从海洋碳汇前沿理论到海洋负排放中国方案

刘纪化^{1*}, 郑强²

1. 山东大学海洋研究院, 青岛 266237;

2. 厦门大学微生物与地球圈层研究所, 厦门 361102

* 通讯作者, E-mail: liujihua1982@sdu.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: 2021-02-24

国家自然科学基金-山东联合基金项目(批准号: U1906216)和国家重点研发计划专项项目(编号: 2020YFA0607600)资助

摘要 海洋是地球上最大的活跃碳库, 对调节气候变化发挥着无可替代的作用. 文章从全球气候变化的视角, 厘清“蓝碳”“海洋碳汇”“海洋负排放”等概念的科学内涵和实用意义, 回顾我国在海洋生物储碳过程机制方面的科学成就及其对该领域国际发展趋势的影响, 展望我国领衔海洋负排放国际大科学计划、积极参与全球治理、支撑碳中和战略的前景.

关键词 海洋碳汇, 微型生物碳泵, 海洋负排放

1 气候变化与海洋碳汇

工业革命以来人类活动排放CO₂加剧全球气候变暖, 引发一系列生态环境问题和社会问题(Jackson等, 2019). 2020年9月22日, 联合国秘书长古特雷斯指出“生存攸关的气候危机”是当今世界面临的五大挑战之一. 应对气候变化已是国际共识. 海洋是地球上最大的活跃碳库, 储存了地球上93%的CO₂, 每年清除约30%人类排放的CO₂(Khaliwala等, 2009). 在储碳周期上, 森林、草原等陆地生态系统碳汇约几十年到百年, 海洋碳汇则可达数百至上千年(Hansell, 2013). 因此, 海洋碳汇在地球历史上对调节气候变化发挥了无可替代的作用(Rothman等, 2003; Grotzinger等, 2011).

早在20世纪80年代, 科学研究揭示, 大气CO₂增加引发的气候变化进程打乱了地球系统自身的演变节

律, 可能影响到人类自身的可持续发展. 各国政府越来越认可和重视这一事实, 并资助了一系列科学研究计划以获得重要数据. 但在整体核算全球CO₂数据时, 却遇到了一个难题, 即: 人类释放的CO₂并非全部停留在大气中, 除了森林等陆地存储的碳之外, 仍然有一部分碳去向不明, 被称之为“丢失的碳”. 进一步研究发现, 这个答案就是“海洋碳汇”. 自此, 覆盖地球表面积70%的海洋, 成为各国争相研究的领域, 海洋吸收大气CO₂的机制成为人们关注的焦点, 一系列海洋国际研究计划应运而生, 包括The Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS)、Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC)、Land Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ)、Integrated Marine Biosphere Research (IMBeR)等. 这些国际大科学计划的实施, 深入系统地研究了包括生物泵(Biological Pump, BP)、碳酸盐泵(Carbonate Counter Pump, CP)、溶解度泵(Solubility Pump,

中文引用格式: 刘纪化, 郑强. 2021. 从海洋碳汇前沿理论到海洋负排放中国方案. 中国科学: 地球科学, 51(4): 644–652, doi: 10.1360/SSTe-2020-0359

英文引用格式: Liu J, Zheng Q. 2021. From the frontier theory of ocean carbon sinks to the plan for ocean negative emissions of China (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 51(4): 644–652, doi: 10.1360/SSTe-2020-0359

SP)等海洋储碳机制,并在全球各大海区获得了大量实测数据(Longhurst和Harrison, 1989; Chisholm, 2000),拓展了不同时间和空间尺度上海洋碳汇在全球气候变化中所发挥重要作用的新认识(Legendre等, 2015).

