

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征

周蕾^{1,2}, 周永强^{1,2}, 张运林^{1,2*}, 朱广伟^{1,2}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 天目湖作为重要集中式饮用水源地, 水体水质变化会影响其生态系统服务功能。有色可溶性有机物 (CDOM) 是溶解性有机物的重要组成部分, 其来源与组成直接影响水处理工艺与出水品质, 因而研究天目湖 CDOM 来源及时空分异规律对其水质供应安全及生态系统功能维护有着重要的作用。基于 2017 年逐月野外采样数据, 运用平行因子分析法 (PARAFAC) 等对 CDOM 光谱数据进行分析, 揭示了天目湖 CDOM 来源和组成的空间及季节变化特征。PARAFAC 结果表明, 天目湖 CDOM 库中微生物作用类腐殖酸组分 C1 相对丰度最高 (44.2% ± 9.8%), 其次为类色氨酸组分 C2 (29.2% ± 4.3%) 和类酪氨酸组分 C3 (17.2% ± 13.1%), 陆源类腐殖酸组分 C4 相对丰度最低 (9.4% ± 2.4%)。时空分布特征及主成分分析结果表明天目湖河口区 CDOM 丰度 $a(254)$ 、C1 和 C2 组分显著高于下游湖区, 而光谱斜率 $S_{275-295}$ 则显著低于下游湖区 (t -test, $P < 0.05$), 意味着入湖河流输入造成天目湖河口区 CDOM 腐殖质化程度及相对分子量的升高。夏、秋季节的 $a(254)$ 、C1、C2 和 C4 组分荧光强度显著高于冬、春季节 (t -test, $P < 0.05$)。结果表明不同季节对 CDOM 组成的影响不仅要考虑降雨量和径流输入的差异, 还应综合考虑水体温度、热分层和浮游植物生物量以及光和微生物降解对 CDOM 的矿化作用。

关键词: 天目湖; 有色可溶性有机物 (CDOM); 平行因子分析 (PARAFAC); 来源; 季节变化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3709-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012280

Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu

ZHOU Lei^{1,2}, ZHOU Yong-qiang^{1,2}, ZHANG Yun-lin^{1,2*}, ZHU Guang-wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Lake Tianmu is an important source of drinking water, and its water quality can influence ecosystem service functions. Unravelling the sources and composition of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) that can affect water treatment processes is necessary to maintain water supply safety and ecosystem service functioning of Lake Tianmu. Samples were collected monthly in 2017 and analyzed for CDOM absorbance and fluorescent spectra using parallel factor analysis (PARAFAC) to investigate the spatial and temporal variations of CDOM sources and composition in Lake Tianmu. PARAFAC results showed that CDOM in Lake Tianmu was mainly composed of a microbial humic-like component C1 (44.2% ± 9.8%), followed by a tryptophan-like component C2 (29.2% ± 4.3%), tyrosine-like component C3 (17.2% ± 13.1%), and terrestrial humic-like component, C4 was the lowest (9.4% ± 2.4%). The CDOM abundance $a(254)$ and fluorescence intensities of C1 and C2 were significantly higher in the river mouths than in the downstream lake regions, whereas the spectral slope $S_{275-295}$ was significantly lower in the river mouths (t -test, $P < 0.05$), indicating that allochthonous inputs cause an elevated degree of humification and relative increase in the molecular weight of CDOM in the inflowing river mouths. Seasonal differences in CDOM composition were mainly ascribed to the $a(254)$ and fluorescence intensities of C1, C2, and C4 being significantly higher in the summer and autumn than in the winter and spring (t -test, $P < 0.05$). Our results showed that the influences of different seasons on CDOM composition comprise differences in rainfall and runoff input, as well as water temperature, thermal stratification, phytoplankton biomass, and mineralization of CDOM by light and microbes.

Key words: Lake Tianmu; chromophoric dissolved organic matter (CDOM); parallel factor analysis (PARAFAC); sources; seasonal variation

湖泊和水库等内陆水体具有重要的生态系统服务功能, 不仅包括航运、防洪调蓄、渔业养殖、农业灌溉、观光休闲等, 还越来越多地承担了饮用水供给功能^[1,2], 随着全球水资源供需矛盾的加剧, 保护湖库水质安全、维护其生态系统功能变得至关重要^[3]。我国水资源分布时空极不均匀, 新中国成立以来我国已经修筑了 9.8 万座库容大于 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的水库^[4]。随着近几十年来我国天然湖泊水资源短缺问

题加剧, 水库日益成为重要的饮用水供给地。作为湖库水质的重要表征指标, 有色可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 由腐

收稿日期: 2020-12-29; 修订日期: 2021-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41930760, 41807362); 江苏省自然科学基金项目 (BK20181104); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目 (QYZDB-SSW-DQC016)

作者简介: 周蕾 (1994 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊生物地球化学循环, E-mail: zhoulei941028@163.com

* 通信作者, E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

殖酸、富里酸和芳香烃类复杂有机物等组成,是水体中溶解性有机物(DOM)的重要组成部分,对水生生态系统生物地球化学循环、能量流动及水质安全有着重要的影响^[5,6]. CDOM 能强烈吸收紫外辐射及蓝光波段,减弱紫外线对水生生物的伤害^[7];另一方面,CDOM 在光降解和微生物降解过程中伴随着温室气体和无机营养盐以及大量中间产物的释放,为浮游植物及微生物的生长提供丰富的碳、氮和磷等生源要素^[8]. 此外,CDOM 作为络合剂和吸附剂也会影响水体中重金属的毒性、迁移转化及生物有效性^[9],且水体中过量的 CDOM 会导致饮用水处理过程中产生难闻气味和致癌物质,如消毒副产物等,从而威胁饮用水安全^[10,11]. 因此,了解湖库等水体中 CDOM 来源及迁移转化规律对维护湖库水质安全和生态系统功能极其重要.

