

E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



2020

Vol.41 No.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM_{2.5} 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 周敏(1997)

不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 吴梦曦,成春雷,黄渤,李梅,陈多宏(2006)

二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 张淑佳,徐亮,郭新梅,黄道,李卫军(2017)

城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 李欣悦,张凯山,邓林俐,向铎鹏,武文琪,殷子渊(2026)

临沂市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中元素分布特征及来源解析 陆平,赵雪艳,殷宝辉,张楠,王歆华,余浩,杨文,王晓丽(2036)

西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 谢雯文,路瑞,慕云飞,戚玉珍,白文艳,李彦鹏(2044)

北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 何万清,王天意,邵霞,聂磊,石爱军(2050)

基于随机森林模型的中国 PM_{2.5} 浓度影响因素分析 夏晓圣,陈菁菁,王佳佳,程先富(2057)

大气污染联合治理分区视角下的中国 PM_{2.5} 关联关系时空变异特征分析 杨文涛,黄慧坤,魏东升,赵斌,彭焕华(2066)

基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 王耀庭,梁加成,郑祚芳,李青春,李威,窦有俊(2075)

龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 唐春雷,郑秀清,梁永平(2087)

三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 唐小娅,童思陈,黄国鲜,许光祥,李丹(2096)

三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征 杨凡,纪道斌,王丽婧,李虹,李莹杰(2107)

汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 付适,倪九派,何丙辉,李天阳,唐毅,钱田,向可翠(2116)

白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 刘鑫,史斌,孟晶,周云桥,可欣,王铁宇(2127)

新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 史鹏程,朱广伟,杨文斌,许海,朱梦圆,刘明亮,虞左明,吴志旭,郑文婷,王裕成,笄文怡,胡林娜(2137)

不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 张柳青,石玉,李元鹏,郭燕妮,周蕾,周永强,张运林,杨艳(2149)

水源水藻类功能群落演替特征及水质评价 李衍庆,黄廷林,张海涵,温成成,杨尚业,林子深,高欣(2158)

人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 王晨旭,黄廷林,李楠,齐允之,徐金兰,司凡,张晗,路林超(2166)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 周石磊,孙悦,岳智丞,张航,王周强,刘世崇,彭瑞哲,苑世超,李再兴,崔建升(2177)

分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 张海涵,王燕,黄廷林,王晨旭,路林超,司凡,李楠,刘凯文,闫苗苗,苗雨甜(2188)

大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 郭燕妮,李元鹏,石玉,张柳青,周蕾,周永强,张运林,韩龙飞(2198)

秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 林子深,黄廷林,杨尚业,温成成,李衍庆,周石磊,宋选社(2210)

长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 贾天琪,雷荣荣,武小琳,倪涛涛,孙树睿,郭伟,刘文彬(2221)

太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评估 廉杰,李祎飞,王晓喧,叶彬,邹华,史红星(2229)

8种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 徐鑫磊,刘建超,陆光华(2239)

我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 朱雅,李一平,罗凡,李荣辉,黄列,程一鑫,蒋裕丰(2247)

基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 李永新,王威,何妹,申泰铭(2257)

城郊流域源汇景观格局与水体抗生性的关系 李敏,唐剑锋,陈利顶,赵方凯,冯青郁,杨磊(2264)

城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 聂云汉,陈浩,李磊,朱奕,赵昕,贾其隆,徐慧婷,叶建锋(2272)

方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 柏晓云,林建伟,詹艳慧,常明玥,吴俊麟,辛慧敏,黄良君(2281)

不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 王智巧,马杰,陈雅丽,翁莉萍,顾亚陶,李永涛(2292)

向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S₂O₈²⁻ 体系降解苯甲酸 孙鹏,张凯凯,张玉,张延荣(2301)

非活化单过硫酸盐降解柳氯磺胺吡啶:动力学及机制 丁曦,张学维,周润生,宋哲,严佳颖,周磊,修光利(2310)

贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 杨钊,李江,向福亮,李彦澄,马凯,谢锋(2320)

新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮 赵远哲,杨永哲,王海燕,储昭升,常洋,董伟羊,闫国凯,王欢,李丛宇(2329)

贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 文刚,王彤,黄廷林,万琪琪,曹瑞华,寇莉青,杨尚业(2339)

连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 秦嘉伟,信欣,鲁航,张萍萍,王露蓉,邹长武,郭俊元(2349)

不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥活性及微生物群落结构差异 姜滢,郭萌蕾,谢军祥,常尧枫,谢嘉玮,陈重军,沈耀良(2358)

反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 陈亚,印雯,张星星,张钰,宋吟玲,吴鹏,徐乐中(2367)

土壤环境承载力评价体系构建与应用 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿(2373)

磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 王俊楠,程珊珊,展文豪,任强,马晓宇,王洋洋(2381)

还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤 张金永,朱玉婷,王明新,韩莹,葛嘉琦(2390)

不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 付平南,贡晓飞,罗丽韵,王琪,李花粉(2398)

生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 王舒,王子芳,龙翼,严冬春,慈恩,徐国鑫,李娇,高明(2406)

长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 王兴,钟泽坤,张欣怡,吴少君,卢绪巧,杨改河,任成杰,韩新辉(2416)

施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 王强,耿增超,许晨阳,郭靖宇,李倩倩,刘莉丽,赵汉红,杜旭光(2425)

间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N₂O 排放的影响 张珂彬,刘新亮,康曼,王毅,沈健林,李勇(2434)

缙云山森林植被类型对土壤 N₂O 相关功能微生物的影响 王盛燕,王富华,罗东海,昌盛,王子芳,高明(2445)

咸水滴灌对棉田土壤 N₂O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 郭慧楠,马丽娟,黄志杰,李美琪,侯振安,阎伟(2455)

有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 储成,吴赵越,黄欠如,韩成,钟文辉(2468)

模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 王楠,潘小承,王传宽,白尚斌(2476)

海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异 李明月,杨雨虹,米铁柱,贺惠,甄毓(2485)

2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 周婷,马姣姣,徐颂军(2496)

《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209, 2263, 2309)

