

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铨, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM_{2.5} 传输特征分析 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O₃ 生成敏感性控制策略解析 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 门聪, 李颀, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd²⁺ 吸附机制 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH₄ 产生潜力与产生途径 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 肖怡, 李崢, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析

倪茂飞^{1,2}, 周慧¹, 马永梅², 苏印^{1,3}, 王晓丹^{1,3}, 王志康^{1,3*}

(1. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 3. 贵州民族大学贵州省工程地质灾害防治工程研究中心, 贵阳 550025)

摘要: 为探索喀斯特城市湖库溶解性有机质 (DOM) 成分特征及来源信息, 以我国贵阳市重要喀斯特湖库——红枫湖、百花湖、松柏山水库和阿哈水库为研究对象, 分析了表层水体溶解性有机碳 (DOC)、叶绿素 a (Chla) 和 DOM 光学参数 (a_{254} 、 a_{280} 、 a_{350} 、E2: E3、 $S_{275-295}$ 、FI、 β : α 、BIX、HIX) 的空间差异, 同时利用荧光吸收峰 (B、T、A、M、C、D、N) 和三维荧光平行因子分析 (EEM-PARAFAC) 解释 DOM 各成分丰度及占比状况, 并运用 Spearman 相关分析及主成分分析 (PCA) 揭示 DOM 参数的相关性和主要环境过程。结果表明, 喀斯特城市湖库 ρ (DOC) 和 ρ (Chla) 范围分别为 4.24 ~ 11.9 mg·L⁻¹ 和 0.32 ~ 19.7 μ g·L⁻¹, 松柏山水库腐殖质 (a_{254}) 和芳香类蛋白质 (a_{280}) 较高, 导致相对分子质量 (E2: E3 和 $S_{275-295}$) 高于其它湖库。表层水体 DOM 成分主要包括可见光范围腐殖质和陆源富里酸, 其占比分别为 23.8% ~ 46.9% 和 17.6% ~ 28.4%。湖库荧光参数 FI、 β : α 和 BIX 较高而 HIX 较低, 说明内源新成分对 DOM 具有显著贡献。光学成分与来源参数具有显著的相关关系, 喀斯特城市湖库 DOM 主要包括大分子腐殖质输入、小分子内源输入和碳酸盐耦合光合作用促进新生 DOM 等过程。

关键词: 喀斯特湖库; 溶解性有机质 (DOM); 人为扰动; 水环境; 碳循环

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3552-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110159

Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region

NI Mao-fei^{1,2}, ZHOU Hui¹, MA Yong-mei², SU Yin^{1,3}, WANG Xiao-dan^{1,3}, WANG Zhi-kang^{1,3*}

(1. College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. Guizhou Provincial Engineering Geological Disaster Prevention and Control Engineering Research Center, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore dissolved organic matter (DOM) components and their origins in metropolitan lakes and reservoirs in the karst region, the typical Hongfeng Lake, Baihua Lake, Songbaishan Reservoir, and Aha Reservoir were investigated in Guiyang City. Surface water parameters, including dissolved organic carbon (DOC), chlorophyll a (Chla), and optical parameters (a_{254} , a_{280} , a_{350} , E2: E3, $S_{275-295}$, FI, β : α , BIX, and HIX) were analyzed. Fluorescence peaks (B, T, A, M, C, D, and N) and three-dimensional matrix fluorescence with parallel factor analysis (EEM-PARAFAC) were employed to explain distinct DOM abundances and proportions. Meanwhile, Spearman's correlation coefficients and principal component analysis (PCA) were used to decipher parameter types and primary environmental processes. The results showed that aquatic ρ (DOC) and ρ (Chla) ranged between 4.24-11.9 mg·L⁻¹ and 0.32-19.7 μ g·L⁻¹, respectively. High humic-like (a_{254}) and protein DOM (a_{280}) were observed in the Songbaishan Reservoir, resulting in higher DOM molecular weight when compared to that in other lakes and reservoirs. Surface water DOM mainly contained visible-light humic-like (23.8%-46.9%) and terrestrial fulvic-like components (17.6%-28.4%). High FI, β : α , and BIX but low HIX values in this study suggested that endogenous inputs largely contributed to aquatic DOM. Aquatic DOM component and source characteristics were significantly correlated with each other. Furthermore, inputs of humic-like DOM and microbial metabolism, as well as coupled carbonate dissolution and photosynthesis, drove dynamic DOM behaviors in the karst lakes and reservoirs.

Key words: karst lakes and reservoirs; dissolved organic matter (DOM); human disturbance; aquatic environments; carbon cycling

溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 广泛分布于自然水体, 并在生物地球化学过程中扮演着至关重要的角色^[1]。它作为一项异质混合物, 主要由共轭的芳香类和脂肪类组分所组成, 其中溶解性有机碳 (DOC) 约占其 50%^[2]。自然界 DOM 是物质运输、反应和储存的重要载体, 驱动了众多环境因子的相互作用^[3]。表层水体 DOM 通常由外源 (降雨和径流引发的陆源输入等) 和内源 (藻类繁殖和微生物分解等) 构成^[4]。同时, 人为活动如: 水利修筑、农业过程和城市化进程可能改变自然水体生态环境功能, 尤其是大量营养元素的输入促使藻类生物量急剧增加, 进而导致 DOM 质量和丰度变

化^[5]。因此, 在人类活动频繁的城镇化区域, 自然过程和人为扰动共同影响 DOM 动态。

湖库是内陆水体的重要组成部分, 虽然它仅占内陆面积的 3%, 但贡献了 38% 的水生碳排放量, 因此被视作有机碳迁移、转化的环境“漏斗”^[6]。喀斯特区域具有独特的生态水文特征, 特别是无规律的

收稿日期: 2021-10-20; 修订日期: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42107091, 41867048, 41803022); 贵州省科技计划项目 (黔科合 ZK [2021] 219); 贵州省普通高等学校青年科技人才成长项目 (黔教合 KY 字 [2021] 109)

作者简介: 倪茂飞 (1990 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为喀斯特水环境有机质特征解析, E-mail: nimaofei000@163.com

* 通信作者, E-mail: wangzhikang@gzmu.edu.cn

降雨可能改变水土连质性和径流状况,进而影响 DOM 成分和来源状态^[7]. 有研究表明,碳酸盐溶解与光合作用相互耦合显著控制喀斯特水体碳循环^[8],进一步调控 DOM 的产生和消耗,也有数据表明喀斯特水体岩石风化率与 DOM 丰度呈负相关关系^[9]. 先前学者已对众多湖库 DOM 特征及其时空格局进行研究^[10~12],然而对于生态环境特征显著的喀斯特城市湖库,特别是其 DOM 成分、来源及其调控因素却鲜见报道.

当前自然水体 DOM 的测量方法众多,如傅里叶变换离子回旋共振质谱法(FT-ICR-MS)^[13]、傅里叶红外光谱法(FTIR)^[14]和高效液相色谱法(HPLC)等^[15]. 它们主要针对其官能团和化学键进行定性、半定量或特定成分分析. 其中,紫外-可见光谱和三维荧光光谱法以其分子级快速检测的特点被广泛应用^[16]. 例如,254、280 和 350 nm 波长下吸光系数(a_{254} 、 a_{280} 和 a_{350})分别表示 DOM 芳香类、蛋白质类和木质素类成分的绝对丰度^[17];吸光度之比(E2:E3)和光谱斜率($S_{275-295}$)与 DOM 相对分子大小呈反比^[18];荧光峰(B、T、A、M、C、D 和 N)揭示不同 DOM 组分的丰度^[19];荧光参数(FI、 β : α 、BIX 和 HIX)解释了 DOM 的来源信息^[20]. 特别地,三维荧光矩阵平行因子分析(EEM-PARAFAC)捕获批量数据的共性荧光峰,在 DOM 荧光矩阵后处理领域具有卓越贡献.

