陆海统筹研发碳汇

刘纪化^{①③}, 张飞^{②③}, 焦念志^{②③*}

① 山东大学海洋研究院, 青岛 266237;

② 厦门大学海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361102;

③ 厦门大学海洋微生物与地球圈层研究所, 厦门 361102

* 联系人, E-mail: jiao@xmu.edu.cn

2015-10-09 收稿, 2015-11-18 接受, 2015-11-27 网络版发表

中国科学院学部咨询项目、国家重大科学研究计划(2013CB955700)和《南海深海过程演变》重大研究计划集成项目(91428308)资助

摘要 人类活动引起的大气 CO₂ 浓度增加正在加剧全球气候变化, 因而全球碳循环和碳汇研究广受关注, 它不仅是科学问题, 也是关乎经济和社会发展的关键问题。碳汇研究涉及大气、陆地、海洋等各圈层。陆地向海洋输出的碳通量, 与陆-气界面、海-气界面相当; 但大部分陆地上形成的有机碳, 在输入河流和近海时发生了改变, 不仅无法形成碳汇, 反而引发河口碳源效应。因此, 系统开展陆海统筹协同研究, 对于全面认识碳汇形成过程与调控机制十分必要。新近提出的“微生物碳泵(microbial carbon pump, MCP)”理论为开展陆海统筹研发碳汇奠定了基础, 可望以 MCP 为突破口, 通过学科交叉研究和“产、学、研、政、用”结合, 实现协同创新, 为发展低碳经济提供科技支撑。

关键词

碳汇
碳循环
微生物碳泵
陆海统筹

工业革命以来, 由于化石燃料的广泛应用, 水泥、伐木、造纸等人类活动, 大气中的 CO₂ 浓度已经由 280 ppm(1 ppm=1 μL/L, 余同)增加到 400 ppm^[1,2], 并且在大气中持续积累。众所周知, 大气 CO₂ 含量的增加是引发全球变暖、海洋酸化等重大环境问题的主要因素, 而全球变暖带来的诸如冰盖融化、海平面上升、极端天气频发等一系列生态灾害, 正在威胁着人类的生存与发展。自 2009 年始, 中国已超过美国成为世界上 CO₂ 第一排放大国, 导致在国际气候谈判中面临巨大的减排压力。与此同时, 作为最大的发展中国家, 我们当前面临的首要任务依然是发展经济。因此, 在尽可能减排的同时增加碳汇(即增加 CO₂ 的吸收和储存能力)是两全其美之策。我国既是陆地大国, 也是海洋大国, 增加碳汇需统筹考虑陆地和海洋, 才有可能获得最优的增汇效果。这一目标的实现, 需要多学科交叉、深入研讨。为此, 由中国科学院学部主办、中国科学院学部学术与出版工作委员会承办、与

《中国科学》杂志社协办的第 30 次中国科学院学部科学与技术前沿论坛“陆海统筹研发碳汇”于 2013 年 11 月 29~30 日在北京召开, 并取得重要科学共识。本文简要综述若干重要方面。

1 陆地碳汇和海洋碳汇

1.1 陆地碳汇

陆地是人类赖以生存和发展的基石, 同时也是受到人类活动影响最大的生态系统。陆地碳库存在于陆地生物圈、土壤圈和岩石圈等^[3]。岩石圈是地球上最大的碳库, 据估计整个岩石圈的有机碳储量为 2.0×10^7 Pg C, 其中化石燃料约为 5000~10000 Pg C^[4,5], 整个岩石圈的碳总储量为 9.0×10^7 Pg C, 地球共包含大约 1.0×10^8 Pg C^[6,7]。陆地生物量碳储量约为 560 Pg C^[6,9], 其中森林约为 422 Pg C, 草原约为 92.6 Pg C^[10]; 作为地球表面最大的碳库, 陆地土壤中有机碳的总储量

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

Liu J H, Zhang F, Jiao N Z. Deciphering the mechanisms of carbon sink through a holistic view of interactions between land and ocean (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3399~3405, doi: 10.1360/N972015-00027

