



矿物增效的生物泵: 基于矿物-微生物作用的水体CO₂增汇策略

袁鹏^{1,2*}, 刘冬^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室, 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广州 510640

* 联系人, E-mail: yuanpeng@gig.ac.cn

2015年12月, 人类应对全球气候变化危机的重要国际公约——《巴黎协定》(Paris Agreement)在巴黎气候变化大会上通过。《巴黎协定》提出, 要将全球21世纪的平均气温上升幅度(相比前工业化时期)控制在2°C(甚至1.5°C)以内。目前, 中国、美国、德国、法国等世界主要大国已签署了该协议, 部分国家还提出了“碳中和”甚至碳负排放的中期目标与完成时间表。中国国家主席习近平在2020年9月第75届联合国大会和12月“气候雄心峰会”上向国际社会作出“中国努力争取2060年前实现碳中和”的郑重承诺, 展现了中国在应对全球气候变化这一关乎人类命运之重大问题上的国家意志和引领能力。为达成全球气候变化的控制目标, 各主要国家正采取措施, 以期实现二氧化碳(CO₂)的有效减排。太阳能、氢能、生物质能源和核能等清洁能源得以迅速发展, 以减少化石能源依赖。然而, 即便在工业活动受新型冠状病毒疫情严重抑制的2020年, 人类向大气层排放的CO₂也高达近375亿吨(数据源自“全球碳排放量组织(Global Carbon Project)”, <https://www.icos-cp.eu/science-and-impact/global-carbon-budget/2020>)。据估算, 单靠发展清洁能源促成的碳减排, 短期内远不足以满足碳中和需求。因此, 科技界和产业界正积极推动“碳增汇”(即增加对大气CO₂的吸收)。一方面, 进一步增加植树造林以提高植被固碳^[1]; 另一方面, 积极发展CO₂捕集、利用和存储技术(carbon capture, utilization and storage, CCUS; 或carbon capture and sequestration, CCS), 例如, 直接捕集工业排放的CO₂^[2], 以及将CO₂注入深部地层进行地质封存^[3]等。

海洋是地球上最大的活跃碳库, 其CO₂储存量占地球总储碳量的93%; 规模分别是陆地碳库和大气碳库的20和50倍^[4]。因此, 海洋增汇和负排放技术近年来受到广泛关注。其思路主要是基于生物泵(biological pump)^[5]、微型生物碳泵^[6]、碳酸盐泵^[7]等机制或其组合^[8]发展相应的技术方法, 以增加颗粒有机碳、自生碳酸盐等储碳物质的产量, 使其高效输出至深海, 实现长时间尺度固碳。例如, Jiao等人^[9]提出, 综合生物泵、微型生物碳泵和碳酸盐泵原理, 营造沉积物厌氧



袁鹏 中国科学院广州地球化学研究所研究员, 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室副主任。研究领域包括矿物表-界面作用及其生态环境效应、固体矿产资源和二次资源的高效高值利用, 以及基于天然矿物的环境生态修复技术方法等。

环境以促进固碳。Montserrat等人^[10]提出, 在海水中添加橄榄石矿物粉末, 利用其风化作用和对水体碱度的调节作用, 加速水体CO₂消耗和碳酸氢根的生成, 增加自生碳酸盐的产量, 从而提高海洋固碳能力。

生物泵作用是指浮游生物通过光合作用将CO₂转化为颗粒有机碳, 经沉降运移至深海或沉积物中实现储碳或固碳(图1)。生物泵作用规模巨大, 对大气CO₂含量有重要调节作用。硅藻是生物泵作用的关键微生物, 其在海洋中数量庞大, 贡献了约40%的全球海洋初级生产力^[11,12]。硅藻的光合作用效率极高, 海洋硅藻通过光合作用所产生的有机碳量, 与陆地热带雨林有机碳的产量持平^[13]。基于海洋生物泵作用原理, 已发展出诸如大洋施铁肥(ocean iron fertilization, OIF)等旨在海洋碳增汇的地球工程(geoengineering)方法。

OIF的主要理论依据是生物泵作用和“铁假说”, 后者由海洋学家Martin^[14]于1990年提出。“铁假说”指出, 铁元素的供给是造成浮游生物爆发进而导致大气CO₂被大量吸收的重要诱因; 冰期时, 含铁沙尘大规模进入南大洋, 带去了丰富营养并促使浮游生物爆发, 使更多碳被转移到深海, 从而降低了大气CO₂浓度^[14]。“铁假说”的若干观点(如铁供给对冰期全球气候变化的重要影响)已为大量研究证实(详见Stoll^[15]的评述文章)。基于“铁假说”, OIF实验对海洋施加“铁肥”, 研究施肥后海区浮游生物的变化以及海区大气CO₂含量变化。1993年

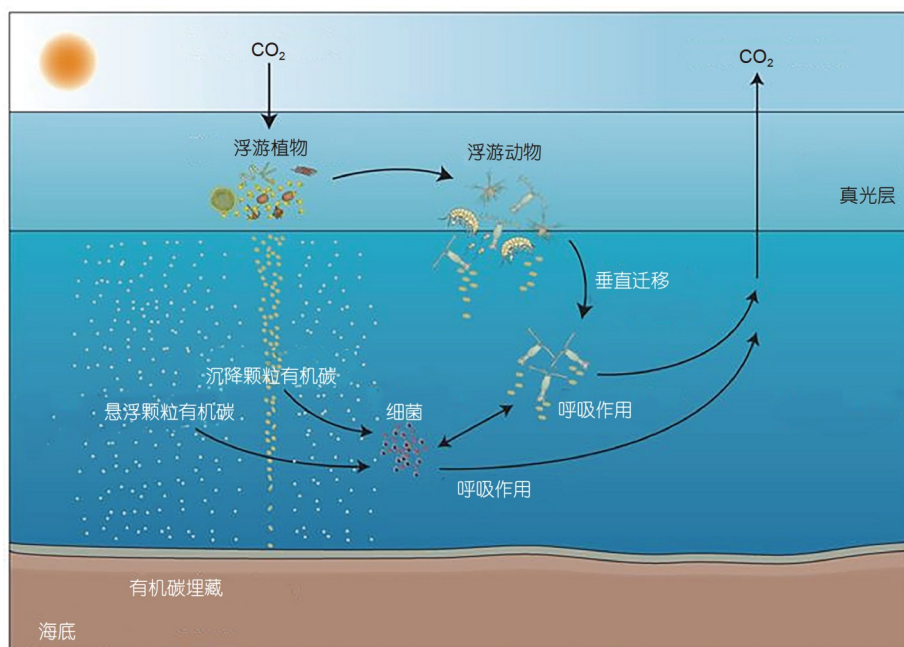


图 1 生物泵作用示意图. 修改自文献[5]

