

• 专题 30: 地球生态保护、人类生命共同体构建与生态地球化学 •

DOM 对重金属在藻上的富集行为的影响规律

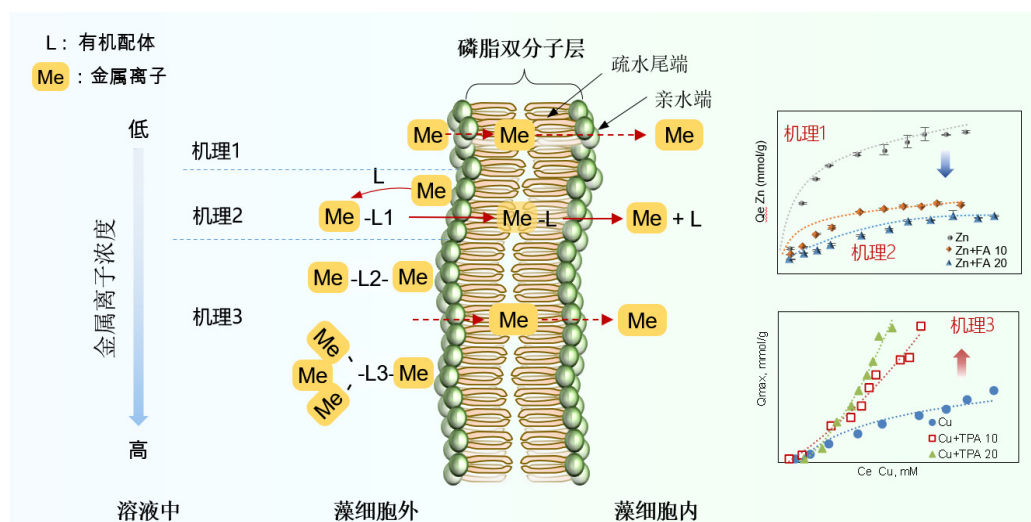
李非里¹, 房晶晶¹, 陈晓玲¹, 施雯², 陈秀娟¹

1. 浙江工业大学 环境学院, 杭州 310014;

2. 浙江省农业科学院 环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310022

藻-水界面是重金属迁移、转化的重要场所, 微藻通过吸附/吸收等作用将重金属从水相转移到藻相, 通过食物链的传递后威胁水生动物和人类健康与安全。溶解性有机质 (Dissolved organic matter, DOM) 是水生生态系统的重要组成部分, 它通过改变重金属的形态和微藻的表面性状, 从而改变藻类对重金属的生物富集行为。如富里酸存在下, 藻对 Pb 的富集量可以增加十余倍, 且富集行为不再遵循 Langmuir 或者 Freundlich 模型。这些影响使得水生生态的重金属风险评估存在高估或者低估的不确定性。解决上述问题的关键之一是掌握 DOM 的作用机制并明确 DOM 分子起作用的关键特性。为此, 选择具有代表性的 DOM: 基于分子量和亲疏水性地分离太湖溶解性有机质、国际腐殖质协会标准物质富里酸和腐殖酸、低分子量有机酸 (苹果酸和柠檬酸)、氨基酸 (赖氨酸、天冬氨酸、甘氨酸、天冬酰胺), 构建 DOM 和金属离子的“微环境宇宙”, 采用 DOM 和重金属的暴露实验, 应用水环境化学和配位化学理论, 研究了 Pb、Cu 和 Zn 等在水-藻界

面的迁移行为的变化规律, 揭示了{(重金属-DOM)-重金属-藻}三元配合物形成的机制以及环境因素的影响规律, 并通过模型拟合开展机理分析以及 SEM 和 TEM 等微观形貌观测进行了验证。结果表明, 除低分子量的有机酸会增加重金属的毒性外, 大多数溶解性有机质可以缓解重金属对藻的毒性, 并显著增加重金属在藻上的吸附量, 得益于{(重金属-DOM)-重金属-藻}三元配合物的形成。暴露吸附实验表明三元配合物的形成仍然遵循拟二级动力学模型, 即属于化学吸附; 吸附等温线符合 Two-step 吸附模型, 表明吸附过程分两步进行。通过不断变化重金属和 DOM 的浓度, 确定了三元配合物的形成需要合适的 DOM 和重金属浓度范围, 同时表明其形成需要自由 Pb^{2+} 和 [DOM-Pb] 的共同参与。DOM 分子中官能团的种类和数量与重金属的最大吸附量呈显著相关性, 利用多元线性回归分析获得的线性方程可以解释氨基酸存在下 84.6% 的藻类富集锌的变化。本研究为准确评估水生生态环境中重金属的风险提供了理论基础和数据支撑。



基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977150)

第一作者简介: 李非里 (1973-), 教授, 研究方向: 重金属在环境介质中的迁移转化. E-mail: 李非里@zjut.edu.cn

· 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 ·

川西北雪宝顶钙华自然遗产退化及其生态保育

代群威, 张婷, 李琼芳, 党政, 崔杰, 罗尧东

西南科技大学 四川绵阳 621010

雪宝顶流域以高寒地区钙华地质景观闻名于世, 流域内有黄龙沟、张家沟、牟尼沟、九寨沟、卡龙沟等丰富的钙华资源, 其中黄龙沟、九寨沟被列入“世界文化与自然遗产名录”, 两处钙华自然遗产地除拥有巨大的人文价值、经济价值外, 还具有极高的科研价值。近年来, 由于地质运动、旅游压力等影响, 钙华景观出现彩池边石坝坍塌开裂、滩流沙化、局部出现大量钙华变黑等现象, 引起各方研究者的关注。作为世界自然遗产地, 如何兼顾自然遗产保育和生态恢复两个方面, 科学合理地开展钙华生态修复保育是目前面临的迫切问题。

