

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勳之, 姜榕, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
基于多种新型受体模型的PM_{2.5}来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
华中地区夏季PM_{2.5}中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)

淄博2021年元宵节PM_{2.5}水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)

浙江省大气颗粒物PM_{2.5}中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)

2001~2019年气象条件对江苏省PM_{2.5}分布的影响 潘晨, 康志明 (649)

基于神经网络和数值模型的重点区域PM_{2.5}预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)

2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)

济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)

山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)

基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善PMF源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)

日照市夏季VOCs物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)

泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)

典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)

2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)

西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)

生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)

不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)

雨源型城市河流污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)

廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)

北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰蓉, 郭道宇 (803)

河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 陈召堂, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)

青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)

鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)

鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)

汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)

基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)

新冠疫情下武汉典型饮用水水源中DBPs污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)

铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)

氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)

环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)

冷冻PN/A颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张绮英, 文言, 钱飞跃 (920)

不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)

云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)

山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)

地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)

西南地质高背景区蔬菜Pb的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)

典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)

矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)

不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)

温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)

两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐焯 (1015)

复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)

产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦Cd吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)

土壤phoC和phoD微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余烁, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)

刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张祯敏, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)

中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)

稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)

模拟及实际根系分泌物对镉污染土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)

德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)

陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)

长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)

《环境科学》征订启事(618) 《环境科学》征稿简则(761) 信息(685, 935, 956)

鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响

郭燕妮^{1,2}, 姚晓龙¹, 陈慧敏¹, 俞晓琴¹, 李宇阳¹, 朱俊羽¹, 韩龙飞², 周蕾^{1,3*}, 周永强^{1,3}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 鄱阳湖水力连通特征季节差异显著, 研究不同水文情景下湖泊调蓄对有色可溶性有机物(CDOM)来源组成、生物可利用性和碳收支平衡的影响对揭示通江湖泊碳循环、水体有机物迁移转化和水资源管理具有重要意义. 通过平行因子分析法对鄱阳湖 CDOM 三维荧光光谱解析得到 3 个荧光组分, 分别为类腐殖质(C1)、类色氨酸(C2)和类酪氨酸(C3). 生物培养前后 CDOM 吸收系数(a_{254})和陆源类腐殖质(C1)均表现为丰水期显著高于枯水期(t -test, $P < 0.01$), 表明陆源类腐殖质(C1)是该湖丰水期 CDOM 的主要来源. 枯水期类蛋白组分占 CDOM 荧光组分强度总和的 81.7%, 表明枯水期可能与周边生产生活废水排放有关. 类腐殖质(C1)和 DOC 的生物可利用性在枯水期达到最大, 分别为 14.0% 和 43.2%, 这与湖泊枯水季节湖床干涸, 上游及周边人类活动排入废水很少受到湖水稀释密切相关. 类蛋白组分的生物有效性在丰水期略高于枯水期, 并无显著差异. 生物可利用对应成分 $\% \Delta C1$ 在丰、枯水期均呈现出从南部河口区向北部出湖口递减的趋势, 表明类腐殖质(C1)的生物可利用性随 CDOM 迁移而降低. 在枯水期和丰水期, 鄱阳湖均表现为 DOC 源, 源通量分别为 $14.0 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{月}^{-1}$ 和 $1.4 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{月}^{-1}$, 而该湖 CDOM 通量在枯水期和丰水期分别表现为源和弱汇, 对应通量分别为 $9.3 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{月})^{-1}$ 和 $1.1 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{月})^{-1}$, 表明枯水期湖泊主要向下游排放 DOC 和 CDOM, 而丰水季节长江干流水位雍高湖水宣泄不畅, 输入的部分 CDOM 可被降解为无机碳、氮和磷等营养盐, 影响湖泊碳循环和富营养化进程.

关键词: 鄱阳湖; 有色可溶性有机物(CDOM); 生物可利用性; 平行因子分析(PARAFAC); 三维荧光(EEMs)

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0837-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105265

Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang

GUO Yan-ni^{1,2}, YAO Xiao-long¹, CHEN Hui-min¹, YU Xiao-qin¹, LI Yu-yang¹, ZHU Jun-yu¹, HAN Long-fei², ZHOU Lei^{1,3*}, ZHOU Yong-qiang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of Geographic Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Lake Poyang has significant differences in hydrological characteristics between the flood and dry seasons. Unraveling the optical composition, bioavailability, fate, and balance of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) and organic carbon fluxes in Lake Poyang under different hydrological conditions can help provide advanced schemes on carbon cycling, the transfer and transformation of organic matter, and water resource management of the lake. Three fluorescent components, including a humic-like (C1), a tryptophan-like (C2), and a tyrosine-like (C3) component, were obtained using three-dimensional fluorescence spectroscopy coupled with parallel factor analysis. Prior to and after 28 days of laboratory biodegradation, the means of a_{254} and the terrestrial humic-like (C1) component in the flood season were both significantly higher than that in the dry season (t -test, $P < 0.01$), indicating that the terrestrial humic-like (C1) component contributed importantly to the CDOM pool. The contribution percentages of protein-like components in the dry season were 81.7% of the summed fluorescent components of CDOM, indicating that there might be discharge of domestic wastewater from areas surrounding the lake in the dry season. The bioavailabilities of the humic-like (C1) component and DOC were 14.0% and 43.2%, respectively, in the dry season. This can be explained by a declined-dilution effect in the lake during the dry rather than in the flood season. We observed no significant difference in the bioavailability of protein-like components under different hydrological conditions. The bioavailability of C1 (i.e., $\% \Delta C1$) showed a decreasing trend from the southern inflowing river mouths to the downstream northern outlet at Hukou in both the flood and dry seasons, indicating that the bioavailability of the C1 decreased following the migration of CDOM in the lake. In the dry season and flood season, Lake Poyang was the source of DOC with fluxes of $14.0 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{mon}^{-1}$ and $1.4 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{mon}^{-1}$, respectively, whereas CDOM fluxes in corresponding periods were the source and weak sink with corresponding fluxes of $9.3 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{mon})^{-1}$ and $1.1 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{mon})^{-1}$, respectively. Therefore, the lake released substantial organic matter to the downstream receiving waters during the dry season, whereas in the flood season, the higher water level in the Yangtze River resulted in a prolonged water residence time of the lake, and a fraction of CDOM was bio-degraded into inorganic nutrients, favoring the metabolisms and the eutrophication process of the lake ecosystem.

Key words: Lake Poyang; chromophoric dissolved organic matter (CDOM); bioavailability; parallel factor analysis (PARAFAC); excitation-emission matrices (EEMs)

收稿日期: 2021-05-25; 修订日期: 2021-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807362, 41930760); 中国科学院青年促进会项目(2021312); 江苏省自然科学基金项目(BK20181104)

作者简介: 郭燕妮(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为有色可溶性有机物循环, E-mail: 1591771211@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhoulei16@mails.ucas.ac.cn

湖泊承接流域大量有机碳输入,是溶解性有机物(DOM)重要的存储及迁移转化要冲. DOM 富含有机碳、氮、磷和硫等生源物质,是天然有机质的重要赋存形态及活性成分. 河流进入湖泊后水面骤然扩宽,水流迅速减缓,DOM 因而经历了一系列复杂的光降解及微生物降解过程,因而湖泊是陆地 DOM 归趋的重要枢纽. 鄱阳湖位于长江中下游南岸,是我国最大的淡水湖,同时也是长江流域最大的通江湖泊,受长江干流水文影响大,有“枯时一条线,丰水连一片”的水文节律^[1]. 鄱阳湖承接赣江、抚河、信江、饶河和修水这 5 条河来水,经湖泊调蓄后由湖口注入长江. 鄱阳湖在调洪蓄水、调节气候、水源供应和内陆水体碳循环等方面发挥了重要的作用^[2],其水质的优劣直接影响到鄱阳湖周边地区以及长江中下游地区居民的用水安全,因此关注鄱阳湖水质的动态变化具有重要的意义. 作为我国最大的吞吐型湖泊,鄱阳湖承接陆源有机碳的输入,经湖泊调蓄后,大量 DOM 不断被矿化释放无机碳、氮和磷等营养物质,影响湖泊富营养化进程及湖泊生态系统演化,剩下那部分难于被降解的有机物随水流进一步向下游继续迁移. 近年来,由于鄱阳湖流域工业化、城镇化和农业化进程的加快,导致湖泊水生态环境面临更大的压力^[3],因此研究鄱阳湖的 DOM 归趋与收支各项显得尤为重要.

