

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

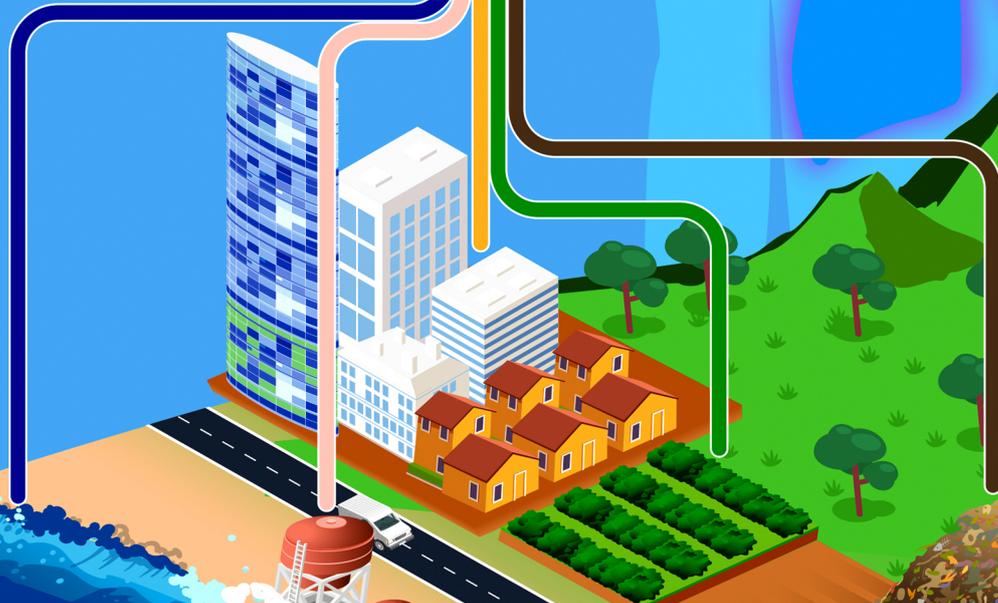
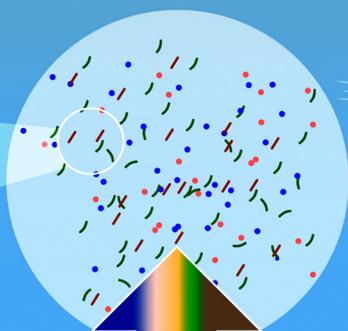
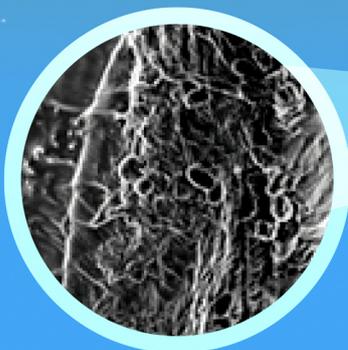
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2022年4月

第43卷 第4期

Vol.43 No.4



目次

2015~2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)

郑州市大气PM_{2.5}中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)

上海城区PM_{2.5}中有机组分及硝基芳化合物分布特征 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)

南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)

春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)

重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)

珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)

基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)

基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)

基于SOA和O₃生成潜势的杭州市PM_{2.5}和O₃协同控制 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 王鹏程, 袁勃, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)

西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)

基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 高宗源, 徐祀, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)

西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)

“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)

中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)

新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)

珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)

河套灌区浅层地下水NO₃⁻-N时空变化及驱动因素 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)

盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)

南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)

千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评估 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)

基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)

不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)

老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)

碳化泡沫负载Co₃O₄活化过硫酸盐降解罗丹明B 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)

低总氮浓度下Fe²⁺促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)

污水管道增强通风作用下氧气的传质特性 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)

长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 张义, 周心劝, 曾晓辉, 冯娇, 刘玉荣 (2062)

中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)

贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评估及控制因素 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评估 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)

安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)

伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)

地膜覆盖和生物炭添加对菜地N₂O排放的影响 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)

氮肥运筹对稻田CH₄和N₂O排放的影响 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)

松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)

棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)

pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)

生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)

有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)

《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素

陈丽丽^{1,2}, 肖启涛³, 俞晓琴^{1,2}, 陈慧敏^{1,2}, 周蕾^{2,4}, 周永强², 韩龙飞^{1*}

(1. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 2. 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; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 南京 210008; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 近几十年来,我国东部平原和丘陵区城市化快速发展,大量的工农业废水和生活污水被排入湖库,直接影响湖库水质和水生生态系统安全. 作为特大及大中型城市集中供水源地,湖库有色可溶性有机物(CDOM)来源组成极大程度影响着供水安全和城市居民生命健康. 通过2021年4月采集长潭水库(11个)、太湖(25个)、洪泽湖(18个)和高邮湖(14个)共68个样品,运用三维荧光光谱结合平行因子分析法(EEMs-PARAFAC)和室内生物培养实验对水体CDOM组成来源和生物可利用性特征进行分析. 结果表明,4个湖库溶解性有机碳(DOC)经28 d生物培养后其生物可利用性 ω (BDOC)均可达50%以上. PARAFAC分析得到4个荧光组分,分别是由农业活动作用的类腐殖酸C1、类色氨酸C2、类酪氨酸C3和C4,其中类蛋白质组分(C2+C3+C4)贡献率在洪泽湖可达(90.0±2.2)%. 洪泽湖荧光组分C1~C3均与TP存在显著相关关系,因而C1~C3可用于预测洪泽湖TP变化情况. 4个湖库CDOM的吸收系数 a_{254} 与DOC呈极显著正相关关系($R^2=0.96$, $P<0.01$),因而上述湖库可以利用 a_{254} 反演DOC浓度. 太湖腐殖化指数HIX较低,生物作用鲜活指数BIX较高,CDOM组成以内源自生作用为主,而其他湖库外源输入信号强烈. 增强4个湖库周边地区工农业废水和生活污水的排放监控,合理规划农业、旅游业和城镇建设,能有效保护湖库水质和水生态环境安全与健康.

关键词: 长潭水库; 太湖; 洪泽湖; 高邮湖; 有色可溶性有机物(CDOM); 平行因子分析(PARAFAC); 生物可利用性
中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1930-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108267

Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China

CHEN Li-li^{1,2}, XIAO Qi-tao³, YU Xiao-qin^{1,2}, CHEN Hui-min^{1,2}, ZHOU Lei^{2,4}, ZHOU Yong-qiang², HAN Long-fei^{1*}

(1. School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China; 3. Key Laboratory of Watershed Geographic Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Intensified urbanization has been occurring in the eastern region of China in recent decades, and excessive industrial and household sewage has been discharged into lakes and reservoirs, which has directly lowered water quality and destructed the functions of aquatic ecosystems. Lakes and reservoirs are typically drinking water sources supplying water for metropolitan areas as well as large- and medium-sized cities. Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) is the colored fraction of DOM, and its source and optical composition strongly affect water supply safety and the health of surrounding citizens. In April 2021, we collected 68 samples from Reservoir Changtan ($n=11$), Lake Taihu ($n=25$), Lake Hongze ($n=18$), and Lake Gaoyou ($n=14$), and we further carried out 28 days of laboratory bio-incubation, together with optical measurements and parallel factor analysis (EEMs-PARAFAC) to analyze the bio-degradability ω (BDOC), sources, and optical composition of CDOM in these waters. The results showed that after 28 days of laboratory bio-incubation, the bioavailability of dissolved organic carbon (BDOC) of the four lakes and reservoirs were all higher than 50%. PARAFAC results showed that CDOM collected from the four lakes was composed of four fluorescent components, including a terrestrial humic-like C1, a tryptophan-like C2, and tyrosine-like C3 and C4. Protein-like components (C2, C3, and C4) contributed importantly to the CDOM pool in the four waterbodies, and in Lake Hongze the contribution of C2-C4 was as high as (90.0±2.2)%. In Lake Hongze, total phosphorus (TP) correlated closely with C1-C3, indicating that those components can be used to trace the variability of TP. Among the four waterbodies, a_{254} was positively correlated with DOC ($R^2=0.96$, $P<0.01$), indicating that a_{254} can be used to estimate the dynamics of DOC in these waters. In Lake Taihu, we found a low level of humification index (HIX) and a high level of biological index (BIX), indicating that autochthonous substances contributed importantly to the CDOM pool in this lake. In comparison, allochthonous sources contributed importantly to the CDOM pool in the remaining three waters. The enhanced monitoring of the discharge of industrial and agricultural effluents in the upstream watersheds of the four waters can help to protect the water quality and maintain healthy aquatic ecosystems.