Figure 1 Schematic diagram of the interactions of biological pump (BP). Adapted from Ref. [5]

起, 研究者分别在极地、近极地和赤道的高营养、低叶绿素海域实施了约13次OIF实验.

上述OIF实验的结果为“铁假说”提供了有力支撑, 却未能证实铁施肥在增强生物泵作用和促进固碳方面的作用. 部分OIF实验(如赤道太平洋地区的OIF实验等^[16])未检测颗粒有机碳垂向输出至深海的通量. 关注了碳输出量的几个OIF实验(如亚北极太平洋实验等^[17]), 结果表明, 铁施肥未增加碳的垂向输出通量. 曾有研究在南大洋对铁施肥产生的“水华”颗粒有机碳进行了长达一年的连续监测^[18], 结果表明, 大部分颗粒有机碳未达深海, 碳的垂向输出效率低. 研究者曾采用SOFeX实验的结果进行碳循环建模和理论模拟计算^[19], 结果显示, 由于OIF有机碳输出效率低, 用其进行海洋固碳, 所需施肥海洋面积极大且施肥量和频次极高. 另一方面, 大量海洋生物泵作用和大洋硅循环的研究表明, 尽管海洋表层水体中硅藻爆发所产生的生物硅量很大, 但因壳体(硅藻的硅质骨架)的有机质分解、生物硅溶解等作用, 最终输出至深海的生物硅量至多仅占表层生物硅量的~3%^[20]. 虽然, 某些大型硅藻可通过“秋季倾泻”方式大规模输出生物硅和有机碳至海底^[21], 使该特定条件下生物硅输出占比较高, 但总体上生物泵作用中生物硅和有机碳垂向输出至深海的效率低.

可见, OIF虽能促使浮游生物爆发, 却不能有效增加有机碳垂向输运至深海的量, 因此, OIF尚未能发展成为缓解气候变化的一种有效策略. 同时, OIF可能增加 N_2O 等非 CO_2 温室气体的产生和排放, 并且可能导致其他的负面生态效应. 鉴

于此, 尽管《伦敦公约》和联合国《生物多样性公约》等旨在规范人类向海洋倾倒物质行为的国际准则并未禁止用于科学研究的小型海洋实验, 近年来已无新的OIF研究报道. OIF这一海洋增汇固碳策略的研究处于“休眠期”.

回顾相关研究可知, OIF实验并未尝试通过改变施肥配方(或方法)调控生物泵作用的有机碳垂向传输. 那么, 是否能够发展人工干预方法(如优化施肥配方), 提高OIF策略的有机碳垂向输出效率? 近期, 我们在硅藻等微生物-金属元素-黏土矿物间相互作用的系列研究^[22-25]中发现, 硅藻生物硅在水中的沉降受环境中铝等元素和黏土矿物等的显著影响; 硅藻可获取黏土矿物溶解所释放的铝, 并吸收其进入壳体骨架; 硅藻等微生物易与黏土矿物颗粒发生团聚. 上述效应可抑制硅藻生物硅溶解, 减少其有机碳在沉降中的损失, 有助于水体 CO_2 增汇.

基于相关研究结果, 我们提出了一种水体 CO_2 增汇策略假说——“矿物增效的生物泵(mineral-enhanced biological pump, MeBP)”^[25]. MeBP策略指出, 可尝试在OIF等基于水体的地球工程或生态工程中施加黏土矿物等矿粉, 通过调节矿物类型配比、调控颗粒特性, 提升微生物有机质-矿物复合体的沉降效率, 阻滞颗粒有机碳损失, 从而提高生物泵的固碳效率, 实现水体 CO_2 增汇. MeBP具有以下潜在优势: (1) 师法自然——基于廉价易得的天然矿物, 仿效地质沉积过程, 其环境生态效应有一定可控性; (2) 靶向作用——由硅藻等硅营养生物与矿物间的特定界面作用驱动; (3) 其应用可拓展

或集成——通过调整配方和施用途径,可望拓展应用场景,通过与其他水体固碳策略联用,可望实现CO₂增汇效率优化。

本文阐释了MeBP提出的背景、概念内涵和理论依据,并初步探讨了其可能的研究路径、应用途径或实施策略、环境生态风险及其可能的规避思路,以期引发进一步的学术讨论和新思考,为未来基于MeBP实施水体CO₂增汇提供基础和依据。

1 MeBP提出的背景及其概念简析

1.1 影响硅藻生物泵作用中有机碳输出的主要因素

硅藻是现代海洋中的主要浮游生物,因此海洋表层水体中常富含硅藻生物硅。然而,表层水体中的生物硅只有约3%^[20]垂向输出至深海。大部分硅藻生物硅则溶于海水,其携带的有机碳不能有效到达海底。因此,通过地球工程或生态工程调控硅藻生物泵作用,应着眼于提高生物泵的固碳效率。这要求找到制约硅藻生物泵垂向输送有机碳的因素,并据其研发减少垂向运移中有机碳损失的方法。

在水体中,硅藻沉降时因硅藻死亡、壳体溶解或有机质分解等导致有机碳损失,上述过程受到生物、物理、化学等多方面因素的影响^[26-28]。首先,硅藻在海洋中的归趋随其种属的不同而存在差异。据估计,地球上有多达约20万种(species)硅藻^[13]。不同种硅藻的生物习性、微观结构和壳体特性(如壳体溶解性)有时存在明显差异^[29];例如,某些硅藻的壳体壁薄,壳体易溶解;而某些大型硅藻的壳体抗溶性好。关于硅藻壳体的形状、比表面积、壁厚、密度等因素对其生物硅循环的影响,文献^[30]对此进行了总结。