针对典型彩池、滩流钙华区域的自然和人为退化等系列现象, 我们提出钙华天然海绵地质体这一概念, 并对其进行了深入探讨。我们认为, 对于黄

龙等钙华遗产持续性科学保育, 最重要是认清其钙华天然海绵地质体特征的本质, 探明钙华孔隙全尺度和矿物单元、生物单元和孔隙单元的组相特征, 分析孔隙渗水、持水及力学特征。同时, 揭示钙华-微生物协同演化过程, 探明微生物参与钙华全过程沉积, 微生物的沉积调控及双向作用。目前, 关于现代微生物过量生长对钙华的有害和有益影响, 以及钙华黑化、沙化等景观退化系列问题的产生原因急需探明。鉴于此, 厘清钙华天然海绵地质体特征, 剖析钙华-微生物共沉积行为与演变机制, 这是对明确钙华体退化和自修复机制, 研究并获得仿天然钙华沉积过程的生态保育关键技术的核心科学基础, 也是对钙华生态保育技术应用于世界自然遗产级钙华景观的有力科学保障。

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

祁连山常绿针叶林 C、N、P 特征及其影响因素

勾晓华¹, 刘建国²

1 兰州大学, 资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室;

2 西北师范大学, 地理与环境科学学院

探索碳(C)、氮(N)和磷(P)的空间特征, 是了解生物地球化学循环和生态系统功能的关键。目前, 关于祁连山常绿针叶林 C、N、P 化学计量特征的研究工作, 主要集中在站点尺度上, 而在区域尺度上对其分布规律的认识仍存在较大不足。本研究在祁连山区域尺度上开展了 4 年的常绿针叶林样方调查工作, 采集了常绿针叶树种不同器官及林下 0-40 cm 的土壤样品, 探究了土壤和植物器官 C、N、P 的宏生态格局及其驱动因素。研究发现: 土壤 C、N 含量和 C:P、N:P 均随纬度梯度和土壤深度的增加而显著降低, 其

表现为“东南高、西北低”的空间异质性特征; 而土壤 P 含量和 C:N 值空间变化稳定, 且土壤 N 库是影响青海云杉器官性状的重要驱动力。在区域尺度上, 青海云杉林土壤的 C、N 含量分别是祁连圆柏林的 1.34 倍和 1.17 倍, 但土壤 C、N 储量无显著差异, 表明两林分在维持区域 C、N 储量方面发挥了同等重要作用, 土壤 C、N、P 储量受土壤、地形、和气候的共同影响。该研究结果有助于我们进一步了解干旱半干旱区山地森林生态系统 C、N、P 的宏生态格局, 为今后指导该区森林的培育和管理提供基础数据。

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

中国儿童铅暴露：差异、挑战和政策

董洁，李小平*

陕西师范大学环境系，西安，710062；

陕西省污染暴露与生态环境健康国际联合研究中心，西安，710062

铅 (Pb) 是一种神经毒素金属，任何水平的铅接触对儿童来说都是不安全的。尽管我国政府自 2000 年开始逐步淘汰含铅汽油，但我国仍然存在儿童铅中毒问题，我国儿童铅污染相关健康的根本问题仍有待全面调查。研究发现，虽然儿童血铅水平(BLLs) 以几何平均数 (GM) 的形式从 2001 年的 $91.40\mu\text{g/L}^{\text{GM}}$ 显著下降到 2018 年的 $37.52\mu\text{g/L}^{\text{GM}}$ ，但自 2000 年我国逐步淘汰含铅汽油后儿童的平均 BLLs 仍高于 $50\mu\text{g/L}$ 或更多 [平均 59.70 ($60.50-65.02$, 95%CI) $\mu\text{g/L}^{\text{GM}}$]。铅暴露导致我国每千名儿童中有 29.67 名 MID，健康损失为每千名儿童 98.23 ($59.40-146.21$, 95%CI) DALYs，此数值均高于西太

平洋地区和其他中低收入地区和国家。在我国，儿童犯罪 (NoCC) 的数量与儿童长期铅暴露的结果之间存在显著相关性。我国 BLLs 的差异受到多种潜在铅相关源 (土壤铅、PM2.5 铅、灰尘铅) 的分布不均、地方工业化和经济发展不平衡以及年轻人对儿童不正确的医疗保健方法等影响。目前，燃煤 (CC) 和有色金属 (NMS) 开采产生的铅排放成为我国儿童低水平铅暴露的重要来源。面对我国 BLLs 的分布不均和差距，未来几十年最大的挑战仍是降低儿童 BLLs ($36-45\mu\text{g/L}$)。我国政府仍需要做出更多努力，制定更严格的指导方针，实施更多预防和管理儿童血铅中毒的政策策略，并持续监测全国儿童 BLLs 的变化。

基金项目：西北典型河谷城市铅粒级赋存效应与婴幼儿生物有效性研究 (41877517)

第一作者简介：董洁 (1993-)，博士生，研究方向：区域污染与暴露风险评估. E-mail: dongjie@snnu.edu.cn

*通信作者简介：李小平 (1977-)，教授，研究方向：污染物人体暴露与风险调控. E-mail: lixiaoping@snnu.edu.cn

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

生物炭上自由基赋存特征及其对土壤生物的毒性效应

贾汉忠, 杨惠强^{1,*}

1. 西北农林科技大学, 中国杨凌, 712100

生物炭的制备过程中通常会伴随着环境持久性自由基 (EPFRs) 的产生, 但目前关于生物炭 EPFRs 的生物毒性的认知有限, 特别在考虑种间相互作用的情况下。本研究系统地探讨了在种植和未种植情况下生物炭携带的 EPFRs 对土壤细菌的影响。研究发现, 生物炭的添加显著增加了土壤中 EPFRs 及其衍生的羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 的含量, 分别达到最大值为 $13.0 \pm 0.47 \times 10^{17}$ 和 $3.47 \pm 0.13 \times 10^{13} \text{ spin g}^{-1}$, 并降低了土壤细菌的 α 多样性。冗余分析和共现网络分析结果表明 EPFRs 和 $\cdot\text{OH}$ 是诱导细菌群落结构发生变化的主要贡献因素 ($P < 0.05$)。结构方程模型表明 EPFRs 和 $\cdot\text{OH}$ 主要通过直接和间接作用降低土壤细菌的 α 多样性。其中, 自由基可以直接诱发细菌的遗传毒性、

