

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

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

张柳青^{1,2}, 彭凯^{2,3}, 周蕾^{2,3}, 石玉², 李元鹏², 周永强², 龚志军², 张运林², 杨艳^{1*}

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637000; 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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 运用三维荧光光谱(excitation-emission matrices, EEMs)与平行因子分析模型(parallel factor analysis, PARAFAC)技术手段对南水北调东线枢纽湖泊洪泽湖、骆马湖两个水体中 CDOM 的来源组成特征进行分析。结果表明: ①解析出两湖泊均得到3个荧光组分, 陆源类腐殖质 C1、类色氨酸 C2 和类酪氨酸 C3。②两湖泊3种组分荧光强度在入湖河口附近明显高于其他水域, 且丰水季节3种组分荧光强度均显著大于枯水季节(t -test, $P < 0.01$), 其中陆源类腐殖质 C1 的荧光强度在丰水期最大。表明两湖水体 CDOM 来源与组成受上游水系来水量和水文过程的影响较大, 尤其是陆源类腐殖质浓度的高低。③相关性分析得出, 陆源类腐殖质 C1 与 DOC 浓度、吸收系数 $a(254)$ 有极显著相关性($r^2 = 0.60$, $P < 0.01$; $r^2 = 0.88$, $P < 0.01$), 相关性高于其余两种组分, 表明陆源类腐殖质为 CDOM 的主要来源。另外, 陆源类腐殖质 C1 与 SUVA、 $S_{275-295}$ 、 $I_C:I_T$ 具有很好的相关性($r^2 = 0.49$, $P < 0.01$; $r^2 = 0.61$, $P < 0.01$; $r^2 = 0.93$, $P < 0.01$), 进一步说明了两湖泊 CDOM 来源与组成受陆源影响较大。洪泽湖、骆马湖 CDOM 来源与组成受到不同水文情景和入湖河流的影响, 应加强丰水期对入湖河流的水质管理。

关键词: 南水北调; 洪泽湖; 骆马湖; 有色可溶性有机物; 平行因子分析

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3018-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811137

Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project

ZHANG Liu-qing^{1,2}, PENG Kai^{2,3}, ZHOU Lei^{2,3}, SHI Yu², LI Yuan-peng², ZHOU Yong-qiang², GONG Zhi-jun², ZHANG Yun-lin², YANG Yan^{1*}

(1. College of Environment Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637000, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Lake Hongze and Lake Luoma are two key lakes located in the middle reaches of the east line of the South-to-North Water Diversion Project. We attempted to unravel the sources and optical composition of CDOM for samples collected from these lakes using excitation-emission matrices (EEMs) and parallel factor analysis (PARAFAC). ① Three fluorescent components were obtained using PARAFAC, including a terrestrial humic-like C1, a tryptophan-like C2, and a tyrosine-like C3. The sources and optical composition of CDOM in the two lakes were, to a large extent, affected by upstream inflow. ② Specifically, fluorescence intensity ($F_{\max}$) of the three components C1-C3 in the inflowing river mouths of the two lakes was notably higher than in the other lake regions, and $F_{\max}$ of the three components during the flood season was significantly higher than during the dry season (t -test, $P < 0.01$). During the flood season, the fluorescence intensity of the terrestrial humic-like component was the highest. This indicates that the source and composition of CDOM in the two lakes are greatly affected by the inflow from the upstream water system, and that the hydrological processes control the abundance and sources of CDOM, especially the terrestrial humic-like C1. ③ Significant positive relationships were found between the terrestrial humic-like C1 and the DOC concentrations and CDOM absorption $a(254)$ ($r^2 = 0.60$, $P < 0.01$; $r^2 = 0.88$, $P < 0.01$), and the correlation was higher than the other two components. This indicated that the terrestrial humic-like component was the main source of CDOM. In addition, the terrestrial humic-like C1 had a significant positive correlation with SUVA, $S_{275-295}$, and the integration ratio of the fluorescence peak C to peak T ($I_C:I_T$) ($r^2 = 0.49$, $P < 0.01$; $r^2 = 0.61$, $P < 0.01$; $r^2 = 0.93$, $P < 0.01$). It is further revealed that the source and composition of CDOM in the two lakes are greatly affected by land sources. This study reveals the response of CDOM source and composition in Lake Hongze and Lake Luoma to different hydrological scenarios and water transfer processes. Based on these results, the water quality management of the rivers entering the lake should be strengthened during the flood season.

Key words: South-North Water Diversion Project; Lake Hongze; Lake Luoma; chromophoric dissolved organic matter (CDOM); parallel factor analysis (PARAFAC)

收稿日期: 2018-11-19; 修订日期: 2019-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807362, 41621002); 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); 中国科学院南京湖泊地理研究所启动基金项目(NIGLAS2017QD08)

作者简介: 张柳青(1994~), 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: 307010856@qq.com

* 通信作者, E-mail: sister_yy@sina.cn

南水北调工程是我国战略性水利工程,关系到国计民生的长远发展,该工程分为东、中、西三条线路,旨在解决我国北方,尤其是京、津、冀缺水问题^[1]. 其东线工程起点位于江苏省扬州附近的长江干流,通过京杭大运河以及与之平行的河道输水,连通高邮湖、洪泽湖、骆马湖、南四湖等湖泊作为调蓄湖泊. 洪泽湖和骆马湖同属于淮河水系淡水湖泊,物产丰富,是重要的水源地,同时也是南水北调东线工程重要枢纽,其水质关系到淮河流域经济带的可持续性发展以及南水北调的水质安全^[2-5]. 近年来,由于流域经济的快速发展,洪泽湖和骆马湖水质受到人类活动以及大规模调水的影响,各种来源的污染物排到湖泊,导致水体中溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)浓度升高且来源更为复杂. 姚昕等^[6]和邢友华等^[7]对东平湖的研究发现其主要入湖河流携带大量的工业废水、生活污水,加上农田径流、水产养殖等污染物的输入,致使东平湖水体富营养化和有机污染的加重. 另外,水体交换过程导致部分 DOM 经生物和光化学过程不断矿化,而难于降解的 DOM 继续迁移,对相连的湖泊水体造成一定的影响,还会影响局地碳循环过程^[8-10].

天然水体中存在的 DOM 是生物圈中最大的有机碳库,在全球碳循环中起重要作用^[9]. DOM 是由富里酸、腐殖质、脂肪族和芳烃化合物等一系列复杂的有机物质组成,高浓度的 DOM 酸臭刺鼻,在水处理过程中通常能释放大量致癌物质,不仅污染处理设备,还会严重威胁人类健康^[11]. 有色可溶性有机物质(chromophoric DOM, CDOM)是 DOM 中能强烈吸收紫外和可见光的部分,因而通过其吸收光谱能在一定程度上揭示 DOM 浓度和组成^[12]. CDOM 化学结构复杂,一部分功能基团能与水体中的有机污染物发生相互作用,从而影响它们的迁移转化和生物可利用性等,同时 CDOM 还能作为水质状况的监测指标^[13].

三维荧光光谱-平行因子分析法结合解析出 CDOM 组分的方法已经被广泛运用到各类水体中,可有效地揭示 CDOM 来源、组成及迁移转化途径^[14],施坤等^[15]对比分析了太湖、巢湖水体 CDOM 吸收特性和组成的异同,周倩倩等^[16]运用三维荧光-平行因子分析对舟山渔场 CDOM 的分布特征进行了研究,但是对洪泽湖和骆马湖的水质的研究较少. 本文基于洪泽湖、骆马湖 CDOM 吸收和荧光变化特征,探究南水北调工程枢纽湖泊 CDOM 的来源组成及潜在驱动机制,通过进一步丰富对洪泽湖和骆马湖水体 CDOM 的研究资料,弄清外源输

入 CDOM 来源和组成结构特征,以期为保证南水北调工程良好可持续地开展以及制定有效的保护措施提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

在洪泽湖和骆马湖分别均匀布设 10 个表层水样采样点(图 1),在 2017 年的 9、12 月,2018 年 4 月对洪泽湖,并在 2017 年的 9、12 月,2018 年的 4、6、7 月对骆马湖进行样品采集,用酸洗过的聚氯乙烯瓶避光冷藏保存并及时送回实验室. 先使用高温灼烧过(450℃ 烧 4 h)的 0.70 μm 孔径的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,所得水样再通过 0.22 μm Millipore 滤膜过滤,滤后水样装入棕色瓶并于 4℃ 恒温冷藏保存,通常在 5 d 内完成所有测试分析. 通过 0.70 μm 滤膜的水样用于测定溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)浓度;通过 0.22 μm 滤膜的水样用于测定 CDOM 吸收光谱和三维荧光光谱.