硅藻及壳体的归趋也受水体生态链的显著影响^[31]。硅藻位于海洋食物链底端,是浮游动物的重要食物;被浮游动物吞食的硅藻,其壳体被包裹于粪粒中排出;粪粒较坚固而不易被破坏,使壳体溶解的几率降低;粪粒中生物硅的溶解率仅为自由悬浮硅藻溶解率的1/2~1/10^[32]。此外,粪粒下沉也比悬浮硅藻更快^[33],使壳体被输运至海底的机会更大。除浮游动物外,海洋水体中广泛存在着细菌等微生物,它们吞噬或分解硅藻细胞有机质的过程也影响着硅藻所携带有机质的垂向传输。

总的来说,海洋生物泵作用所涉及的生态系统和微生物作用高度复杂,参与其中的硅藻种类多,且硅藻种群随水体条件、季节等因素发生着动态变化^[12]。因此,尽管近年来有关硅藻地球化学归趋之生态制约机制的认识日趋深入,目前还难以实现从微生物生态因素入手人为干预硅藻生物泵作用。因此,要改善硅藻生物泵垂向输运有机碳的效率,须着眼非生物因素——即硅藻壳体的特性和其环境物理化学响应,尤其是壳体在水中的溶解性及沉降行为等因素,探索调控富有机质硅藻壳体垂向传输效率的有效方法。

据此思路,影响硅藻生物泵作用的壳体特性和物理化学

因素,主要包括壳体化学组成和壳体的团聚等。(1) 硅藻壳体的无机组分是无定形二氧化硅,其具有A型蛋白石(即Opal-A)矿物结构;在海洋环境中较易发生溶解,在表层海水中溶解率达50%~60%^[34]。壳体的溶解速率常用比溶解速率方程描述,该方程通过计算水体中硅酸的浓度、壳体比表面积等参数,获得特定条件下壳体的溶解速率^[35]。然而,比溶解速率方程预设了理想化条件,未考虑壳体化学组成变化对溶解性的影响。而研究表明,硅藻生物硅化学成分的改变会影响其溶解性^[36-38]。Dixit等人^[37]发现,海洋硅藻壳体含有铝时,其溶解性随之减弱;当铝/硅原子比为1/70时,溶解度降低25%。然而,海洋中溶解铝浓度低(例如,大洋表层水体中的Al浓度最高仅约50 nmol/L^[39]),赋存于壳体中的铝含量也很低(Al/Si原子比≤0.008);这种低铝含量不足以明显降低生物硅的溶解性^[30,37]。尽管如此,壳体化学组成影响其溶解性这一现象说明,改变壳体化学成分是调控壳体溶解性的一种潜在方法。(2) 硅藻壳体在水中的团聚和沉降。特定条件下,硅藻分泌的多糖可转化为透明胞外聚合颗粒(translucent exopolymer particles, TEP)^[40]。TEP使硅藻壳体彼此黏附并团聚。硅藻团聚体的沉降行为与单独的壳体颗粒不同,有利于降低壳体垂向运移中的溶解率。一方面,团聚体的沉降更快,抵达深海的几率更大^[41];另一方面,团聚体中活体硅藻的比例高,可延缓微生物对壳体有机质的分解^[42]。此外,团聚体中局部pH低于海水pH^[43],有利于延缓生物硅溶解。有关微生物-矿物团聚体的研究表明^[24,44,45],硅藻、蓝细菌等浮游生物的细胞体与黏土矿物等矿物颗粒易形成团聚体,该过程具有提高沉降速率和保护有机质(延缓其降解)等作用,与上述硅藻团聚体有类似效应。

因此,不妨考虑由硅藻壳体的无机组成及其团聚、沉降行为入手,研发可提高壳体沉降量、提高固碳效率的技术方法,以期应用于新一代基于水体生物泵作用的地球工程或生态工程中。

1.2 MeBP假说的提出

如前所述,铝进入硅藻壳体的结构中可降低其溶解性,有助于硅藻有机质随壳体沉降进入深海保存。然而,海洋水体中溶解铝的浓度仅为nmol/L级^[39]。该条件下,铝进入硅藻的比例极低,其降低壳体溶解性的效应可忽略。近期,我们在研究湖泊硅藻生物硅的硅-铝共循环和高铝环境中硅藻生物硅结构响应时发现,高溶解铝浓度(μmol/L级)的湖水环境中,铝进入硅藻壳体中的比例显著提高,其对壳体溶解的抑制效应明显^[23]。在高溶解铝浓度水体中,铝以类质同象置换硅的形式进入并稳定赋存于硅藻生物硅的结构中,其硅/铝原子比约为0.05;由此导致其溶解程度比无铝时降低多达~55%。该结果对水体硅藻生物泵增效乃至CO₂增汇的启示是,可通过提高水体中的溶解铝浓度,抑制壳体在沉降过程中的分解,提升有机碳的输出效率。与此相符,近期一项关于海洋中溶

解铝浓度变化影响硅藻固碳量的模拟研究(基于实验室硅藻培养)表明^[46],海水中添加痕量铝(40 nmol/L)可显著降低硅藻颗粒有机碳的分解速率,有助于其垂向传输和固碳。

尽管如此,鉴于铝的生物毒性,直接向海洋中添加溶解铝,即便能够提高硅藻生物泵的效率,也显然有违水体安全要求。因此,我们转而思考——是否可用黏土矿物等天然含铝矿物(作为铝源)用于调控生物泵效率?按此思路,我们开展了有关浮游微生物-矿物相互作用和硅藻土矿物学的系列研究^[22-24]。基于所获得的初步实验证据,提出了“矿物增效的生物泵作用(或策略,MeBP)”假说^[25]。其主要观点是,可尝试在OIF等基于水体的地球工程或生态工程中施加黏土矿物等矿粉,通过调节矿物配方、调控颗粒特性,减少颗粒有机碳在沉降过程中的损失,从而提高生物泵固碳效率。MeBP的作用机制中,黏土矿物一方面起到“硅营养”作用,促进硅藻等浮游生物生长;另一方面起到抑制硅藻壳体溶解、改善壳体聚沉性的作用。上述效应已初步得到实验证实。MeBP的机制示意图如图2所示。

