生态环境知识网
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

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

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

双奖期刊

2022年2月
第43卷 第 2 期
Vol.43 No.2

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 43 卷　第 2 期
2022 年 2 月 15 日

目　次

综述
不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 …… 李勖之, 姜瑢, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁(577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 …… 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国(586)
研究报告
兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 …… 黄文, 王胜利(597)
基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比 …… 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂(608)
华中地区夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析 …… 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铖, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽(619)
淄博 2021 年元宵节 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征 …… 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文(629)
浙江省大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 …… 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲(639)
2001 ~ 2019 年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 …… 潘晨, 康志明(649)
基于神经网络和数值模型的重点区域 $PM_{2.5}$ 预报比较分析 …… 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军(663)
2015 ~ 2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 …… 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤(675)
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 …… 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜(686)
山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 … 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源(696)
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 …… 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯(707)
日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 …… 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发(714)
泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 …… 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤(723)
典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 …… 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜(735)
2000 ~ 2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 …… 田智慧, 任祖光, 魏海涛(743)
西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 …… 徐森, 李思亮, 钟君(752)
生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 …… 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏(762)
不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 …… 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送(770)
雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 …… 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮(782)
廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 …… 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌(795)
北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 …… 郭芝芝, 苏振华, 邸琰茗, 郭逍宇(803)
河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 …… 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰(813)
青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 …… 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊(826)
鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 …… 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强(837)
鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 …… 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华,丁明军, 鞠民, 刘赟(847)
汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 …… 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华(859)
基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 …… 王子峤, 李叙勇(867)
新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 …… 张坤锋, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨(878)
铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 …… 齐鹏, 胡春, 邢学辞, 毕志浩, 李泽松(887)
氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 …… 柴铖, 许路, 金鑫, 石烜, 吴晨曦, 金鹏康(896)
环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 …… 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升(907)
冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 …… 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张绮亮, 文言, 钱飞跃(920)
不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 …… 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞(928)
云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 …… 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波(936)
山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 …… 张丁, 黄容, 高雪松(946)
地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 …… 鞠铁男, 雷梅(957)
西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 …… 穆德苗, 孙约兵(965)
典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 …… 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰(975)
矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 …… 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬(985)
不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 …… 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋(995)
温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 …… 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚(1004)
两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全生产的影响 …… 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵(1015)
复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 …… 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲(1023)
产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 …… 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉(1031)
土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 …… 杨文娜, 余泺, 罗东海, 熊子怡, 王蓥燕, 王子芳, 高明(1040)
刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 …… 李文杰, 张祯皎, 赵雅萍, 许淼平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉(1050)
中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 …… 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲(1059)
稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 …… 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣(1069)
模拟及实际根系分泌物对芘污染土壤微生物群落的影响 …… 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗(1077)
德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 …… 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君(1089)
陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 …… 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲炜, 龙小翠(1097)
长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 …… 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗(1108)
《环境科学》征订启事(618)　《环境科学》征稿简则(761)　信息(685, 935, 956)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第2期 2022年2月
Vol.43,No.2 Feb.,2022

鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征

罗燕清, 万智巍, 晏彩霞*, 聂明华,丁明军, 鞠民, 刘赟
(江西师范大学地理与环境学院,鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘要: 目前针对鄱阳湖流域沉积物溶解性有机质(DOM)光谱特征的研究仍较少,因此基于紫外-可见光谱和三维荧光光谱技术,并结合平行因子分析法(PARAFAC),对鄱阳湖沉积物中 DOM 的物质组成和来源特征进行了解析. 结果表明,鄱阳湖沉积物 DOM 的腐殖化程度较高,是陆源输入和藻类、浮游生物等内源产生的混合型,且以陆源输入为主. 与碟形湖区相比,通江水域沉积物 DOM 的有色溶解性有机质浓度更高、DOM 粒径更大且芳香性及腐殖化程度更高. 通过 PARAFAC 共解析出 3 个类腐殖质组分(C1、C2、C4)和 1 个类蛋白组分(C3). 与碟形湖相比,腐殖质组分均表现为通江水域更高,其中 C1 组分在两区域的占比均为所有组分中最高,前者为 42%,后者为 46%. 空间分布上, 4 个组分荧光强度总体上呈现东高西低的趋势,高值主要分布在都昌和南矶湿地水域附近,分析主要与丰水期水位上涨、大量植物被淹死亡和人类活动有关. 主成分分析结果表明,湖区不同沉积物 DOM 荧光组分差异较小,但以碟形湖区沉积物 DOM 腐殖化程度略高.

关键词:沉积物; 溶解性有机质(DOM); 紫外-可见吸收光谱; 三维荧光光谱; 鄱阳湖
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)02-0847-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202106048

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake

LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia*, NIE Ming-hua, DING Ming-jun, JU Min, LIU Yun
(Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: At present, there are few studies on the spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in the sediments of the Poyang Lake basin. Therefore, excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) technology and ultraviolet-visible spectra combined with the parallel factor analysis (PARAFAC) were applied to investigate the fluorescent components and sources of DOM in sediments from Poyang Lake. The results showed that the DOM in sediments originated from both terrestrial and autochthonous sources with a high humification. Compared with the sub-lakes, the DOM from the main lake was characterized with a higher concentration of colored DOM, larger particle size, and higher aromaticity and humification degree. In addition, four fluorescence components of DOM in sediments were identified by the PARAFAC model, including three humic-like components (C1, C2, and C4) and one protein-like component (C3). The fluorescence intensity of the humic substances in the sub-lakes was higher than those in the main lake. Furthermore, the percentage of fluorescence abundance of C1 was the highest both in the sub-lakes (42%) and main lake (46%). The spatial distribution of the fluorescence intensity of the four components gradually increased from west to east, and the peak values were observed in the Duchang and Nanji Wetland. This may be related to the death of a large number of plants due to the rise in the water level during the wet season and human activities. Principal component analysis showed that although there were no significant differences in the four fluorescent components between the sub-lakes and the main lake, the humification degree of DOM in the sub-lakes was slightly higher than that in the main lake.

Key words: sediments; dissolved organic matter (DOM); UV-vis spectra; 3D-EEMs; Poyang Lake

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是一类具有复杂化学组成、结构和环境行为的有机混合物. DOM 主要由类腐殖酸(胡敏酸和富里酸)、亲水性有机酸、多糖、类蛋白和类氨基酸等物质组成,广泛存在于地下水、土壤和湖泊等环境介质中[1,2]. 水生环境中的 DOM 有多种自然和人为来源,如雨水、植物淋滤、土壤淋洗、废水和藻类产生等[3]. 不同来源的 DOM 在化学成分和生物利用度上可能存在显著差异. 作为湖泊沉积物有机质中最活跃的组分之一,一方面 DOM 能与水体中金属离子及有机污染物结合,影响污染物形态的分布、迁移转化能力及生物有效性,对水生生态系统结构和功能产生显著影响; 另一方面,DOM 是水生环境中最大的有机碳库,在生态系统碳平衡中具有重要作用[4~6].

