

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

裂谷演化与生物地球化学反馈

王嘉宁^{1*}, 王瑞林¹, 李生¹, 贾凡琛¹, 高和婷¹, 朱光有¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉市 430100

本文系统综述了裂谷演化过程中生物地球化学反馈机制的形成、调控及其对全球元素循环与气候系统潜在影响的内在联系。裂谷作为新生板块边界, 其演化受板块拉张、地壳薄化及地幔上涌等动力学作用的驱动, 同时伴随断层活动、火山喷发和沉积环境的复杂演变, 这些地质过程通过火山与热液作用释放大量温室气体, 并促进有机质的沉积与矿化, 从而对碳、硫、硅、磷、氮等关键元素的地球化学循环产生深远调控作用, 进而影响区域乃至全球的气候变化。近年来, 随着同位素地球化学、分子生物学及数值模拟等前沿技术的发展, 研究者对裂谷内部微生物和浮游植物(尤其是硅藻)在光合作用、甲烷生成及生物降解等过程中的作用进行了深入探讨, 揭示了其在温室气体释放和元素转化中的关键调节功能; 与此同时, 矿物-生物相互作用作为一种重要的反馈机制, 也逐渐显现出对裂谷长期演化的影响。以东非裂谷、巴伦支裂谷等典型区域为例, 综合研究表明, 火山活动、沉积作用与热液过程在共同作用下构成了复杂的反馈

网络, 使得裂谷构造演化与生物地球化学过程之间存在着多尺度、动态耦合的内在关系, 这不仅在温室气体排放和古气候变化记录中有所体现, 也为理解地球表层动力学演化提供了新的视角。尽管当前在数据采集、实验方法和跨学科模型构建等方面已取得诸多进展, 但高分辨率地球化学分析、微观尺度生物过程定量研究以及多学科交叉整合仍存在不足, 亟待进一步突破。展望未来, 综合运用先进的分子生物学技术、同位素追踪手段和数值模拟方法, 有望进一步揭示裂谷演化中生物地球化学反馈机制的内在细节及其作用路径, 从而为预测区域及全球气候变化提供更为坚实的理论支撑, 同时也为探讨地球系统中复杂反馈网络的形成与演化提供新思路, 对推动地质学、生态学及气候科学等相关领域的交叉融合具有重要理论与应用价值。

关键词: 裂谷演化; 生物地球化学反馈; 元素循环; 温室气体; 气候变化

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

南极罗斯海 LGM 以来氧化还原环境变化研究

王逸卓¹, 韩喜彬^{2*}, 张怡², 洪昱恺², 韩瑞³, 刘昀³,
马朋云³, 葛倩², 李小虎²

1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都市 610000;

2. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学与划界全国重点实验室, 浙江省杭州市西湖区保俶北路 36 号 310012;

3. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 青岛 266590

大洋底层水氧化还原环境变化的研究, 对于理解全球气候变化、深层水循环、全球海洋环流及生态系统健康等具有重要意义。南极罗斯海是南极底层水生成的重要区域之一, 本文通过对罗斯海 ANT32-RB16C 柱状沉积物进行主、微量元素、粒度、有机碳及氮同位素的测试分析, 选取 Mn/Ti、Co/Ti、Mo/Ti、Cd/Ti、U/Th 及 Ni/Co 等氧化还原敏感元素地球化学指标, 结合前人建立的年代框架, 讨论了末次冰盛期 (last Glacial Maximum, LGM) 以来罗斯海底层水氧化还原状态的变化。结果表明, 研究区在 LGM 以来的沉积环境中, 始终处于富氧状态下, 但存在显著的变化并呈四个阶段。第一阶段 (24.7~15.6 Cal ka BP)

研究区氧化程度较强, 水体氧含量较高, 主要受南极底层水 (AABW) 的影响, 处于氧化条件高峰阶段; 第二阶段 (15.7 Cal ka BP~4.5 Cal ka BP) 则因生产力提高, 以及温度对海冰消退和大洋环流的影响等多重因素, 处于氧化条件衰减阶段; 第三阶段 (4.5 Cal ka BP~1.5 Cal ka BP) 还原环境显著增强, 同样也受到了生产力的主要影响; 第四阶段 (1.5 Cal ka BP~0 Cal ka BP), 氧化环境迅速恢复, 与此阶段气温突降而对 AABW 的增强作用及低生产力水平密不可分。

关键词: 氧化还原环境; 罗斯海; 末次冰盛期; 底层水; 氧化还原敏感元素地球化学指标

基金项目: 中国国家重点研发计划 (2023YFC2811305); 自然资源部第二海洋研究所科研基金 (SZ2405); 南极海洋对气候变化的影响及响应 (IRASCC)

第一作者简介: 王逸卓 (2000-) 硕士研究生; 研究方向: 沉积地球化学。Email: yz_wang@sio.org.cn

*通信作者简介: 韩喜彬 (1976-) 副研究员; 研究方向: 沉积地球化学。Email: hanxibin@sio.org.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

贵州草海生态系统退化诊断与恢复技术

杨海全^{1,2*}, 陈敬安^{1,2}, 王敬富^{1,2}, 廖鹏^{1,2}

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳市观山湖区林城西路 99 号 550081;

2. 红枫湖水库生态系统贵州省野外科学观测研究站, 贵州贵阳 551499

草海作为喀斯特高原湿地的典型代表, 其物质循环与生态环境具有典型特征。沉积物和颗粒物中有机质含量显著高于其他类型湖泊, 其中沉积物 TOC 平均含量达 16%, 沉积物磷形态以有机磷为主, 酯类等有机磷的矿化驱动内源磷释放, 内源释放通量高, 其中重污染区达 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。草海水体具有高 pH、高 HCO_3^- 等特征, 存在明显的施肥效应。实施流域综合污染治理工程以来, 草海外源污染输入得到了有效控制, 水体溶解氧含量升高, 水质稳中向好。然而自 2020 年以来, 草海出现大面积水体浑浊、水生植物消亡现象, 沉水植物盖度由原来 90% 以上减少到不足 30%, 水体营养盐含量显著升高, 水体浑浊, 水质明显恶化, 局部湖区甚至出现蓝藻水华, 对生态系统和鸟类构成严重威胁, 草海水生生态系统濒临崩溃。当前草海正处于从健康的清水草型生态系统向浊水藻型生态系统灾难性突变的关键时间节点。草海生态系统退化主要是由于持续的流域外源输入导致的湖泊存在较高内源负荷, 而水文节律的改变 (持续高水位和水位变幅减