由于 DOM 来源组成异常复杂,传统化学分析方法难以有效揭示其来源组成,作为 DOM 中能吸收紫外光和可见光的部分,有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)的光谱特性能有效示踪 DOM 来源组成和归趋特征信息^[4,5]. 不同的径流量会影响水体的生态结构,并且影响水体中 CDOM 归趋,从而制约碳、氮和磷等生源要素的地球化学循环^[6],进而影响湖泊生态群落结构. 鄱阳湖作为重要的水源地,一旦湖水中有高浓度 CDOM 的存在,能使得水体酸臭刺鼻,锈垢水处理系统及输水管网,其来源与组成直接制约水处理工艺与流程^[7]. CDOM 的生物可利用性是指在一定时间内可以被微生物利用的部分,这部分有机物被称为生物可利用的那部分溶解性有机物(bioavailable DOM, BDOM)^[8]. BDOM 能与水体中的重金属及微型污染物相互作用,影响其环境行为及毒理特征与致毒潜力,进而对供水区人畜用水安全产生重要影响^[9,10]. 微生物降解还可改变水体中荧光组分的物质浓度,进而影响 CDOM 在水体中的迁移转化过程^[11],因此对 CDOM 的来源组成及生物可利用性进行研究很有必要.

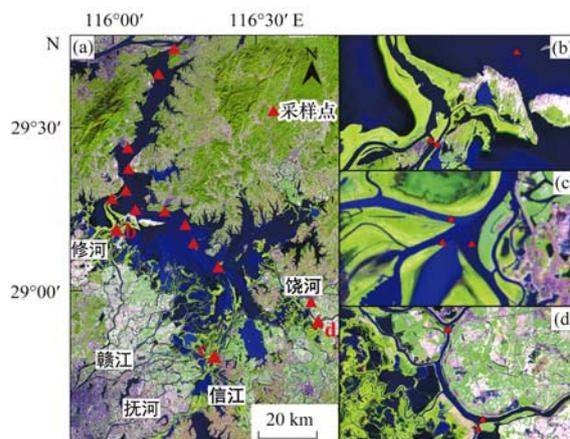
CDOM 的光学测量操作简单,灵敏度高,被广泛

应用于反映水体环境状况及天然有机质来源组成及归趋研究^[12,13]. 三维荧光结合平行因子分析是目前应用较广的一门技术,可以提供 CDOM 的组成和结构信息,被应用于各种天然水体中^[14,15]. 近年来,一些国内外学者对 CDOM 及其生物可利用性做了相关研究^[11,16,17]. 张柳青等^[17]结合三维荧光-平行因子分析法对洪泽湖和骆马湖 CDOM 的生物可利用性进行了研究,认为不同季节两个湖泊的 CDOM 来源存在差异,进而影响了 CDOM 的生物可利用性. 魏珈等^[18]的研究运用三维荧光-平行因子分析了不同流域背景的 DOM 的入海通量,发现不同流域背景下,河流 DOM 入海通量存在差异性. 目前国内外对鄱阳湖这类水力滞留时间较短的吞吐型通江湖泊的 CDOM 通量、收支平衡和生物可利用性的研究较少,尤其鄱阳湖这类过水型湖泊在主要入湖河流与出湖口之间的 CDOM 生物降解潜力和收支平衡方面鲜见报道. 鉴于此,本文通过在不同水文情景下开展样品采集(采样点涉及主要入湖河道、湖中和出湖口),并结合 CDOM 的光学参数与室内 28 d 生物培养实验所揭示的生物可利用性特征,进一步分析鄱阳湖在不同来水情景下的 CDOM 通量、收支平衡的格局和其生物降解潜力,通过揭示通江湖泊 CDOM 归趋及碳收支平衡,以期对鄱阳湖的供水安全管理提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

在鄱阳湖各入湖河口、湖口以及湖面布设样点(图 1),分别于 2016 年 10 月(15 个)、2020 年 7 月(16 个)和 2020 年 10 月(19 个)采集水样. 采样结束后将样品置于车载冰箱保存,并于当日运回实验室进行样品处理,将 100 mL 的样品通过 0.7 μm 的



(b)、(c)和(d)依次为对应(a)中各点的局部放大

图 1 鄱阳湖采样点分布及局部放大

Fig. 1 Location of sampling sites in Lake Poyang and partial zoom

Whatman GF/F 滤膜以测定 DOC 浓度, 继而将滤后水再通过 0.22 μm 孔径的 Millipore 滤膜过滤, 滤后水装入酸洗和高温灭菌过的白色 PET 瓶, 用于测定 CDOM 紫外吸收光谱和三维荧光光谱。

1.2 生物培养实验

在室温黑暗好氧环境下生物培养 28 d 以表征 BDOM^[19]。首先将 100 mL 水样过 0.22 μm 孔径的 Millipore 滤膜以去除颗粒态有机物的潜在影响, 置于高温灭菌过的棕色玻璃瓶中。棕瓶中加入 2 mL 采样点原水作为接种细菌, 继而加入 2 mL 营养盐使得瓶中 NH_4^+-N 及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 分别增加至 80 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 进行室内生物培养实验以避免生物培养中微生物活动受到营养限制^[20]。将棕瓶置于室温环境并拧松瓶盖, 每日摇晃数次, 以保证有足够的氧气供应, 28 d 后再通过 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤来测定 CDOM 紫外吸收光谱和三维荧光光谱, 通过 Whatman GF/F 滤膜以测定 DOC 浓度。各指标前面加“ Δ ”表示生物培养前与培养后各组分荧光强度的差值, 例如 Δa_{254} 、 ΔDOC 和 $\Delta\text{C1} \sim \Delta\text{C3}$ 。差值占培养前组分最大荧光强度 (F_{max}) 的百分比值, 即 $\%\Delta\text{C1} \sim \%\Delta\text{C3}$ 用来表征各个荧光组分的生物可利用性。

1.3 水文数据的获取

本文各入湖河流以及出湖口的逐日流量数据均来自全国雨水情信息大江大河实时水情表 (http://xxfb.mwr.cn/sq_djdh.html)。

1.4 参数的测定

1.4.1 重要的水质参数以及 CDOM 光谱参数的测定

DOC 的测定使用 Shimadzu TOC-L 总有机碳分析仪在高温 (680 $^{\circ}\text{C}$) 下采用 NPOC 扫吹模式测定。TN 及 TP 参照文献[21]的方法测定。

CDOM 光谱参数的测定使用 Shimadzu UV-2550 UV-Vis 分光光度计测定, 使用 5 cm 的比色皿, 间隔 1 nm, 测定波长在 200 ~ 800 nm 之间的吸光度, 以当日超纯水为空白对照, 通过计算获得 CDOM 的丰度, 本文用 a_{254} 来表示^[22,23]。 $S_{275-295}$ 表示波长在 275 ~ 295 nm 波段拟合得到的指数函数曲线光谱斜率, $S_{275-295}$ 值越小, 反映 CDOM 的陆源类腐殖酸信号越强^[24]。