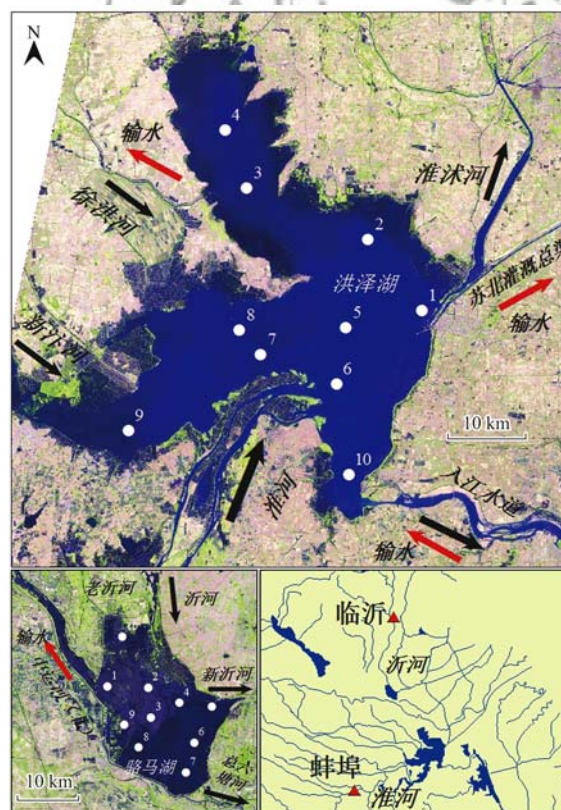


图 1 洪泽湖和骆马湖采样点及流域水文控制站位置

Fig. 1 Location of sampling sites in Lake Hongze and Lake Luoma and hydrological gauging stations in the two lake watersheds

1.2 水文数据

本研究收集的水文资料来自于水利部淮河水利委员会(<http://www.hrc.gov.cn/>)、中国河流泥沙公报,包括 2014 ~ 2017 年淮河、沂河两个控制站

(分别为蚌埠和临沂)的月均径流量数据、2008 ~ 2016 年洪泽湖、骆马湖年径流量和蓄水量数据以及引江济淮调水量数据。

1.3 样品参数测定

1.3.1 紫外-可见吸收光谱及 DOC 的测定

采用 Shimadzu UV-2550 UV-Vis 分光光度计测定 CDOM 的吸收光谱,用 5 cm 比色皿,以 Milli-Q 水为空白对照,在 200 ~ 800 nm 和间隔 1 nm 的设置下测量 CDOM 的吸光度.扣除 700 nm 吸光度以扣除潜在散射效应,而后根据公式(1)计算对应波长的吸收系数^[17]:

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

式中, $a(\lambda)$ 表示波长 λ 对应 CDOM 吸收系数 (m^{-1}), $D(\lambda)$ 表示扣除 700 nm 处吸光度在波长 λ 的吸光度, r 指光程路径 (m). 在本研究使用特征波长吸收系数 $a(254)$ 、比紫外吸光系数 SUVA 和光谱斜率 $S_{275-295}$ 等吸收光谱指标表征 CDOM 丰度、来源和组成.

$a(254)$ 指 CDOM 在 254 nm 处的吸收系数. 比紫外吸光系数 SUVA 是 $a(254)$ 与 DOC 浓度的比值,能够指示水体中包括芳香族化合物在内的具有不饱和碳碳键的化合物的浓度变化,该指标值越高,陆源类腐殖质信号越强^[18]. CDOM 光谱斜率 $S_{275-295}$ 表示 275 ~ 295 nm 波长范围内拟合得到的指数函数的光谱斜率,能够在一定程度上反映 CDOM 组成,其值越小,反映 CDOM 的陆源腐殖程度越高. 根据公式(2)计算光谱斜率 $S_{275-295}$ ^[19]:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \times \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (2)$$

式中, λ_0 表示参照波长 440 nm, S 表示光谱斜率.

DOC 浓度采用岛津总有机碳分析仪 (TOC-L) 在高温 (680℃) 环境下采用 NPOC 扫吹模式进行测定^[20].

1.3.2 三维荧光光谱测定

CDOM 荧光激发-发射光谱矩阵 (excitation-emission matrices, EEMs) 采用 F-7000 型荧光光度计 (Hitachi 公司) 测定,激发光谱范围在 200 ~ 450 nm, 间隔 5 nm; 发射光谱范围在 250 ~ 600 nm, 间隔 1 nm. 测得的三维荧光光谱先进行水拉曼散射校正,即扣除超纯水 (Milli-Q) 空白 EEMs,并以超纯水 EEMs 中 350nm 下的荧光强度将所有 EEMs 定标为拉曼单位 (Raman unit, R. U.)^[21];再采用 MATLAB 软件中的 drEEM 工具包通过切除及插值的方法进行瑞利散射校正;内滤波效应采用每个样品 EEMs 激发发射波长处相对应的吸光度进行校正^[22, 23]. 荧光峰 C 峰与 T 峰积分比值 $I_C:I_T$ 能很好地表征陆源类腐殖质荧光峰信号与内源类色氨酸荧

光峰信号之间的比值差异,能有效揭示 CDOM 来源组成特征,尤其是表征陆源类腐殖质输入信号强弱^[24].

1.3.3 平行因子分析 (PARAFAC)

平行因子分析 (PARAFAC) 采用交替最小二乘原理的迭代型三维数阵分解算法,将三维荧光数据解析为若干个具有唯一对应发射波长极值的荧光组分^[14, 25 ~ 27]. 采用 MATLAB R2015b 的 drEEM 工具箱 (ver. 0.2.0) 进行平行因子分析,共选取 77 个 (洪泽湖 30 个,骆马湖 47 个) EEMs 矩阵进行运算,每个矩阵对应 251 个发射波长、45 个激发波长. 数据被剖分成 6 个随机子集,取 3 个子集用于建模,另外 3 个用于模型验证,每个 EEMs 子集均从 3 个组分模型逐步到 6 个组分检验. 结果表明 3 个组分模型能很好地通过对半检验 (split-half analysis)、随机初始化分析 (random initialization analysis) 及残差分析 (residual analysis). 将平行因子分析结果中每个荧光组分的最大荧光强度 ($F_{\max}$) 作为各类荧光物质浓度和荧光组分强度的表征^[28].

1.4 数据处理

使用 SPSS 进行皮尔逊相关性分析,图表数据统计与数据绘制采用 Origin 8.5, ArcGIS 10.2 软件绘制采样点布设图及 CDOM 吸收、荧光参数插值图. EEMs 光谱的平行因子分析采用 MATLAB R2015b 软件的 drEEM 工具箱进行 CDOM 吸收光谱的拟合和相关指标的计算.

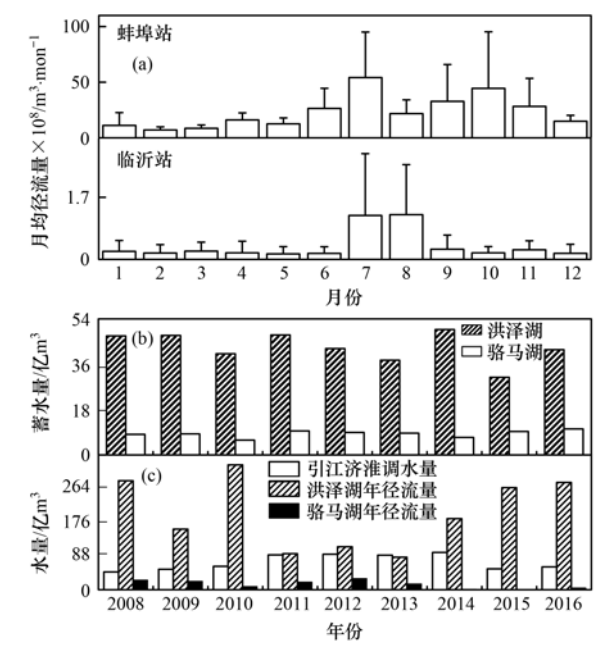
2 结果与分析

2.1 洪泽湖和骆马湖水文特征

淮河和沂河分别是洪泽湖、骆马湖的主要来水河流,图 2(a) 分别是淮河蚌埠站和沂河临沂站 2014 ~ 2017 年监测的月均径流量. 整体来看,两湖泊在丰水期的来水量均大于枯水期,且洪泽湖接纳淮河来水量远高于骆马湖接纳沂河来水量. 沂河枯水期时间长于淮河,除 7、8 月水量增高外,其余时间径流量基本相同. 淮河月径流量充沛,相对而言沂河丰、枯水期更替现象更为明显. 图 2(b) ~ 2(c) 可以看出,洪泽湖年蓄水量和主要来水河流年径流量均大于骆马湖,除了 2014 ~ 2016 年外,两湖泊主要入湖河流淮河和沂河年径流量大于两湖泊的年蓄水量. 每年引江济淮年调水量也低于洪泽湖主要入湖河流年径流量.