2 海洋碳汇与蓝碳概念

21世纪以来,人类活动和气候变化对海洋生态系统的双重压力不断加大,国际社会日益认识到海洋碳汇在应对气候变化和生态系统服务功能中的价值和潜力. 2009年,联合国环境规划署(UNEP)、联合国粮农组织(FAO)和联合国教科文组织政府间海洋学委员会(IOC/UNESCO)联合发布了《蓝碳:健康海洋固碳作用的评估报告》(简称《蓝碳报告》)(Nellemann等, 2009).《蓝碳报告》明确指出“蓝碳是指利用海洋活动及海洋生物吸收大气中的CO₂,并将其固定在海洋中的过程、活动和机制”,特别指出了浮游植物固碳量与陆地固碳量相当,整个海洋碳库对于调节气候变化具有重要意义.从此“蓝碳”概念被广泛采纳,多项国际计划和国家计划相继出台. 2010年,保护国际基金会(Conservation International)和政府间海洋学委员会(IOC/UNESCO)等联合启动了“蓝碳倡议”计划(The Blue Carbon Initiative),成立了碳汇政策工作组和科学工作组,发布了《政策框架》《行动国家指南》《行动倡议报告》等一系列海洋碳汇报告. 2013年,中国科学家共同成立了“全国海洋碳汇联盟”(Pan-China Ocean Carbon Alliance, COCA),在我国近海典型海区设立了7个时间序列观测站(Jiao等, 2015). 2014年,“未来海洋联合会”(Future Ocean Alliance, FOA)正式成立,并推出了《中国蓝碳计划》(<http://www.future-ocean-alliance.org>),在国家“十三五”规划中执行了若干重点研发计划,推动了海洋碳汇研究在我国的蓬勃发展. 2015年,美国国家海洋和大气管理局(NOAA)蓝碳工作组从市场机会、认可和能力建设、科学发展和国家行动等几个方面提出了国家海洋碳汇工作建议(<http://www.mangrovealliance.org/the-blue-carbon-national-working-group>).

然而,由于各类蓝碳研究的难易程度不同,国内外研究大多关注与陆地植物类似的看得见的红树林、盐沼、海草等海岸带蓝碳(Donato等, 2011; McTigue等, 2019).而真正对调节气候变化起主导作用的开阔海区

蓝碳(浮游植物、微型生物等介导的碳汇)却被忽略了.比如,印度尼西亚在全球环境基金(Global Environment Facility, GEF)的支持下实施了为期四年的蓝色森林项目(Blue Forests Project),建立了国家海洋碳汇中心,编制了《印尼海洋碳汇研究战略规划》.此外,肯尼亚、印度、越南和马达加斯加等国已启动盐沼、海草床和红树林的海洋碳汇项目,开展实践自愿碳市场和自我融资机制的试点示范.这种状况在一定程度上误导了政府和公众,必须加以澄清.

从最初的定义上,“蓝碳”与“海洋碳汇”概念是一致的,既包含海岸带碳汇,也包括开阔海区碳汇(Nellemann等, 2009).“蓝碳”概念不应片面,甚至被曲解为红树林、海草床等“看得见、摸得着”碳汇资源的专属名词.从生态系统可持续发展的视角,红树林、海草床等碳汇确实具有重要生态价值(McLeod等, 2011; 章海波等, 2015; Howard等, 2018).但是从气候变化的视角,红树林、海草床等碳汇远无法达到对气候变化产生影响的量级,而真正对气候变化发挥显著调节作用的是海洋水体碳汇,即微型生物为主介导的有机碳汇与无机碳汇(焦念志, 2012; Legendre等, 2015; 谢树成等, 2017; 张瑶等, 2017; Wang, 2018; Jiao等, 2020).因此,涉及红树林、海草床等碳汇时,应采用“海岸带蓝碳”,以保障学术严谨性和科学术语应用的准确性.

