2017, 40(4): 1013-1027.
- [54] Ricart A M, Gaylord B, Hill T M, Sigwart J D, Shukla P, Ward M, Ninokawa A, Sanford E. Seagrass-driven changes in carbonate chemistry enhance oyster shell growth. Oecologia, 2021, 196(2): 565-576.
- [55] Young C S, Sylvers L H, Tomasetti S J, Lundstrom A, Schenone C, Doall M H, Gobler C J. Kelp (*Saccharina latissima*) mitigates coastal ocean acidification and increases the growth of North Atlantic bivalves in lab experiments and on an oyster farm. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 881254.
- [56] 全国水产技术推广总站组. 增殖型海洋牧场技术模式. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [57] Ware J R, Smith S V, Reaka-Kudla M L. Coral reefs: sources or sinks of atmospheric CO₂?. Coral Reefs, 1992, 11(3): 127-130.
- [58] 张称意, 于宏敏, 李贵才, 邓正苗, 谢永宏. 湿地碳汇的科学基础与利用的热点研究. 气候变化绿皮书: 应对气候变化报告. 社会科学文献出版社, 2022. 246-256.
- [59] 岳冬冬, 王鲁民. 中国海水贝类养殖碳汇核算体系初探. 湖南农业科学, 2012(15): 120-122, 130.
- [60] 于佐安, 谢玺, 朱守维, 杜尚昆, 李晓东, 李大成, 周遵春, 王庆志. 辽宁省海水养殖贝藻类碳汇能力评估. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 382-386.
- [61] 葛红星, 赵杰, 董志国. 2016—2020年江苏省海水养殖贝类生产情况及碳汇评估. 江苏海洋大学学报: 自然科学版, 2022, 31(2): 1-6.
- [62] 赵祺, 张云岭, 崔晨, 张秀文, 齐遵利, 孙绍永. 河北省海水贝藻养殖碳汇强度评估与脱钩分析. 河北渔业, 2022(5): 35-39, 44.
- [63] 孙雪峰, 陈爱华, 张雨, 张志东, 曹奕, 陈素华, 李秋洁, 吴杨平. 江苏省海水养殖贝藻类碳汇能力评估. 水产养殖, 2022, 43(8): 8-12.
- [64] 顾波军, 朱梓豪. 浙江省海水贝藻养殖碳汇能力测算及时空演化. 中国渔业经济, 2021, 39(6): 88-95.
- [65] 尹钰文, 车鉴, 魏海峰, 罗传辉. 辽宁省 2010—2019 年海水养殖贝藻类碳汇能力评估. 海洋开发与管理, 2022, 39(9): 17-23.
- [66] Warren C E, Davis G E. Laboratory studies on the feeding, bioenergetics and growth of fish. The Biological Basis for Freshwater Fish Production. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1967: 175-214.
- [67] Taylor P G, Townsend A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea. Nature, 2010, 464(7292): 1178-1181.
- [68] Kellogg M L, Cornwell J C, Owens M S, Paynter K T. Denitrification and nutrient assimilation on a restored oyster reef. Marine Ecology Progress

- Series, 2013, 480: 1-19.
- [69] Krumins V, Gehlen M, Arndt S, Van Cappellen P, Regnier P. Dissolved inorganic carbon and alkalinity fluxes from coastal marine sediments: model estimates for different shelf environments and sensitivity to global change. *Biogeosciences*, 2013, 10(1): 371-398.
- [70] Jiao N Z, Liu J H, Jiao F L, Chen Q R, Wang X X. Microbes mediated comprehensive carbon sequestration for negative emissions in the ocean. *National Science Review*, 2020, 7(12): 1858-1860.
- [71] zu Ermgassen P S E, Spalding M D, Grizzle R E, Brumbaugh R D. Quantifying the loss of a marine ecosystem service: filtration by the eastern oyster in US estuaries. *Estuaries and Coasts*, 2013, 36(1): 36-43.
- [72] Ray N E, Fulweiler R W. Meta-analysis of oyster impacts on coastal biogeochemistry. *Nature Sustainability*, 2021, 4(3): 261-269.
- [73] Chen Q R, Tang K, Chen X F, Jiao N Z. Microbial sulfurization stimulates carbon sequestration in marine oxygen minimum zones. *Science Bulletin*, 2022, 67(9): 895-898.
- [74] Bufe A, Hovius N, Emberson R, Rugenstein J K C, Galy A, Hassenruck-Gudipati H J, Chang J M. Co-variation of silicate, carbonate and sulfide weathering drives CO₂ release with erosion. *Nature Geoscience*, 2021, 14(4): 211-216.
- [75] Lerman A, MacKenzie F T. CO₂ air-sea exchange due to calcium carbonate and organic matter storage, and its implications for the global carbon cycle. *Aquatic Geochemistry*, 2005, 11(4): 345-390.
- [76] Ramakrishna C, Thriveni T, Ahn J W. A brief review on Oyster shells origin and sedimentary evolution for the formation of limestone. *Journal of Energy Engineering*, 2018, 27(3): 48-56.
- [77] Saderne V, Fusi M, Thomson T, Dunne A, Mahmud F, Roth F, Carvalho S, Duarte C M. Total alkalinity production in a mangrove ecosystem reveals an overlooked Blue Carbon component. *Limnology and Oceanography Letters*, 2021, 6(2): 61-67.
- [78] Gorbushina A A. Life on the rocks. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(7): 1613-1631.
- [79] Rosentreter J A, Maher D T, Erler D V, Murray R, Eyre B D. Seasonal and temporal CO₂ dynamics in three tropical mangrove creeks - A revision of global mangrove CO₂ emissions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 222: 729-745.
- [80] Castro-Alonso M J, Montañez-Hernandez L E, Sanchez-Muñoz M A, Macias Franco M R, Narayanasamy R, Balagurusamy N. Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and its potential in bioconcrete: microbiological and molecular concepts. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 126.
- [81] Mozafari M, Banijamali S, Bairo F, Kargozar S, Hill R G. Calcium carbonate: adored and ignored in bioactivity assessment. *Acta Biomaterialia*, 2019, 91: 35-47.
- [82] Enyedi N T, Makk J, Kótai L, Berényi B, Klébert S, Sebestyén Z, Molnár Z, Borsodi A K, Leél-Össy S, Demény A, Németh P. Cave bacteria-induced amorphous calcium carbonate formation. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8696.
- [83] Seifan M, Berenjian A. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation in designing bio self-healing concrete. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2018, 34(11): 168.
- [84] 代光志, 徐潇航, 丁聪. 微生物诱导沉积碳酸钙机理及其在混凝土裂缝修复中的应用. *混凝土与水泥制品*, 2020(10): 1-7.
- [85] 李娇, 李梦迪, 公丕海, 关长涛. 海洋牧场渔业碳汇研究进展. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 142-150.
- [86] 张继红, 刘纪化, 张永雨, 李刚. 海水养殖践行“海洋负排放”的途径. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 252-258.
- [87] Dupraz C, Reid R P, Braissant O, Decho A W, Norman R S, Visscher P T. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, 2009, 96(3): 141-162.
- [88] Chuo S C, Mohamed S F, Mohd Setapar S H, Ahmad A, Jawaid M, Wani W A, Yaqoob A A, Mohamad Ibrahim M N. Insights into the current trends in the utilization of bacteria for microbially induced calcium carbonate precipitation. *Materials*, 2020, 13(21): 4993.
- [89] 余小飞. 能吸收二氧化碳,还能自我修复,生物混凝土掀起建筑新浪潮, [2020-07-19]. <https://new.qq.com/omn/20200719/20200719A0EW7E00.html>.