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00027>

约为1400~1500 Pg C^[11~13], 根据其存留时间可总体划分为活性碳库(小于1年)、缓性碳库(几十年)和惰性碳库(几百年至数千年)^[14]. 陆地植被通过光合作用将大气CO₂固定为有机碳, 一部分构成植物体本身, 并随食物链传递, 供给包括人类在内的各种动物的生命活动; 另一部分有机碳伴随着呼吸作用被重新排放到大气中; 还有一部分有机碳以枯枝落叶的形式进入土壤, 在各种微生物的作用下, 以CO₂的形式重新返回到大气当中. 这便形成了陆地生物碳循环的基本过程^[15].

陆地碳汇是指陆地从大气圈中吸收并扣押碳的容量. 陆地生态系统碳库受到人类活动的影响最大, 因此是全球碳循环的研究重点之一^[3]. 增加陆地碳汇, 对于减少CO₂在大气中的积累, 减缓由此带来的气候变化具有重要意义. 中国幅员辽阔, 可以考虑通过加强植树造林等方式增加陆地碳汇, 减轻在国际气候谈判中的压力. 中国陆地碳汇研究已取得部分进展, 缩小了与西方发达国家的差距. 据估计, 中国在20世纪80~90年代的陆地碳汇每年约为0.19~0.26 Pg C^[16], 与欧洲同期陆地碳汇水平相当.

然而, 陆地碳汇也存在自身的局限性, 增加了陆地碳汇研究的难度. (1) 陆地碳汇的留存时间较短. 作为重要的临时碳汇, 陆地碳汇可以为减少工业排放争取宝贵的时间, 但不能长久抵消工业排放^[17]. (2) 陆地碳汇受季节变化和其他气候变化的影响较大^[18,19]. (3) 陆地碳汇分布不均, 评估碳汇储量难度大. 陆地生态系统包括森林、草原、沙漠、冻原、湿地、农田等不同生态环境, 碳汇能力各不相同, 分别需要不同的评估模式和方法, 往往结果存在较大差异^[20~24]. (4) 陆地碳汇潜力相对优势不明显. 相对于占地球表面积超过71%、平均深度近4000 m的海洋, 陆地面积较小, 且厚度较薄, 碳汇潜力不占优势. 另外, 通过改变土地利用方式, 如发展人工林等常见的增加陆地碳汇的方法, 存在未知的生态风险^[25].

1.2 海洋碳汇

地球表面71%的面积被海洋覆盖, 海洋是地球上极其重要的碳汇, 同时也是地球上最大的活跃碳库. 海洋承担着调节全球气候变化“缓冲器”的作用. 海洋浮游植物每天从大气中吸收高达亿吨的CO₂, 但绝大部分被固定下来的有机碳经过一系列生物地球化学过程之后很快又返回到大气中. 虽然只有很小部分的有

机碳能够长期储存在深海和海底沉积物中, 但这种长期储碳对全球气候变化发挥着举足轻重的作用. 海洋碳循环与储碳机制研究已成为当前国际热点.

海洋可以通过物理、化学和生物学机制完成储碳, 如“溶解度泵(solubility pump, SP)”、“碳酸盐泵(carbonate pump, CP)”和“生物泵(biological pump, BP)”等^[26]. 溶解度泵基于物理和化学过程, 依靠海-气CO₂交换和物理搬运, 实现对大气CO₂的长期封存^[27]; 碳酸盐泵主要基于海水中碳酸盐的沉降过程, 由于这个过程同时释放等当量的CO₂, 所以又被称为“反向泵(counter pump)”; 而生物泵则基于颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)的垂直沉降; POC被埋葬海底后, 实现长期碳汇^[26~28]. 但真正到达海底被埋藏的POC只占初级生产力的0.1%^[29], 可见生物泵效率并不高, 且生物泵在长时间尺度上是单向进行的, 无法发挥气候“缓冲器”的作用.