小、水体流动性差) 导致近岸区挺水植物消亡、沉水植物萌发受到抑制; 同时禁渔措施的实施造成湖区鱼虾数量剧增, 一方面增加了沉积物再悬浮, 进一步造成水体浑浊, 内源释放增强, 另一方面食草性鱼类机械损伤进一步造成水生植物消亡, 造成水生生态系统退化, 水生植物消浪作用减弱, 水体自净作用降低, 生态系统失衡, 形成恶性循环。草海生态系统修复应遵循“自然修复为主, 人工干预为辅”的理念, 进一步削减流域外源营养盐输入通量的同时, 对湖区实施科学的鱼类种群调控和水位调控措施, 并研发高效适宜的水体营养盐和悬浮颗粒物削减-沉积物再悬浮控制技术, 降低内负荷, 提高水体透明度, 为沉水植物恢复创造良好生境。选择典型区域开展技术示范, 恢复水生植物群落, 提升水质, 形成草型健康的生态系统, 并向全湖应用推广, 逐步恢复草海水生生态系统。

关键词: 生态系统; 退化诊断; 恢复技术; 内源污染控制; 草海

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

中国交通碳排放预测与碳达峰路径规划

贾晓晨^{1*}

1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都市 610051

在全球应对气候变化、推动低碳可持续发展的背景下。中国交通减排对于全球减排目标、推动交通领域的低碳可持续发展有重大意义。中国交通运输业的碳排放问题历来备受关注,其碳达峰、碳中和战略目标的实现对于全球气候具有深远影响。本研究旨在助力中国交通运输业提前达成这一战略目标,通过深入分析、科学预测,为制定有效的减排策略提供坚实的理论依据。为实现上述目标,本研究选取了 2000—2021 年中国 30 个省(市、自治区)的面板数据作为研究样本。这些数据能够全面反映中国不同地区交通运输业在长期发展过程中的碳排放特征及变化趋势。在数据处理阶段,对原始数据进行了严格的清洗、整理和标准化处理,以确保数据的准确性和可靠性,为后续的模式构建奠定坚实基础。在模型构建方面,本研究采用了多种先进的机器学习回归算法,包括线性回归、决策树回归、随机森林回归等。其中, Lasso 回归模型因其在变量选择和系数压缩方面的独特优势,能够有效处理高维数据并降低模型的过拟合风险;支持向量机算法则凭借其在小样本、非线性、高维模式识别问题上的卓越表现,展现出强大的分类和回归能力。将 Lasso 回归模型与支持向量机算法相结合所建立的预测模型(以下简称 Lasso_SVM 模型)在各项性能指标上均表现出色,成为本研究的核心预测工具。为了进一步验证模型的有效性和实用性,本研究以粤沪鲁川 4 省(市)的交通运输业进

行实证分析。针对这 4 省(市),本研究设定了基准、节能减排和技术减排这 3 种不同的未来发展情景。基准情景假设在现有政策和技术条件下,交通运输业按照历史趋势自然发展;节能减排情景考虑了常规的节能减排政策措施的实施效果,如推广新能源汽车、优化交通管理等;技术减排情景则聚焦于先进技术在交通运输领域的大规模应用,如智能交通系统、氢燃料电池技术的普及等。运用 Lasso_SVM 预测模型,对粤沪鲁川 2022—2035 年交通运输碳排放量进行了精确预测。预测结果显示,在基准情景下,四省市交通碳达峰时间分别为 2029 年(73.59 Mt)、2028 年(52.16 Mt)、2030 年(55.08 Mt)、2029 年(33.46 Mt);节能减排情景可使达峰时间整体前移 1~2 年,峰值削减 12.7%~19.4%;技术减排情景下新能源技术突破可使山东等货运大省峰值再降 8.3%。在节能减排情景下,4 省(市)的达峰时间均有所提前,碳排放峰值也相应降低,体现了节能减排措施的积极效果。而在技术减排情景下,由于先进技术的推动作用,达峰时间进一步提前,碳排放峰值显著下降,显示出技术创新在交通减排领域的巨大潜力。最后,本研究结合 4 省(市)在不同情景下的碳排放预测结果,综合考虑经济、社会、环境等多方面因素,制定了科学可行的减排路径。

关键词: 交通减排; 碳达峰; 碳中和; 减排路径

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

化学助剂促进二氧化碳地质封存和强化采油研究

段世辰¹, 于志强^{1*}, 郑益军¹, 廖丽姿¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广州市 510640

在全球碳中和目标驱动下, 碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术已成为平衡减排与能源需求的关键路径。CO₂ 提高石油采收率 (CO₂-EOR) 作为 CCUS 的重要分支, 不仅能够促进油藏开发, 还可实现 CO₂ 的地质封存。CO₂-EOR 是将 CO₂ 注入油藏, 通过降低原油粘度、膨胀原油体积等机制提高原油采收率。因其具有成本优势, CO₂-EOR 技术已有 50 多年的研究历史并取得了商业成功。据估计, 全球 CO₂-EOR 的储存潜力高达 168 亿吨。然而, CO₂-EOR 过程中常面临重力超覆、粘性指进和早期气窜等技术挑战, 这些问题源于注入的 CO₂ 和储层流体之间的密度和粘度差异, 会导致采油量减少和碳储存能力降低。表面活性剂作为一类高效的化学添加剂, 在解决上述问题方面展现出独特优势。表面活性剂能够通过降低 CO₂-地层水/原油界面张力 (如磺酸盐类表面活性剂可降低界面张力 1~2 个数量级)、反转岩石润湿性 (氟碳表面活性剂可使砂岩接触角减少 40%~60%) 及抑制矿物溶解 (甜菜碱类表面活性剂降低矿物溶解速率 30%~50%), 显著提升 CO₂ 溶解封存容量与毛细管捕集安全性。在 CO₂-EOR 应用中, 表面活性剂通过促