Key words: Reservoir Changtan; Lake Taihu; Lake Hongze; Lake Gaoyou; chromophoric dissolved organic matter (CDOM); parallel factor analysis (PARAFAC); bioavailability

收稿日期: 2021-08-24; 修订日期: 2021-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807362, 41807163); 江苏省自然科学基金项目(BK20181104); 中国科学院青年促进会项目(2021312); 中国科学院南京地理与湖泊研究所项目(E1SL002)

作者简介: 陈丽丽(1998~),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: 877494639@qq.com

* 通信作者, E-mail: hanlf@hnnu.edu.cn

湖泊和水库在防洪、航运、渔业养殖、旅游、维持水域生态系统平衡和提供人类生产生活用水等方面发挥着重要作用,是水生生态系统的重要组成部分^[1,2]。在我国,大型湖库通常是特大及大中型城市集中供水的水源地,如密云水库供给北京,青草沙水库供给上海,千岛湖供给杭州和嘉兴,于桥水库供给天津^[3,4]。近几十年来,我国经济迅速发展,城镇化水平显著提高,人类活动引起湖库的水质、水量和水生生态系统等发生了显著改变,影响流域周围居民的用水安全。

溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)是全球淡水系统中天然有机质的重要赋存形态及活性成分,也是陆地和水域之间能量与物质联系的纽带,具有复杂的分子结构,与水体的物理和化学特征息息相关^[5-7]。有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)是DOM中强烈吸收可见光和紫外光的部分,由一系列复杂有机类物组成^[8,9],能减少紫外辐射对水生生物的伤害^[10],经光降解与微生物降解后能释放大量无机碳氮磷等生源要素,为浮游生物提供养分^[11,12];另一方面,CDOM能影响有害有毒物质的生物有效性以及痕量重金属的迁移和转化^[13]。水体中存在过量CDOM会使得水体呈酸臭味,在水处理过程中损坏处理设施并产生大量致癌物质,影响用水安全与居民生命健康^[14]。溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)是指胶体有机物质中能通过孔径为0.7 μm滤膜的碳,常用以表征DOM的总含量,与水体中微生物的生命活动密切相关,是表征水体有机物浓度和水质的一个重要参数^[15]。DOC的生物可利用性(biodegradable of dissolved organic carbon, BDOC)是指在一定时间段(28d)能够被微生物分解利用(呼吸作用和有机碳矿化作用等)的那部分DOC,微生物在降解过程中会释放温室气体和营养物质,进而对水体富营养化和碳循环过程产生影响^[16,17]。因此,明确湖库CDOM来源、分布特征和生物可利用性对于维系水生生态系统平衡和水质安全具有重要作用。

近年来,三维荧光光谱(EEMs)被较为广泛地应用于研究CDOM来源组成,通过组分荧光强度的变化可以有效揭示CDOM光谱组成变化^[18]。大型湖库作为大型城市重要的集中型饮用水供水水源地,其CDOM来源组成对周边地区人畜用水安全与生命健康息息相关。目前,对于东部地区湖泊CDOM来源的研究大都侧重于讨论丰枯情景下单个湖库CDOM的来源及其组成^[19-21]。因此,对于东部地区受不同人类活动影响程度、不同营养水平湖库

CDOM组成及其来源进行研究,并对同期多个湖库进行比较就显得尤为重要。本研究在2021年4月对长潭水库、太湖、洪泽湖和高邮湖进行水样采集,这4个湖库CDOM来源组成及生物可利用性直接影响周边无锡、苏州、湖州、台州、盱眙和高邮等多个大中型城市居民用水安全与生命健康。本文试图通过分析比较湖库间水质参数、CDOM光谱组成及其空间分布特征,揭示4个湖库间CDOM来源的异同及潜在影响机制,丰富我国湖库的CDOM及水环境相关资料,以期为保护水生生态系统平衡和水质安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

长潭水库隶属于浙江省,主要入库河流为永宁江、柔极溪和黄岩溪等,正常蓄水水位33 m,库容3.3亿m³,集雨区面积441.3 km²,是一座结合防洪、灌溉和发电等多项功能为一体的大型水库,周边大部分城镇以传统农业为主。太湖位于长江三角洲,湖面面积2338 km²,是我国第三大淡水湖,夏秋季常发生水华暴发事件,水体富营养化现象严重。洪泽湖分属于江苏省淮安市和宿迁市,是南水北调东线的组成部分,淮河、徐洪河和汴河等是其主要入湖河流,近些年由于人类活动,湖泊面积逐渐缩小。高邮湖又名新开湖,行政上分属于江苏省和安徽省,湖泊面积760 km²,在全国淡水湖中排名第六,由于受围网养殖和农业活动污染,其水质状况不容乐观。这4个湖库作为周边城镇的饮用水水源地,影响着周边地区经济发展和用水安全,因此保证湖库水质安全工作至关重要。

1.2 样品采集与处理

2021年4月分别在长潭水库、太湖、洪泽湖和高邮湖布设11、25、18和14个采样点(图1)进行采样。取30 mL原水用以测定总氮(TN)和总磷(TP)。30 mL原水通过直径47 mm的Whatman GF/F滤膜以测定溶解性有机碳(DOC)、铵态氮(NH₄⁺-N)和正磷酸盐(PO₄³⁻-P)等水质参数。使用Millipore滤膜(0.22 μm孔径)过滤80 mL原水,其中50 mL滤后水用于进行生物培养实验,30 mL滤后水用以测定CDOM三维荧光光谱和吸收光谱。

1.3 DOC浓度及主要水质参数测定

将滤后水置于日本岛津公司生产的总有机碳分析仪(TOC-L)中,在气压(200 ± 10) kPa、温度680℃的高温环境下催化燃烧以测定DOC浓度^[22]。将装有原水的试管放在高压灭菌锅内,在高温环境下(120℃)消煮40 min,之后采用Shimadzu UV-

2550PC UV-Vis 分光光度计测定总氮(TN)和总磷(TP). 利用连续流动式分析仪(荷兰 Skalar SAN + +)测定硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、亚硝态氮(NO_2^- -N)和正磷酸盐(PO_4^{3-} -P)^[23].

1.4 生物培养实验

将 50 mL 经过 0.22 μm 孔径 Millipore 滤膜的滤后水放于高温灭菌的棕色培养瓶中,另加入 1 mL 原水作为菌种,等比例加入 1 mL 营养盐使瓶中 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 分别提升至 80 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以防止培养过程中氮磷等营养盐限制^[24],将水样摇匀,拧开盖子保存在室温环境中培养 28 d (每日摇晃多次). 培养结束后将水样用 Millipore 滤膜(0.22 μm) 进行处理以测定 DOC 浓度. 培养前后 DOC 相减即为 BDOC, BDOC 与培养前 DOC 的比值即为 $\omega(\text{BDOC})$.