3 深海碳汇成因之谜

既然真正影响气候变化的是整个海洋水体中形成的碳汇,那么其碳汇机制就成为科学界关注的焦点.所以,BP成为所有此类研究的必测指标. 20世纪末,BP的监测手段是通过沉积物捕获器(Honda等, 1997),但这类方法在现场操作费时费力,且收集颗粒有机物的定量也受诸多因素影响,测定精度有限.于是,当时一个新的可测指标“新生产力(New production)”备受关注.新生产力是初级生产力结构中的一部分(焦念志和王荣, 1994),它所反映的是海洋光合作用固定的有机碳中,能够被传输到真光层以下进而实现储碳的那部分初级生产力(焦念志和王荣, 1993; 王荣等, 1995).新生产力表征上层海洋储碳通量,因此无法反映海洋长周期储碳能力.其实, BP作用随着深度加大,其碳通量呈Martin曲线指数衰减(Martin等, 1987),到

达海底碳量不足表层光合固碳量的1%(Aristegui等, 2009; Ducklow等, 2001; Hansell等, 2009). 那么, 其余99%有机碳的去处, 就成为科学界关注的焦点. 与此同时, 科学家观测到海洋中存在一个巨大的溶解有机碳库(Dissolved Organic Carbon Pool, DOC Pool)(Hedges, 2002), 它占海洋总有机碳的95%以上, 而其中95%以上又是惰性溶解有机碳(Recalcitrant Dissolved Organic Carbon, RDOC). 早在20世纪60年代, 海洋化学家就发现海洋中存在一个巨大的DOC碳库, 其碳当量可与大气CO₂相媲美, 但其来源和成因却悬而未决, 被称为“难解之谜(Enigma)”(Barber, 1968). 之后的半个世纪, 众多科学家对这个不解之谜进行了各种探究, 提出了若干假说, 但均未找到令人信服的证据. 2008年, 我国科学家提出的“微生物碳泵”(Microbial Carbon Pump, MCP)理论框架得到国际同行专家认可, 国际海洋研究科学委员会(Scientific Committee on Oceanic Research, SCOR)为此设立了以MCP为题的国际科学工作组(图1). MCP是指海洋微生物的生理代谢和生态过程将活性有机碳转化为难以被生物利用的惰性溶解有机碳, 从而长期封存于海洋水体中的储碳机制(Jiao等, 2010)(图2). 与BP不同, MCP不依赖于沉降,

可以在任何水层发生, 随着时间的推移, RDOC不断积累形成巨大碳库. 尽管MCP理论在提出之初就被*Science*评论为“巨大碳库的幕后推手”(Stone, 2010), 但始终面临一个难题: 如何验证? 事实上, 长达数千年RDOC储存周期的实验证实, 是在MCP概念提出8年之后. 利用加拿大达尔豪斯大学Aquatron大型生态模拟体系开展实验, 傅里叶变换回旋共振质谱数据表明, MCP效率极高, 可在“月”的时间尺度上生产出与南海2000m深海中极为相似的RDOC, 从而揭开了长达半个世纪“不解之谜”的面纱(Jiao等, 2018a).

后续一系列研究结果同样证实了MCP客观存在. 例如, 荧光溶解有机质(Fluorescent Dissolved Organic Matter, FDOM)通常被认为是海洋RDOC的重要组成部分之一, 通过培养实验发现海洋蓝细菌的主要代表类群(聚球藻和原绿球藻)产生的FDOM与深海环境中的FDOM具有极相似的荧光信号和光化学性质, 再次证实了MCP介导的微生物过程在海洋储碳中的重要作用(Zhao等, 2017); 微生物代谢蓝细菌病毒裂解产物研究, 进一步从微生物群落多样性和RDOC化学分子多样性时间耦合的视角验证了MCP是RDOC的主要来源(Zhao等, 2019).

图1 焦念志领衔的国际海洋研究科学委员会(SCOR)
MCP科学工作组成员一起研讨

图2 海洋储碳主要生物学过程和机制

Microbial Carbon Pump, 微型生物碳泵; Biological Carbon Pump, 生物泵; POC, 颗粒有机碳; RDOC, 惰性溶解有机碳