蛋白质功能障碍和膜功能受损等, 从而改变土壤细菌的群落结构。除了上述提到的直接作用外, EPFRs 和 $\cdot\text{OH}$ 还会提高土壤中 DOC 和 NH_4^+ 4-N 含量, 进而加剧 P 限制去改变细菌群落结构组成。此外, 碱性磷酸酶 (AP) 活性的提高进一步证实了由 EPFRs 和 $\cdot\text{OH}$ 驱动引发的微生物 P 限制。值得注意的是, 种植小麦之后, 土壤中的 EPFRs 和 $\cdot\text{OH}$ 的含量没有发生明显变化, 但是缓解了 P 限制。与此同时, 土壤细菌的 α 多样性也得到了明显的提高, 表明小麦主要是通过缓解 EPFRs 和 $\cdot\text{OH}$ 诱导的间接毒性来改变土壤细菌的群落结构组成。这些结果解析了生物炭的自由基在真实土壤系统中对土壤细菌的毒性, 并表明在评估土壤健康时全面考虑各生态组分之间相互作用的重要性。

* Email: jiahz@nwafu.edu.cn

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

树种是影响青藏高原东缘针叶林土壤 C:N:P 化学计量的主导因素

刘婕¹, 勾晓华^{1*}

1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

碳(C)、氮(N)和磷(P)是参与森林生态系统物质循环和能量流动的主要元素, 影响植物的光合作用和生态系统初级生产力。然而, 不同针叶树种在青藏高原对土壤化学计量的影响尚不明确。本研究选取青藏高原东缘 6 种典型针叶树种, 分析土壤与植物器官的 C、N、P 含量及其化学计量比: 冷杉(*Abies fabri*)、华北落叶松(*Larix principis*)、云杉(*Picea asperata*)、紫果云杉(*Picea purpurea*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和青杆(*Picea wilsonii*)。研究发现: (1) 树种对土壤养分的影响高于树种多样性和林分年龄。不同树种林分间土壤养分差异显著($P < 0.05$): 以紫果云杉和油松为主的森林土壤 C 和 N 含量较

高, 而青杆和云杉土壤的 P 含量较低。未来该研究区内紫果云杉和油松对 C 和 N 的积累潜力可能更高。华北落叶松林土壤 N:P 和 C:P 最低, 进一步证实人工林的土壤养分低于天然林。(2) 所有物种的细根的 N 和 P 含量均低于叶片, 但平均 C 含量较高。所有树种的叶片的平均 N:P 比均低于 14, 表明该地区植物生长存在 N 限制。(3) 林龄和海拔与土壤 C、N 含量呈正相关。此外, 影响土壤养分的关键变量包括土壤 pH 值、容重和土壤含水量。总体来说, 种植合适的针叶树种有利于提高青藏高原森林土壤固 C 潜力, 研究结果为今后的森林植树造林策略和植被开发提供了基础信息。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U21A2006)

第一作者简介: 刘婕 (1999-), 研究生, 研究方向: 森林生态学. E-mail: jieliu2021@lzu.edu.cn.

*通信作者简介: 勾晓华 (1970-), 教授, 研究方向: 树木年轮与全球变化. E-mail: xhgou@lzu.edu.cn.

· 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 ·

川西北雪宝顶钙华自然遗产退化及其生态保育

代群威, 张婷, 李琼芳, 党政, 崔杰, 罗尧东

西南科技大学 四川绵阳 621010

雪宝顶流域以高寒地区钙华地质景观闻名于世, 流域内有黄龙沟、张家沟、牟尼沟、九寨沟、卡龙沟等丰富的钙华资源, 其中黄龙沟、九寨沟被列入“世界文化与自然遗产名录”, 两处钙华自然遗产地除拥有巨大的人文价值、经济价值外, 还具有极高的科研价值。近年来, 由于地质运动、旅游压力等影响, 钙华景观出现彩池边石坝坍塌开裂、滩流沙化、局部出现大量钙华变黑等现象, 引起各方研究者的关注。作为世界自然遗产地, 如何兼顾自然遗产保育和生态恢复两个方面, 科学合理地开展钙华生态修复保育是目前面临的迫切问题。

针对典型彩池、滩流钙华区域的自然和人为退化等系列现象, 我们提出钙华天然海绵地质体这一概

念, 并对其进行了深入探讨。我们认为, 对于黄龙等钙华遗产持续性科学保育, 最重要是认清其钙华天然海绵地质体特征的本质, 探明钙华孔隙全尺度和矿物单元、生物单元和孔隙单元的组相特征, 分析孔隙渗水、持水及力学特征。同时, 揭示钙华-微生物协同演化过程, 探明微生物参与钙华全过程沉积, 微生物的沉积调控及双向作用。目前, 关于现代微生物过量生长对钙华的有害和有益影响, 以及钙华黑化、沙化等景观退化系列问题的产生原因急需探明。鉴于此, 厘清钙华天然海绵地质体特征, 剖析钙华-微生物共沉积行为与演变机制, 这是对明确钙华体退化和自修复机制, 研究并获得仿天然钙华沉积过程的生态保育关键技术的核心科学基础, 也是对钙华生态保育技术应用于世界自然遗产级钙华景观的有力科学保障。

· 专题 30: 地球生态保护、人类生命共同体构建与生态地球化学 ·

典型热带岛屿生态系统土壤有机质组成及碳氮磷生态化学计量学

Soil organic matter composition and C:N:P stoichiometry of a typical tropical island ecosystem

梁胜岚^{1,2*}, 席祥龙^{1,2}, 徐利强³, 吴礼彬⁴, 刘晓东^{1,2}

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 安徽合肥 230026;

3. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009;

4. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072

土壤 C:N:P 化学计量学是了解自然系统中营养元素循环的关键, 分析土壤有机质组成和稳定性是探究生态系统营养元素循环的核心, 研究结果能够为揭示生态系统演化过程提供重要信息。通过多次西沙群岛野外调查, 采集了南海西沙群岛不同岛屿的 8 个土壤剖面样品。基于总有机碳 (TOC)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 数据, 发现近表层土壤 TOC、TN 含量和土壤 C:N:P 值显著高于下层; 热带珊瑚岛土壤 TP 含量明显高于其他地区, 这与历史时期的海鸟活动密切相关。野外调查和土壤沉积剖面样品反射光谱分析结果表明, 珊瑚砂、海鸟粪和植物残体是西沙群岛土壤物质组成的主要成分, 利用主成分分析和冗余分析可知, 所有现代没有海鸟活动的西沙岛屿具有相同的演化规律, 近表层土壤中 TOC 和 TN 主要来源于植物残体, 而海鸟粪土层中 TOC、TN 和 TP 主要来源于鸟粪输入。为了从微观角度深入探讨西沙土壤-植物生态系统的碳循环过程, 使用热裂解气相色谱质谱技术 (Py-GC/MS) 从分子层面分析了土壤样品中有机