本研究以我国典型喀斯特城市湖库作为对象,利用紫外-可见光谱、荧光光谱和 EEM-PARAFAC 探索自然和人为作用下湖库 DOM 成分、相对分子质量大小和来源的空间特征,同时评价光学参数的相关及主成分关系,通过揭示喀斯特城市湖库 DOM 空间格局与碳循环过程的响应潜力,以期为我国碳中和背景下生态环境监测提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

基于前期对景观生态和人为扰动状况的考察工作,本研究选取位于贵州省贵阳市典型喀斯特城市湖库(红枫湖、百花湖、松柏山水库和阿哈水库)作为野外调查及采样监测对象(图 1).

其中,红枫湖(25°57'~26°37'N, 105°58'~106°28'E)流域面积1596 km²,蓄水面积57.2 km²,为乌江猫跳河的一级水库;百花湖(26°35'~26°42'N, 106°27'~106°34'E)流域面积1895 km²,蓄水面积14.5 km²,为乌江猫跳河的二级水库^[21];阿哈水库(26°21'~26°24'N, 106°33'~106°34'E)流域面积190 km²,库容约5.42 × 10⁷ m³. 松柏山水库(26°31'~26°33'N, 106°37'~106°59'E)平均库容4.46 × 10⁷ m³,蓄水水位1179 m. 研究区域位于亚热带季风气候区,海拔高度范围为1128~1338 m,年平均温度在-7.8~37.5℃,年平均降雨为1140

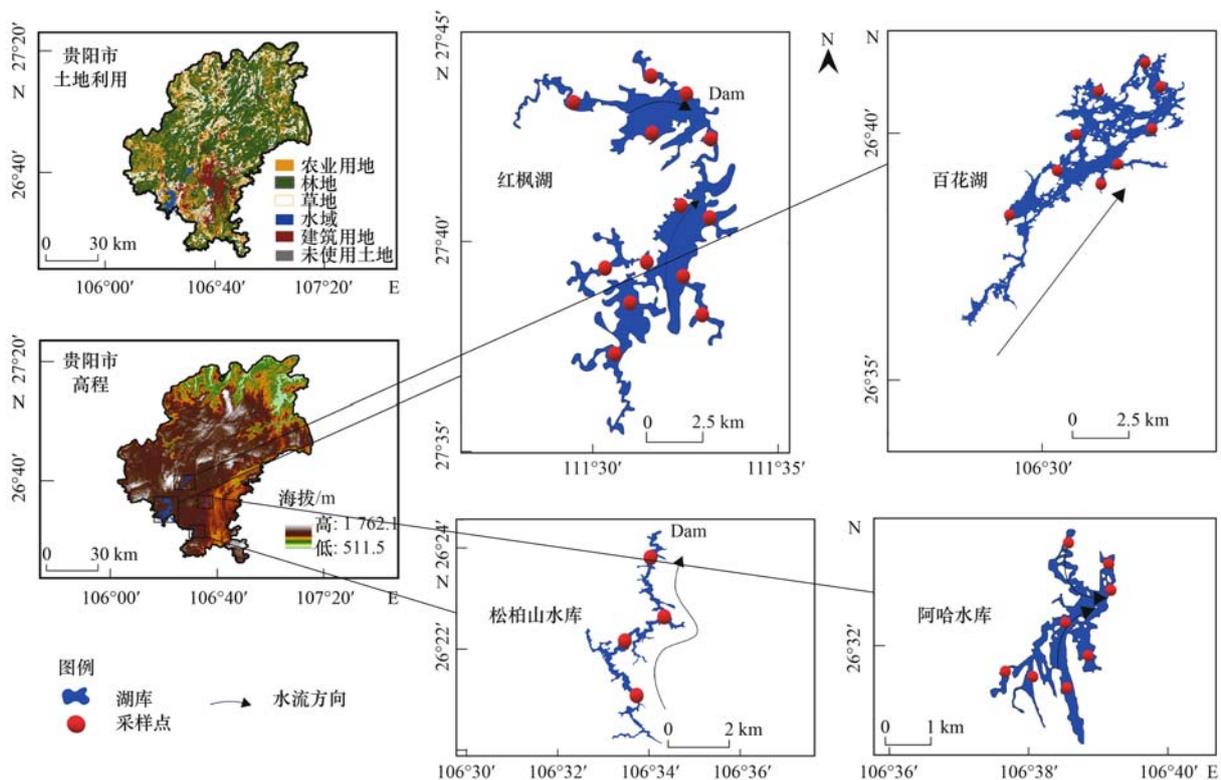


图 1 研究区域高程、土地利用和采样点分布示意

Fig. 1 Metropolitan DEM, land use, and distribution of sampling sites in the karst lakes and reservoirs

~1 200 mm. 区域岩性由碳酸盐岩(白云岩和石灰岩)主导. 近年,由于典型的区域重要性和人为源输入,红枫湖、百花湖和阿哈水库被纳入贵阳市“两湖一库”综合治理工程.

1.2 样品采集与分析

样品采集:于2021年5月,根据喀斯特城市湖库空间尺度对红枫湖(13个样点)、百花湖(9个样点)、松柏山水库(4个样点)和阿哈水库(8个样点)开展水样的采集工作,样点设置以求最大程度覆盖湖库空间信息. 湖库边缘样品利用采样器直接获取,湖库中心样品借助采样艇泊入采取. 将表层水样(10~20 cm)置于500 mL高密度聚乙烯瓶中密封保存.

样品预处理:水样过滤采用玻璃纤维膜(GF/F 47 mm, 0.7 μm , Whatman),其中用于DOC测定的样品利用2 mol·L⁻¹盐酸酸化处理. 后续将预处理完成的样品置于4℃以下冰柜冷藏保存,并在一周内完成DOC测定、紫外-可见光谱和荧光光谱的扫描工作.

实验室分析:冷藏样品取出后避光放置,其中DOC采用varioTOC cube select总有机碳分析仪(Elementar,德国)测定. 叶绿素a(Chla)利用乙醇提取-分光光度法测定^[22]. 紫外-可见光谱采用UV-1500PC紫外-可见分光光度计(Macy,上海)分析,扫描范围为200~700 nm,单位间隔1 nm. 荧光光谱采用F-380荧光分光光度计(天津港东科技发展有限公司,天津)分析,激发波长(E_x)扫描范围为200~450 nm(单位间隔5 nm),发射波长(E_m)扫描范围为250~600 nm(单位间隔1 nm).

1.3 光学分析

紫外光学参数:选取 a_{254} 、 a_{280} 、 a_{350} 、E2:E3和 $S_{275-295}$ 用于样品DOM成分和分子大小的判别^[23,24],具体计算及描述如下:

$$a_\lambda = 2.303A_\lambda/l \quad (1)$$

$$\text{E2:E3} = A_{250}/A_{365} \quad (2)$$

$$a_{295} = a_{275}e^{-S(295-275)} \quad (3)$$

式中, a_λ 为波长为 λ 时的吸光系数(m^{-1}), λ 取值254、280和350 nm分别对应腐殖质、蛋白质和木质素DOM的绝对丰度; A_λ 为波长为 λ 时的吸光度(无量纲); l 为吸光路径长度,即比色皿宽度(m);E2:E3为吸光度之比(无量纲),它与DOM分子质量呈反比; A_{250} 和 A_{365} 分别为波长为250 nm和365 nm处的吸光度; S 为光谱斜率,即 $S_{275-295}$ (nm^{-1}),它与DOM相对分子质量呈反比.