2.2 CDOM 光谱特性及 DOC 的时空特征

由表 1 可知,洪泽湖丰水期 SUVA (t -test, $P < 0.05$)、DOC 浓度和 $a(254)$ 均显著高于枯水期 (t -test, $P < 0.01$). 图 3(a) ~ 3(c) 和 3(j) ~ 3(l) 显



(a) 2014 ~ 2017 年蚌埠站和临沂站平均月均径流量情况，
(b) 2008 ~ 2016 年洪泽湖、骆马湖年蓄水量情况，
(c) 2008 ~ 2016 年引江济淮调水量和蚌埠站、
临沂站年径流量情况

图 2 洪泽湖和骆马湖月均径流量、年蓄水量、
年径流量以及引江济淮年调水量情况

Fig. 2 Monthly mean runoff, annual storage and yearly mean runoff in Lake Hongze and Lake Luoma, and the amount of water transferred from the River Yangtze to the River Huaihe

示,丰水期洪泽湖 DOC 浓度、吸收系数 $a(254)$ 在西南区域,即新汴河、淮河等入湖周围较高,枯水期(2018 年 4 月)在东南区域 DOC 浓度和 $a(254)$ 均小于其他区域,CDOM 浓度降低。从图 3(d)~3(e)看出,丰水期(2017 年 9 月)和枯水期(2017 年 12 月)主要是大分子有机物质较多,并且 CDOM 腐殖化程度较高。 $S_{275-295}$ 在丰、枯水期无显著差异,CDOM 可能具有同源性。从图 3(g)~3(i)可以看出, $S_{275-295}$ 在丰、枯水期,总是北部小片水滞留区

域较大,从入湖口自水流方向较小,表明入湖河流为洪泽湖 CDOM 的主要来源。丰水期 SUVA 值在淮河南入湖处及周围区域高于其他区域,在枯水期(2017 年 12 月),新汴河、徐洪河对洪泽湖 SUVA 影响增加。

骆马湖 DOC 浓度和 $a(254)$ 在丰水期显著高于枯水期($P < 0.01$),而丰水期和枯水期的 SUVA 和 $S_{275-295}$ 值无显著差异。图 4(a)~4(e)可以看出,丰水期骆马湖上游水系携带大量陆源 CDOM 输入,且 DOC 浓度自北部入湖区域向南部敞水区逐渐递减。 $a(254)$ 在丰水期和枯水期分布与 DOC 相似[见图 4(p)~4(t)]。SUVA 丰、枯水期表现为自西北入湖河口向东南下游敞水区逐次递减的趋势,这在丰水期(7、9 月)表现得尤为显著,表明骆马湖 CDOM 主要是河流输入。

2.3 荧光特征

2.3.1 CDOM 的荧光组分特征分析

采用 PARAFAC 模型对洪泽湖和骆马湖水样的三维荧光光谱矩阵进行解析和对半检验,最终确定 3 个荧光组分模型可以很好地模拟三维荧光光谱集,根据相关文献可以确定 3 个组分分别为:C1 陆源类腐殖质、C2 类色氨酸和 C3 类酪氨酸(图 5)^[29]。组分腐殖质 C1 荧光光谱类具有陆生植物或土壤有机物质光谱特征(250/410 nm)^[30],说明两个湖泊中 CDOM 外源输入的主要信号为陆源类腐殖质,一般为土壤淋溶随河流携入湖泊。C2 组分荧光光谱有一个发射波长在 330 nm 处,两个激发波长,即 230 nm 和 285 nm 处,为类蛋白质中的类色氨酸荧光物质,通常为藻源或者生活废水伴生 CDOM^[31]。C3 组分荧光光谱(275/315 nm)代表类蛋白质中的酪氨酸荧光物质,可能为藻源,抑或其他荧光组分经光化学或微生物矿化过程后的产物^[32]。

表 1 丰水期和枯水期 DOC 浓度、SUVA、 $S_{275-295}$ 和 $a(254)$ 均值及差异显著性水平 t 检验结果

Table 1 Properties of the means of DOC, SUVA, $S_{275-295}$, and $a(254)$ during the flood season and the dry season, and significance levels of difference between seasons using a t -test

地点	项目	DOC/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$a(254)/\text{m}^{-1}$	SUVA/ $\text{L} \cdot (\text{m} \cdot \text{mg})^{-1}$	$S_{275-295}/\mu\text{m}^{-1}$
洪泽湖	丰水期	4.966 ± 0.672	25.510 ± 2.846	5.187 ± 0.644	18.943 ± 1.542
	枯水期	3.448 ± 0.516	16.272 ± 3.233	4.710 ± 0.505	19.695 ± 2.065
	P	<0.01	<0.01	<0.05	>0.05
骆马湖	丰水期	4.248 ± 0.492	20.364 ± 4.427	4.469 ± 0.280	23.010 ± 2.762
	枯水期	3.643 ± 0.282	15.821 ± 1.493	4.347 ± 0.270	22.881 ± 1.439
	P	<0.01	<0.01	>0.05	>0.05