不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征

张柳青^{1,2}, 石玉¹, 李元鹏¹, 郭燕妮¹, 周蕾^{1,3}, 周永强^{1*}, 张运林¹, 杨艳^{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. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 有色可溶性有机物(CDOM)的生物可利用性直接反映其生物可降解潜力,影响水体中污染物质的迁移转化和水质优劣状况.本研究运用三维荧光光谱-平行因子分析法(EEMs-PARAFAC)结合室内微生物培养实验,分析了高邮湖、南四湖和东平湖CDOM光谱组成和荧光组分的生物可利用性特征,并进一步阐述其对丰水和枯水两种水文情景的响应.结果表明:①运用EEMs-PARAFAC方法解析出4种荧光组分,微生物作用类腐殖酸C1和陆源类腐殖酸C4,类色氨酸C2和类酪氨酸C3.②3个湖泊丰水期吸收系数差值 $\Delta a(254)$ (培养前-培养后)均为正值,而枯水期 $\Delta a(254)$ 部分为负值,这意味着CDOM生物可利用性对季节的响应存在较大差异.③不同水文情境下,南四湖和东平湖类腐殖酸组分 $\% \Delta C1$ 、 $\% \Delta C4$ 均为负值,南四湖丰、枯水期和东平湖丰水期类蛋白组分 $\Delta C2 \sim \Delta C3$ 为正值(t -test, $P < 0.001$, $P = 0.005$).而丰水期高邮湖类蛋白组分 $\Delta C2 \sim \Delta C3$ 也为正值(t -test, $P = 0.008$, $P = 0.005$),这意味着不稳定类蛋白组分更容易被微生物矿化,可能生成更稳定的类腐殖酸.3个湖泊腐殖化指数HIX、荧光峰积分比值 $I_C : I_T$ 均大于培养前,同时斜率 $S_{275-295}$ 均减小进一步证实该结论.④丰、枯水期3个湖泊的类蛋白组分C2~C3的生物可利用性在入湖区域较高,同时该类湖泊入湖口区域类腐殖酸累积也较高,因而需要进一步加强入湖河流水质管理,减少外源CDOM输入以确保上述3个湖泊供水安全.

关键词: 高邮湖; 南四湖; 东平湖; 有色可溶性有机物(CDOM); 生物可利用性; 平行因子分析(PARAFAC)

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2149-09 DOI: 10.13227/j.hjlx.201911029

Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios

ZHANG Liu-qing^{1,2}, SHI Yu¹, LI Yuan-peng¹, GUO Yan-ni¹, ZHOU Lei^{1,3}, ZHOU Yong-qiang^{1*}, ZHANG Yun-lin¹, YANG Yan^{2*}

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

Abstract: The bio-lability of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) directly reflects its biodegradability potential, and also affects the migration and conversion of pollutants and impacts water quality. This study combines excitation-emission matrices and parallel factor analysis (EEMs-PARAFAC) with laboratory 28 days of bio-incubation experiments, and analyzed the bioavailability characteristics of CDOM samples collected from Lake Gaoyou, Lake Nansi and Lake Dongping in flood season and dry season. Our results showed that: ① four fluorescent components were obtained using EEMs-PARAFAC, including a microbial humic-like C1, a terrestrial humic-like C4, a tryptophan-like C2, and a tyrosine-like C3. ② The differences of CDOM absorption pre-and post-incubation, i. e. $\Delta a(254)$ of the three lakes were positive in the three lakes in the flood season, while partially negative in the dry season, indicating a quite different response of CDOM bioavailability to hydrological seasons. ③ Under different hydrological scenarios, the two humic-like components C1 and C4 increased post-bio-incubation compared with that pre-incubation for the samples collected from Lake Nansi and Lake Dongping, and the two protein-like components in Lake Nansi in both the flood and dry seasons and in Lake Dongping in the flood season (t -test, $P < 0.001$, $P = 0.005$) were lower in the post-than those pre-incubation. In Lake Gaoyou, C1-C3 post-incubation were significantly lower than pre-incubation (t -test, $P = 0.008$, $P = 0.005$). In the dry season, in comparison, C1-C4 except for C2 increased post-incubation than pre-incubation for Lake Gaoyou. This indicated that the protein-like components are unstable and more easily uptaken by microorganisms and may be potentially converted into more stable humic-like components. HIX and $I_C : I_T$ of the three lakes increased post-incubation while the spectral slope $S_{275-295}$ decreased, which further confirmed the aforementioned conclusion. ④ During both the flood and dry seasons, the bioavailability of the protein-like components C2-C3 and the fluorescence intensity of C1 and C4 in the inflowing river mouths of the three lakes were higher than in the remaining lake regions. It is

收稿日期: 2019-11-04; 修订日期: 2019-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807362); 江苏省自然科学基金项目(BK20181104); 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: zlq_1994@126.com

* 通信作者,E-mail: yqzhou@niglas.ac.cn; sister_yy@sina.cn

therefore necessary to strengthen the water quality management in the inflowing river mouths of the three lakes to maintain the water quality of the lakes.

Key words: Lake Gaoyou; Lake Nansi; Lake Dongping; chromophoric dissolved organic matter (CDOM); bioavailability; parallel factor analysis (PARAFAC)

有色可溶性有机物质 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 广泛存在于天然水体中, 是可溶性有机物质 (dissolved organic matter, DOM) 中能强烈吸收紫外和可见光的部分. 湖泊中 CDOM 主要来源于地表径流、降雨淋溶和人类活动等^[1,2], 其在生物地球化学循环过程中起到核心作用, 同时也是水生生物生命活动能量的直接来源^[3,4]. CDOM 的生物可利用性还会直接影响以 CDOM 为络合剂或吸附剂的重金属及有机污染物的生理毒性和环境行为, 同时对饮用水处理工艺与流程起决定性作用. 另外 CDOM 的生物可利用性高低直接影响水生生态系统中 C 和 N 等生源物质的循环与再生速率, 作用于水体富营养化过程, 并且对揭示 CDOM 的迁移转化过程、潜在温室气体效应以及对水质的影响均起到不可忽视的作用^[5], 因此对 CDOM 的生物可利用性研究具有重要价值, 国内外有部分学者开始关注天然环境中 CDOM 的生物可利用性特征^[6]. 钱伟等^[7]的研究表明可见-紫外光谱和荧光光谱能很好地分析研究内河水体 DOM 的分解和转化过程. Wu 等^[8]的研究发现得克萨斯州南部沿海水域河流 DOM 生物有效性受季节和人为影响较明显. 三维荧光结合平行因子分析法 (EEMs-PARAFAC) 被广泛用于分析河流、湖泊和海洋中 CDOM 的光学指标特征, 能快速、准确地鉴定出 CDOM 的荧光组分以及分析光谱特征^[6,9].

高邮湖、南四湖和东平湖是南水北调东线工程重要枢纽湖泊, 其水质优劣对东线调水工程的顺利开展起到了关键性作用, 同时是受水区人们生产生活和城市经济发展的重要命脉^[10]. 但随着城市的快

速发展, 工业、农业和生活等污染源产生的污染物直接或间接地排放到湖泊、河流等, 导致其水环境质量受到较大影响, 污染物来源和种类越来越复杂^[11]. 目前国内外对湖泊 CDOM 生物可利用特征的研究较少, 且鲜见报道运用 EEMs-PARAFAC 揭示上述 3 个湖泊 CDOM 的生物降解特征. 鉴于此, 本研究在丰、枯季节开展对高邮湖、南四湖和东平湖样品采集, 开展室内 CDOM 的生物降解特征分析, 并进一步探讨 3 个湖泊 CDOM 生物可利用性如何响应于不同水文情景及其潜在影响机制, 通过丰富 3 个湖泊 CDOM 及其生物可利用性特征的研究资料, 以期东线调水工程水质管理提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 样品采集与处理

在高邮湖、南四湖和东平湖分别布设 7 个, 13 个和 6 个采样点 (见表 1、图 1), 于 2018 年 4 月和 7 月采集水样. 样品采集完毕当日运回实验室后立即使用 0.22 μm Millipore 滤膜过滤水样 200 mL 以去除水样中微生物, 其中 100 mL 立即用于测定生物培养前 CDOM 紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱, 另外 100 mL 滤后液装入经酸洗和高温灭菌的棕色玻璃瓶, 加入 2 mL 菌种 (菌种为对应样点原水), 为避免生物培养实验过程中可能存在的营养盐限制, 添加 2 mL 营养液将样品的营养盐水平提升至 80 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_4^+-N 及 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ ^[12,13]. 样品置于室温 $[(20 \pm 2)^\circ\text{C}]$ 和避光好氧条件下 (每日轻晃数次) 培养 28 d 后再次测定 CDOM 紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱.