海洋中还存在一个巨大的溶解有机碳库(dissolved organic carbon, DOC), 占海洋总有机碳的90%以上, 并且其中大部分是不能被生物利用的惰性溶解有机碳(recalcitrant dissolved organic carbon, RDOC), 其储量和大气CO₂相当^[30], 储存周期长达5000年. 然而海洋中巨大RDOC碳库的来源和产生机制, 长久以来并不清楚.

最近提出的“微型生物碳泵(microbial carbon pump, MCP)”理论, 提供了新的视角和思路, 揭示了海洋RDOC碳库的来源和产生机制^[31]. MCP是由海洋微型生物主导的, 不依赖于物理沉降的储碳机制, 能够在不同环境、不同水层的海洋中均发挥作用. 微型生物是海洋生物量的主体, 通过自身代谢活动, 将海洋环境中的活性溶解有机碳(labile dissolved organic carbon, LDOC)或半活性溶解有机碳(semi-labile dissolved organic carbon, SLDOC)转化成难以利用的RDOC, 实现千年以上的长周期碳封存. 在BP还没有发育好的古海洋中, MCP可能发挥过比现代海洋更大的作用^[32].

MCP理论的提出, 不但解决了长久困扰科学家们的难题, 也为增加海洋碳汇的生态工程提供了新思路. 即, 在研究海洋储碳能力时, 不应该只考虑依赖于沉降的BP过程, 应该同时考虑BP和MCP, 实现海洋储碳效率最大化^[33].

2 陆海统筹研发碳汇

陆地和海洋作为地球上重要的碳汇, 虽然储碳

形式和周期存在差异,但它们是紧密关联的.新近研究表明,陆地向海洋输出的碳通量,与陆-气界面、海-气界面相当^[34];大部分陆地上形成的有机碳,在输入河流后发生了改变^[35];河流携带的大量有机碳和营养盐注入海洋后,不仅导致近海富营养化,而且陆源有机碳无法有效保存^[36,37],进而引发一系列生态问题和河口碳源效应^[38,39].

人们已经意识到:陆海统筹,学科交叉开展碳汇研究,是解答一系列生态问题的关键.然而,相关研究的开展却并不顺利.究其原因,是因为陆地碳汇和海洋碳汇的科学理论体系存在差异,研究方法各不相同.

2.1 陆海统筹研发碳汇的理论基础

MCP理论的提出,不但揭示了海洋储碳新机制,而且为陆海统筹研究碳汇提供了可能.研究表明,MCP的储碳原理不仅适用于海洋,也适用于陆地土壤等其他环境^[40,41];MCP的生态学原理指出:并不是营养盐越多,越有利于有机碳的储存.事实上,营养盐过多会刺激异养细菌的呼吸作用,引发碳源效应.大量观测数据资料显示,在地球各种环境中(如土壤、河流、湖泊湿地、河口和近岸、以及开阔大洋),均存在这样的现象:在高氮环境中,有机碳的浓度反而是低的^[42].长达2~5年的河流模拟实验结果表明,高浓度营养盐使陆源有机碳的保存时间降低了约50%,而环境微生物在此过程中发挥了主导作用^[35].这些研究有力地支持了上述理论,也为富营养化的近海实施陆海统筹生态工程,提供了客观依据.

中国既是陆地大国,也是海洋大国(图1),环境多样,碳汇潜力巨大.因此,通过陆海统筹和学科交叉研究,可望实现增加整体碳汇的目标.过去20年,中国已成为全球最大的化肥消费国,陆地过量施肥和利用率较低并存:自1980~2010年我国化肥用量由1296万吨增加至5561万吨,年均增长率5%,其平均施用量已接近世界平均水平的4倍^[43].同时,我国化肥利用率约30%~40%,另外60%~70%主要以溶解态氮肥的形式进入水体^[44].因此,我国每年流失到江河的总氮量巨大.据估算,我国从陆地输入河流的总氮在过去22年增加了53%^[45].以长江为例,每年输入近海的溶解态无机氮约31万吨,导致长江口海域长期富营养化,初级生产力结构发生改变,赤潮频发,并出现大面积的低氧区^[46~48].