2.3.2 CDOM 荧光组分时空分布特征

由表 2 可知,洪泽湖 3 组分荧光强度在丰水期均显著高于枯水期(t -test, $P < 0.01$),且组分 C1 荧

光强度均高于其余两组分。丰水期(2017 年 9 月)组分 C1 荧光强度在西南区域高于东北区域,夏秋交替季节雨水量大,受入湖河流的影响较大。枯水

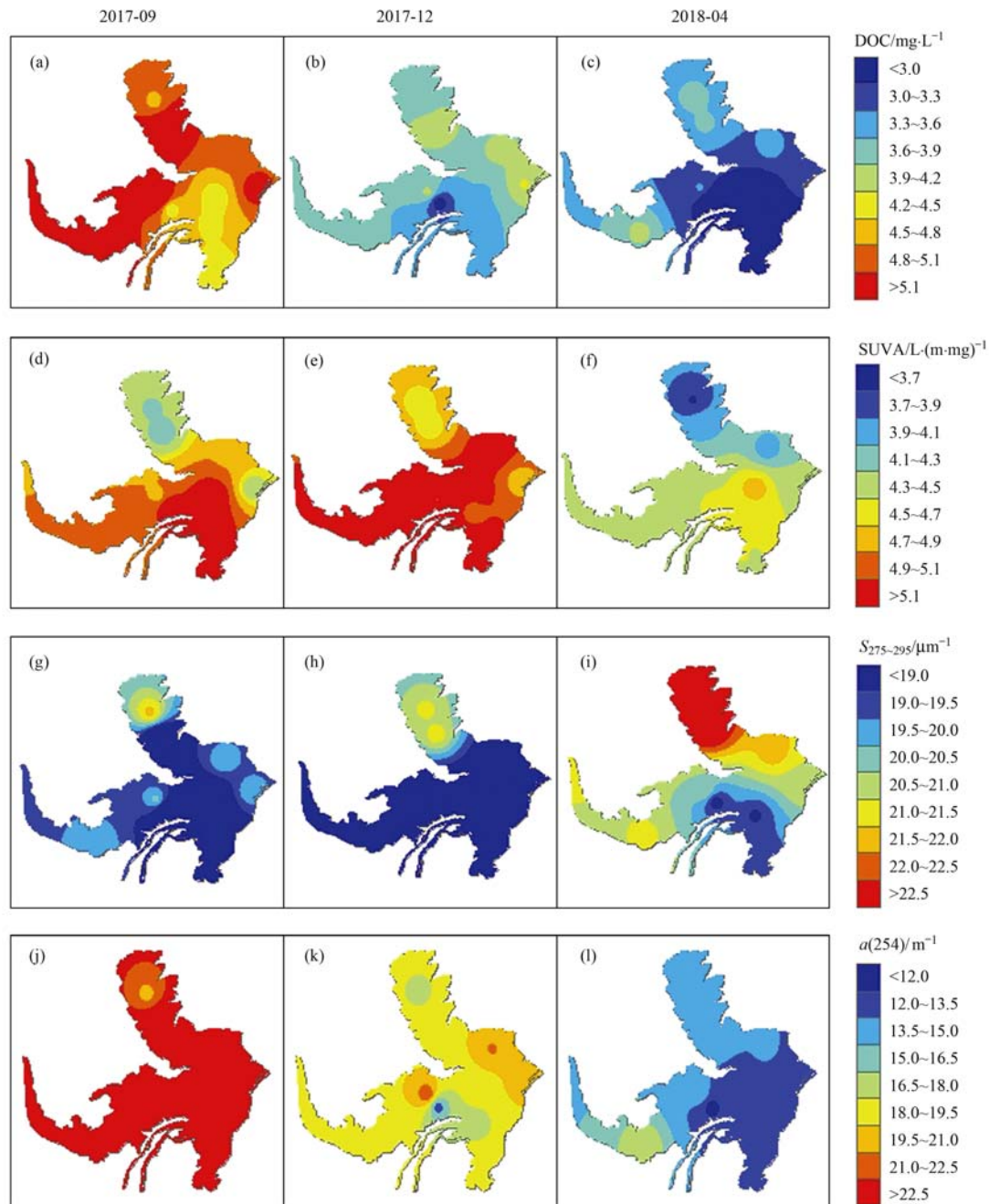


图3 洪泽湖在不同水文情景下 DOC、SUVA、 $S_{275-295}$ 和 $a(254)$ 空间分布

Fig. 3 Spatial variabilities of dissolved organic carbon (DOC), ratio of specific ultraviolet absorption at 254 nm to DOC concentration (SUVA), CDOM spectral slope $S_{275-295}$, and CDOM absorption coefficient $a(254)$ in Lake Hongze under different hydrological scenarios

期(2017年12月和2018年4月)组分C1在洪泽湖分布比较均匀,仅北边小片区域较低。枯水期(2017年12月)的组分C2和C3荧光强度在东南、西南区域浓度低于其余区域。此外,枯水期组分C3在洪泽湖北部区域荧光信号较强(图6)。

骆马湖丰水期3种荧光组分荧光强度均显著高于枯水期(t -test, $P < 0.01$),类色氨酸C2在丰水期最高,枯水期陆源类腐殖质C1荧光强度最低。整体来看,3种荧光物质呈由北到南逐渐降低的趋势(图7)。从图7(c)~7(e)可以看出组分C1荧光强

度空间分布均匀,同时组分C2在枯水期(2018年4月)和丰水期(2018年6月、7月)空间分布相似,入湖口较高,随后逐渐降低。丰水期(2018年6、7月)组分C3高于其余两种荧光物质,随梅雨季节后,气温升高,湖水发生轻微藻华,从而导致其浓度的升高。

2.3.3 相关性分析

由图8、9和表3可知,DOC浓度、吸收系数 $a(254)$ 与3种组分荧光强度均有显著正相关性,其中陆源腐殖质C1与 $a(254)$ 的相关性最好($r^2 =$

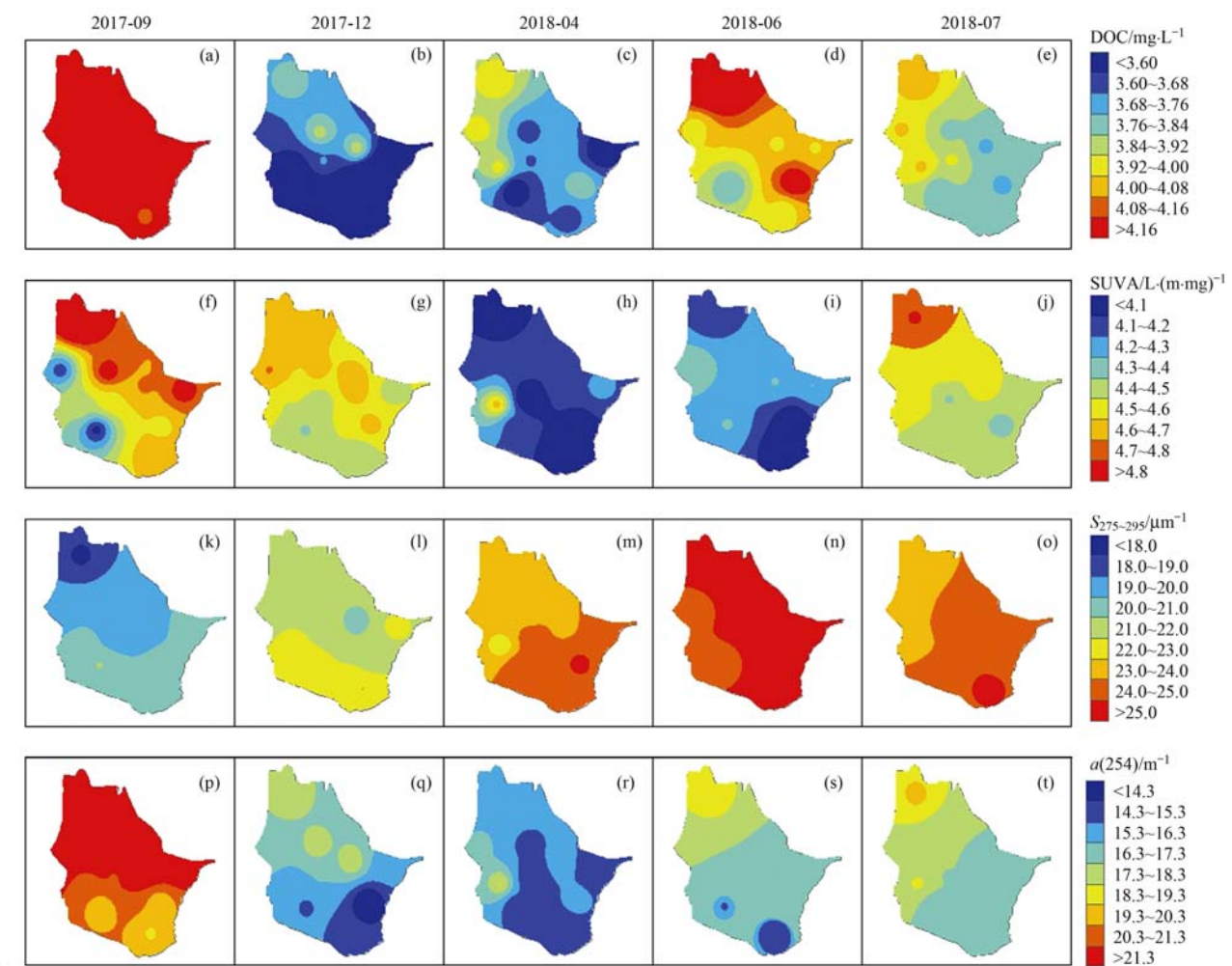


图4 骆马湖在不同水文情景下 DOC、SUVA、 $S_{275-295}$ 和 $a(254)$ 空间分布

Fig. 4 Spatial variabilities of dissolved organic carbon (DOC), ratio of specific ultraviolet absorption at 254 nm to DOC concentration(SUVA), CDOM spectral slope $S_{275-295}$, and CDOM absorption coefficient $a(254)$ in Lake Luoma under different hydrological scenarios