质 (SOM) 的化学结构和组成特征, 发现土壤中有有机质主要包括脂类、芳香类、木质素和含氮杂环化合物等组分; 采用固态 ^{13}C 核磁共振 (NMR) 技术得到土壤有机碳中官能团的存在形式, 可将有机碳种类分为: 烷基碳 (Alkyl-C)、氧烷基碳 (O-Alkyl-C)、芳香碳 (Aromatic-C) 和羰基碳 (Carbonyl-C)。研究结果表明, 在不同沉积或土壤剖面中, O-Alkyl-C 含量的变化与植物输入贡献比变化趋势高度一致, Carbonyl-C 则与剖面中鸟粪输入比例变化相对应, Alkyl-C 和 Aromatic-C 存在相互转化的过程, 这反映了不同碳源会影响有机碳在土壤中的存在形式; 结合烷基化指数、疏水性指数和芳香性指数等随剖面深度的变化, 发现表层有机质的稳定性相对于下部样品要高, 这与表层土壤中丰富的有机质组成密切相关。上述研究结果有助于我们更好地理解珊瑚岛生态系统中营养元素的生物地球化学循环过程, 同时对全面评估西沙群岛生态系统的稳定性与可持续性发展提供了科学依据。

基金项目: 国家自然科学基金 (41976191)

作者简介: 梁胜岚, 女, 硕士研究生, 研究方向: 生态环境变化. E-mail: liangsl@mail.ustc.edu.cn

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

磷石膏-赤泥土壤化与植被生态重建应用潜力研究

刘勇¹, 张李帅¹, 陈莉¹, 苟万里¹, 万合锋², 杨海全³, 李志斌^{1,3}

1. 贵阳学院 生物与环境工程学院, 贵阳 550005;

2. 贵州省生物研究所, 贵阳 550009;

3. 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 550081

磷石膏和赤泥分别是磷化工和氧化铝工业排放的大宗固体废弃物, 具有产生量十分庞大, 综合处置利用难、长期堆存侵占土地, 造成巨大的资源浪费和严重的生态环境健康风险等突出问题, 其资源化综合利用技术特别是如何大规模、低成本的资源化综合利用一直是研究的热(难)点。基于磷石膏与赤泥的酸碱中和反应, 同时含有铁、铝、磷、钾、镁、钙等多种土壤元素以及赤泥的天然黏土矿物属性等, 通过多因素不同水平正交试验与不同植物生长试验研究了磷石膏与赤泥协同土壤化的潜力。研究结果表明: (1) 制备的磷石膏-赤泥基人工土壤的 pH 接近中性、含水率约 30%、有机质高达 7.5% 以及良好的阳离子交换能力等, 可达到自然土

壤基本特征; (2) 磷石膏-赤泥基人工土壤中养分含量高, 其中总氮、总磷与总钾含量分别可达到全国土壤养分一级、一级和二级标准以上, 满足植物生长养分条件;

(3) 初步表明紫花苜蓿、黑麦草、满天星、麦仙翁、小麦、三叶草、辣椒、向日葵等十余种植物均可不同程度发芽和生长, 特别是黑麦草、小麦、向日葵和麦仙翁等植物长势良好, 部分植物叶绿素 a/b 和植物不同酶(如 POD、SOD 和 CAT 等) 活性高, 表现出良好适生性与抗逆性。综上所述, 磷石膏与赤泥具有协同土壤化, 实现低成本、规模化综合利用的巨大潜力。磷石膏-赤泥基人工土壤对于如矿区等缺土地地区的植被生态重建或景观设计等具有重要参考价值。

· 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 ·

不同土地开发利用时序对塔里木河流域土壤质量状况影响

梁楠, 赵禹, 白金

中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054

塔里木河流域是新疆重要的优质棉、粮基地, 区域土地利用变化、土壤质量状况对粮食安全、生态安全具有重要影响。本文以 1980-2020 年 5 期美国 Landsat 卫星系列遥感影像资料为基础数据源, 运用土地利用转移矩阵, 分析了研究区 40 年土地利用时空变化特征; 根据西北地区 1:25 万土地质量地球化学调查成果, 对塔里木河流域主要绿洲区表层土壤元素分布特征、肥力状况、土壤生态环境、进行了研究, 并对不同开发利用年限耕地氮、磷、钾元素均值进行了对比。结果表明: 塔里木河流域土地利用类型以未利用地、草地、耕地为主, 三者的面积百分比从 1980 年的 54.34%、34.95%、5.31% 变化为 2020 年的 53.99%、32.02%、8.33%。调查区土壤养分综合质量

等级以中等-较缺乏为主, 占调查区面积 94.98%, 铁门关市土壤养分综合质量最优, 巴州及克州次之; 调查区无重金属污染风险的优先保护类土壤占比 99.93%, 安全利用土壤占比 0.07%, 风险管控类土壤占比 0.002%; 调查区土壤质量综合等级以良好为主, 占调查区面积 49.592%, 其次为中等等级土壤, 占比 45.849%, 优质土地占比 4.56%, 主要分布在巴州、阿克苏和喀什地区。调查区耕地氮、磷、钾元素随着耕地年限的增加整体呈现上升趋势, 但开发利用 30 年的耕地其主要转入类型为氮、磷、钾元素值较低的草地, 占耕地总转入面积的 93.87%, 致使该开发利用年限的耕地存在明显的质量下降趋势。研究结果可为塔里木河流域后备耕地资源开发工作提供参考依据。

基金项目: 中国地质调查局项目“新疆耕地区土地质量地球化学调查 (DD20190521)”和“西北五省耕地区 1:25 万土地质量地球化学调查 (DD20160319)”联合资助。