目前的研究表明,湖库 CDOM 来源及组成情况受到多种因素的共同作用表现出明显的时空分异特征^[12]. CDOM 主要来源于外源输入和内源产生^[5,6]. 外源输入主要包括河流输入、农业面源和工业及生活污水等点源输入^[13],内源产生主要包括浮游植物、沉水植物死亡降解及沉积物再悬浮等产生^[14]. 对于富营养化水体如太湖而言,浮游植物死亡降解产物是 CDOM 的主要来源之一^[15],而对于地表湖库等饮用水源而言,流域外源有机质输入通常占据 CDOM 库的主导地位^[13]. CDOM 物质组成复杂多样,传统的化学检测手段很难直接表征其组成及结构特征,近年来,三维荧光激发-发射矩阵光谱(excitation-emission matrices, EEMs)结合平行因子分析(parallel factor analysis)被广泛用于 CDOM 的来源与组成特征的定性或半定量研究^[16,17]. 以往的研究表明雨季腐殖质化程度较高的大分子 CDOM 的大量输入对水库水质安全造成威胁,并对水处理过程中 CDOM 的去除效率提出了更高的要求^[18,19]. CDOM 的吸收和荧光相关指标与叶绿素 a 浓度或富营养化指数等水质参数具有较好的正相关关系,并可用于反演湖库内有机物丰度和富营养化程度^[20,21],此外通过荧光组分变化还能在一定程度上识别水库周边的点源污染^[21]. 因此,揭示饮用水源地 CDOM 来源与组成特征对监测其水质变化、保证湖区水供应安全及生态系统功能健全至关重要,并且能为水处理工艺的改进提供科学依据.

天目湖(119°25'E, 31°18'N)原名沙河水库,水面面积为 12 km²,平均水深 7 m,最大水深为 14 m,水库集水面积 152 km²^[22],是一个集饮用水、农业灌溉、渔业和旅游等多种功能于一体的水库型湖泊. 天目湖是江苏省溧阳市最大的饮用水源地,供给

人口约 70 万,且湖区及其周边保护区是国家 5A 级景区,因此保证天目湖水质清洁及水供应安全是水库管理的重中之重. 天目湖水库处于季风气候区,不同季节降水和径流等水文要素的差异会影响水体 CDOM 的组成特征^[23,24],然而,目前对天目湖水质的研究主要集中在热分层、营养盐及浮游植物群落结构等^[2,22,25],缺少对 CDOM 来源和时空异质性的分析. 基于此,本研究通过 2017 年 1~12 月逐月采样调查,分析不同季节天目湖河口及下游湖区 CDOM 的空间分异特征,讨论其来源,以期为天目湖水质安全和生态功能维护提供科学依据和理论指导.

1 材料与方法

1.1 研究区域与现场样品采集

在天目湖布设了 10 个采样点(TM1~TM10,图 1),于 2017 年 1~12 月进行了为期 1 a 逐月野外采样活动. 其中, TM8~TM10 这 3 个样点主要代表上游河口区域; TM1 接近水库大坝出水口; TM2 和 TM3 分别靠近下游两个旅游活动区域; TM6 和 TM7 分别位于天目湖抽水蓄能电站抽放水口的下游和上游^[26]. 由于 TM9 点位水位较浅,仅有 3~8 月采集到水样,此外,除 4 月外, TM7 点位采集了中层(距水面约 5 m)和底层(距水面约 8~10 m)水样,因此共收集了 114 个表层水样(距

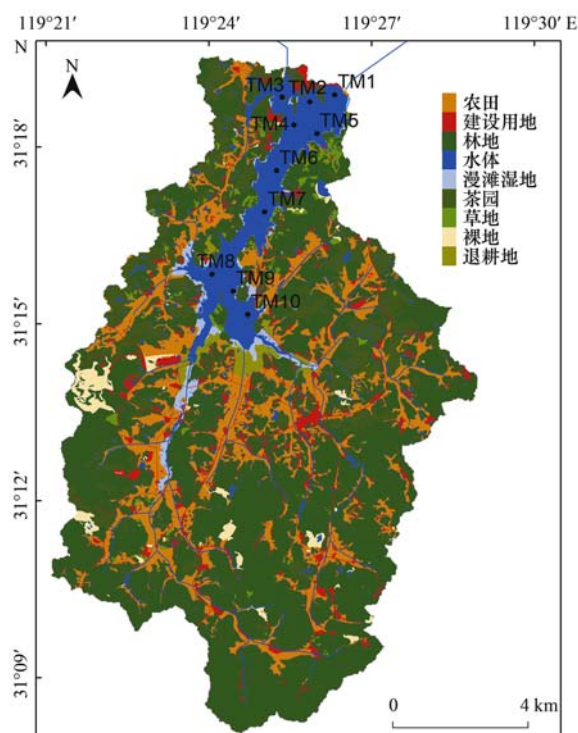


图 1 天目湖流域 2010 年土地利用类型及采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Lake Tianmu and the corresponding land use of the lake watershed in 2010

水面 0.5 m)、11 个中层水样和 11 个底层水样. 用采水器采集水样保存于纯水洗过的聚乙烯瓶内, 在避光冷藏的条件下尽快运回实验室, 通常 6 h 内完成过滤, 3 d 内完成 CDOM 吸收和荧光光谱的测量.

1.2 样品的处理及样品参数的测量

用高温灼烧过 (450℃ 4h) 的 Whatman GF/F 滤膜 (孔径 0.7 μm) 过滤水样, 滤后液由岛津总有机碳分析仪 (TOC-L) 在 680℃ 高温下测定溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC). 孔径为 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤剩余水样, 滤后液装入预先酸洗纯水冲泡的瓶子中冷藏保存, 用于 CDOM 吸收和荧光光谱测量.

CDOM 吸收光谱由 Shimadzu UV-2550 UV-Vis 分光光度计测定, 采用 5 cm 的比色皿, 并将 Milli-Q 纯水作为实验的空白对照. 在 200 ~ 800 nm 波长范围内获得 CDOM 的吸光度 (间隔为 1 nm), 并减去 700 nm 处的吸光度来对吸光度进行基线校正. 通过公式 (1) 计算对应波长的吸收系数:

$$a(\lambda) = 2.303 \times D(\lambda) / r \quad (1)$$

式中, $a(\lambda)$ 表示波长为 λ 时对应的 CDOM 吸收系数 (m^{-1}), $D(\lambda)$ 表示在波长 λ 处矫正后的吸光度, r 表示光程路径 (m). 本研究使用 254 nm 处的吸收系数 $a(254)$ 指示 CDOM 丰度^[27]; 使用 $a(250)$: $a(365)$ 表征 CDOM 分子的相对大小, 一般值越小, CDOM 分子相对越大^[28]; CDOM 光谱斜率 ($S_{275-295}$) 和光谱斜率比值 S_R ($S_{275-295}/S_{350-400}$) 也可用来半定量表征 CDOM 的芳香性和平均分子量大小, 值越小表示 CDOM 平均分子量越大, 并且微生物和光降解也会导致 $S_{275-295}$ 的变化^[28]; 比紫外吸收系数 SUVA 是 254 nm 处吸收系数与 DOC 浓度的比值, 表征 CDOM 芳香性水平, 值越高表示 CDOM 芳香性越高^[29].