4 MCP介导的海洋碳汇过程机制研究引领该领域国际趋势

近十年来, 研究人员发现海洋碳汇(主要是有机碳)不仅包括早期认识到的海岸带植物固碳, 例如海岸带红树林、海草床和盐沼等, 实际上占海洋生物量90%以上看不见的微型生物也在海洋碳汇产生过程中发挥了不可替代的作用(Cavicchioli等, 2019; Jiao等, 2020). 海洋中浮游植物通过光合作用将无机碳转化为颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)和溶解有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)(Azam等, 1983). 其中, POC在重力作用下向深海沉降并最后到达海底实现长周期储碳的生物学机制, 被称为“生物泵(Biological Pump, BP)”. BP是基于颗粒有机碳和垂直迁移过程, 虽然固碳量巨大, 但储碳效率并不高(Aristegui等, 2009; Ducklow等, 2001; Hansell等, 2009). 与BP依赖沉降和埋藏不同, MCP储碳与深度无关, 是微型生物代谢和生态过程对有机碳的转化, 其产物是RDOC, 存储周期长达千年(Jiao等, 2010, 2018b). MCP不仅实现了长周期储碳, 而且释放无机氮、磷等营养盐, 从而保障海洋初级生产力的可持续性(Jiao等, 2014). 因此, MCP理论框架下的碳汇过程机制研究, 以及如何提高海洋微型生物碳泵效率, 成为具有重要前景的研究领域.

鉴于MCP理论框架的前瞻性, 国际海洋科学研究

委员会(SCOR)在2008年专门设立了MCP科学工作组(SCOR-WG134), 来自12个国家的26位科学家共同开展科研攻关, MCP理论不断得到发展和完善. 2011年MCP被国际海洋与湖沼科学促进会(ASLO)遴选为四个前沿科学论题之一, ASLO资助全球范围内有志于海洋碳汇研究的青年科学家开展工作. 值得指出的是, MCP不仅是前沿理论, 也具有重要应用前景(张传伦等, 2019). 早在2011年, 焦念志提出的“研发海洋碳汇, 保障经济发展”建议就获得了国家发改委“十二五”建言献策优秀提案一等奖. 2013年, 基于MCP提出的减少陆地施肥增加近海碳汇的生态增汇理念(Jiao等, 2011)是陆海统筹的典型案列, 被遴选为中国科学院学部跨学部论坛的主题(图3). 同年, 国际大型海洋联合研究计划-海洋生物地球化学与生态系统集成研究(IMBeR)每三年一次的战略研讨会(IMBIZO)将MCP遴选为3个国际战略研讨主题之一. 2014年, 在IMBeR“未来海洋”大会总结中, MCP再次被遴选为“研究亮点”, 标志着MCP成为海洋科学的持续热点研究领域. 2015年由焦念志发起, 中国、美国、欧洲、加拿大等科学家共同参与建立了“北太平洋海洋科学组织”(PICES)和“国际海洋考察理事会”(ICES)联合工作组, 这是PICES建立110多年以来第二个联合工作组. 该工作组基于MCP理论开展海洋碳汇合作研究, 通过学科交叉及国际组织间联合攻关, 实现了科学与政策的连接, 促进了政府间合作. 同年, 海洋碳汇被纳入国家战略, 中共中央、国务院印发的《生态文明体制改革总体方案》中明确要求研发“海洋碳汇的有效机制”, 并在《中共中央国务院关于加快推进生态文明建设的意见》《“十三五”规划纲要》《“十三五”控制温室气体排放工作方案》《全国海洋主体功能区划》等战略部署中具体体现. 2016年, 焦念志领衔在国际著名学术品牌“戈登科学前沿研究论坛”(Gordon Research Conferences, Frontier of Science, GRC)上发起创立了“海洋生物地球化学与碳汇永久论坛”; GRC对永久论坛条件要求十分严苛, 通常需要6年才能完成所有评审、遴选和试办程序. 基于MCP发起创立的此GRC永久论坛, 标志着我国在该领域走在了国际前沿, 并提升了我国在碳汇领域的国际话语权(图4).