第一作者简介: 梁楠 (1980-), 高级工程师, 研究方向: 生态地球化学. E-mail: 3638640@qq.com

*通信作者简介: 赵禹 (1988-), 工程师, 研究方向: 生态地球化学. E-mail: zhaoyu01@mail.cgs.gov.cn

· 专题 30: 地球生态保护、人类生命共同体构建与生态地球化学 ·

南极无冰区湖泊碳埋藏特征及其影响因素 Carbon burial characteristics and influencing factors in lakes inform the ice-free areas of Antarctica

龙璇琦¹, 聂亚光², 郑章琴¹, 金晶¹, 刘晓东^{1*}

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;
2. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230039

湖泊沉积物碳埋藏是陆地碳循环中重要的环节, 对全球碳平衡起着重要的作用。目前全球气温的升高增强了有机物的分解效应, 对湖泊碳埋藏产生巨大影响。南极地区脆弱的生态系统对全球变化的响应敏感且剧烈, 出现增温放大效应, 同时微生物活性的增强有可能对南极碳的埋藏与保存产生重要影响。栖息有大量企鹅和海豹等生物南极无冰区是南极大陆物质交换的活跃地区, 贫瘠而脆弱的陆地生态系统对全球气候变化敏感, 生物传输带来大量氮和磷等营养物质的同时, 也会带来大量碳的输入, 同时影响栖息地周边的湖泊水生生态系统, 因而, 南极无冰区是研究南极碳循环与碳埋藏的理想场所, 但目前有关该地碳埋藏的相关研究较少, 埋藏量与主要影响因素尚不明确。本研究采集了南极无

冰区罗斯岛的鸟粪土沉积物样品和维多利亚地中部难言岛的湖泊沉积物样品, 分析沉积物剖面的理化性质、元素组成、同位素信号和沉积速率, 从历史演化的角度计算碳埋藏速率, 探究碳埋藏特征及其影响因素。研究表明, 南极无冰区碳埋藏速率主要受到沉积速率的影响, 同时也与有机质的沉积有一定关系, 受鸟粪影响的湖泊总体上存在较高有机碳埋藏速率, 较文献中报道的数据结果要高。上述研究结果表明, 以往研究对于南极碳埋藏能力可能存在一定的低估, 南极在历史时期存在高沉积速率的阶段, 南极可能埋藏了更多碳, 并且随着南极温度的升高, 这部分的碳很有可能会被释放出来, 加剧全球变暖, 对南极乃至全球生态产生重大影响, 需要对南极碳埋藏与碳循环进行更深入的研究。

第一作者简介: 龙璇琦, 男, 硕士研究生, 研究方向: 极地元素生物地球化学循环. E-mail: lovestudy@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者简介: 刘晓东, 男, 教授, 研究方向: 生态环境变化. E-mail: ycx@ustc.edu.cn

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

基于碳中和的生态保护/修复研究进展与展望

周启星*, 欧阳少虎, 李田

南开大学 环境科学与工程学院 碳中和交叉科学中心, 天津 300350

党的二十大报告指出, 加快实施重要生态系统保护和修复重大工程, 提升生态系统的多样性、稳定性和持续性。为此, 本报告首先从生态地球化学的角度, 对生命共同体的构建、基本内涵和重要性进行了概述。认为: 元素及化合物是地球系统中赖以循环的物质基础, 它们在地球系统各分室中有其不同的分布与分配规律, 进而决定了在不同生态圈之间的迁移转化走向。从生物个体到典型群落与特定流域, 从自然景观到大陆及全球生物圈, 田显示了在其中所处的中心地位。从生态学物质循环与能量流动来看, 山水林田湖草沙是人与自然构成的生命共同体的基本模式, 反映了生态地球化学在局部与全部、区域与全球的关系。对生命系统而言, 生态效应或健康影响的微观分析以及宏观调控, 成为生态地球化学在生态保护和系统治理或修复的基础和依据。

之后, 较为系统介绍了基于碳中和的生态修复

与治理研究进展。从碳中和生物新概念的提出, 到碳中和生物生态体系的构建, 特别是一系列基于生物电化学系统的新型污染土水环境的生态修复技术的研发、装备研制以及全面推广应用, 包括陆续发明 U 型单、双和多电极以及多维体系生物电化学修复污染土水的新技术与装备, 通过促进传质、共代谢、降低渗透压和提升环境介质导电性强化污染物降解, 进而解决在大幅降低成本的同时大大提升修复效率与速率等问题, 诠释了基于生命共同体的污染土水环境生态修复与治理的重要性。

最后, 从科学目标、技术目标和实践目标, 对本领域今后研究进行了展望, 指出: 在基础和应用基础方面, 重点是开展陆地或海洋核心碳汇识别及其增强机制, 特别是碳中和植物-动物-微生物协同固碳分子机制的研究; 在应用层面, 则要重点开展核心碳汇多途径增强及相关技术研发及应用。

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

弱电场调控植物-微生物生态修复机制研究

李田, 周启星*, 张晓林

南开大学 环境科学与工程学院 碳中和交叉科学中心, 天津 300350

石油污染土壤具有污染范围广、降解难的特点, 物理修复技术与化学修复技术能够在短时间内实现有机污染物的高效去除, 但是对于局部石油污染场地的原位修复存在成本高、难度大的缺点, 因此以植物、微生物为主的生态修复技术在这种有机污染场地的原位修复中具有很大的应用潜力。然而, 由于石油烃的毒性以及植物或微生物对环境条件要求高的问题, 一直制约着生态修复技术的进一步推广和应用。

微生物电化学技术通过电压或电位调控, 可以实现功能菌群的定向富集并将石油烃污染土壤中积累的电子进行空间转移, 同步实现生物强化和生物刺激

来加速石油烃的去除。虽然该修复原理将石油烃的去除效率提高了 120%, 但是仍然存在着修复范围小、修复效果差的问题。究其原因, 主要是存在原位修复功能菌富集缓慢、土壤传质困难的瓶颈。鉴于此, 本团队在首创微生物电化学土壤修复技术的基础上, 围绕目前土壤污染与生态修复存在的瓶颈问题, 通过开展低碳绿色生物修复技术研发与应用工作, 发展了植物-微生物电化学联合修复技术原理, 发现了植物根际分泌碳源可强化电活性功能菌群的富集, 揭示了植物-微生物电化学耦合系统的互营互作机制, 构建了零碳源投入的植物-微生物电化学协同修复技术体系并成功开展工程应用。