CDOM 三维荧光光谱 (EEMs) 由 Hitachi 公司的 F-7000 型荧光光度计测定, 激发和发射波长分别设定在 230 ~ 450 nm (5 nm 的间隔) 和 300 ~ 550 nm (1 nm 的间隔). Milli-Q 纯水作为空白用来校正水样 EEMs 中的因为拉曼散射而造成的误差. 通过 MATLAB R2015b drEEM (ver. 0.2.0) 工具包中插值的方法消除瑞利散射^[30], 以及通过相应激发发射波长处的吸光度校正 EEMs 的内滤波效应^[31]. 本研究使用生源指数 (BIX) 表征内源 CDOM 的贡献, 值越大表明新生内源 CDOM 贡献的提升^[32]; 腐殖质化指数 (HIX) 和荧光峰积分比值 $I_C:I_T$ (类腐殖酸 C 峰与类蛋白 T 峰积分值之比) 均与 CDOM 腐殖质化程度和芳香性水平成显著正相关^[33].

1.3 平行因子分析 (PARAFAC)

通过 MATLAB R2015b 中的 drEEM (ver. 0.2.0) 工具包进行 PARAFAC 分析^[30], 共 136 个 EEMs 矩阵用于运算, 每个矩阵包括 251 个发射波段和 45 个激发波段. EEMs 矩阵被划分成 6 个随机子集, 3 个子集用于建模, 另外 3 个用于模型验证数据集, 每个 EEMs 子集均逐步从 3 ~ 5 个组分模型逐一验证, 最终得到 4 个荧光组分模型, 并通过对半检验、随机初始化分析以及残差分析. PARAFAC 分析得到的每个荧光组分的最大荧光强度 ($F_{\max}$) 用以表征各类荧光物质浓度和荧光强度, 单位为拉曼单位 (Raman unit)^[34].

1.4 降雨量数据

本研究包含 1953 ~ 2017 年宜兴站降雨量数据, 由中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 整理得到.

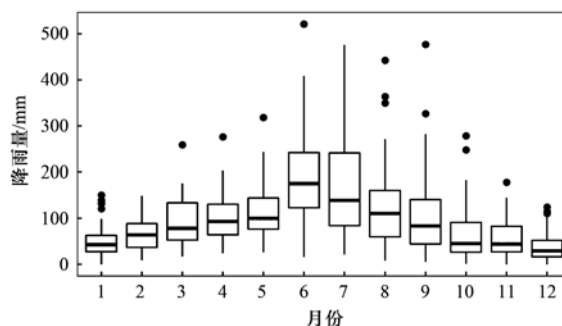
1.5 数据处理方法

本研究使用 R (v3.6.3) 和 Rstudio 软件进行数据统计分析 [包括平均数、标准差、 t 检验 (t -test)、主成分分析 (PCA) 和相关性分析等] 和图表绘制, 此外, 通过 ArcGIS 10.5 绘制空间插值图.

2 结果与分析

2.1 天目湖水文特征

天目湖流域附近宜兴站降雨量数据可用来表征该流域不同季节的水文特征. 天目湖流域降雨量随季节变化明显 (图 2), 夏季 (6 ~ 8 月) 降雨量 ($161.5 \text{ mm} \pm 105.2 \text{ mm}$) 显著高于其他季节, 春季 (3 ~ 5 月) 降雨量 ($101.8 \text{ mm} \pm 52.4 \text{ mm}$) 次之, 其次是秋季 (9 ~ 10 月) 降雨量 ($75.2 \text{ mm} \pm 67.0 \text{ mm}$), 冬季的降雨量最低 ($51.2 \text{ mm} \pm 34.6 \text{ mm}$), 该结果表明天目湖降雨和径流输入存在明显的季节分异.



箱体展示上四分位数、中位数和下四分位数; 散点代表离群值

图 2 1953 ~ 2017 年宜兴站多年月平均降雨量情况

Fig. 2 Boxplots showing monthly variability of rainfall at the Yixing Station in 1953-2017

2.2 平行因子分析结果

PARAFAC 分析得到了 4 个荧光组分 (图 3):

组分 C1 ($E_x/E_m = 235 \text{ nm}/404 \text{ nm}$) 为微生物作用类腐殖酸组分,与微生物对类腐殖酸的再处理有关^[18,35];组分 C2 [$E_x/E_m = 280 (< 230) \text{ nm}/340 \text{ nm}$]和组分 C3 [$E_x/E_m = 270 (< 230) \text{ nm}/< 300 \text{ nm}$]分别为类色氨酸、类酪氨酸组分,均属于内源类蛋白组分^[36,37],来源于原生地微生物降解作用或

生活污水排放;组分 C4 [$E_x/E_m = 365 (265) \text{ nm}/452 \text{ nm}$]是陆源类腐殖质组分,主要来源于外源输入^[38].天目湖表层水中 C1 组分相对丰度最高 ($44.2\% \pm 9.8\%$),其次为 C2 ($29.2\% \pm 4.3\%$)和 C3 ($17.2\% \pm 13.1\%$),C4 组分相对丰度最低 ($9.4\% \pm 2.4\%$).

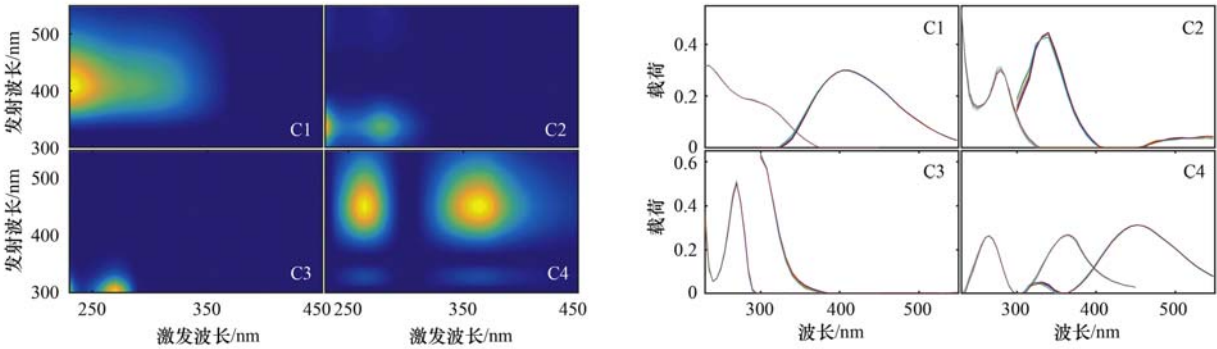


图3 平行因子分析 (PARAFAC) 得到的 4 种荧光组分 (C1~C4) 激发发射荧光图谱及对半检验结果

Fig. 3 Excitation-emission fluorescence spectral shapes of the four fluorescent components (C1-C4) and split-half validation by PARAFAC