1.4.2 三维荧光光谱的测定与平行因子分析

使用 F-7000 分子荧光光度计 (Hitachi 公司) 测定 CDOM 三维荧光光谱, 设定激发光谱范围为 200 ~ 450 nm, 间隔 5 nm; 发射光谱范围 250 ~ 600 nm, 间隔 1 nm。通过扣除每日超纯水的三维荧光光谱进行水拉曼散射校正, 并用超纯水 EEMs 中 350 nm 下的荧光强度将所有 EEMs 定标为拉曼单位 (Raman unit, R. U.)。用 MATLAB 软件中的 drEEM 工具包剪

切散射峰后通过线性内插法以消除瑞利散射的影响^[25], 内滤波效应采用每个样品的激发发射波长处的吸光度予以校正^[26]。

采用 MATLAB R2015b 的 drEEM 工具箱对 88 个 EEMs 矩阵进行平行因子分析, 对应有 45 个激发波长, 251 个发射波长。数据被分为 6 个随机子集, 取 3 个子集用于建模, 其余 3 个用于模型验证, 每个 EEMs 子集均从 3 个组分逐步到 6 个组分检验, 最终确定了 3 个组分能通过对半检验、随机初始化检验及残差分析 (图 2)。各荧光组分对应的最大荧光强度 (F_{max}) 用以表征该组分的荧光强度或该荧光物质对应浓度^[27,28]。

1.5 荧光组分的鉴定

经过平行因子分析得到 3 个荧光组分 (图 2), 分别是 C1 ($E_x/E_m = 255/444$ nm) 为陆源类腐殖酸^[27,29], 与陆源土壤淋溶输入密切相关; C2 ($E_x/E_m = 235(285)/372$ nm) 为红移类色氨酸或蓝移微生物作用类腐殖酸^[14], C3 ($E_x/E_m = 270/300$ nm) 为类酪氨酸^[14,30], C2 和 C3 与湖泊周边生产生活污水输入和藻草降解等密切相关。

1.6 CDOM 通量与 DOC 通量的计算

各入湖河流 CDOM 通量通过丰、枯水期 CDOM 丰度 (a_{254}) 与对应水期的径流量相乘获得, DOC 通量同样通过相应丰、枯水期各河流的 DOC 浓度与该河径流量的乘积获得。当鄱阳湖 5 条入湖河流输入总通量高于湖口站的出湖通量时, 鄱阳湖表现为汇; 当 5 条入湖河流的输入总通量低于输出通量时, 该湖表现为源^[31,32]。

1.7 统计分析

使用 IBM SPSS Statistics 23 统计数据的平均值、标准差、最小值和最大值, 并进行独立样本 *t*-test 检验, 采样点位和 CDOM 参数的空间分布图使用软件 ArcGIS 10.4 绘制, 图表绘制使用 Origin 2018, 本文用小写字母 a 表示两组数据在 0.05 水平上差异显著, 用大写字母 A 表示两组数据在 0.01 水平上存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 水文情景的划分以及重要的水质参数和荧光组分

如图 3(a) 所示, 根据多年湖口站的月平均径流量变化情况, 本研究将 7 月划分为鄱阳湖的丰水期, 10 月为枯水期。图 3(b) 为采样期间鄱阳湖入湖河流赣江 (外洲站)、信江 (梅港站)、抚河 (李家渡站)、饶河 (虎山站)、修水 (万家埠站) 和出湖口 (湖口站) 的 DOC 通量变化情况, 其中负值表示出

湖通量. 在 2020 年 7 月我国长江流域发生连续强降雨天气, 长江中下游径流量变化较大, 因此在 2020 年 7 月的径流量误差值在各个人湖河流和出湖口变化较大. 由于两次 10 月的水文数据相近, 因此本研究在后面分析时将 2016 年 10 月与 2020 年 10 月归

在一起, 共同代表枯水期 CDOM 光谱参数的变化情况. 如图 4 所示, 整体上, 各入湖河流和出湖口的总氮(TN)、总磷(TP)和陆源类腐殖质(C1)均在丰水期高于枯水期, 在赣江表现得尤为明显, 而类蛋白质(C2 和 C3)整体表现为在枯水期较高.

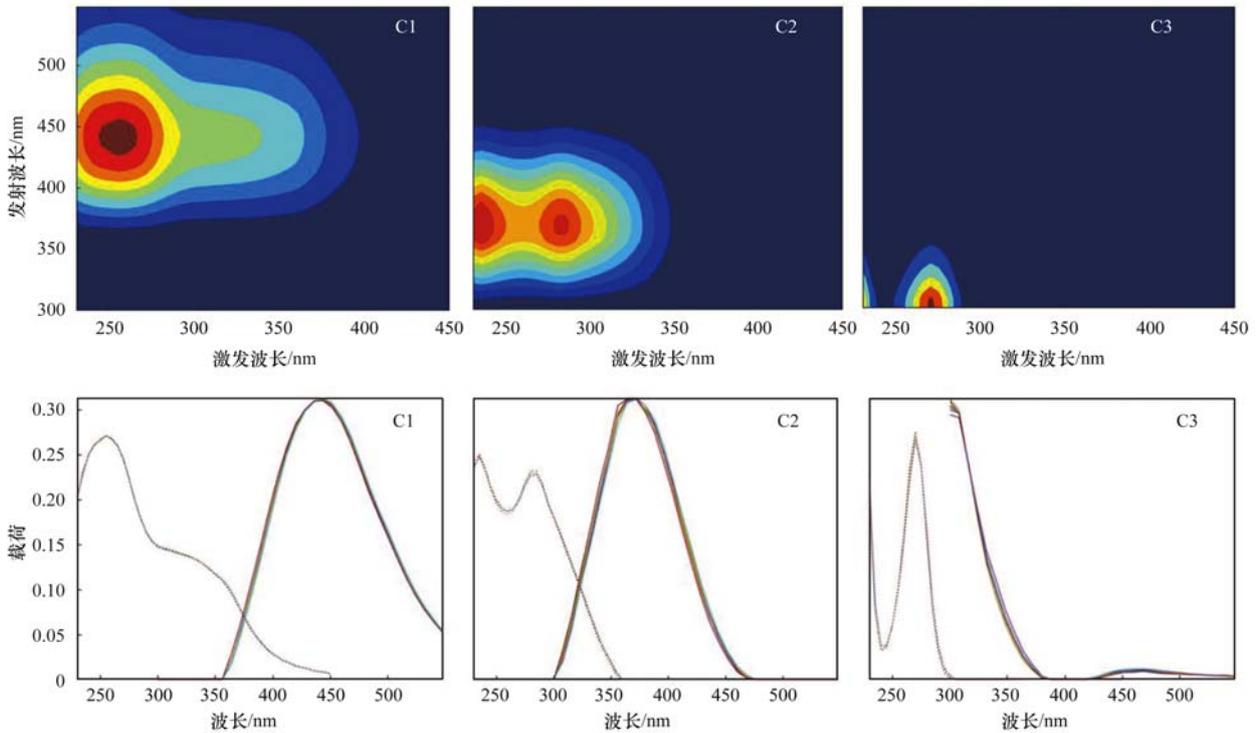


图 2 平行因子分析法得到的 3 个荧光组分荧光光谱和对半检验结果

Fig. 2 Fluorescent spectra of the three PARAFAC components and split-half validation results