目前,光谱、磁共振和质谱等多种表征技术被用于 DOM 物化性质研究,极大提高了对 DOM 特征的识别能力. 其中,荧光光谱技术实现了 DOM 参数的全面可视化,包括荧光强度、荧光团的数量和类型、荧光最大值的位置和峰值强度的比率[7],而被广泛应用于 DOM 组分和来源等研究中. 此外,与一些分析方法的结合使得光谱分析得以定量化和可视化,如平行因子分析法(parallel factor analysis, PARAFAC)可准确识别出荧光峰的个数、位置和荧光强度等信息,以快速量化和表征不同环境介质中的 DOM[8,9]. 目前,国内外学者运用 UV-vis 和 3D-EEMs,并结合 PARAFAC 模型,在湖泊[5,10]、海

收稿日期: 2021-06-05; **修订日期**: 2021-07-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(42067058, 42067034); 江西省自然科学基金项目(20202BAB203015, 20202BAB203014)
作者简介: 罗燕清(1998~),女, 硕士研究生,主要研究方向为天然胶体的环境行为, E-mail: Lyqluoyanqing@163.com
* 通信作者,E-mail:yancaixia@jxnu.edu.cn

洋[11,12]和河流[13,14]等水体沉积物的 DOM 分布特征及其来源等研究中取得了丰富的成果.

作为我国最大的淡水湖泊,鄱阳湖承担着“绿肺”的功能[15]. 然而,近年来,人口激增和无序的工农业生产导致污染加剧,严重影响到湖区辐射范围内居民生活、生产以及生态用水安全[16]. 因此,在鄱阳湖开展对水体污染物环境行为具有重要影响的 DOM 的来源、物质组成和影响因素等的研究,对保护鄱阳湖水质具有极其重要的意义. 目前,鄱阳湖水环境中 DOM 的相关研究、尤其是水体中 DOM 光谱特征已经取得了一定进展. 例如,刘丽贞等[17]的研究通过 PARAFAC 解析鄱阳湖水样有色溶解性有机物(CDOM)荧光组分,发现鄱阳湖水体 CDOM 由两类荧光组分组成,并指出各荧光组分都与水体中总氮和溶解性总氮呈现显著正相关关系. 申钊颖等[18]采用 3D-EEMs 结合荧光区域积分研究了鄱阳湖不同区域水环境中 DOM 光谱特性,并探讨了消落带的土壤、水体和植物中 DOM 的联系与区别. 李雅妮等[19]以鄱阳湖水体 DOM 为研究对象,结合 EEMs-PARAFAC 对不同相对分子质量荧光组分和重金属含量进行分析,为湖区重金属污染防治提供了理论支持. 然而,有关鄱阳湖沉积物 DOM 光谱特征及意义的相关研究却较少. 基于此,本研究利用 UV-vis 和 3D-EEMs 技术,并结合 PARAFAC 模型,探讨了鄱阳湖湖区多个样点沉积物 DOM 的组成、分布特征和来源,以期为识别和评价鄱阳湖水体污染源提供理论依据,从而更好地展开该区水环境保护工作.

1 材料与方法

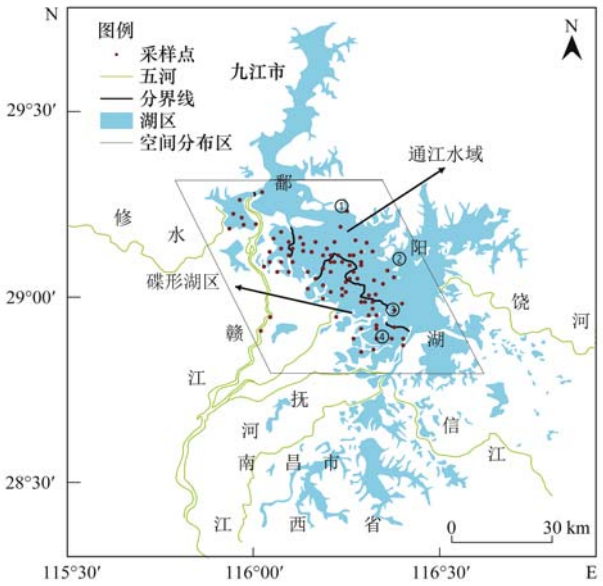
1.1 样品采集与预处理

鄱阳湖位于江西省北部,流域面积约162 225 km^2,是我国最大的淡水湖. 本研究根据鄱阳湖不同区域的水动力条件和沉积环境特点,并重点关注入湖最大支流——赣江河口区沉积物中 DOM 的光谱特性,于 2017 年 6 月在研究区共设置了 87 个底泥采样点(图 1),并将采样区域参照张祖芳[20]的方法分为了碟形湖区(分界线左侧)和通江水域(分界限右侧). 碟形湖区为季节性呈现的子湖泊,枯水期时成为孤立水域; 通江水域为低水位时与长江连通的湖区. 本研究采用彼得森采泥器采集底泥样品,装入自封袋后置于低温环境中尽快运回实验室. 用冷冻干燥机将沉积物样品冷冻干燥后研磨并过 100 目筛备用.

1.2 实验方法

1.2.1 沉积物中 DOM 提取

DOM 提取采用超声提取法与振荡法相结合的



①都昌,②朱袍山,③南矶湿地水域,④康山

图 1 鄱阳湖沉积物采样点示意

Fig. 1 Sampling sites of sediments from Poyang Lake

方法提取,超声提取方法参照 Liu 等[21]的研究中所描述的方法. 具体提取过程如下:称取 0.2 g 土样于 15 mL 离心管中,按水土比 50∶1 加入超纯水(Millipore,电阻率为 18.25 MΩ·cm),720 W 超声 30 min,重复两次,于室温下在振荡器上以 200 $r\cdot min^{-1}$振荡 24 h,再使用3 600 $r\cdot min^{-1}$转速离心机离心 20 min,取上清液过 0.45 μm 滤膜(PVDF,Millipore,USA),得到 DOM 溶液,用于 DOC 含量测定及光谱指标测定. DOC 浓度采用 liquiTOC Ⅱ(Elementar,Germany)测定.

1.2.2 紫外-可见光谱测定及特征参数分析

紫外-可见光谱通过 UV-3300(美普达,上海)分光光度计测定,用 10 mm 光程石英比色皿在 200 ~ 800 nm 范围内扫描测定,步长为 1 nm,以 Millipore 水作空白对照.

UV_{254}值为波长 254 nm 处的吸光度,用于表征 DOM 浓度及芳香性[22]. 吸收系数 α 由公式(1)获得.

$$\alpha(\lambda) = 2.303 \times A(\lambda)/r \quad (1)$$

式中,$A(\lambda)$为波长 λ 处吸光度,r 为光程路径(m). 本文以 355 nm 处吸收系数 $\alpha(355)$表示 CDOM 的相对浓度[13],且与 CDOM 浓度呈正相关关系.

光谱斜率 S 可用于表征 DOM 相对分子质量大小和芳香性. 本文中 275 ~ 295 nm 和 350 ~ 400 nm 波长下吸光度指数函数曲线光谱斜率即 $S_{275\sim295}$和 $S_{350\sim400}$,通过 SigmaPlot 软件的单指数衰减函数拟合得到,两者比值即为光谱斜率比 S_R,常用于指示

DOM 相对分子质量,且与相对分子质量呈反比.

比吸收系数(specific UV absorbance, SUVA)为波长 λ 处吸收系数与 DOC 浓度的比值[23],可用于表征 DOM 的腐殖化程度(本文 λ 为 254 nm 和 260 nm). E2/E4 为波长在 254 nm 和 436 nm 处吸光度的比值,用于指示 DOM 来源. E3/E4 为波长在 300 nm 和 400 nm 处吸光度的比值,该值 > 3.5 表明 DOM 主要为富里酸, < 3.5 为胡敏酸[24].