基金项目: 环境污染治理与修复 (52100189)

第一作者简介: 李田 (1994-), 助理研究员, 研究方向: 土壤低碳绿色修复技术. E-mail: tianli1@nankai.edu.cn

*通信作者简介: 周启星 (1963-), 教授, 研究方向: 生态地学. E-mail: zhouqx@nankai.edu.cn

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

长江流域三峡水库沉积物-水界面磷释放通量及机理

杨姣姣^{1,2}, 马一明¹, 李珊泽³, 王敬富^{1,2*}, 金祖雪^{1,2}, 李单昊^{1,4}, 王雨春^{1,3}

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 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

4. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048

三峡水库是世界上最大的水利工程, 目前正面临水体富营养化问题。由于三峡大坝的修建, 沉积物中积累了大量的磷。沉积物释放的磷为上覆水体提供了重要的磷源, 进一步加剧了藻华的发生。本研究以三峡水库为研究对象, 采用化学顺序提取法和高分辨率薄膜扩散梯度技术研究了沉积物-水界面的磷含量分布和释放机制, 并综合评估了三峡水库中内源磷的贡献。结果表明: 三峡库区沉积物中总磷含量较高, 平均含量为 1368 mg kg^{-1} ; 沉积物中磷含量以 HCl-P 为主, 其次为 NaOH-P 和 BD-P。沉

积物-水界面的磷释放通量平均为 $0.42 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 表明沉积物磷释放是上覆水体磷的重要来源。巫山、秭归和香溪河采样点 DGT-P 和 DGT-Fe 的浓度呈显著正相关 (r^2 分别为 0.91、0.39 和 0.29, $p < 0.05$)。DGT-P 和 DGT-S 的浓度亦显著正相关 (r^2 分别为 0.71、0.87 和 0.50, $p < 0.05$)。结果表明, 在三峡水库中 Fe-P 的还原性溶解是沉积物中磷释放的主要机制, 硫酸盐还原及其与铁的共沉淀促进了 Fe-P 的释放。这些结果为大型深水库内源磷污染防控提供了重要理论支撑。

基金项目: 矿物学 (41825003)

第一作者简介: 杨姣姣 (1998-), 硕士, 研究方向: 湖泊环境. E-mail: yangjiaojiao@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 王敬富 (1983-), 研究员, 研究方向: 湖泊环境. E-mail: wangjingfu@vip.skleg.cn

• 专题 30: 地球生态保护、人类生命共同体构建与生态地球化学 •

喀斯特地区溶解有机质来源的多元解析研究

吴婧^{1,2}, 张润宇¹, 陈敬安¹, 袁海军^{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 550081

2. 中国科学院大学, 北京 100049

喀斯特地区水生生态系统中碳循环的复杂性给溶解有机质 (Dissolved organic matter, DOM) 的来源解析带来了巨大的挑战和困难。本研究应用 C/N 比值、 $\delta^{13}\text{C}$ 组成、紫外-可见吸收光谱与三维荧光光谱等表征技术, 综合对比了西南喀斯特地区典型土壤与水生植物样品 DOM 的多维特征, 探讨了示踪喀斯特地区 DOM 来源的可靠方法与指标。结果表明: 水生植物的 C/N 比值波动范围较大, 石灰土的 C/N 比值偏低, 水生植物与土壤样品的 C/N 比值及 $\delta^{13}\text{C}$ 组成有所重叠, 难以区分 DOM 的来源。多种紫外吸收系数 (a_{254} 、 a_{280} 、 a_{300} 与 a_{350}) 侧面反映了不同 DOM 样品中芳香族化合物的相对丰度, SUVA_{254} 、 $E2/E3$ 、

$E4/E6$ 与腐殖化指数 (HIX、 HIX_{ohno}) 指示了样品之间腐殖化程度的差异, 特别是 HIX、荧光指数 (FI)、 S_R 较好区分了浮游藻类与土壤 DOM。修正荧光指数 (YFI) 还揭示了不同 DOM 样品的化学组成, 与三维荧光光谱的平行因子分析相吻合。此外, 黄壤因较低的 pH 值会使土壤有机质酸解为含氮组分, 导致 HIX、FI 和 S_R 的匹配性不好。除浮游藻类外, HIX 表明水生植物 DOM 均为内源, S_R 却显示其主要为外源, 而 FI 指示兼有内源和外源。因此, 在进行喀斯特地区 DOM 来源解析时, 光谱技术相比 C/N 比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 分析更加简便、有效, 同时应注意不同土壤类型的异质性与水生生态系统的复杂性。

Multivariate analysis of dissolved organic matter sources in karst areas

Wu Jing^{1,2}, Zhang Runyu¹, Chen Jingan¹, Yuan Haijun^{1,2}

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, P.R.China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China

Due to the complexity of the carbon cycle in aquatic ecosystems in karst areas, it has brought huge challenges and difficulties to the source apportionment of dissolved organic matter (DOM). In this study, the C/N ratio, $\delta^{13}\text{C}$ composition, ultraviolet-visible absorption and three-dimensional fluorescence spectroscopy techniques were comprehensively used to compare the multidimensional features of DOM from typical soils and aquatic plants in the Southwest China Karst Region, in order to explore reliable methods and effective indicators for tracing the source of DOM in karst areas. The results showed that the C/N ratio of limestone soil was low, and the C/N ratio of aquatic plants and soil samples overlapped as well as the $\delta^{13}\text{C}$ values; thus, it is difficult

to distinguish the sources of DOM. A variety of UV absorption coefficients (a_{254} 、 a_{280} 、 a_{300} 、 a_{350}) together with SUVA_{254} 、 $E2/E3$ 、 $E4/E6$ better reflected the relative abundance of aromatic compounds in different DOM samples. The humification index (HIX and HIX_{ohno}) indicated different humification degree among various DOM samples. Particularly, HIX, the fluorescence index (FI), and S_R effectively distinguished DOM from algae and soil end-members. The modified fluorescence index YFI further revealed the main chemical composition of different DOM samples, in accordance with the parallel factor analysis of the three-dimensional fluorescence spectrum. However, the low pH value of yellow soil will promote the acid

decomposition of soil organic matter into nitrogen-containing components, resulting in poor matching of HIX, FI, and S_R . Except for algae, the HIX indices indicated that the DOM of aquatic plants was endogenous, S_R indicated exogenous DOM, and the FI reflected both endogenous and exogenous DOM.