2 MeBP的作用机制和潜在优势

作为一种旨在干预水体碳循环、实现CO₂增汇的地球工程策略,MeBP具有以下特点和潜在优势。

2.1 MeBP功能及其可调控、可拓展和可集成性

MeBP关于生物泵固碳的增效,可望通过以下机制实现:一方面,施加黏土矿物颗粒使其与硅藻作用,抑制壳体溶解。如前所述,在高溶解铝浓度水体中,结构含铝硅藻生物硅的溶解性减弱,有利于降低壳体在沉降中的有机碳损失。我们的初步实验表明,在硅藻(威氏海链藻, *Thalassiosira weissflogii*)培养体系中添加蒙脱石等黏土矿物,矿物的结构铝在硅藻作用下溶出,部分溶出铝被硅藻吸收并进入其硅质骨架^[25]。这将抑制壳体溶解,有助于富有机质硅藻颗粒的垂向输出^[23,28]。

另一方面,施加黏土矿物颗粒可促使壳体与黏土团聚、加速沉降。如前所述,硅藻团聚体沉降速度快、有利于活体硅藻保存,可延缓生物硅溶解和有机质分解。理论上,黏土矿物颗粒由于具有丰富的表面基团,易与硅藻细胞表面的有机官能团发生吸附等作用,形成黏土-硅藻团聚体,这已被实验证实^[25]。硅藻壳体-黏土颗粒团聚体的“压舱效应”有助于其加速沉降并延缓生物硅的分解,从而可望提升硅藻有机碳的垂向输出效率。此外,黏土矿物对水体中的有机离子也具有吸附作用^[24],因此黏土的施加有望额外增加硅藻生物泵中有机质的输送量。

因此,在基于生物泵的水体增汇方法中引入施加黏土矿物环节,相当于对硅藻壳体进行“改性”,并经由上述机制促进有机碳垂向输出。此过程中,通过调控黏土矿物的“配方”和添加量,可望优化硅藻生物泵固碳效率,该特点即为MeBP

的可调控性。

MeBP还具有应用拓展性,可望扩展或集成用于海洋OIF体系之外的更多应用场景,如陆地水体固碳。可利用水库等大型人工蓄水装置,发展规模化、可循环的新型生物泵固碳方法,并构建相应的CO₂增汇设施;研发相关CCS或CCUS技术,通过优化工程设计和配套应用,实现CO₂高效捕集和利用。换言之,基于MeBP机制,可望将基于特定海域生物泵作用的海洋固碳策略,升级为可大规模实施应用的新一代水体固碳增汇技术。此外,还可将MeBP与微型生物碳泵、碳酸盐泵等固碳策略或生态工程联用^[8,47],或将其作为一个增效模块集成(或嵌套)入水体固碳工程中,实现水体CO₂增汇的优化。

2.2 靶向性——定向作用于硅藻等硅营养微生物的特性

关于硅藻对黏土矿物的上述微生物溶解作用的机制,尽管在生物学上还需开展深入研究,但其诱因之一很可能是硅藻对硅营养的需求。研究表明,硅营养的持续供给对硅藻爆发十分关键,例如,2009年的LOHAFEX实验曾因硅营养耗尽而导致硅藻爆发终止^[48]。而黏土矿物结构中的硅恰可为硅藻生长提供营养。尤其是,硅藻所导致的黏土溶解作用以及铝进入壳体结构的过程,很可能“靶向”发生于硅藻和邻近的黏土矿物颗粒之间。因此,所施加的黏土矿物颗粒将定向作用于硅藻。此靶向性特点,可使基于MeBP的水体增汇工程定向促进硅藻爆发,避免其他(非期望)浮游生物的爆发,从而提高固碳作用的可控性。

2.3 环境友好性——师法自然、有利于降低生态风险

地球工程的潜在环境和生态风险是评估其可行性的重要指标。黏土矿物等作为产出丰富的天然组分,广泛参与微生物地质作用和地球化学过程,因此,微生物能“适应”富黏土环境。而黏土矿物作为陆源输入海洋的主要无机物^[49,50],与水体生态系统相容性良好,为将黏土矿物用于地球工程策略奠定了基础。根据沉积记录数据,大洋的沙尘输入与古气候变化间存在相关性^[51],这被归因于沙尘中的铁。但实际上,沙尘中亦富含黏土矿物^[52],风尘输入海洋可能恰好构建了一个典型的MeBP场景,即,黏土矿物等含硅、铝和铁的矿物颗粒促进了浮游生物爆发和之后的有机碳沉降、固碳,进而影响了古气候。就此而言,基于MeBP策略进行海洋等水体的增汇,可谓效法了大洋降尘促进生物泵作用的自然过程^[51]。而与自然过程不同,人为增效硅藻生物泵,可进一步优化施肥配方和参数,可望在实现“硅藻爆发、高效聚沉和有机碳垂向输出”的同时,有效控制环境和生态风险。

MeBP策略的环境友好性还体现在,由于具有靶向性,黏土矿物的潜在毒害元素(铝)的溶出相对可控;并且,硅藻-黏

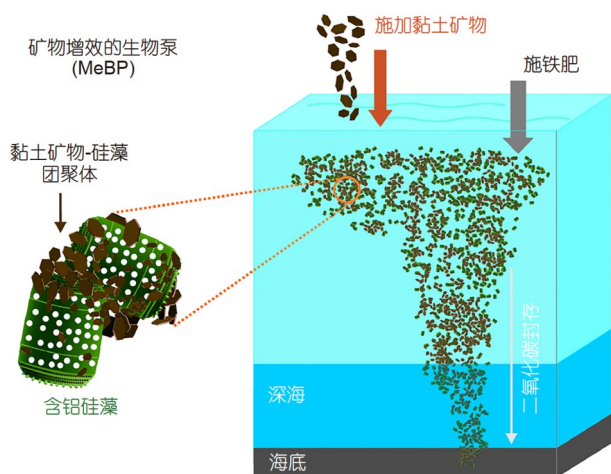


图2 矿物增强的生物泵主要作用机制示意图

Figure 2 Schematic representation of the main mechanism of mineral-enhanced biological pump (MeBP)

