中国科学: 地球科学 2021 年 第 51 卷 第 4 期: 632 ~ 643
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论 坛

实施海洋负排放 践行碳中和战略

焦念志[1*], 刘纪化[2], 石拓[2], 张传伦[3], 张永雨[4], 郑强[1], 陈泉睿[1], 汤凯[1], 王誉泽[3], 董海良[5], 唐剑武[6], 叶思源[7], 董双林[8], 高坤山[1], 张继红[9], 薛强[10], 李琦[10], 贺志理[11], 屠奇超[2], 王法明[12], 黄小平[13], 白雁[14], 潘德炉[14]

1. 厦门大学海洋微型生物与地球圈层研究所, 厦门 361101;
2. 山东大学海洋研究院, 青岛 266237;
3. 南方科技大学深圳海洋地球古菌组学重点实验室, 深圳 518055;
4. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 青岛 266101;
5. 中国地质大学(北京)地质微生物与生物地球化学研究中心, 北京 100083;
6. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;
7. 自然资源部中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;
8. 中国海洋大学水产学院, 青岛 266003;
9. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071;
10. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
11. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510006;
12. 中国科学院华南植物园, 广州 510650;
13. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;
14. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

* 通讯作者, E-mail: jiao@xmu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-16; 收修改稿日期: 2020-12-21; 接受日期: 2020-12-23; 网络版发表日期: 2021-03-09
国家重点研发计划专项“全球变化及应对”项目(编号: 2020YFA0608300、2018YFA0605800、2020YFA0607600)、国家自然科学基金NSFC-UNEP合作研究项目(编号: 41861144018)、国家自然科学基金重大研究计划项目(编号: 91751207)和厦门大学地球科学部-校长基金项目(编号: 20720170107)资助

摘要 碳中和是应对气候变化的必由之路, 海洋负排放是实现碳中和的重要途径. 文章提出海洋负排放相关的八个基本路径, 包括陆海统筹减排增汇、海洋缺氧酸化环境减排增汇、滨海湿地减排增汇、养殖环境减排增汇、珊瑚礁生态系统减排增汇、海洋地质碳封存、海洋碳汇核查技术体系, 以及海洋碳汇交易体系和量化生态补偿机制等; 旨在抛砖引玉, 引发研讨、推动研发, 不断细化和完善海洋负排放方案, 为落实碳中和国家战略提供科技支撑.

关键词 海洋碳汇, 负排放, 碳中和, 微型生物碳泵, 生物泵, 碳封存, 碳汇交易

中文引用格式: 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. 2021. 实施海洋负排放 践行碳中和战略. 中国科学: 地球科学, 51(4): 632–643, doi: 10.1360/SSTe-2020-0358
英文引用格式: Jiao N, Liu J, Shi T, Zhang C, Zhang Y, Zheng Q, Chen Q, Tang K, Wang Y, Dong H, Tang J, Ye S, Dong S, Gao K, Zhang J, Xue Q, Li Q, He Z, Tu Q, Wang F, Huang X, Bai Y, Pan D. 2021. Deploying ocean negative carbon emissions to implement the carbon neutrality strategy (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 51(4): 632–643, doi: 10.1360/SSTe-2020-0358

© 2021 《中国科学》杂志社

1　引言

为应对气候变化的严峻形势，2015年《巴黎协定》明确规定了全球增温控制目标并倡导各国自主减排. 中国政府积极响应并承诺“力争CO_2排放于2030年前达到峰值”. 2020年第75届联合国大会上进一步提出“争取2060年前实现碳中和”的宏伟目标. 这是我国向全世界的郑重承诺, 彰显了大国责任. 同时, 我们清醒地认识到, 作为发展中国家, 高质量发展是硬道理, 必须科学规划、合理布局. 实现碳中和的主要路径包括减排(减少CO_2排放)和增汇(增加CO_2吸收), 我国应在尽可能减排的同时大力研发“负排放(主动增汇)”各种途径、落实可行的负排放方案, 为碳中和国家战略提供科技支撑.

2　海洋负排放路径与基本方案

海洋是地球上最大的活跃碳库, 海洋负排放潜力巨大. 国际上, 针对生物泵(Biological pump, BP)等海洋储碳机制的研究已有近四十年的历史, 早在二十多年前就尝试了海洋施肥等地球工程(Geoengineering) (Martin等, 1994), 尽管存在生态后效等争议, 但积累了丰富的科学数据, 为今后实施海洋负排放提供了宝贵的资料. 在国内, 过去近二十年来, 海洋碳汇研究取得了长足进展, 在理论上提出了“微型生物碳泵(Microbial carbon pump, MCP)”储碳机制(Jiao等, 2010), 揭示了海洋巨大惰性溶解有机碳(Recalcitrant dissolved organic carbon, RDOC)的成因. 现代海洋中RDOC碳库的碳量约为6500亿吨, 地球历史上可达现代RDOC碳库的上千倍(Rothman等, 2003; Mcleod等, 2011), 显示了RDOC增汇的研发潜力. 2019年, MCP理论以及相关的增汇路径, 包括陆海统筹减排增汇(Jiao等, 2011)、海水养殖区增汇(Jiao等, 2018)、缺氧区增汇(Jiao等, 2020)等负排放方案纳入联合国气候变化专门委员会(IPCC)特别报告. “十三五”期间, 我国实施了多个与海洋碳汇有关的国家重点研发计划项目, 取得了一系列成果(Ye等, 2015; Ren和Zhang, 2016; Liu等, 2017a; Zhang等, 2017; Zhang等, 2018; Li等, 2019; Sui等, 2019; Li等, 2020; Zhao等, 2020; Yang等, 2020; Gao等, 2020), 为进一步研发可行的海洋负排放技术打下了良好基础. “十四五”期间, 应进一步面向国家重大需求, 推动科学理论转化为服务国家碳中和战略的具体实施方案.

2.1　陆海统筹减排增汇方案

陆源营养物质过量输入不仅会引发近海富营养化和赤潮等生态灾害, 也会影响到河口和近海的储碳. 尽管初级生产力在一定程度上会随营养盐增加而增加, 但由于光合作用产物主要是活性有机碳, 进入环境后反而会成为滋生异养细菌的温床. 尤其是在海源活性有机质激发效应作用下, 相当部分的陆源有机碳在河口和近海会被转化成CO_2释放到大气, 使得高生产力的河口海区反而成为排放CO_2的源(Jiao等, 2011, 2018). 同时, 由于风浪潮流造成沉积物再悬浮, 使得基于颗粒有机碳沉降与埋藏的BP储碳机制被削弱. 而对于MCP而言, 尽管其不受沉降与再悬浮的直接影响, 但氮磷等营养盐浓度过高则不利于RDOC的形成和保存(图1a). 因此, 富营养化的河口海区的储碳量大都低于理论值.