表 1 高邮湖、南四湖和东平湖采样点经纬度

Table 1 Latitude and longitude of sampling points in Gaoyou Lake, Nansi Lake, and Dongping Lake

高邮湖		南四湖		东平湖	
经度	纬度	经度	纬度	经度	纬度
119.409 44°	32.799 44°	117.314 17°	34.607 22°	116.199 44°	36.054 44°
119.386 67°	32.827 22°	117.228 06°	34.558 61°	116.221 94°	35.996 67°
119.331 11°	32.841 11°	117.150 56°	34.680 00°	116.234 72°	35.940 56°
119.301 11°	32.876 94°	117.116 11°	34.729 17°	116.178 89°	35.953 06°
119.272 50°	32.802 50°	117.003 61°	34.840 56°	116.189 44°	35.987 22°
119.218 89°	32.795 83°	116.980 56°	34.893 06°	116.187 78°	36.021 39°
119.284 72°	32.753 61°	116.906 94°	34.948 33°	—	—
—	—	116.801 39°	35.039 17°	—	—
—	—	116.787 50°	35.060 56°	—	—
—	—	116.696 11°	35.083 06°	—	—
—	—	116.668 89°	35.151 11°	—	—
—	—	116.652 78°	35.217 22°	—	—
—	—	116.608 61°	35.257 22°	—	—

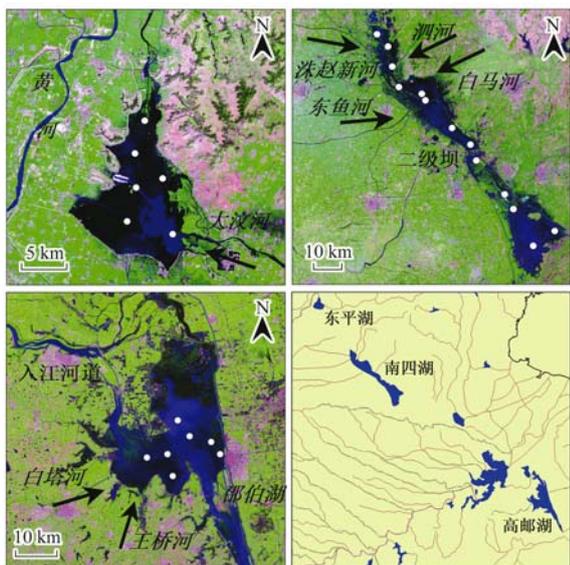


图1 高邮湖、南四湖和东平湖采样点布设示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping

1.2 水文数据

本研究用淮河流域降雨量水文数据采集自淮水利委员会(<http://www.hrc.gov.cn/>).

1.3 紫外-可见吸收光谱参数和水质参数

主要水质参数 TN、TP 和 Chla 根据 Zhu 等^[14]的方法测定. 采用 Shimadzu UV-2550 分光光度计及与之匹配的 5 cm 石英比色皿测定 CDOM 吸光度. 以 Milli-Q 水为空白对照, 在 200 ~ 800 nm 范围内每隔 1 nm 测量 CDOM 的吸光度. 扣除 700 nm 处吸光度以消除潜在颗粒物带来的散射效应, 根据公式 (1) 计算对应波长的吸收系数^[15]:

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

式中, $a(\lambda)$ 表示 CDOM 在波长 λ 处对应的吸收系数 (m^{-1}), $D(\lambda)$ 表示扣除 700 nm 处吸光度后在波长 λ 处的吸光度, r 表示光程路径 (m).

$S_{275-295}$ 是由 275 ~ 295 nm 波长范围内的吸收系数经指数函数拟合得到的光谱斜率, CDOM 在紫外及蓝光波段吸收光谱随波长增加呈指数函数递减. $S_{275-295}$ 随 CDOM 腐殖化程度增大而减小, 根据公式 (2) 计算^[16]:

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

式中, $a(\lambda)$ 和 $a(\lambda_0)$ 分别指在波长 λ 和参考波长 $\lambda_0 = 440 \text{ nm}$ 下 CDOM 的吸收系数.

本研究使用生物培养前与培养后的 CDOM 相关指标差值, 即 $\Delta a(254)$ 和 $\Delta S_{275-295}$ 来表征生物培养后 CDOM 相对浓度和结构变化特征.

1.4 三维荧光光谱测定及平行因子分析

使用 F-7000 型荧光光度计 (Hitachi 公司) 测定样品 CDOM 荧光激发-发射光谱矩阵 (excitation-

emission matrices, EEMs), 设置激发光谱在 200 ~ 450 nm 范围, 间隔 5 nm; 发射光谱范围 250 ~ 600 nm, 间隔 1 nm. 测得的三维荧光光谱先扣除超纯水 EEMs 以进行水拉曼散射校正, 同时用当日测得超纯水 EEMs 中 350 nm 激发条件下的荧光强度将所有 EEMs 定标为拉曼单位 (Raman unit, R. U.)^[17]. 再采用 MATLAB 软件中的 drEEM 工具包通过切除及插值的办法进行瑞利散射校正, 同时使用每个样品 EEMs 激发发射波长相对应的吸光度进行内滤波效应校正^[18]. 本研究使用荧光峰 C 峰与 T 峰积分比值 $I_C : I_T$ 来表征 CDOM 陆源类腐殖酸输入信号及 CDOM 光谱组成的变化, 该比值越大, CDOM 腐殖化程度越强^[19]. 腐殖化指数 (humification index, HIX) 是 254 nm 激发条件下 (本研究中由于激发波长间隔为 5 nm, 因而该处为 255 nm), 发射波长 435 ~ 480 nm 与 300 ~ 345 nm 的荧光强度积分的比值, 该指数越大, CDOM 腐殖化程度越高, 用于判定 CDOM 来源^[20,21].

平行因子分析 (PARAFAC) 采用 MATLAB R2015b 的 drEEM 工具箱 (ver. 0.2.0) 完成, 共选取 104 个 [培养前后高邮湖共 7 个采样点 \times 2 次采样 \times 2 (培养前后), 南四湖 13 个采样点 \times 2 次采样 \times 2 (培养前后), 以及东平湖 6 个采样点 \times 2 次采样 \times 2 (培养前后)] 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 子集均逐步从 3 个组分模型逐步到 6 个组分检验. 最终确定 4 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). 本研究采用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^[22]. 同时以生物培养前与培养后各组分 F_{\max} 的差值, 及差值占培养前组分 F_{\max} 的百分比值, 即 $\Delta C1 \sim \Delta C4$ 以及 $\% \Delta C1 \sim \% \Delta C4$ 来表征各个荧光组分的生物可利用性特征.