图1 中国不同地理生态环境下陆海统筹研发碳汇示意图

Figure 1 Deciphering the mechanisms of carbon sink through interactions between land and ocean in China

过量陆源营养盐输入海洋,虽然有利于提高BP效率,但并不一定能够增加整体碳汇.例如,过量营养盐会刺激海洋微型生物的代谢(如呼吸作用),导致更多环境有机碳被利用;剧烈的呼吸作用导致低氧或无氧区的形成,进而导致大量危害性更强的温室气体或有害气体(如 CH_4 , H_2S 等)的产生.同时,由于水体中溶解氧的降低,影响细胞呼吸产能效率,导致MCP效率降低,减弱了RDOC向深海的转移效率^[49].

通过实施陆海统筹生态工程,降低陆源营养盐输入至合理范围,将有利于更多DOC保存在水体中,实现整体碳汇增加的效应(图2)^[50].已有研究结果表明,当氮磷营养盐成为限制时,微型生物细胞就开始积累有机碳^[51].

仅就陆地而言,增加土壤营养盐供给,可能有利于陆地碳汇;但若从陆海统筹全局来看,就会有新的认识:过量陆源营养盐输入,非但不会增加近海储碳,反而会带来一系列生态灾害,最终导致整体碳汇效应降低.因此,碳汇研发,绝不能将陆地和海洋孤立隔绝开,必须陆海统筹,整合陆地和海洋碳汇研发资源,协调陆海碳汇研发步骤,根据我国生态资源特征,因地制宜地开展交叉学科碳汇研究.

2.2 陆海统筹研发碳汇的科学认识

陆海统筹研发碳汇,需要理清一些科学认识,如“固碳”与“储碳”的关系;“碳库”与“碳汇”的关系等.通常认为,初级生产者将 CO_2 固定下来,转化为有机碳,就完成了储碳过程;但人们往往忽视,这部分被固定的碳,很快就会被细菌等微生物的呼吸作用转

图2 增加微生物碳汇原理示意图。(a) 陆地大量营养盐输入导致近海溶解有机碳活化并被呼吸致使近海水域经常是 CO_2 的“源”；(b) 通过实施陆海统筹生态恢复工程提高微生物碳泵的储碳能力，有利于近海水域变成 CO_2 的“汇”^[50]

Figure 2 Microbial carbon processing scenarios with various nutrient conditions. (a) Dissolved organic carbon could be remobilized for respiration due to excessive terrestrial nutrients input, which could consequently exacerbate the CO_2 source effects in the coastal water; (b) Microbial carbon sequestration could be enhanced by reducing terrestrial nutrient input, which is in turn favorable for the coastal water to be a sink of CO_2 ^[50].

化为 CO_2 重新返回大气，这对“储碳”几乎没有贡献；因此“固碳”不等于“储碳”，只有把碳长期保存下来，才能起到对大气 CO_2 的有效封存^[33]。“碳库”是碳的现存量，而“碳汇”则存在时间约束，即储碳周期(如，海洋惰性溶解有机碳的储存周期约为5000年)。不同时间尺度的碳汇(十年、百年或千年)对储碳的贡献也是不同的。就储碳而言，时间越长，越稳定越好。实施碳汇生态工程的目标，也应该是以小的成本，实现更长久、更稳定的储碳。

2.3 陆海统筹研发碳汇的展望

现代科学研究表明，全球光合作用每年捕获的碳量，约45%由陆地生态系统完成，约55%由海洋生物完成^[52~55]，因此陆地碳汇和海洋碳汇同样重要。

中国幅员辽阔，南北跨度大，生态差异显著；国际海洋法公约赋予中国管辖的海域范围，相当于中国国土面积的1/3，其中主权海洋国土面积为300000 km^2 ，碳汇潜力巨大。因此，需要对生态环境进行区分，有针对性地模拟和研发碳汇。如在青藏高原地区，应该以加大保护力度，防止冻土融化、甲烷溢出及沉积老碳流出为主；在长江中下游地区，主要以控制农田种植和养殖业的化肥用量，减少营养盐的来源为主；在中国近海，应该以建立碳汇监测站，跨时空、跨行业、跨部门协同研究，获取核心过程参数为主。