土团聚体和壳体本身能吸收或吸附铝, 可避免水体溶解铝浓度过高。诸多研究表明^[53], 黏土矿物结构铝的化学稳定性高, 在海水pH条件下化学溶出缓慢。这意味着, 集中投放黏土造成水体铝浓度大幅上升的几率低。实际上, 早在20世纪70年代, 已有向海洋中赤潮爆发区播撒黏土矿物来处理赤潮的方法^[54], 近年来甚至用人工改性黏土^[55,56]处理赤潮。这些实践都证明黏土矿物用于地球工程安全性较高。

3 MeBP的研究思路及其环境风险应对探讨

3.1 MeBP策略的研究和实践思路

鉴于前述潜在优势, 值得对MeBP开展深入研究, 并相应地据此研发地球工程或生态工程技术。为此, 须探明施加条件(矿物类型、施加量和方式等)、生物泵响应(生物爆发量和周期、硅藻壳体溶解性变化等)、硅藻种属和水体物理化学条件(不同类型硅藻的差异、水体营养条件等)的影响, 乃至矿物添加对非硅藻藻类的影响及其效应, 为工程实施提供依据。MeBP研究所涉及的体系复杂、学科领域多, 因此, 必须多学科、多角度地开展协同研究。在研究尺度和层次上, 要兼顾“宏”和“微”, 将微观机制研究与场地实验紧密结合; 在研究路径上, 既要沿“基础-应用基础-实际应用”的途径渐进, 又要不囿于此, 灵活开展探索性实验, 兼顾研究的稳妥性和效率。

简言之, 基础研究主要从实验室层面的矿物-微生物界面作用研究入手, 探明不同类型矿物微粒与硅藻(及其壳体)的相互作用。旨在: (1) 筛选用于硅藻聚沉的潜力矿物、矿物集合体及其组合, 评估其用于MeBP的可行性; (2) 探明矿物施加对硅藻生物习性乃至壳体结构-成分的影响, 遴选适用于MeBP的优势和潜力硅藻种属, 掌握相关的矿物-微生物界面

作用机制; (3) 掌握水环境条件下矿物-硅藻聚沉效应和壳体溶解性的制约因素和条件, 研究实现“加速硅藻壳体聚沉效应”的方法。

在此基础上, 在水体环境模拟实验体系中开展生物泵放大模拟实验, 验证硅藻爆发及生物泵增强的机制和方法。分析增效处理后硅藻输出有机质通量等的变化, 探明模拟池体系中矿物对生物泵有机碳输出效率的影响, 获得通过施加矿物质实现生物泵增强的系统数据, 总结生物泵增效条件和矿物施用参数。继而, 放大实验规模, 系统测试矿物组合和参数条件; 梳理MeBP调控硅藻聚沉及垂向输送的因素、条件和方法, 为开展实际水体实验提供技术依据。最后, 组织多学科研究力量, 协调科研和工程技术人员, 开展基于MeBP的水域围隔实验和工程实践。须认真评估前期实验(包括前人的OIF实验)结果, 进行合理的实验设计; 根据不同水体场景的特点(营养物、水化学等), 采用相应的实验策略和方案(包括环境风险的应对预案)。

3.2 关于MeBP的生态环境风险应对等问题的探讨

实施地球工程或生态工程必须充分考虑其潜在的环境和生态风险。OIF实验中, 向海洋添加大量铁元素, 会引发海洋生态环境扰动, 产生生态效应甚至风险^[57]。例如, OIF会引发浮游微生物群落结构、海洋生物地球化学循环的改变^[58], 进而引发初级生产力和食物链变化, 造成海洋动物种群变化、影响海洋渔业^[59], 并导致海水中间层溶解氧的消耗, 产生低氧和厌氧环境, 威胁海洋需氧生物的生存^[60]。施铁肥还可能导致 N_2O 、 CH_4 等非 CO_2 温室气体排放的增加^[61]。而基于MeBP的水体增汇实验, 或存在类似OIF的潜在环境风险, 因此必须审慎评估, 例如, 评估硅和铝浓度在水中显著增加引起的生物地球化学和环境效应等。

尽管对地球工程之生态效应的关注如此必要, 但鉴于人类已面临地球宜居性受严重威胁的严峻局面, 若面对气候灾变趋势怯于探索, 这也是一种巨大风险, 无异于“因噎废食”。因此, 我们认为, 有关水体地球工程的科学探索不应停止, 还应更积极地探索其“升级”的可能性。回顾之前的OIF, 其固碳效率不尽人意, 一方面, 由于OIF主要是为了验证“铁假说”和探索铁驱动的生物地球循环机制, 固碳并非其首要关注目标; 另一方面, 这些OIF研究主要基于海洋科学, 学科视角较单一, OIF本身的固碳潜力也许尚未被充分挖掘。总之, 正如德国极地及海洋研究所Smetacek和Naqvi^[62]指出, 相关研究尤其是关于OIF等地球工程储碳的基础科学研究亟待进一步开展。并且, 以固碳为目的MeBP研究, 须更有针对性、在更大空间-更长时间尺度上进行实地研究, 并聚焦固碳效率问题, 深入研究其微观机制。值得指出, MeBP不仅涉及多学科交叉, 还涉及工程技术, 因此, 亟待突破单一学科视角, 打破学科壁垒和思维定势, 从多角度分析MeBP固碳及其调控的机制。例如, 需参考陆海统筹增汇^[63]和水体藻类研究与应