进混相驱替 (烷基苯磺酸盐降低最小混相压力 10%~20%)、形成稳定泡沫/乳液 (Pickering 泡沫可提高采收率 15%~25%) 及优化流动性, 有效扩大波及体积并降低残余油饱和度。尽管表面活性剂技术优势明显, 但仍面临成本高昂 (氟碳表面活性剂成本达 10~50\$/kg)、环境风险 (传统石油磺酸盐存在生物毒性) 及多尺度作用机制不明确等瓶颈。本研究通过分子动力学模拟方法, 以界面张力降低能力和泡沫稳定性为关键指标, 对 CO₂-EOR 领域所用的化学助剂进行筛选。优选驱替效率高、封存效果好的表面活性剂并进行复配。筛选出来的复配体系通过岩心驱替实验验证模拟结果, 并进行盖层稳定性测试和生物毒性实验, 全面评估其现场应用的可行性。研究表明, 表面活性剂复配体系在 CO₂ 地质封存和 CO₂-EOR 中具有广阔的应用前景。通过不断的研究和技术创新, 表面活性剂将为应对气候变化和保障能源安全做出重要贡献。

关键词: 表面活性剂; 二氧化碳地质封存; 强化采油; 分子动力学模拟; 复配体系

基金项目: 中国科学院学部咨询评议项目 (2022-ZW10-A-023); 中国工程院院地合作项目 (2023-GD-07); 广东省千万吨级海上规模化 CCS 或 CCUS 集群前期规划研究项目 (E4410101)

第一作者简介: 段世辰 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 二氧化碳利用与封存。Email: duanshichen@gig.ac.cn

*通信作者简介: 于志强 (1970-), 研究员, 研究方向: 新型污染物的环境行为 (环境分布及非生物转化) 以及新型污染物对人体的早期健康影响。Email: zhiqiang@gig.ac.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

清平磷矿床流体包裹体中稀有气体同位素组成的地质意义及其对古气候环境重建的启示

姚毅^{1,2}, 王浩^{1,2*}, 石亮^{1,2}, 刘军省^{3,4}, 贺天全^{5,6}

1. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司, 四川德阳 618299;
2. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司技术中心, 四川德阳 618202;
3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;
4. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;
5. 四川省第二地质大队非金属资源勘查研究中心, 四川成都 611930;
6. 四川省化工地质勘查院, 四川成都 611930

在当前百年未有之大变局的深刻变革和复杂调整的国际背景下, 磷矿资源开发已上升到国家战略层面, 成为新一轮全球资源战略的焦点。清平磷矿床作为中国西南地区的重要磷矿资源, 其形成与演化过程中捕获的流体包裹体, 蕴含着丰富的古环境信息。然而, 清平磷矿床的成矿作用与古气候环境变化的关系尚不明确, 而流体包裹体中的稀有气体同位素组成为解决这一问题提供了潜在的线索。因此, 本研究旨在通过对清平磷矿床中流体包裹体的稀有气体同位素组成进行深入分析, 探讨其在地质过程中的意义, 并为古气候环境的重建提供新的启示。本研究采用先进的质谱分析技术, 对磷矿样品中的流体包裹体进行了详细的稀有气体同位素分析, 包括氦、氩、氙等元素的同位素比例测定。研究结果表明, 稀有气体同位素组成在清平磷矿床中显示出明显的多样性, 这反映了成矿流体的复杂来源和演化过程。氦同位素数据显示了地幔和地壳物质的混合特征, 指示了成矿流体可能受到了地幔热液的影响。氩和氙同位素比例的变化则揭示了成矿过程中流体的分馏和混合作用, 以及可能的大气参与。这些数据为理解磷矿床的成因提供了新

的地球化学证据。进一步地, 通过与现代气候环境数据的对比, 本研究探讨了稀有气体同位素在古气候环境重建中的应用。氩同位素数据表明, 成矿时期的气候条件可能比现代更为湿润, 而氦同位素数据则暗示了古气候环境中可能存在显著的温度变化。这些发现为重建古气候环境提供了新的线索, 特别是在解析古气候温度和降水模式方面。本研究的成果不仅丰富了清平磷矿床成矿机制的认识, 也为磷矿资源的勘探和评价提供了新的地球化学指标。同时, 通过稀有气体同位素组成的分析, 本研究为全球古气候环境变化研究提供了新的数据支持和理论依据, 对于深入理解地球气候系统的演变具有重要意义。本研究的战略意义在于为磷矿资源的可持续开发和利用提供理论支持和实践指导, 同时为全球古气候模型提供更加精确的约束条件。未来的研究将进一步探索稀有气体同位素在其他地质记录中的应用, 以期为全球古气候模型提供更加精确的约束条件。

关键词: 清平磷矿床; 流体包裹体; 同位素; 成矿机制; 古气候环境重建

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

非水相流体覆盖对矿物有效反应面积的影响研究 ——以 CO₂ 地质封存为例

朱慧星^{1*}, 杨博¹, 许天福¹

1. 吉林大学 新能源与环境学院, 长春 130012

在环境地球化学相关模拟中, 因受多种复杂因素的共同影响, 反应速率的精确计算始终是一个难题。在以 CO₂ 地质封存为代表的众多地下工程中, 水与矿物之间的有效反应面积 (Effective Reaction Area, ERA) 常受到矿物表面非水相流体覆盖的影响, 增加了反应速率的计算难度。然而, 目前关于非水相流体覆盖对矿物 ERA 的影响机制及其量化研究仍存在较大欠缺。针对这一问题, 本研究提出采用格子玻尔兹曼方法 (Lattice Boltzmann Method), 利用其精确表征相界面的优势来定量探究非水相流体覆盖对矿物 ERA 的影响规律。在此基础上, 构建了一种考虑流体润湿性的计算模型, 用于高效计算矿物的 ERA。研究表明, 在 CO₂、水两相体系中, 随着 CO₂ 饱和度的升高, ERA 的下降