半个世纪以来, 全球化肥生产量持续提高, 农田施肥量有增无减. 我国的化肥产量从改革开放以来大幅度增加, 化肥施用量成倍增长, 已经超出了农作物正常生长所需. 过量的营养盐随雨水冲刷经河流进入海洋, 是造成近海富营养化的主要原因. 通过陆海统筹科学施肥、减少向近海的营养输入, 可望缓解富营养化、增加BP和MCP碳汇总量(Jiao等, 2011, 刘纪化等, 2015)(图1b). 这一观点已经被近海与外海的现场对比实验(Liu等, 2014)以及在小型河流中添加营养盐的实验所证实(Rosemond等, 2015). 这给陆海统筹生态增汇工程提供了低成本高效益的路径(图1b). 通过卫星遥感高频观测和水动力数值模拟等手段, 可实现对流域和近海不同界面碳通量、上层海洋有机碳储量等的定量估算(Bai等, 2015; Liu等, 2015; Li等, 2018; Le等, 2019). 在长江-东海系统的初步研究表明, 通过卫星遥感与三维水动力模型相结合, 可有效评估长江下游段、入河口、入海和陆架扩散的物质通量(Cui等, 2018; Liu等, 2019; Wang等, 2020). 因而, 利用遥感长时序监测及浮标现场观测等, 动态认知河流有效入海通量、河口沉积和陆架输运的动态变化, 可为陆海统筹减排增汇工程提供宏观量化依据.

陆海统筹减排增汇的基本方案: (1) 研究典型河口和近海生态系统微型生物适应机制和储碳效应. 通过

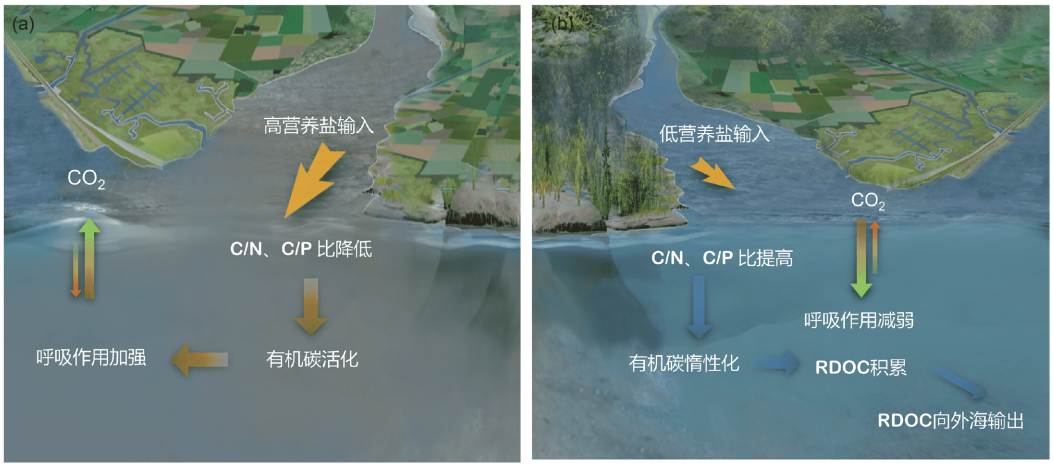

图 1　近海富营养化海区“源”“汇”原理示意图

(a) 大量陆源营养物质入海致使河口海域经常是CO_2的“源”; (b) 通过实施海陆统筹减排增汇生态工程, 可望变“源”为“汇”, 提高河口近海综合储碳能力和生态服务功能. 修改自Jiao等(2011)

整合长期数据资料, 结合实验研究, 解析河口和近海生态系统微型生物对多变环境的适应机制以及对人类活动和气候变化响应的生态韧性, 认知河口近海固碳/储碳动态变化规律, 确立可用于生态调控的主导因素. (2) 研究陆源输入与河口近海碳“源-汇”转换的生态动力学机制, 解析陆源输入有机碳的结构特征、营养盐的动态行为、淡水/海水锋面生物地球化学过程, 通过实验和生态模拟, 认知BP和MCP联合增汇的优化边界条件. (3) 进行陆海统筹典型河口海区负排放生态工程示范: 选择研究基础较好、资料积累较多、陆源输入可控、环境参数可测的河口海区, 开展现场生态调控示范性研究. 结合现场实测数据和面上遥感数据, 检验微型生物固碳/储碳能力随环境条件变化的参数拟合度, 评估大范围推广应用的可行性和生态效益. (4) 建立陆海一体化的碳汇监测网络和陆海联动的减排增汇模式, 统筹协调环境保护与社会经济可持续发展.

2.2　海洋缺氧、酸化环境的负排放方案

自20世纪60年代以来, 受全球变暖和人类活动双重影响, 近海缺氧频次正在显著增加(Breitburg等, 2018), 缺氧改变了食物网结构和生物多样性, 引发内源性海水酸化, 直接影响海洋生态系统健康, 并威胁到渔业资源的可持续性. 我国长江口外、珠江口、渤海等海域都出现大面积缺氧区, 并且有不断扩大的趋势. 在缺氧区实施负排放措施可望既增加碳汇、又缓解环境问题, 可谓一举两得.

海洋缺氧区负排放方案的原理在于MCP与碳酸盐泵的耦合机制(Jiao等, 2020), 也就是谋求无机碳有机碳综合储碳最大化. 一方面, 缺氧环境下保存的有机碳比有氧环境增加50% (Jessen等, 2017). 另一方面, 厌氧微生物活动与人为干预可实现碳酸盐泵的逆转, 即由“源”转“汇”. 单就化学平衡而言, 碳酸钙沉积会放出等当量的CO_2, 因此被认为是“碳酸盐反泵(Carbonate counter pump, CCP)”. 然而, 在缺氧的沉积物环境, 反硝化细菌、硫酸盐还原菌等微生物的生理代谢过程可以提高间隙水的HCO_3^-碱度, 促进海底自生碳酸盐沉积. 与此同时, MCP产物RDOC可以成为碳酸盐晶核, 进而实现MCP、CCP的耦合. 由微生物驱动的碳酸盐沉积(Microbially-induced carbonate precipitation, MICP)在自然海区中客观存在(Seifan和Berenjian, 2019), 但现代海洋中MICP的通量无法满足应对气候变化的需要, 如果人为添加橄榄石等矿物则可有效促进负排放效应(图2). 以往这方面研究主要在于模型评估其碳汇效应(Köhler等, 2013; Montserrat等, 2017; Taylor等, 2015), 矿物化学热力学和动力学过程研究很少(Montserrat等, 2017). 理论上, 1mol的橄榄石能螯合4mol的CO_2, 以硅酸盐(蛋白石)的饱和度(约1mmol/L)作为橄榄石添加的上限来计算(Koltermann等, 2011), 则1吨海水大约可溶解0.1kg橄榄石, 中国近海海域面积为300多万平方公里, 即使仅考虑10m以内较浅的混

图 2　近海缺氧环境微生物诱导碳酸盐沉积(MICP)示意图

合层, 能吸收的CO_2量也将是十分可观的. 此外, 硅酸盐释放的硅有利于硅藻的生长, 提高BP通量, 从而实现MCP+CCP+BP的耦合.

海洋缺氧、酸化环境的负排放基本方案: (1) 对近海典型缺氧酸化海区进行系统的现场观测, 解析MICP自然过程与驱动机制; (2) 在上述基础上进行矿物添加实验, 研究碱性矿物在海水中的行为及其化学热力学和生态动力学过程, 获取系统的过程参数, 解析MCP+CCP+BP储碳最大化的环境条件和调控边界值; (3) 在典型缺氧酸化海区建立海洋负排示范区, 建立MICP综合储碳模型, 打造可复制的海洋负排放工程样板.