Therefore, when determining the sources of organic matter in karst areas, the spectroscopy technique is more effective and reliable than the C/N ratio and $\delta^{13}\text{C}$ analysis. Meanwhile, more attention should be given to the heterogeneity of different soil types and the complexity of aquatic ecosystems.

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

碳正离子在含氧污染物大气环境迁移转化中的作用机制

王甲新¹, 姬越蒙^{1*}, 安太成¹

1. 广东工业大学, 环境科学与工程学院、环境健康与污染控制研究院, 广州 510006

含氧挥发性有机物 (OVOCs) 种类繁多, 不仅有着丰富的一次来源, 还可以通过挥发性有机物 (VOCs) 的大气氧化反应二次生成。受环境条件以及大气成分的共同影响, 进入到大气中的 OVOCs 存在十分复杂的地球化学循环与转化机制, 导致其地球化学行为、环境与健康效应的相关研究仍然不够清晰。因此, 非常有必要对排放传输进入大气的 OVOCs 进行物理化学转化机制的系统研究, 以明晰其地球化学转化过程, 构建 OVOCs 与气候、生态环境以及人体健康效应的作用机制。本研究选取典型小分子量 α -二羰基化合物(乙二醛与甲基乙二醛)作为研究对象, 采用量子化学计算与实验方法相结合的手段, 对其在弱酸性水相环境中的化学转化过程进行了深入探究, 分别阐明了小分子量 α -二羰基化合物在无/有含氮物

种存在下, 通过快速地液相聚合对二次有机气溶胶 (SOA) /棕色碳 (BrC) 的贡献机制。我们的研究率先提出了碳正离子介导的 OVOCs 液相聚合反应是弱酸性气溶胶及云/雾滴中 SOA 和 BrC 形成的关键机制, 揭示了碳正离子是其成核的关键因素。本研究提出的碳正离子介导的反应机理能够合理解释实验中 OVOCs 在颗粒相和液相中气溶胶增长差异明显这一矛盾之处, 同时, 还应用该机理对更多 OVOCs, 如醇羟基化合物等, 在气溶胶内部的液相转化行为进行了探究与阐释。我们的研究为明晰 OVOCs 在大气环境中的迁移、化学过程以及对 SOA 的贡献机制提供了分子层面的科学依据, 同时也为服务生态环境及人体健康等领域的国家重大需求提供了基础理论和数据支撑。

基金项目: 国家自然科学基金 (42077189, 4201001008)、广东省自然科学基金 (2019B151502064)

第一作者简介: 王甲新 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 大气污染控制. E-mail: wzzz0704@163.com

*通信作者简介: 姬越蒙 (1979-), 教授, 研究方向: 挥发性有机物环境地球化学过程. E-mail: jiyym@gdut.edu.cn

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

天然土壤纳米胶体对水稻镉生物有效利用性和毒性的影响

欧阳少虎^{1,2}, 周启星^{1,2*}

1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350;

2. 南开大学碳中和交叉科学中心, 天津 300350

有毒重金属是常见的污染物,最有可能与土壤环境中无处不在的天然纳米胶体(Ncs)相互作用。然而,目前关于土壤 Ncs 对镉(Cd)环境归趋和健康风险的影响研究还保持着大量未知。本文采用同步荧光光谱和傅里叶变换红外光谱二维相关光谱(2DCOS)相结合的方法研究了三种土壤 Ncs 与 Cd 之间的相互作用。结果表明,Cd 与土壤 Ncs 表面的结合主要是通过强亲水效应和 $\pi - \pi$ 相互作用驱动的,这有助于我们理解土壤 Ncs 对 Cd 的高吸附容量

(366 ~ 612 mg/g) 和强亲和力($K_L = 4.3 \sim 9.7$ L/mg)。有趣的是,土壤 Ncs 和 Cd 共暴露在水稻(*Oryza sativa* L.)暴露 7 天后可显著降低 Cd 对根系的植物毒性(如吸收、根系生长和氧化应激)。在分子水平上,代谢组学分析表明,下调的代谢途径(如异喹啉生物碱和氨基酰基-tRNA 生物合成,甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢)可能导致上述不良的植物毒性。本研究为天然 Ncs 调控土壤环境中有毒重金属的归趋和健康风险的影响提供了新的见解。

基金项目: 环境地球化学(42107306)

第一作者简介: 欧阳少虎(1989-), 助理研究员, 研究方向: 环境地球化学. E-mail: ouyangshaohu@nankai.edu.cn

*通信作者简介: 周启星(1963-), 教授, 研究方向: 生态地球化学. E-mail: zhouqx@nankai.edu.cn

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

红枫湖流域农业面源污染治理的生物地球化学垒体系构建初探

岑模珊^{1,2}, 朱蒋洁^{1,3}, 计永雪⁴, 陈敬安^{1,2}, 曾艳^{1,*}

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 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550003;

4. 贵州财经大学 管理科学与工程学院, 贵阳 550025

在点源污染得到有效控制后, 流域内农业面源污染逐渐成为了湖库氮、磷等营养物质外源输入的主要贡献者。本研究选取红枫湖流域农田土壤为研究对象, 对其添加改良剂并种植植物来构建生物地球化学垒, 并对其氮、磷拦截效应进行了综合评估。研究结果表明, 对土壤添加 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 CaCl_2 与钠基膨润土显著提高了对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和磷拦截率, 降低其流失程度。其中, 对土壤添加 CaCl_2 改性钠基膨润土、并种植植被构建的生物地球化学垒, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和磷的综合拦截效果最佳, 截留率分别为 87%、92%、93%。而添加了 FeSO_4 的土壤, $\text{NO}_3^-\text{-N}$