曲线与传统线性模型偏离并呈现出上凸的特征, 采用新提出的模型能够显著提升预测精度。此外, 水、油两相体系内, 随着矿物润湿性不同, ERA 下降曲线呈现不同的特征 (亲水矿物上凸, 亲油矿物下凹)。进一步的模拟分析表明, 在更为复杂的 CO₂、水和油的三相体系中, CO₂ 倾向于被油相包裹。基于此, 本研究提出可通过 CO₂ 和油相的总饱和度来预测三相体系中矿物的 ERA。总体而言, 无论是在两相还是三相体系内, 通过在计算过程中考虑润湿性影响, 新提出模型对矿物 ERA 的计算精度均显著高于传统线性模型。

关键词: 水岩反应; 矿物有效反应面积; 格子玻尔兹曼方法; CO₂ 地质封存

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42141013)

第一及通信作者简介: 朱慧星 (1993-), 副教授; 研究方向: 地下多相流及反应溶质运移。Email: zhuhx@jlu.edu.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

沉积过程中生物藿烷构型变化的主要影响因素及其在重建古沉积环境酸碱度中的潜在应用

卢永丽¹, 吕沛宗^{1*}, 朱雷¹

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

藿烷类化合物是原油及沉积物中最常见的五环三萜类化合物, 是细菌藿多醇及其相关生物藿烷类化合物的沉积产物, 由多种细菌产生, 因此在多种环境中广泛存在, 也应用于反应细菌活动。沉积物中的藿烷主要以生物构型($\beta\beta$ 型)与地质构型($\alpha\beta$ 和 $\beta\alpha$ 型)存在; 随着埋藏加深, 首先生物构型藿烷会向地质构型藿烷转换, 其次升藿烷类化合物 C-22 位容易发生异构化, 由 22R 向 22S 转变并随着成熟度增加而达到平衡, 同时 $\alpha\beta/\beta\alpha$ 的值也会随着成熟度增加。因此升藿烷 22S/(22S+22R) 可以用于判断沉积物成熟度。基于现代沉积物最新研究发现生物藿烷与地质构型藿烷的转换还会受酸碱度影响, 从而提出了将生物构型藿烷用于恢复古沉积环境酸碱度的潜在可能性。但由于生物藿烷及其不稳定, 因此在应用之前需要谨慎考虑影响其构型变化的主要影响因素。

本研究基于新疆三塘湖盆地及和什托洛盖盆地两口钻井的连续样品。对样品中藿烷类, 正构烷烃, 类异戊二烯, 甾烷类, 以及菲系列化合物开展分析。通过主成分分析(PCA)发现生物藿烷 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\beta)$ 参数与新藿-13(18)烯/ C_{30} 藿烷有较高的相关性, 而与升藿烷 22S/(22S+22R) 和深度具有较强的负相关性; 说明生物藿烷以及藿烯主要受控于埋藏深度, 且升藿烷 22S/(22S+22R) 在低熟样品中也可以用于反应成熟度变化。而生物藿烷参数则与姥植比、CPI、

甲基菲指数、 C_{30} 莫烷/ C_{30} 藿烷以及甾烷类化合物成熟度参数相关性较弱, 但可以观察到 CPI 与姥植比具有较强相关性, 而甾烷类化合物成熟度参数具有较强相关性且二者具有负相关关系; 这说明 1. 甲基菲指数、CPI、 C_{30} 莫烷/ C_{30} 藿烷以及甾烷类化合物成熟度参数并不能很好的反映低熟样品的成熟度。2. CPI 与姥植比的变化很有可能是沉积环境改变导致有机质输入共同变化。3. 沉积环境的氧化还原性以及有机质输入变化对生物藿烷参数的影响较小。4. 甾烷类化合物的构型组合可能受控于有机质输入或沉积环境的氧化还原性。

基于以上分析, 生物藿烷计算的酸碱度与深度的关系为 $pH = -0.0029 \times \text{深度} + 5.41$, 其 R^2 为 0.75。结合两个井位样品沉积相的变化并不明显, 我们假设两个井位的古沉积环境酸碱度变化较小且以最浅样品作为原始酸碱值, 以深度校正了基于生物藿烷的酸碱度计算公式: $pH(\text{校正}) = -0.0029 \times \text{深度} + pH(\text{原始计算})$ 由于数据点整体偏少, 且对于盆地的古地温梯度以及古埋藏史了解较少, 我们希望在以后的工作中逐渐完善校正公式并将其广泛应用于重建古沉积环境酸碱度。

关键词: 生物藿烷; 埋藏深度; 主成分分析; 古环境重建

第一作者简介: 卢永丽(2003-), 本科生; 研究方向: 有机地球化学。Email: 2295441401@qq.com

*通信作者简介: 吕沛宗(1999-), 硕士研究生; 研究方向: 有机地球化学。Email: 1540539926@qq.com

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

氧化石墨烯对植物修复系统的调控作用

杜俊杰^{1*}

1. 山西师范大学 生命科学学院, 太原市 030000

针对土壤重金属污染问题,植物修复因其能抵消碳排放、生态友好和成本低廉的优势一直都被认为是一种具有广阔应用前景的土壤重金属污染治理技术。如何利用纳米技术调控植物修复的效率是重要的学术问题。氧化石墨烯(GO)不仅比表面积大,表面带有酸性含氧官能团,还具有良好的生物相容性和水溶液稳定性,其应用涉及农业和环保等领域。GO在治理重金属污染方面,很多的报道集中于水体污染,目前GO在污染土壤的修复研究不足。经研究发现,GO能刺激植物根系分泌物的增量从而提高重金属的