2.3　滨海湿地生态服务功能与增汇方案

滨海湿地生态系统是海岸带蓝碳的主要贡献者, 其单位面积的固碳速率可达陆地森林生态系统的十倍以上(Mcleod等, 2011; 章海波等, 2015; Ye等, 2015; 张瑶等, 2017; 唐剑武等, 2018). 然而, 人类活动业已导致海草床的退化, 降低了海岸带储碳能力(Liu等, 2017b; Jiang等, 2017; Jiang等, 2018; Liu等, 2020). 自2011年以来, 国际上开展了大量的海岸带蓝碳研究, 我国也积极参与其中(Mcleod等, 2011; 章海波等, 2015; Howard等, 2017; Jiao等, 2018; Wang等, 2019; Wang等, 2020; Pei等, 2020). 我国滨海湿地生态系统增汇技术路线尚未建立起来, 对一些重要生态过程认知不足, 滨海湿地生态系统储碳潜力仍未得到详细阐述(左平等, 2009; Yuan等, 2015; 布乃顺等, 2018; Jiang等, 2018). 例如, 互花米草通常被认为是外来入侵生物而被强力消杀(包括人为割除、焚烧、施加禾本植物除草剂等), 不仅消耗人力物力财力, 而且药物残留造成一定的环境后效. 对我国海岸带互花米草分布状况的调查分析表明, 在裸露的河口冲积扇环境中, 互花米草是难得的开荒者, 不仅可改造荒滩, 而且可大量吸收氮磷等营养盐, 减轻河口富营养化, 快速生长大量固碳. 由于其根系发达, 植株茂密, 纤维含量高, 可有效形成碳汇. 随着冲积扇的外推互花米草在潮上带则逐渐让位于芦苇等其他禾本植物(图3). 因此, 互花米草的生态功能值得进一步研究, 可望通过趋利避害、发挥其应有的生态作用.

滨海湿地生态系统服务功能与增汇方案: (1) 选择典型的盐沼湿地、红树林湿地和海草床生态系统, 建立滨海湿地碳通量监测网络, 查明滨海湿地水-土-气-生物循环中的碳通量、时空演变与受控机制; (2) 对互花米草等外来物种进行系统的研究, 全面认识其在生态系统中的作用与功能, 综合评估其生态风险和碳汇效应; (3) 构建滨海湿地蓝碳示范区,建立不同类型的滨海湿地固碳增汇的生态管理对策.

2.4　海水养殖环境负排放方案

海水养殖活动不仅可保障人类不断增长的营养和食物需求(Lubchenco等, 2020), 而且还可成为重要的

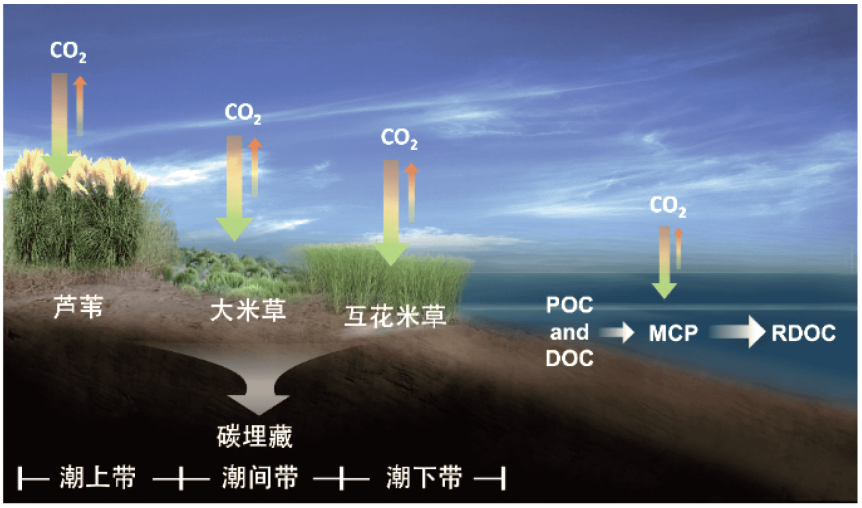

图 3　滨海湿地生态系统主要代表性禾本植物生态位分化及互花米草用于增汇的设想

MCP, 微型生物碳泵; POC, 颗粒有机碳; DOC, 溶解有机碳; RDOC, 惰性溶解有机碳

负排放途径. 目前, 我国仅在近海约0.3%的领海面积开展了大型海藻养殖, 尚有很大的发展空间. 海藻类具有高效吸收CO_2并抵御海洋酸化的潜力(Gao和McKinley, 1994).通过光合作用消耗海水中的CO_2和营养盐合成有机物, 提高表层海水pH值, 促使海洋吸纳更多的CO_2. 海藻养殖过程中产生的颗粒有机碳和溶解有机碳, 分别通过BP和MCP发挥负排放功能(Zhang等, 2017; 张永雨等, 2017; Jiao等, 2018; Sui等, 2019). 有机碎屑要么被埋葬, 要么通过立体养殖底栖贝类或海参加以利用, 而以往被忽视的由MCP转化的RDOC在养殖区具有重要的碳汇效应(Zhang等, 2017; 2020a; 2020b) (图4). 根据BP和MCP储碳原理, 通过清洁能源(太阳能、风能、波浪能等)驱动人工上升流促进营养盐循环增汇措施是生态系统内部调节举措(Jiao等, 2018), 不同于以往向生态系统添加外源物质(施肥等)的做法. 这一绿色发展理念改变了以往把海水养殖简单地认为是增加环境负荷和有机污染的认识, 变"污染源"为"增汇场", 已纳入IPCC应对气候变化的海洋与冰冻圈特别报告(SROCCC). 这从根本上扭转了近海养殖活动一味地遭受环境诟病的局面, 为我国的海水养殖业的发展和海洋负排放生态工程的实施铺平了道路.

海水养殖区负排放的技术路径和实施方案: (1) 系统研究综合海水养殖区固碳储碳过程与机理、查明各个环节的碳足迹、建立有效的碳计量方法、形成技术规程, 为海洋碳汇交易做好技术准备; (2) 实施海水养殖负排放工程, 基于环境承载力进行贝、藻、底栖生物等不投饵生物标准化混养, 形成多层次立体化生态养殖格局, 实施清洁能源驱动的人工上升流生态增汇工程; (3) 建立健康的海洋牧场模式, 恢复和发展原有种群和群落, 例如实施"蛎礁藻林"工程, 以人工块体为附着基恢复浅海活牡蛎礁群, 建立以活牡蛎礁为基底的野生海藻场, 形成野生贝藻生态系统, 拓展蓝碳富集区和海洋生物栖息地, 促进海洋负排放与生态系统可持续发展.