目前，国际上尚未建立海洋碳汇相关的技术方法和标准规范。因此，我们应该抓住这一历史机遇，深入开展地球化学、物理海洋学、卫星遥感、地质学等交叉学科研究，利用现有的室内培养、船载现场模

拟、中宇宙生态实验体系等实验方法,借助分子生物学和生物化学的尖端技术,模拟和探索陆地和海洋碳汇形成机制和调控过程。例如:全球气候变化背景下陆地碳汇全组分的格局及其影响机制;陆地碳汇的潜力及其实现途径;陆-河-海系统的碳运输过程及再分配;河口、海岸带、湿地系统碳汇潜力;海洋碳汇的格局及其调控机制;海洋碳汇潜力及增汇途径;我国典型陆河海系统的统筹增汇模式及战略等。在长时间、可比的大量数据资料和生态过程参数基础上,构建生态模型,模拟不同环境条件和生态情景下,最优增汇效果的调控机制和变动规律。在统筹考虑陆地

和海洋的基础上,率先建立海洋碳汇方法与技术体系的规范与标准,服务减排增汇的国家战略需求。

站在不同的科学视角,碳汇研究不仅存在空间交叠,更具有时间跨度。现代碳循环研究,能够为古气候变化提供过程参数,用于模拟和反演。同样,古气候、古环境的研究,也能够“以古示今,演绎未来”。古今结合能够帮助我们跨越历史鸿沟,探究地质历史年代时间尺度的碳循环过程。在学科交叉的基础上,古今结合可能是碳汇研究的创新突破口。现代与地质历史年代碳汇格局的比较研究,将会产生地球碳循环的新认识。

致谢 感谢第30次中国科学院学部科学与技术前沿论坛“陆海统筹研发碳汇”(2013年11月29~30日,北京)与会人员,以及论坛组织方中国科学院学部学术与出版工作委员会与《中国科学》杂志社。

参考文献

- 1 IPCC, Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Metz B, Davidson O, Swart R, et al., eds. Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001. 2
- 2 Jones N. Troubling milestone for CO₂. Nat Geosci, 2013, 6: 589
- 3 Geng Y B, Dong Y S, Meng W Q. Processes of terrestrial carbon cycles studies (in Chinese). Prog Geogr, 2000, 19: 297–306 [耿元波, 董云社, 孟维奇. 陆地碳循环研究进展. 地理科学进展, 2000, 19: 297–306]
- 4 Hunt J M. Distribution of carbon in earth' crust. Bull Am Assoc Petrol Geol, 1972, 56: 2273–2277
- 5 Bolin B. How much CO₂ will remain in the atmosphere? In: Bolin B, Doos B R, Jagar J, et al., eds. The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems. New York: Wiley, 1986. 93–155
- 6 Schlesinger W H, Bernhardt E S. Biogeochemistry, An Analysis of Global Change. 2nd ed. San Diego, California: Academic Press, 1997
- 7 Smith T, Cramer W, Dixon R, et al. The global terrestrial carbon cycle. Water Air Soil Pollut, 1993, 70: 19–38
- 8 Olson J S, Watts J A, Allison L J. Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystems. Oak Ridge National Laboratory: Oak Ridge, 1983
- 9 Houghton R A. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. In: Lal R, Kimble J, Levine E, et al., eds. Soils and Global Change. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. 45–65
- 10 Turner B L. The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in The Biosphere over The Past 300 Years. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990
- 11 Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. Annu Rev Ecol Syst, 1977, 8: 51–81
- 12 Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298: 156–159
- 13 Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. Soi Sci Soc Am J, 1993, 57: 192–194
- 14 Parton W J, Schimel D S, Cole C, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. Soil Sci Soc Am J, 1987, 51: 1173–1179
- 15 Fang J Y, Guo Z D. Looking for missing carbon sinks from terrestrial ecosystems (in Chinese). Chin J Nat, 2007, 29: 1–6 [方精云, 郭兆迪. 寻找失去的陆地碳汇. 自然杂志, 2007, 29: 1–6]
- 16 Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature, 2009, 458: 1009–1013
- 17 Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report; Land use, land-Use Change and Forestry. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000
- 18 Cao M, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. Glob Change Biol, 1998, 4: 185–198
- 19 Fang J Y, Piao S L, Zhao S Q. The carbon sink the role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere (in Chinese). Acta Phytocool Sin, 2001, 25: 594–602 [方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. 植物生态学报, 2001, 25: 594–602]