生物有效性;GO能吸附营养元素和调整土壤菌群结构而有助于植物生长;GO能进入植物根部并向上转移。基于以上的研究基础,提出GO能吸附土壤中游离的重金属离子并以吸附体的形式进入植物根部并向上转移,增强超积累植物对重金属的富集。本研究的开展将为纳米技术调控植物修复效率的探索研究奠定一定的理论和技术基础。

关键词: 重金属; 植物修复; 氧化石墨烯; 超积累植物; 调控机理

基金项目: 国家自然科学基金项目(32371709)

作者简介: 杜俊杰(1985-), 教授; 研究方向: 污染生态学。Email: 182284317@qq.com

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

海洋酸化对硅藻蛋白石固碳作用的影响及机制

刘冬^{1,2*}, 余荣达^{1,2}, 沈宇果^{1,2}, 刘浩^{1,2}, 王旭^{1,2}, 霍广铖^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

海洋硅藻贡献了全球近 50% 的海洋初级生产力, 并通过“生物泵”作用提供了全球~20% 的固碳量。硅藻“生物泵”的有效性受到硅藻蛋白石(即, 硅藻的硅质壳体)这一生物矿物溶解性的显著影响。因此, 硅藻蛋白石在海水中的稳定性成为保证硅藻固碳效率的关键因素。近年来, 随着大气二氧化碳浓度的逐渐升高, 更多的二氧化碳进入海洋, 使海洋逐渐酸化, 海水 pH 不断降低, 这对硅藻蛋白石的形成产生了直接影响, 并引起硅藻蛋白石性质的变化, 进而影响到其溶解性, 随之作用于硅藻“生物泵”的效率等。然而迄今为止, “海洋酸化对硅藻蛋白石溶解度及其固碳效应影响”这一重要前沿问题尚未获得有效解答。本研究由生物矿物学研究入手, 尝试对不同酸化条件下硅藻蛋白石的矿物结构和表面性质开展研究, 以探明海洋酸化对硅藻蛋白石溶解性的影响及引起的固碳效应变化的机制。实验室开展模拟研究表明: 海洋酸化抑制硅藻对硅和铝的吸收, 削弱了硅藻蛋白

石的“压舱石”作用。低 pH 值培养液中所获硅藻蛋白石的含硅量减低, 这表明, 低 pH 值条件将抑制了硅藻对硅的吸收。并且, 所获硅藻蛋白石密度降低, 而孔隙度显著增加。这使得硅藻蛋白石在水体中的沉降时间增加, 溶解的可能性更高。另一方面, 低 pH 值降低了硅藻对铝的吸收, 使硅藻蛋白石中铝的含量降低。这不仅增加了硅藻蛋白石的溶解度, 还降低了其机械强度, 削弱了其在水体中的稳定性。因此, 海洋酸化将抑制硅藻蛋白石中的硅和铝, 从而降低硅藻蛋白石的水体稳定性, 导致其“压舱石”功能的减弱, 降低海洋生物泵效率。上述结果提升对硅藻蛋白石矿物学性质及其固碳能力受海洋酸化影响机制的认识, 为未来全球性海洋碳循环变化的预测提供理论依据。

关键词: 海洋酸化; 硅藻蛋白石; 生物泵效率; 固碳

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

双碳目标导向下米曲霉菌丝球介导的高效硒还原富集机制及回收技术研发

陈诗雨¹, 李非里^{1*}

1. 浙江工业大学 环境学院, 杭州 310014

硒 (Se) 作为典型稀散元素, 其在水圈-生物圈-岩石圈系统中的地球化学分配行为及跨圈层迁移路径的解析, 是实现表生环境生物有效性调控的理论基础。在工业革命及新能源产业驱动下, 我国 2024 年原生 Se 产量预计达 1802 吨, 而消费量高达 2481 吨, 供需矛盾突出。含 Se 废水处理不当, 会形成恶性循环, 导致资源开采、污染扩散与生态风险相互加剧, 包括人为干扰下 Se 的异常地球化学行为, 及其高生物富集因子加剧的食物链传递风险。传统的物理化学以及微生物法成本高, 能耗高、还可能存在二次污染的风险。因此, 研究集高效 Se 富集-还原机制, 是实现 Se 的资源化回收、降低人为活动对 Se 的生态地球化学行为影响的关键。本研究基于米曲霉 (*Aspergillus oryzae*) 菌丝球构建了多相界面耦合的硒 (Se) 生物地球化学转化的微生态, 系统阐明了 Se (IV) 在菌丝-水界面传输中的形态转化动力学。研究表明该体系具有高效去除性能: 低浓度 Se (100 μ g/L) 24 h 界面通量 4.40×10^{-4} mmol/m²/h, 去除率达 92.09%; 对高浓度 Se (10 mg/L) 96 h, 界面通量 11.4×10^{-3} mmol/m²/h, 去除率达 95.18%, 出水水质达 GB 8978-1996 三级标准, 12 h 单位体积 Se 回收率 R_{Se} 为 8.6 g/m³。环境适应性: 在稳定 pH (2.5~6)、广域温度 (15~40 $^{\circ}$ C) 及中低盐度 ($\leq 20\%$) 条件下, 菌丝球 (投加量 2 g/100 mL 湿重) 对高浓度 Se 都能实