用^[64]等相关领域的新进展,探索利用MeBP进行水体固碳增汇的技术方法。

此外,与一般科学实验“由小到大、循序渐进”不尽相同,MeBP实验事关水体生态安全。因此,有时难以兼顾其效果和安全:实验室级别的小尺度实验难以为评估工程效果和效应提供准确依据;而直接进行大规模MeBP实验的潜在环境风险较大。鉴于海洋增汇与碳中和研究的紧迫性,MeBP研究在遵循科学规律、稳妥推进的同时,不妨灵活探索以提高研究效率。例如,在风险可控的前提下,可在工程端先开展探索性场地实验,由此获得指导性的基础数据,为应用基础研究指引方向。此外,可综合采用模型预测、计算分析等手段与实验研究相结合,为大规模水体实验提供技术依据。

最后,在全球碳中和巨大需求下,受碳排放额度交易等商业利益驱动,商界对地质或生态工程技术用于固碳具有浓厚兴趣。由于相关的监管尚比较缺乏,或将催生某些纯粹出于商业目的、罔顾环境生态风险的水体固碳工程,从而埋下隐患。对此,我们认为,从事水体固碳增汇技术研究的科研人员,应格外珍视专业性和科学精神,保持科学上的独立性,避免为商业利益所裹挟。

4 结语

大洋施铁肥(OIF)虽能促进浮游生物爆发,却不能高效地垂向输出有机碳。针对此问题,我们提出了一种水体CO₂增汇策略假说——矿物增效的生物泵。主要观点是,可在基于水体的地球工程中施加黏土矿物等矿粉,通过矿物-微生物作用实现生物泵增效。一方面,硅藻促使黏土矿物颗粒溶解并释放铝,后者进入硅藻生物硅结构中并抑制壳体溶解,促进有机碳的垂向输出;另一方面,硅藻生物硅和黏土通过团聚加速沉降,提高迁移至深海的有机碳通量。通过调控矿物配方和颗粒特性,可调节MeBP在不同水体环境和应用场景的适应性与有效性。MeBP可与其他固碳策略集成或联用,用于水体CO₂增汇。

由于MeBP研究无经验可循,需要通过大量基础研究和场地实验以验证(或证否)其有效性、可行性及实施条件。为此,亟待积极、灵活地开展多学科、多角度交叉研究,综合实验室研究、计算模拟和场地实验等,为催生有效的水体CO₂增汇技术奠定基础。我们期待,MeBP策略的提出能引发有关水体增汇技术与工程实践的新思考和讨论,助力碳中和目标的达成。

致谢 文章成稿得到了中南大学刘红昌博士、重庆大学郭劲松教授、澳大利亚阿德莱德大学Dusan Losic教授、澳门科技大学杜培鑫博士和中国科学院广州地球化学研究所余荣达、沈宇果、田倩等研究生的帮助,特致感谢。感谢国家高层次人才特殊支持计划科技创新领军人才项目和国家自然科学基金(41772041, 42172047)资助。

推荐阅读文献

- Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, et al. The global tree restoration potential. *Science*, 2019, 365: 76–79
- Chu S. Carbon capture and sequestration. *Science*, 2009, 325: 1599
- Schrag D P. Storage of carbon dioxide in offshore sediments. *Science*, 2009, 325: 1658–1659
- Friedlingstein P, O’Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2020. *Earth Syst Sci Data*, 2020, 12: 3269–3340
- Herndl G J, Reinthaler T. Microbial control of the dark end of the biological pump. *Nat Geosci*, 2013, 6: 718–724
- Jiao N Z, Robinson C, Azam F, et al. Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean—Future research directions. *Biogeosciences*, 2014, 11: 5285–5306
- Schrag D P, Higgins J A, Macdonald F A, et al. Authigenic carbonate and the history of the global carbon cycle. *Science*, 2013, 339: 540–543
- Jiao N Z. Developing ocean negative carbon emission technology to support national carbon neutralization (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2021, 36: 179–187 [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: 179–187]
- Jiao N Z, Liu J, Jiao F, et al. Microbes mediated comprehensive carbon sequestration for negative emissions in the ocean. *Natl Sci Rev*, 2020, 7: 1858–1860
- Montserrat F, Renforth P, Hartmann J, et al. Olivine dissolution in seawater: Implications for CO₂ sequestration through enhanced weathering in coastal environments. *Environ Sci Technol*, 2017, 51: 3960–3972
- Tréguer P J, De La Rocha C L. The world ocean silica cycle. *Annu Rev Mar Sci*, 2013, 5: 477–501
- Tréguer P J, Bowler C, Moriceau B, et al. Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump. *Nat Geosci*, 2018, 11: 27–37
- Armbrust E V. The life of diatoms in the world’s oceans. *Nature*, 2009, 459: 185–192
- Martin J H. Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, 1990, 5: 1–13
- Stoll H. 30 years of the iron hypothesis of ice ages. *Nature*, 2020, 578: 370–371
- Coale K H, Johnson K S, Fitzwater S E, et al. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 1996, 383: 495–501