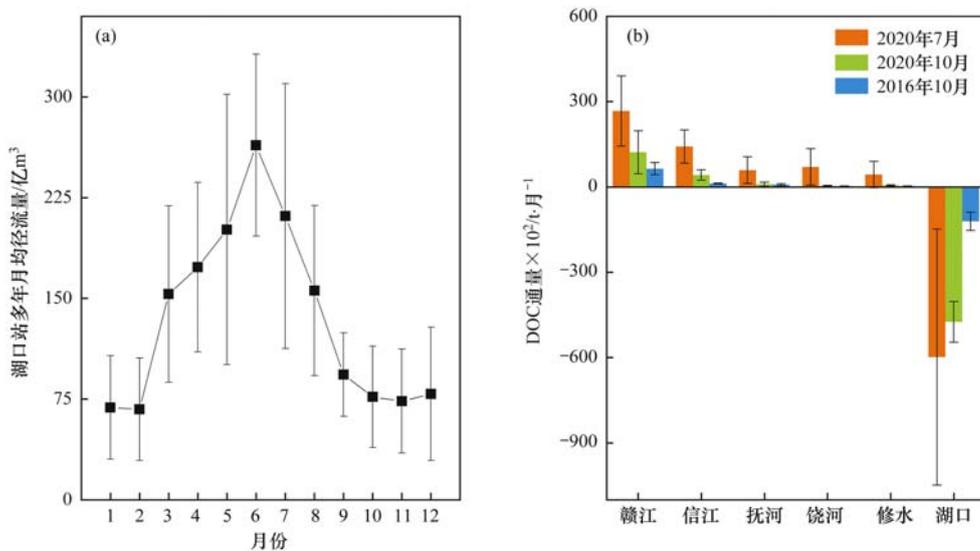


图 3 鄱阳湖多年月均径流量及采样期间各入湖河流和出湖口的 DOC 通量

Fig. 3 Multi-year monthly mean runoff of Poyang Lake at Hukou and DOC fluxes in the five inflow rivers and the only outlet at Hukou during the sampling periods

2.2 湖泊调蓄对 CDOM 通量及 DOC 通量的影响

如图 5 所示, CDOM 通量和 DOC 通量在丰水期和枯水期的空间分布大致相同, 丰水期和枯水期输入通量的最大值均出现在赣江, 其次为信

江. 丰水期各入湖河流间 CDOM 和 DOC 通量差异性较大. 如图 6 所示, CDOM 和 DOC 的输入和输出通量一致表现为丰水期显著大于枯水期 (t -test, $P < 0.05$), CDOM 通量在丰、枯水期分别表

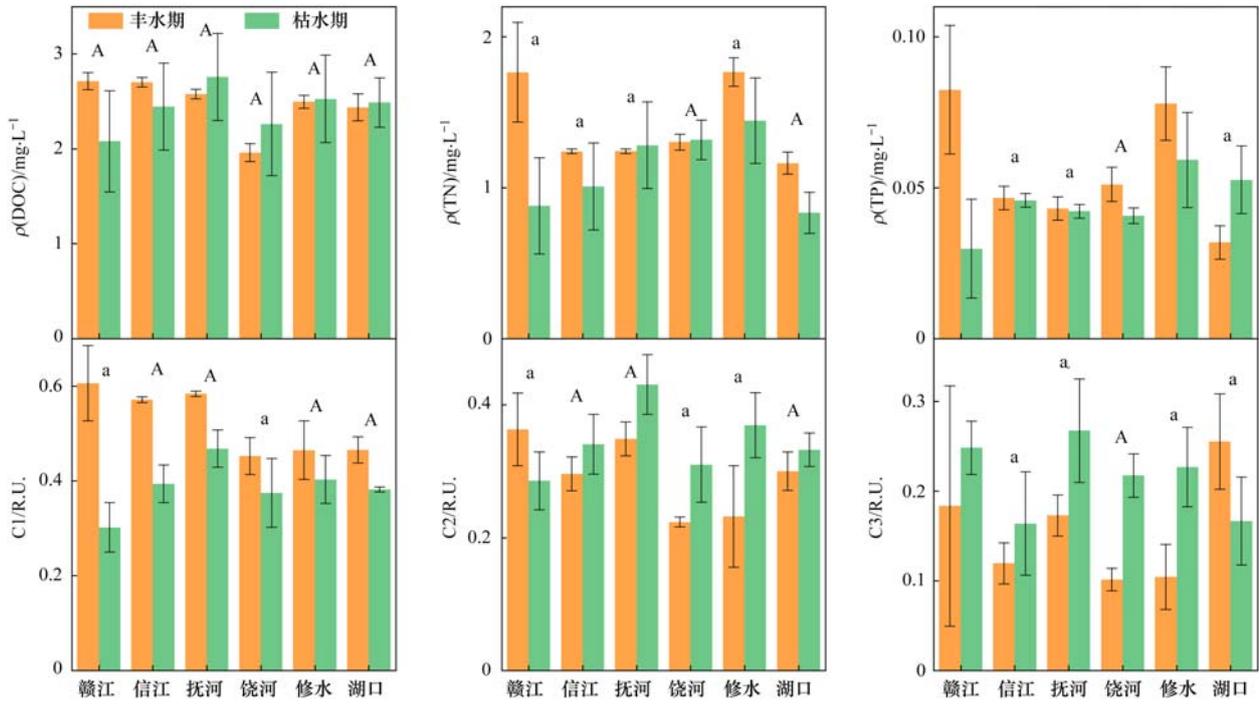
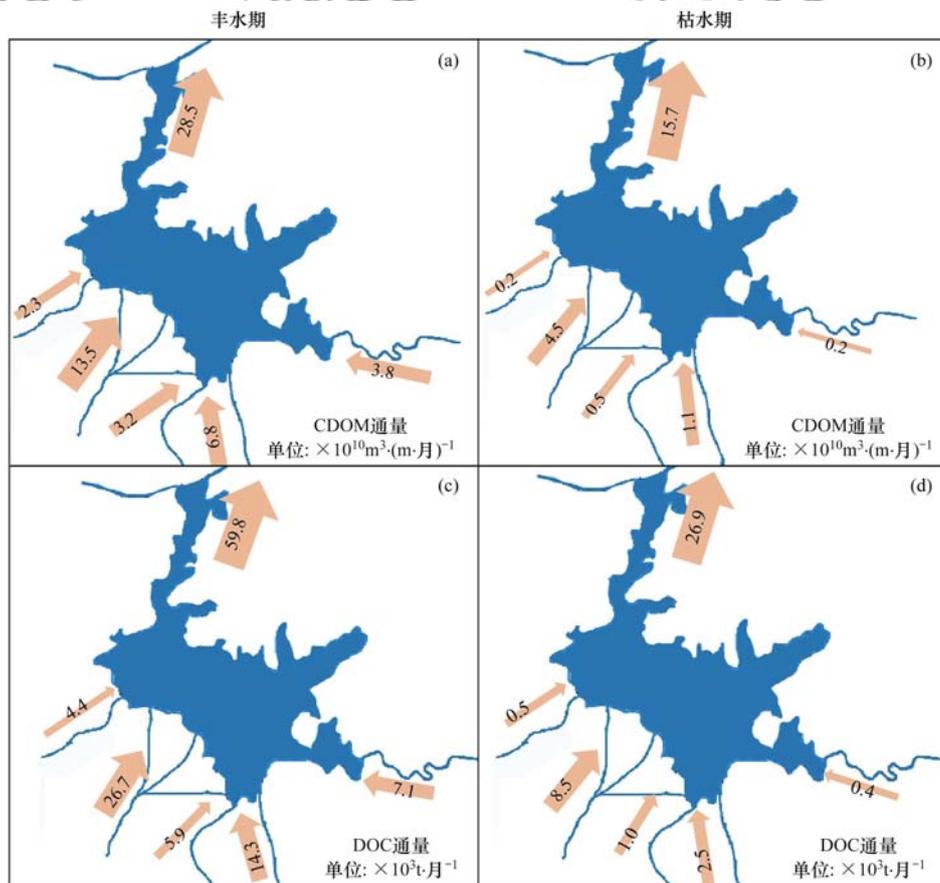


图 4 不同水期入湖河流及出湖口的营养盐和荧光组分变化情况

Fig. 4 Variations in nutrients and fluorescence intensities of PARAFAC-derived components in the inflow rivers and the only outlet at Hukou during different hydrological scenarios.