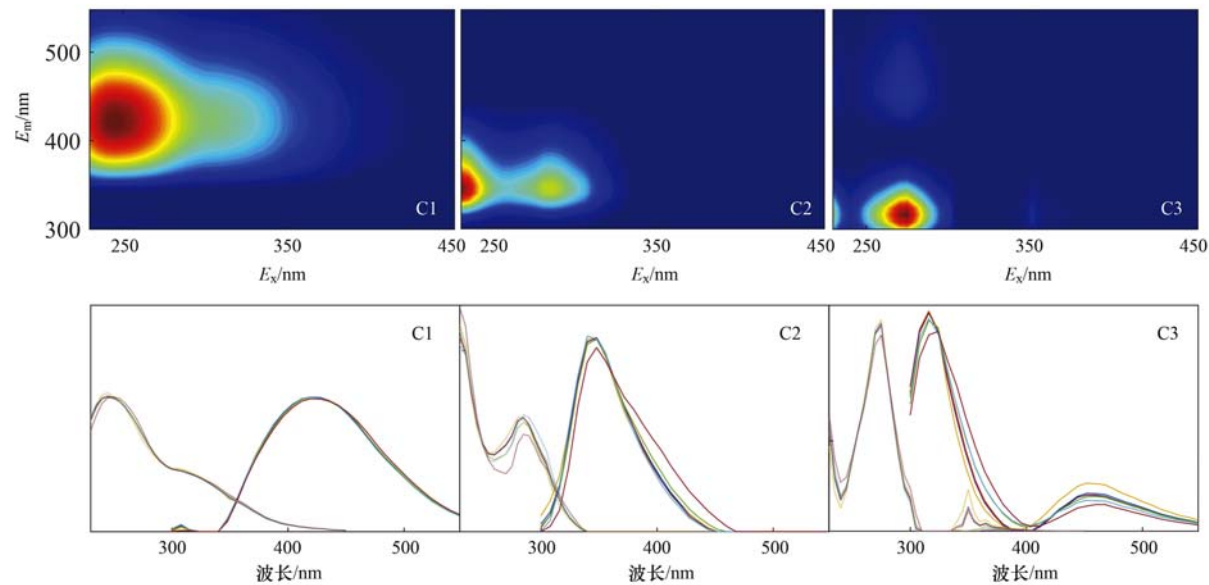


图5 平行因子分析得到的3个荧光组分荧光光谱和对半检验结果

Fig. 5 Fluorescence spectra of the three PARAFAC components and the three-component-model was well validated using split-half validation

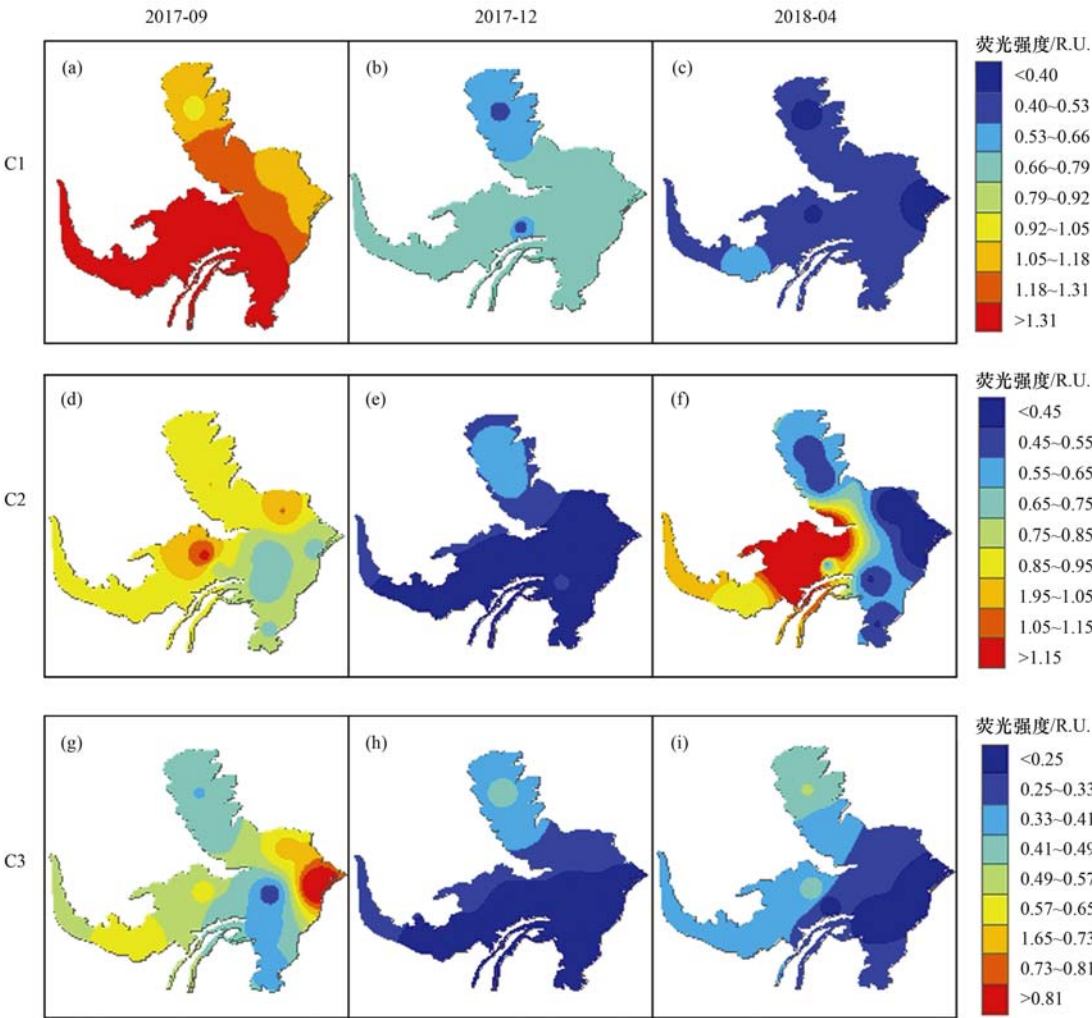


图 6 洪泽湖 3 种荧光组分在不同水文情景下的空间分布

Fig. 6 Spatial variations of the three components in Lake Hongze under different hydrological scenarios

表 2 丰水期和枯水期 3 种荧光组分荧光强度均值及差异显著性水平 *t* 检验结果

Table 2 Properties of the means of the three components during the flood season and the dry season, and significance levels of difference between these two seasons using a *t*-test

地点	项目	C1/R. U.	C2/R. U.	C3/R. U.
洪泽湖	丰水期	1.289 ± 0.179	0.867 ± 0.167	0.519 ± 0.212
	枯水期	0.587 ± 0.158	0.476 ± 0.123	0.296 ± 0.098
	<i>P</i>	<0.01	<0.01	<0.01
骆马湖	丰水期	0.739 ± 0.258	0.934 ± 0.399	0.759 ± 0.128
	枯水期	0.473 ± 0.095	0.705 ± 0.099	0.571 ± 0.089
	<i>P</i>	<0.01	<0.01	<0.01

0.88, $P < 0.01$), 是 CDOM 组成的主要组分. 而 DOC 浓度与 3 种组分荧光强度的比例的相关性弱. $S_{275-295}$ 与 C1、C3 组分荧光强度的比例有显著相关性 ($r^2 = 0.61$, $P < 0.01$; $r^2 = 0.82$, $P < 0.01$)、SUVA 和 $I_c:I_T$ 与 3 种组分荧光强度的比例显著相关, 其中陆源类腐殖质 C1 荧光强度的比例与 $I_c:I_T$ 的相关性最好 ($r^2 = 0.93$, $P < 0.01$), 除了类色氨酸 C2 与 $S_{275-295}$ 和 SUVA 均无显著相关性外, 其余两种组分荧光强度与 $S_{275-295}$ 、SUVA 和 $I_c:I_T$ 均有显著相关

性, SUVA 和 $I_c:I_T$ 能很好地反映两湖泊 CDOM 的组成特征.