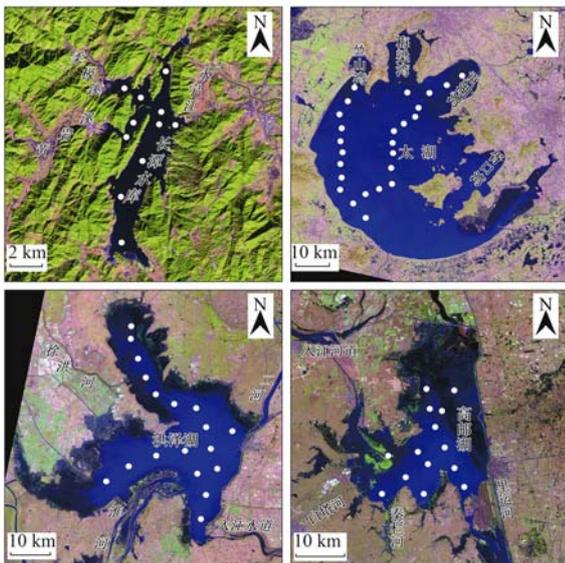


图 1 长潭水库、太湖、洪泽湖和高邮湖采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Reservoir Changtan, Lake Taihu, Lake Hongze, and Lake Gaoyou

1.5 紫外-可见吸收光谱参数测定

将路径长度 5 cm 的比色皿放于 Shimadzu UV-2550PC UV-Vis 分光光度计中以测定 CDOM 的吸光度,以 Milli-Q 超纯水为参照,设置测定范围为 200 ~ 800 nm (间隔 1 nm),各波长吸光度数值减去 700 nm 处数值以消除散射效应,使用公式(1)计算吸收系数^[25]:

$$a_{\lambda} = 2.303 \times D_{\lambda} / r \quad (1)$$

式中, a_{λ} 为波长 λ 的吸收系数 (m^{-1}), D_{λ} 为消除散射效应后的吸光度, r 为光程路径 (m). 吸收系数 a_{254} 常用来表示 CDOM 的相对浓度^[26]. $S_{275-295}$ 为吸收光谱斜率,其数值与 CDOM 芳香性呈反比例关系^[27]. 比紫外系数 SUVA_{254} 用于表征 CDOM 芳香性水平^[28]. $a_{250} : a_{365}$ 用来表征 CDOM 分子的相对大

小,其值与 CDOM 分子大小呈反比例关系.

1.6 三维荧光光谱测定

使用 F-7000 三维荧光扫描仪(日本日立)测定 CDOM 三维荧光光谱 (EEMs),激发和发射光谱范围分别设定为 200 ~ 450 nm (5 nm 间隔)和 250 ~ 600 nm (1 nm 间隔),拉曼散射的校正通过所测水样荧光光谱减去当日所测超纯水予以实现,瑞利散射峰采用 drEEM 工具包裁剪后运用线性插值的方法予以消除,并利用各样品三维荧光光谱激发发射波长处的吸光度来校正内滤波效应^[29]. 腐殖化指数 (HIX) 和荧光峰积分比值 $I_c : I_T$ 能表征 CDOM 的腐殖化程度,其值与腐殖化程度呈正相关关系^[30]. 生物作用鲜活指数 (BIX) 表征内源 CDOM 的贡献程度,数值越大,表示内源作用对 CDOM 贡献越大^[31].

1.7 平行因子分析

采用 MATLAB R2015b 的 drEEM 工具进行 PARAFAC 分析,共选取 68 个(长潭水库 11 个、太湖 25 个、洪泽湖 18 个和高邮湖 14 个)EEMs 矩阵进行运算. 最终确定 4 个组分模型能很好地通过对半检验、残差分析以及随机初始化检验. 每个荧光组分的最大荧光强度 (F_{max}) 用以表征相应荧光组分浓度^[32].

1.8 数据处理

该文使用 ArcGIS 10.2 绘制采样点位图和空间插值图,利用 IBM SPSS Statistics 25 进行平均值、标准差和均值间差异显著性水平 t 检验 (t -test) 等数据统计分析,使用 Origin 9.1 绘制图表.

2 结果与分析

2.1 主要水质参数及 a_{254} 特征

DOC 浓度呈现出高邮湖 > 洪泽湖 > 太湖 > 长潭水库的规律(图 2),长潭水库 $\rho(\text{DOC})$ 平均值为 $(2.1 \pm 0.3) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,极显著低于高邮湖 $\rho(\text{DOC})$ 平均值 $[(7.6 \pm 0.7) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}, P < 0.001, t$ -test, 下同],这表明比起其他 3 个湖库,长潭水库受到人类扰动较小,有机物污染风险小. 洪泽湖 $\rho(\text{DOC})$ 为 $5.7 \sim 8.1 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,较其他湖库来说波动较大 ($P < 0.001$). 太湖和高邮湖的 TN 浓度较高,且与长潭水库和洪泽湖存在显著性差异 ($P < 0.001$),但太湖 $\rho(\text{TN})$ 的波动较大 ($1.6 \sim 2.9 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 同时,太湖 TP 浓度与其他湖库存在显著差异 ($P < 0.005$). 此外,太湖 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 PO_4^{3-} -P 浓度高于其他湖库,而洪泽湖此 4 项指标的波动较大 ($P < 0.05$). 值得一提的是,4 个湖库 $\rho(\text{PO}_4^{3-}$ -P) 均很低且无显著性差异,平均值最高为太湖 $[(4 \pm 7) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}]$. 高邮湖的 a_{254} 平均值为 $(21.1 \pm 1.7) \text{m}^{-1}$,

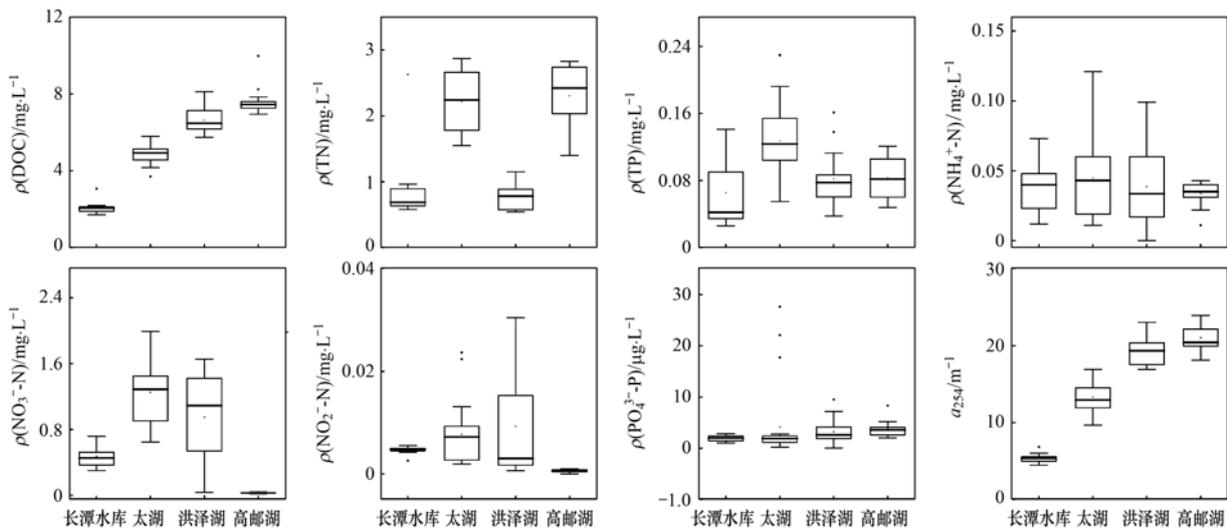


图2 东部地区大型湖库主要水质参数和 CDOM 吸收系数 a_{254}

Fig. 2 Water quality parameters and CDOM absorption a_{254} of the four studied lakes and reservoirs in the eastern region of China

显著高于长潭水库、太湖和洪泽湖 ($P < 0.05$), 呈现出高邮湖 > 洪泽湖 > 太湖 > 长潭水库的规律, 这说明高邮湖 CDOM 的浓度要显著高于其他 3 个湖库. 此外, 太湖、洪泽湖和高邮湖的波动范围较大, 而长潭水库的波动范围较小 ($4.5 \sim 6.8 \text{ m}^{-1}$).

2.2 DOC 生物可利用性特征

经过 28d 生物培养后, 长潭水库、太湖、洪泽湖和高邮湖的 DOC 浓度均显著降低 ($P < 0.001$, 图 3), $\omega(\text{BDOC})$ 分别可达 53.9%、53.3%、58.4% 和 56.2%. 高邮湖 $\rho(\text{BDOC})$ 平均值为 $(4.3 \pm 0.8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 极显著高于洪泽湖和长潭水库 ($P < 0.001$), 但与太湖并无显著性差异. 太湖的 $\omega(\text{BDOC})$ 显著低于洪泽湖和高邮湖 ($P < 0.05$), 其余湖库间无明显差异. 值得一提的是, 高邮湖 DOC 浓度在生物培养前后均较高, 但 BDOC 并不是最高的, 而长潭水库生物培养前后 DOC 浓度均较低, 但 BDOC 与其他湖库并无显著差异, 这表明 DOC 微生物降解速率与其浓度相关性并不是很大.