1.5 数据处理

采用 SPSS23.0 软件进行独立样本 t -test 和 Pearson 相关分析, 使用 ArcGIS10.2 绘制插值图, Origin 9.5 绘制图表, MATLAB R2015b 软件的 drEEM 工具箱进行平行因子分析建模.

2 结果与分析

2.1 水文特征及主要水质参数

高邮湖、南四湖均属于淮河流域, 东平湖分为老湖区和新湖区, 主要由老湖区蓄水且属于黄河流域,

而新湖区属于淮河流域, 3 个湖泊均地处季风影响显著的黄淮海平原区. 由图 2 可知, 淮河流域 5~8 月的月降水量为 89.4~196.9 mm, 1~4 月和 9~12 月降水量在 5.4~58.2 mm 范围内. 根据降水情况, 本研究将 2018 年 4 月划为枯水期, 2018 年 7 月划为丰水期. 3 个湖泊主要水质参数见表 2.

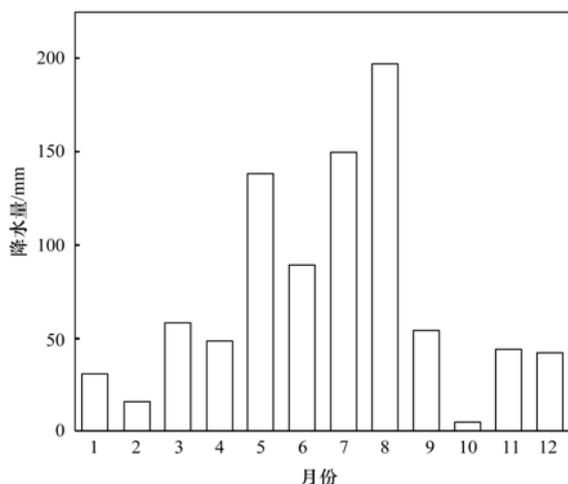


图 2 2018 年淮河流域月均降水量

Fig. 2 Monthly mean rainfall of Huaihe River watershed in 2018

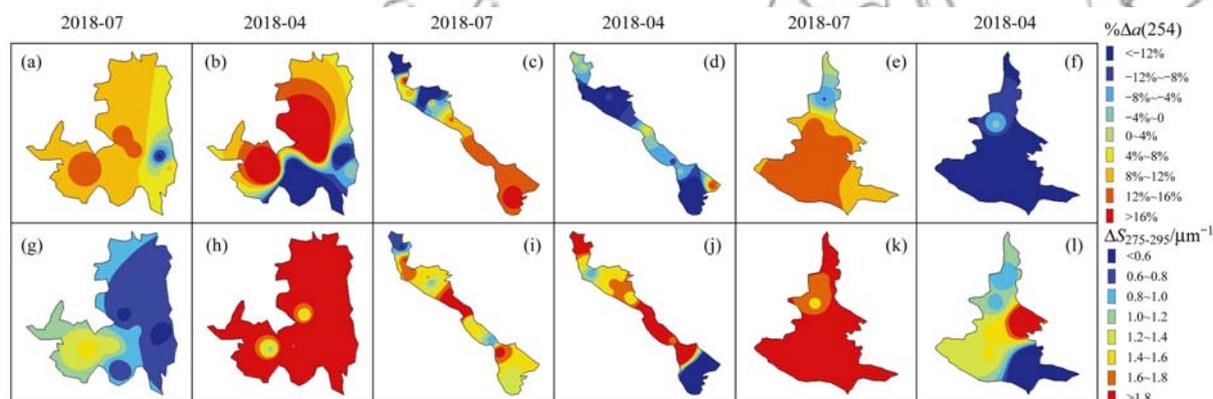


图 3 不同水文情景下 3 个湖泊吸收系数 $\% \Delta a(254)$ 和 $\Delta S_{275-295}$ 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of $\% \Delta a(254)$ and $\Delta S_{275-295}$ in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping in different hydrological scenarios

水期下游湖区 $\% \Delta a(254)$ 为正值, 上游湖区为负值, $\Delta S_{275-295}$ 在湖区中部较高. 东平湖枯水期 $\% \Delta a(254)$ 也为负值, $\Delta S_{275-295}$ 值在湖区中心较高, 丰水期除北部出湖口外, 其余湖区 $\% \Delta a(254)$ 为正值且 $\Delta S_{275-295}$ 值在各区域高于枯水期.

2.3 荧光组分

运用 EEMs-PARAFAC 对培养前后全部水样的荧光数据进行分析, 鉴定出 4 种荧光组分 (图 4), 两种类腐殖酸组分 C1、C4 和类蛋白组分 C2、C3. C1 激发和发射波长分别为 245 nm 和 412 nm, 组分 C4 分别对应两个激发和发射波长, $E_x/E_m = 265, 380/460$ nm. 组分 C1 与微生物代谢相关, 既可能是微生物矿化类蛋白, 也可能来源于微生物对类腐殖酸的再处理, 组分 C4 具有较强的陆源特征, 主要来源于

表 2 3 个湖泊主要水质参数变化范围

湖泊	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Chla/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
高邮湖	0.05~0.13	1.66~2.70	20.38~78.10
南四湖	0.03~0.12	0.85~1.87	12.11~98.03
东平湖	0.03~0.12	1.04~1.58	21.62~65.67

2.2 吸收、荧光光谱参数变化特征

由表 3 可知, 南四湖、东平湖和高邮湖吸收系数 $a(254)$ 在丰水期经生物培养 28 d 后, 其值低于培养前, 然而在枯水期略微增加. 3 个湖泊样品 HIX 值均高于培养前, 且东平湖丰水期和高邮湖丰、枯水期样品显著高于培养前 ($P < 0.001$, $P = 0.001$, $P < 0.05$), $I_C:I_T$ 与 HIX 变化规律相似. 南四湖和高邮湖丰、枯水期以及东平湖丰水期的样品 $S_{275-295}$ 值减小. 图 3 表明, 丰水期高邮湖 $\% \Delta a(254)$ 在西部入湖区域和湖中心均为正值且高于其他区域, 其 $\Delta S_{275-295}$ 也在入湖区域较高. 枯水期 $\% \Delta a(254)$ 在南部入湖区和北部湖区为正值且较高, 湖区 $\Delta S_{275-295}$ 值大于 1.8. 南四湖枯水期 $\% \Delta a(254)$ 均为负值且空间分布较一致, $\Delta S_{275-295}$ 值在下级湖区高于上级湖区, 而丰

外源输入^[23,24]. 组分 C2 和 C3 是类蛋白组分, 组分 C2 是类色氨酸 ($E_x/E_m = 230/340$ nm, 280/348 nm), 组分 C3 是类酪氨酸 ($E_x/E_m = 275/308$ nm), 主要来源于原生地, 如藻类等降解产生, 内陆水体中部分类蛋白组分也来源于人类生产生活排放^[25].