箭头的方向表示水流方向,箭头的粗细表示通量大小

图 5 不同水文情景下各入湖河流以及出湖口的 CDOM 和 DOC 通量

Fig. 5 CDOM and DOC influxes and effluxes of the major inflowing rivers and the only outlet at Hukou of Lake Poyang under different hydrological scenarios

现为汇(输入 > 输出)和源(输入 < 输出),其汇与源通量分别为 $1.1 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{月})^{-1}$ 和 $9.3 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{月})^{-1}$, DOC 通量在不同水文情景

下均表现为源,丰水期的 DOC 源通量仅为 $1.4 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{月}^{-1}$,而枯水期其源通量可达 $14.0 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{月}^{-1}$,为丰水期输出的 10 倍之多.

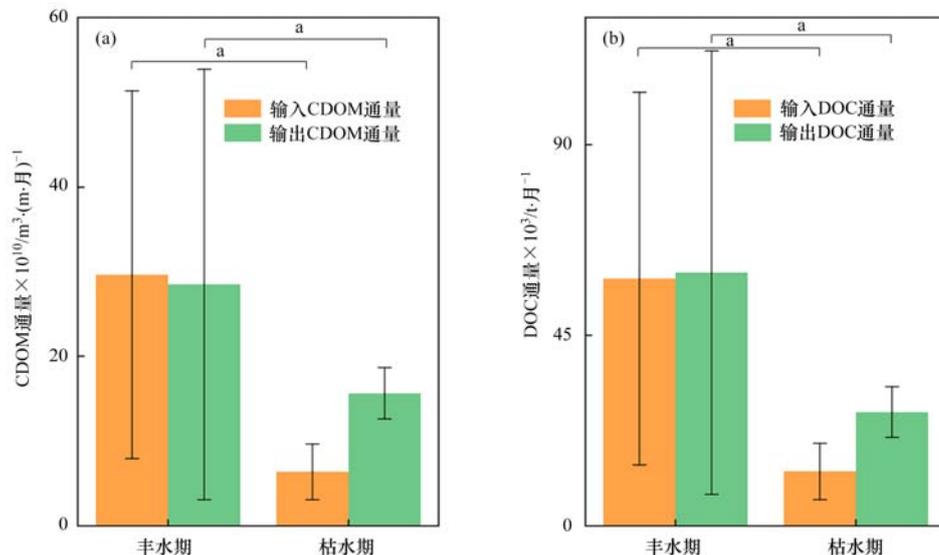


图 6 鄱阳湖调蓄对 CDOM 和 DOC 通量的影响

Fig. 6 Effects of Lake Poyang storage on the balance CDOM and DOC fluxes

2.3 不同水期 CDOM 光谱参数在生物培养前后的变化

如图 7 所示,在生物培养前与培养后均存在

a_{254} 和陆源类腐殖质(C1)在丰水期显著高于枯水期 (t -test, $P < 0.01$), $S_{275-295}$ 、类酪氨酸(C3)在枯水期显著高于丰水期 (t -test, $P < 0.01$). 丰水期 a_{254} 在

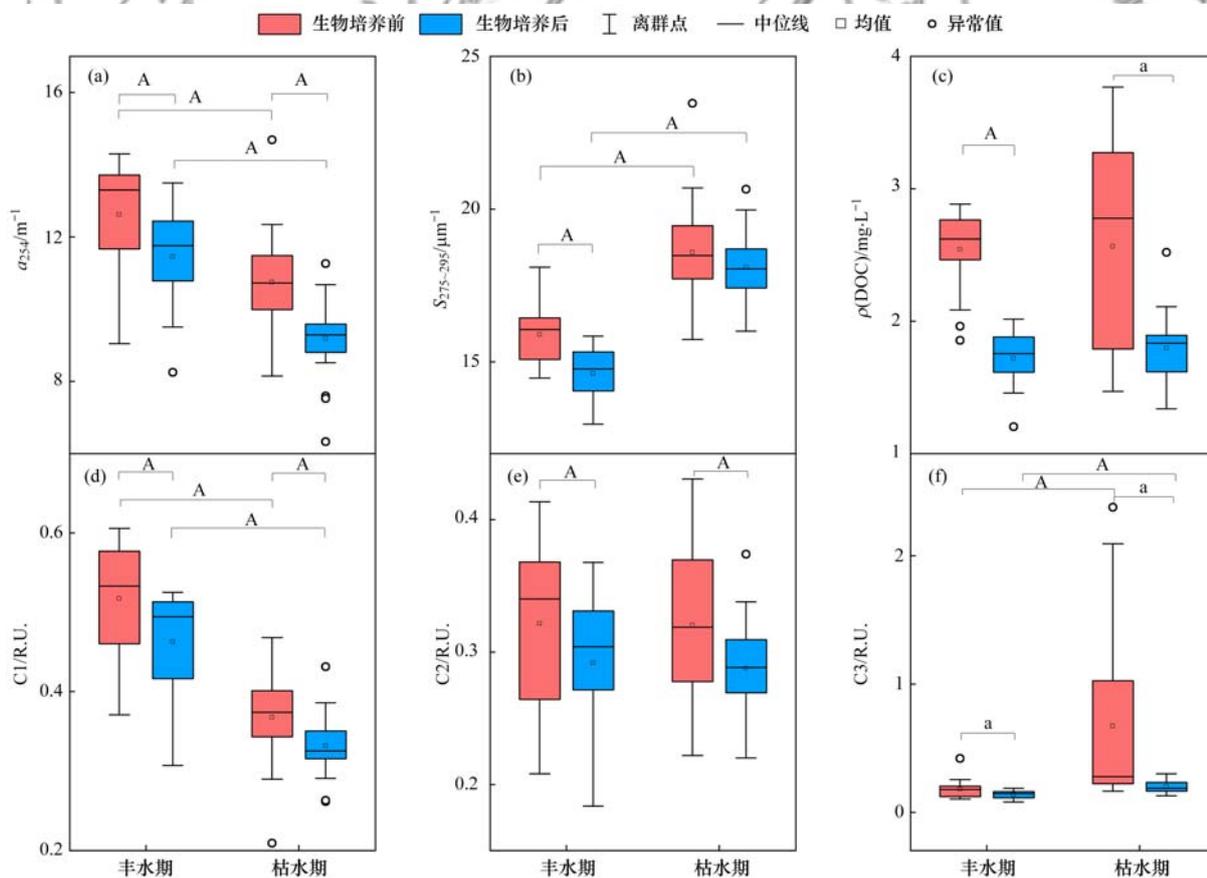


图 7 不同水期鄱阳湖 CDOM 光谱参数和荧光组分强度在生物培养前后的变化情况

Fig. 7 Variations in CDOM spectral parameters and fluorescent intensities pre- and post-laboratory biodegradation under different hydrological scenarios

生物培养后显著降低 (t -test, $P < 0.01$), 被微生物利用了 9.2%, 而枯水期 a_{254} 被生物降解得更为显著 (t -test, $P < 0.01$), 达到 10.6%. 经微生物作用后, 丰水期和枯水期 DOC 浓度降解显著 (t -test, $P < 0.01$), 分别下降了 32.5% 和 43.2%. 不同水文情景下 3 个荧光组分的荧光强度在微生物利用后均显著降低, 丰水期类腐殖酸 (C1)、类色氨酸 (C2) 和类酪氨酸 (C3) 的生物有效性分别为 10.5%、8.6% 和 16.7%, 而枯水期 C1、C2 和 C3 分别被微生物利用了 14.0%、17.6% 和 11.0%.