为打造中国科学界高端学术品牌, 中国科学院学部于2017年推出“雁栖湖会议”, 首期论坛主题为基于MCP理论的“Climate Change and Biological Carbon

图3 中国科学院学部“陆海统筹研发碳汇”主题科学与技术前沿论坛(2013年)

图4 中国科学家以MCP理论为基础在著名国际学术品牌GRC发起“海洋生物地球化学与碳汇”永久论坛(2016年)

Sequestration in the Ocean”(图5). 论坛由中国、美国、加拿大、欧洲科学院院士担任共同主席, 针对全球变化背景下应对气候变化、实施减排增汇及发展低碳经济的迫切需要, 深入探讨陆海统筹研发海洋碳汇过程与机制及其应用前景(Zhang等, 2018; Zhang等, 2019), 在*National Science Review* (Jiao等, 2018a, 2018b; Robinson等, 2018; Zhang等, 2018)和《中国科学: 地球科学》(胡欣等, 2018; 党宏月和李嘉, 2018; 牛明杨等, 2018; 谢树成, 2018)分别出版了专题.

2019年, 联合国气候变化专门委员会(IPCC)将海洋碳汇纳入《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》, “微型生物碳泵”理论、陆海统筹理念以及海水养殖区人工上升流等中国科学家提出的科学理论及其引导的增汇路径(Jiao等, 2018b)同时被纳入其中(图6). 2020年, 上述方案被纳入联合国政府间海洋委员会(IOC)海洋碳汇研究总结报告(IOC-R)以及未来十年海洋碳汇联合研究与观测的应对气候变化的解决方案之中.

5 碳中和国家战略与海洋负排放前景

碳中和目标的实现, 是应对气候变化、实现《巴

黎协定》目标的核心抓手. 在此背景下, 各国纷纷提出碳中和的时间表, 但实施路线图并不清晰. 中国承诺在2060年实现碳中和, 这将贡献全球在本世纪的升温幅度降低0.2~0.3°C (<https://climateactiontracker.org/press/china-carbon-neutral-before-2060-would-lower-warming-projections-by-around-2-to-3-tenths-of-a-degree>), 因此, 中国碳中和实施的路线图受到全球瞩目. 当前国际关注点集中在“减少碳排放”的路径和手段, 但对于碳中和目标的实现而言, 在减少碳排放的同时, 必需增加对大气CO₂的吸收, 即负排放的研发和实施, 以保障经济可持续发展.

全球科学家都意识到了这一点. 例如, 美国政府虽退出了巴黎气候协定, 但美国科学家与学术界仍然清醒地认识到负排放研究的必要性和紧迫性. 2019年美国国家科学院、工程院和医学科学院联合发表了“负排放技术与可靠的碳封存”(Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration)(Malik, 2019).

在碳中和目标的牵引下, 全球科学家已经开始了增加海洋储碳、应对气候变化的理论研究和探索, 旨在为实施海洋增汇提供理论基础和技术支撑. 2019年, 我国科学家发起了“海洋负排放国际大科学计划(Ocean Negative Carbon Emission, ONCE)”, 来自全

图5 中国科学院学部首届“雁栖湖会议”(2017年)

图6 IPCC《气候变化中的海洋与冰冻圈特别报告》首次领衔作者大会(2017年)

球15个国家的23名科学家签约参加ONCE计划,通过开展广泛的国际合作研究,建立长时间序列海洋碳汇观测站,链接海洋负排放科学研究和实际应用。ONCE可望推动在国家和地区层面建立典型海洋环境的负排放生态示范工程,结合海洋环境模拟实验体系,建立海洋负排放多种模式,针对可能存在的潜在风险进行生态系统水平上的评估,建立生态环境保护与增加碳汇双重标准下的“可监测、可报告、可核查”的指标体系和核算体系,绘制实施海洋负排放的路线图,可望为全球实现碳中和贡献中国方案。