荧光参数:选取FI、 β : α 、BIX和HIX用于样品DOM来源的判别^[25]. 其中,FI为荧光指数,它是 E_x 为370 nm时, E_m 在450 nm和500 nm处的荧光强

度比值,FI<1.4反映水体陆生源输入显著,FI>1.9反映水体内源输入主导; β : α 为新鲜度指数,其为 E_x 在310 nm处, E_m 在380 nm和420~435 nm处的荧光强度比值,该值反映新生DOM的相对比例;BIX为自生源指数,它是 E_x 为310 nm时, E_m 在380 nm和430 nm处的荧光强度比值,BIX<0.7为外源输入,BIX>1为自生源主导;HIX为腐殖化指数,它是 E_x 为254 nm时, E_m 在435~480 nm和300~345 nm处的荧光强度比值,HIX<4表示腐殖化程度低,水生微生物活动显著.

荧光吸收峰:不同基团对应特殊的荧光吸收峰(B、T、A、M、C、D和N)^[26],其中B($E_x/E_m = 275 \text{ nm}/305 \text{ nm}$)为络氨酸,T($E_x/E_m = 275 \text{ nm}/340 \text{ nm}$)为色氨酸,A($E_x/E_m = 260 \text{ nm}/400 \sim 460 \text{ nm}$)为紫外区域腐殖质,M($E_x/E_m = 290 \sim 310 \text{ nm}/370 \sim 410 \text{ nm}$)为微生物来源的腐殖质,C($E_x/E_m = 320 \sim 360 \text{ nm}/420 \sim 460 \text{ nm}$)为可见光区域腐殖质,D($E_x/E_m = 390 \text{ nm}/509 \text{ nm}$)为陆源富里酸,N($E_x/E_m = 280 \text{ nm}/370 \text{ nm}$)为生物源DOM.

EEM-PARAFAC分析:PARAFAC作为一项荧光数据的后处理技术,用于分离EEM中的共性成分,它揭示了荧光光谱的主要信息,包括:①EEMs散射波的切除;②非负性条件约束;③样品贡献荷载评估;④离群值剔除;⑤拆半分析确定平行因子数量. 输出值为总体数据的主要荧光成分,及各成分对应的最大荧光强度(F_{max}),据此判断体系的DOM组分信息.

1.4 统计方法

本研究利用Kolmogorov-Smirnov test检验数据的正态分布性,Levene's test检验其方差齐次性,并在统计分析中将非正态分布数据进行自然对数转换. 湖库DOC、Chla、紫外光学参数(a_{254} 、 a_{280} 、 a_{350} 、E2:E3、 $S_{275-295}$)和荧光吸收峰(B、T、A、M、C、D、N)的显著性差异分析利用具有Turkey HSD test的单因素方差分析(ANOVA)检验(P 在0.001和0.05水平上显著),数据为“平均值 \pm 标准差”形式. Spearman相关性分析(P 在0.01和0.05水平上显著)和主成分分析(PCA)分别用于各参数相关关系验证和湖库DOM主要过程判别. EEM-PARAFAC基于DOMFluorv1.71工具箱在Matlab 2018a上运行. 各统计分析基于SPSS 19.0和OriginLab OriginPro 2020b,所有图形绘制利用SigmaPlot 14.0和OriginLab OriginPro 2020b完成.

2 结果与分析

2.1 湖库DOC及紫外光学参数

典型喀斯特城市湖库DOC、Chla和紫外光学

参数 (a_{254} 、 a_{280} 、 a_{350} 、E2: E3、 $S_{275-295}$) 如表 1 所示, 不同湖库众多参数具有显著的空间差异 ($P < 0.05$).

百花湖 $\rho(\text{DOC})$ 范围在 $5.50 \sim 11.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $(9.01 \pm 2.15) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这显著高于红枫湖 [$(5.36 \pm 1.11) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$]、松柏山水库 [$(6.05 \pm 2.95) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] 和阿哈水库 [$(6.07 \pm 0.49) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] ($P < 0.001$). 不同湖库 $\rho(\text{Chla})$ 差异较大 ($0.32 \sim 19.7 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 其中阿哈水库 $\rho(\text{Chla})$ 最大, 平均值为 $(12.0 \pm 4.86) \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 次之为红枫湖 [$(2.49 \pm 3.54) \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$] 和百花湖 [$(3.00 \pm 1.49) \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$], 松柏山水库最小, 为 $(0.92 \pm 0.36) \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P < 0.001$). 松柏山水库 a_{254} 值为 $(6.08 \pm 1.37) \text{ m}^{-1}$, 低于红枫湖 [$(11.9 \pm 3.53) \text{ m}^{-1}$]、百花湖 [$(13.6 \pm$

$1.66) \text{ m}^{-1}$] 和阿哈水库 [$(11.6 \pm 1.75) \text{ m}^{-1}$] ($P < 0.001$). 类似地, a_{280} 值和 a_{254} 具有相同的变化趋势, 即松柏山水库 [$(5.40 \pm 1.45) \text{ m}^{-1}$] 低于红枫湖 [$(11.9 \pm 3.53) \text{ m}^{-1}$]、百花湖 [$(10.8 \pm 1.66) \text{ m}^{-1}$] 和阿哈水库 [$(8.87 \pm 1.35) \text{ m}^{-1}$] ($P < 0.001$). 然而, a_{350} 值不具有显著的空间差异 ($P > 0.05$), 各湖库中位数在 $2.23 \sim 2.80 \text{ m}^{-1}$ 范围内. 松柏山水库 E2: E3 (3.83 ± 1.26) 较低 ($P < 0.001$), 而其它湖库之间不具有显著的差异 (中位数: $5.21 \sim 5.33$, $P > 0.05$). 参数 $S_{275-295}$ 的灵敏度高于 E2: E3, 其值表现为: 松柏山水库 [$(0.0059 \pm 0.0016) \text{ nm}^{-1}$] < 百花湖 [$(0.014 \pm 0.0010) \text{ nm}^{-1}$] < 红枫湖 [$(0.018 \pm 0.0028) \text{ nm}^{-1}$] 和阿哈水库 [$(0.018 \pm 0.0023) \text{ nm}^{-1}$] ($P < 0.05$).

表 1 喀斯特城市湖库 DOC, Chla 及 DOM 紫外-可见光学参数空间变化特征

Table 1 Spatial variations in DOC, Chla, and DOM UV-Vis parameters in the karst lakes and reservoirs

位置	项目	最小值	最大值	中位值	平均值	标准偏差
红枫湖	$\rho(\text{DOC})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.24	7.96	5.07	5.36	1.11
	$\rho(\text{Chla})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.32	12.3	0.84	2.49	3.54
	a_{254}/m^{-1}	7.78	19.9	11.1	11.9	3.53
	a_{280}/m^{-1}	5.86	15.3	8.51	9.11	2.89
	a_{350}/m^{-1}	1.72	5.02	2.72	3.01	1.13
	E2: E3	3.10	5.99	5.21	5.06	0.74
	$S_{275-295}/\text{nm}^{-1}$	0.011	0.021	0.018	0.018	0.0028
百花湖	$\rho(\text{DOC})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	5.50	11.9	9.74	9.01	2.15
	$\rho(\text{Chla})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.99	6.75	2.44	3.00	1.49
	a_{254}/m^{-1}	11.6	16.3	13.0	13.6	1.66
	a_{280}/m^{-1}	8.84	13.5	10.0	10.8	1.66
	a_{350}/m^{-1}	2.20	4.11	2.80	2.99	0.66
	E2: E3	4.61	6.31	5.33	5.52	0.626
	$S_{275-295}/\text{nm}^{-1}$	0.012	0.015	0.013	0.014	0.0010
松柏山水库	$\rho(\text{DOC})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.49	10.5	4.61	6.05	2.95
	$\rho(\text{Chla})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.51	1.29	0.93	0.92	0.36
	a_{254}/m^{-1}	4.43	7.60	6.14	6.08	1.37
	a_{280}/m^{-1}	3.61	6.78	5.60	5.40	1.45
	a_{350}/m^{-1}	0.98	2.95	2.23	2.10	0.84
	E2: E3	2.82	5.66	3.42	3.83	1.26
	$S_{275-295}/\text{nm}^{-1}$	0.0044	0.008	0.0055	0.0059	0.0016
阿哈水库	$\rho(\text{DOC})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	5.48	6.90	5.95	6.07	0.49
	$\rho(\text{Chla})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	6.30	19.7	11.1	12.0	4.86
	a_{254}/m^{-1}	8.63	14.3	11.4	11.6	1.75
	a_{280}/m^{-1}	6.76	11.1	8.67	8.87	1.35
	a_{350}/m^{-1}	1.96	4.66	2.79	2.94	0.84
	E2: E3	3.57	5.75	5.22	4.98	0.71
	$S_{275-295}/\text{nm}^{-1}$	0.015	0.019	0.018	0.018	0.0013

2.2 湖库 DOM 的 EEM-PARAFAC 分析

利用 EEM-PARAFAC 解析了 4 个城市湖库的 DOM, 共发现了 2 项主要荧光成分, 其对应 E_x 、 E_m 波长及其荧光强度如图 2 所示.