2.4 荧光组分变化特征

由表 4 可知, 不同水文情景下东平湖和南四湖的类腐殖酸 C1 和 C4 荧光强度均高于培养前, 南四湖组分 C2~C3 和东平湖组分 C2 荧光强度 ($P < 0.001$, $P < 0.05$) 低于培养前且小于 30%. 此外, 丰水期东平湖和高邮湖 (t -test, $P = 0.005$) 组分 C3 荧光强度也低于培养前, $\% \Delta C3$ 均值分别为 24% 和 40%, 高邮湖枯水期 $\% \Delta C1$ 、 $\% \Delta C3$ 和 $\% \Delta C4$ 为负值, 3 个组分累积程度较高 (见图 5).

表 3 不同水文情景下 3 个湖泊吸收系数 $a(254)$ 、 $S_{275-295}$ 、 $I_C:I_T$ 和 HIX 经培养 28 d 前后 t 检验

Table 3 The t -test between the mean of $a(254)$, $S_{275-295}$, $I_C:I_T$ and HIX before and after 28 days of bio-incubation of the three lakes in different hydrological scenarios

湖泊	项目		$a(254)/m^{-1}$	HIX	$S_{275-295}/\mu m^{-1}$	$I_C:I_T$
高邮湖	丰水期	0 d	22.9 ± 4.4	1.7 ± 0.4	21.5 ± 1.1	7.6 ± 0.7
		28 d	20.7 ± 3.0	2.5 ± 0.6	20.0 ± 0.7	10.5 ± 4.7
	枯水期	0 d	16.6 ± 1.0	1.3 ± 0.5	21.5 ± 2.1	4.7 ± 0.3
		28 d	16.8 ± 8.6	1.7 ± 0.5	20.0 ± 1.4	5.8 ± 3.3
	P		>0.05	$=0.001$	<0.001	>0.05
南四湖	丰水期	0 d	24.9 ± 6.1	3.7 ± 0.4	18.1 ± 0.6	3.3 ± 0.6
		28 d	23.4 ± 3.3	4.6 ± 2.1	17.3 ± 0.8	5.5 ± 1.2
	枯水期	0 d	21.2 ± 4.6	2.2 ± 0.1	21.5 ± 0.8	2.8 ± 1.1
		28 d	22.8 ± 2.4	2.5 ± 2.5	18.7 ± 1.5	3.6 ± 1.2
	P		>0.05	>0.05	<0.05	<0.001
东平湖	丰水期	0 d	22.3 ± 2.3	2.0 ± 0.2	23.9 ± 0.7	3.5 ± 0.3
		28 d	20.1 ± 2.2	2.7 ± 0.3	21.9 ± 0.5	5.7 ± 0.5
	枯水期	0 d	23.0 ± 4.0	1.5 ± 0.2	22.2 ± 1.4	2.9 ± 0.5
		28 d	28.8 ± 2.6	1.6 ± 0.3	21.1 ± 1.4	3.7 ± 1.2
	P		>0.05	<0.001	<0.001	<0.001

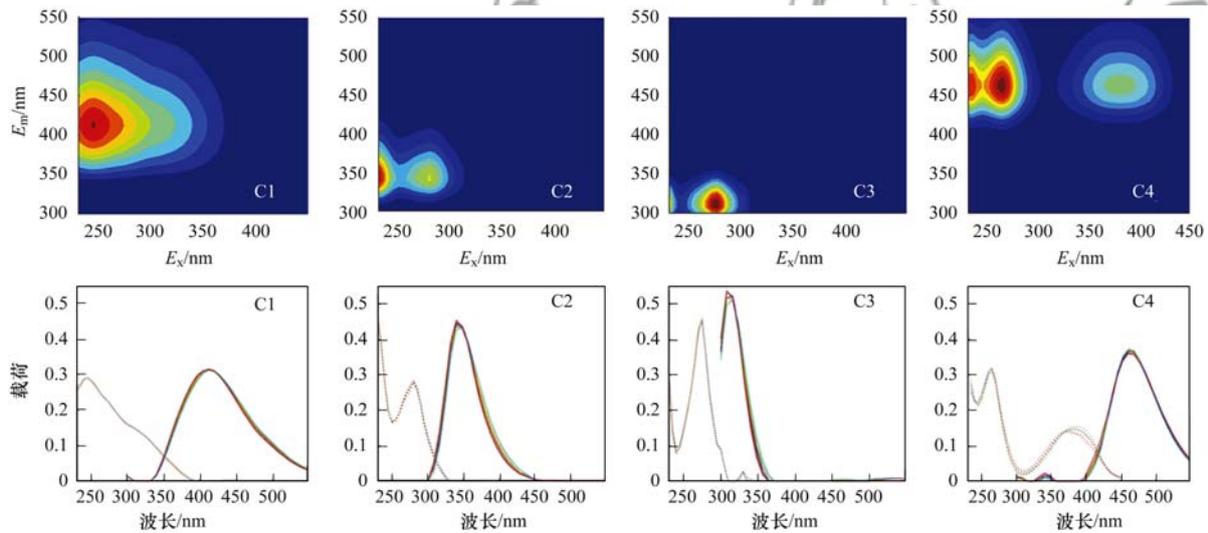


图 4 对半检验和随机初始化检验 PARAFAC 模型得到 4 类荧光组分

Fig. 4 Four fluorescent components were obtained by PARAFAC modeling, and the model was validated using split-half analysis and random initialization

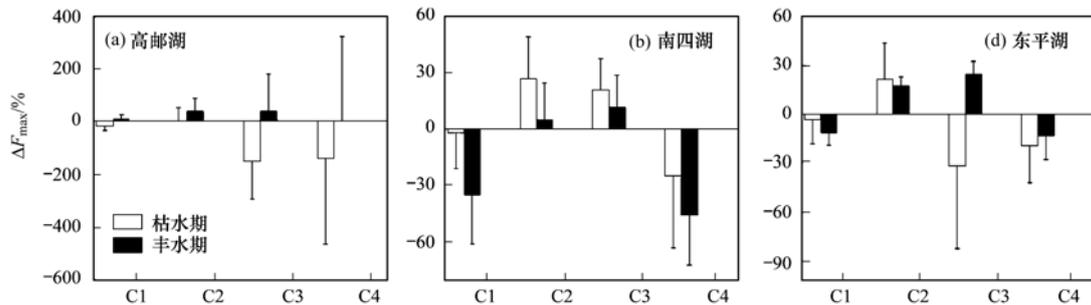


图 5 不同水文情景下 3 个湖泊的荧光组分经生物培养 28 d 前后的变化

Fig. 5 Variability of the four fluorescent components of the three lakes pre-and post-28 days of bio-incubation in different hydrological scenarios