3 讨论

3.1 入湖河流对洪泽湖、骆马湖 CDOM 来源及组成的影响

洪泽湖是淮河中游湖泊, 主要入湖河流有淮河、新沂河、徐洪河等, 骆马湖南面与洪泽湖相连, 京杭运河、沂河为其主要入湖河流^[33, 34]. 有研究结

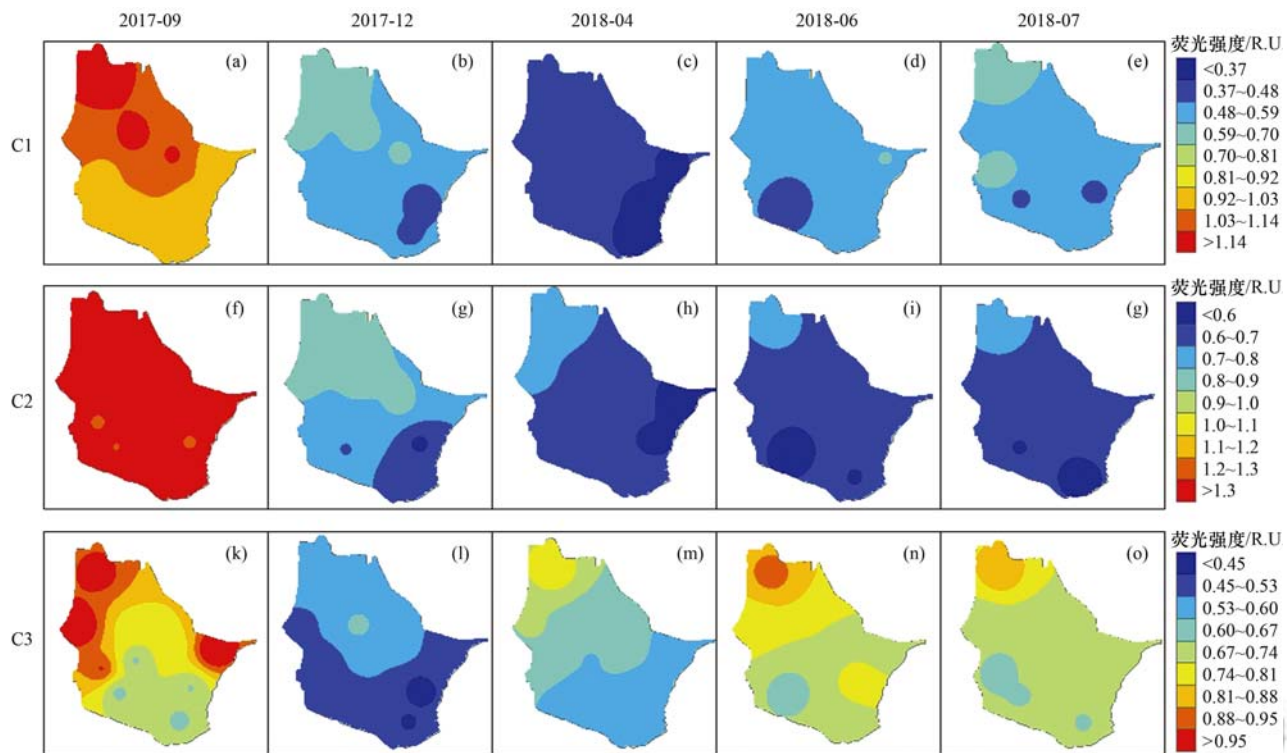


图7 骆马湖3种荧光组分在不同水文情景下的空间分布
Fig. 7 Spatial variations of the three components in Lake Luoma under different hydrological scenarios

表3 DOC、 $S_{275-295}$ 、SUVA、 $a(254)$ 、 $I_C:I_T$ 与3个荧光组分的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 3 Pearson's correlation coefficient between DOC, $S_{275-295}$, SUVA, $a(254)$, $I_C:I_T$, and the three components

项目	C1	C2	C3	C1 百分比	C2 百分比	C3 百分比
DOC	0.779 **	0.675 **	0.533 **	0.136	-0.071	-0.118
$a(254)$	0.942 **	0.566 **	0.260 **	0.486 **	-0.235 *	-0.433 **
$S_{275-295}$	-0.626 **	-0.219	0.445 **	-0.787 **	0.033	0.909 **
SUVA	0.661 *	0.071	-0.327 **	0.781 **	-0.364 **	-0.704 **
$I_C:I_T$	0.451 **	-0.375 **	-0.647 **	0.963 **	-0.663 **	-0.740 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; 2) 百分比表示每种组分荧光强度占3种组分总荧光强度的百分比

果显示,洪泽湖和骆马湖 CDOM 的来源与组成受人湖河流影响较大,这可能是由于两湖泊均是淮河水系且夏季受东南季风的影响,湖水主要补给形式为降水径流^[35],因此入湖河流水质主要决定湖泊 CDOM 来源与组成,从陆源类腐殖质的空间分布情况也能印证。陆源类腐殖质与 SUVA、 $S_{275-295}$ 、 $I_C:I_T$ 具有很好的相关性,进一步说明了陆源类腐殖质占主导地位。入湖河流携带 CDOM 进入湖泊后随迁移过程发生光降解或微生物降解,这可能是导致 CDOM 相对分子质量逐渐下降的原因^[36],这一规律在骆马湖水体中更为明显,而洪泽湖北部区域 $S_{275-295}$ 总高于其余区域,该区域主要为小分子有机物质,受其入湖河流的影响较小。从 SUVA 的分布来看,也能发现其腐殖化程度低于其余区域。

3.2 不同水文情景对洪泽湖、骆马湖 CDOM 来源及组成的影响

骆马湖水体中陆源类腐殖质和两种类蛋白质物质

荧光强度的空间分布与洪泽湖有类似的季节性变化,丰水期3种荧光物质浓度明显高于枯水期,且3种荧光物质浓度与 DOC 浓度和 $a(254)$ 有显著正相关性,表明两湖泊 CDOM 的来源可能存在同源性,这与两水体中 CDOM 主要贡献为陆源类腐殖质的研究结果相符合。两湖通过徐洪河等河道连通,水体的交互作用可能也是其 CDOM 荧光组分在不同水文情景下分布相似的原因。洪泽湖陆源腐殖质 C1 高于骆马湖,这可能是由于丰水期洪泽湖月径流量大于骆马湖,且接纳淮河来水量较大,受陆源影响明显^[5]。洪泽湖3种组分在西南区域(即入湖河流区域)高于其余区域,丰水期尤为明显,骆马湖与洪泽湖有类似的规律,进一步表明了入湖河流对两湖泊 CDOM 的贡献较大。

然而,两湖泊类腐殖质和类蛋白质含量在枯水期降低,这是由于枯水期温度较低,藻类等生长缓慢,内源释放较低。相反,丰水期温度升高,光

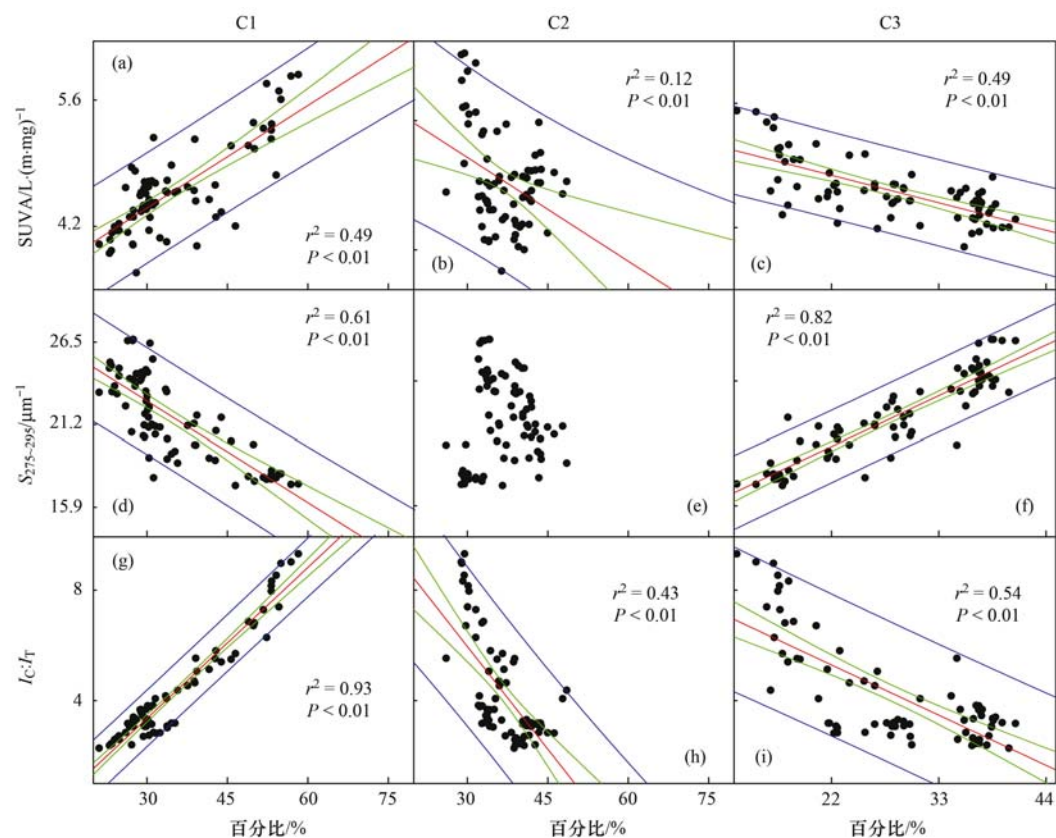


图8 SUVA、 $S_{275-295}$ 、 $I_C:I_T$ 和3个组分荧光强度百分比的相关性分析

Fig. 8 Relationships between of percentage of the three components and SUVA, $S_{275-295}$, and $I_C:I_T$

