

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## CO<sub>2</sub> (aq) 受限条件下蓝藻的增殖优势加剧 喀斯特地区水库生态风险

曾艳<sup>1</sup>, 冉光荣<sup>1</sup>, 张紫焱<sup>1</sup>, 陈敬安<sup>1\*</sup>

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

蓝藻水华频繁发生, 尤其是在湖泊和水库中, 对水生生态系统和人类健康构成重大威胁。二氧化碳的可得性在浮游植物群落从硅藻和绿藻占优势向蓝藻占优势的转变中起着关键作用。喀斯特地区地表水的自然高 pH 值, 加上水库的季节性热分层, 导致该地区水库表层水中水溶性二氧化碳 [CO<sub>2</sub> (aq)] 的缺乏更为显著。然而, 目前关于喀斯特地区水库中无机碳动态变化对浮游植物群落影响的研究仍十分有限, 特别是在全球变暖的背景下。因此, 本研究选取了中国西南喀斯特地区的两个典型浅水水库, 在近一年的时间内, 每月采集表层水样, 并季节性采集垂直剖面水样。分析了营养物质、溶解无机碳 (DIC)、水溶性二氧化碳 [CO<sub>2</sub> (aq)] 浓度, 以及 DIC 的稳定同位素 ( $\delta^{13}\text{CDIC}$ ) 和浮游植物种类。结果表明, 表层水体中 CO<sub>2</sub> (aq) 浓度在暖季显著低于冷季, 且蓝藻丰度与 CO<sub>2</sub> (aq) 浓度呈显著负相关, 而硅

藻和绿藻则与 CO<sub>2</sub> (aq) 浓度呈正相关。这表明, CO<sub>2</sub> (aq) 缺乏条件下更有利于蓝藻的主导地位。在热分层期间, 底层水体中的 CO<sub>2</sub> (aq) 浓度显著高于表层水体, 表明热分层阻碍了二氧化碳的垂直交换, 使表层水体更容易受到 CO<sub>2</sub> 限制, 从而更有利于蓝藻的主导地位。此外, 与非喀斯特地区水库的对比分析显示, 喀斯特水库中较高的 pH 值会加剧表层水体中 CO<sub>2</sub> (aq) 的缺乏, 进一步增强蓝藻的主导地位。随着全球变暖, 温度升高及由此导致的沉积物中营养物质释放增加, 将加剧喀斯特水库中蓝藻水华的风险。这项研究强调, 在喀斯特地区的 (亚) 深水库中, 蓝藻占主导地位的风险更高, 为这些水库的生态脆弱性提供了新的见解。

**关键词:** 蓝藻优势; CO<sub>2</sub> (aq) 限制; 喀斯特地区; (亚) 深水库; 生态脆弱性

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0806000); 国家自然科学基金 (42177249)

第一作者简介: 曾艳 (1983-), 副研究员; 研究方向: 喀斯特地区水环境与水生态。Email: zengyan@vip.skleg.cn

\*通信作者简介: 陈敬安 (1973-), 研究员; 研究方向: 环境地球化学。Email: chenjingan@vip.skleg.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 喀斯特流域水生系统碳流失对流域碳汇的影响

侯永梅<sup>1</sup>, 李思亮<sup>1\*</sup>

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津市 300000

虽然陆地生态系统是重要的大气碳(C)汇,但由于水生生态系统碳的输出,特别是在生态环境脆弱且人类干扰强烈的流域,净景观生态系统碳汇能力可能被高估。本研究将水生碳输出的三种主要途径(碳埋藏、气态碳排放和下游碳输出)整合到中国西南典型的喀斯特河流-水库系统——乌江流域(WRB)的陆地-水生系统净景观生态系统碳汇评估中。结果表明,乌江流域在2000年、2006年、2013年和2017年的净景观碳汇分别为12.0、13.8、14.0和16.1 Tg C/yr,而水生系统碳输出分别抵消了陆地碳汇的10.6%、11.9%、14.6%和14.1%。就年际变化而言,水生生态系统碳输出呈现出显著的增加趋势,表明水库建设和生态修复极大地改变了流域碳的生物地球化学过程以及陆地向水生系统碳输出的动态变化。下