2.4 CDOM 光谱参数及荧光组分的生物可利用性的空间分布特征

如图 8, 经过生物培养后, 丰水期 $\% \Delta \text{DOC}$ 的空

间分布表现为湖区内部较高、出湖口处较低的现象, 而 $\% \Delta \text{DOC}$ 在枯水期显著高于丰水期 (t -test, $P < 0.001$), 并且在各入湖河流表现得更为显著. 类腐殖酸的生物可利用性 ($\% \Delta \text{C1}$) 表现为枯水期显著高于丰水期 (t -test, $P < 0.05$), 丰、枯情景下均表现为从南部湖区向北部湖区递减的趋势. $\% \Delta \text{C2}$ 同样表现为枯水期显著高于丰水期 (t -test, $P < 0.01$), 如表 1, 枯水期 $\% \Delta \text{C2}$ 在各入湖河流均为正值, 其负值出现在丰水期的湖口和修水. 丰水期 $\% \Delta \text{C2}$ 由上级湖泊向下级湖泊有递减的趋势, 枯水期 $\% \Delta \text{C2}$ 在湖区中部赣江、修水一带较大. 相比于丰水期, 枯水期 $\% \Delta \text{C3}$ 存在较多负值, 并且信江和抚河的类酪氨酸 (C3) 累积较显著.

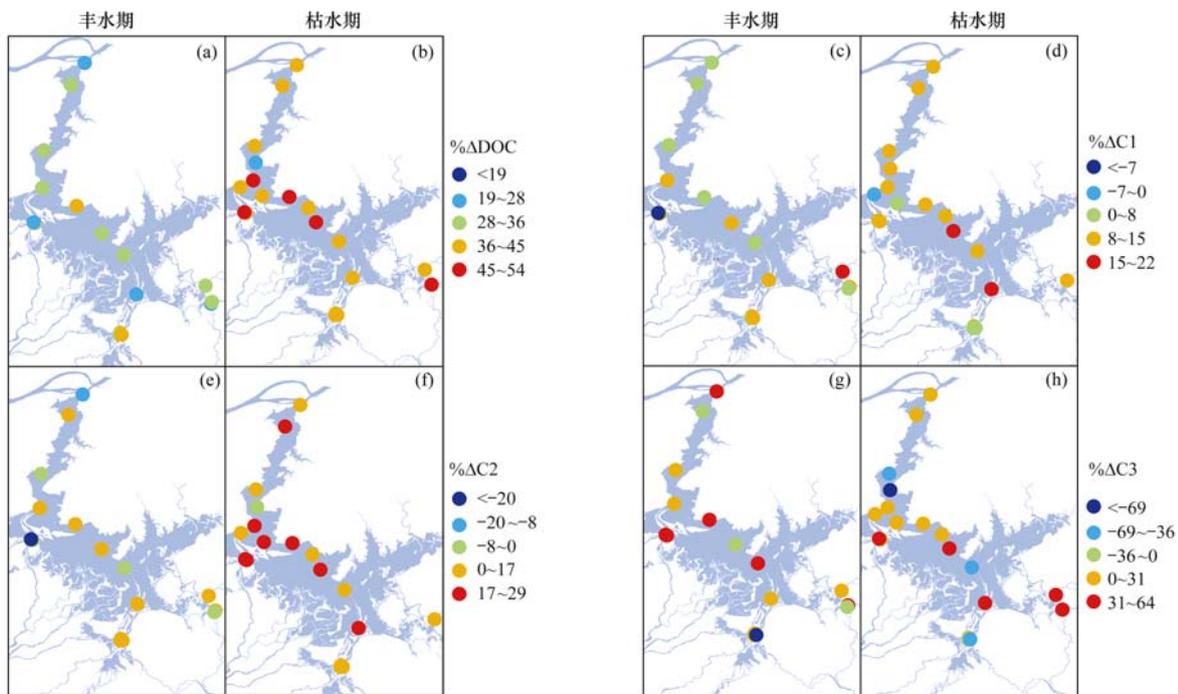


图 8 鄱阳湖 DOC 及 CDOM 荧光组分的生物可利用性的时空分布特征

Fig. 8 Bioavailability of DOC and CDOM fluorescent components in Lake Poyang under different hydrological scenarios

表 1 鄱阳湖入湖河流和出湖口 DOC 及 CDOM 荧光组分的生物可利用性

河流	水期	%BDOC	%ΔC1	%ΔC2	%ΔC3
修水	丰水期	28.8	-7.1	-20.4	24.5
	枯水期	47.8	13.4	22.0	35.3
赣江	丰水期	30.1	13.8	10.4	27.1
	枯水期	44.0	13.4	19.5	10.1
抚河	丰水期	30.7	11.8	10.9	10.4
	枯水期	44.0	7.8	13.2	-0.7
信江	丰水期	41.4	14.0	11.1	-30.6
	枯水期	40.6	11.5	12.4	-3.9
饶河	丰水期	25.6	10.1	8.6	6.1
	枯水期	53.7	22.4	29.1	33.4
湖口	丰水期	29.2	8.5	-3.5	29.1
	枯水期	44.4	15.4	18.0	9.3

3 讨论

3.1 不同径流下入湖河流的 CDOM 来源及湖泊的调蓄情况

鄱阳湖的 5 条输入河流的类腐殖质 C1 均表现为丰水期大于枯水期, 说明丰水期 CDOM 存在显著的类腐殖质特征, 来自上游的径流量携带了较多的土壤淋溶有机物^[29]. 丰水期鄱阳湖 CDOM 通量主要来源于赣江, 意味着丰水期赣江经过上游南昌主城区后 CDOM 组成及结构发生显著变化^[33]. 丰水期的总氮 (TN) 和总磷 (TP) 浓度均在赣江较大, 这会进一步刺激该河段藻类的生长, 使得水体溶氧下降, 进一步导致藻类死亡, 因此丰水期类蛋白质在赣江较高, 并且类色氨酸的荧光强度较大, 表明南昌市区可

能存在因极端暴雨过程管网破损引起的生活及工业废水排放,并且丰水期充沛来水量的稀释作用远不及生活污水输入的影响^[2].陈晓玲等^[34]的研究得到鄱阳湖的泥沙主要来自赣江,这说明赣江作为鄱阳湖的最大支流对鄱阳湖的生态环境影响重大.枯水期3类荧光组分均在抚河的荧光强度较大,意味着枯水期抚河的荧光类物质主要是由上游抚州市排放的陆源类物质和生活污水所决定的.

不同水文情景下 CDOM 和 DOC 的输入、输出通量变化与丰、枯水期的径流量变化大致相同,表明径流量显著影响 CDOM 和 DOC 通量的季节变化.鄱阳湖的汇通量仅体现在丰水期的 CDOM 汇,并且 CDOM 输入通量与输出通量差异并不显著,这意味着部分来自上游入湖河流中的 CDOM 在湖泊中不断被矿化为碳、氮和磷等营养盐,进而影响湖泊碳循环和富营养化水平,在此过程中湖泊调蓄发挥的作用较大.枯水期由于长江干流水位较低,鄱阳湖水在湖口位置宣泄流畅,来自湖泊上游的溶解性物质可以被很好地转移到长江下游地区,湖泊发挥的调蓄作用较小,上游输入的 CDOM 未经微生物充分降解便输出湖泊.枯水期湖泊输出的 CDOM 通量和 DOC 通量显著高于同时期输入的 CDOM 通量和 DOC 通量,表明鄱阳湖在枯水期是 DOC 和 CDOM 的源,并且可能存在枯水期所排放的一部分 CDOM 通量和 DOC 通量来源于丰水期所输入的通量.