2.3 CDOM 空间分布差异

天目湖表层水年平均 DOC 浓度和 CDOM 吸收荧光相关指标均表现出明显的空间差异 (图 4). DOC 浓度、 $I_c:I_T$ 以及微生物作用类腐殖酸组分 C1 和陆源类腐殖质组分 C4 的荧光强度均表现为河口区域向下游区域减小的趋势,说明河流输入是天目湖腐殖质类物质的重要来源. $S_{275-295}$ 、BIX 以及类蛋白质组分 C2

和 C3 则表现为下游湖区高于河口区,说明在受陆源影响较小的区域,内源 CDOM 的贡献相加增大. 类腐殖酸组分 (C1 和 C4) 占比在河口区 ($57.9\% \pm 7.3\%$) 高于下游区域 ($52.1\% \pm 12.4\%$).

2.4 CDOM 不同深度差异

天目湖 TM7 点位表层、中层和底层水 DOC 浓度和 CDOM 吸收荧光相关指标存在差异,但均不显

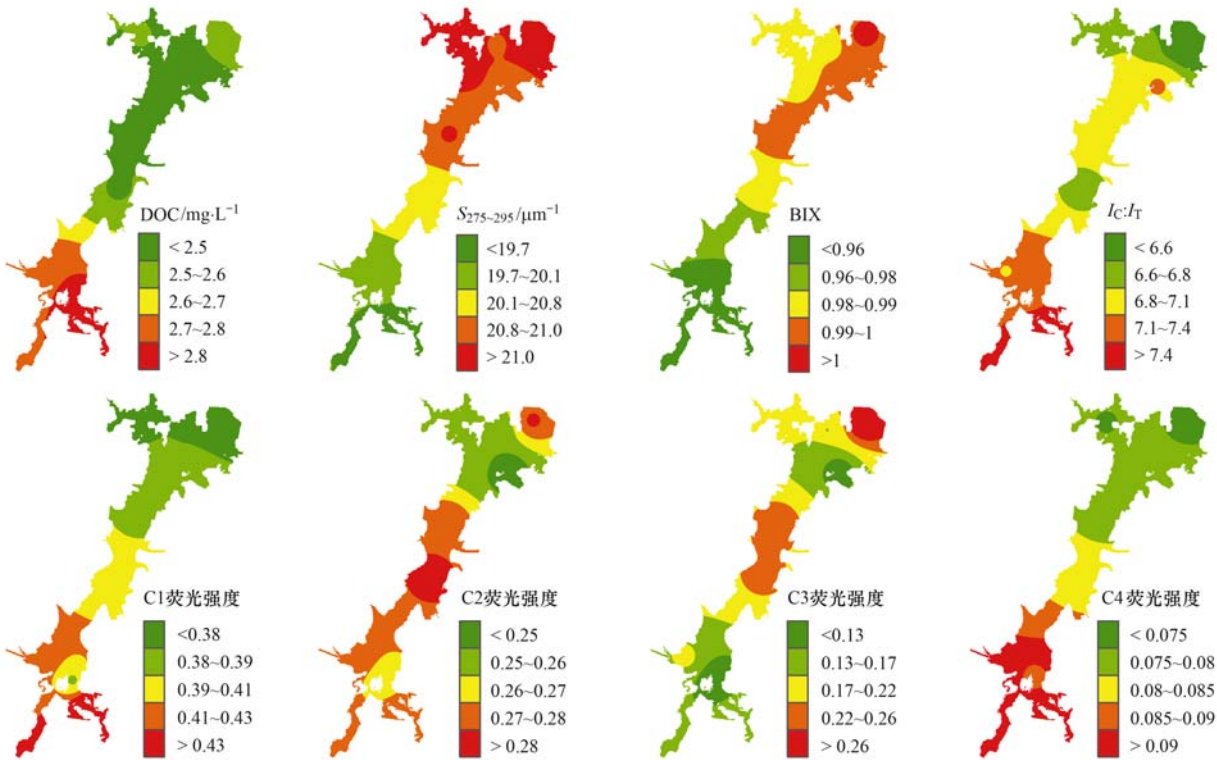


图4 天目湖年平均 DOC 浓度、CDOM 吸收和各荧光组分荧光强度的空间差异

Fig. 4 Spatial variations in the annual average DOC concentration and CDOM-related parameters in Lake Tianmu in 2017

著 (t -test, $P > 0.05$, 图 5), 这可能与样点数目较少有关. DOC 浓度和陆源类腐殖质组分 C4 的荧光强度由表层向底层递增, 且 $a(250):a(365)$ 和 $S_{275-295}$

由表层向底层递减, 说明大分子陆源类腐殖酸物质在湖底层积累. 类蛋白质组分 C2 和 C3 则表现为表层和底层水高于中层水.