湖库表层水体成分 1 (C1) 的 E_x 位于 350 nm 处, E_m 位于 430 nm 处, 该物质为典型的可见光范围腐殖质, 同时也是难以生物降解的大分子成

分^[27]. C1 的 F_{max} 平均值为 $(0.0096 \pm 0.0029) \text{ R. U.}$, 在 $0.0029 \sim 0.015 \text{ R. U.}$ 范围内. 成分 2 (C2) 的 E_x 位于 385 nm 处, E_m 位于 470 nm 处, 为长波激发类富里酸, 出峰范围接近陆源 DOM 成分^[28]. 它的 F_{max} 的平均值为 $(0.0084 \pm 0.0031) \text{ R. U.}$, 在 $0.0015 \sim 0.015 \text{ R. U.}$ 范围内. 总体来说, 喀斯特城市湖库 DOM 主要由难降解的可见光范围腐殖质和

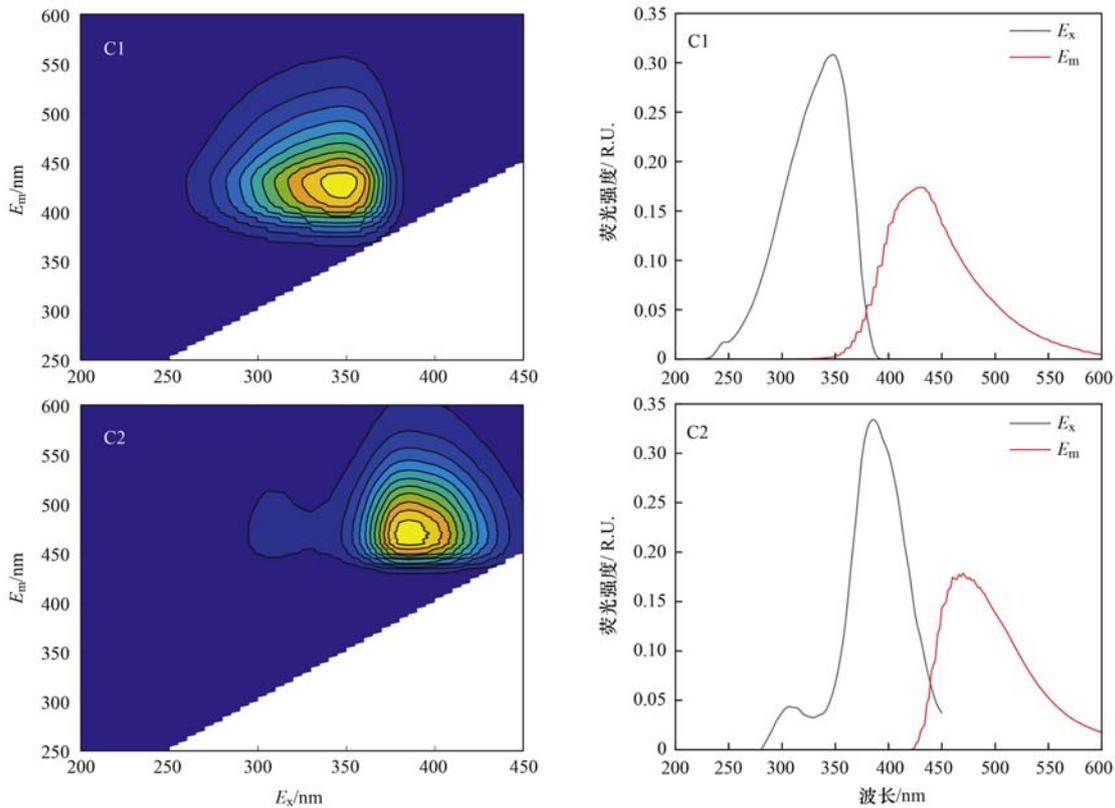


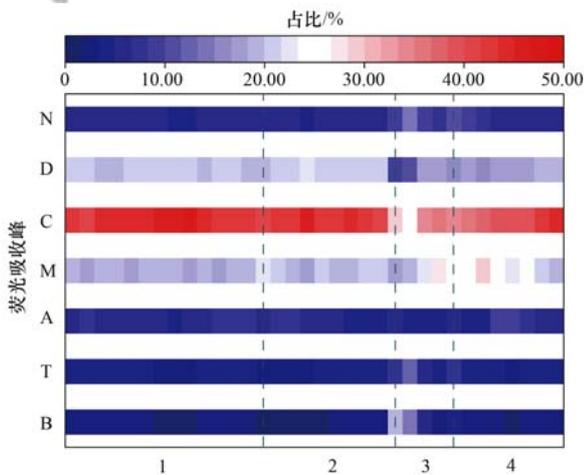
图2 喀斯特城市湖库 DOM 的 EEM-PARAFAC 分离组分

Fig. 2 Spectral characteristics of two components identified by EEM-PARAFAC modeling in the karst lakes and reservoirs

陆源富里酸成分所构成。

2.3 湖库 DOM 荧光吸收峰

为进一步探索湖库 DOM 成分的全面信息,选取 EEM 固定荧光吸收峰(B、T、A、M、C、D 和 N)进行研究,其占比关系如图 3 所示。



1. 红枫湖, 2. 百花湖, 3. 松柏山水库, 4. 阿哈水库

图3 喀斯特城市湖库 DOM 荧光吸收峰(B、T、A、M、C、D 和 N) 占比情况

Fig. 3 Proportional variations in the selected fluorescence peaks (peak B, T, A, M, C, D, and N) in the karst lakes and reservoirs