1.2.3　三维荧光光谱测定与参数分析

用 F7100 型(日立)三维荧光光谱仪对沉积物中 DOM 进行三维荧光光谱分析. 设定条件为:激发光源采用 450 W 氙弧灯,PTM 电压为 700 V,信噪比 > 110,带通为 E_x = 5 nm, E_m = 5 nm; 响应时间选择自动; 扫描速率为30 000 nm·min^{-1}; 激发波长范围为 230 ~ 450 nm,发射波长范围为 250 ~ 500 nm,波长间隔均为 5 nm. 测定前用 Milli-Q 超纯水作实验空白.

荧光参数(FI、BIX 和 HIX)常用于判断 DOM 的来源及性质. 荧光指数(fluorescence index, FI)指激发波长为 370 nm 时,发射波长在 450 nm 与 500 nm 处的荧光强度比值. 该指数常用于研究和表征 DOM 中腐殖质的来源. 当 FI > 1.9 时,表明微生物代谢即细胞和藻类胞外释放和渗滤液为主要来源,自生源特征突出; 当 FI < 1.4 时,表明以陆源即陆地植物和土壤有机质贡献为主[25].

自生源指数(biological index, BIX)指激发波长为 310 nm 时,发射波长在 380 nm 与 430 nm 处的荧光强度比值. 该指数常用于表征 DOM 自生源相对贡献,且自生源贡献率和 BIX 值呈正相关关系[26]. 当 BIX 大于 1 时,表明 DOM 自生源特性较强; BIX 介于 0.6 ~ 0.7 时,表示自生源较少[14].

腐殖化指数(humification index, HIX)指激发波长为 254 nm 时,发射波长在 435 ~ 480 nm 和 300 ~ 350 nm 间区域积分面积的比值,常用于表征 DOM 腐殖化程度. 当 HIX > 6 时,表明 DOM 具有强腐殖质特征且陆源贡献较大; HIX 介于 4 ~ 6 时,表明 DOM 属于强腐殖质特征和微弱的新近自生源; HIX < 4 时,表明 DOM 腐殖质特征较弱且以自生源为主[27].

类蛋白物质相对浓度 Fn(280)为 E_x = 280 nm 时, E_m 在 340 ~ 360 nm 间最大荧光强度,代表类蛋白物质相对浓度水平; 类腐殖质物质相对浓度 Fn(355)为 E_x = 355 nm 时, E_m 在 440 ~ 470 nm 间最大荧光强度,代表类腐殖物质的相对浓度水平[28].

1.2.4　平行因子分析法

平行因子分析法通过将复杂的荧光信号分解成不同的独立荧光部分,从而进一步提高示踪和表征天然水域 DOM 变化的能力. 它是基于三线性理论的一种数学模型,将所有点位的整个三维荧光数据组分解成 3 个线性项和 1 个残留数组[29]. 建模之前,利用 Zepp 等[30]的研究描述的方法去除样品的拉曼散射和瑞利散射,以超纯水 E_x 为 350 nm 和 E_m 为 370 ~ 430 nm 范围内拉曼谱进行校正,并以拉曼校正对样品荧光强度进行标准化(r. u.)[31]. 然后在 MATLAB 中使用 DOMFlour 工具箱对鄱阳湖沉积物 DOM 的 3D-EEMs 数据进行分析[32]. 通过平方误和核心一致性验证 PARAFAC 模型以筛选合适的模型组分,并进行拆分验证. 在 OpenFluor 数据库(http://www.openfluor.org)中对 E_x 和 E_m 进行定量比较以鉴定 PARAFAC 中的荧光团[33].

1.2.5　绘图及数据处理

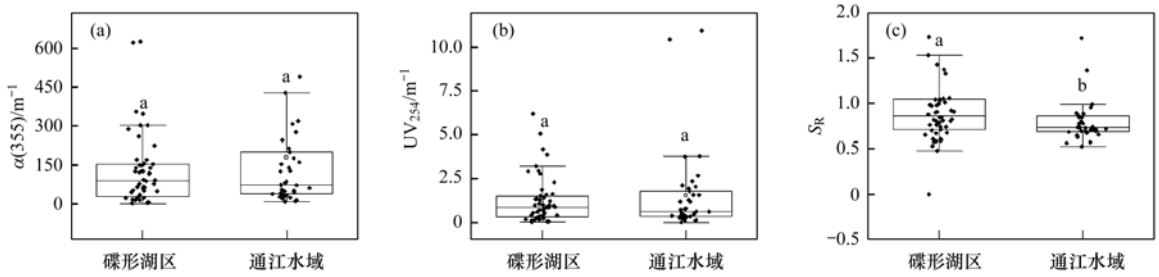
用 Excel 2019 和 Origin 2020 软件对样品所测紫外和荧光数据进行分析处理以及作图,包括平均值、标准偏差和最大值等描述性数据; 使用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件进行相关分析、主成分分析(principal components analysis, PCA)和非参数检验; 根据采样点坐标以及荧光组分含量,利用 Arcgis 10.2 软件中的反距离加权插值分析,得到鄱阳湖湖区表层沉积物采样点分布图以及光谱参数的空间插值图.

2　结果与讨论

2.1　鄱阳湖沉积物 DOM 的紫外-可见光谱特征参数分析

鄱阳湖不同区域沉积物 DOM 在 355 处的吸收系数 α(355)值在通江水域为(180.05 ± 268.14) m^{-1},碟形湖区为(128.11 ± 137.20) m^{-1}[图 2(a)],可以看出通江区域沉积物 DOM 的 α(355)值显著高于碟形湖区,这表明通江区域沉积物 CDOM 相对浓度显著高于碟形湖区. 254 nm 波长处的吸光度可表征 DOM 中芳香化合物等不饱和碳键含量,且 UV_{254} 值与芳香性及腐殖化程度呈正相关关系[22]. 碟形湖区 UV_{254} 值范围在 0.03 ~ 6.20 m^{-1}之间,均值为 1.25 m^{-1},而通江水域 UV_{254} 值范围在 0.01 ~ 10.96 m^{-1}之间,均值为 1.56 m^{-1}[图 2(b)],说明通江水域芳香化合物含量及腐殖化程度高于碟形湖区. 该结果与东太湖水体 DOM 较低的 UV_{254} 值结果相似,分析可能是由于碟形湖区水位低,丰水期湿地植被淹没和腐烂分解后,易被水体中微生物分解利用的亲水性物质释放到水体中所致[34]. 作为表征 DOM 来源与迁移的综合指标,通常

$S_R > 1$ 时,表明 DOM 以生物源输入为主; $S_R < 1$ 时,表明 DOM 以陆源输入特征为主,且由于芳香性和腐殖化程度高即微生物作用微弱,光漂白为影响 S_R 值的主要因素[35,36]. 本研究中碟形湖区和通江水域 S_R 值都小于 1,分别为 0.83 ± 0.24 和 0.75 ± 0.15 [图 2 (c)],表明该时期鄱阳湖沉积物中 DOM 主要是陆源输入. 碟形湖区 S_R 值略大于通江水域,表明碟形湖区沉积物 DOM 相对分子质量略小于通江水域,原因可能在于碟形湖区水位较低,太阳辐射即光漂白影响更为明显.