现近 95% 去除率。在 30 $^{\circ}$ C 条件下 6 h 即实现 95% 去除率, 较常温 (25 $^{\circ}$ C) 效率提升 10%。SEM-EDS、XPS, FTIR 等表征技术进一步解析了 Se 在菌丝球界面的赋存形态演变规律: 纳米硒 (Se⁰) 颗粒的粒径分布在 60~100 nm 范围内、并呈现出由 Se⁴⁺向 Se⁰ 梯度演变的空间异质性。吸附动力学 ($R^2=0.99$) 和 Weber-Morris 扩散模型研究表明, 菌丝球的三维网络结构通过多级吸附-生物转化耦合作用决定硒的迁移机制。①初始阶段 (<1 h) 由表面氨基等官能团主导吸附; ②中期阶段 (1~4 h) Se (IV) 向菌体内扩散, 经同化代谢生成硒代氨基酸 (SeCys/SeMet); ③后期阶段 (>4 h) 在谷胱甘肽还原酶催化下, 异化还原生成 Se⁰, 同时伴随低量挥发性硒 (DMSe/DMDSe) 的代谢。限速步骤为胞内谷胱甘肽还原酶介导的异化还原过程, 是硒生物累积的关键调控点。本研究首次阐明了米曲霉菌丝球介导的硒元素固-液界面迁移转化分子机制, 发现其通过多尺度物理吸附-化学络合-生物还原级联反应实现硒的高效富集与价态调控, 为开发基于微生物界面工程的硒污染修复技术提供了理论依据, 同时其揭示的“硒还原-有机酸代谢”耦合电子传递路径为碳汇系统功能强化开辟了新方向。

关键词: 菌丝球; 纳米硒; 形成机制; 动力学

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977150)

第一作者简介: 陈诗雨 (2000-), 硕士研究生; 研究方向: 微生物地球化学。Email: 2926447235@qq.com

*通信作者简介: 李非里 (1973-), 教授; 研究方向: 重金属跨介质迁移与形态转化动力学。Email: lifeili@zjut.edu.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

气候变化和碳中和背景下矿物-有机碳-污染物的 生物地球化学过程：从冻土到农田

王梓萌^{1*}

1. 复旦大学 环境科学与工程系, 上海 200437

环境界面地球化学是水土污染防治、气候变化应对和新污染物治理的核心科学基础。然而, 在多重物理、化学和生物过程的共同调控下, 环境界面呈现显著的“热区”与“热时”特征, 其分子反应机制尚不清晰, 多要素驱动的耦合过程亟待系统解析。气候变化是近现代地球系统演化的核心驱动力之一, 其通过温度升高、极端降水、冻融循环等过程, 深刻影响环

境界面的地球化学行为, 改变碳循环与污染物的耦合机制。本报告将以气候变暖背景下冻土中结合残留态污染物的赋存和活化, 以及农田土壤固碳能力受限于微生物热适应演化驱动的铁库钝化为两个研究案例, 汇报近期的研究工作。

关键词: 土壤化学; 碳循环; 生物地球化学

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

天然纳米胶体驱动水中石墨相氮化碳的结合特性与光合毒性

姚树立¹, 欧阳少虎^{1*}

1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350

石墨氮化碳 (Graphitic carbon nitride, CN) 已广泛应用于催化, 能源与环境污染修复。天然纳米胶体 (Nanocolloids, Ncs) 在环境中广泛存在, 在生物地球化学过程中发挥着关键作用。然而, Ncs 在 CN 上的结合特性及对藻类固碳行为的影响仍然未知。本研究综合二维荧光光谱和荧光激发-发射矩阵平行因子研究了 CN 对 Ncs 的吸附行为和机理。结果揭示了 Ncs 中的氨基酸和腐殖酸样成分的混合物通过 π - π 相互作用和静电相互作用优先结合在 CN 上, 这导致 CN 结构的改变以及光生电荷能力的增强, 值得注意的是, 与单独的 Ncs, CN 相

比, 复合暴露对藻类造成更强的光合毒性 (叶绿素 a 和光合相关基因显著下调)。代谢组学和转录组学分析进一步阐明了氨基酸、碳水化合物, 脂质代谢和光合相关基因的下调的调节是导致了毒性的根本原因。这项研究深入探讨了 Ncs 通过吸附作用调节天然水中 CN 的环境命运与风险, 特别是其通过增强能量转移能力进而加强光毒性方面的作用与机制。

关键词: 天然纳米胶体; 石墨相氮化碳; 能量转移; 环境行为

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

基于 NBS 的生态系统恢复力评价体系研究 ——以准格尔旗为例

李朋伟¹, 秦越强^{2*}, 张鑫²

1. 上海科技馆, 上海 201306;

2. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北省廊坊市 065000

针对矿集区生态系统恢复力评价需求, 本研究以准格尔旗为对象, 构建了涵盖生态脆弱性、生态弹性力及生态压力度的综合评价模型。基于层次分析法(AHP)与模糊理论, 整合多源数据及空间分析技术, 实现了恢复力等级划分与空间可视化, 旨在为生态修复决策提供科学依据。遵循科学性、代表性及相对独立性原则, 构建三级评价体系: 包括生态脆弱性(坡度、坡向、降雨量、温度、表生土壤类型)、生态弹性力(土壤有效水、有机质、净初级生产力)及生态压力度(地貌景观损毁、地质灾害、人口密度)。各指标按恢复力差、一般、较高、高四级量化。采用专家打分法构造判断矩阵, 通过AHP计算指标权重。以生态脆弱性为例, 其指标权重依次为降雨量(0.352)、温度(0.202)、坡度(0.181)、坡向(0.151)、表生土壤类型(0.114), 通过一致性检验($CR=0.0616<0.1$)。生态脆弱性中气候因子(降雨量、温度)权重占比达55.4%, 凸显半干旱区水热条件对系统稳定性的主导作用; 生态弹性力以净初级生产力(NPP, 权重0.539)为核心, 反映植被恢复的关键地位; 生态压力度中地质灾害权重最高(0.539), 揭示采矿活动对景观的显著扰动。生态弹性力与生态压力度指标权重均通过 $CR<0.1$ 检验, 满足逻辑一致性。利用GIS平台叠加指标图层, 结合模糊隶属度函数处理连续型数据(如降雨量)与离散型数据(如土壤类型)的不确定性,