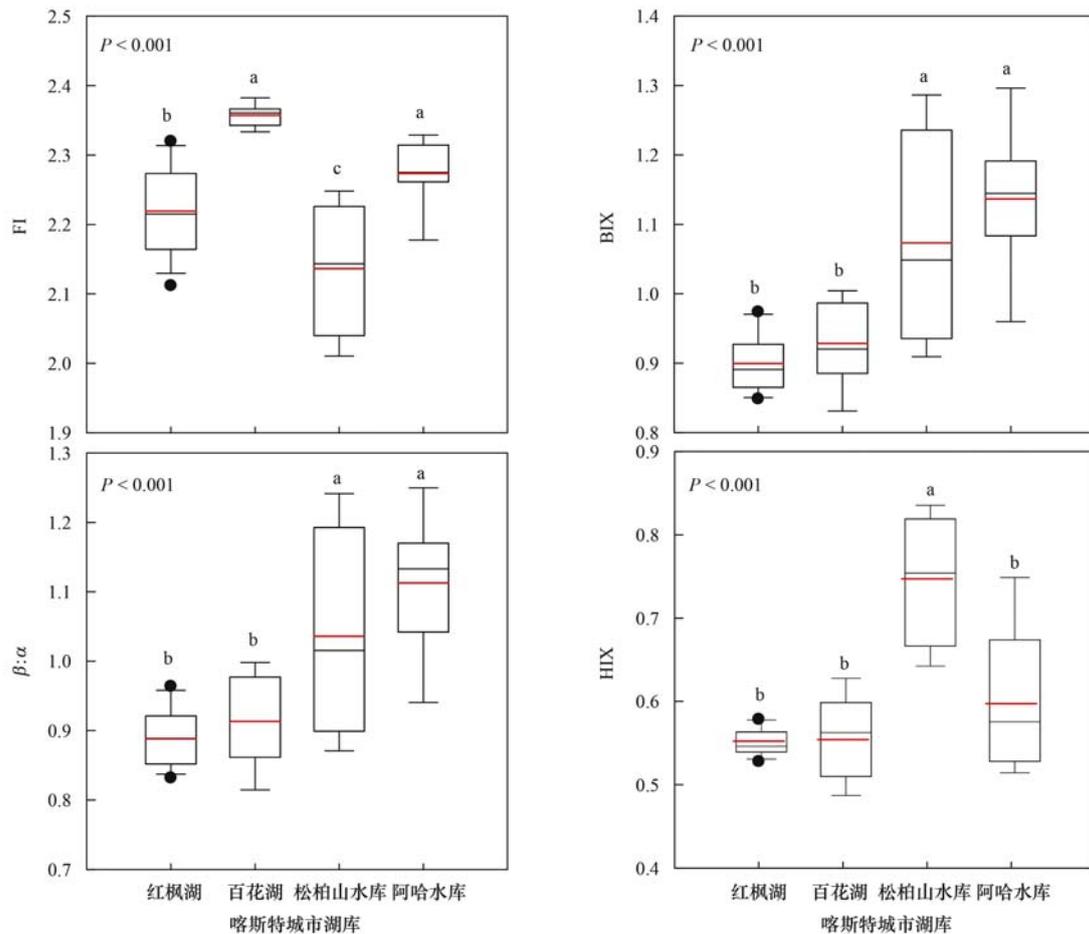
自然水体 C 峰在各湖库中占比(23.8% ~ 46.9%)显著高于其它荧光吸收峰($P < 0.001$)。其中,松柏山水库 C 峰占比最低,为(30.8 ± 5.55)%,

其次为阿哈水库[(38.9 ± 3.40)%]、红枫湖[(43.9 ± 1.76)%]和百花湖[(42.6 ± 1.18)%]最高($P < 0.001$)。另一方面,M 峰和 D 峰占比较大,总体分别在 17.6% ~ 28.4% 和 9.29% ~ 22.0%,这与 EEM-PARAFAC 的结果一致。其中,M 峰在阿哈水库占比最高[(23.7 ± 2.84)%],在红枫湖占比最低[(18.4 ± 0.42)%] ($P < 0.001$),在百花湖和松柏山水库占比分别为(20.0 ± 1.28)% 和(21.7 ± 3.71)%。另一方面,D 峰在松柏山水库占比最低,为(13.9 ± 4.71)%,其次为在阿哈水库[(17.5 ± 1.28)%],在红枫湖和百花湖占比较高,分别为(20.7 ± 0.97)% 和(20.3 ± 0.52)% ($P < 0.001$)。由 C 峰与 D 峰可见,喀斯特湖泊与水库 DOM 陆源输入比例存在差异。其余如 B、T、A 和 N 峰占比较低,其平均值分别为(2.96 ± 3.66)%、(4.26 ± 1.87)%、(6.04 ± 1.39)% 和(6.45 ± 2.00)%。注意到松柏山水库的 B 峰[(10.4 ± 7.88)%]、T 峰[(7.91 ± 3.54)%]和 N 峰[(10.3 ± 2.87)%]显著高于其它湖库($P < 0.001$),说明其生物过程相对显著。

2.4 湖库荧光参数

喀斯特城市湖库 DOM 荧光参数(FI、 β : α 、BIX 和 HIX)如图 4 所示,各湖库之间具有显著的空间差异($P < 0.001$)。

表层水体 FI 在 2.01 ~ 2.38 范围内,其中百花



黑线、红线、箱体下沿、箱体上沿、上误差棒、下误差棒和散点分别表示中位数、平均值、25%分位、75%分位、5%分位、95%分位和离群值;不同小写字母表示不同湖库之间具有显著的统计性差异

图4 喀斯特城市湖库 DOM 荧光参数空间格局特征

Fig. 4 Spatial patterns of DOM fluorescent parameters in the karst lakes and reservoirs

湖最高,为 2.36 ± 0.015 ,次之为阿哈水库 (2.27 ± 0.047) 和红枫湖 (2.22 ± 0.064),松柏山水库最低,为 2.14 ± 0.098 ($P < 0.001$)。湖库 $\beta:\alpha$ 和 BIX 表现出一致的变化趋势,且分别在 $0.81 \sim 1.25$ 和 $0.83 \sim 1.30$ 范围内,其值均为松柏山水库 ($\beta:\alpha: 1.04 \pm 0.16$; BIX: 1.07 ± 0.16) 和阿哈水库 ($\beta:\alpha: 1.11 \pm 0.095$; BIX: 1.13 ± 0.097) 高于红枫湖 ($\beta:\alpha: 0.89 \pm 0.042$; BIX: 0.90 ± 0.040) 和百花湖 ($\beta:\alpha: 0.91 \pm 0.064$; BIX: 0.93 ± 0.059) ($P < 0.001$)。另一方面,松柏山水库 HIX 值 (0.75 ± 0.080) 显著高于红枫湖 (0.55 ± 0.016)、百花湖 (0.55 ± 0.049) 和阿哈水库 (0.60 ± 0.084) ($P < 0.001$)。因此,可见光范围腐殖质和陆源富里酸为喀斯特城市湖库共同的高占比成分,但水体 DOM 同时受新生生物源驱动,显示了强烈的区域特征。

3 讨论

3.1 喀斯特城市湖库 DOM 成分特征

自然湖库 DOM 成分复杂,它们同时受生物地

球化学和人为过程的影响。本研究湖泊为人为活动频繁的城镇区域,而水库自然状态相对良好(饮用水源地)。受人为因素调控,百花湖 DOC 浓度显著高于阿哈水库和松柏山水库(表 1),这与其它喀斯特湖库结果相似^[29]。松柏山水库芳香类和蛋白质类 DOM 丰度较低而相对分子质量较高,说明水体 DOM 分子可能具有其它高分子成分^[30]。木质素不具有显著的空间差异 ($P > 0.05$),因此各喀斯特城市湖库具有相似的陆生源。

本研究湖库 PARAFAC 和荧光吸收峰一致,表现为可见光范围内腐殖质和陆源富里酸成分主导(图 2),并且它们在水库中的比例显著高于湖泊(图 3),说明其输入主要受自然条件控制^[31]。水体微生物源腐殖质成分占比明显但样品丰度差异大,导致其未被 PARAFAC 识别为共性峰。该成分指示 DOM 生物新陈代谢强度,因此高占比的阿哈水库和松柏山水库说明:喀斯特自然水体更有利于 DOM 的生物生产和利用^[32]。然而,湖库小分子氨基酸成分占比较少,这可能由于封闭水体 DOM 经历长时间水

力停留,大量可生物利用小分子消耗,加之喀斯特区域水土流失严重、土壤肥力较低,导致生物源 DOM 成分被掩盖而陆源大分子突出^[33~35].