2.5　珊瑚礁生态系统"源-汇"效应评估与增汇方案

珊瑚礁是生产力水平最高的海洋生态系统之一, 其碳循环过程受以虫黄藻(zooxanthellae)为代表的珊瑚水螅体共生微生物的互惠调控(Hoegh-Guldberg等, 2019). 珊瑚共生体(holobiont)通过光合作用、摄食、钙化、降解等生物过程驱动珊瑚礁生态系统有机碳和无机碳的高效循环(Morris等, 2019). 由于珊瑚的钙化过程中伴随CO_2释放, 长期以来人们一直将其定义为"碳源"属性(Ware等, 1992; Gattuso等, 1999). 但现有的数据大多来自对有限珊瑚群落典型代谢活动(光合作用、呼吸作用、钙化、碳酸钙溶解)的评估, 忽视了其他重要的生物地球化学过程(如MCP驱动的RDOC储碳、固氮、硝化、硫酸盐还原等), 以及风浪潮流、营养盐输入、珊瑚礁类型等自然、人为因素对珊瑚生

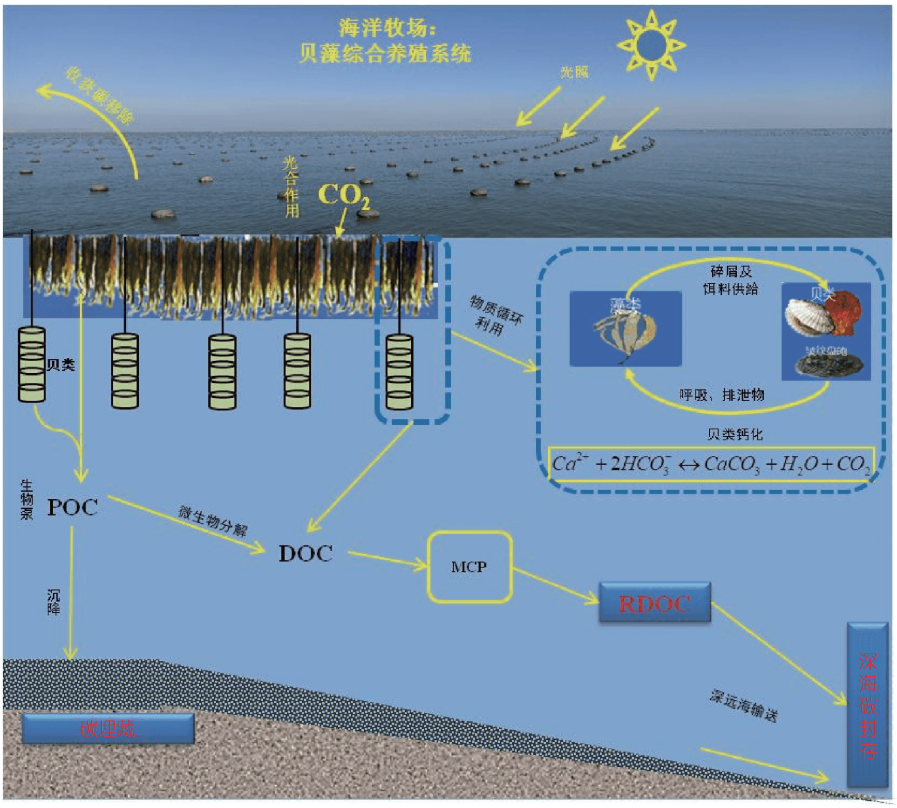

图 4　海水综合养殖区负排放路径示意图

MCP, 微型生物碳泵; POC, 颗粒有机碳; DOC, 溶解有机碳; RDOC, 惰性溶解有机碳

态系统碳循环的影响, 因而可能忽略了珊瑚礁可以是碳汇的情形(Kayanne等, 1995; Chisholm和Barnes, 1998). 新近研究通过对海水中CO_2分压与有机及无机碳代谢间的关系进行验证, 从群落代谢角度提出了以有机净生产力与无机净生产力比值作为海水CO_2对大气源/汇的判断标准(Suzuki和Kawahata, 2003). 目前, 珊瑚礁的碳源/碳汇属性仍然存在争议, 尚未纳入蓝碳收支中(Macreadie等, 2019). 作为兼性营养生物, 造礁珊瑚在自养和异养这两种营养方式间的弹性转换会影响甚至决定珊瑚礁生态系统的碳源汇功能. 即珊瑚异养(如摄食浮游动物、悬浮颗粒有机物、沉积颗粒有机物等)占优势时, 表现为大气CO_2的净源, 而当虫黄藻自养占优势时, 珊瑚礁区表现为CO_2的净汇. 然而, 日益加重的环境问题导致全球造礁珊瑚覆盖率在过去三十年内下降了近50% (Kawahata等, 2019), 海水表面温度异常升高与海洋酸化直接影响到珊瑚与其体内自养虫黄藻的共生关系, 导致珊瑚的白化现象严重, 营养方式改变. 而高强度的人为活动使水体中陆源输入的悬浮颗粒有机物激增, 引发珊瑚礁生态系统生物组成、生态结构遭到破坏, 也影响了珊瑚的营养方式和碳的源汇效应(Putnam等, 2017). 因此新型研究手段的开发与应用迫在眉睫. 近年来兴起的氨基酸同位素示踪技术, 可以根据不同生物的必需氨基酸δ^{13}C值的信号表达所形成的独特的“生物碳指纹”, 初步揭示造礁珊瑚在自养、异养营养方式间转化的动态变动规律及其碳汇效应(Ferrier-Pagès和Leal, 2019; Whiteman等, 2019), 为珊瑚礁生态系统的碳循环提供了更多有效信息(Popp等, 2007; McMahon等, 2016; Fox等, 2019). 此外, 利用纳米二次离子质谱技术, 在亚细胞超微尺度上对珊瑚共生体内的碳指纹进行示踪和定量, 分析有机碳在珊瑚不同组分间的转移过程, 将会更加精细地描绘珊瑚-虫黄藻-微生物间营养互作、元素循环及能量传递的过程与规律(Loussert-Fonta等, 2020). 这些手段的应用将有助于对珊瑚礁碳源汇属性的正确判断.

要回答珊瑚礁碳源汇这一根本问题, 并促使珊瑚礁由碳源向碳汇转变, 当前研发应重点考虑以下技术

路径和实施方案: (1) 加强珊瑚礁生物固碳机理、生物之间的物质转化以及主要的钙化生物对碳酸盐沉积的贡献的研究, 示踪并定量各营养层级和珊瑚共生体的碳流分配, 阐释珊瑚弹性营养方式对碳汇过程的影响机制, 建立珊瑚高分辨率碳特征标识体系; (2) 揭示微型生物在珊瑚礁系统有机碳埋藏/无机碳矿化平衡中的作用, 阐明惰性有机碳在珊瑚礁区的动态变化过程及其“源-汇”效应, 基于实验参数, 建立普适性模型, 回答学术界对于珊瑚礁系统长期悬而未决的“源-汇”悖论; (3) 建立有关珊瑚礁碳循环以及珊瑚礁系统碳增汇模型, 针对不同珊瑚礁区域碳库变动的共性/特异性和环境差异, 研究惰性有机碳调控及人工上升流工程对珊瑚礁系统的生态影响(图5), 解析有机碳生态调控的动力学过程和边界效应, 建立多重胁迫下的珊瑚礁增汇模型, 并在典型海区进行示范研究.