3.2 径流量对鄱阳湖 CDOM 光谱参数以及生物降解的影响

在生物培养前后,CDOM 浓度和陆源类腐殖质(C1)的浓度均在丰水期较高,这表明丰水期 CDOM 主要来源于 C1,并且丰水期 C1 较难被微生物利用.Zhou 等^[35]的研究发现丰水时期,由于地表径流量的增大,会携带更多的土壤表层淋溶物质和凋落物入湖,这进一步丰富了湖泊 CDOM 的组成结构,在生物培养前与培养后, $S_{275-295}$ 在丰水期较低进一步验证了这一结论. CDOM 中 C1 的荧光强度较大可能有以下两个原因,一是丰水期本身具有更多的外源输入类腐殖质基质;其次是在生物培养时,微生物会优先利用 CDOM 中的类蛋白组分,且对类蛋白的利用性较高^[36],不同水文情景下类蛋白的生物有效性均高于类腐殖质进一步验证了这一点.丰、枯水期 C1 在培养后的显著性降低表明 CDOM 在受到外界温度和营养状态的刺激时,陆源类腐殖质的部分均会发生不完全降解^[37].生物培养后,微生物衍生的分泌物产生了新的腐殖类物质,导致腐殖质的信号增加^[38,39],并且径流量的减小更有利于这一过程的发生,这也是枯水期 C1 部分样点存在培养

后高于培养前的原因.

在生物培养前,枯水期类蛋白质的荧光组分强度较高,表明枯水期 CDOM 的主要来源为周边地区所排放的生活污水以及藻类等浮游植物死亡后经微生物降解的产物.在生物培养后,类蛋白质的生物有效性在不同水文情景下差异不显著,表现为枯水期略高于丰水期,表明类蛋白质在不同水文情景下均具有较高的生物可利用性.张柳青等^[40]发现高邮湖、东平湖在枯水期时类蛋白质的生物活性较低,这主要是不同湖泊所接受的 CDOM 来源差异引起,鄱阳湖作为我国最大的淡水湖,具有“丰水一片,枯水一线”的水文特征,在枯水期湖泊周边河流向湖泊排放的生活污水,这一过程在缺少雨水或径流的稀释作用下将变得十分明显. DOC 的损失主要是由 DOC 的矿化驱动引起的^[37],枯水期由于周边城市及乡镇居民生产生活排放废水聚集于河槽,鲜少被上游河流来水冲刷稀释,且该时段有机碳降解具有更低的营养限制^[41],加上水力滞留时间较长,更容易被微生物所利用,因此具有较高的生物可利用性.这一过程也可能增强微生物对类腐殖质物质的降解能力,这与枯水期 C1 降解比例高于丰水期结果相印证.

3.3 鄱阳湖 CDOM 光谱参数生物可利用性的空间分布

DOC 的生物有效性在修水南入湖口附近的湖区达到较高值,这说明该地区湖面变窄,有机质较为聚集,更有利于 DOC 的进一步降解^[42]. $\% \Delta C1$ 在丰、枯水期均呈现出从南部湖区向北部出湖口位置递减的趋势,作用于类腐殖质(C1)的微生物在南部湖区具有较高的生物活性,这说明上级河流输入的陆源类腐殖质具有更高的营养基质,在外界环境的刺激下更容易被微生物降解^[37],而 CDOM 在向湖口迁移的过程中,由于受紫外辐射发生光降解作用,因此微生物降解效果较为微弱,并且丰水期水力滞留时间更短,微生物对 C1 的降解现象更加微弱,一些学者的研究同样发现在湖区的下游地区,CDOM 降解效果减弱^[40].枯水期类色氨酸组分 $\% \Delta C2$ 在中部湖区较高,表明中部湖区特别是修水南入湖口的微生物活性较高,可以充分降解类蛋白质中的类色氨酸组分,并且较高的类色氨酸浓度将导致更快的矿化速率.类蛋白质中类色氨酸组分和类酪氨酸组分的生物活性在不同水文情景下并不相同,类酪氨酸的生物活性在丰水期更高,在枯水期更低.丰水期湖口位置不仅受到上级河流带来的溶解有机质,还会接受来自长江的倒灌作用,此时湖口附近的 CDOM 组成结构将会更加复杂^[43],CDOM 的生物利用性也会有所变化,与入湖河流相比,丰水期类酪氨酸的生

物有效性在湖口达到最大。

4 结论

(1) 在生物培养后, 丰水期和枯水期类腐殖酸(C1)的生物有效性分别为 10.5% 和 14.0%, 不同水文情景下类蛋白质的生物有效性差异不显著, 在丰水期和枯水期的生物可利用性分别是 12.6% 和 14.3%, 枯水期 DOC 被微生物降解得更为显著, 其生物有效性可达 43.2%。

(2) 鄱阳湖调蓄后, CDOM 通量和 DOC 通量的输入、输出变化情况与径流量在丰、枯水期的变化较为一致, 鄱阳湖在丰水期 DOC 源通量为 $1.4 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{月}^{-1}$, CDOM 表现为弱汇, 汇通量为 $1.1 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{月})^{-1}$ 。鄱阳湖枯水期表现为 DOC 源和 CDOM 源, 源通量分别达 $14.0 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{月}^{-1}$ 和 $9.3 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{月})^{-1}$ 。

(3) 不同水文情景下类腐殖质(C1)的生物有效性在空间上均呈现由南部湖区向北部出湖口递减的趋势, 径流量对两种类蛋白质组分的生物利用性影响更大, 表现为丰水期鄱阳湖具有较高的类酪氨酸生物活性, 而枯水期作用于类色氨酸的微生物活性更高。

致谢: 感谢鄱阳湖站刘贺和中国科学院南京地理与湖泊研究所石玉、张柳青、李元鹏、邢晓晟和张成英等同志在野外及室内实验过程中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 彭宁彦, 戴国飞, 张伟, 等. 鄱阳湖不同湖区营养盐状态及藻类种群对比[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1295-1308.
Peng N Y, Dai G F, Zhang W, et al. Differences in nutrition condition and algae population in different areas of Poyang Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(5): 1295-1308.
- [2] 范宏翔, 徐力刚, 朱华, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖水龄影响的定量区分[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 1175-1187.
Fan H X, Xu L G, Zhu H, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and anthropogenic activities on variation of water age in the Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(4): 1175-1187.
- [3] 李括, 杨柯, 彭敏, 等. 近 20 年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1724-1738.
Li K, Yang K, Peng M, et al. Changes in concentrations and pollution levels of trace elements of floodplain sediments of Poyang Lake basin in recent twenty years [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1724-1738.
- [4] Li D B, Pan B Z, Zheng X, et al. CDOM in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers, China: optical properties, possible sources, and their relationships with environmental variables [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(26): 32856-32873.
- [5] 张运林, 秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析[J]. 水科学进展, 2007, **18**(3): 415-423.
Zhang Y L, Qin B Q. Feature of CDOM and its possible source in Meiliang Bay and Da Taihu Lake in Taihu Lake in summer and winter [J]. Advances in Water Science, 2007, **18**(3): 415-423.
- [6] Zeng Q H, Qin L H, Li X Y. The potential impact of an inter-basin water transfer project on nutrients (nitrogen and phosphorous) and chlorophyll a of the receiving water system [J]. Science of the Total Environment, 2015, **536**: 675-686.
- [7] Wang M, Chen Y G. Generation and characterization of DOM in wastewater treatment processes [J]. Chemosphere, 2018, **201**: 96-109.
- [8] Bittar T B, Vieira A A H, Stubbins A, et al. Competition between photochemical and biological degradation of dissolved organic matter from the cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* [J]. Limnology and Oceanography, 2015, **60**(4): 1172-1194.
- [9] 任浩宇, 姚昕, 马飞扬. 微生物降解影响下湖泊草原 DOM 与重金属的相互作用 [J]. 中国环境科学, 2020, **40**(11): 4989-4997.
Ren H Y, Yao X, Ma F Y. The interaction between macrophytes-derived dissolved organic matter and heavy metal under the influence of microbial degradation [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(11): 4989-4997.
- [10] Xu H C, Guan D X, Zou L, et al. Contrasting effects of photochemical and microbial degradation on Cu(II) binding with fluorescent DOM from different origins [J]. Environmental Pollution, 2018, **239**: 205-214.
- [11] Yang L Y, Chen W, Zhuang W E, et al. Characterization and bioavailability of rainwater dissolved organic matter at the southeast coast of China using absorption spectroscopy and fluorescence EEM-PARAFAC [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, **217**: 45-55.
- [12] Dias A, Kurian S, Thayapurath S. Optical characteristics of colored dissolved organic matter during blooms of *Trichodesmium* in the coastal waters off Goa [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, **192**(8), doi: 10.1007/s10661-020-08494-w.
- [13] Stedmon C A, Markager S. Tracing the production and degradation of autochthonous fractions of dissolved organic matter by fluorescence analysis [J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50**(5): 1415-1426.
- [14] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50**(2): 686-697.
- [15] Shutova Y, Baker A, Bridgeman J, et al. Spectroscopic characterisation of dissolved organic matter changes in drinking water treatment: from PARAFAC analysis to online monitoring wavelengths [J]. Water Research, 2014, **54**: 159-169.
- [16] Zhou Y Q, Li Y, Yao X L, et al. Response of chromophoric dissolved organic matter dynamics to tidal oscillations and anthropogenic disturbances in a large subtropical estuary [J]. Science of the Total Environment, 2019, **662**: 769-778.
- [17] 张柳青, 彭凯, 杨艳, 等. 不同水文情景下洪泽湖、骆马湖有色可溶性有机物生物可利用性特征 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, **40**(1): 85-90.
Zhang L Q, Peng K, Yang Y, et al. The bioavailability characteristics of CDOM in Lake Hongze and Lake Luoma under different hydrological scenarios [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, **40**(1): 85-90.
- [18] 魏珈, 郭卫东, 王志恒, 等. 降雨事件对不同流域背景河流