进行生态系统恢复力评级分区。恢复力高区域为本底生态环境分布区域, 或生态压力度较低区域, 主要分布于准格尔旗中部广大区域, 介于准格尔召-那日松、薛家湾-龙口两大煤炭矿集区中部; 恢复力较高区域一般位于采煤集中区域, 因近年来相关政策的出台, 准格尔旗矿山基本实现了边开采边治理的良好运行模式, 部分矿山实现了绿色矿山建设目标, 排土场等景观治理取得了较好效果; 恢复力一般区域指生态压力指数较大地区, 主要体现为人口压力和人工活动影响较大地区, 分布于村镇等人口集中区域和矿山集中区域; 恢复力差区域主要分布于准格尔旗十二连城乡一带, 该地区土壤类型主要为风沙土, 抵抗降雨侵蚀作用能力较差, 是制约该区域生态地质作用向好发展的最主要因子, 净初级生产力和有效水指标明显制约生态系统向好发展。本次研究通过融合AHP权重分配、GIS空间分析及模糊综合评价, 建立了可量化、可视化的生态系统恢复力评价模型, 为准格尔旗生态修复优先级划定提供依据。模型验证显示其与SRP(敏感性-恢复力-压力)框架结论一致, 但动态监测数据(如NPP时序变化)的纳入进一步提升模型时效性。未来可拓展至类似生态脆弱区, 为区域可持续发展策略优化提供方法论支撑。

关键词: 生态系统恢复力; 层次分析法; 模糊综合评价; GIS空间分析; 准格尔旗

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20208078)。

第一作者简介: 李朋伟(1992-), 工程师; 研究方向: 矿山生态修复、地质矿产、行星地质等。Email: 1336570674@qq.com

*通信作者简介: 秦越强(1987-), 高级工程师; 研究方向: 矿山生态修复、地质灾害、地质矿产等。Email: qq331851187@163.com

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

基于高精度在线监测的大气含氟温室气体 季节变化和排放估算

张艳利^{1*}, 黄晓晴¹, 王新明¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

含氟温室气体具有极高的全球增温潜势, 即使相对常规温室气体浓度较低, 其对全球变暖有非常重要的贡献。氢氟氯碳化物 (HCFCs)、氢氟碳化物 (HFCs)、含氟烯烃类 (HCFOs、HFOs) 以及全氟化合物作为氟氯烃 (CFCs) 的第二、三、四代替物, 针对其大气浓度水平及变化趋势的研究对评估它们的使用和排放现状及后续减排具有重要意义。我国目前处于第二-三代含氟制冷剂交替阶段, 然而由于现有研究在时间和空间尺度上相对较少, 且基于野外观测的研究数据比较缺乏, 为我国减排履约成效的评估带来较大挑战。由于含氟温室气体主要来自人为源, 针对人为活动较强的城市地区的研究

十分需要。基于在我国南方典型城市地区的长时间离线观测和短期高分辨高精度连续外场观测, 对中国华南地区大气中主要的 HCFCs、HFCs、HFOs 和全氟化合物的浓度水平、变化趋势、季节差异及其主要排放源区进行了探讨, 并基于示踪剂比值法估算了其排放量, 分析了含氟温室气体排放的历史演变趋势, 可填补该地区部分含氟温室气体监测数据的空白, 为华南地区含氟温室气体的排放估算提供可靠的数据支撑。

关键词: 含氟温室气体; 氢氟碳; 全氟化合物; 历史演变; 排放估算

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

港口航道疏浚土生态资源化利用技术路径研究

马国强¹, 贾建娜¹, 邱宁¹, 彭士涛^{1*}

1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津市 300456

我国疏浚土总量巨大, 2023 年沿海港口建设和航道维护(含长江口)每年疏浚土总量超 3.5 亿 m³。目前存在疏浚土处置方式单一、资源化利用较少、利用方式单一等诸多问题。围填海管控升级后, 沿海港口航道疏浚土处置利用已成为制约水运绿色健康发展的瓶颈难题。黄骅港位于渤海湾穹顶处, 所在地属于粉沙淤泥质海岸, 泥沙运动十分活跃, 泥沙易动、易扬、易沉, 航道极易发生淤积。黄骅港(包括煤炭港区和综合港区)全航道年淤积量在 2600 万 m³左右。本文调查分析了黄骅港疏浚土的理化特性, 结果表明黄骅港疏浚土硅含量在 50.30%~68.95%, 氯离子含量在 0.36%~1.52%, 远超过建设用砂标准限值 0.06%。针

对其氯离子含量高、黏土含量高、泥块夹带严重的特点, 开展了疏浚土生态资源化利用技术路径研究, 研究了黄骅港疏浚土泥沙分离的可行性, 研发了疏浚土高强度固化生态友好块体产品, 系统分析了疏浚土用于建材生产、生态保护修复的技术和经济可行性。借鉴长江航道疏浚土在生态固滩、吹填促淤及湿地营造等生态修复领域的应用, 提出了利用黄骅港疏浚土开展岸滩生态修复的技术路径, 对于解决港口航道疏浚土大规模处置难题, 保障潮间带生态安全具有借鉴意义。

关键词: 疏浚土; 岸滩修复; 生态资源化利用; 潮间带

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700, 2022YFE0113500)

第一作者简介: 马国强(1992-), 助理研究员; 研究方向: 环境科学。Email: zxmqq@tju.edu.cn

*通信作者简介: 彭士涛(1979-), 正高级工程师; 研究方向: 环境科学。Email: pengshitao@tiwte.ac.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

高压条件下蒙脱石对 CO₂ 的吸附研究

罗琨¹, 王航¹, 刘冬¹, 于志强^{1*}, 彭平安¹

1. 广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广州 510640

地质碳封存 (Geological Carbon Sequestration, GCS) 是一种通过将二氧化碳 (CO₂) 捕获并长期储存在地层中以减少温室气体排放的技术, 是应对气候变化的重要手段之一。其核心目标是通过将 CO₂ 从工业排放源分离并注入地下地质构造中, 防止其进入大气层。蒙脱石是封存区最常见的矿物之一, 其具有较高的比表面积和 CO₂ 吸附能力, 在地质碳封存中起到重要作用。然而, 其对 CO₂ 在储层条件下的吸附机制仍尚不清楚。尽管有研究表明, 高压条件下气态 CO₂ 可吸附于蒙脱石层间域, 但仍存在如下问题尚待解决: (1) 未能提供 CO₂ 进入层间域的直接证据; (2) CO₂ 分子在何种温度压力下可进入蒙脱石层间; (3) 蒙脱石层间域的吸附量是多少。本研究基于上述问题, 开展了实验室模拟研究, 在 25℃、50℃