- 17 Boyd P W, Strzepek R, Takeda S, et al. The evolution and termination of an iron-induced mesoscale bloom in the northeast subarctic Pacific. *Limnol Oceanogr*, 2005, 50: 1872–1886
- 18 Bishop J K B, Wood T J. Year-round observations of carbon biomass and flux variability in the Southern Ocean. *Glob Biogeochem Cycle*, 2009, 23: GB2019
- 19 Zeebe R E, Archer D. Feasibility of ocean fertilization and its impact on future atmospheric CO₂ levels. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L09703
- 20 Tréguer P J, Sutton J N, Brzezinski M, et al. Reviews and syntheses: The biogeochemical cycle of silicon in the modern ocean. *Biogeosciences*, 2021, 18: 1269–1289
- 21 Kemp A E S, Pike J, Pearce R B, et al. The “fall dump”—A new perspective on the role of a “shade flora” in the annual cycle of diatom production and export flux. *Deep Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 2000, 47: 2129–2154
- 22 Yuan P, Liu D, Zhou J, et al. Identification of the occurrence of minor elements in the structure of diatomaceous opal using FIB and TEM-EDS. *Am Miner*, 2019, 104: 1323–1335
- 23 Liu D, Yuan P, Tian Q, et al. Lake sedimentary biogenic silica from diatoms constitutes a significant global sink for aluminium. *Nat Commun*, 2019, 10: 4829–4835
- 24 Liu H, Yuan P, Liu D, et al. Insight into cyanobacterial preservation in shallow marine environments from experimental simulation of cyanobacteria-clay co-aggregation. *Chem Geol*, 2021, 577: 120285
- 25 Yuan P, Liu D. Proposing a potential strategy concerning mineral-enhanced biological pump (MeBP) for improving ocean iron fertilization (OIF). *Appl Clay Sci*, 2021, 207: 106096
- 26 Bidle K D, Azam F. Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages. *Nature*, 1999, 397: 508–512
- 27 Loucaide S, Cappelle P V, Behrends T. Dissolution of biogenic silica from land to ocean: Role of salinity and pH. *Limnol Oceanogr*, 2008, 53: 1614–1621
- 28 Dixit S, Van Cappellen P. Surface chemistry and reactivity of biogenic silica. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66: 2559–2568
- 29 Li T G, Xiong Z F, Zhai B. Laminated Diatom Mat Deposits from the Low-latitude Western Pacific Linked to Global Carbon Cycle (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2015 [李铁刚, 熊志方, 翟滨. 低纬度西太平洋硅藻席沉积与碳循环. 北京: 海洋出版社, 2015]
- 30 Loucaides S, Van Cappellen P, Roubéix V, et al. Controls on the recycling and preservation of biogenic silica from biomineralization to burial. *Silicon*, 2012, 4: 7–22
- 31 Sarthou G, Timmermans K R, Blain S, et al. Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: A review. *J Sea Res*, 2005, 53: 25–42
- 32 Schultes S. The role of mesozooplankton grazing in the biogeochemical cycle of silicon in the Southern Ocean. Doctor Dissertation. Bremen: Universität Bremen, 2004
- 33 Turner J T, Ianora A, Esposito F, et al. Zooplankton feeding ecology: Does a diet of *Phaeocystis* support good copepod grazing, survival, egg production and egg hatching success? *J Plankton Res*, 2002, 24: 1185–1195
- 34 Nelson D M, Tréguer P, Brzezinski M A, et al. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: Revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. *Glob Biogeochem Cycle*, 1995, 9: 359–372
- 35 Hurd D C, Birdwhistell S. On producing a more general model for biogenic silica dissolution. *Am J Sci*, 1983, 283: 1–28
- 36 Van Bennekom A J, Buma A G J, Nolting R F. Dissolved aluminium in the Weddell-Scotia Confluence and effect of Al on the dissolution kinetics of biogenic silica. *Mar Chem*, 1991, 35: 423–434
- 37 Dixit S, Van Cappellen P, van Bennekom A J. Processes controlling solubility of biogenic silica and pore water build-up of silicic acid in marine sediments. *Mar Chem*, 2001, 73: 333–352
- 38 Rickert D, Schlüter M, Wallmann K. Dissolution kinetics of biogenic silica from the water column to the sediments. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66: 439–455
- 39 Han Q, Moore J K, Zender C, et al. Constraining oceanic dust deposition using surface ocean dissolved Al. *Glob Biogeochem Cycles*, 2008, 22: GB2003
- 40 Passow U, Engel A, Ploug H. The role of aggregation for the dissolution of diatom frustules. *FEMS Microbiol Ecol*, 2003, 46: 247–255
- 41 Alldredge A L, Silver M W. Characteristics, dynamics and significance of marine snow. *Prog Oceanogr*, 1988, 20: 41–82
- 42 Moriceau B, Garvey M, Ragueneau O, et al. Evidence for reduced biogenic silica dissolution rates in diatom aggregates. *Mar Ecol Prog Ser*, 2007, 333: 129–142
- 43 Alldredge A L, Cohen Y. Can microscale chemical patches persist in the sea? Microelectrode study of marine snow, fecal pellets. *Science*, 1987, 235: 689–691
- 44 Newman S A, Mariotti G, Pruss S, et al. Insights into cyanobacterial fossilization in Ediacaran siliciclastic environments. *Geology*, 2016, 44: 579–582
- 45 Playter T, Konhauser K, Owttrim G, et al. Microbe-clay interactions as a mechanism for the preservation of organic matter and trace metal biosignatures in black shales. *Chem Geol*, 2017, 459: 75–90