游碳输出占水生碳输出的61.8%~82.1%,其中约72%发生在雨季,主要归因于喀斯特地区强烈土壤侵蚀作用下岩石风化作用和外源碳的增加。水库中的有机碳埋藏占陆地碳汇的0.7%~2.0%,主要受内源碳的生物地球化学过程和陆地碳输入的影响。同时,CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>排放抵消了陆地碳汇的1.2%~3.7%,如果考虑水库下泄水中的气体排放(这些水体以增强的微生物降解和缺氧条件为特征),这种抵消效应会进一步增强。本研究强调了陆地-水生碳输出在抵消陆地碳汇中的重要作用,因此将水生系统碳输出纳入生态系统碳评估对于全面理解净景观生态系统碳汇有重要作用。

**关键词:** 陆地 C 汇; 生物地球化学过程; 净景观 C 平衡; 梯级水库

基金项目: 国家自然科学基金项目(42230509, 42222062)

第一作者简介: 侯永梅(1997-), 博士在读; 研究方向: 喀斯特流域水碳耦合。Email: ymhou23\_@tju.edu.cn

\*通信作者简介: 李思亮, 教授; 研究方向: 流域生物地球化学循环。Email: siliang.li@tju.edu.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 西南“叠加区”生态环境现状检测与问题诊断

于慧<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川省成都市 610213

通过地面调查、遥感监测、空间建模等手段, 开展以降雨侵蚀力、土壤可蚀性、植被覆盖度、净初级生产力、NDVI 等水土流失、植被状况、流域环境状况关键指标检测, 检测西南喀斯特“叠加区”生态环境现状, 诊断区域生态系统退化严重程度。建立西南

喀斯特“叠加区”适应气候变化生态保护修复技术效应评估的指标体系。

**关键词:** 生态环境现状检测; 生态系统退化; 生态保护修复

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2023YFF0806004)

作者简介: 于慧 (1980-), 副研究员; 研究方向: 国土空间生态修复与土地综合整治。Email: yuhui@imde.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 多情景视角下生态脆弱区土地格局优化及生态系统服务价值评估——以乌江流域为例

李志颖<sup>1</sup>, 魏荣菲<sup>2\*</sup>, 唐玉倩<sup>1</sup>, 王芳<sup>3</sup>, 郭庆军<sup>2</sup>

1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430078;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源利用与环境修复重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

喀斯特地区是西南地区典型的生态脆弱区, 乌江流域作为其中的核心部位, 发挥着生态安全屏障的重要作用。受气候变化与人类活动的双重影响, 该地区生态系统的稳定性与持续性受到挑战, 探明流域未来发展格局与生态系统服务的动态变化路径对于乌江生态环境保护与修复具有重要意义。然而, 土地利用在生态修复导向下的多目标优化路径及其与生态系统服务之间的响应机制尚不明确。因此, 本研究以乌江流域作为研究区域, 结合自然与社会经济等多种驱动要素数据分析人类活动和气候变化影响下土地利用的动态演变过程, 耦合启发式智能算法模型与 PLUS 模型探索经济效益最大化、碳排放最小化以及生态系统服务最大化多目标下协同的土地利用空间配置, 进而预测多种情景 (SSP1-

RCP2.6、SSP2-RCP4.5、SSP5-RCP8.5、自然发展、优化调控) 下生态系统服务价值的未来发展趋势。结果表明: 在 SSP1-RCP2.6 与 SSP2-RCP4.5 情景下, 林地、草地等生态土地利用类型得到一定程度的保护与恢复, SSP5-RCP8.5 情景下建设用地数量显著提升; 同自然发展情景相比, 优化后的土地利用配置兼顾建设用地与生态类型用地的的发展; 5 种情景预测下 2030 年乌江流域地区生态系统服务价值均有所增长。本研究可为乌江流域开展国土空间生态修复工作, 推动绿色可持续发展提供数据支撑与政策建议。

**关键词:** 生态系统服务; 土地利用; 多目标优化; 乌江流域

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF0806004)

第一作者简介: 李志颖 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 土地利用优化。Email: zhiying@cug.edu.cn

\*通信作者简介: 魏荣菲 (1985-), 副研究员; 研究方向: 环境质量评价与修复。Email: weirf.12b@igsrr.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 蓖麻对某铀矿区土壤的修复行为及机制探讨