3.2 喀斯特城市湖库 DOM 来源解析

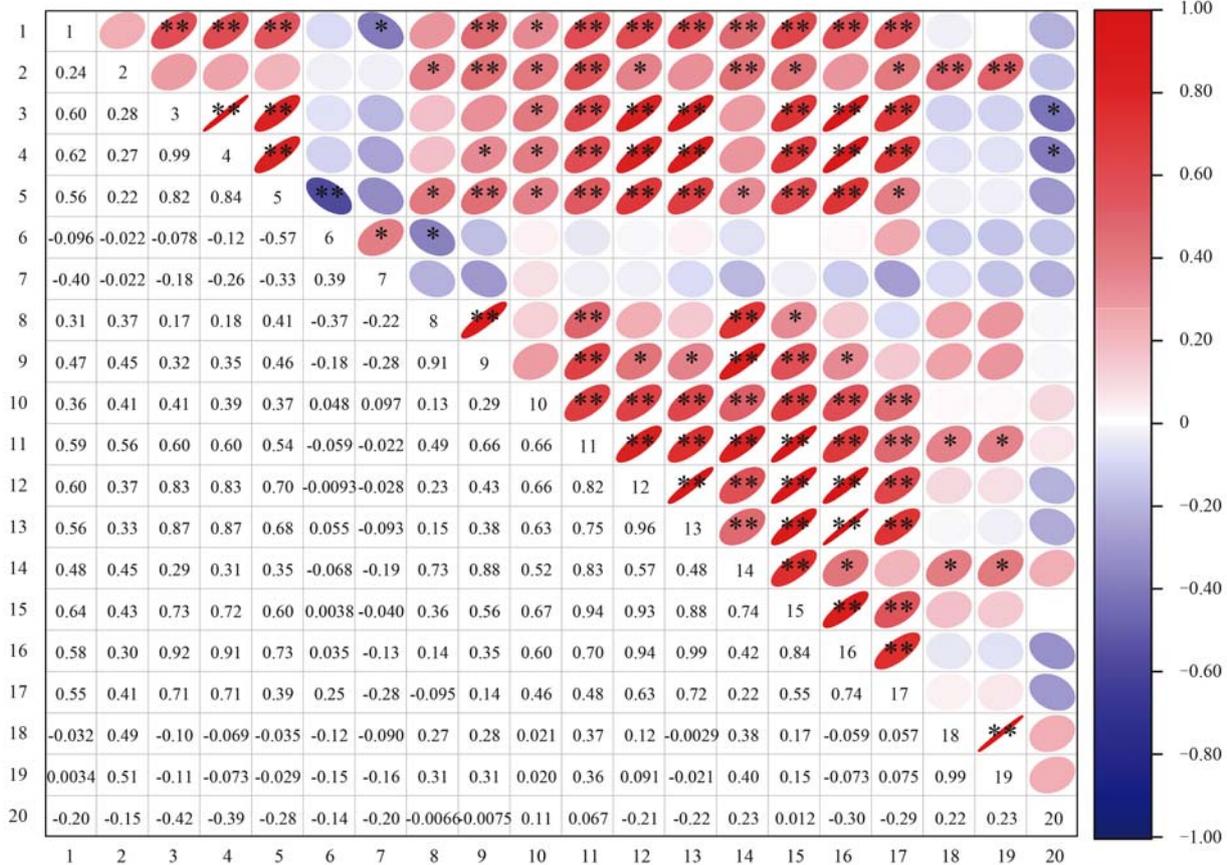
自然水体 DOM 来源主要包括外源(如:陆生源和人为源)和内源(如:微生物新陈代谢和胞外分泌物),其中原位微生物活动和陆源土壤输入被认为是其主要贡献途径^[36]. 本研究湖库 DOM 内源讯号强烈,这与已有报道的众多亚热带湖库相似^[37~39]. 水库的 β : α 和 BIX 值显著高于湖泊的(图 4),进一步证明自然条件促进生物源 DOM 的生产^[40]. 然而,百花湖 FI 显著高于松柏山水库,显示该湖泊内源输入贡献率较高. 这看似冲突的结果说明了人为输入对水体 DOM 生物过程具有双向影响,即人为源主要包含蛋白质和脂肪酸类 DOM,这有利于湖库微生物降解利用而增大内源比例^[41];另一方面,人为源输入破坏了原有的 DOM 供给平衡,从而抑制微生物新生 DOM 比例^[42]. 与普遍认知相同,人为过程被识别为爆发性输入,导致环境出现急剧变化^[43]. 因此,湖库微生物需要长时间适应环境变

化,从而导致自身 DOM 新陈代谢过程发生改变.

人为源改变自然水体 DOM 成分,并对其来源讯号产生影响^[44]. 有研究表明,农业用地改变水土连质性,促使大量的陆生土壤进入水体而外源 DOM 增多^[45],这与本研究中湖泊陆源富里酸高于水库的结果一致(图 3). 同时,湖库周围频繁的农业过程也进一步导致水体营养结构和有机物组分发生改变,使陆源和生物源腐殖质富集^[46]. 然而,木质素作为另一项重要的陆生源讯号未有显著的空间差异($P > 0.05$),这源于湖库周围环境相似的林地和草地分布(图 1). 另一方面,生活废水包含大量可生物利用有机物质,它的输入改变湖泊微生物和藻类新陈代谢状态,进而 DOM 降解量增大而生产量减少,即内源增多而新生源较少. 这支撑了先前对市政废水影响自然水体 DOM 的报道^[47],同时也解释了自然状态较好的松柏山水库 DOM 内源输入低而腐殖化率相对较高.

3.3 喀斯特城市湖库 DOM 相关性及其成分分析

湖库众多 DOM 参数具有显著相关性(图 5),其中 DOC 与众多 DOM 成分正相关($P < 0.05$),这与



1. DOC, 2. Chla, 3. a_{254} , 4. a_{280} , 5. a_{350} , 6. E2: E3, 7. $S_{275-295}$, 9. B 峰, 9. T 峰, 10. A 峰, 11. M 峰, 12. C 峰, 13. D 峰, 14. N 峰, 15. C1, 16. C2, 17. FI, 18. β : α , 19. BIX, 20. HIX; * 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$; 椭圆向右倾斜(红色)表示正相关关系,椭圆向左倾斜(蓝色)表示负相关关系;相关系数与椭圆离心率呈正比,与椭圆面积呈反比

图 5 喀斯特城市湖库 DOM 参数的 Spearman 相关系数

Fig. 5 Spearman's correlation coefficients between DOM-related parameters in the karst lakes and reservoirs

已有的研究结果相似^[48],说明 DOM 成分极大地贡献了 DOC 组成. 水体 Chla 揭示内源 DOM 的生产潜力,它与除陆源富里酸外的其它荧光峰显著正相关 ($P < 0.05$),显示大量腐殖质和氨基酸类成分与生物过程有关,也说明本研究 DOM 成分与来源具有一致性. 吸光系数 (a_{254} 、 a_{280} 和 a_{350}) 均与 DOM 芳香度有关,因此相互联系 ($P < 0.01$). 水体 DOM 通过光化学和生物条件相互转换^[49],因此各荧光峰具有普遍关联 ($P < 0.05$). 内源参数 FI 与众多腐殖质类 DOM 相关 ($P < 0.05$),说明原位输入仍是本研究腐殖质的重要来源. 水体 BIX 和 $\beta:\alpha$ 表征新生生物源 DOM,它们因此与 Chla 具有相关性 ($P < 0.01$).

喀斯特城市湖库参数具有 3 项主成分 (PCx),它们反映了水体 DOM 经历的主要过程. 其中 PC1 由 DOC、 a_{254} 、 a_{280} 、 a_{350} 、A 峰、M 峰、C 峰、D 峰、C1、C2 和 FI 组成,并解释了 41.4% 的变量信息 (图 6),该主成分为典型的大分子腐殖质输入^[50]. PC2 由 E2:E3、 $S_{275-295}$ 、B 峰、T 峰、N 峰和 HIX 构成,并解释了 20.2% 的变量信息,它表征了生物内源小分子 DOM 输入^[51]. PC3 解释了 13.0% 的变量信息,并由 M 峰、BIX、 $\beta:\alpha$ 和 Chla 所构成,该主成分源于喀斯特水体碳酸盐与藻类光合作用耦合机制,因此促使水体新生 DOM 丰度增加. 同时,PC2 和 PC3 解释了本研究 DOM 陆源大分子和生物源讯号共存的现象:大量新生 DOM 具有强生物可用性,该组分处于有机相 (源于 PC3 产生) 和无机相 (源于 PC2 矿

化) 的快速循环中. 因此可探测 DOM 成分显示陆源,但其中生物过程显著.