参考文献

- 胡欣, 刘纪化, 刘怀伟, 庄光超, 荀鲁盈. 2018. 异养细菌硫代谢及其在海洋硫循环中的作用. 中国科学: 地球科学, 48: 1540–1550
- 党宏月, 李嘉. 2018. 变化海洋中的甲烷气候临界点潜力及生成悖论. 中国科学: 地球科学, 48: 1551–1567
- 焦念志, 王荣. 1993. 新生产力——一个新的海洋学研究领域. 海洋与湖沼, 24: 204–211
- 焦念志, 王荣. 1994. 海洋初级生产光动力学及产品结构. 海洋学报, 5: 85–91
- 焦念志. 2012. 海洋固碳与储碳——并论微生物在其中的重要作用. 中国科学: 地球科学, 42: 1473–1486
- 牛明杨, 梁文悦, 王凤平. 2018. 海洋环境中甲烷的生物转化及其对气候变化的影响. 中国科学: 地球科学, 48: 1568–1588
- 王荣, 焦念志, 李超伦, 沈志良, 吉鹏. 1995. 胶州湾的初级生产力和新生产力. 海洋科学集刊. 181–194
- 谢树成. 2018. 距今2.52亿年前后的生物地球化学循环与海洋生态系统崩溃: 对现代海洋的启示. 中国科学: 地球科学, 48: 1600–1605
- 谢树成, 陈建芳, 王凤平, 荀鲁盈, 汤凯, 翟卫东, 刘纪化, 马文涛. 2017. 海洋储碳机制及区域碳氮硫循环耦合对全球变化的响应. 中国科学: 地球科学, 47: 378–382
- 张传伦, 孙军, 刘纪化, 蔡阮鸿. 2019. 海洋微生物碳泵理论的发展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1933–1944
- 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, 樊炜, 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
- Aristegui J, Gasol J M, Duarte C M, Herndl G J. 2009. Microbial oceanography of the dark ocean's pelagic realm. *Limnol Oceanogr*, 54: 1501–1529
- Azam F, Fenchel T, Field J, Gray J, Meyer-Reil L, Thingstad F. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar Ecol Prog Ser*, 10: 257–263
- Barber R T. 1968. Dissolved organic carbon from deep waters resists microbial oxidation. *Nature*, 220: 274–275
- Cavicchioli R, Ripple W J, Timmis K N, Azam F, Bakken L R, Baylis M, Behrenfeld M J, Boetius A, Boyd P W, Classen A T, Crowther T W, Danovaro R, Foreman C M, Huisman J, Hutchins D A, Jansson J K, Karl D M, Koskella B, Mark Welch D B, Martiny J B H, Moran M A, Orphan V J, Reay D S, Remais J V, Rich V I, Singh B K, Stein L Y, Stewart F J, Sullivan M B, van Oppen M J H, Weaver S C, Webb E A, Webster N S. 2019. Scientists' warning to humanity: Microorganisms and climate change. *Nat Rev Microbiol*, 17: 569–586
- Chisholm S W. 2000. Stirring times in the Southern Ocean. *Oceanography*, 407: 685–686
- 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. *Nat Geosci*, 4: 293–297