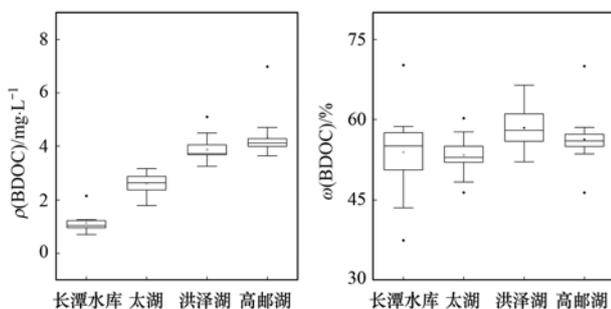


图3 BDOC 和 %BDOC 的变化特征

Fig. 3 Variability in BDOC and %BDOC in the eastern region of China

2.3 CDOM 光学参数特征

东部地区 4 个湖库的 $S_{275-295}$ 也表现出: 高邮湖

> 洪泽湖 > 太湖 > 长潭水库 (图 4), 而且高邮湖波动范围很大 ($19.1 \sim 23.6 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$), 与长潭水库和太湖存在显著性差异 ($P < 0.05$), 但长潭水库、太湖和洪泽湖之间无显著性差异, 这说明长潭水库 CDOM 组成受外源输入影响较大. 高邮湖 $a_{250} : a_{365}$ 数值范围为 $(5.3 \sim 9.5)$, 波动范围较其他湖库更大; 长潭水库的 $a_{250} : a_{365}$ 显著小于太湖、洪泽湖和高邮湖 ($P < 0.01$), 但太湖、洪泽湖和高邮湖之间并无显著性差异, 这表明长潭水库 CDOM 分子较其他湖库大, 陆源输入信号强烈, 与 $S_{275-295}$ 指标反映的事实相一致. 洪泽湖的 SUVA_{254} 均值为 $(2.9 \pm 0.2) \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$, 显著高于长潭水库、太湖和高邮湖 ($P < 0.005$), 而太湖的波动范围较大 [$(2.4 \sim 3.1) \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$], 且与长潭水库和高邮湖无显著差异. SUVA_{254} 能表征 CDOM 芳香性水平和腐殖化程度, 表明与其他湖库相比, 洪泽湖 CDOM 芳香性水平较高.

高邮湖水体的腐殖化指数 HIX 平均值为 1.8 ± 0.3 , 极显著高于长潭水库、太湖和洪泽湖 ($P < 0.001$), 呈现出高邮湖 > 洪泽湖 > 长潭水库 > 太湖的规律. 除此之外, 长潭水库、高邮湖和太湖也表现出明显的差异 ($P < 0.05$). $I_C : I_T$ 是类腐殖酸 C 峰与类蛋白 T 峰积分值之比, 能很好地表征 CDOM 芳香性和腐殖质化程度. 高邮湖 $I_C : I_T$ 的平均值为 7.9 ± 1.3 , 极显著地高于长潭水库、太湖和洪泽湖 ($P < 0.001$), 表现出和腐殖化指数 HIX 一样的特征, 但长潭水库和洪泽湖的 $I_C : I_T$ 值并无显著差异. 太湖生物作用鲜活指数 BIX 的平均值为 1.2 ± 0.1 , 极显著地高于长潭水库、洪泽湖和高邮湖 ($P < 0.001$), 但长潭水库、洪泽湖和高邮湖间无显著差异, 说明

太湖内源作用信号强烈. 长潭水库、高邮湖和洪泽湖 BIX 的范围分别为 0.9 ~ 1.1、0.9 ~ 1.0 和 1.0 ~

1.1, 表明长潭水库、高邮湖和洪泽湖 CDOM 组成可能受内源作用和外源输入共同影响.

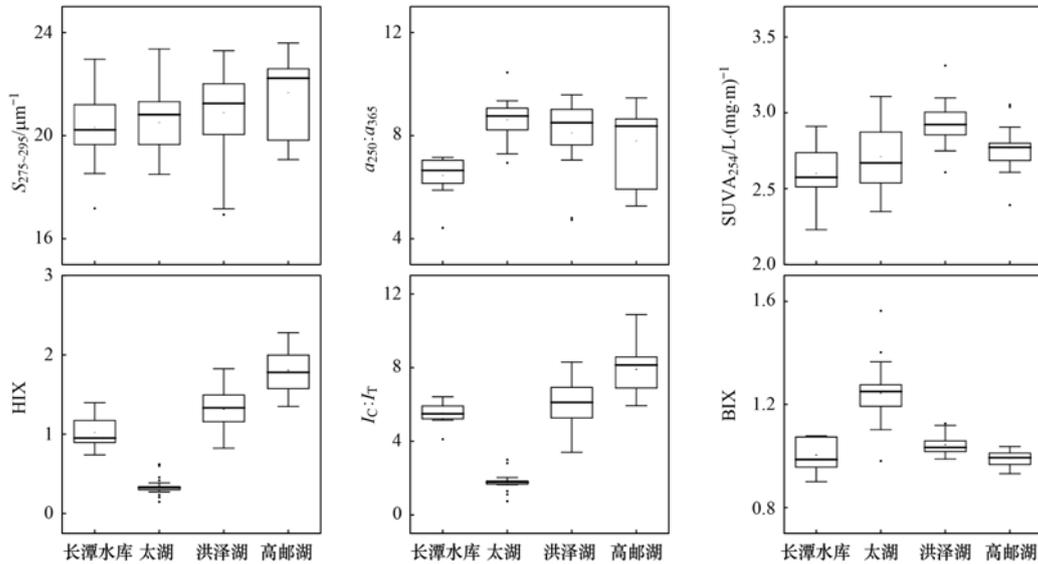


图 4 东部地区湖库水体 CDOM 参数变化特征

Fig. 4 Characteristic of CDOM-related parameters in lakes and reservoirs in the eastern region of China

2.4 三维荧光光谱特征

根据 PARAFAC 模型分析结果, 最终得到 4 个荧光组分 (图 5). C1 有一个激发波长最大值 ($E_x \leq 230$ nm) 和一个发射波长最大值 ($E_m = 428$ nm), 判断该组分为农业活动作用的类腐殖酸^[33]. C2 有两个激发波长最大值 ($E_x \leq 230$ nm/290 nm) 和一个发射波长最大值 ($E_m = 340$ nm), 判断该组分为类色氨酸^[34]. C3 有一个激发波长最大值 ($E_x = 275$ nm) 和一个发射波长最大值 ($E_m = 316$ nm), C4 有两个激发波长最大值 ($E_x \leq 230$ nm/270 nm) 和一个发射波长最大值 ($E_m \leq 300$ nm), 判断 C3 和 C4 均为类酪氨酸^[35]. C2、C3 和 C4 均属内源类蛋白组分, 主要与生活废水排放和微生物降解有关.

长潭水库、太湖、洪泽湖和高邮湖的类蛋白组

分相对丰度 ($C2 + C3 + C4$) % 较大, 分别为 (75.2 ± 1.4) %、(90 ± 2.2) %、(87.2 ± 4.6) % 和 (69.4 ± 2.3) %, 类腐殖酸 C1 相对丰度均较小, 尤其是太湖和洪泽湖类腐殖酸 C1 相对丰度仅为 (10 ± 0.1) % 和 (12.8 ± 0.1) %, 四大湖库 CDOM 组分均以类蛋白质组分为主, 这主要是由于水体受到微生物分解作用或者生活污水排放的影响.