- 20 Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Glob Biogeochem Cycle*, 1995, 9: 23–36
- 21 Gurney K R, Law R M, Denning A S, et al. Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 2002, 415: 626–630
- 22 Scurlock J M, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Glob Change Biol*, 2002, 8: 736–753
- 23 Nilsson S, Jonas M, Stolbovoi V, et al. The missing “missing sink”. *Forest Chron*, 2003, 79: 1071–1074
- 24 Houghton R. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Glob Change Biol*, 2005, 11: 945–958
- 25 Wang Y, Cao S. Carbon sequestration may have negative impacts on ecosystem health. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 1759–1760
- 26 Chisholm S W. Oceanography: stirring times in the Southern Ocean. *Nature*, 2000, 407: 685–687
- 27 Raven J, Falkowski P. Oceanic sinks for atmospheric CO₂. *Plant Cell Environ*, 1999, 22: 741–755
- 28 Falkowski P G, Barber R T, Smetacek V. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 1998, 281: 200–206
- 29 Houghton J, Ding Y, Griggs D, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2001
- 30 Ogawa H, Tanoue E. Dissolved organic matter in oceanic waters. *J Oceanogr*, 2003, 59: 129–147
- 31 Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, et al. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nat Rev Microbiol*, 2010, 8: 593–599
- 32 Rothman D H, Hayes J M, Summons R E. Dynamics of the neoproterozoic carbon cycle. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 8124–8129
- 33 Jiao N Z. Carbon fixation and sequestration in the ocean, with special reference to the microbial carbon pump (in Chinese). *Sci Sin Terrae*, 2012, 42: 1473–1486 [焦念志. 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*, 2012, 42: 1473–1486]
- 34 Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nat Geosci*, 2013, 6: 597–607
- 35 Rosemond A D, Benstead J P, Bumpers P M, et al. Experimental nutrient additions accelerate terrestrial carbon loss from stream ecosystems. *Science*, 2015, 347: 1142–1145
- 36 Guenet B, Danger M, Abbadie L, et al. Priming effect: Bridging the gap between terrestrial and aquatic ecology. *Ecology*, 2010, 91: 2850–2861
- 37 Bianchi T S. The role of terrestrially derived organic carbon in the coastal ocean: a changing paradigm and the priming effect. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 1973–1981
- 38 Chen C-T A, Borges A V. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO₂. *Deep Sea Res Part II: Topical Stud Oceanogr*, 2009, 56: 578–590
- 39 Yuan X, Yin K, Harrison P J, et al. Bacterial production and respiration in subtropical Hong Kong waters: Influence of the Pearl River discharge and sewage effluent. *Aquat Microb Ecol*, 2010, 58: 167–179
- 40 Benner R. Biosequestration of carbon by heterotrophic microorganisms. *Nat Rev Microbiol*, 2011, 9: 75
- 41 Liang C, Balser T C. Microbial production of recalcitrant organic matter in global soils: Implications for productivity and climate policy. *Nat Rev Microbiol*, 2010, 9: 75
- 42 Taylor P G, Townsend A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea. *Nature*, 2010, 464: 1178–1181
- 43 Luan J, Qiu H G, Jing Y, et al. Decomposition of factors contributed to the increase of China’s chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China (in Chinese). *J Nat Res*, 2013, 28: 1869–1878 [栾江, 仇焕广, 井月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解即趋势预测. *自然资源学报*, 2013, 28: 1869–1878]
- 44 Yuan J Z, Li L H. The effect of non-point source agricultural pollution on water body and its control (in Chinese). *Inner Mongolia Agric Sci Tech*, 2009, 1: 29–31 [袁金柱, 李利华. 我国农业面源污染对水体的影响及防治措施. *内蒙古农业科技*, 2009, 1: 29–31]
- 45 Ti C, Pan J, Xia Y, et al. A nitrogen budget of mainland China with spatial and temporal variation. *Biogeochemistry*, 2012, 108: 381–394
- 46 Hongkan G. The maxium value of dissolved oxygen in its vertical distribution in Yellow Sea. *Acta Oceanol Sin*, 1980, 2: 70–79
- 47 Zhang J, Liu S, Ren J, et al. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the east China Sea shelf. *Prog Oceanogr*, 2007, 74: 449–478
- 48 Li X, Bianchi T S, Yang Z, et al. Historical trends of hypoxia in Changjiang River estuary: Applications of chemical biomarkers and microfossils. *J Marine Syst*, 2011, 86: 57–68
- 49 Jiao N, Robinson C, Azam F, et al. Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean-future research directions. *Biogeosciences*, 2014, 11: 5285–5306
- 50 Jiao N, Tang K, Cai H, et al. Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land. *Nat Rev Microbiol*, 2010, 9: 75