2.6 海洋碳汇核查技术体系研发

海洋碳汇形成过程的复杂性决定了海洋碳汇核查技术研发的难度, 迄今国际上尚未建立海洋碳汇核查标准体系. 微型生物作为海洋生态环境调控和元素循环的关键枢纽, 其驱动的碳汇链条和海洋生态系统功能及产出密切相关. 然而, 由于海洋生态系统的复杂性和现有知识体系的局限性, 海洋碳汇资源核查面临诸多挑战. 微型生物所驱动的海洋碳汇过程的功能基因家族、关键类群及其代谢产物(有机碳分子)尚不明确, 限制了高分辨率碳汇核查手段和关键微型生物检测技术的研发. 目前, 高通量宏基因组测序(Scholz等, 2012)、功能基因芯片(He等, 2012; Tu等, 2014)、以及高分辨率质谱(Zhao等, 2019)等技术已广泛应用于多种环境下微型生物群落(功能基因与物种)及其代谢产物的相关研究. 然而, 由于现有知识体系对海洋碳汇过程的认知不足, 此类高通量高分辨率技术手段尚无法直接用于海洋碳汇核查评估. 我国应发挥海洋微型生物研究的优势, 系统地进行海洋碳汇核查技术体系研发, 占据这个国际制高点. 通过链接无机与有机碳库以及生命与理化过程, 解析碳汇构成, 溯源碳汇成因, 查明主要碳汇的生物族谱, 并按照碳汇效应分级建档, 在此基础上形成系统的海洋碳汇核查理论、监测指标和评估方法.

为解决相关技术瓶颈, 需系统解析海洋微型生物所驱动的碳循环过程, 包括: (1) 根据海洋微型生物多样性极高、生态功能各异、所介导的碳循环过程复杂等特点, 解析碳汇相关的关键微型生物物种、功能基因家族、代谢产物水平上的碳汇图谱; (2) 针对海水的流动性所带来的碳汇溯源难题, 根据微型生物碳泵理论追踪惰性有机碳的化学结构特征、生物合成特征以及基因特征, 研发分子水平上高分辨率有机碳溯源与示踪技术; (3) 通过环境基因组测序, 建立碳汇主线关键微型生物物种和功能基因碳指纹与环境参数数据库; 高分辨率碳指纹监测技术, 如碳汇功能基因芯片、高分辨率质谱等, 建立用于海洋碳汇核查估算的技术规程与标准体系.

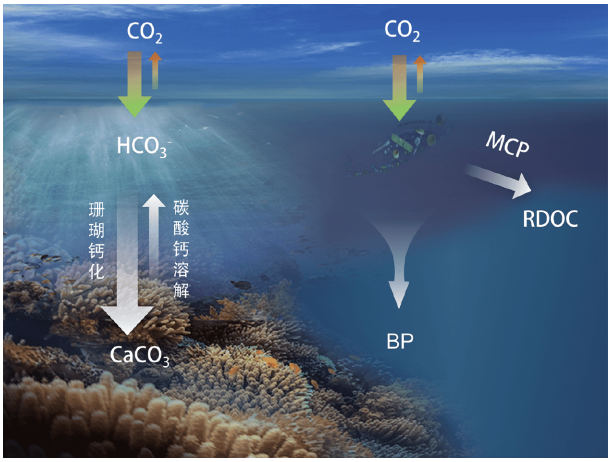

图 5 珊瑚礁生态系统碳“源”与“汇”效应示意图
MCP, 微型生物碳泵; BP, 生物泵; RDOC, 惰性溶解有机碳

2.7 海洋地质碳封存技术方案

CO_2地质封存是全球负排放的重要选项之一. 海洋地质碳封存是把大规模排放源捕集而来的CO_2通过管线和井筒注入到海床表面或海洋地层里面从而实现CO_2长期隔离的一种气候工程前沿技术(Herzog, 1998; Brewer等, 2004).

国际上与碳捕集、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization & Storage, CCUS)相关的海洋地质技术主要分为两大类: 海底地层CO_2单纯封存技术, 以及利用CO_2来强化海洋油气资源的开采从而实现动态封存的CO_2-EOR技术. 目前多个国家已开展这类技术的研发(魏凤等, 2014). 日本于20世纪90年代通过参与IEA/GHG海洋碳封存国际共同研究计划及“与CO_2海洋封存相关的环境影响预测技术研发”计划, 经过三阶段的

研发，最终实现了30万吨级规模的海洋地质碳封存示范(Tanaka等，2017). 英国国家海洋研究中心(NOC)牵头了“海洋碳捕集与封存环境监测战略”国际合作项目，在北海海底模拟CO_2泄漏，测试并开发海底封存CO_2泄漏的监测传感器和技术方法(Marcella等，2020)，成立了全球第一个海上CO_2-EOR中心(北海CO_2提高采收率中心). 美国把CO_2-EOR作为墨西哥湾海域提高油气采收率的主导技术(Warwick等，2017). 越南、马来西亚、阿联酋、巴西等国也在世界多处海域完成了一些先导试验项目，并积极参与中加日美主导的国际标准化组织碳封存技术委员会ISO/TC 265的相关活动.

我国学者发展了CO_2饱和岩石多相多场耦合分析理论，提出了适合我国陆相非均质地层的封存容量、场地选址和项目可行性评估方法，开发了CCUS风险矩阵评价方法、井下原位取样监测和低渗储层安全调控技术，解决了我国CCUS场地面临的封存容量难以把握、封存机制认识不清、安全保障缺乏手段等的技术瓶颈，为CCUS项目的顺利实施提供了重要科技支撑，引领了本学科的发展(Li等，2016a，2016b；Liu等，2016). 中国多个海区均有实施CCUS的条件，通过实施海洋地质碳封存，可望保障沿海经济发达地区有稳定和规模化的减排去处，确保发达地区的能源供应和储备实现自给自足.

今后研发方案: (1) 开展海洋地层CO_2运移规律、封存机理和封存体稳定性控制与监测技术的研究，建立考虑健康、安全等因素的海洋地质碳封存场地适宜性评估模型，提出海洋地质碳封存的评价方法及其稳定性保障的新工艺与新技术，构建我国海洋地质地层的封存容量、场地选址和项目可行性的评估体系，确定海洋地质碳封存技术示范最优方案和封存地点；(2) 研制海底高精度原位流体取样、原位CO_2通量、CO_2浓度、地层压力温度监测等系列装置，开发海洋地质碳封存环境风险评价技术与方法，阐明我国海洋地质碳封存的生态响应和适应机制，实现CO_2地质封存全生命周期安全监控；(3) 建立国家海洋地质碳封存技术测试系统、科普教育基地、国际协作设施，开展海洋地质碳封存示范工程, 引领技术创新和标准制定.

2.8 海洋碳交易体系和量化生态补偿机制

将海洋碳汇纳入碳交易体系，不仅有利于减排目标的实现，同时可望形成新的经济增长点，促进海洋生态环境的保护与修复，进一步带来经济效益和社会效益. 海洋碳汇方法学和标准的建立是开展海洋碳汇交易、推进海洋增汇项目发展的基础；海洋碳汇的经济价值核算是推动海洋碳汇进入碳交易市场、优化海洋资源配置的前提条件 (刘芳明等, 2019). 海洋碳汇具有一般商品的二重属性, 即使用价值和价值. 海洋碳汇的使用价值体现在通过海洋生态系统的碳汇功能抵消经济活动CO_2排放，而价值体现在整个增汇过程中投入的人力、物力、资金和技术进行研究、保护和利用, 这其中凝结了无差别的人类劳动. 碳定价有助于将气候风险纳入商业成本，消费者基于价格选择将促进生产者寻求碳排放更少的技术. 而海洋碳汇可成为一种补偿货币, 为实施海洋碳交易提供量化技术支撑.