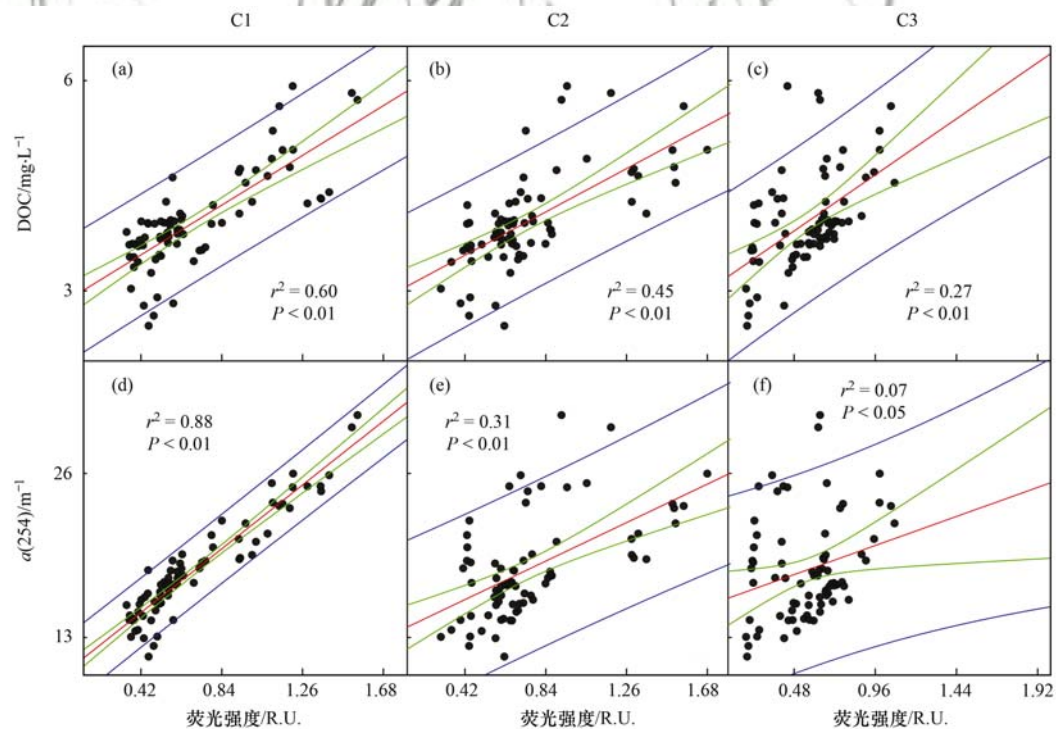


图9 DOC、 $a(254)$ 和3个组分荧光强度的相关性分析

Fig. 9 Correlations between the three components, DOC, and $a(254)$

照增强,加快了藻类的生长和大分子物质光降解作用,导致类色氨酸和类酪氨酸含量明显增高,与 Yao^[37] 和刘兆冰^[38] 的研究结果相似,此现象在洪

泽湖北部水滞留区域尤为明显,这可能是由于水体交换速率较低,促进 CDOM 的矿化,亦或是内源贡献较高. 骆马湖丰、枯水期 SUVA、 $S_{275-295}$ 无显著差

异,可能是由于其入湖河流量及蓄水量较低,CDOM 组成结构受水文交替的影响较小.但骆马湖 9 月 CDOM 相对分子质量较低,沿河流入湖的方向腐殖化程度降低,表明夏季骆马湖内源补给较为明显,这是因为夏季温度升高,浮游植物生长速度加快,其胞外分泌物和残体降解过程中可能释放大内源 CDOM^[39,40].洪泽湖在丰水期 CDOM 腐殖化程度高于枯水期,但相对分子质量与其无显著差异,表明 CDOM 组成结构相似,一方面可能由于秋冬季节光照和微生物分解能力降低,CDOM 内源补给水平较低,另一方面由于陆源类腐殖质输入高^[41].

3.3 南水北调工程对洪泽湖、骆马湖 CDOM 来源及组成的影响

南水北调是大规模的跨流域调水工程,调水过程必定会引起调入区和调出区的水体环境,如泥沙、水生植物和生态环境等方面的变化^[42].本研究结果表明了两湖泊水体中 CDOM 的来源、组成结构以及空间分布情况很相似,且骆马湖陆源类腐殖质低于洪泽湖,这可能是旱季调水经过洪泽湖后再进入骆马湖,CDOM 同时受洪泽湖和调水影响,矿化作用小于洪泽湖^[17].本研究也显示了两湖泊枯水期,即调水期间,DOC 浓度和吸收系数 $a(254)$ 值低于丰水期,可能是由于调水水质较好,起到一定的稀释作用,亦或是水交换过程改变了湖泊的环境,导致 CDOM 组成发生变化^[43,44].进一步影响水体中 CDOM 来源与组成特征.骆马湖在调水(枯水期)和非调水期间其 SUVA 和 $S_{275-295}$ 值均无显著差异,其 CDOM 结构组成受调水的影响较小.此外,有研究发现从长江调水过程增大了湖泊富营养化的可能性^[33,45],改变了碳氮比,影响水体植物的生长发育,已有研究表明,当植物生长过程中发生氮限制,其会释放一部分初级生产力到水体中^[46,47].

4 结论

(1) 运用 PARAFAC 解析洪泽湖、骆马湖 CDOM 的三维荧光光谱,得出陆源类腐殖质(C1)、内源类色氨酸(C2)和类酪氨酸(C3)这 3 种荧光组分.丰水期入湖河流输入是两湖泊 CDOM 的主要贡献源,增加了骆马湖 CDOM 的内源贡献.不同水文情景下洪泽湖 CDOM 陆源类腐殖质占主导地位.

(2) 南水北调东线调水对湖泊 CDOM 来源及组成特征的影响小于入湖河流,但是在一定程度上增强了输水通道陆源类腐殖质输入,尤其是洪泽湖.调水期间两湖泊 CDOM 降低,对湖泊水质提高有一

定的促进作用.

(3) 洪泽湖和骆马湖水质受入湖河流的影响较大,为改善和保证南水北调东线调水质量,可在入湖口种植水生植物或设网拦蓄形成缓冲区域,达到截留和转化外源污染物的目的.从入湖河道着手,尤其在丰水期,加强对流域中河流污染源排放的控制管理.

致谢:感谢邹伟、邢晓晨、夏忠、陈业、刘宁超和郭锐等同志在野外和实验过程中提供的帮助.