- DOM 组成及入海通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(4): 737-744.
- Wei J, Guo W D, Wang Z H, *et al.* Impacts of storm event on DOM composition and flux in two Jiulong Tributaries with different watershed features [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(4): 737-744.
- [19] Hur J, Lee B M, Shin H S. Microbial degradation of dissolved organic matter (DOM) and its influence on phenanthrene-DOM interactions[J]. Chemosphere, 2011, **85**(8): 1360-1367.
- [20] Zhou L, Zhou Y Q, Yao X L, *et al.* Decreasing diversity of rare bacterial subcommunities relates to dissolved organic matter along permafrost thawing gradients [J]. Environment International, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105330.
- [21] 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4970-4980.
- Lian X Q, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Effect of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net Plain[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4970-4980.
- [22] Zhao Y, Song K S, Lv L L, *et al.* Relationship changes between CDOM and DOC in the Songhua River affected by highly polluted tributary, Northeast China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(25): 25371-25382.
- [23] Song K S, Shang Y X, Wen Z D, *et al.* Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis [J]. Water Research, 2019, **150**: 403-417.
- [24] Fichot 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] Murphy K R, Stedmon C A, Graeber D, *et al.* Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC [J]. Analytical Methods, 2013, **5**(23): 6557-6566.
- [26] Kothawala D N, Murphy K R, Stedmon C A, *et al.* Inner filter correction of dissolved organic matter fluorescence [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2013, **11**(12): 616-630.
- [27] 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.
- [28] Borisover M, Laor Y, Parparov A, *et al.* Spatial and seasonal patterns of fluorescent organic matter in Lake Kinneret (Sea of Galilee) and its catchment basin [J]. Water Research, 2009, **43**(12): 3104-3116.
- [29] Kowalczyk P, Durako M J, Young H, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fluorescence in the South Atlantic Bight with use of PARAFAC model: interannual variability [J]. Marine Chemistry, 2009, **113**(3-4): 182-196.
- [30] 李元鹏, 石玉, 张柳青, 等. 千岛湖有色可溶性有机物光谱学特征及环境指示意义 [J]. 环境科学学报, 2019, **39**(11): 3856-3865.
- Li Y P, Shi Y, Zhang L Q, *et al.* Spectral characteristics and environmental significance of chromophoric dissolved organic matter in Lake Qiandao, a large drinking water reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(11): 3856-3865.
- [31] 单森, 齐远志, 罗春乐, 等. 中国主要河流输送陆源碳的同位素特征及影响因素 [J]. 地球科学进展, 2020, **35**(9): 948-961.
- Shan S, Qi Y Z, Luo C L, *et al.* Carbon isotopic constrains on the sources and controls of the terrestrial carbon transported in the four large rivers in China [J]. Advances in Earth Science, 2020, **35**(9): 948-961.
- [32] 李玉强, 赵哈林, 陈银萍. 陆地生态系统碳源与碳汇及其影响机制研究进展 [J]. 生态学杂志, 2005, **24**(1): 37-42.
- Li Y Q, Zhao H L, Chen Y P. Advances in the study of terrestrial ecosystem carbon source, sink and affection mechanisms [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, **24**(1): 37-42.
- [33] Hosen J D, McDonough O T, Febria C M, *et al.* Dissolved organic matter quality and bioavailability changes across an urbanization gradient in headwater streams [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(14): 7817-7824.
- [34] 陈晓玲, 吴忠宜, 田礼乔, 等. 水体悬浮泥沙动态监测的遥感反演模型对比分析——以鄱阳湖为例 [J]. 科技导报, 2007, **25**(6): 19-22.
- Chen X L, Wu Z Y, Tian L Q, *et al.* Inversion model for dynamic monitoring of suspended sediment: a case study on Poyang Lake [J]. Science & Technology Review, 2007, **25**(6): 19-22.
- [35] Zhou Y Q, Liu M, Zhou L, *et al.* Rainstorm events shift the molecular composition and export of dissolved organic matter in a large drinking water reservoir in China: high frequency buoys and field observations [J]. Water Research, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116471.
- [36] Xu H C, Guo L D. Intriguing changes in molecular size and composition of dissolved organic matter induced by microbial degradation and self-assembly [J]. Water Research, 2018, **135**: 187-194.
- [37] Ni M F, Li S Y. Biodegradability of riverine dissolved organic carbon in a Dry-hot Valley Region: Initial trophic controls and variations in chemical composition [J]. Journal of Hydrology, 2019, **574**: 430-435.
- [38] Ogawa H, Amagai Y, Koike I, *et al.* Production of refractory dissolved organic matter by bacteria [J]. Science, 2001, **292**(5518): 917-920.
- [39] Wilson H F, Raymond P A, Saiers J E, *et al.* Increases in humic and bioavailable dissolved organic matter in a forested New England headwater stream with increasing discharge [J]. Marine and Freshwater Research, 2016, **67**(9): 1279-1292.
- [40] 张柳青, 石玉, 李元鹏, 等. 不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 [J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2149-2157.
- Zhang L Q, Shi Y, Li Y P, *et al.* Bioavailability characteristics of Chromophoric dissolved organic matter in lake Gaoyou, lake Nansi, and lake Dongping under different hydrological scenarios [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2149-2157.
- [41] Wickland K P, Aiken G R, Butler K, *et al.* Biodegradability of dissolved organic carbon in the Yukon River and its tributaries: Seasonality and importance of inorganic nitrogen [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, **26**(4), doi: 10.1029/2012GB004342.
- [42] Harris T D, Smith V H. Do persistent organic pollutants stimulate cyanobacterial blooms? [J]. Inland Waters, 2016, **6**(2): 124-130.
- [43] Kothawala D N, Ji X, Laudon H, *et al.* The relative influence of land cover, hydrology, and in-stream processing on the composition of dissolved organic matter in boreal streams [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, **120**(8): 1491-1505.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	(577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	(586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	(597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	(608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	(619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	(639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	(649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	(675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	(686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	(696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	(707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	(714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	(723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	(735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	(743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	(752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	(762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	(770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	(782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	(826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	(859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	(867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	(878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	(887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	(907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	(928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	(936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	(946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	(957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	(965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	(975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	(985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	(995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	(1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	(1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	(1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	(1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	(1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	(1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	(1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	(1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	(1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	(1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1108)