长潭水库北部地区的类腐殖酸 C1 的荧光强度显著高于中部和南部, 而类酪氨酸 C3 和 C4 的荧光强度表现为南部地区最高 (图 6). 太湖的类腐殖酸 C1 荧光强度从敞水区向南北湖区逐渐升高, 类色氨酸 C2 和类酪氨酸 C3 呈现出从梅梁湾和贡湖湾向西南湖区逐渐升高的趋势, 而类酪氨酸 C4 荧光强度表现为从西南湖区向东北湖区逐渐升高. 洪泽湖

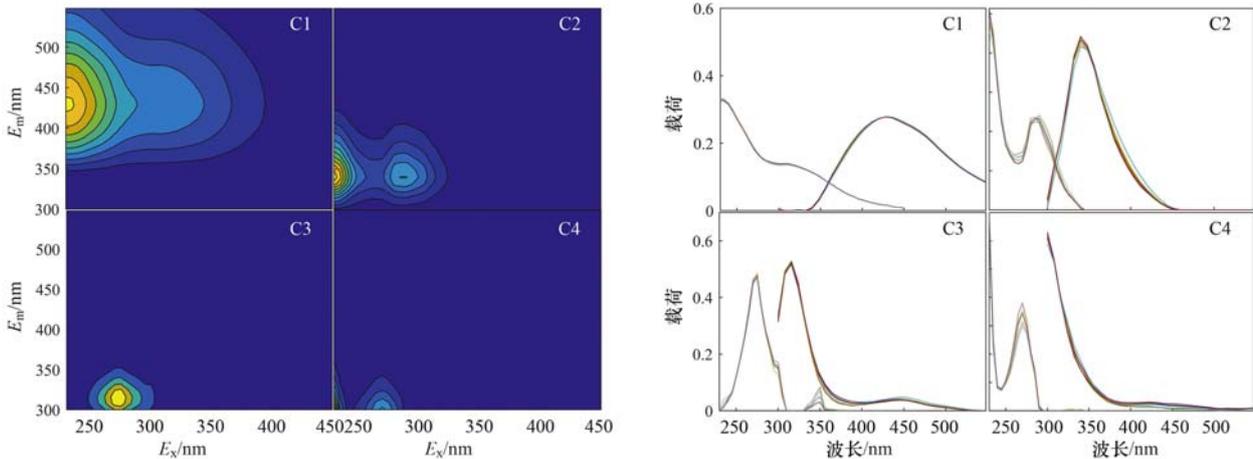


图 5 荧光组分荧光光谱和对半检验结果

Fig. 5 Fluorescent spectra of the four PARAFAC components identified using PARAFAC and split-half validation results

类色氨酸 C2 和类酪氨酸 C3 呈现出从南部湖区向北部湖区逐渐变大的趋势, 而类腐殖酸 C1 的荧光强度表现为从北向南逐渐升高. 高邮湖西南湖区各

荧光组分的荧光强度与湖区其他部分相比较, 荧光强度数值均较高, 这可能是由于西南湖区入湖河流较多, 其上游水质影响水体 CDOM 组成.