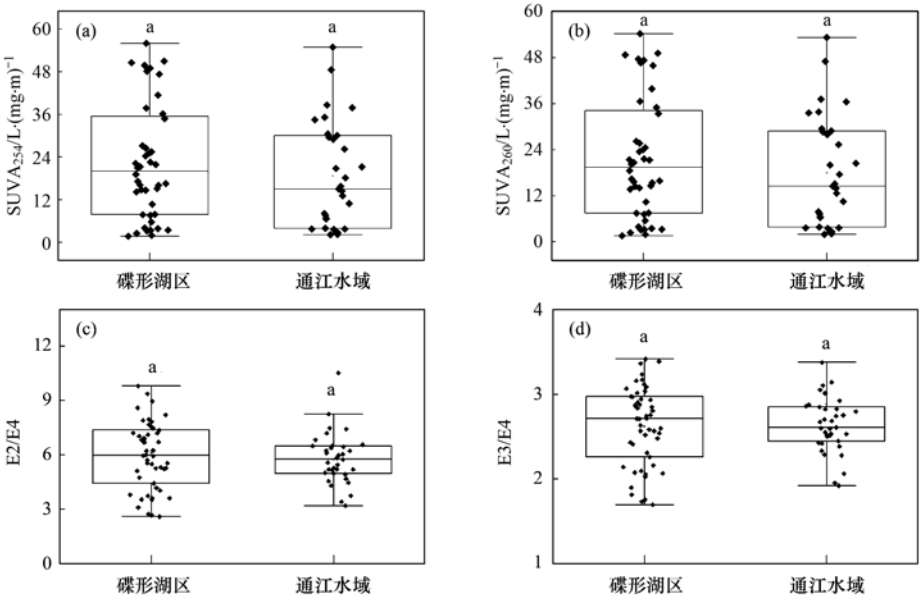


不同小写字母表示存在显著差异

图 2 鄱阳湖沉积物 DOM 的 $\alpha(355)$、UV_{254} 和 S_R

Fig. 2 The $\alpha(355)$, UV_{254}, and S_R values of DOM in sediments from Poyang Lake

$SUVA_{254}$ 常用于表征样品中芳香结构的含量以及腐殖化程度,该值越大,表明腐殖化程度越高[37]. 与表 1 中其他相关研究相比[38],碟形湖区和通江水域 $SUVA_{254}$ 值都较大,分别为 (22.62 ± 16.25) L·(mg·m)$^{-1}$和(18.66 ± 14.64) L·(mg·m)$^{-1}$[图 3 (a)],表明鄱阳湖沉积物 DOM 腐殖化程度较高. $SUVA_{260}$ 常用于表征 DOM 疏水性组分含量,且与其成正相关关系[39]. 碟形湖区和通江水域 $SUVA_{260}$ 值分别为(21.80 ± 15.72) L·(mg·m)$^{-1}$和(17.99 ± 14.19) L·(mg·m)$^{-1}$[图 3 (b)],该值比大沽河河口区沉积物 DOM 的 $SUVA_{260}$ 值高,表明鄱阳湖沉积物 DOM 疏水性组分含量较高. 吸收指数 E2/E4 可用于表征有机质来源,该值较高为内源,反之为外源[40]. 但也有学者指出,受光漂白影响,E2/E4 值在表征河口有机物来源中存在较大的局限性[41]. 因此,在研究中,可结合 FI 等荧光参数探讨研究区 DOM 来源. 碟形湖区和通江水域 E2/E4 值都较低,分别为 6.10 ± 2.15 和 5.75 ± 3.07[图 3 (c)],表明鄱阳湖沉积物 DOM 主要来源于外源. 碟形湖区和通江水域 E3/E4 值都低于 3.5,分别为 2.62 ± 0.46 和 2.89 ± 1.56[(图 3 (d)],表明鄱阳湖沉积物 DOM 主要为胡敏酸.



不同小写字母表示存在显著差异

图 3 鄱阳湖沉积物 DOM 的 $SUVA_{254}$、$SUVA_{260}$、E2/E4 和 E3/E4

Fig. 3 $SUVA_{254}$, $SUVA_{260}$, E2/E4, and E3/E4 values of DOM in sediments from Poyang Lake

2.2 鄱阳湖沉积物 DOM 的荧光参数分析

为进一步分析鄱阳湖沉积物中 DOM 的光谱特征,本研究选取主要荧光光谱指数(FI、BIX 和 HIX)进行分析,结果如图 4 所示. 鄱阳湖沉积物中

表 1　不同水体沉积物 DOM 光谱参数的对比[1)]

Table 1　Comparison of spectral parameters for DOM in sediments from different water bodies

项目	$\alpha(355)/m^{-1}$	UV_{254}/m^{-1}	S_R	$SUVA_{254}/L\cdot(mg\cdot m)^{-1}$	$SUVA_{260}/L\cdot(mg\cdot m)^{-1}$	E2/E4	E3/E4	FI	BIX	HIX	文献
鄱阳湖	0.61 ~ 428.08	20.64	0.47 ~ 1.52	20.64	19.89	2.6 ~ 9.8	1.29 ~ 3.37	1.23 ~ 1.69	0.58 ~ 1.08	0.88 ~ 5.33	本研究
南四湖	—	—	—	—	—	—	—	2.27 ~ 2.47	0.71 ~ 0.85	2.65 ~ 7.82	[5]
巢湖	—	—	0.74 ~ 1.41	—	—	—	—	2.56 ~ 4.89	0.31 ~ 1.54	1.38 ± 0.44	[10]
周村水库	2.91 ~ 5.01	—	1.00 ± 0.05	—	6.94	—	5.49 ± 0.84	1.70 ± 0.04	0.8 ~ 1.0	1.26 ± 0.07	[24]
渤海湾	1.12 ~ 3.51	—	0.33 ~ 0.77	—	—	—	—	1.21 ~ 1.36	0.87 ~ 1.65	2.77 ~ 4.96	[27]
大沽河	—	—	—	0.18 ~ 1.23	0.17 ~ 1.23	—	—	1.61 ~ 1.99	0.59 ~ 2.73	0.27 ~ 1.60	[38]
普里河	4.69 ± 0.68	—	1.61 ± 0.07	3.70 ± 0.84	3.50 ± 0.80	7.04 ± 1.49	2.74 ± 0.30	1.69 ± 0.03	0.89 ± 0.07	3.58 ± 0.50	[42]
桃花溪	6.06 ± 1.86	—	1.64 ± 0.29	3.82 ± 1.05	3.62 ± 0.99	8.49 ± 1.02	3.20 ± 0.29	1.74 ± 0.06	0.92 ± 0.03	2.69 ± 0.59	[42]
崇明东滩湿地	0.41 ~ 48.33	—	—	—	—	—	—	1.64 ~ 2.57	0.51 ~ 1.25	1.58 ~ 8.34	[43]
罗峪沟流域	—	—	—	4.86 ~ 6.29	3.07 ~ 4.35	—	—	1.44 ~ 1.79	4.85 ~ 6.71	5.67 ~ 14.88	[44]