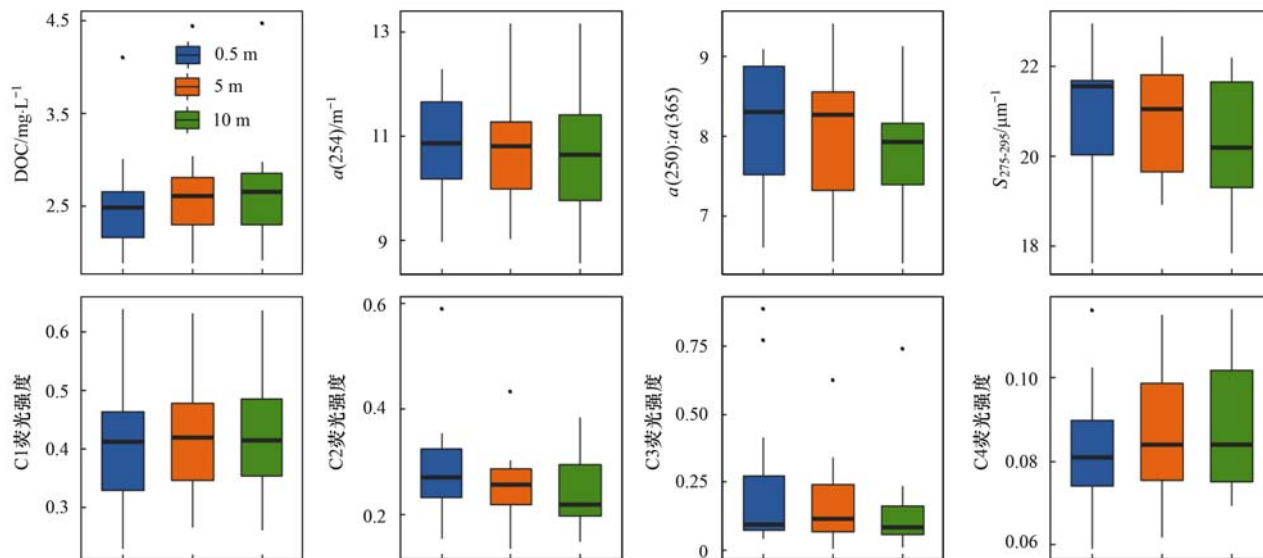


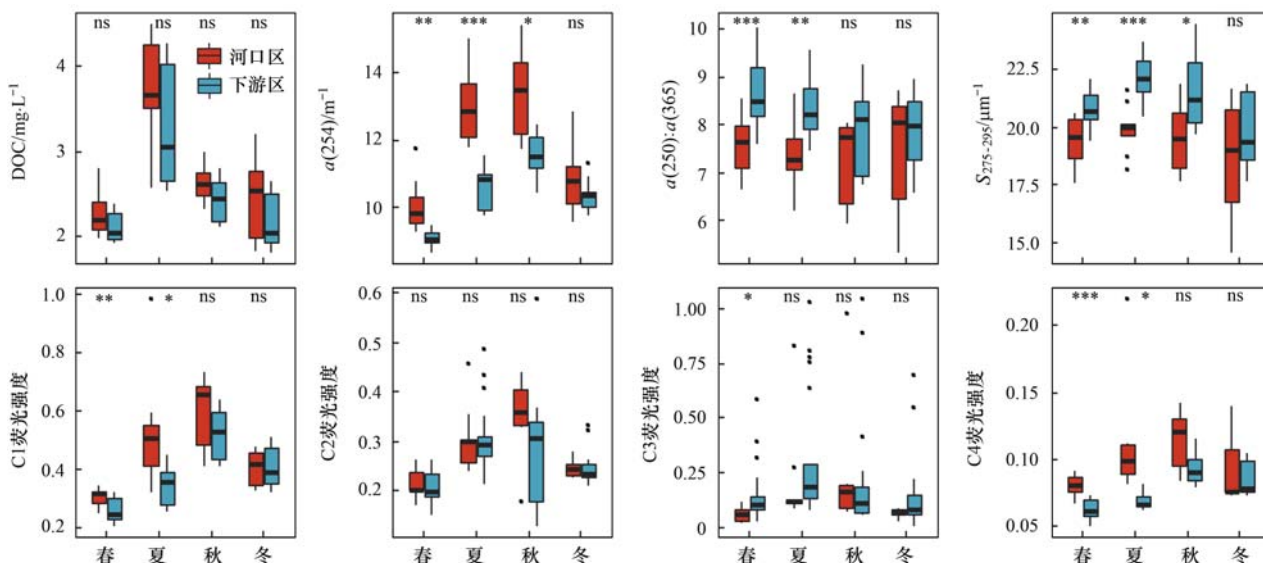
图 5 天目湖表层、中层和底层的 DOC 浓度、CDOM 吸收和各荧光组分荧光强度差异

Fig. 5 Boxplots showing differences in the DOC concentration and CDOM-related parameters of the surface, middle, and bottom layers at TM7 in Lake Tianmu

2.5 CDOM 季节变化特征

通过对比不同季节河口区和下游湖区表层水 DOC 浓度和 CDOM 吸收荧光相关指标发现 (图 6), 夏季 DOC 浓度要显著高于其他 3 个季节 (t -test, $P < 0.05$), 河口区 DOC 浓度在各个季节均略高于下游湖区 DOC 浓度, 但这一差异不显著 (t -test, $P > 0.05$); 而 CDOM 丰度 $a(254)$ 则表现为夏、秋季节显著高于冬、春季节 (t -test, $P < 0.05$), 且除冬季外, 河口区和下游湖区均有显著差异 (t -test, $P <$

0.05). CDOM 吸收系数比值 $a(250):a(365)$ 表现为春季显著高于秋、冬季节, 且春、夏季下游湖区显著高于河口区 (t -test, $P < 0.05$); CDOM 光谱斜率 $S_{275-295}$ 也表现为冬季最低, 且春、夏、秋季下游湖区显著高于河口区 (t -test, $P < 0.05$). 对于荧光组分而言, 微生物作用类腐殖质组分 C1、类色氨酸组分 C2 和类腐殖质组分 C4 表现为秋季最高, 春季最低, 且 C1 和 C4 在春、夏季河口区域显著高于下游湖区 (t -test, $P < 0.05$); 类酪氨酸组分 C3 季节差



*** 表示 $P < 0.001$, ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$, ns 表示不显著, 黑色散点表示离群值

图 6 天目湖 DOC 浓度、CDOM 吸收和各荧光组分荧光强度季节变化

Fig. 6 Boxplots showing seasonal variations in DOC concentration and CDOM-related parameters in Lake Tianmu

异小于其他组分,表现为冬季最低.此外,夏季各荧光组分均出现明显的离群值.

2.6 CDOM 吸收荧光指标 PCA 分析

基于表层水 DOC 和 CDOM 吸收荧光相关指标的 PCA 分析显示(图 7),前 2 个主成分 PC1 和 PC2 分别解释了总方差的 35.1% 和 26.9% (图 7).与 PC1 相关性较高的指标为 $S_{275-295}$ 、 $a(250):a(365)$ 、 S_R 和 BIX ($r > 0.55$, $P < 0.001$) 以及 $I_C:I_T$ 、HIX 和 C4 ($r < -0.6$, $P <$

0.001),这表明 PC1 可能与 CDOM 腐殖质化程度和分子量大小变化有关[图 7(a)].与 PC2 相关性较高的指标为 $a(254)$ 、C1、C2 和 C4 ($r > 0.7$, $P < 0.001$),这表明 PC2 可能主要与 CDOM 丰度有关[图 7(a)].在样品得分中可以看出[图 7(b)],河口区域样品 PC1 得分基本为负,而下游湖区样品 PC1 得分则主要为正,另外,夏季 PC1 得分高于冬季;夏、秋季样品 PC2 得分主要为正,而春、冬季样品 PC2 得分主要为负.