随着国际社会对海洋负排放的重视，海洋碳汇终将被纳入全球碳交易体系. 我国应积极探索海洋碳汇交易的可行路径，以占得先机、把握未来竞争的主动权.研发重点包括: (1) 依据中国特色海洋碳汇资源, 设计海洋碳货币体系，建立基于海洋碳货币的碳中和核算机制与方法学，开展碳汇的碳定价影响要素和模式研究，探索符合国情和国际国内交易规则的海洋碳汇交易模式；(2) 开展海洋碳货币体系实施路径研究(市场和可持续交易政策协同), 建立陆海协同的碳管理模式, 形成陆海联网的碳交易体系, 进行海洋碳汇交易试点和示范；(3) 制定基于碳汇的量化生态补偿机制，建立代表性河流水系由沿海地区对西部地区的生态补偿体系，使企业和公众自觉、自愿地加入到低碳经济活动中来，促进国内大循环，推动低碳经济、保持可持续发展.

3 结束语

倡导人类命运共同体、积极参与全球治理，是我国的国际战略. 气候变化是当前全球最有共识的领域, 碳中和是应对气候变化的有效措施，海洋负排放是实现碳中和目标的重要途径. 文章提出了海洋负排放相关路径的初步方案，包括陆海统筹减排增汇、海洋缺氧酸化环境负排放生态工程、滨海湿地生态系统服务功能、养殖环境减排增汇、珊瑚礁生态系统减排增汇、海洋地质碳封存、海洋碳汇核查技术体系，以及海洋碳汇交易体系和量化生态补偿机制等. 这些方案

虽然描绘了未来海洋负排放研发的基本路线图, 但仍然是粗线条框架, 需要更多的研究和讨论不断细化和完善, 并推动有条件的负排放方案尽快实施, 为实现碳中和战略目标提供支撑.

参考文献

布乃顺, 杨骁, 黎光辉, 马溪平, 宋有涛, 马放, 李博, 方长明, 闫卓君. 2018. 互花米草入侵对长江口湿地土壤碳动态的影响. 中国环境科学, 38: 2671–2679

刘芳明, 刘大海, 郭贞利. 2019. 海洋碳汇经济价值核算研究. 海洋通报, 38: 11–16

刘纪化, 张飞, 焦念志. 2015. 陆海统筹研发碳汇. 科学通报, 60: 3399–3405

唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 杨华蕾, 孙晓红, 王法明, 温泉, 陈少波. 2018. 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, 48: 661–665

魏凤, 李小春, 刘玫, 李琦, 周洪, 陈征澳. 2014. CCS国际标准化进展剖析及对我国的启示. 科技管理研究, 34: 201–205

章海波, 骆永明, 刘兴华, 付传城. 2015. 海岸带蓝碳研究及其展望. 中国科学: 地球科学, 45: 1641–1648

张瑶, 赵美训, 崔球, 樊伟, 齐家国, 陈鹰, 张永雨, 高坤山, 樊景凤, 汪光义, 严重玲, 卢豪良, 罗亚威, 张子莲, 郑强, 肖伟, 焦念志. 2017. 近海生态系统碳汇过程、调控机制及增汇模式. 中国科学: 地球科学, 47: 438–449

张永雨, 张继红, 梁彦韬, 李鸿妹, 李刚, 陈晓, 赵鹏, 蒋增杰, 邹定辉, 刘晓勇, 刘纪化. 2017. 中国近海养殖碳汇形成过程与机制. 中国科学: 地球科学, 47: 1414–1424

左平, 刘长安, 赵书河, 王春红, 梁玉波. 2009. 米草属植物在中国海岸带的分布现状. 海洋学报, 31: 101–111

Bai Y, Cai W J, He X, Zhai W, Pan D, Dai M, Yu P. 2015. A mechanistic semi-analytical method for remotely sensing sea surface pCO_2 in river-dominated coastal oceans: A case study from the East China Sea. J Geophys Res Oceans, 120: 2331–2349

Breitburg D, Levin L A, Oschlies A, Grégoire M, Chavez F P, Conley D J, Garçon V, Gilbert D, Gutiérrez D, Isensee K, Jacinto G S, Limburg K E, Montes I, Naqvi S W A, Pitcher G C, Rabalais N N, Roman M R, Rose K A, Seibel B A, Telszewski M, Yasuhara M, Zhang J. 2018. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. Science, 359: eaam7240

Brewer P G, Peltzer E, Aya I, Haugan P, Bellerby R, Yamane K, Kojima R, Walz P, Nakajima Y. 2004. Small scale field study of an ocean CO_2 plume. J Oceanogr, 60: 751–758

Chisholm J R M, Barnes D J. 1998. Anomalies in coral reef community metabolism and their potential importance in the reef CO_2 source-sink debate. Proc Natl Acad Sci USA, 95: 6566–6569

Cui Q, He X, Liu Q, Bai Y, Chen C T A, Chen X, Pan D. 2018. Estimation of lateral DOC transport in marginal sea based on remote sensing and numerical simulation. J Geophys Res Oceans, 123: 5525–5542

Ferrier-Pagès C, Leal M C. 2019. Stable isotopes as tracers of trophic interactions in marine mutualistic symbioses. Ecol Evol, 9: 723–740

Fox M D, Elliott Smith E A, Smith J E, Newsome S D. 2019. Trophic plasticity in a common reef-building coral: Insights from $\delta^{13}C$ analysis of essential amino acids. Funct Ecol, 33: 2203–2214

Gao G, Burgess J G, Wu M, Wang S, Gao K. 2020. Using macroalgae as biofuel: Current opportunities and challenges. Botanica Marina, 63: 355–370

Gao K, McKinley K R. 1994. Use of macroalgae for marine biomass production and CO_2 remediation: A review. J Appl Phycol, 6: 45–60

Gattuso J P, Frankignoulle M, Smith S V. 1999. Measurement of community metabolism and significance in the coral reef CO_2 source-sink debate. Proc Natl Acad Sci USA, 96: 13017–13022

He Z, Van Nostrand J D, Zhou J. 2012. Applications of functional gene microarrays for profiling microbial communities. Curr Opin Biotech, 23: 460–466

Herzog H J. 1998. Ocean Sequestration of CO_2—An overview. Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 35: 7

Hoegh-Guldberg O, Pendleton L, Kaup A. 2019. People and the changing nature of coral reefs. Regional Studies Mar Sci, 30: 100699

Howard J, Sutton-Grier A, Herr D, Kleypas J, Landis E, Mcleod E, Pidgeon E, Simpson S. 2017. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. Front Ecol Environ, 15: 42–50

Jessen G L, Lichtschlag A, Ramette A, Pantoja S, Rossel P E, Schubert C J, Struck U, Boetius A. 2017. Hypoxia causes preservation of labile organic matter and changes seafloor microbial community composition (Black Sea). Sci Adv, 3: e1601897

Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Kirchman D L, Weinbauer M G, Luo T, Chen F, Azam F. 2010. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. Nat Rev Microbiol, 8: 593–599

Jiao N, Tang K, Cai H, Mao Y. 2011. Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land. Nat Rev Microbiol, 9: 75