关燕鹤<sup>1\*</sup>

1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 江西省南昌市 330013

铀矿区土壤污染的修复是我国核工业生态环境保护领域亟待解决的重要课题。在众多土壤修复技术中, 植物修复技术因其环境友好性和经济性, 已成为铀污染土壤修复的研究热点。本研究以中国东南部某铀矿区为研究对象, 基于对矿区土壤铀含量的全面调研, 将土壤分为低 ( $50\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、中 ( $100\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、高 ( $200\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 三个浓度组, 利用前期筛选出的优势植物蓖麻开展实验。采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)、透射电镜 (TEM)、能谱 (EDS)、高效液相色谱 (HPLC)、高通量测序 (High-throughput sequencing)、RNA-Seq 转录组测序和 LC-MS/MS 代谢组学等先进技术, 揭示蓖麻修复铀污染土壤的调控机制。结果显示: 蓖麻在不同铀浓度胁迫下的生物量和生长状态呈现先增后降趋势。在中、低浓度铀胁迫下, 蓖麻毒物兴奋效应明显。随着铀浓度的增加, 蓖麻叶片的光合色素 (叶绿素 a、b、类胡萝卜素、总叶绿素) 和抗氧化酶活性 (POD、SOD) 呈现先升后降的趋势; 可溶性蛋白含量则先降后升, 而丙二醛含量变化不大。根部细胞在不同铀浓度胁迫下状态良好; 茎、叶部细

胞在中、低浓度铀胁迫下淀粉粒数量明显增加, 而在高浓度铀胁迫下与对照组相差不大。含铀结晶主要位于表皮细胞壁的外侧, 而其他形态的铀则可见于细胞壁和细胞质中。铀胁迫显著影响了微生物群落的组成, 导致结构重组和功能变化。铀胁迫条件下, 蓖麻根际土壤中脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性均显著低于对照组 (CK), 而过氧化氢酶的活性随着铀浓度的升高呈现出先增长后降低的趋势。不同铀浓度胁迫下蓖麻根系的基因表达差异涉及代谢过程、酶活性与催化功能、转运过程、信号传导与调控以及细胞结构与功能等方面。差异显著基因的注释中, 代谢通路占据了主要部分, 其中氨基酸代谢、其他次级代谢物的生物合成和碳水化合物代谢的基因富集程度最高。此外, 在低、中浓度铀胁迫下, 差异显著的代谢物数量显著高于高浓度铀胁迫组, 且不同处理下对根系影响最大的均为代谢通路, 尤其是次级代谢物的生物合成通路。

**关键词:** 铀胁迫; 蓖麻; 微观分布; 代谢组学; 转录组学

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 人类活动影响下中国西南喀斯特地区磷转化 微生物的种群及演替特征

吴求生<sup>1</sup>, 袁权<sup>1\*</sup>

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

磷限制在全球范围陆地生态系统中普遍存在, 磷也是水库内源负荷的关键因素。微生物在磷循环过程中扮演重要角色。病毒是地球上最大的生物实体, 我们对其如何影响微生物磷获取过程的了解仍然有限。本研究采集贵州喀斯特植被恢复不同阶段土壤样本(0-60 年) 和不同库龄沉积物样本(最高 42 年) 进行宏基因组测序并识别病毒信息。结果表明随着植被恢复年限增加, 土壤微生物群落解磷和聚磷潜力增强。随着库龄增加, 沉积物微生物群落解磷潜力下降。2 种生境中, 病毒对于微生物磷获取潜力和磷循环微生物多样性的影响都大于理化指标。土壤中, 裂解型病毒显著促进微生物群落解磷和聚磷潜力, 但降低磷

循环微生物多样性; 溶源型仅与 C-P 氧化裂解和水解途径显著相关, 与磷循环微生物多样性未见相关性; 沉积物中, 裂解型和溶源型都显著降低微生物群落解磷和聚磷潜力, 但这 2 种病毒的多样性与磷循环微生物群落多样性显著正相关。沉积物中病毒编码丰富的磷获取的辅助代谢基因(包括 *ppk1*、*ppk2*、*phy*、*phnJ* 等基因)。2 种生境中, 病毒侵染频率最高的磷循环物种是链霉菌属、慢生根瘤菌以及中慢生根瘤菌等优势属。