- 51 Jiao N, Zheng Q. The microbial carbon pump: From genes to ecosystems. *Appl Environ Microbiol*, 2011, 77: 7439–7444
- 52 Arrigo K R. Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature*, 2015, 437: 349–355
- 53 Bowler C, Karl D M, Colwell R R. Microbial oceanography in a sea of opportunity. *Nature*, 2009, 459: 180–184
- 54 Falkowski P G, Katz M E, Knoll A H, et al. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science*, 2004, 305: 354–360
- 55 Simon N, Cras A L, Foulon E, et al. Diversity and evolution of marine phytoplankton. *C R Biol*, 2009, 332: 159–170

Deciphering the mechanisms of carbon sink through a holistic view of interactions between land and ocean

LIU JiHua^{1,3}, ZHANG Fei^{2,3} & JIAO NianZhi^{2,3}

¹*Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China;*

²*State Key Laboratory of Marine Environmental Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China;*

³*Institute of Marine Microbes and Ecospheres, Xiamen University, Xiamen 361102, China*

The recent global climate change is presumably linked to increased atmospheric CO₂ caused by anthropogenic activities. Therefore, the research on global carbon cycling attracts tremendous attention not only because it is related to science but also related to economy and society. This kind of research involves interactions among atmosphere, geosphere and the ocean. The carbon flux exported from land to ocean is equivalent to the land-sea interface and air-sea interface. However the major organic carbon derived from land is modified sharply when they are exported from rivers to coastal oceans, which convert the “carbon sink” into “carbon source” in the estuary. In such a scenario, the carbon cycling research between land and sea is therefore critically important in order to understand the processes and mechanisms behind it. The framework of microbial carbon pump (MCP) sheds light on the source and fate of recalcitrant dissolved organic carbon, which also is applicable to the soil system. Meanwhile, a new scientific understanding is that “carbon fixation is not equal to carbon storage” and “carbon pool is not equal to carbon sink”, which could provide insight into strategies to increase carbon sink. This scientific understanding provides practical and consistent foundation for the research and potential ecology management on carbon cycling between land and sea. Future endeavor in deciphering the mechanisms of carbon sink requires an interdisciplinary approach and the cooperation of industry, researchers, policy maker and customer.

carbon sink, carbon cycling, microbial carbon pump, land and ocean interaction

doi: 10.1360/N972015-00027