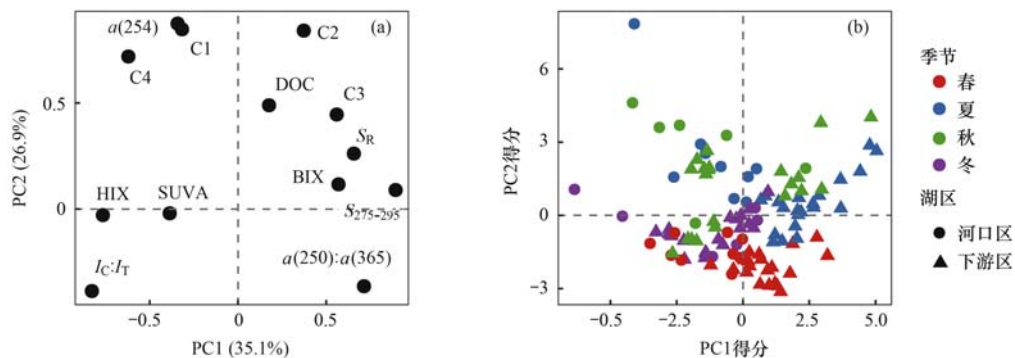


图 7 基于 CDOM 吸收荧光指标的主成分分析 (PCA) 载荷图和不同季节和不同湖区样品 PC1 和 PC2 的得分

Fig. 7 Principal component analysis (PCA) for CDOM-related parameters and PC1 and PC2 factor scores of samples collected from Lake Tianmu in 2017

3 讨论

本研究表明天目湖 CDOM 来源和组成受外源输入和内源自生等多重影响表现出显著的空间分异和季节变化特征.

3.1 天目湖 CDOM 组成特征

天目湖 CDOM 丰度 $a(254)$ 的范围为 $8.7 \sim 15.4 \text{ m}^{-1}$,平均值为 $10.8 \text{ m}^{-1} \pm 1.4 \text{ m}^{-1}$.以往基于我国 22 个湖泊的 821 个点位的研提出 $a(254)$ 可用于判断湖泊的富营养化程度, $a(254)$ 处于 $4 \sim 10 \text{ m}^{-1}$ 表明处于中营养状态; $10 \sim 15 \text{ m}^{-1}$ 表明处于轻度富营养化, $15 \sim 23 \text{ m}^{-1}$ 表明处于中度富营养化^[20].以此判断天目湖水库已基本处于轻度富营养化状态,且位于河口附件点位在夏、秋季节已处于中度富营养水平(图 5),这与传统的根据总氮、总磷和叶绿素等指标判断的富营养化状态结果相符^[2],说明应加强对天目湖水库的营养盐及有机物输入管控,尤其在春、秋季节的河口区域,以避免天目湖水库富营养化程度的进一步加重.该结果也进一步证实 CDOM 丰度 $a(254)$ 作为判断富营养化状态的指标的可行性及灵敏性.平行因子分析结果表明天目湖 CDOM 库中微生物作用类腐殖酸组分 C1 占比最高,其次为类色氨酸组分 C2、类酪氨酸 C3 和陆源类腐殖酸组分 C4,总体而言,类腐殖酸组分 C1 和 C4 占比 $53.9\% \pm 18.8\%$,类蛋白质组分占比 46.1%

$\pm 11.4\%$.类腐殖质组分一般被认为主要与外源输入有关,包括径流输入和农田污水的排放等^[18],例如,有研究表明暴雨径流会造成陆源类腐殖质和微生物作用类腐殖质组分的急剧增加^[39].类蛋白质组分通常被认为主要与内源微生物作用相关,同时生活污水的排放也可以促进类蛋白质组分的增加^[18],由此说明天目湖 CDOM 组成受外源输入和内源自生的共同影响,且类腐殖酸组分占比稍高于类蛋白质组分.天目湖分层采样结果显示 DOC 和大分子陆源类腐殖酸物质在湖底层丰度较高,这可能与水库异重流有关.携沙径流进入相对清水水库后由于重量差等会形成水库异重流,导致悬浮物质和腐殖质在底层的淤积,从而造成水库水质的改变^[40,41].腐殖质一般被认为是微生物难降解物质^[42],同时天目湖热分层时期底层溶氧和营养盐含量处于较低水平^[22],可能会抑制微生物作用,这在一定程度上解释了底层蛋白质组分荧光强度小于表层和中层的现象.值得指出的是,DOC 浓度与 CDOM 吸收和荧光相关指标在不同分层均无显著差异,这可能与样品数量不足有关,未来还需对 CDOM 不同深度分布特征及驱动机制作进一步研究.

3.2 外源输入对天目湖 CDOM 组成的影响

天目湖河口区和下游湖区 CDOM 丰度和组成具有明显差异,且这一差异尤其体现在春、夏、秋季,而降雨量较小的冬季无显著差异(图 4 和图 6),这

意味着入湖河流输入是天目湖 CDOM 的重要来源之一. 河口区域 $a(254)$ 、微生物作用类腐殖酸组分 C1、陆源类腐殖酸 C4 和类腐殖质组分占比均高于下游湖区, 而 $S_{275-295}$ 、 $a(250):a(365)$ 和 PC1 低于下游湖区, 说明河流输入导致河口区域 CDOM 腐殖质化程度升高, 且这一部分 CDOM 分子量较大. 从河口到下游湖区, 由于湖水的稀释以及光降解和微生物降解, 类腐殖质组分荧光强度逐渐减弱. 这一研究结果与千岛湖、太湖和洪泽湖等相似^[43~46]. 天目湖上游河流流域土地利用类型以农田、建设用地、林地和茶园等为主 (图 1), 以往的研究表明, 天目湖入湖河流受农业面源污染影响显著, 且河口为天目湖氮、磷营养盐等污染最严重的区域^[25]. 结合本研究表明, 农业面源污染不仅携带大量的无机营养盐还包括土壤淋溶带来的类腐殖质等大分子有机物. 从长时间尺度来看, 天目湖入湖河流类腐殖质 CDOM 的占比与流域内与人类活动相关的土地利用类型 (农田和建设用地) 的占比呈显著正相关^[47], 说明人类活动通过农业生产或城市化等过程改变土地利用类型, 从而影响了天目湖 CDOM 组成特征. 值得指出的是, 类色氨酸组分 C2 和类酪氨酸组分 C3 在河口和下游湖区不同季节基本没有显著差异, 这说明河流携带的类蛋白质组分对天目湖 CDOM 库的影响小于类腐殖质组分. 类蛋白组分一般被认为来源于生活污水或微生物降解藻类或水生植物的残留物等^[18,33], 下游湖区靠近天目湖旅游区域, 受生活污水排放影响显著, 这一定程度上减弱了河口和下游湖区的差异. 另一方面, 下游湖区与河口相比受到扰动相对较小, 更有利于稳定的微生物作用, 这与表征新生内源 CDOM 的指数 BIX 从河口处向大坝出水口处递增相印证 (图 4)^[32].