**关键词:** 磷限制; 内源负荷; 裂解型与溶源型; 解磷与聚磷; 辅助代谢基因

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0806000); 国家自然科学基金(41573083, 42177116, U2202209)

第一作者简介: 吴求生, 博士研究生; 研究方向: 微生物地球化学。Email: 565715597@qq.com

\*通信作者简介: 袁权, 研究员; 研究方向: 土壤微生物学和生物地球化学, 喀斯特系统生源要素循环的微生物学机制。Email: yuanquan@mail.gyig.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 喀斯特生态脆弱区土壤有机碳库提升的微生物机制

崔俊芳<sup>1</sup>, 钟卫<sup>1</sup>, 唐家良<sup>1\*</sup>, 李春培<sup>1</sup>, 芦美<sup>1</sup>

1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610229

报告系统梳理了喀斯特脆弱区边坡类型和特点, 以及国内外边坡修复领域的多项关键技术, 依据生态系统重建、维持和景观优化与生态系统功能提升的步骤, 提出喀斯特脆弱区生态修复总体设计思路; 通过分析对比喀斯特脆弱区生态修复及治理模式, 依据可持续发展理念, 提出蚕桑产业是推动

贵州叠加脆弱区可持续发展的新路径, 明确了边坡桑配搭苔藓在土石质边坡用于生态修复的技术方案。

**关键词:** 喀斯特; 适应性生态修复; 蚕桑产业; 苔藓

基金项目: 科技部重点研发项目 (2023YFF0806002)

第一作者简介: 崔俊芳 (1983-), 副研究员; 研究方向: 土壤结构与水碳耦合。Email: jfcui@imde.ac.cn

\*通信作者简介: 唐家良 (1981-), 研究员; 研究方向: 地力提升。Email: jltang@imde.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 西沙石岛喀斯特岩溶：珍贵地质遗迹资源之殇 和逆喀斯特岩溶海洋岩土工程

许红<sup>1,2,3</sup>, 李琦<sup>4</sup>, 鲍志东<sup>5</sup>, 张莉<sup>6</sup>, 孔亮<sup>7</sup>

1. 长江大学(武汉), 湖北武汉, 434100;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

3. 国土资源部青岛海洋地质研究所, 山东青岛, 266237;

4. 中国地质大学(北京), 北京, 100083;

5. 中国石油大学(北京), 北京, 102249;

6. 广州海洋地质调查局, 广东广州, 511466;

7. 青岛理工大学, 山东青岛, 266033

喀斯特地貌如桂林山水、云南石林, 是珍贵地质遗迹资源和顶级生态景观代名词。海洋岛屿喀斯特尤其是南海海岛喀斯特仅见于西沙群岛石岛。石岛是中国南海海拔最高的小岛, 石岛老龙头是唯一一尊发现于自然界的龙形石。老龙头酷似石龙, 是西沙军民图腾, 也是中华民族的象征。但是, 老龙头由弱固结沙屑灰岩-生物礁海滩沙固结形成, 逾 40 年研究发现是中全新世-晚更新世。老龙头是西沙群岛名片。但是, 在全球气候变化与人类获得加剧的背景下, 热带风暴、半日潮、波浪流、南海双向季风、高温、高湿、高盐

七大自然力与人类活动造成的损害、损坏和损毁, 老龙头现状堪忧: 头重脚轻, 已呈倒三角锥状, 摇摇欲坠, 定义为顶级生态景观之殇和海岛喀斯特岩溶。本文以现代海岛碳酸盐岩生态景观喀斯特为研究对象, 以台湾高雄叶柳公园女王头灰质泥岩喀斯特修复失败, “5-10 年或断颈”为警示。探索石岛老龙头修复保护的科学理论及其纳米材料和海洋岩土工程方案。

**关键词:** 西沙群岛石岛; 老龙头; 喀斯特岩溶; 逆喀斯特岩溶修复; 纳米材料与海洋岩土工程

基金项目: 国家自然科学基金项目(49206061, 41106064); 国家油气重大科技专项(2011ZX05025-002-04); 国家科技基础资源调查专项(2017FY201407)

第一作者简介: 许红, 教授; 研究方向: 碳酸盐岩沉积岩石学。Email: qdxhong@163.com

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 喀斯特湖泊沉积物-水界面 $\text{CO}_2$ 产生的空间分布及分子机制