1)“—”表示文献中未给出数据

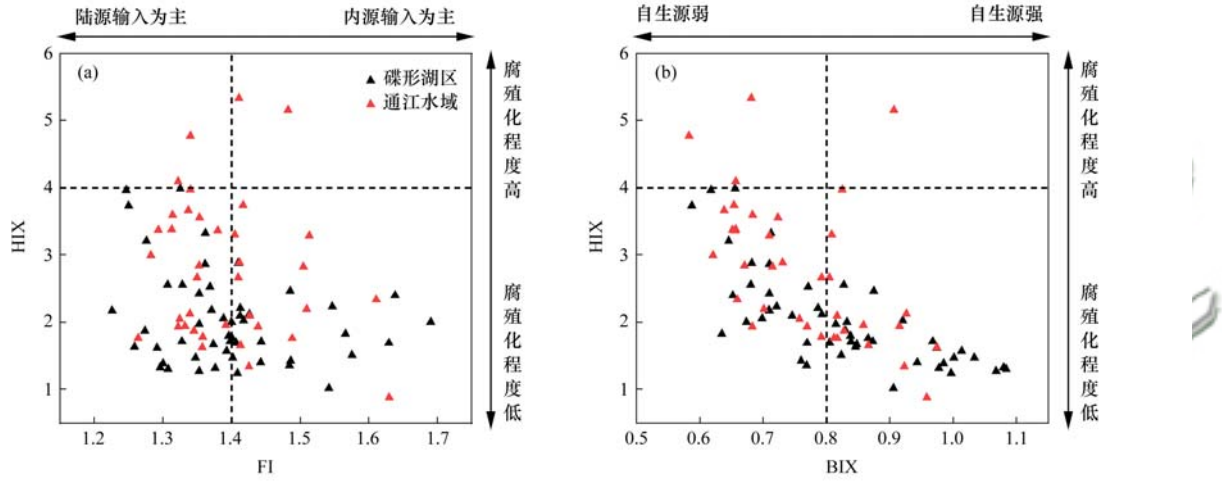


图 4　鄱阳湖沉积物 DOM 荧光参数分布

Fig. 4　Distribution of fluorescence indices of DOM in sediments from Poyang Lake

DOM 的 FI 范围为 1.23 ~ 1.69，碟形湖区均值为 1.39 ± 0.10，通江水域均值为 1.39 ± 0.08，可以看出，通江水域与碟形湖区相差不大. FI 值的变化趋势说明鄱阳湖沉积物 DOM 是陆源输入和藻类、浮游生物等内源产生的混合输入，且由图 4(a)可以看出以陆源产生居多，结果与 Yan 等[33]对鄱阳湖入湖水中 DOM 的研究结果类似. 鄱阳湖沉积物 BIX 范围为 0.58 ~ 1.08，碟形湖区均值为 0.82 ± 0.13，通江水域均值为 0.76 ± 0.10. BIX 值的变化趋势说明鄱阳湖沉积物 DOM 组分中自生源贡献较少. 鄱阳湖沉积物 HIX 范围为 0.88 ~ 5.33，碟形湖区均值为 2.03 ± 0.69，通江水域均值为 2.77 ± 1.05[图 4(b)]，这说明鄱阳湖沉积物 DOM 的腐殖质特征较弱，生物活性较强，此结果与刘丽贞等[17]对鄱阳湖 CDOM 的研究结果类似. 综上，鄱阳湖不同湖区沉积物 DOM 荧光参数表征意义整体一致，可能与鄱阳湖为浅水湖泊且水体流动性强有关；湖区沉积物 DOM 的腐殖化程度较低，DOM 来源为陆源和自生源共同作用的结果，且以陆源输入为主.

与我国不同水体沉积物 DOM 荧光参数对比发现(表 1)，鄱阳湖沉积物 DOM 中 FI 指数和 BIX 指数与其他水体范围基本一致. 而 HIX 指数要低于其他几个水体，如鄱阳湖沉积物 DOM 中 HIX 指数范围(0.88 ~ 5.33)远低于罗峪沟流域(5.67 ~ 14.88)，这可能与该研究样品为不同土地利用下采样点的沉积物，包括林地、草地、休耕地、沟壑和林地等，而本研究样品均为水体沉积物有关.

Fn(280)和 Fn(355)常用于表征样本 DOM 类蛋白物质和类腐殖质组分相对浓度. 本研究中碟形湖区 Fn(280)和 Fn(355)分别为 0.61 ~ 0.55 r. u. 和 0.02 ~ 0.68 r. u.，均值分别为 0.19 r. u. 和 0.18 r. u.；通江水域 Fn(280)和 Fn(355)分别为 0.06 ~ 0.59 r. u. 和 0.04 ~ 0.76 r. u.，均值分别为 0.19 r. u. 和 0.22 r. u.. 空间分布上(图 5)，Fn(280)和 Fn(355)值大致从碟形湖区向通江水域即自西向东方向上呈增大趋势，且高值出现在同一个区域，即南矶湿地水域附近区域(图 1)，这可能与此处较高的生物量有关.

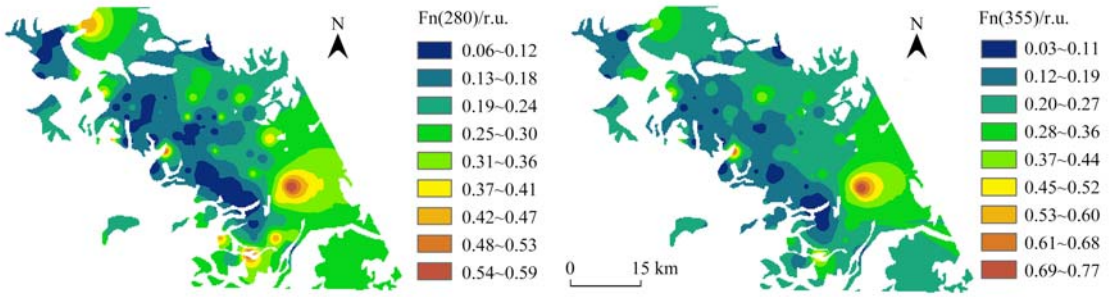


图 5 鄱阳湖沉积物 DOM 的 Fn(280)和 Fn(355)空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution of Fn(280) and Fn(355) of DOM in sediments from Poyang Lake

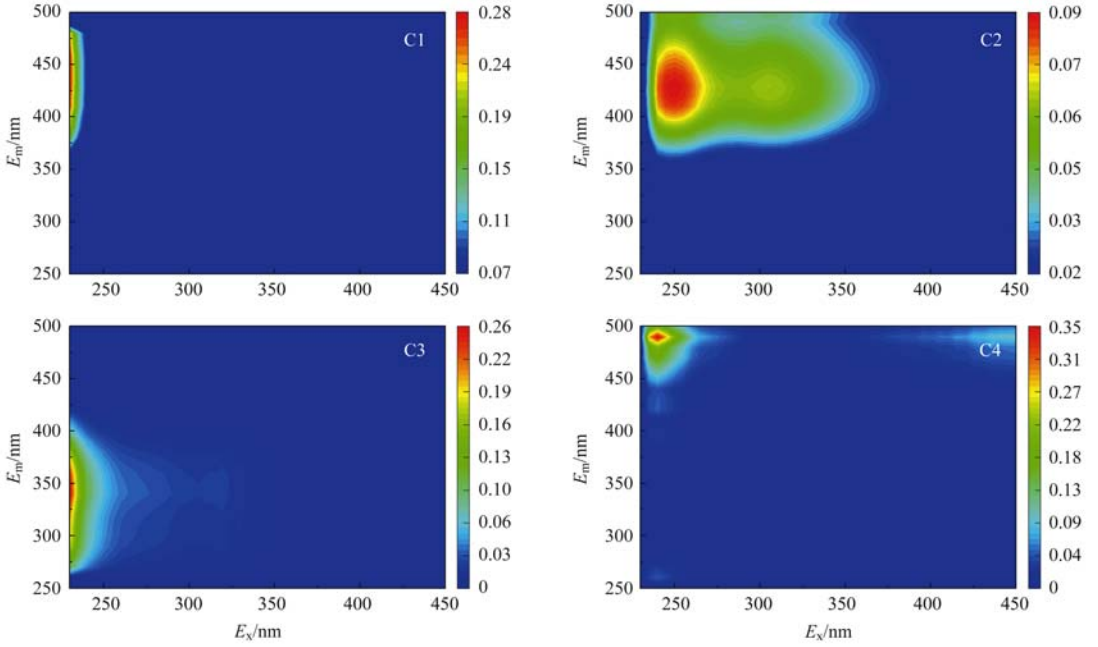


图 6 平行因子分析法得到的 4 个荧光组分

Fig. 6 Three-dimensional fluorescence diagram of four components obtained by parallel factor analysis