Jiao N, Wang H, Xu G, Aricò S. 2018. Blue carbon on the rise: Challenges and opportunities. Natl Sci Rev, 5: 464–468

Jiao N, Liu J, Jiao F, Chen Q, Wang X. 2020. Microbes mediated comprehensive carbon sequestration for negative emissions in the

ocean. Natl Sci Rev, 7: 1858–1860

Jiang Z, Liu S, Zhang J, Wu Y, Zhao C, Lian Z, Huang X. 2018. Eutrophication indirectly reduced carbon sequestration in a tropical seagrass bed. Plant Soil, 426: 135–152

Jiang Z, Liu S, Zhang J, Zhao C, Wu Y, Yu S, Zhang X, Huang C, Huang X, Kumar M. 2017. Newly discovered seagrass beds and their potential for blue carbon in the coastal seas of Hainan Island, South China Sea. Mar Pollution Bull, 125: 513–521

Kawahata H, Fujita K, Iguchi A, Inoue M, Iwasaki S, Kuroyanagi A, Maeda A, Manaka T, Moriya K, Takagi H, Toyofuku T, Yoshimura T, Suzuki A. 2019. Perspective on the response of marine calcifiers to global warming and ocean acidification—Behavior of corals and foraminifera in a high CO_2 world "hot house". Prog Earth Planet Sci, 6: 5

Kayanne H, Suzuki A, Saito H. 1995. Diurnal changes in the partial pressure of carbon dioxide in coral reef water. Science, 269: 214–216

Köhler P, Abrams J F, Völker C, Hauck J, Wolf-Gladrow D A. 2013. Geoengineering impact of open ocean dissolution of olivine on atmospheric CO2, surface ocean pH and marine biology. Environ Res Lett, 8: 014009

Koltermann K P, Gouretski V, Jancke K. 2011. Hydrographic Atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE). Southampton: National Oceanography Centre

Le C, Gao Y, Cai W J, Lehrter J C, Bai Y, Jiang Z P. 2019. Estimating summer sea surface pCO_2 on a river-dominated continental shelf using a satellite-based semi-mechanistic model. Remote Sens Environ, 225: 115–126

Li M, Xie W, Li P, Yin K, Zhang C. 2020. Establishing a terrestrial proxy based on fluorescent dissolved organic matter from sediment pore waters in the East China Sea. Water Res, 182: 116005

Li T, Bai Y, He X, Xie Y, Chen X, Gong F, Pan D. 2018. Satellite-based estimation of particulate organic carbon export in the northern South China Sea. J Geophys Res Oceans, 123: 8227–8246

Li P, Tao J, Lin J, He C, Shi Q, Li X, Zhang C. 2019. Stratification of dissolved organic matter in the upper 2000 m water column at the Mariana Trench. Sci Total Environ, 668: 1222–1231

Li Q, Chen Z A, Zhang J T, Liu L C, Li X C, Jia L. 2016a. Positioning and revision of CCUS technology development in China. Int J Greenh Gas Control, 46: 282–293

Li Q, Wei Y N, Chen Z A. 2016b. Water-CCUS nexus: Challenges and opportunities of China's coal chemical industry. Clean Techn Environ Policy, 18: 775–786

Liu D, Bai Y, He X, Tao B, Pan D, Chen C T A, Zhang L, Xu Y, Gong C. 2019. Satellite estimation of particulate organic carbon flux from Changjiang River to the estuary. Remote Sens Environ, 223: 307–319

Liu J, Jiao N, Tang K. 2014. An experimental study on the effects of nutrient enrichment on organic carbon persistence in the western Pacific oligotrophic gyre. Biogeosciences, 11: 5115–5122

Liu J, Ye S, Allen Laws E, Xue C, Yuan H, Ding X, Zhao G, Yang S, He L, Wang J, Pei S, Wang Y, Lu Q. 2017a. Sedimentary environment evolution and biogenic silica records over 33000 years in the Liaohe delta, China. Limnol Oceanogr, 62: 474–489

Liu Q, Pan D, Bai Y, Wu K, Chen C T A, Liu Z, Zhang L. 2015. Estimating dissolved organic carbon inventories in the East China Sea using remote-sensing data. J Geophys Res Oceans, 119: 6557–6574

Liu S, Jiang Z, Zhang J, Wu Y, Huang X, Macreadie P I. 2017b. Sediment microbes mediate the impact of nutrient loading on blue carbon sequestration by mixed seagrass meadows. Sci Total Environ, 599–600: 1479–1484

Liu S, Trevathan-Tackett S M, Ewers Lewis C J, Huang X, Macreadie P I. 2020. Macroalgal blooms trigger the breakdown of seagrass blue carbon. Environ Sci Technol, 54: 14750–14760

Liu X, Li Q, Song R, Fang Z, Li X. 2016. A multilevel U-tube sampler for subsurface environmental monitoring. Environ Earth Sci, 75: 1194

Loussert-Fonta C, Toullec G, Paraecattil A A, Jeangros Q, Krueger T, Escrig S, Meibom A. 2020. Correlation of fluorescence microscopy, electron microscopy, and NanoSIMS stable isotope imaging on a single tissue section. Commun Biol, 3: 362

Lubchenco J, Haugan P M, Pangestu M E. 2020. Five priorities for a sustainable ocean economy. Nature, 588: 30–32

Marcella D, Jerry B, Douglas C, Rob H. 2020. Insights and guidance for offshore CO_2 storage monitoring based on the QICS, ETI MMV, and STEMM-CCS projects.100: 1–9

Macreadie P I, Anton A, Raven J A, Beaumont N, Connolly R M, Friess D A, Kelleway J J, Kennedy H, Kuwae T, Lavery P S, Lovelock C E, Smale D A, Apostolaki E T, Atwood T B, Baldock J, Bianchi T S, Chmura G L, Eyre B D, Fourqurean J W, Hall-Spencer J M, Huxham M, Hendriks I E, Krause-Jensen D, Laffoley D, Luisetti T, Marbà N, Masque P, McGlathery K J, Megonigal J P, Murdiyarso D, Russell B D, Santos R, Serrano O, Silliman B R, Watanabe K, Duarte C M. 2019. The future of blue carbon science. Nat Commun, 10: 3998

Martin J H, Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E, Gordon R M, Tanner S J, Hunter C N, Elrod V A, Nowicki J L, Coley T L, Barber R T, Lindley S, Watson A J, van Scoy K, Law C S, Liddicoat M I, Ling R, Stanton T, Stockel J, Collins C, Anderson A, Bidigare R, Ondrusek M, Latasa M, Millero F J, Lee K, Yao W, Zhang J Z, Friederich G, Sakamoto C, Chavez F, Buck K, Kolber Z, Greene R,

Falkowski P, Chisholm S W, Hoge F, Swift R, Yungel J, Turner S, Nightingale P, Hatton A, Liss P, Tindale N W. 1994. Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean. Nature, 371: 123–129

Mcleod E, Chmura G L, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte C M, Lovelock C E, Schlesinger W H, Silliman B R. 2011. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2. Front Ecol Environ, 9: 552–560

McMahon K W, Thorrold S R, Houghton L A, Berumen M L. 2016. Tracing carbon flow through coral reef food webs using a compound-specific stable isotope approach. Oecologia, 180: 809–821