郭雯<sup>1</sup>, 廖鹏<sup>1\*</sup>, 陈敬安<sup>1</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所 环境室, 贵州省贵阳市 550081

喀斯特流域因土层浅薄、石漠化严重而成为典型的生态脆弱区。最近数据显示, 该区域的增温速率 ( $0.34^\circ\text{C}/10$  年) 与青藏高原 ( $0.32^\circ\text{C}/10$  年) 相当, 位列全球升温最快区域之一。同时, 作为全国 13 大水电基地之一, 筑坝水库的周期性蓄放水行为和自然湖泊水体季节性分层使得湖泊沉积物-水界面呈现动态的无氧-有氧波动, 成为  $\text{CO}_2$  的潜在产生热区。然而, 目前对于  $\text{CO}_2$  产生的空间分布规律及其微观分子机制仍知之甚少。本研究以典型喀斯特湖泊红枫湖的 28 个表层沉积物为对象, 首次揭示有氧条件下  $\text{CO}_2$  产量较缺氧条件高 4.6 倍, 且呈现显著的空间异质性——富集  $\text{Fe}(\text{II})$  的浅层沉积物表现出更高的  $\text{CO}_2$  释放通量。研究发现有氧环境中的  $\text{CO}_2$  来源不仅包括传统认知的微生物作用, 还包含  $\text{Fe}(\text{II})$  氧化生成

的羟基自由基驱动的非生物氧化过程, 平均占比 26.76%, 其贡献的  $\text{CO}_2$  通量达  $95.61 \text{ g}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。利用傅里叶回旋共振离子质谱分析, 进一步发现羟基自由基介导的羧基加成可引发芳香结构开环, 导致有机质解聚、脱甲氧基化和碎片化, 最终形成缩合芳香化合物和  $\text{CO}_2$ 。此外, 羟基自由基还促进大分子氧化分解为生物可利用的小分子酸。本研究首次在喀斯特湖泊沉积物中发现羟基自由基介导的有机碳化学氧化是重要的非生物  $\text{CO}_2$  产生源, 这一过程机制需耦合到现有的沉积物碳循环的生物地球化学模型框架中, 以更全面评估喀斯特流域碳收支。

**关键词:** 喀斯特; 沉积物-水界面; 无氧-有氧波动; 羟基自由基; 二氧化碳

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0806003)

第一作者简介: 郭雯 (1999-), 博士研究生; 研究方向: 环境地球化学。Email: guowen@mail.gyig.ac.cn

\*通信作者简介: 廖鹏 (1986-), 教授; 研究方向: 环境地球化学。Email: liaopeng@mail.gyig.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 全球变化下西南喀斯特高原湖库富营养化防控策略

王敬富<sup>1,2,3\*</sup>, 吴泓辰<sup>1,3</sup>, 马一明<sup>1,2</sup>, 金祖雪<sup>1,3</sup>, 陈敬安<sup>1,2,3</sup>

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. 红枫湖水库生态系统贵州省野外科学观测研究站, 贵阳 551499

富营养化是指水体氮磷等营养物输入过多, 引发藻类大面积爆发的现象。过去四十年全球藻华发生普遍增加, 富营养化和藻华频发是全球重大环境问题。然而, 除氮磷营养盐外, 气候变化在多大程度上对富营养化造成影响? 应该采取什么策略加以应对? 成为当前亟待回答的科学问题。本研究针对西南喀斯特区高原湖泊、水库富营养化问题开展研究, 取得如下认识: 1、全球变暖加剧冰川消融, 增加陆源输入, 提升初级生产, 对高原湖泊生态系统有重大影响; 2、2003~2020 年来, 中国湖泊 ( $n=64$ ) 和水库 ( $n=33$ ) 的藻华风险期 (ABRPs) 分别增加了 42 天 (11.5%) 和 54 天 (14.8%), 气温 (Tair)