3.3 天目湖 CDOM 季节差异分析

天目湖 CDOM 组成季节差异主要表现在夏、秋季节与冬、春季的差异 (图 7). 不同季节不仅代表降雨量和径流输入的差异, 还对水体温度、热分层和浮游植物生物量等产生显著影响^[22], 从而影响天目湖 CDOM 组分特征. 值得指出的是, CDOM 不同组分荧光强度极大值一般出现在夏季 (图 6), 但从平均值来看, 夏季 CDOM 丰度 $a(254)$ 和 C1、C2 和 C4 组分荧光强度低于秋季. 这一方面可能是由于径流不仅携带有机物进入水体, 较高的降雨量和径流量对湖水也具有一定的稀释作用. 另一方面, 以往研究曾发现, 强降雨过程中天目湖水体 CDOM 各荧光组分浓度并未出现高值, 而强降雨过程后 CDOM 组分荧光强度则出现上升并维持高值, 说明降雨和径流输入对天目湖 CDOM 的影响具有时滞效应^[47]. 此

外, 在水力滞留时间较长的其他湖泊或水库中也发现, 在发生暴雨径流后 30 d 内 DOC 浓度始终保持在高于径流前的水平^[39,48]. 同时, 有研究发现天目湖 5~9 月浮游植物生物量均维持在较高水平^[25], 即经过春、夏季节水体中积累了大量的浮游植物生物量, 微生物降解浮游植物过程中伴随着类蛋白组分和类腐殖酸组分的转化^[14]. 除此之外, 天目湖在 5~9 月存在明显的热分层现象不利于底层与表层的物质交换, 且热分层时期底层溶氧和营养盐含量处于较低水平, 会抑制底层微生物对有机物的降解活动, 而秋季 10 月份水体热分层消失^[22], 有利于底层 CDOM 向表层的释放. 以往研究表明, 对于浅水湖泊如太湖而言, 风浪扰动等引起的底泥再悬浮也会造成 CDOM 从底泥间隙水中的释放^[49], 这可能意味着沉积物释放也是天目湖秋季 CDOM 丰度较高的一个原因, 未来还需进一步研究.

湖泊内 CDOM 在接收外源、内源和人类活动来源的同时, 也经历着光和微生物介导的有机物矿化^[50,51], 也就是说湖泊内 CDOM 通常处于新生与降解的动态平衡的瞬时态. 有研究表明, 光降解会导致 $S_{275-295}$ 的增加^[28,52], 这可能在一定程度上解释了夏季 $S_{275-295}$ 及 PC1 显著高于冬季 (图 6 和图 7) 的现象. 光降解类腐殖质物质不仅造成无机碳的产生, 还会伴随着不易光降解的小分子有机物的产生, 可进一步促进微生物对有机物的利用^[53,54], 这一过程也伴随着 BIX 的升高^[53]. 因此对 CDOM 组成的研究不仅要考虑 CDOM 的不同来源, 更要结合微生物和光降解对 CDOM 的矿化作用, 才能更准确地解释其组成及时空分异特征.

4 结论

(1) CDOM 荧光光谱平行因子分析结果显示, 天目湖 CDOM 库以微生物作用类腐殖酸组分和类色氨酸组分占主导, 其次为类酪氨酸和陆源类腐殖酸组分, 表明天目湖 CDOM 组成受外源输入和内源自生的共同影响.

(2) 天目湖河口区域 $a(254)$ 、微生物作用类腐殖酸组分和陆源类腐殖酸高于下游湖区, 而 $S_{275-295}$ 、 $a(250):a(365)$ 和 PC1 低于下游湖区, 说明河流输入导致河口区域 CDOM 腐殖质化程度升高, 且这一部分 CDOM 分子量较大.

(3) 天目湖 CDOM 组成季节差异主要表现在夏、秋季节与冬、春季的差异. 不同季节对 CDOM 组成的影响不仅表现在降雨量和径流输入的差异, 还需综合考虑水体温度、热分层、浮游植物生物量以及微生物和光降解对 CDOM 的矿化作用等对