Montserrat F, Renforth P, Hartmann J, Leermakers M, Knops P, Meysman F J R. 2017. Olivine dissolution in seawater: Implications for CO_2 sequestration through enhanced weathering in coastal environments. Environ Sci Technol, 51: 3960–3972

Morris L A, Voolstra C R, Quigley K M, Bourne D G, Bay L K. 2019. Nutrient availability and metabolism affect the stability of coral–symbiodiniaceae symbioses. Trends MicroBiol, 27: 678–689

Pei L, Ye S, Yuan H, Pei S, Xie S, Wang J. 2020. Glomalin-related soil protein distributions in the wetlands of the Liaohe Delta, Northeast China: Implications for carbon sequestration and mineral weathering of coastal wetlands. Limnol Oceanogr, 65: 979–991

Popp B N, Graham B S, Olson R J, Hannides C C S, Lott M J, López-Ibarra G A, Galván-Magaña F, Fry B. 2007. Insight into the trophic ecology of Yellowfin Tuna, Thunnus albacares, from compound-specific nitrogen isotope analysis of proteinaceous amino acids. Terrestr Ecolog, 1: 173–190

Putnam H M, Barott K L, Ainsworth T D, Gates R D. 2017. The vulnerability and resilience of reef-building corals. Curr Biol, 27: R528–R540

Ren L, Zhang J. 2016. Temporal variation in biodeposit organic content and sinking velocity in long-line shellfish culture. Chin J Ocean Limnol, 34: 985–991

Rosemond A D, Benstead J P, Bumpers P M, Gulis V, Kominoski J S, Manning D W P, Suberkropp K, Wallace J B. 2015. Experimental nutrient additions accelerate terrestrial carbon loss from stream ecosystems. Science, 347: 1142–1145

Rothman D H, Hayes J M, Summons R E. 2003. Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle. Proc Natl Acad Sci USA, 100: 8124–8129

Scholz M B, Lo C C, Chain P S G. 2012. Next generation sequencing and bioinformatic bottlenecks: The current state of metagenomic data analysis. Curr Opin Biotech, 23: 9–15

Seifan M, Berenjian A. 2019. Microbially induced calcium carbonate precipitation: A widespread phenomenon in the biological world. Appl Microbiol Biotechnol, 103: 4693–4708

Sui J, Zhang J, Ren S J, Lin F. 2019. Organic carbon in the surface sediments from the intensive mariculture zone of Sanggou Bay: Distribution, seasonal variations and sources. J Ocean Univ China, 18: 985–996

Suzuki A, Kawahata H. 2003. Carbon budget of coral reef systems: An overview of observations in fringing reefs, barrier reefs and atolls in the Indo-Pacific regions. Tellus B-Chem Phys Meteor, 55: 428–444

Tanaka Y, Sawada Y, Tanase D, Tanaka J, Shiomi S, Kasukawa T. 2017. Tomakomai CCS Demonstration Project of Japan, CO_2 injection in process. Energy Procedia, 114: 5836–5846

Taylor L L, Quirk J, Thorley R M S, Kharecha P A, Hansen J, Ridgwell A, Lomas M R, Banwart S A, Beerling D J. 2015. Enhanced weathering strategies for stabilizing climate and averting ocean acidification. Nat Clim Change, 6: 402–406

Tu Q, Yu H, He Z, Deng Y, Wu L, Van Nostrand J D, Zhou A, Voordeckers J, Lee Y J, Qin Y, Hemme C L, Shi Z, Xue K, Yuan T, Wang A, Zhou J. 2014. GeoChip 4: A functional gene-array-based high-throughput environmental technology for microbial community analysis. Mol Ecol Resour, 14: 914–928

Wang F, Lu X, Sanders C J, Tang J. 2019. Tidal wetland resilience to sea level rise increases their carbon sequestration capacity in United States. Nat Commun, 10: 5434

Wang F, Sanders C J, Santos I R, Tang J, Schurech M, Kirwan M L, Kopp R E, Zhu K, Li X, Yuan J, Liu W, Li Z. 2020. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. Natl Sci Rev, , doi: 10.1093/nsr/nwaa296

Ware J R, Smith S V, Reaka-Kudla M L. 1992. Coral reefs: Sources or sinks of atmospheric CO_2? Coral Reefs, 11: 127–130

Warwick P D, Verma M K, Attanasi E D, Olea R A, Blondes M S, Freeman P A, Brennan S T, Merrill M D, Jahediesfanjani H, Roueche J, Lohr C D. 2017. A database and probabilistic assessment methodology for carbon dioxide-enhanced oil recovery and associated carbon dioxide retention in the United States. Energy Procedia, 114: 7055–7059

Whiteman J, Elliott Smith E, Besser A, Newsome S. 2019. A guide to using compound-specific stable isotope analysis to study the fates of molecules in organisms and ecosystems. Diversity, 11: 8

Yang H, Tang J, Zhang C, Dai Y, Zhou C, Xu P, Perry D C, Chen X. 2020. Enhanced carbon uptake and reduced methane emissions in a newly restored wetland. J Geophys Res Biogeosci, 125: e05222

Yuan J, Ding W, Liu D, Kang H, Freeman C, Xiang J, Lin Y. 2015. Exotic *Spartina alterniflora* invasion alters ecosystem-atmosphere exchange of CH_4 and N_2O and carbon sequestration in a coastal salt marsh in China. Glob Change Biol, 21: 1567–1580

Ye S, Laws E A, Yuknis N, Ding X, Yuan H, Zhao G, Wang J, Yu X, Pei S, DeLaune R D. 2015. Carbon sequestration and soil accretion in coastal wetland communities of the Yellow River Delta and Liaohe Delta, China. Estuaries Coasts, 38: 1885–1897

Zhang C, Dang H, Azam F, Benner R, Legendre L, Passow U, Polimene L, Robinson C, Suttle C A, Jiao N. 2018. Evolving paradigms in biological carbon cycling in the ocean. Natl Sci Rev, 5: 481–499

Zhang D, Tian X, Dong S, Chen Y, Feng J, He R P, Zhang K. 2020a. Carbon dioxide fluxes from two typical mariculture polyculture systems in coastal China. Aquaculture, 521: 735041

Zhang D, Tian X, Dong S, Chen Y, Feng J, He R P, Zhang K. 2020b. Carbon budgets of two typical polyculture pond systems in coastal China and their potential roles in the global carbon cycle. Aquacult Environ Interact, 12: 105–115

Zhang Y Y, Zhang J H, Liang Y T, Li H M, Li G, Chen X, Zhao P, Jiang Z J, Zou D H, Liu X Y, Liu J H. 2017. Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China. Sci China Earth Sci, 60: 2097–2107

Zhao Z, Gonsior M, Schmitt-Kopplin P, Zhan Y, Zhang R, Jiao N, Chen F. 2019. Microbial transformation of virus-induced dissolved organic matter from picocyanobacteria: Coupling of bacterial diversity and DOM chemodiversity. ISME J, 13: 2551–2565

Zhao G, Ye S, He L, Yuan H, Ding X, Wang J, Laws E A. 2020. Historical change of carbon burial in Late Quaternary sediments of the ancient Yellow River delta on the west coast of Bohai Bay, China. Catena, 193: 104619

(责任编委: 郑永飞)