由图 6(a) ~ 6(h) 可知, 丰水期高邮湖 $\% \Delta C1$ 和 $\% \Delta C4$ 自西向东逐渐增大, 东部临近运河小部分湖

区正值, $\% \Delta C2$ 、 $\% \Delta C3$ 在各湖区均为正值. 枯水期 $\% \Delta C1$ 、 $\% \Delta C4$ 总体上为负值且分别在南部湖区和北

部区域最小. 丰水期南四湖% $\Delta C1$ 和% $\Delta C4$ 在各湖区也为负值,% $\Delta C2$ 同时存在正负值,无明显递变规律,% $\Delta C3$ 在各湖区基本为正值且在入湖区域较高. 枯水期% $\Delta C2$ 和% $\Delta C3$ 在各湖区为正值,% $\Delta C1$ 在出湖口为负值且低于其他区域,湖区中部及北部区域为正值,% $\Delta C4$ 均为负值且上级湖区较小[见图 6(i) ~6

(p)]. 东平湖丰水期% $\Delta C1$ 为负值,从南到北逐渐减小,除出入湖口区域外,% $\Delta C4$ 为负值. % $\Delta C2$ 和% $\Delta C3$ 为正值且在湖中心较大. 枯水期东平湖% $\Delta C1$ 、% $\Delta C4$ 变化规律与丰水期相似,但% $\Delta C1$ 在中部和出湖口为正值. % $\Delta C2$ 在出湖口较低,% $\Delta C3$ 仅在入湖口为正值 [见图 6(q) ~6(x)].

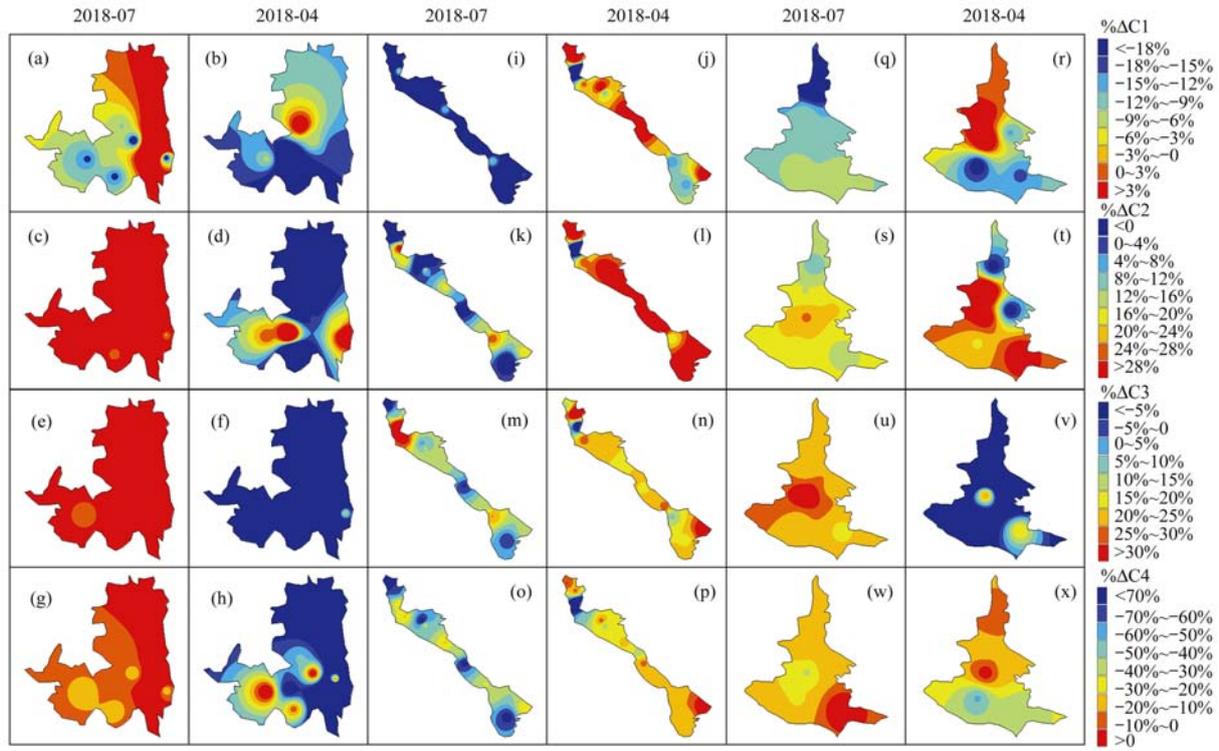


图 6 同水文情景下 4 种荧光组分 % $\Delta C1$ ~ % $\Delta C4$ 的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of % $\Delta C1$ -% $\Delta C4$ in the three lakes in different hydrological scenarios

表 4 不同水文情景 3 个湖泊生物培养 28 d 前后荧光组分 *t* 检验

Table 4 The *t*-test between the mean of F_{max} of the four fluorescent components pre and post 28 days of bio-incubation of the three lakes in different hydrological scenarios

湖泊	项目	C1/R. U.	C2/R. U.	C3/R. U.	C4/R. U.	
高邮湖	丰水期	0 d	0.8 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.2 ± 0.1
		28 d	0.8 ± 0.4	0.3 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1
	枯水期	0 d	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.3 ± 0.0	0.2 ± 0.0
		28 d	0.7 ± 0.1	0.5 ± 0.3	0.8 ± 0.5	0.4 ± 0.5
	<i>P</i>	>0.05	0.008	0.005	>0.05	
南四湖	丰水期	0 d	0.7 ± 0.1	0.8 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.2 ± 0.0
		28 d	0.9 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.0
	枯水期	0 d	0.7 ± 0.2	1.4 ± 0.6	0.7 ± 0.3	0.2 ± 0.1
		28 d	0.7 ± 0.1	1.0 ± 0.5	0.6 ± 0.2	0.2 ± 0.1
	<i>P</i>	<0.001	>0.05	>0.05	<0.05	
东平湖	丰水期	0 d	0.7 ± 0.1	0.7 ± 0.0	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.0
		28 d	0.8 ± 0.1	0.6 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.2 ± 0.0
	枯水期	0 d	0.8 ± 0.1	1.2 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.2 ± 0.0
		28 d	0.7 ± 0.1	0.9 ± 0.2	0.7 ± 0.3	0.2 ± 0.0
	<i>P</i>	>0.05	<0.001	0.005	>0.05	
	<i>P</i>	>0.05	<0.05	>0.05	>0.05	

2.5 荧光组分与吸收、荧光光谱参数相关性分析

由表 5 可知,生物培养 28 d 后,高邮湖组分 C1 与 $a(254)$ 、HIX、 $I_C:I_T$ 显著正相关,与 $S_{275-295}$ 显著负相关,C3 与 $a(254)$ 、HIX 显著负相关,与 $S_{275-295}$ 显著正相关,表明组分 C1、C3 与 CDOM 丰度及结构的变化关系紧密.南四湖组分 C1、C4 与 $a(254)$ 显著正相关,与 $S_{275-295}$ 显著负相关,且 C1 与 HIX 和 $I_C:I_T$ 显著正相关. 两种类蛋白组分与 HIX、 $I_C:I_T$ 显著负

相关. 表明了两种类腐殖酸累积影响 CDOM 结构组成特征. 组分 C1 与 C2、C3 显著负相关,组分 C1 与 C4 显著正相关,说明组分 C1 的产生与组分 C2、C3 的降解有关. 东平湖组分 C2、C4 与 $a(254)$ 显著正相关,同时 C2、C3 分别与 HIX、 $I_C:I_T$ 显著负相关,表明组分 C2 和 C4 的生物可利用性对 CDOM 浓度的影响显著,类蛋白组分的降解对 CDOM 结构的影响也较大.