对 ABRPs 延长贡献高于 TSI(N+P) 的时间超过 63%, 并随全球变暖而持续延长 ( $0.82 \pm 0.04 \text{ d} \cdot \text{yr}^{-1}$ ); 3、气候变化将进一步降低西南湖库藻华发生阈值, “局部藻华” 可能成为未来的新常态, 藻-菌相互作用在西南喀斯特高原湖泊藻华形成与维持中可能扮演重要角色。综上, 气候变化背景下西南喀斯特高原湖库富营养化风险加剧, 应采取更为有力的保护与管理措施, 积极应对气候变化可能带来的生态环境风险。

**关键词:** 气候变化; 喀斯特高原湖库; 富营养化; 藻类水华

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF0806000); 贵州省重大科技专项 (黔科合重大专项字[2024]009, [2024]013); 贵州省科技计划项目 (黔科合平台-YWZ[2023]006); 中国科学院青年创新促进会优秀会员 (Y2023105)

第一及通信作者简介: 王敬富 (1983-), 研究员; 研究方向: 水环境保护与污染防治。Email: wangjingfu@vip.skleg.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 基于 InVEST 模型的贵州省水源涵养时空变化评估

牛凝<sup>1,2</sup>, 范继辉<sup>1\*</sup>, 杨紫滢<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都市 610299;

2. 中国科学院大学, 北京市 100049

随着全球水资源短缺和水质恶化问题的加剧, 水源涵养成为水资源管理和生态系统可持续发展的重要议题。贵州省作为典型的喀斯特地貌区, 其独特的水文地质特征和严重的水土流失问题使得该区域的水源涵养研究尤为重要。然而, 当前研究多局限于短期变化分析, 针对贵州省长时间序列水源涵养时空演变规律及综合分区的研究尚显不足。因此, 本研究基于 InVEST 年产水模型对贵州省 1983 年至 2022 年的水源涵养量进行定量估算, 并结合 MK 趋势检验和 Sen's 斜率方法分析其时空变化特征。并探讨气候和土地利用变化对水源涵养的影响机制, 对贵州省进行水源涵养功能分区。结果表明, 贵州省多年平均产水

量和水源涵养量分别为 547.62 mm 和 364.70 mm, 空间上呈现东部上升、西部下降的变化趋势。降水是水源涵养变化的主要驱动因子, 不同土地利用类型中, 林地的水源涵养能力最高。空间分区结果显示, 高水源涵养能力-极重要区域主要分布在贵州省东南部, 而低水源涵养能力-极重要区域则集中于西北部。本研究为贵州省水资源合理利用和生态保护提供了科学依据, 对区域可持续发展具有重要的理论和实践意义。

**关键词:** 水源涵养; InVEST 模型; 时空变化; 气候和土地利用变化

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0806002); 国家自然科学基金 (U2240216); 四川省科技计划 (2024YFHZ0246)

第一作者简介: 牛凝 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 生态水文学。Email: niuning@imde.ac.cn

\*通信作者简介: 范继辉 (1980-), 副研究员; 研究方向: 生态水文学和水文水资源。Email: jhfan@imde.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 可解释机器学习揭示了气候变暖增加了湖泊和水库的藻华风险

马一明<sup>1,2</sup>, 王敬富<sup>1,2\*</sup>

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

近几十年来, 中国在减少外源氮(N)和磷(P)输入湖泊和水库(L&Rs)方面做出了巨大努力, 试图控制藻华(ABs)。气候变化似乎抵消了这一措施的效果。因此, 区分气候变化和营养物质的作用对于制定有效的藻华管理策略至关重要, 但仍然具有挑战性。在这里, 我们将藻华的开始和结束时间与神经网络模型相结合, 研究了 2003~2020 年中国藻华风险期(ABRPs)的变化趋势和控制因素。我们发现, 在过去的 20 年中, 湖泊和水库的 ABRPs 分别增加了 42 天(11.5%)和 54 天(14.8%)。气温(Tair)对 ABRPs 延长的贡献(11%)远大于 P(5.3%)和 N(3.5%)。Tair 的贡献超过

了 N 和 P 的贡献, 占一年的 63%, 并将随着全球变暖而继续扩大。此外, 与湖泊相比, 水库的 ABRPs 显示出更快的增长率。这可能是由于水库的 Tair 阈值较低(水库: 12.6℃, 湖泊: 16.7℃)以及温度的影响较大(水库: 17%, 湖泊: 5%)。总之, 我们的研究揭示了气候变暖对藻华开始和结束时间的潜在重要性, 并区分了 L&Rs 藻华驱动机制的差异, 从而为中国 L&Rs 藻华防控策略的制定提供了科学依据。