和 75℃ 条件下, 0~50 bar (5 MPa) 的压力范围内, 以天然蒙脱石和 600℃ 煅烧后闭合层间的热处理蒙脱石为研究对象, 开展了 CO₂ 气体吸附实验。结果表明, CO₂ 气态分子在压力 ≥14 bar 时可进入蒙脱石层间域, 并与层间的 Ca²⁺ 反应生成了 CaCO₃。该发现为 CO₂ 进入蒙脱石层间域提供了直接证据。随着压力的上升, 进入层间的 CO₂ 逐渐增加, 当压力为 50 bar 时, CO₂ 在层间域的吸附量可达蒙脱石总吸附量的 ~72%。上述结果表明, 蒙脱石层间域在地质碳封存过程中对气态 CO₂ 的吸附/捕获起到重要作用。

关键词: CO₂ 吸附; 层间域; 蒙脱石; 高压; 地质碳封存

基金项目: 二氧化碳地质碳封存场地初筛 (E2510104)

第一作者简介: 罗琨 (2000-), 博士研究生; 研究方向: 矿物学。Email: luokun21@mails.ucas.ac.cn

*通信作者简介: 于志强 (1970-), 研究员; 研究方向: 地质碳封存。Email: zhiqiang@gig.ac.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

Atmospheric nitrate and its isotope records from a SE-Dome ice core with minimal post-depositional alteration

Shohei Hattori^{1*}, Wei Zhao¹

1. Nanjing University 国际同位素效应研究中心, Modern Engineering Plaza No.163 Xianlin Avenue, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, China Postcode: 210023 210023

Stable isotopes of atmospheric nitrate (NO_3^-) are valuable tracers for nitrogen sources and atmospheric processes. However, post-depositional processes often alter their signals in ice core records. The Southeastern Dome (SE-Dome) ice core in Greenland presents a promising archive of atmospheric chemistry variations, as it has experienced minimal post-depositional modification due to its high accumulation rate ($\sim 1 \text{ m w.e. a}^{-1}$).

In this study, we present a 60-year (1959–2014) record of $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) and $\Delta^{17}\text{O}$ (NO_3^-) from the SE-Dome ice core. $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) exhibited a decline from 1960 to 1974 and displayed clear seasonal variations, with higher values in summer and lower values in winter. $\Delta^{17}\text{O}$ (NO_3^-) showed no significant long-term trend but retained a distinct seasonal pattern. The mass-weighted annual mean $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) values at SE-Dome were, on average, $4.2\% \pm 2.8\%$ lower than those observed in the Greenland Summit ice core between 1959 and 2006. Using the Transfer of Atmospheric Nitrate Stable

Isotopes To the Snow (TRANSITS) model under SE-Dome conditions, post-depositional changes were estimated to be limited, with only a 0.9% shift in $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) and a -0.2% shift in $\Delta^{17}\text{O}$ (NO_3^-) from initial deposition. While differences in NO_3^- sources cannot be entirely ruled out, the lower $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) values at SE-Dome compared to Summit likely reflect reduced post-depositional processing.

As a result, the SE-Dome ice core NO_3^- record provides a more direct reconstruction of NO_x emissions and atmospheric oxidation chemistry during transport. This record captures signals from North American and Western European sources, offering robust insights into past atmospheric nitrogen cycling. In this presentation, we will introduce the latest findings on the controlling factors of $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) and discuss prospects for what can be revealed from the SE-Dome's nitrate isotope record.

关键词: 冰芯; 硝酸盐

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

Inorganic nitrogen nutrition in boreal plants is underestimated and insensitive to environmental changes

陈崇娟¹, 刘学炎^{2*}

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300000;
2. 中国科学院地球化学研究所 地球化学研究所, 贵阳 550000

Although more and more evidences on plant uptake of soil extractable inorganic N (EIN) challenged the traditional viewpoint of soil extractable organic N (EON) as the dominant (averaging 63%±6%) N source to boreal plants, relative contributions between EIN and EON to boreal plants and their environmental responses remain unclear. By investigating N concentrations and natural N isotopes in soils and plants, we evaluated and compared contributions of soil EIN and EON to plants of six same genera between Alaskan tundra (AT) with lower mean annual temperature (MAT, -6.8°C) and atmospheric N deposition (AND, 0.4 kg-N/ha/yr) and northeastern China peatlands (NECP) with higher MAT (-3.3°C) and AND (5.1 kg-N/ha/yr). Soil EIN was three times less than EON, but it contributed c.a. 54%±7% of N among

studied plants. In NECP, higher MAT and AND caused more increments (by three times) in soil EON than EIN, but soil EIN's contributions to plants did not differ between AT (52%±6%) and NECP (57%±7%). We concluded that soil EIN's contributions to boreal plants are underestimated (by 17%) and insensitive to concurring warmer climates and higher N deposition. These findings highlighted the importance of soil EIN nutrition to boreal plants and suggested potentially more EON losses under projected warming climate and increasing N pollution, which are useful for evaluating responses of N dynamics in boreal ecosystems to global changes.

Key words: plant nitrogen use; inorganic nitrogen; boreal ecosystem; climate warming; N deposition

基金项目: 国家杰出青年基金项目 (42125301); 国家自然科学基金重点基金项目 (42330505); 国家自然科学基金青年基金项目 (42003061)

第一作者简介: 陈崇娟 (1992-), 讲师; 研究方向: 陆地系统氮生物地球化学。Email: chencj@tju.edu.cn

*通信作者简介: 刘学炎 (1982-), 教授; 研究方向: 氮污染与水-土-气环境质量演变、氮循环与生物圈结构与功能演化。Email: liuxueyan@mail.gyig.ac.cn