2.3 鄱阳湖沉积物 DOM 的荧光组分特征

对 87 个沉积物 DOM 三维荧光光谱矩阵数据进行平行因子解析发现,鄱阳湖沉积物 DOM 共解析出 4 种荧光组分(C1、C2、C3 和 C4,图 6). 通过收敛系数 (tucker convergence coefficient, TCC),将 4 种荧光组分与在线 OpenFluor 数据库中的模型进行对比以判定物质组成(表 2). 4 种荧光组分的最大激发、发射波长分别为 C1(E_x/E_m = 230 nm/440 nm)、C2(E_x/E_m = 250(305) nm/430 nm)、C3(E_x/E_m = 230 nm/430 nm)和 C4(E_x/E_m = 240 nm/490 nm). 其中,C1 组分荧光峰的位置和紫外区类腐殖质荧光峰 A 位置相近,荧光峰 A 是紫外区类腐殖质产生的荧光,广泛存在于河流、海洋等水体环境中,其位置和强度都包含与腐殖物质化学组成有关的信息[45]. C2 组分具有两个荧光峰,其发射波长相同,均为 430 nm,激发波长分别为 250 nm 和 305 nm,主峰 250/430 nm 位于陆源类腐殖质荧光峰 A(237 ~ 260 nm/380 ~ 460 nm)区域,肩峰 305/430 nm 位于海源类腐殖质荧光峰 M(290 ~ 310 nm/380 ~ 420 nm)区域[46]. 一般来说,发射波长较长(红移)且发射极大值较宽的峰包含许多共轭荧光分子,荧光峰 A 便是此类荧光团之一. 峰 A 主要来源于维管植物,性质芳香,高度共轭; 荧光峰 M 最初被认为完全来自海洋浮游生物,但相关研究发现也存在于陆地和淡水环境中[47,48]; 故组分 C2 可被认为是传统 A 峰和 M 峰的结合体,且为陆源输入. C3 组分与类色氨酸荧光峰 T(275/340 nm)荧光特性相似,是降解程度较低的多肽类化合物[49]. C4 组分的最大波峰位置和可见区类腐殖质荧光峰 C(320 ~ 360 nm/420 ~ 460 nm)位置相近,荧光峰 C 被认为是从陆源输出的腐殖质,该类型的荧光团出现在大多数海洋中层水样品中,且峰值位置和宽度变化较小[7].

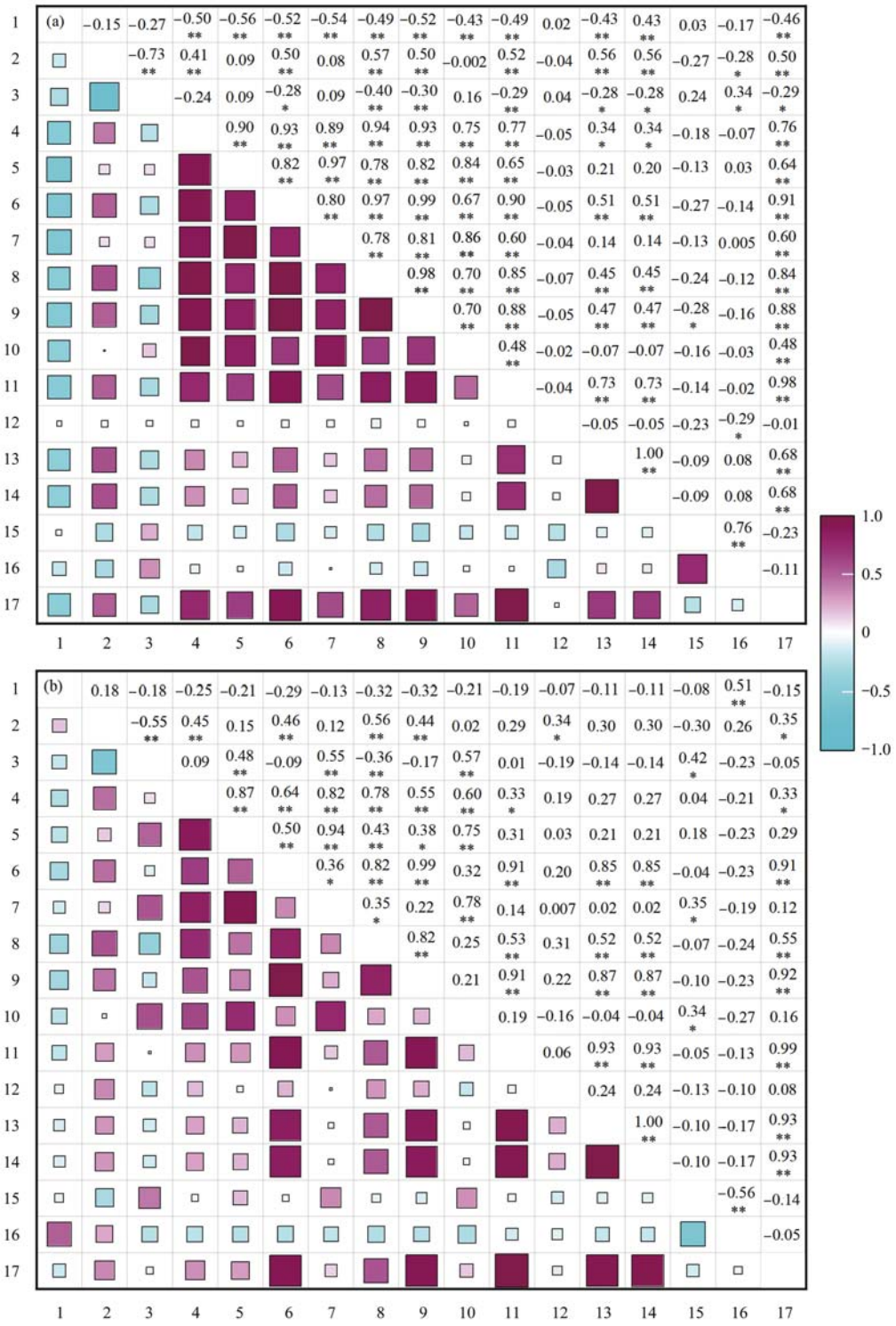
为进一步探讨鄱阳湖两区域中沉积物 DOM 不同荧光组分的归趋性,分别对 4 种荧光组分及其他光谱参数进行皮尔逊相关分析,结果如图 7 所示. 可以看出,碟形湖区中 4 种荧光组分之间都具有极显

表 2　Open Flour 数据库中 PARAFAC 组分的最大 TCC 值

Table 2　Max value of TCC for the PARAFAC components between the present study and the Open Flour database

本研究	TCC			物质组成	OpenFluor 模型	OpenFluor 中 ID
	E_x	E_m	$E_x \times E_m$ [1)]			
C1	0. 982 4	0. 964 3	0. 947 4	紫外腐殖质物质	C1	50[50]
C2	0. 994 2	0. 993 0	0. 987 3	类腐殖质	C1	959[51]
C3	0. 992 5	0. 936 7	0. 929 7	色氨酸	C5	59[49]
C4	0. 964 6	0. 932 2	0. 899 1	陆地腐殖质	C4	50[50]