总的来说,喀斯特区域除陆源输入和微生物新陈代谢调控水体 DOM 以外,区域环境地质条件也强烈影响 DOM 动态变化. 后续研究可进一步探索水体溶解性无机碳、藻类和 DOM 的相互作用关系.

4 结论

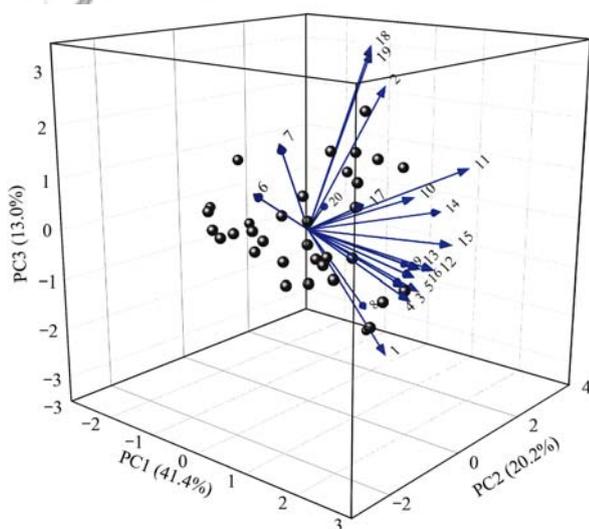
(1) 典型喀斯特城市湖库 DOM 主要包括 2 项大分子成分,即可见光范围腐殖质和陆源富里酸,它们分别占 DOM 总量的 23.8% ~ 46.9% 和 9.29% ~ 22.0%.

(2) 表层水体 DOM 荧光参数 FI、 $\beta:\alpha$ 和 BIX 分别在 2.01 ~ 2.38、0.81 ~ 1.25 和 0.83 ~ 1.30 范围内,且 HIX 小于 4,这显示了强烈的新生内源讯号,同时说明 DOM 腐殖化程度较低.

(3) 湖库 DOM 成分、来源及分子大小相关参数具有显著的相关关系,大分子腐殖质输入、生物内源小分子输入和区域碳酸盐耦合光合作用为典型喀斯特湖库 DOM 的主要过程.

参考文献:

- [1] 吕伟伟,姚昕,张保华. 太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3601-3613.
- [2] Lü W W, Yao X, Zhang B H. Fluorescence characteristics and environmental significance of organic matter in the northern part of Lake Taihu in spring and winter[J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3601-3613.
- [3] Zhang Y L, Yin Y, Liu X H, et al. Spatial-seasonal dynamics of chromophoric dissolved organic matter in Lake Taihu, a large eutrophic, shallow lake in China[J]. Organic Geochemistry, 2011, 42(5): 510-519.
- [4] 袁冬海,王家元,王昊天. 径流雨水中溶解性有机质特征演化及其对典型污染物迁移和生物有效性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(22): 8404-8415.
- [5] Yuan D H, Wang J Y, Wang H T. Study of characteristics of DOM in urban runoff in Beijing and the mechanism with typical heavy metal[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): 8404-8415.
- [6] Derrien M, Yang L Y, Hur J. Lipid biomarkers and spectroscopic indices for identifying organic matter sources in aquatic environments: a review[J]. Water Research, 2017, 112: 58-71.
- [7] Du Y X, Lu Y H, Roebuck J A, et al. Direct versus indirect effects of human activities on dissolved organic matter in highly impacted lakes[J]. Science of the Total Environment, 2021, 752, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141839.
- [8] Li S Y, Bush R T, Ward N J, et al. Air-water CO₂ outgassing in the Lower Lakes (Alexandrina and Albert, Australia) following a millennium drought[J]. Science of the Total Environment, 2016, 542: 453-468.
- [9] Kellerman A M, Guillemette F, Podgorski D C, et al. Unifying concepts linking dissolved organic matter composition to persistence in aquatic ecosystems[J]. Environmental Science &



1. DOC, 2. Chla, 3. a_{254} , 4. a_{280} , 5. a_{350} , 6. E2:E3,
7. $S_{275-295}$, 9. B 峰, 9. T 峰, 10. A 峰, 11. M 峰, 12. C 峰,
13. D 峰, 14. N 峰, 15. C1, 16. C2, 17. FI, 18. $\beta:\alpha$, 19. BIX,
20. HIX

图 6 喀斯特城市湖库 DOM 相关参数主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of DOM-related parameters in the karst lakes and reservoirs

- Technology, 2018, **52**(5): 2538-2548.
- [8] Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms [J]. Earth-Science Reviews, 2010, **99**(3-4): 162-172.
- [9] Lü W W, Yao X, Su C T, *et al.* Characteristics and influencing factors of hydrochemistry and dissolved organic matter in typical karst water system [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(10): 11174-11183.
- [10] Kida M, Kojima T, Tanabe Y, *et al.* Origin, distributions, and environmental significance of ubiquitous humic-like fluorophores in Antarctic lakes and streams [J]. Water Research, 2019, **163**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114901.
- [11] Kothawala D N, Stedmon C A, Müller R A, *et al.* Controls of dissolved organic matter quality: evidence from a large-scale boreal lake survey [J]. Global Change Biology, 2014, **20**(4): 1101-1114.
- [12] Liu D, Du Y X, Yu S J, *et al.* Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River [J]. Water Research, 2020, **168**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115132.
- [13] 聂云汉, 陈浩, 李磊, 等. 城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 [J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2272-2280.
Nie Y H, Chen H, Li L, *et al.* Molecular chemo-diversity of the dissolved organic matter occurring in urban stormwater runoff [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2272-2280.
- [14] 王志康, 韩月, 苟攀, 等. 阿哈水库 DOM 的分离及其对消毒副产物的贡献 [J]. 环境科学研究, 2018, **31**(6): 1088-1095.
Wang Z K, Han Y, Gou P, *et al.* The fraction of DOM and their contribution to the disinfection by-products formation: a case study in Aha reservoir [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(6): 1088-1095.
- [15] 何欣, 赵红霞, 刘慧, 等. 含盐水体中酪氨酸的光致溴代反应研究 [J]. 环境科学学报, 2018, **38**(7): 2683-2689.
He X, Zhao H X, Liu H, *et al.* The photocatalytic bromination of tyrosine in saline water [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(7): 2683-2689.
- [16] Ni M F, Li S Y, Santos I, *et al.* Linking riverine partial pressure of carbon dioxide to dissolved organic matter optical properties in a Dry-hot Valley Region [J]. Science of the Total Environment, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135353.
- [17] Ni M F, Jiang S H, Li S Y. Spectroscopic indices trace spatiotemporal variability of dissolved organic matter in a river system with Karst characteristic [J]. Journal of Hydrology, 2020, **590**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125570.
- [18] Ma Y M, Li S Y. Spatial and temporal comparisons of dissolved organic matter in river systems of the Three Gorges Reservoir region using fluorescence and UV-Visible spectroscopy [J]. Environmental Research, 2020, **189**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109925.
- [19] Knapik H G, Fernandes C V S, De Azevedo J C R, *et al.* Biodegradability of anthropogenic organic matter in polluted rivers using fluorescence, UV, and BDOC measurements [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(3), doi: 10.1007/s10661-015-4266-3.
- [20] 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 等. 岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 [J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2651-2660.
Liu Y, He Q F, Liu N K, *et al.* Distinguishing the compositions and sources of the chromophoric dissolved organic matter in a typical karst river during the dry season: a case study in Bitan River, Jinfo Mountain [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2651-2660.
- [21] 王雨春, 万国江, 尹澄清, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征 [J]. 湖泊科学, 2002, **14**(4): 301-309.
Wang Y C, Wan G J, Yin C Q, *et al.* Distribution of total, exchangeable and fixed nitrogen in the sediments of two lakes in Guizhou province [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, **14**(4): 301-309.
- [22] Ni M F, Ge Q S, Li S Y, *et al.* Trophic state index linked to partial pressure of aquatic carbon dioxide in a typical karst plateau lake [J]. Ecological Indicators, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106912.
- [23] Zagarese H E, Ferraro M, Queimaliños C, *et al.* Patterns of dissolved organic matter across the Patagonian landscape: a broad-scale survey of Chilean and Argentine lakes [J]. Marine and Freshwater Research, 2017, **68**(12): 2355-2365.
- [24] Ficht C G, Benner R. The spectral slope coefficient of chromophoric dissolved organic matter ($S_{275-295}$) as a tracer of terrigenous dissolved organic carbon in river-influenced ocean margins [J]. Limnology and Oceanography, 2012, **57**(5): 1453-1466.
- [25] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征 [J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5451-5463.
Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Spectral evolution characteristics of DOM in sediment interstitial water during the formation stage of thermal stratification in the main reservoir area of the Zhoucun Reservoir [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5451-5463.
- [26] Carstea E M, Bridgeman J, Baker A, *et al.* Fluorescence spectroscopy for wastewater monitoring: a review [J]. Water Research, 2016, **95**: 205-219.
- [27] Tfaily M M, Corbett J E, Wilson R, *et al.* Utilization of PARAFAC-modeled excitation-emission matrix (EEM) fluorescence spectroscopy to identify biogeochemical processing of dissolved organic matter in a northern peatland [J]. Photochemistry and Photobiology, 2015, **91**(3): 684-695.
- [28] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 2003, **82**(3-4): 239-254.
- [29] 罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦. 重庆西部山区典型湖泊水-气界面 CO₂ 交换通量及其影响因素 [J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 192-199.
Luo J C, Ni M F, Li S Y. Water-air interface CO₂ exchange flux of typical lakes in a mountainous area of the western Chongqing and their influencing factors [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 192-199.
- [30] Wang K, Pang Y, He C, *et al.* Optical and molecular signatures of dissolved organic matter in Xiangxi Bay and mainstream of Three Gorges Reservoir, China: spatial variations and environmental implications [J]. Science of the Total Environment, 2019, **657**: 1274-1284.
- [31] Chen H, Zheng B H, Song Y H, *et al.* Correlation between molecular absorption spectral slope ratios and fluorescence humification indices in characterizing CDOM [J]. Aquatic Sciences, 2011, **73**(1): 103-112.
- [32] Töming K, Kutser T, Tuvikene L, *et al.* Dissolved organic