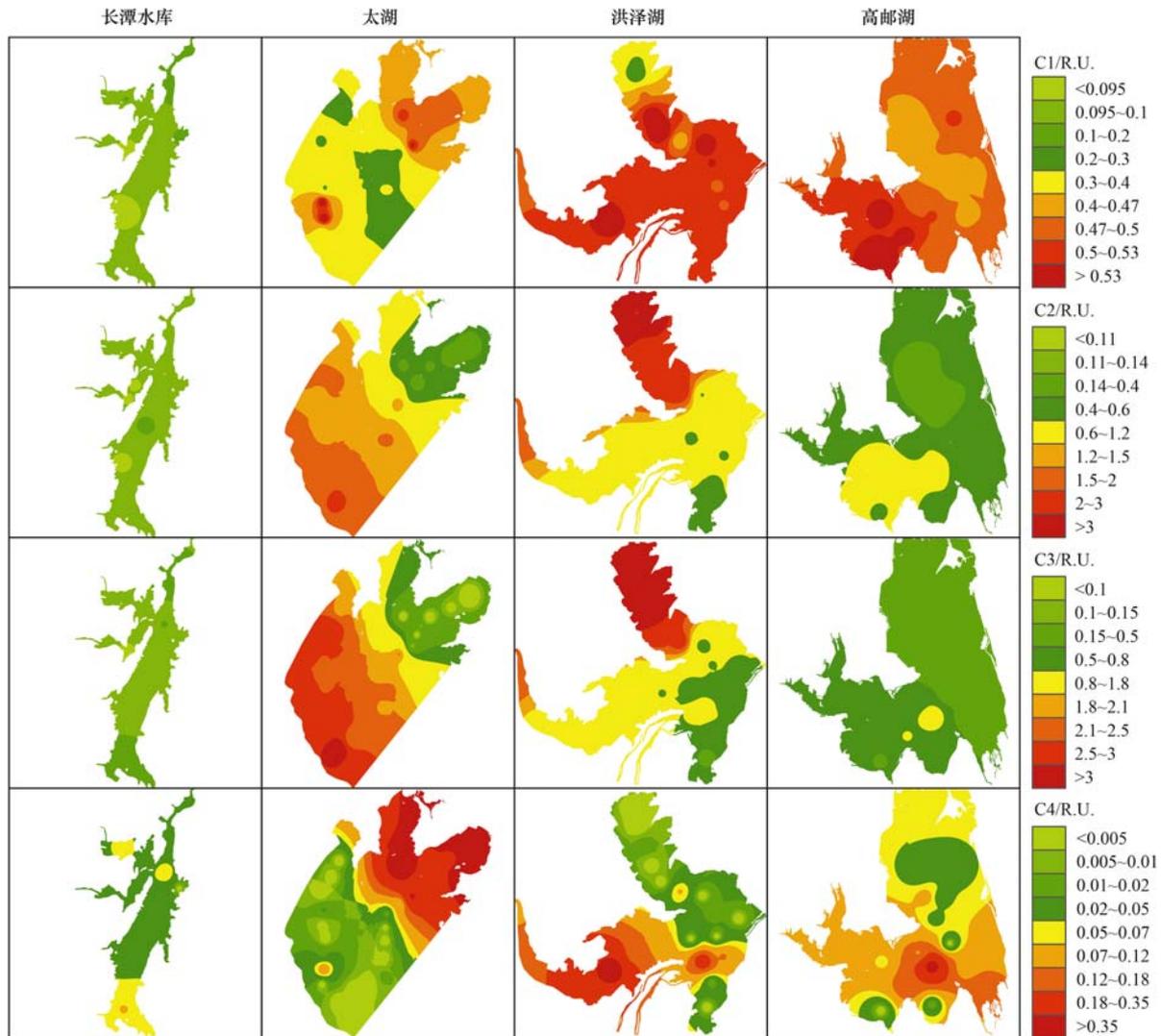


图 6 长潭水库、太湖、洪泽湖和高邮湖 4 种组分荧光强度空间分布

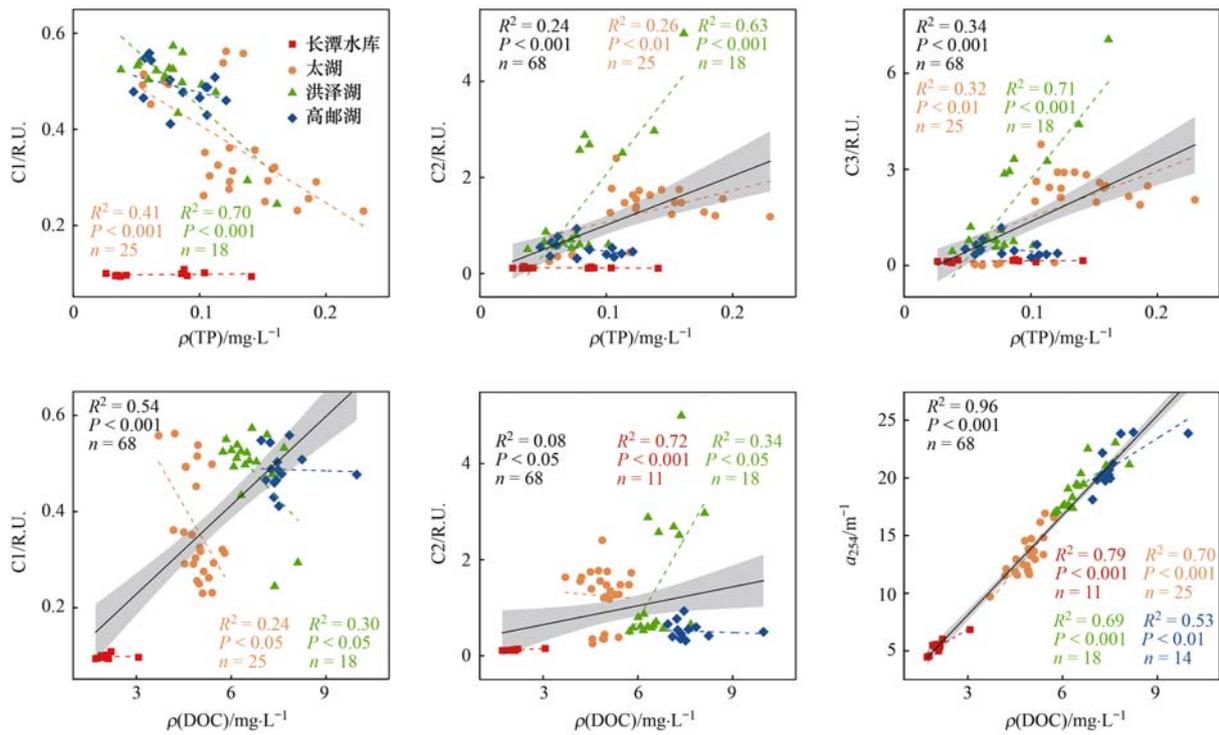
Fig. 6 Spatial distribution of fluorescence intensity of four components in the four studied lakes and reservoirs

高邮湖的类腐殖酸 C1 的荧光强度极显著地高于长潭水库和太湖 ($P < 0.001$), 这说明与其他湖库相比, 高邮湖的 CDOM 组成受农业活动影响较大. 长潭水库的类色氨酸 C2 和类酪氨酸 C3 荧光强度极显著地低于其他 3 个湖库 ($P < 0.001$), 这说明与其他湖库相比, 长潭水库 CDOM 组成受微生物分解作用或生活污水的影响较小. 由于 4 个湖库类酪氨酸 C4 的数值均较小, 因此并无显著性差异. 对比 4 个湖库 CDOM 组分荧光强度的空间分布, 可以发现与其他湖库相比, 长潭水库 CDOM 各组分荧光强度均较低; 洪泽湖类腐殖酸 C1 的相对丰度仅为 $(12.8 \pm 0.1)\%$, 但是其荧光强度的高值较多.

2.5 荧光组分、水质参数和吸收系数相关性分析

对东部地区 4 个湖库的 4 个荧光组分、TP、

DOC 和 a_{254} 进行相关性分析, 本研究除了进行单个湖库的拟合, 还增加了整体拟合 (图 7). 洪泽湖的类腐殖质 C1 与 TP 呈极显著的负相关关系, 而类色氨酸 C2 和类酪氨酸 C3 与 TP 有着极好的正相关关系. 太湖的各个荧光组分与 TP 之间也存在着一定的相关性, 但是拟合度较差. 长潭水库的类色氨酸 C2 与 DOC 表现出极好的线性拟合度 ($R^2 = 0.72$). 值得一提的是, 四大湖库无论是分开拟合还是整体拟合, a_{254} 和 DOC 的线性拟合度极好, 表现出显著的正相关关系 ($R^2 = 0.96$). 从整体上看, 4 个湖库各项指标的整体拟合结果并不理想, 这可能是由于 4 个湖库之间地形、气候和植被等各有特点, 水体各项指标间存在较大差异.



黑色实线表示 4 个湖库整体相关性分析, 阴影部分表示的是 4 个湖库整体拟合时 95% 置信区间

图 7 太湖、洪泽湖、高邮湖和长潭水库总磷 TP 与 3 个荧光组分 C1 ~ C3 和 DOC 与 C1 ~ C2 和 a_{254} 的相关性分析

Fig. 7 Correlations between TP and PARAFAC components C1-C3, DOC, and C1-C2, a_{254} for the samples collected from the four lakes and reservoirs in the eastern region of China

3 讨论

3.1 4 个湖库 CDOM 组成结构特征、生物可利用性及影响因素

通常情况下,天然湖泊 CDOM 主要以陆源类腐殖质输入贡献为主^[36],而长潭水库、太湖、洪泽湖和高邮湖均表现出类蛋白质组分贡献率大于类腐殖质型,CDOM 组成以类蛋白质为主.有研究表明人类活动排放的生活污水、工业废水和微生物对死亡的水生植物和藻类的分解作用会使得湖库水体中类蛋白质组分信号强烈^[37, 38],因此 4 个湖库类蛋白组分较高可能与湖库周围人类活动排放的生活、工业废水有关.本研究采样时间是在 4 月(枯水期),降水量和入湖河流水量较小,水体交换速率缓慢,对微生物代谢产物的稀释作用较弱,影响水体 CDOM 组成结构,这与东部平原其他湖库研究结果相一致. Shi 等^[39]的研究发现天目湖降水量增多会降低水体 CDOM 组分的荧光强度.张柳青等^[40]研究高邮湖、南四湖和东平湖发现枯水期 CDOM 荧光强度高于丰水期.根据空间分布插值图和荧光强度结果,高邮湖由农业活动作用的类腐殖酸 C1 要显著高于其他湖库, C1 贡献率达 30.6%,这可能是由于高邮湖周边城镇发展种植业和水产养殖^[41],大量农药、化肥、饲料和动物粪便等通过降水和入湖河流带入湖

泊,影响水体 CDOM 组成.太湖腐殖化指数 HIX 显著低于其他 3 个湖库,但生物作用鲜活指数 BIX 显著大于其他湖库且 > 1 ,表明春季(枯水期)太湖 CDOM 组成受内源自生作用较为强烈,这与王聪颖等^[42]的研究结果相一致,其他 3 个湖库外源输入信号强烈.

经 28 d 生物培养实验发现,4 个湖库 DOC 生物有效性最高可达 58.4%,这意味着水体中很大一部分 DOC 能快速被微生物降解利用.有研究发现,水体芳香性程度与 DOC 生物可利用性呈负相关^[43, 44],根据本研究中 4 个湖库 $SUVA_{254}$ 和 $a_{250}:a_{365}$ 数值结果,表明 4 个湖库水体芳香化程度均较低,这可能是由于枯水期地表径流较小,携带入湖的陆源类腐殖酸较少.郭燕妮等^[45]的研究发现鄱阳湖枯水期受人类生活污水排放影响,水体 DOC 和类蛋白组分生物利用性较高.在本研究中,4 个湖库枯水期降水量小,对周围人类活动排放的工农业及生活污水稀释作用较弱,CDOM 组成均以类蛋白组分为主,微生物降解过程中会优先利用 DOC 中具有较低碳氮比的类蛋白质^[46]且有机碳降解过程中所受营养限制小,再加上枯水期水体交换速率慢,为微生物降解作用提供了相对稳定的环境,DOC 生物利用性较高.上述 4 个湖库中高 BDOC 意味着湖库水体中大量有机碳及碳链上富含的氮磷等生源物质在湖库

内运移过程中不断矿化为无机盐并进入生态系统食物链中,从而加速湖库富营养化进程^[47].同时,DOC作为水生系统中的有机碳库,其降解过程会产生大量温室气体(CO₂和CH₄等),影响气候变化及生态系统的碳平衡和碳循环^[48].