1)该值表示 TCC-E_x 与 TCC-E_m 的乘积



(a)碟形湖区,(b)通江水域; 1. FI, 2. BIX, 3. HIX, 4. Fn(280), 5. Fn(355), 6. C1, 7. C2, 8. C3, 9. C4, 10. DOC, 11. UV_{254}, 12. S_R, 13. $SUVA_{254}$, 14. $SUVA_{260}$, 15. E2/E4, 16. E3/E4, 17. α(355); ** 表示显著性水平, $P<0.01$; * 表示显著性水平, $P<0.05$(双尾)

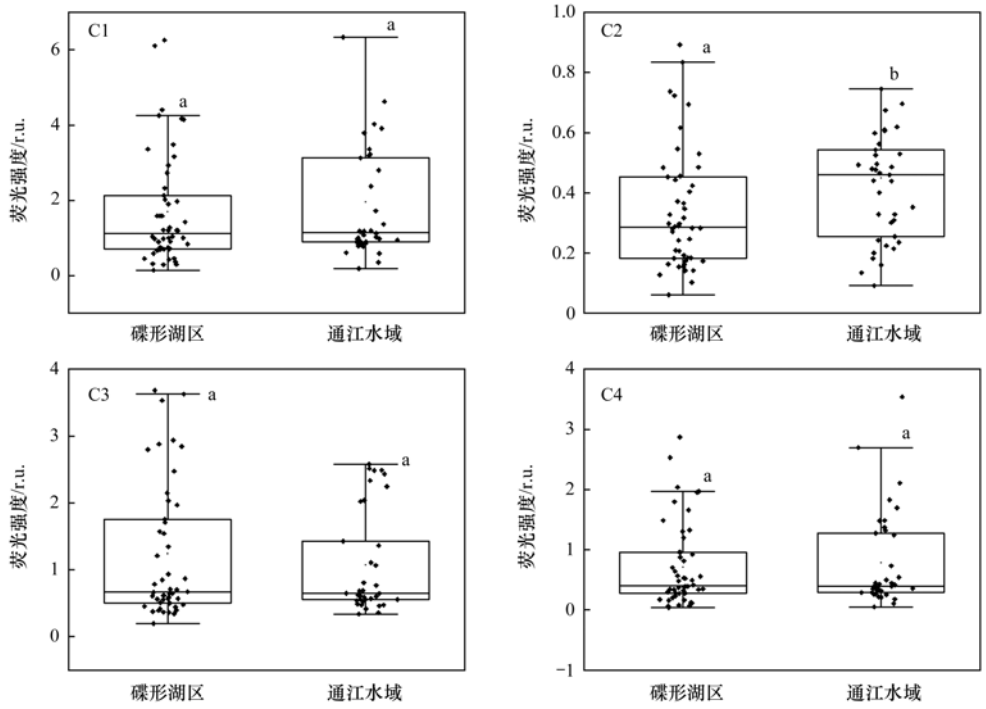
图 7　鄱阳湖沉积物 DOM 荧光组分特征和其他指标的相关性

Fig. 7　Correlation between fluorescence components of DOM and other parameters

著相关关系($r>0.78$, $P<0.01$),而通江水域中C1、C3和C4分别呈极显著正相关关系($r>0.82$, $P<0.01$),但C2和C4无相关关系($r=0.22$, $P>0.05$);并且碟形湖区中Fn(280)和Fn(355)与4个荧光组分间均呈极显著正相关关系($r>0.78$, $P<0.01$),而通江水域中除Fn(355)与C4呈显著正相关关系($r=0.38$, $P<0.05$),余者均呈极显著正相关关系($r>0.43$, $P<0.01$),说明鄱阳湖沉积物DOM的类蛋白质和类腐殖质组分具有相同的来源,以陆源输入为主.

2.4 鄱阳湖沉积物DOM荧光组分空间分布特征

碟形湖区和通江水域中沉积物DOM的荧光成分如图8所示.通江水域中,组分C1、C2和C4最大荧光强度F_{max}均值分别为(1.95±1.70)、(0.44±0.26)和(0.78±0.78) r.u.,而碟形湖区分别为(1.69±1.46)、(0.35±0.23)和(0.71±0.67) r.u..可以看出,C1、C2和C4组分荧光强度均表现为通江水域高于碟形湖区;而组分C3荧光强度在通江水域为(1.07±0.76) r.u,碟形湖区为(1.24±1.05) r.u,即C3组分表现为碟形湖区高于通江水域(图8).



不同小写字母表示存在显著差异

图8 鄱阳湖4个荧光组分荧光强度

Fig. 8 Fluorescence intensity of DOM four components in Poyang Lake

根据各荧光组分荧光强度百分比可知(图9),C2和C4组分荧光强度占比在两区域之间没有太大的差异.而碟形湖区和通江水域组分C1荧光强度占比分别为42%和46%,可以发现,组分C1在两区域沉积物DOM中都占据了较大比重,表明鄱阳湖沉积物DOM成分以腐殖质物质为主.而组分C3在碟形湖区和通江水域荧光强度占比分别为31%和25%,表明碟形湖区沉积物DOM中类蛋白物质(色氨酸)比重高于通江水域.

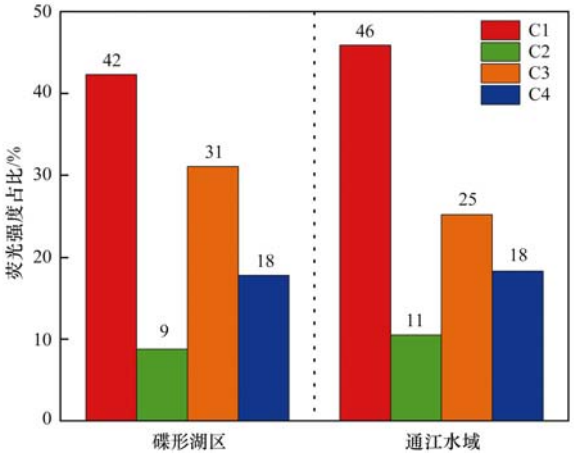


图9 鄱阳湖4个荧光组分荧光强度占比

Fig. 9 Percentage of fluorescence abundance of DOM four components in Poyang Lake

鄱阳湖沉积物DOM荧光组分的空间分布如图10所示,4个荧光组分荧光强度的空间分布规律并不完全相同.总体而言,4个荧光组分的荧光强度表现为自西向东递增的趋势,且高荧光强度值出现在大致相同的区域,即都昌和南矶湿地水域附近(图1),该分布趋势和刘丽贞等[18]对鄱阳湖CDOM的研究结果相似.本实验样品采集于6月,正值鄱阳