- Ducklow H, Steinberg D, Buesseler K. 2001. Upper ocean carbon export and the biological pump. *Oceanography*, 14: 50–58
- Grotzinger J P, Fike D A, Fischer W W. 2011. Enigmatic origin of the largest-known carbon isotope excursion in Earth's history. *Nat Geosci*, 4: 285–292
- Hansell D A, Carlson C A, Repeta D J, Schlitzer R. 2009. Dissolved organic matter in the ocean: A controversy stimulates new insights. *Oceanography*, 22: 202–211
- Hansell D A. 2013. Recalcitrant dissolved organic carbon fractions. *Annu Rev Mar Sci*, 5: 421–445
- Hedges J I. 2002. Why dissolved organic matter? In: Hansell D A, Carlson C A. eds. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. California: Academic Press. 24–56
- Honda M C, Kusakabe M, Nakabayashi S, Manganini S J, Honjo S. 1997. Change in $p\text{CO}_2$ through biological activity in the marginal seas of the Western North Pacific: The efficiency of the biological pump estimated by a sediment trap experiment. *J Oceanogr*, 53: 645–662
- Howard J L, Creed J C, Aguiar M V P, Fourqurean J W. 2018. CO_2 released by carbonate sediment production in some coastal areas may offset the benefits of seagrass “Blue Carbon” storage. *Limnol Oceanogr*, 63: 160–172
- Jackson R B, Friedlingstein P, Andrew R M, Canadell J G, Le Quéré C, Peters G P. 2019. Persistent fossil fuel growth threatens the Paris Agreement and planetary health. *Environ Res Lett*, 14: 121001
- 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, 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
- 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, 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. 2014. Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean—Future research directions. *Biogeosciences*, 11: 5285–5306
- Jiao N Z, Chen D K, Luo Y M, Huang X P, Zhang R, Zhang H B, Jiang Z J, Zhang F. 2015. Climate change and anthropogenic impacts on marine ecosystems and countermeasures in China. *Adv Clim Change Res*, 6: 118–125
- Jiao N, Cai R, Zheng Q, Tang K, Liu J, Jiao F, Wallace D, Chen F, Li C, Amann R, Benner R, Azam F. 2018a. Unveiling the enigma of refractory carbon in the ocean. *Natl Sci Rev*, 5: 459–463
- Jiao N, Wang H, Xu G, Aricò S. 2018b. Blue carbon on the rise: Challenges and opportunities. *Natl Sci Rev*, 5: 464–468
- Khaliwala S, Primeau F, Hall T. 2009. Reconstruction of the history of anthropogenic CO_2 concentrations in the ocean. *Nature*, 462: 346–349
- Legendre L, Rivkin R B, Weinbauer M G, Guidi L, Uitz J. 2015. The microbial carbon pump concept: Potential biogeochemical significance in the globally changing ocean. *Prog Oceanogr*, 134: 432–450
- Longhurst A R, Glen Harrison W. 1989. The biological pump: Profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. *Prog Oceanogr*, 22: 47–123
- Malik J A N. 2019. US Academies call for research agenda on Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration. *MRS Bull*, 44: 13–15
- Martin J H, Knauer G A, Karl D M, Broenkow W W. 1987. VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific. *Deep Sea Res Part A-Oceanographic Res Papers*, 34: 267–285
- 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
- McTigue N, Davis J, Rodriguez A B, McKee B, Atencio A, Currin C. 2019. Sea level rise explains changing carbon accumulation rates in a salt marsh over the past two millennia. *Biogeosciences*, 124: 2945–2957
- Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, Valdés L, De Young C, Fonseca L, Grimsditch G. 2009. Blue Carbon-The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal
- Robinson C, Wallace D, Hyun J H, Polimene L, Benner R, Zhang Y, Cai R, Zhang R, Jiao N. 2018. An implementation strategy to quantify the marine microbial carbon pump and its sensitivity to global change. *Natl Sci Rev*, 5: 474–480
- Rothman D H, Hayes J M, Summons R E. 2003. Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle. *Proc Natl Acad Sci USA*, 100: 8124–8129
- Stone R. 2010. The invisible hand behind a vast carbon reservoir. *Science*, 328: 1476–1477
- Wang L. 2018. Microbial control of the carbon cycle in the ocean. *Natl Sci Rev*, 5: 287–291
- 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 Y, He P, Li H, Li G, Liu J, Jiao F, Zhang J, Huo Y, Shi X, Su R, Ye N, Liu D, Yu R, Wang Z, Zhou M, Jiao N. 2019. *Ulva prolifera* green-tide outbreaks and their environmental impact in the Yellow Sea, China. [Natl Sci Rev](#), 6: 825–838
- Zhao Z, Gonsior M, Luek J, Timko S, Ianiri H, Hertkorn N, Schmitt-Kopplin P, Fang X, Zeng Q, Jiao N, Chen F. 2017. Picocyanobacteria and deep-ocean fluorescent dissolved organic matter share similar optical properties. [Nat Commun](#), 8: 15284
- 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

(责任编辑: 焦念志)