

# 微生物碳泵理论揭开深海碳库 跨世纪之谜的面纱

焦念志



焦念志

中国科学院院士，厦门大学海洋与地球学院教授

## 深海碳库成因之谜

气候变化是当今最大的全球性环境问题。人类活动导致大气二氧化碳(CO<sub>2</sub>)持续升高是加剧气候变化的主因。海洋是地球上最大的碳库，吸收了工业革命以来人类活动排放CO<sub>2</sub>的三分之一，是全球气候变化的“调节器”。海洋碳库调节气候变化的主要组分是溶解在水里的有机碳(DOC)。一方面，海洋DOC总碳量与大气碳库相近，如果与大气有交换，则势必影响气候变化。另一方面，海洋DOC中约95%是生物难以降解的惰性溶解有机碳(RDOC)，海洋RDOC的平均年龄约5000年，RDOC的积累可以缓解气候变化。早在半个世纪之前，科学家们就认识到RDOC碳库的重要性，然而其成因却一直是个悬而未决的科学难题，美国科学家在《自然》杂志刊文称其为难解之谜(Enigma)。

## 海洋微生物碳泵——揭开深海碳库成因之面纱

海洋微生物碳泵(Microbial Carbon Pump, MCP)，指的是海洋微生物的生理生态过程与生物地球化学过程把有机碳从可被利用的活性态转化为不可利用的惰性溶解有机碳，从而长期封存的储碳机制(图1)。RDOC的不可利用性有两种形式，一种是化学结构复杂、难被降解的有机碳，另一种是浓度极低

而多样性很高的一类有机碳。二者对应于相应的学说，前者叫“结构惰性假说”，后者叫“稀释假说”。我们在南海的实际研究以及其他国际同行的研究结果都表明，结构惰性的有机碳是深海RDOC的主要贡献者。特别是在加拿大的Aquatron大型海洋生态系统实验体系(水体117000升)进行的长周期生态模拟实验，不仅证实微生物碳泵储碳机制的客观存在，而且证明微生物碳泵效率极高，在不到一年的时间里即可把浮游植物产生的活性DOC转化成与南海深海中RDOC十分接近的化合物(图2)。RDOC在海洋的滞留时间在千年尺度，微生物的转化效率却如此之高，着实令人惊讶。

微生物虽个体极小，但种类繁多，生物量更是巨大。据估算，单海洋光合微生物每天固定产生有机质的量就可与陆地所有植物固定的有机碳量相当。微生物碳泵的过程，包括了病毒裂解细菌细胞、原生动捕食细菌产生有机质碎屑、细菌群落反复降解有机质、古菌等自养微生物直接合成有机质，等等。海洋碳循环和生物储碳机制还存在一系列复杂的物理和化学过程，与生物生态过程密不可分。若从非生物的角度看RDOC的循环，光(光降解作用)、热(海底火山热液)、物理吸附沉降等过程均加速了海水RDOC的循环或从水体中移除，而巨大的海洋RDOC库不仅未见“瘦身”，原位观测数据更是指出RDOC库在缓慢累加。可见，微生物碳泵是巨大海洋RDOC碳库形成的

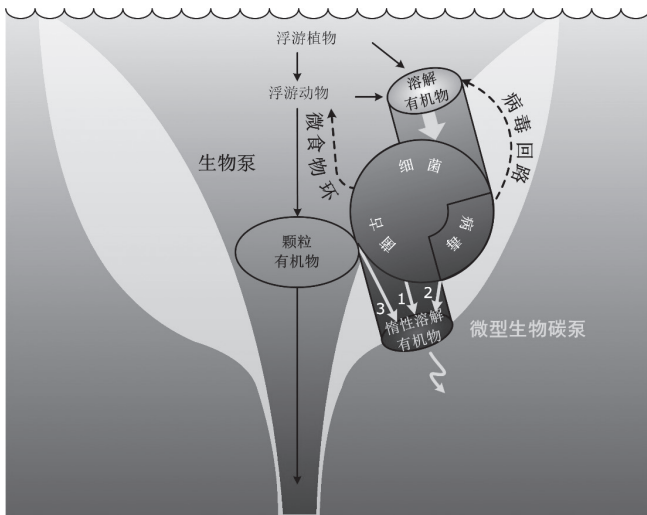


图1 微生物碳泵（图中右侧的泵状示意图）——海洋微生物把有机碳从活性有机碳转化为惰性溶解有机碳，从而实现碳的长期封存（仿 Jiao et al., 2010 *Nature Review Microbiology*）