的淋失程度增强, 不宜选取。种植植物后, 植物生长对土壤中氮和磷有一定的活化作用, 导致模拟径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和溶解性磷浓度较种植植物前升高, 但是均低于对照组。而且种植植物后经改良的土壤单元 Olsen-P 较种植植物前显著降低, 也反映出植物对土壤磷的活化利用。综上表明, 通过对土壤添加 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 CaCl_2 与钠基膨润土并种植适生植物(黑麦草和白花三叶草)来构建的生物地球化学垒可实现红枫湖小流域内的氮、磷等污染物拦截和植物生长两相促进, 从而有效、持续拦截土壤氮、磷, 降低其流失程度, 对实现农业面源污染的可持续治理具有重要意义。

基金项目: 贵州省湖泊水环境科技创新基地中央引导地方科技发展资金项目(黔科中引地[2021]4028); 贵州省科学技术基金([2019]1042)。

第一作者简介: 岑模珊(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊环境。E-mail: cenmoshan@mail.gyig.ac.cn.

*通信作者简介: 曾艳(1983-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为湖泊生源要素循环。E-mail: zengyan@vip.skleg.cn.

• 专题 30: 地球生态保护、人类命运共同体构建与生态地球化学 •

湖泊不同来源有机质降解过程中的碳磷活化差异特征研究

殷超¹, 曾艳¹, 陈敬安^{1*}, 冉光荣^{1,2}, 钟培森¹, 岑模珊^{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 550001;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049

碳 (C) 和磷 (P) 是自然界重要的生源要素, 是植物体内各种重要有机化合物的组成元素。植物衰亡后, 其残体有机质矿化降解过程中, 又伴随着 C、P 等元素的释放。传统研究观点认为碳、磷等生源要素在有机质矿化过程中, 仍按照其在有机质组成中的比例进行等比例活化释放。而随着先进原位采样监测技术的普及, 越来越多的研究发现有机质降解过程中 C 和 P 的活化行为存在差异, 并非等比例释放。在湖泊有机质降解过程中, 若以有机碳 (OC) 和有机磷 (OP) 等比例活化释放为基础, 估算湖泊有机磷释放通量, 将大幅低估有机质矿化释磷通量及其在水生生态系统中的循环能力; 从而严重低估湖泊内负荷对水体营养盐的贡献, 导致对藻类水华形势的严重误判。因此, 为了探明湖泊有机

质降解过程中碳、磷活化行为特征和差异, 我们选取了湖泊内源 (藻类) 和外源 (陆源 C3 和 C4 植物) 典型有机质进行不同环境条件下的室内降解模拟实验研究。研究表明: (1) 不同类型植物矿化速率存在显著差异, 藻类 > C4 植物 > C3 植物; (2) 不同类型有机质降解过程中均发生了 P 比 C 优先活化现象, 且矿化速率越快的植物残体, 其降解早期 P 较 C 优先活化现象越显著; (3) 缺氧环境能够促进 OP 的矿化分解, 导致植物残体降解过程中 P 比 C 优先活化程度较富氧环境下显著。这些研究成果不仅有利于科学认识湖泊富营养化过程机制, 还有助于深入揭示湖泊内源磷污染和水体富营养化维持机制, 可为湖泊富营养化防治和湖泊生态修复提供科学依据和理论指导。

• 专题 30: 地球生态保护、人类生命共同体构建与生态地球化学 •

典型新污染物的环境地球过程及效应

高艳蓬, 邓楚月, 牛笑林, 罗娜, 李桂英, 安太成*

广东工业大学 环境健康与污染控制研究院和环境科学与工程学院, 广州 510006; *Email: antc99@gdut.edu.cn

新污染物 (ECs) 危害生态环境和人体健康, 成为当前全球面临的重大环境问题。ECs 如内分泌干扰物、防腐抗菌剂等不仅自身具有毒性, 而且在环境地球化学过程中可能形成具有比母体毒性更强的转化产物等。然而, 由于大多数 ECs 在环境中浓度较低、迁移转化过程复杂, 难以定量归趋, 另外, 绝大多数未知转化产物缺乏标准品, 难以判明其结构及效应等实际问题, 导致明晰 ECs 的环境地球化学过程及效应仍然是艰巨任务。如何准确地辨识典型 ECs 的环境过程及效应、阻控其生态健康风险成为科学解决国家 ECs 治理面临的迫切需求。因此, 我们以日常生活频繁接触到的防腐抗菌剂、香味剂等典型 ECs 为研究对象, 采用量子化学、单体稳定同位素分析与非靶向筛查等技术手段, 把理论模拟、实验研究和野外观测相耦合, 从“瞬态中间体—产

物归趋—环境健康效应”的全过程链, 研究典型 ECs 如防腐抗菌剂等的环境地球化学过程及效应, 研究结果表明, (1) 脱氢瞬态中间体是防腐抗菌剂 ECs 形成致癌物二噁英的关键证据, 也是转化过程中雌激素效应增加的重要前驱体, 并提出了阻断毒性产物形成的调控原理。(2) 揭示了三类典型 ECs 随侧链长短、季节交替等影响下, 其转化过程及环境效应的动态演变规律, 为快速预判类似结构 ECs 的环境风险提供重要依据。(3) 阐明典型 ECs 在人体内暴露过程中羟基化代谢物的形成机制及其代谢物的潜在健康效应。上述研究为科学明晰典型 ECs 的环境地球化学过程及效应提供了新手段, 实现了环境地球化学过程研究从微观机制到宏观效应的有效链接, 也为快速预判类似结构 ECs 的环境生态与健康风险评估提供科学依据。

基金项目: 国家重点研发重点专项项目 (2019YFC1804500); 国家自然科学基金重点项目 (41731279)

第一作者简介: 高艳蓬 (1987-), 教授, 研究方向: 典型新污染物的环境转化与毒性效应. E-mail: gaoyp0114@gdut.edu.cn

*通信作者简介: 安太成 (1971-), 教授, 研究方向: 新污染物的环境地球化学过程、健康效应及其风险消减. E-mail: antc99@gdut.edu.cn