3.2 荧光光谱在水体监测中的应用

有研究表明水体CDOM的荧光组分与N和P等元素有显著的相关性,如Zhang等^[49]的研究发现云贵高原高山湖泊的类腐殖质组分与TN和TP存在显著的正相关关系;冯可心等^[50]的研究发现丹江口水库类色氨酸组分和陆源类腐殖质组分与TN和TP呈显著正相关.在本研究中,洪泽湖类腐殖质C1与TP存在显著负相关关系,类色氨酸C2和类酪氨酸C3与TP存在显著正相关关系,这表明在一定程度上可以利用荧光组分对洪泽湖的TP变化情况进行预测,以期监测水体的水质变化情况.长潭水库DOC与类色氨酸C2有着显著的正相关关系,这意味着枯水期在长潭水库可以用类色氨酸C2的荧光强度来预测DOC浓度.

目前,关于DOC浓度与CDOM相对浓度的反演已经取得许多成果.Matsuoka等^[51]对北冰洋CDOM研究结果显示,北冰洋东部CDOM浓度与DOC浓度呈显著正相关关系;Xu等^[52]对鄱阳湖的研究发现CDOM吸收系数可以有效地指示鄱阳湖DOC浓度;张运林等^[53]的研究发现冬季梅梁湾和大太湖CDOM吸收系数与DOC浓度有极好的相关性.在本研究中,4个湖库在枯水期无论是分开拟合还是整体拟合,CDOM吸收系数 a_{254} 与DOC都表现出显著的正相关关系,这意味着4个湖库在枯水期可以利用CDOM浓度反演DOC浓度.

3.3 CDOM空间分布及环境指示意义

长潭水库上游各组分荧光强度要显著高于库区其他部分,这主要是由于上游集水区(屿头乡和北洋镇等)以第一产业为主且人口密集^[54],水体CDOM组成受农业面源污染和生活污水影响较大.太湖类腐殖质C1荧光强度自敞水区向南北湖区逐步升高,这主要是由于类腐殖质随入湖河流进入太湖,对入湖口水体CDOM组成影响较大,敞水区影响较小,这与Zhou等^[55]的研究结果相一致.太湖类腐殖质C1在敞水区荧光强度变低,但类蛋白质组分荧光强度较高,这主要是由于在敞水区经微生物分解作用产生了新的类蛋白质^[56].洪泽湖北部湖区类蛋白荧光强度显著高于其他湖区,这可能是由于洪泽湖北部湖区相对封闭,水体更新速率慢,湖区周围人口城镇密集,受工农业废水和生活污水影响较大^[57].刘超等^[58]的研究发现洪泽湖周围地区近些

年来水田和围网养殖面积增多,农户采用传统施肥方式,大量饲料、动物粪便以及农药和化肥等化学物质随土壤淋溶和入湖河流进入湖泊,这可能是使洪泽湖较其他湖库类腐殖质C1荧光强度高的原因.高邮湖是过水型湖泊,上游河水的水质会直接影响湖泊的CDOM组成,根据刘改妮等^[59]的研究,高邮湖西南湖区的主要入湖河流(淮河)沿线经过众多城镇,人口密集且围网养殖面积较大,入湖河流承接了很多工农业和生活污水,使其西南湖区各组分荧光强度高于其他湖区.

总体来说,4个湖库的水体CDOM组成或多或少地受到农业面源污染以及生活污水和工业废水的影响,长期以往会影响湖库生态系统和水质安全,作为大中小型城市的饮用水水源地,4个湖库周边地区必须严格控制污水排放,改善农业生产方式,合理规划城镇及工厂建设,从而减少人类活动对湖库的影响,降低湖库水体污染的风险.

4 结论

(1)经生物培养后,4个湖库DOC浓度显著下降, ω (BDOC)均达50%以上,水体中很大一部分有机碳能被微生物利用,降解过程中产生温室气体和无机盐,影响水体富营养化进程和碳循环.4个湖库CDOM组成包括农业活动作用的类腐殖质C1、类色氨酸C2和类酪氨酸C3、C4,类蛋白质是四大湖库CDOM的主要组成物质.

(2)洪泽湖类腐殖质C1与TP存在显著负相关关系,类色氨酸C2和类酪氨酸C3与TP存在显著正相关关系,在一定程度上可以利用荧光组分对洪泽湖的TP变化情况进行预测.4个湖库吸收系数 a_{254} 能很好地指示DOC浓度,可以利用吸收系数 a_{254} 反演DOC浓度.

(3)太湖腐殖化指数HIX较低,生物作用鲜活指数BIX较高,CDOM组成以内源自生作用为主,而其他湖库以外源输入为主.4个湖库水体CDOM组成在枯水期受人类活动影响较大,承接了很多工农业废水和生活污水.

致谢:张成英和齐天赐等同志协助野外调查和室内分析,谨表谢意.

参考文献:

- [1] 杨桂山,马荣华,张路,等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J].湖泊科学,2010,22(6):799-810.
Yang G S, Ma R H, Zhang L, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 799-810.
- [2] 周蕾,周永强,张运林,等.重要饮用水源地天目湖库有色可溶性有机物来源与组成特征[J].环境科学,2021,42(8):3709-3718.

- Zhou L, Zhou Y Q, Zhang Y L, *et al.* Characterizing sources and composition of chromophoric dissolved organic matter in a key drinking water Reservoir Lake Tianmu [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3709-3718.
- [3] 陈吉吉, 徐蘇士, 赵靓, 等. 北京密云水库流域水体夏季 POM 浓度及来源分析[J]. *地球与环境*, 2021, **49**(2): 157-163.
- Chen J J, Xu S S, Zhao L, *et al.* Concentration and source identification of particulate organic matter in the Miyun Reservoir watershed (Beijing) in Summer [J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(2): 157-163.
- [4] 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.
- [5] Hassett J P. Dissolved natural organic matter as a microreactor [J]. *Science*, 2006, **311**(5768): 1723-1724.
- [6] 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.
- [7] Leenheer J A, Nanny M A, McIntyre C. Terpenoids as major precursors of dissolved organic matter in landfill leachates, surface water, and groundwater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(11): 2323-2331.
- [8] Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption characteristics in relation to fluorescence in Lake Taihu, China, a large shallow subtropical lake [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 43-52.
- [9] Coble P G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color [J]. *Chemical Reviews*, 2007, **107**(2): 402-418.
- [10] Hu B, Wang P F, Qian J, *et al.* Characteristics, sources, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in large and shallow Hongze Lake, China [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, **43**(6): 1165-1172.
- [11] Zhou Y Q, Xiao Q T, Yao X L, *et al.* Accumulation of terrestrial dissolved organic matter potentially enhances dissolved methane levels in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(18): 10297-10306.
- [12] Lapierre J F, Frenette J J. Effects of macrophytes and terrestrial inputs on fluorescent dissolved organic matter in a large river system [J]. *Aquatic Sciences*, 2009, **71**(1): 15-24.
- [13] Zhang Y L, Van Dijk M A, Liu M L, *et al.* The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence [J]. *Water Research*, 2009, **43**(18): 4685-4697.
- [14] Wang M, Chen Y G. Generation and characterization of DOM in wastewater treatment processes [J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 96-109.
- [15] 陈慧敏, 俞晓琴, 朱俊羽, 等. 太湖有色可溶性有机物 (CDOM) 对 COD 及 BOD₅ 的指示意义 [J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(5): 1376-1388.
- Chen H M, Yu X Q, Zhu J Y, *et al.* Optical indices of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) as potential indicators tracing the variability of chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand (BOD₅) in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(5): 1376-1388.
- [16] Mann C J, Wetzel R G. Dissolved organic carbon and its utilization in a riverine wetland ecosystem [J]. *Biogeochemistry*, 1995, **31**(2): 99-120.
- [17] 周苗, 李思亮, 丁虎, 等. 地表流域有机碳地球化学研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(1): 255-264.
- Zhou M, Li S L, Ding H, *et al.* Advances in study on organic carbon characteristics in the riverine systems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(1): 255-264.
- [18] 刘明亮, 张运林, 秦伯强. 太湖入湖河口和开敞区 CDOM 吸收和三维荧光特征 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 234-241.
- Liu M L, Zhang Y L, Qin B Q. Characterization of absorption and three-dimensional excitation-emission matrix spectra of chromophoric dissolved organic matter at the river inflow and the open area in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(2): 234-241.
- [19] Wu K, Lu K J, Dai M H, *et al.* The bioavailability of riverine dissolved organic matter in coastal marine waters of southern Texas [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, **231**, doi: 10.1016/j.ecss.2019.106477.
- [20] 郭燕妮, 李元鹏, 邵克强, 等. 博斯腾湖有色可溶性有机物来源及季节变化特征 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(11): 3971-3981.
- Guo Y N, Li Y P, Shao K Q, *et al.* Sources and seasonal variation of chromophoric dissolved organic matter in Lake Bosten [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(11): 3971-3981.
- [21] 陈昭宇, 李思悦. 三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 195-203.
- Chen Z Y, Li S Y. Seasonal variation of DOM spectral characteristics of rivers with different urbanization levels in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 195-203.
- [22] 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.
- [23] 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 等. 湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 603-613.
- Yu M L, Hong G X, Xu H, *et al.* Effects of cyanobacterial blooms in eutrophic lakes on water quality of connected rivers [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 603-613.
- [24] 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.
- [25] Sun Q Y, Wang C, Wang P F, *et al.* Absorption and fluorescence characteristics of chromophoric dissolved organic matter in the Yangtze Estuary [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(5): 3460-3473.
- [26] 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.
- [27] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969.
- [28] Spencer R G M, Butler K D, Aiken G R. Dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter properties of rivers in the USA [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, **117** (G3), doi: 10.1029/