主要机制，解开了半个世纪前美国科学家提出的 RDOC 碳汇成因之谜的面纱。

### 海洋微生物碳泵与气候效应

已有研究表明，全球变暖将加剧海洋水体分层，不利于海水混合，将减少深海营养盐向有光层的输送，进而降低自养生物光合作用固碳。然而异养细菌的活动将随温度升高而增强，这将使得微生物碳泵相对加强。海洋微生物不仅在现代，而且在地球环境和古气候演化中也扮演了举足轻重的角色。大气氧化、雪球地球、生命大爆发和数次生物大灭绝，都与之息息相关。与板块构造学说并列地球科学两大理论的“米兰科维奇理论”阐述地表气候旋回的驱动机制，该理论强调地球轨道参数（偏心率、斜率和岁差）调控地表不同纬度和不同季节的太阳辐射量变化，而北半球 65 度夏季太阳辐射量的周期性变化控制地表气候变化的冰期旋回。然而，偏心率对太阳辐射的贡献理论值不足 0.1%，不足偏心率在碳同位素比值地质记录中的 1%。海洋地质学家汪品先院士在这一领域有着独到的见解，经过多

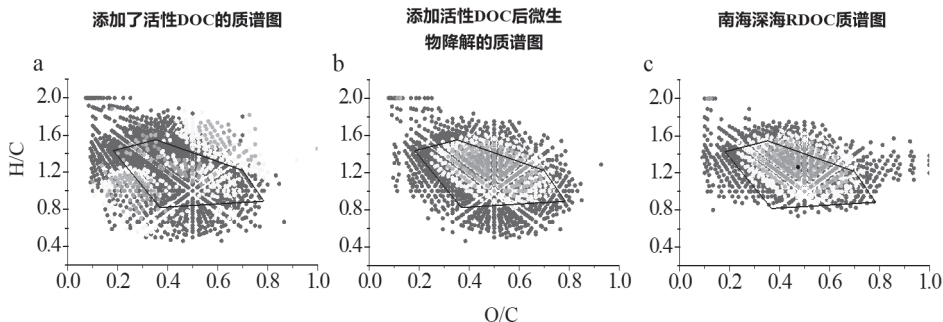


图2 微生物碳泵在短短的一年时间里把浮游植物产生的活性有机碳转化成与南海深海中RDOC十分接近的化合物，表明其效率极高（仿 Jiao et al., 2018 *National Science Review*）

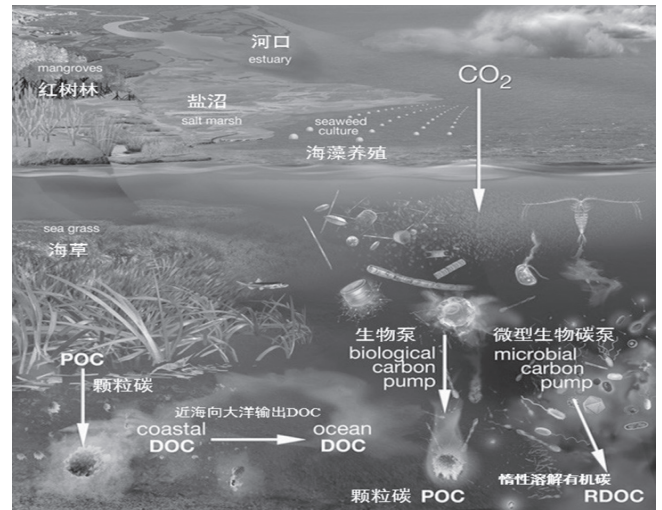


图3 陆海统筹：减少陆地施肥，增加海洋碳汇应对气候变化（仿 Jiao, Wang and Xu, 2018 *National Science Review*）

年矢志不渝的研究和思考，根据微生物碳泵理论提出了溶解有机碳假说，用于解释海洋碳库的 40 万年长偏心率周期的气候效应，并带领团队利用箱式模型进行了初步验证，完善了“米兰科维奇理论”。

### 海洋微生物碳泵与缓解气候变化措施

目前，联合国气候变化专门委员会（IPCC）已将海洋微生物碳泵纳入《海洋与冰冻圈》特别报告，不仅介绍了微生物碳泵的科学概念，并将其作为减排增汇缓解气候变化的可能措施，为这一领域科学研究和政策制定指引了新的方向。基于微生物碳泵原理，针对近海富营养海区，通过降低陆地营养盐输入，可望实现增加近海储碳的目的。目前，陆地普遍存在过量施肥，导致大量营养盐输入海洋，形成了近海的氮、磷等富营养环境；过量的营养盐会刺激海洋微生物降解更多的有机质，包括来自陆源有机碳在近海富营养化海洋环境中进一步被呼吸转化为二氧化碳重新释放到大气中。若能够控制陆源营养盐的输入，将会提高微生物碳泵的生态效率。美欧科学家在各种自然环境的统计资料以及河流实验结果也印证了这一点。因此，海陆统筹（图 3），合理减少农田土壤施肥，减少陆地营养盐向海洋的排放量，将使微生物碳泵在近海更加有效地将有机碳惰性化，并随后由海流带入大洋进行长期储碳。这将是一个既现实可行、又无环境风险的增汇途径。

致谢：作者感谢厦门大学蔡阮鸿、张瑶、张锐，以及同济大学汪品先、田军、翦知潞、谢昕等的支持