表 5 生物培养后 3 个湖泊吸收荧光参数与 4 个荧光组分皮尔逊相关性分析¹⁾

Table 5 Pearson correlation analysis between absorption parameters and fluorescence parameters of three lakes post the 28 days of bio-incubation

项目		$a(254)$	HIX	$S_{275-295}$	$I_C:I_T$	C1	C2	C3
高邮湖	C1	0.702**	0.577*	-0.678*	0.741**	—	—	—
	C2	0.014	-0.237	-0.009	-0.300	-0.438	—	—
	C3	-0.534*	-0.558*	0.579*	-0.461	-0.526	0.274	—
	C4	0.069	0.670**	0.096	0.440	-0.007	-0.069	-0.158
南四湖	C1	0.659**	0.758**	-0.498**	0.765**	—	—	—
	C2	-0.114	-0.601**	0.065	-0.710**	-0.407*	—	—
	C3	-0.247	-0.856**	-0.269	-0.807**	-0.457*	0.746**	—
	C4	0.567**	0.011	-0.474*	-0.029	0.259	0.522*	0.402*
东平湖	C1	0.549	0.014	-0.498	0.182	—	—	—
	C2	0.735**	-0.790**	-0.329	-0.809**	0.252	—	—
	C3	0.554	-0.841**	0.072	-0.778**	0.075	0.500	—
	C4	0.835**	-0.235	-0.622*	-0.176	0.779**	0.536	0.229

1) *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 不同水文情景对湖泊 CDOM 荧光组分生物降解特征的影响

南四湖枯水期荧光组分生物可利用性高于丰水期,而其余两个湖泊与之相反,而 Wu 等^[8]的研究发现得克萨斯州南部的 5 条河流冬季 DOM 的生物可利用性高于夏季. 这是由于是丰水期降雨水和外源输入的共同作用,引入的 DOM 生物活性较高,且已有研究表明雨水中 DOM 的生物可利用性潜力更大^[26]. 丰水期 3 个湖泊类蛋白荧光强度均低于培养前,而类腐殖酸荧光强度有所增加,南四湖和高邮湖的类腐殖酸与 HIX 显著正相关进一步说明微生物作用增强了 CODM 的腐殖化程度. 枯水期高邮湖和东平湖类蛋白 C2 荧光强度降低而 C3 荧光强度增加,表明枯水期类蛋白组分生物活性较低,由于不同季节 CDOM 来源存在差异进而影响了微生物的降解能力^[27]. 同时,研究发现不同季节南四湖类腐殖酸 C1 荧光强度与两种类蛋白荧光强度显著负相关,表明了微生物优先利用类蛋白质与类腐殖酸 C1 的产生紧密相关,这与程琼等^[28]的研究结果相似,3 个湖泊微生物降解作用促进了水体中类腐殖物质的转化,不稳定的 CDOM 组分在微生物作用下

趋向于转化为性质更稳定的物质. Dong 等^[29]对黄浦江的研究也发现不稳定 CDOM 物质的微生物转化有助于类腐殖物质的积累,可见微生物对有机物质的分解和转化起到了不可忽视的作用.

3.2 不同水文情景对湖泊 CDOM 生物降解空间分布特征的影响

微生物降解能力一方面取决于 CDOM 自身结构特征,另一方面也受到微生物代谢强度,外源输入等因素的影响^[27]. 丰水期高邮湖西部入湖口及湖中心类腐殖酸 $\% \Delta C1$ 和 $\% \Delta C4$ 为负值,而全湖类蛋白 $\% \Delta C2$ 和 $\% \Delta C3$ 高于 28%,西部入湖区域受外源输入影响较大,该区域类蛋白的生物可利用性较高且伴随类腐殖酸累积,随着迁移转化过程中紫外光辐射的作用,CDOM 不稳定性增强,所以东部湖区出现类腐殖酸减少的现象^[30]. 类蛋白组分在丰水期显著降低可以进一步说明. 枯水期高邮湖的类腐殖酸 $\% \Delta C1$ 和 $\% \Delta C4$ 为负值且分别在湖区南部入湖口和北部最小,而 $\% \Delta C2$ 仅在入湖口和东南湖区为正值,表明了枯水期不同湖区各个荧光组分的活性较低. 枯水期南四湖两类蛋白的生物可利用性受空间位置的影响较小,类腐殖酸主要在上级湖泊累积,上级湖泊接纳外源河流输入的影响. 丰水期南四湖类腐殖酸在全湖区都有累积现象,而组分 C3 的生物可利用

性从北部入湖口到南部出湖口有降低的趋势,由于上级湖区主要用于蓄水,而下级湖泊保证了泄洪安全,因此上级湖泊可能截留了更多具有生物潜力的 DOM^[31]. 丰水期东平湖类蛋白质为正值且在湖中心最高,然而湖区中心和出湖口两种类腐殖酸累积也较高,意味着东平湖湖区中心类蛋白组分生物可利用性较高,这与湖泊地形位置不同有关^[32]. 枯水期东平湖入湖口至出湖口方向类色氨酸的生物可利用性逐渐降低,同时两种类腐殖酸累积程度也在减少,这与迁移过程可能增加了东平湖不稳定组分的矿化程度相关^[33].

3.3 3 个湖泊 CDOM 生物可利用性特征的潜在环境指示意义

微生物作用后,高邮湖、南四湖和东平湖丰水期水样 CDOM 的吸收系数 $\Delta a(254)$ 为正值,而枯水期 $a(254)$ 值略微高于培养前,这可能是由于枯水期水样中微生物的裂解作用导致的^[34]. 同时 CDOM 的类蛋白组分占比减少且微生物作用后的类腐殖酸增加, HIX 值也随之增加,意味着发生了类腐殖酸的转化,与 Shin 等^[35] 的研究结果相似. 一定程度上指示了微生物消耗湖泊类蛋白质,可以减缓湖泊富营养化程度^[36]. 然而,3 个湖泊 $S_{275-295}$ 值在不同水文情境下也显著低于培养前, $I_C: I_T$ 均增大可以进一步印证 CDOM 腐殖化程度的增强. 天然水体中类腐殖酸结构复杂,丰富的官能团对重金属离子和其他有毒污染有机物具有吸附络合作用,另一个方面说明微生物作用提高了 CDOM 的腐殖化程度可能会增加复合污染物质,降低水环境质量^[37,38]. 因此, CDOM 生物可利用性特征对环境的潜在指示意义还需进一步研究.