- 2011JG001928.
- [29] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48.
- [30] 朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 等. 亚热带河口陆基养虾塘水体 CDOM 三维荧光光谱平行因子分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 164-171.
- Zhu A J, Sun D Y, Tan J, *et al.* Parallel factor analysis of fluorescence excitation emission matrix spectroscopy of CDOM from the mid-culture period of shrimp ponds in a Subtropical Estuary[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 164-171.
- [31] Zhou Y Q, Davidson T A, Yao X L, *et al.* How autochthonous dissolved organic matter responds to eutrophication and climate warming: Evidence from a cross-continental data analysis and experiments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, **185**: 928-937.
- [32] Zhang J, Zhao J J, Yang G P, *et al.* Concentration and characterization of colored dissolved organic matter in the surface Microlayer and subsurface water of the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, **18**(2): 383-393.
- [33] 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.
- [34] 刘笑茜, 张运林, 殷燕, 等. 三维荧光光谱及平行因子分析法在 CDOM 研究中的应用[J]. *海洋湖沼通报*, 2012, (3): 133-145.
- Liu X H, Zhang Y L, Yin Y, *et al.* Application of three-dimensional fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis in CDOM study[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2012, (3): 133-145.
- [35] Yamashita Y, Boyer J N, Jaffé R. Evaluating the distribution of terrestrial dissolved organic matter in a complex coastal ecosystem using fluorescence spectroscopy[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, **66**: 136-144.
- [36] 刘堰杨, 秦纪洪, 刘琛, 等. 基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 720-728.
- Liu Y Y, Qin J H, Liu C, *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rivers of western Sichuan Plateau based on EEM-PARAFAC analysis[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 720-728.
- [37] Zhou Y Q, Zhang Y L, Jeppesen E, *et al.* Inflow rate-driven changes in the composition and dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a large drinking water lake[J]. *Water Research*, 2016, **100**: 211-221.
- [38] Stedmon C A, Sereďyńska-Sobecka B, Boe-Hansen R, *et al.* A potential approach for monitoring drinking water quality from groundwater systems using organic matter fluorescence as an early warning for contamination events[J]. *Water Research*, 2011, **45**(18): 6030-6038.
- [39] Shi Y, Zhang L Q, Li Y P, *et al.* Influence of land use and rainfall on the optical properties of dissolved organic matter in a key drinking water reservoir in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134301.
- [40] 张柳青, 杨艳, 李元鹏, 等. 高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物来源组成特征[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(2): 428-439.
- Zhang L Q, Yang Y, Li Y P, *et al.* Sources and optical dynamics of chromophoric dissolved organic matter in Lake Gaoyou, Nansi, and Dongping[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(2): 428-439.
- [41] 刘涛, 揣小明, 陈小锋, 等. 江苏省西部湖泊水环境演变过程与成因分析[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(9): 995-1002.
- Liu T, Chuai X M, Chen X F, *et al.* Evolution of lake water environment in west Jiangsu Province and analysis of causes[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(9): 995-1002.
- [42] 王聪颖, 陈卫, 陶辉, 等. 太湖水源水有色溶解性有机物 (CDOM) 荧光特性分布特征以及源解析[J]. *净水技术*, 2019, **38**(3): 56-62.
- Wang C Y, Chen W, Tao H, *et al.* Fluorescent distribution characteristics and source apportionment of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in source water of Taihu Lake [J]. *Water Purification Technology*, 2019, **38**(3): 56-62.
- [43] 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.
- [44] Mu C C, Abbott B W, Wu X D, *et al.* Thaw depth determines dissolved organic carbon concentration and biodegradability on the northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(18): 9389-9399.
- [45] 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 837-846.
- Guo Y N, Yao X L, Chen H M, *et al.* Influences of hydrological scenarios on the bioavailability, fate, and balance of chromophoric dissolved organic matter in Lake Poyang [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 837-846.
- [46] 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.
- [47] Liu Q, Jiang Y, Tian Y L, *et al.* Impact of land use on the DOM composition in different seasons in a subtropical river flowing through a region undergoing rapid urbanization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **212**: 1224-1231.
- [48] Hitchcock J N, Mitrovic S M, Hadwen W L, *et al.* Terrestrial dissolved organic carbon subsidizes estuarine zooplankton; an in situ mesocosm study[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(1): 254-267.
- [49] Zhang Y L, Zhang E L, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2645-2659.
- [50] 冯可心, 李永峰, 姜霞, 等. 丹江口水库表层沉积物有色可溶性有机物空间分布特征及其来源分析[J]. *环境化学*, 2016, **35**(2): 373-382.
- Feng K X, Li Y F, Jiang X, *et al.* Distribution and source analysis of chromophoric dissolved organic matter in the surface sediments of the Danjiangkou Reservoir [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(2): 373-382.
- [51] Matsuoka A, Babin M, Doxaran D, *et al.* A synthesis of light absorption properties of the Arctic Ocean: application to semi-analytical estimates of dissolved organic carbon concentrations from space[J]. *Biogeosciences*, 2014, **11**(12): 3131-3147.
- [52] Xu J, Wang Y Q, Gao D, *et al.* Optical properties and spatial distribution of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in

- Poyang Lake, China [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, **43**(4): 700-709.
- [53] 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.
- [54] 屈道村, 屈艺. 长潭水库富营养化现状及防治对策[J]. *环境监测与预警*, 2011, **3**(1): 41-43, 53.
Qu D C, Qu Y. Eutrophication situation in Changtan Reservoir and the protection measures [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2011, **3**(1): 41-43, 53.
- [55] Zhou Y Q, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Lake Taihu, a large, shallow and eutrophic aquatic ecosystem in China serves as a sink for chromophoric dissolved organic matter [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, **41**(2): 597-606.
- [56] 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.
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.
- [57] 王霞, 刘雷, 何跃, 等. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(2): 58-61.
Wang X, Liu L, He Y, *et al.* Temporal-spatial distribution characteristics and factor analysis of eutrophication in Hongze Lake [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(2): 58-61.
- [58] 刘超, 王智源, 张建华, 等. 景观类型与景观格局演变对洪泽湖水质的影响 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(8): 3302-3311.
Liu C, Wang Z Y, Zhang J H, *et al.* Effects of landscape types and landscape pattern evolution on water quality of Hongze Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(8): 3302-3311.
- [59] 刘改妮, 辛玮光, 薛祥山, 等. 天门市高邮湖流域水环境问题及治理对策[J]. *环境与可持续发展*, 2020, **45**(2): 144-150.
Liu G N, Xin W G, Xue X S, *et al.* Water environment problems and countermeasures of Gaoyou Lake basin in Tianchang City [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2020, **45**(2): 144-150.



CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-ni, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Julong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)