**关键词:** 湖泊和水库; 藻华; 气候变暖; 可解释机器学习

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF0806000); 贵州省重大科技专项(黔科合重大专项字[2024]009, [2024]013); 贵州省科技计划项目(黔科合平台-YWZ[2023]006); 中国科学院青年创新促进会优秀会员(Y2023105)

第一作者简介: 马一明(1994-), 博士研究生; 研究方向: 生态环境保护。Email: mayiming@mail.gyig.ac.cn

\*通信作者简介: 王敬富(1983-), 研究员; 研究方向: 水环境保护与污染防治。Email: wangjingfu@vip.skleg.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 溶解无机碳对河流生态系统的潜在威胁

祁虹凯<sup>1</sup>, 刘易<sup>1,2\*</sup>

1. 香港科技大学(广州)地球与海洋大气科学学域, 广州 510000;

2. 港澳海洋研究中心, 香港 999077

河流作为最重要的淡水生态系统之一, 是陆地、海洋与大气之间水、气体和能量交换的枢纽。河流生态系统的新陈代谢会随着太阳辐射、水流稳定性和温度等外部压力而发生变化。然而以溶解无机碳(DIC)等内部因素对河流生态系统新陈代谢的潜在影响却很少受到关注。在这项研究中, 我们使用机器学习来重现全球河流的 DIC 数据集, 然后将全球河流划分为高 DIC 河流和低 DIC 河流。通过全球河流观测数据计算得出的表观耗氧量(AOU)作为生态系统新陈代谢强度的指标。研究发现, 高溶解无机碳河流生态系统随季节气候变化表现出更强的波动, 这种现象在较寒冷的气候区更为明显。由于溶解无机碳促进了总初级生产力(GPP)维持生态系统平衡, 当 GPP 被温度等因素快速减弱时增加了高溶解无机碳河流出现缺氧的风险。同时, 随着自上世纪以来人类农业施肥及营养盐的输入, 全球河流生态系统新陈代谢开

始出现较大幅度的波动。通过全球河流 AOU 的历史波动发现, 面对人类活动干扰, 高溶解无机碳河流相较于低溶解无机碳河流具有更长的波动周期(影响更久)、更大的波动幅度(影响更大)及滞后效应。基于河流历史表观耗氧量的年度变化, 我们设计了一个简单的基于米氏方程改进的概念模型并较好地拟合出了全球年平均表观耗氧量的历史变化趋势。该模型进一步被用于预测在不同的未来气候情景下, 溶解无机碳在河流生态系统长期变化中所起的作用。研究表明与低溶解无机碳河流相比, 在不同施肥情况的所有气候情景下高溶解无机碳河流均面临着更高的耗氧风险, 从而揭示出溶解无机碳对河流生态系统新陈代谢带来了潜在的隐藏风险。

**关键词:** 河流生态系统; 新陈代谢; 溶解无机碳; 敏感性

基金项目: 香港研究资助局卓越学科领域计划(AoE/P-601/23-N); 港澳海洋中心资助

第一作者简介: 祁虹凯(1996-), 博士研究生; 研究方向: 流域水文地质及氮循环。Email: chrisgardnerqihk@hotmail.com

\*通信作者简介: 刘易(1987-), 助理教授; 研究方向: 水文地质学。Email: yiliuyl@hkust-gz.edu.cn

## • 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 近四十年西南喀斯特地区水文过程的生态恢复响应

曾思博<sup>1</sup>, 蒋勇军<sup>1\*</sup>, 刘再华<sup>2</sup>, 蒲俊兵<sup>3</sup>, 贺秋芳<sup>1</sup>, 吴泽<sup>1</sup>, 田兴<sup>1</sup>

1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400700;
2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;
3. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 400000

植被恢复可增加碳储量并产生生态系统正向效益,但其对脆弱喀斯特地区水资源可利用量的影响尚不明确。本研究以过去数十年实施大规模生态恢复工程的中国西南喀斯特地区为对象,系统分析了1982~2018年间气候参数、植被绿度、水文要素(蒸散发、径流、土壤湿度)、产水量及陆地水储量的长时空变化特征。采用广义线性混合模型(GLMM)定量解析了气候变化与植被绿化对该湿润区水资源变化的贡献率。结果表明:1982~2018年间西南喀斯特地区植被绿化趋势显著;气候变化呈现1993年前湿润化向1993~2013年干旱化的显著转折。研究发