CDOM 组成的影响。

致谢:感谢叶小锐、石玉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] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 151-160.
Han B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(2): 151-160.
- [2] 朱广伟, 陈伟民, 李恒鹏, 等. 天目湖沙河水库水质对流域开发与保护的响应[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 809-817.
Zhu G W, Chen W M, Li H P, *et al.* Response of water quality to the catchment development and protection in Tianmuhu Reservoir, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(6): 809-817.
- [3] 张黎庆, 王银龙. 水库水质保护措施探讨[J]. 环境与发展, 2014, **26**(6): 19-24.
Zhang L Q, Wang Y L. Study on reservoir water quality protection measures[J]. Environment and Development, 2014, **26**(6): 19-24.
- [4] 孙振刚, 张岚, 段中德. 我国水库工程数量及分布[J]. 中国水利, 2013, (7): 10-11.
- [5] Coble P G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color[J]. Chemical Reviews, 2007, **107**(20): 402-418.
- [6] 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.
- [7] Archibald J P, Santos I R, Davis K L. Diel versus tidal cycles of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) and radon in a coral reef in the Great Barrier Reef[J]. Regional Studies in Marine Science, 2019, **29**, doi: 10.1016/j.rsmas.2019.100659.
- [8] 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.
- [9] Clements W H, Brooks M L, Kashian D R, *et al.* Changes in dissolved organic material determine exposure of stream benthic communities to UV-B radiation and heavy metals: implications for climate change[J]. Global Change Biology, 2008, **14**(9): 2201-2214.
- [10] Chen Y L, Arnold W A, Griffin C G, *et al.* Assessment of the chlorine demand and disinfection byproduct formation potential of surface waters via satellite remote sensing[J]. Water Research, 2019, **165**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115001.
- [11] Wang M, Chen Y G. Generation and characterization of DOM in wastewater treatment processes[J]. Chemosphere, 2018, **201**: 96-109.
- [12] Zhang Y L, Zhou L, Zhou Y Q, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter in inland waters: Present knowledge and future challenges[J]. Science of the Total Environment, 2021, **759**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143550.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Bai L L, Cao C C, Wang C H, *et al.* Toward quantitative understanding of the bioavailability of dissolved organic matter in freshwater lake during cyanobacteria blooming[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(11): 6018-6026.
- [16] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, *et al.* Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy[J]. Marine Chemistry, 2008, **108**(1-2): 40-58.
- [17] Spencer R G M, Guo W D, Raymond P A, *et al.* Source and biolability of ancient dissolved organic matter in glacier and lake ecosystems on the Tibetan Plateau[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, **142**: 64-74.
- [18] 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.
- [19] Heibati M, Stedmon C A, Stenroth K, *et al.* Assessment of drinking water quality at the tap using fluorescence spectroscopy[J]. Water Research, 2017, **125**: 1-10.
- [20] Zhang Y L, Zhou Y Q, Shi K, *et al.* Optical properties and composition changes in chromophoric dissolved organic matter along trophic gradients: Implications for monitoring and assessing lake eutrophication[J]. Water Research, 2018, **131**: 255-263.
- [21] 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.
- [22] 孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2632-2640.
Sun X, Zhu G W, Da W Y, *et al.* Thermal stratification and its impacts on water quality in Shahe Reservoir, Liyang, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2632-2640.
- [23] 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.
- [24] 陈乐, 周永强, 周起超, 等. 抚仙湖有色可溶性有机物的来源组成与时空变化[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1357-1367.
Chen L, Zhou Y Q, Zhou Q C, *et al.* Sources, composition and spatiotemporal variations of chromophoric dissolved organic matter in a deep oligotrophic Lake Fuxian, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1357-1367.
- [25] 崔扬, 朱广伟, 李慧赞, 等. 天目湖沙河水库水质时空分布特征及其与浮游植物群落的关系[J]. 水生态学杂志, 2014, **35**(3): 10-18.
Cui Y, Zhu G W, Li H Y, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir and its relationship with phytoplankton community[J]. Journal of Hydroecology, 2014, **35**(3): 10-18.

- [26] 孙祥. 水文气象对天目湖沙河水库藻类群落结构动态变化的影响[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2018.
- Sun X. Effects of hydrological and meteorological conditions on the dynamics of phytoplankton community structure in Shahe Reservoir, Tianmu Lake[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2018.
- [27] Zhou L, Zhou Y Q, Hu Y, *et al.* Hydraulic connectivity and evaporation control the water quality and sources of chromophoric dissolved organic matter in Lake Bosten in arid northwest China [J]. *Chemosphere*, 2017, **188**: 608-617.
- [28] 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.
- [29] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [33] Zhou Y Q, Shi K, Zhang Y L, *et al.* Fluorescence peak integration ratio $I_C:I_T$ as a new potential indicator tracing the compositional changes in chromophoric dissolved organic matter [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1588-1598.
- [34] Lawaetz A J, Stedmon C A. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water [J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 936-940.
- [35] Cawley K M, Butler K D, Aiken G R, *et al.* Identifying fluorescent pulp mill effluent in the Gulf of Maine and its watershed[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(8): 1678-1687.
- [36] 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.
- [37] Murphy K R, Hambly A, Singh S, *et al.* Organic matter fluorescence in municipal water recycling schemes: toward a unified PARAFAC model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(7): 2909-2916.
- [38] 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.
- [39] 李程遥, 黄廷林, 温成成, 等. 汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1391-1402.
- Li C Y, Huang T L, Wen C C, *et al.* Influence of storm runoff on the spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in a drinking water reservoir during the flood season [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1391-1402.
- [40] 刘日锋, 李扬, 马卫星, 等. 暴雨径流潜流演变特征及对水源水库水质的影响[J]. *供水技术*, 2017, **11**(4): 6-11, 16.
- Liu R F, Li Y, Ma W X, *et al.* Characteristics of rainstorm flow undercurrent evolution and its influence on water quality of source water reservoir[J]. *Water Technology*, 2017, **11**(4): 6-11, 16.
- [41] 李涛, 谈广鸣, 张俊华, 等. 水库异重流研究进展[J]. *中国农村水利水电*, 2006, (9): 21-24.
- [42] Pérez M T, Sommaruga R. Differential effect of algal- and soil-derived dissolved organic matter on alpine lake bacterial community composition and activity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(6): 2527-2537.
- [43] 石玉, 周永强, 张运林, 等. 太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4915-4924.
- Shi Y, Zhou Y Q, Zhang Y L, *et al.* Response of chromophoric dissolved organic matter composition to different hydrological scenarios in large eutrophic Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4915-4924.
- [44] 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.
- [45] 张柳青, 彭凯, 周蕾, 等. 南水北调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3018-3029.
- Zhang L Q, Peng K, Zhou L, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in key lakes in the middle reaches of the east route of the South-North Water Diversion Project [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3018-3029.
- [46] 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.
- [47] 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*, 2019, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134301.
- [48] Warner K A, Saros J E. Variable responses of dissolved organic carbon to precipitation events in boreal drinking water lakes[J]. *Water Research*, 2019, **156**: 315-326.
- [49] Zhou Y Q, Zhou J, Jeppesen E, *et al.* Will enhanced turbulence in inland waters result in elevated production of autochthonous dissolved organic matter? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 405-415.
- [50] Ward C P, Nalven S G, Crump B C, *et al.* Photochemical alteration of organic carbon draining permafrost soils shifts microbial metabolic pathways and stimulates respiration [J]. *Nature Communications*, 2017, **8**(1), doi: 10.1038/s41467-017-00759-2.
- [51] Cory R M, Ward C P, Crump B C, *et al.* Sunlight controls water column processing of carbon in arctic fresh waters[J]. *Science*, 2014, **345**(6199): 925-928.
- [52] 梁文健. 渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征

及季节变化的初步研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.

Liang W J. A preliminary study on distribution and seasonal variations of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.

[53] Li S D, Hou X, Shi Y, *et al.* Rapid photodegradation of

terrestrial soil dissolved organic matter (DOM) with abundant humic-like substances under simulated ultraviolet radiation[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(2), doi: 10.1007/s10661-019-7945-7.

[54] Tranvik L J, Bertilsson S. Contrasting effects of solar UV radiation on dissolved organic sources for bacterial growth[J]. *Ecology Letters*, 2001, **4**(5): 458-463.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjks@rcees.ac.cn;网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)