4 结 论

(1) 紫外-可见吸收光谱和荧光光谱参数能较好地表征 CDOM 生物可利用性特征. 不同水文情境下,东平湖、南四湖和高邮湖 CDOM 样品均出现类蛋白物质的消耗和类腐殖酸的累积现象. 微生物优先降解不稳定的类蛋白质,并增加了 CDOM 腐殖化程度.

(2) 不同湖泊 CDOM 来源和组成存在差异,微生物降解特性不同. 丰水期高邮湖和东平湖 CDOM 荧光组分生物可利用性高于枯水期,而南四湖在枯水期较高. 丰水期高邮湖类蛋白组分的生物可利用性高于南四湖和东平湖,且枯水期高邮湖类腐殖酸累积程度高于其余两个湖泊.

(3) 整体上 3 个湖泊入湖河口区域类蛋白质生物可利用性及类腐殖酸的累积高于其余湖区,因而有必要加强入湖河流周边流域人类污染物排放管

理,尤其是丰水期,以此降低因局域 CDOM 生物可利用性过高而对水质造成的潜在危害.

致谢:感谢邹伟、徐轩、任浩宇、刘森、李娜、张成英及邢晓晟等同志在野外与室内实验过程中给予的帮助.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Zeri C, Beşiktepe Ş, Giannakourou A, *et al.* Chemical properties and fluorescence of DOM in relation to biodegradation in the interconnected Marmara-North Aegean Seas during August 2008 [J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, **135**: 124-136.
- [4] Asmala E, Autio R, Kaartokallio H, *et al.* Bioavailability of riverine dissolved organic matter in three Baltic Sea estuaries and the effect of catchment land use [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(11): 6969-6986.
- [5] Steinberg D K, Nelson N B, Carlson C A, *et al.* Production of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the open ocean by zooplankton and the colonial cyanobacterium *Trichodesmium* spp. [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, **267**: 45-56.
- [6] Yang L Y, Chen W, Zhuang W E, *et al.* Characterization and bioavailability of rainwater dissolved organic matter at the southeast coast of China using absorption spectroscopy and fluorescence EEM-PARAFAC [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, **217**: 45-55.
- [7] 钱伟, 杨玉盛, 曾宏达, 等. 内河 DOM 降解的三维荧光、紫外光谱研究——以白马河为例 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, **2**(3): 42-48. Qian W, Yang Y S, Zeng H D, *et al.* Characterization of dissolved organic matter biodegradation using 3-D EEM fluorescence and UV spectroscopy in Urban River-A case study of Baima River [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, **2**(3): 42-48.
- [8] 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**: 106477.
- [9] Sleighter R L, Cory R M, Kaplan L A, *et al.* A coupled geochemical and biogeochemical approach to characterize the bioreactivity of dissolved organic matter from a headwater stream [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, **119**(8): 1520-1537.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Abbott B W, Larouche J R, Jones J B Jr, *et al.* Elevated dissolved organic carbon biodegradability from thawing and

- collapsing permafrost [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, **119**(10): 2049-2063.
- [13] 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**: 105330.
- [14] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, *et al.* Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **173**: 216-223.
- [15] 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.
- [16] 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 等. 黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4105-4113.
- Zhao X T, Li S, Wang Y 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.
- [17] Murphy K R, Butler K D, Spencer R G M, *et al.* Measurement of dissolved organic matter fluorescence in aquatic environments: An interlaboratory comparison [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(24): 9405-9412.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Bu X L, Han F Y, Ruan H H, *et al.* Changes in chemical composition and spectral characteristics of dissolved organic matter from soils induced by biodegradation [J]. *Soil Science*, 2014, **179**(4): 197-204.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Sankar M S, Dash P, Singh S, *et al.* Effect of photo-biodegradation and biodegradation on the biogeochemical cycling of dissolved organic matter across diverse surface water bodies [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **77**: 130-147.
- [26] Bao H Y, Yi Y Y, Wang C, *et al.* Dissolved organic matter in coastal rainwater: concentration, bioavailability and depositional flux to seawater in southeastern China [J]. *Marine Chemistry*, 2018, **205**: 48-55.
- [27] Hansen A M, Kraus T E C, Pellerin B A, *et al.* Optical properties of dissolved organic matter (DOM): effects of biological and photolytic degradation [J]. *Limnology Oceanography*, 2016, **61**(3): 1015-1032.
- [28] 程琼, 庄婉娥, 王辉, 等. 夏季闽江 CDOM 的空间分布与降解特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 157-163.
- Cheng Q, Zhuang W E, Wang H, *et al.* Spatial distribution and degradation of CDOM in the Minjiang river in summer [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 157-163.
- [29] Dong Q Q, Li P H, Huang Q H, *et al.* Occurrence, polarity and bioavailability of dissolved organic matter in the Huangpu River, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(9): 1843-1850.
- [30] 马琼琳, 李朋辉, 黄清辉. UV-C 辐照对河水溶解有机质降解及微生物可利用性的影响 [J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(3): 259-265.
- Ma Q L, Li P H, Huang Q H. Effect of UV-C irradiation on dissolved organic matter and its bioavailability [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(3): 259-265.
- [31] 张韩, 薛丽芳, 杜杰. 南四湖流域水循环要素的时空变化特征 [J/OL]. *南水北调与水利科技*, 1-10. (2019-11-22) [2019-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191122.1132.010.html>.
- Zhang W, Xue L F, Du J. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of water cycle elements in the Nansihu Basin [J/OL]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 1-10. (2019-11-22) [2019-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191122.1132.010.html>.
- [32] Guillemette F, Del Giorgio P A. Simultaneous consumption and production of fluorescent dissolved organic matter by lake bacterioplankton [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(6): 1432-1443.
- [33] 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.
- [34] Lønborg C, Álvarez-Salgado X A, Davidson K, *et al.* Production of bioavailable and refractory dissolved organic matter by coastal heterotrophic microbial populations [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **82**(4): 682-688.
- [35] Shin Y, Lee E J, Jeon Y J, *et al.* Hydrological changes of DOM composition and biodegradability of rivers in temperate monsoon climates [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **540**: 538-548.
- [36] 赵海超, 李艳平, 王圣瑞, 等. 洱海沉积物有色可溶性有机物 (CDOM) 三维荧光空间分布特性及指示意义 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(2): 507-516.
- Zhao H C, Li Y P, Wang S R, *et al.* The spatial distribution and its significance of three-dimensional fluorescence characteristics of CDOM in sediments from Lake Erhai [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(2): 507-516.
- [37] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 基于 UV-vis 及 EEMs 解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量 DOM 的光谱特征及来源 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 172-184.
- Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Spectral characteristics and sources of dissolved organic matter with different relative molecular weight from rainwater from summer and autumn in the Zhoucun reservoir based on UV-Vis and EEMs [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 172-184.
- [38] Ji M C, Zhang J Q, Li S J, *et al.* Evaluating CDOM sources using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis, and their links to water quality in highly polluted rivers in China [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, **28**(3): 1203-1214.

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai; Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core; Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine; Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)