- carbon and its potential predictors in eutrophic lakes[J]. *Water Research*, 2016, **102**: 32-40.
- [33] Zhang Z P, Show K Y, Tay J H, *et al.* Effect of hydraulic retention time on biohydrogen production and anaerobic microbial community[J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(10): 2118-2123.
- [34] Gao J B, Wang H. Temporal analysis on quantitative attribution of karst soil erosion: a case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China[J]. *CATENA*, 2019, **172**: 369-377.
- [35] Solomon C T, Jones S E, Weidel B C, *et al.* Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: current knowledge and future challenges[J]. *Ecosystems*, 2015, **18**(3): 376-389.
- [36] Johnston S E, Bogard M J, Rogers J A, *et al.* Constraining dissolved organic matter sources and temporal variability in a model sub-Arctic lake[J]. *Biogeochemistry*, 2019, **146**(3): 271-292.
- [37] Sun Q Y, Jiang J, Zheng Y Y, *et al.* Effect of a dam on the optical properties of different-sized fractions of dissolved organic matter in a mid-subtropical drinking water source reservoir[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **598**: 704-712.
- [38] Jiang T, Chen X S, Wang D Y, *et al.* Dynamics of dissolved organic matter (DOM) in a typical inland lake of the Three Gorges Reservoir area: fluorescent properties and their implications for dissolved mercury species[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **206**: 418-429.
- [39] Shang Y X, Jacinthe P A, Li L, *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles and dissolved organic matter in reservoirs across China[J]. *Environmental Research*, 2021, **201**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111579.
- [40] Chen M L, Jung J, Lee Y K, *et al.* Production of tyrosine-like fluorescence and labile chromophoric dissolved organic matter (DOM) and low surface accumulation of low molecular weight-dominated DOM in a productive Antarctic sea[J]. *Marine Chemistry*, 2019, **213**: 40-48.
- [41] Lambert T, Bouillon S, Darchambeau F, *et al.* Effects of human land use on the terrestrial and aquatic sources of fluvial organic matter in a temperate river basin (The Meuse River, Belgium)[J]. *Biogeochemistry*, 2017, **136**(2): 191-211.
- [42] Butman D E, Wilson H F, Barnes R T, *et al.* Increased mobilization of aged carbon to rivers by human disturbance[J]. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(2): 112-116.
- [43] 林琳, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 人类活动对太湖水环境影响的稳定氮同位素示踪[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(4): 546-552.
- Lin L, Wu J L, Zeng H A, *et al.* Stable nitrogen isotope tracing anthropogenic influence on lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(4): 546-552.
- [44] 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 等. 黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4105-4113.
- Zhao X T, Li S, Wang Z W, *et al.* Composition, spatial distribution characteristics and source analysis of chromophoric dissolved organic matter in the Lanzhou reach of the Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4105-4113.
- [45] Wilson H F, Xenopoulos M A. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(1): 37-41.
- [46] Williams C J, Frost P C, Morales-Williams A M, *et al.* Human activities cause distinct dissolved organic matter composition across freshwater ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(2): 613-626.
- [47] Yu M D, Liu S J, Li G W, *et al.* Municipal wastewater effluent influences dissolved organic matter quality and microbial community composition in an urbanized stream[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135952.
- [48] Hestir E L, Brando V, Campbell G, *et al.* The relationship between dissolved organic matter absorption and dissolved organic carbon in reservoirs along a temperate to tropical gradient[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **156**: 395-402.
- [49] Hansen A M, Kraus T E C, Pellerin B A, *et al.* Optical properties of dissolved organic matter (DOM): effects of biological and photolytic degradation[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(3): 1015-1032.
- [50] 袁博, 郭梦京, 郑兴, 等. 漓河流域溶解性有机质分子量分级表征及其与水质的相关性[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(11): 3773-3782.
- Yuan B, Guo M J, Zheng X, *et al.* Molecular weight fractionated characterization of dissolved organic matter and its correlation with water quality in the Bahe River Basin, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(11): 3773-3782.
- [51] Lee M H, Osburn C L, Shin K H, *et al.* New insight into the applicability of spectroscopic indices for dissolved organic matter (DOM) source discrimination in aquatic systems affected by biogeochemical processes[J]. *Water Research*, 2018, **147**: 164-176.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	..... PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method .....	..... WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port .....	..... XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter .....	..... WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019 .....	..... KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan .....	..... WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area .....	..... LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019 .....	..... ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain .....	..... GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	..... ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	..... WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze .....	..... CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors .....	..... YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	..... JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region .....	..... NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake .....	..... HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake .....	..... WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River .....	..... ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff .....	..... ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems .....	..... CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	..... WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin .....	..... LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water .....	..... PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing .....	..... MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition .....	..... HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment .....	..... REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors .....	..... LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater .....	..... YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process .....	..... LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge .....	..... GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 .....	..... XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years .....	..... CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	..... HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt .....	..... ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area .....	..... SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area .....	..... LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China .....	..... WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	..... XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility .....	..... ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan .....	..... LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems .....	..... SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas .....	..... MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	..... LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas .....	..... XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils .....	..... WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	..... XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)