参考文献:

- [1] Office of the South-to-North Water Diversion Project Construction Committee, State Council, PRC. The south-to-north water diversion project[J]. *Engineering*, 2016, **2**(3): 265-267.
- [2] Ma Y J, Li X Y, Wilson M, *et al.* Water loss by evaporation from China's South-North Water Transfer Project[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 206-215.
- [3] 张晓松,曹命凯,丁艳霞,等.南水北调东线典型受水区降雨特征分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, **16**(3): 59-64.
Zhang X S, Cao M K, Ding Y X, *et al.* Rainfall characteristics in typical water-receiving area of East Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, **16**(3): 59-64.
- [4] Yang Y, Yin L, Zhang Q Z. Quantity versus quality in China's South-to-North Water Diversion Project: A system dynamics analysis[J]. *Water*, 2015, **7**(5): 2142-2160.
- [5] Yin Y X, Chen Y, Yu S T, *et al.* Maximum water level of Hongze Lake and its relationship with natural changes and human activities from 1736 to 2005[J]. *Quaternary International*, 2013, **304**: 85-94.
- [6] 姚昕,孙将凌,董杰,等.东平湖 CDOM 的光谱吸收特征及环境指示意义[J]. *光谱学与谱分析*, 2016, **36**(10): 3232-3236.
Yao X, Sun J L, Dong J, *et al.* Absorption characteristics and environmental significance of dissolved organic matter in Lake Dongping[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(10): 3232-3236.
- [7] 邢友华,董洁,李晓晨,等.东平湖表层沉积物中磷的吸附容量及潜在释放风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(4): 746-751.
Xing Y H, Dong J, Li X C, *et al.* Phosphorus sorption capacity of the surficial sediment in the Dongping Lake and risk assessment of potential phosphorus release[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(4): 746-751.
- [8] 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.
- [9] Yu M, Wang C R, Liu Y, *et al.* Sustainability of mega water diversion projects: experience and lessons from China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 721-731.
- [10] Shao T T, Song K S, Du J, *et al.* Seasonal variations of CDOM optical properties in rivers across the Liaohe Delta[J]. *Wetlands*, 2016, **36**(S1): 181-192.
- [11] Wang M, Chen Y G. Generation and characterization of DOM in wastewater treatment processes[J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 96-109.
- [12] Song K S, Li L, Tedesco L, *et al.* Spectral characterization of

- colored dissolved organic matter for productive inland waters and its source analysis[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, **25** (3): 295-308.
- [13] Huang M, Li Z W, Luo N L, *et al.* Application potential of biochar in environment; Insight from degradation of biochar-derived DOM and complexation of DOM with heavy metals[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 220-228.
- [14] 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.
- [15] 施坤, 李云梅, 王桥, 等. 太湖、巢湖水体 CDOM 吸收特性和组成的异同[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1183-1191.
- Shi K, Li Y M, Wang Q, *et al.* Similarities and differences in absorption characteristics and composition of CDOM between Taihu Lake and Chaohu Lake[J]. *Environment Science*, 2010, **31**(5): 1183-1191.
- [16] 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 等. 舟山渔场有色溶解有机物 (CDOM) 的三维荧光-平行因子分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 163-171.
- Zhou Q Q, Su R G, Bai Y, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Zhoushan Fishery using excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Environment Science*, 2015, **36**(1): 163-171.
- [17] 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.
- [18] Singh S, D'Sa E J, Swenson E M. Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) variability in Barataria Basin using excitation-emission matrix (EEM) fluorescence and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3211-3222.
- [19] 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.
- [20] Wang Y, Zhang D, Shen Z Y, *et al.* Characterization and spacial distribution variability of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Yangtze Estuary [J]. *Chemosphere*, 2014, **95**: 353-362.
- [21] Lawaetz A J, Stedmon C A. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water [J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 936-940.
- [22] Zepp R G, Sheldon W M, Moran M A. Dissolved organic fluorophores in southeastern US coastal waters: Correction method for eliminating Rayleigh and Raman scattering peaks in excitation-emission matrices[J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 15-36.
- [23] Wang Z G, Cao J, Meng F G. Interactions between protein-like and humic-like components in dissolved organic matter revealed by fluorescence quenching[J]. *Water Research*, 2015, **68**: 404-413.
- [24] Zhao Y, Song K S, Wen Z D, *et al.* Evaluation of CDOM sources and their links with water quality in the lakes of Northeast China using fluorescence spectroscopy[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, **550**: 80-91.
- [25] Dainard P G, Guéguen C. Distribution of PARAFAC modeled CDOM components in the North Pacific Ocean, Bering, Chukchi and Beaufort Seas[J]. *Marine Chemistry*, 2013, **157**: 216-223.
- [26] 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.
- [27] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: A tutorial [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, **6**(11): 572-579.
- [28] Osburn C L, Wigdahl C R, Fritz S C, *et al.* Dissolved organic matter composition and photoreactivity in prairie lakes of the U. S. Great Plains[J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, **56**(6): 2371-2390.
- [29] Yamashita Y, Jaffé R, Maie N, *et al.* Assessing the dynamics of dissolved organic matter (DOM) in coastal environments by excitation emission matrix fluorescence and parallel factor analysis (EEMs-PARAFAC) [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(5): 1900-1908.
- [30] 赵夏婷, 李珊, 王兆伟, 等. 黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4105-4113.
- Zhao X T, Li S, Wang Z W, *et al.* Composition, spatial distribution characteristics and source analysis of chromophoric dissolved organic matter in the Lanzhou reach of the Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4105-4113.
- [31] 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 等. 黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4501-4512.
- Tang Y, Sun Y Y, Shi X Y, *et al.* Distribution characteristics of chromophoric dissolved organic matter and nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in autumn [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4501-4512.
- [32] Zhang Y L, Gao G, Shi K, *et al.* Absorption and fluorescence characteristics of rainwater CDOM and contribution to Lake Taihu, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **98**: 483-491.
- [33] 邓恒, 徐国宾, 段宇, 等. 淮河与洪泽湖河湖关系研究进展及展望[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, **29**(5): 142-147.
- Deng H, Xu G B, Duan Y, *et al.* Research progress and prospect of the relationship between Huaihe River and Hongze Lake[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, **29**(5): 142-147.
- [34] 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.
- [35] 李波, 濮培民. 淮河流域及洪泽湖水质的演变趋势分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, **12**(1): 67-73.
- Li B, Pu P M. Study on the evolution tendency of water quality in Huai River Basin and Hongze Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, **12**(1): 67-73.
- [36] 南楠, 张波, 李海东, 等. 洪泽湖湿地主要植物群落的水质净化能力研究[J]. *水土保持研究*, 2011, **18**(1): 228-231, 235.
- Nan N, Zhang B, Li H D, *et al.* Water quality purification ability of main wetland plant community in Hongze Lake[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, **18**(1): 228-231, 235.
- [37] Yao X L, Zhang L, Zhang Y L, *et al.* Water diversion projects

- negatively impact lake metabolism: A case study in Lake Dazong, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 1460-1468.
- [38] 刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 等. 渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1198-1208.
- Liu Z B, Liang W J, Qin L P, *et al.* Distribution and seasonal variations of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea [J]. *Environment Science*, 2019, **40**(3): 1198-1208.
- [39] Asmala E, Stedmon C A, Thomas D N. Linking CDOM spectral absorption to dissolved organic carbon concentrations and loadings in boreal estuaries[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, **111**: 107-117.
- [40] 宋炎炎, 苏东辉, 邵田田. 东辽河流域河湖光学吸收特性的季节变化[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(6): 2013-2023.
- Song Y Y, Su D H, Shao T T. Seasonal changes of optical absorption properties of river and lake in East Liaohe River basin, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(6): 2013-2023.
- [41] Xing L Q, Zhang Q, Sun X, *et al.* Occurrence, distribution and risk assessment of organophosphate esters in surface water and sediment from a shallow freshwater Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 632-640.
- [42] 李其梁, 苑希民, 杨敏, 等. 淮沂水系洪泽湖-骆马湖水资源联合优化调度研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, **11**(2): 10-13.
- Li Q L, Yuan X M, Yang M, *et al.* Research on joint optimal regulation of water resources in the Hongze and Luoma Lakes of Huaiyi water system [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, **11**(2): 10-13.
- [43] 宋亚净, 刘立华, 石兆英, 等. 长距离调水对沿线及受纳水体水环境的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, **10**(3): 98-102, 136.
- Song Y J, Liu L H, Shi Z Y, *et al.* Environmental impact of long distance water transfer on the water conveyance line and receiving water body [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, **10**(3): 98-102, 136.
- [44] 吕学研, 张咏, 徐亮, 等. 南水北调东线一期江苏段试调水期间的水质变化[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, **26**(6): 12-18.
- Lü X Y, Zhang Y, Xu L, *et al.* Variation of water quality of Jiangsu during water transfer test in first phase of eastern section of south to north water diversion project [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, **26**(6): 12-18.
- [45] Zhu Y P, Zhang H P, Chen L, *et al.* Influence of the South-North Water Diversion Project and the mitigation projects on the water quality of Han River [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **406**(1-2): 57-68.
- [46] 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 等. 巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3186-3193.
- Ye L L, Wu X D, Liu B, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of dissolved organic matter and influencing factors in Lake Chaohu [J]. *Environment Science*, 2015, **36**(9): 3186-3193.
- [47] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 961-968.
- Yu H, Zhang W B, Lu S Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in Lake Hongze and their pollution status evaluation [J]. *Environment Science*, 2010, **31**(4): 961-968.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)