现,近40年来该湿润区植被绿化与气候变化共同导致蒸散发显著增强(+2.08~2.67 mm/a)、陆地水储量持续减少(-2.19~2.96 mm/a),而产水量基本保持不变。植被绿化可解释26.43%~52.09%的陆地水储量下降,这种水分耗损主要源于干旱年份(1993~2013年)土壤水分和地下水的持续减少。研究强调,未来在湿润喀斯特区实施生态修复时,需充分考虑植被恢复对水资源可持续供给的影响。

**关键词:** 喀斯特水文;生态水文过程;生态恢复;西南喀斯特区;陆地水储量

基金项目: 国家自然科学基金项目(42307070)

第一作者简介: 曾思博(1990-), 教授; 研究方向: 岩溶动力学与全球变化。Email: swsibozeng@swu.edu.cn

\*通信作者简介: 蒋勇军(1968-), 教授; 研究方向: 水文学, 岩溶环境学。Email: jiangyj@swu.edu.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 喀斯特典型小流域暴雨事件期间溶解性有机碳动力学过程与调控机制

王浩阳<sup>1</sup>, 覃蔡清<sup>2</sup>, 岳甫均<sup>1</sup>, 李思亮<sup>1\*</sup>

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津市 300072;

2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安市 710049

气候变化下极端降雨事件的频发正在加剧陆地生态系统中碳库的转化与流失, 特别是在以浅层透水土壤和快速地表-地下水文连通性为特征的生态脆弱的喀斯特地区。为了科学评估气候变化对生态脆弱与环境敏感性较强的喀斯特流域物质循环的影响, 本研究以典型西南喀斯特小流域为对象, 开展了暴雨事件驱动下溶解性有机碳 (DOC) 输出的动态响应研究。基于高频原位光学传感器 (15 min 分辨率) 在不同水文条件下的连续监测数据表明, 暴雨阶段的 DOC 浓度变化可达基流段的 2~9 倍。进一步结合三维荧光光谱-平行因子分析 (EEM-PARAFAC) 技术解析了暴

雨事件期间溶解性有机质 (DOM) 的来源, 主要为陆源腐殖质与类蛋白类物质, 这与快速增强的水文过程促使土壤渗透有关的陆源地表径流输入有关, 为拓宽气候变化下喀斯特流域碳输出动态、迁移转化提供强有力证据。本研究通过多种技术手段与分析方法来量化和表征气候变化对喀斯特流域碳循环的扰动机制, 为制定行之有效的流域环境管理与气候适应型缓解策略提供了坚实的科学依据。

**关键词:** 喀斯特流域; 暴雨事件; 碳动力学; 溶解性有机质; 气候变化

基金项目: 科技部重点研发计划 (2023YFF0806001)

第一作者简介: 王浩阳 (1998-), 博士研究生; 研究方向: 有机碳的生物地球化学循环。Email: hywang\_edu@163.com

\*通信作者简介: 李思亮 (1978-), 教授; 研究方向: 地球关键带和生物地球化学。Email: siliang.li@tju.edu.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

## 喀斯特土壤侵蚀：全球变化背景下的关键驱动因素

崔珉铭<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

本研究整合贵州喀斯特区温度、降水、蒸散发和土壤湿度等数据, 分析土壤侵蚀变化趋势及对气候因素的敏感性。结果表明, 坡度和年降水量是影响土壤侵蚀的关键变量, 土地覆盖类型贡献较小。过去几十年, 该区域土壤侵蚀总量呈下降趋势。敏感性分析显

示, 降水普遍促进土壤侵蚀, 蒸散发在部分地区促进而在高海拔地区抑制土壤侵蚀。本研究为该地区土壤侵蚀防治和生态环境保护提供科学依据。

**关键词:** 喀斯特; 土壤侵蚀; 气候变化

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF0806004)

作者简介: 崔珉铭 (1987-), 研究员; 研究方向: 微量元素地球化学与地球系统模型。Email: cuiminming@mail.gyig.ac.cn