- 46 Zhou L, Liu F, Liu Q, et al. Aluminum increases net carbon fixation by marine diatoms and decreases their decomposition: Evidence for the iron–aluminum hypothesis. *Limnol Oceanogr*, 2021, 66: 2712–2727
- 47 Wang Y Z, Lu Y, Liu J H, et al. Advocating eco-engineering approach for ocean carbon negative emission (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2021, 36: 279–287 [王誉泽, 鲁鋈, 刘纪化, 等. “三泵集成”打造海洋CO₂负排放生态工程. *中国科学院院刊*, 2021, 36: 279–287]
- 48 Martin P, Loeff M R, Cassar N, et al. Iron fertilization enhanced net community production but not downward particle flux during the Southern Ocean iron fertilization experiment LOHAFEX. *Glob Biogeochem Cycle*, 2013, 27: 871–881
- 49 Jeong G Y, Achterberg E P. Chemistry and mineralogy of clay minerals in Asian and Saharan dusts and the implications for iron supply to the oceans. *Atmos Chem Phys*, 2014, 14: 12415–12428
- 50 Blattmann T M, Liu Z, Zhang Y, et al. Mineralogical control on the fate of continentally derived organic matter in the ocean. *Science*, 2019, 366: 742–745
- 51 Blain S, Quéguiner B, Armand L, et al. Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature*, 2007, 446: 1070–1074
- 52 Moreno T, Querol X, Castillo S, et al. Geochemical variations in aeolian mineral particles from the Sahara-Sahel Dust Corridor. *Chemosphere*, 2006, 65: 261–270
- 53 Jeandel C, Oelkers E H. The influence of terrigenous particulate material dissolution on ocean chemistry and global element cycles. *Chem Geol*, 2015, 395: 50–66
- 54 Shiota A. Red tide problem and countermeasures. *Int J Aquat Fish Technol*, 1989, 1: 195–293
- 55 Yu Z M, Zou J Z, Ma X N. Application of clays to removal of red tide organisms I. Coagulation of red tide organisms with clays. *Chin J Ocean Limnol*, 1994, 12: 193–200
- 56 Yu Z, Song X, Cao X, et al. Mitigation of harmful algal blooms using modified clays: Theory, mechanisms, and applications. *Harmful Algae*, 2017, 69: 48–64
- 57 Buesseler K O, Doney S C, Karl D M, et al. Ocean iron fertilization—Moving forward in a sea of uncertainty. *Science*, 2008, 319: 162
- 58 Hoffmann L J, Peeken I, Lochte K, et al. Different reactions of Southern Ocean phytoplankton size classes to iron fertilization. *Limnol Oceanogr*, 2006, 51: 1217–1229
- 59 Gnanadesikan A, Sarmiento J L, Slater R D. Effects of patchy ocean fertilization on atmospheric carbon dioxide and biological production. *Glob Biogeochem Cycle*, 2003, 17: 1050
- 60 Fuhrman J A, Capone D G. Possible biogeochemical consequences of ocean fertilization. *Limnol Oceanogr*, 1991, 36: 1951–1959
- 61 Oschlies A, Koeve W, Rickels W, et al. Side effects and accounting aspects of hypothetical large-scale Southern Ocean iron fertilization. *Biogeosciences*, 2010, 7: 4017–4035
- 62 Smetacek V, Naqvi S W A. The next generation of iron fertilization experiments in the Southern Ocean. *Phil Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2008, 366: 3947–3967
- 63 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 [刘纪化, 张飞, 焦念志. 陆海统筹研发碳汇. *科学通报*, 2015, 60: 3399–3405]
- 64 Li J J, Qin S, Liu F L, et al. New trends in the research and applications of seaweed in response to global change (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 334–338 [李晶晶, 秦松, 刘福利, 等. 全球变化下的海藻学术和应用新趋势. *科学通报*, 2020, 65: 334–338]

Summary for “矿物增效的生物泵：基于矿物-微生物作用的水体CO₂增汇策略”

Mineral-enhanced biological pump—A strategy based on mineral-microbe interactions for increasing carbon sink in water

Peng Yuan^{1,2*} & Dong Liu^{1,2}

¹ CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (CAS), Guangzhou 510640, China;

² CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou 510640, China

* Corresponding author, E-mail: yuanpeng@gig.ac.cn

Addressing the threats posed by global climate change by reducing the number of greenhouse gases is currently one of the most important research goals of the scientific community. Ocean iron fertilization (OIF) is a geoengineering strategy aimed at mitigating global warming through human intervention. The OIF concept is based on the idea that artificial adding of iron nutrients into iron-depleted regions of the ocean will lead to a rapid boost of phytoplankton populations and the mass sinking of organic matter that ultimately leads to the sequestration of significant amounts of atmospheric CO₂ in the deep sea and sediments. The OIF experiments have been conducted in past over the time and the space scales of weeks and kilometres in polar, subpolar and tropical areas of the oceans. The results have generated new knowledge and a better understanding of the role of iron in regulating marine ecosystems and have confirmed that the iron supply is one of the key controls on the dynamics of phytoplankton blooms, such as diatom as the base of the marine food chain, which in turn affect the whole biogeochemical cycling of carbon. However, the OIF as an effective carbon control strategy is not adequately supported with concerns about potential significant impacts on marine ecosystems. The iron fertilization also did not significantly strengthen the vertical carbon export to the deep sea and thereby the sequestration of CO₂. The efficacy by which the OIF vertically exports organic carbon associated with diatom blooms to the deep sea remains constrained due to the remineralization and the loss of organic carbon during the sinking process of diatomaceous biogenic silica (BSi). Therefore, to address these limitations, the next generation of the IOF geoengineering experiments should be designed to improve the low efficiency of the vertical export of bloomed phytoplankton, which will reduce the loss of organic carbon during the sinking of biomass. In our recent studies, we observed a noticeable dissolution-inhibition effect of Al-bearing lake diatomaceous BSi, which is caused by the high content of Al incorporation in the structure of the BSi. This finding inspired a new idea about the possibility of incorporating naturally occurring, environmentally safe and Al-rich minerals as an Al source for the geoengineering experiments. We hypothesize that clay minerals, with characteristically high contents of Al and Si, might be good ingredients for mineral fertilization in geoengineering experiments to enhance the efficiency of the vertical carbon export of the biological pump. This new proposed mineral-aided process is termed mineral-enhanced biological pump (MeBP). In this paper, the concept, background and theoretical basis of MeBP for CO₂ sequestration in water bodies as a new and inexpensive geoengineering strategy are explained. The basic idea of the MeBP concept is to use finely grained powders of minerals, such as clay minerals as nutrients for geoengineering or ecological engineering experiment to enhance the efficiency of the complexes of microbial organic matter and minerals and to hinder the loss of particulate organic carbon by adjusting the mineral ratios and regulating the particle properties. If so, the improved carbon sequestration efficiency of the biological pump and the CO₂ sink enhancement in water bodies could be achieved. The MeBP offers several potential advantages such as application simplicity, low-cost, scalability, environmental friendliness, and flexibility, and it could be applied alone or in combination with other carbon sequestration strategies. Also, the approaches for the research and application of MeBP, the environmental and ecological risks of applying MeBP and the possible ways of avoiding these risks are discussed. These discussions aim to stimulate new thinking toward the development of new technologies of increasing carbon sink in water bodies that are sustainable, ecologically acceptable and scalable, and can be translated into real applications and engineering practices.

mineral-microbe interactions, carbon neutrality, clay minerals, biological pump, diatom

doi: [10.1360/TB-2021-1267](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1267)