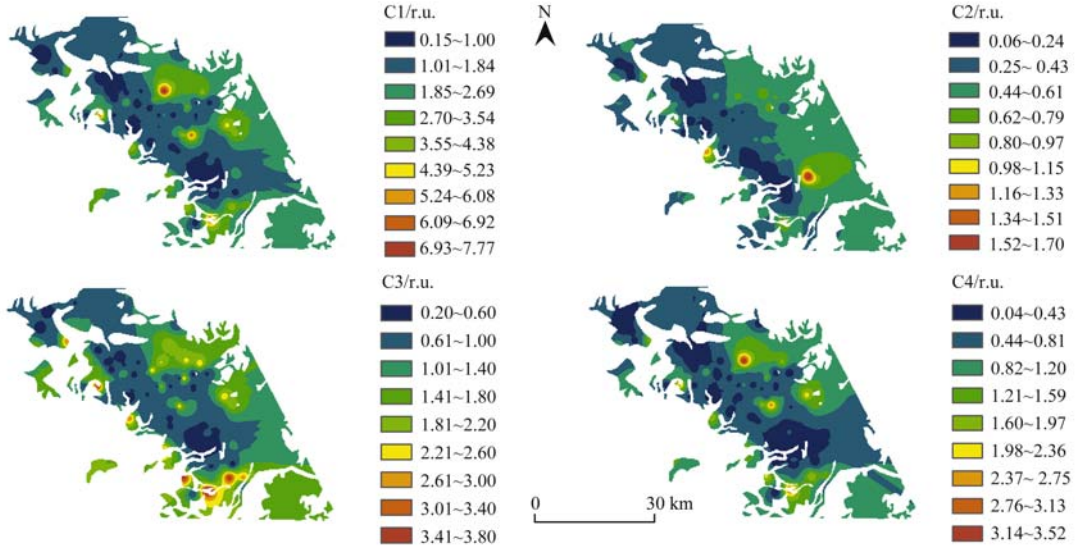


图 10　鄱阳湖 4 个荧光组分及空间分布特征

Fig. 10　Spatial distribution of DOM four components in Poyang Lake

湖丰水期,而鄱阳湖典型植物芦苇在 4 月开始大量生长,因此,高荧光强度值主要出现在都昌、南矶、朱袍山和康山附近,可能与丰水期水位上涨导致湿地植物淹没死亡,降解释放大量 DOM 有关. 许金鑫等[43]在研究崇明东滩湿地土壤 DOM 光谱特征时指出,崇明东滩北部由于互花米草和芦苇大量生长,使得该区植物生物量和土壤有机质含量较高,有利于微生物生长繁衍,导致该区色氨酸荧光明显偏高. 有研究也表明[52],苔草群落丰水期大部分死亡或进入休眠期. 而苔草和芦苇等水生植被为都昌和康山两

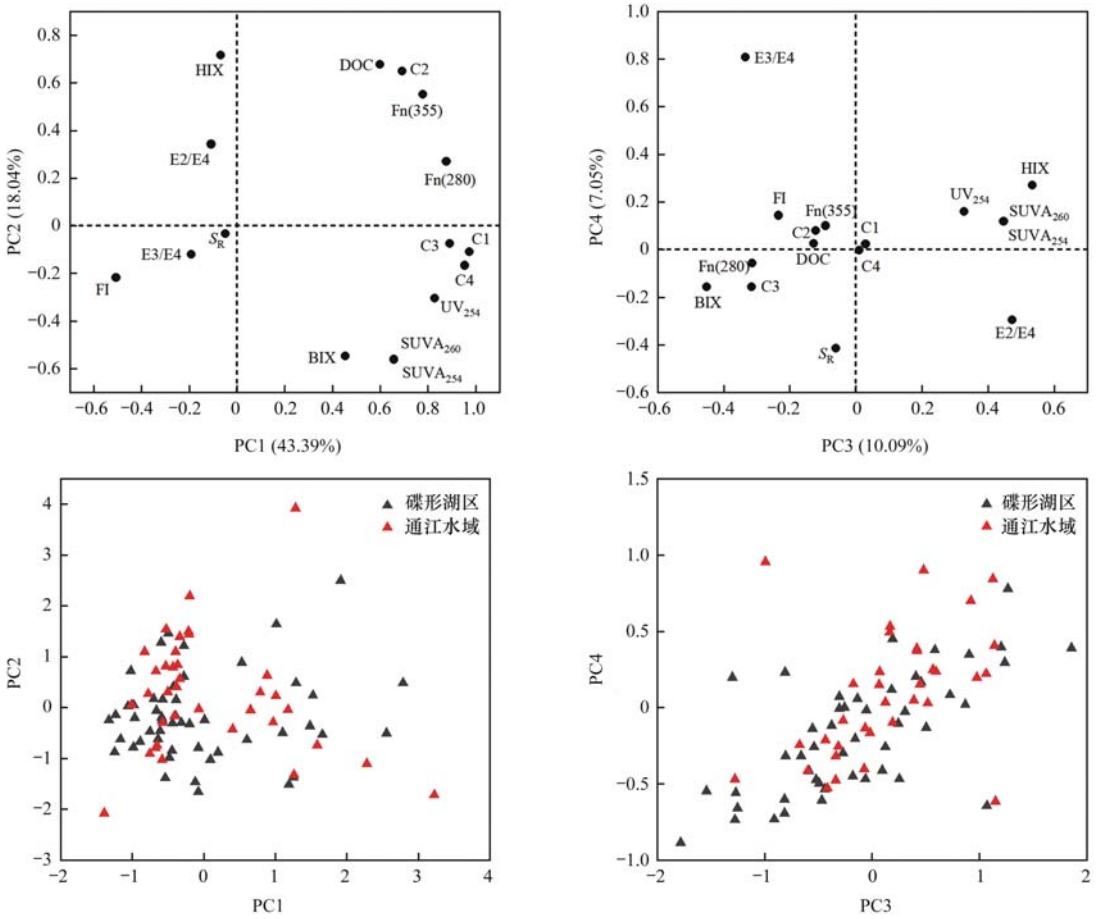


图 11　鄱阳湖沉积物 DOM 主成分分析载荷矩阵及样本得分值

Fig. 11　Loading plots and sample scores of the principal components in PCA

区域优势种,衰亡后经过微生物降解导致水体中类蛋白色氨酸增加,因此色氨酸 C3 高荧光强度值出现在该区域. 此外,都昌附近值较高也可能与人类活动有关[18].

2.5 鄱阳湖沉积物 DOM 光谱参数的主成分分析

为进一步研究鄱阳湖沉积物样品的 DOM 特征,对 87 个沉积物样本的三维荧光组分及光谱参数,包括 C1、C2、C3、C4、UV_{254}、DOC、S_R、$SUVA_{254}$、$SUVA_{260}$、E2/E4、E3/E4、FI、BIX、HIX、Fn(280)和 Fn(355),共 16 个参数,进行 PCA 分析,以达到降维的目的. 经检验得出,KMO 值为 0.76,Bartlett 值为 $P<0.01$,表明各因素之间具有相关性,可进行主成分分析. 通过 PCA 共提取出 5 个主成分,累积贡献率达 86.15%,现针对前 4 个主成分绘制载荷图及样品得分图,并分析各组分所代表的意义及样品性质的分布规律.

第 1 主成分方差贡献率达 43.39%,从图 11 可以看出,在主成分 1 中,DOM 荧光组分(C1、C3、C4)、Fn(280)和 UV_{254} 有较高的正载荷(>0.82);且 C1、C3、C4、Fn(280)和 UV_{254} 两两之间存在显著正相关关系($r>0.51$, $P<0.01$),故主成分 1 主要代表沉积物 DOM 荧光组分、蛋白质浓度及芳香性. 第 2 主成分方差贡献率为 18.04%,其中 HIX、DOC 和 C2 在该成分的载荷较高(>0.65),且 HIX 与 DOC、C2 具有显著的相关性($r>0.38$, $P<0.01$),表明 PC2 代表 DOM 的有机质浓度及腐殖化程度. 第 3 主成分方差贡献率为 10.09%,其中 HIX、$SUVA_{254}$ 和 $SUVA_{260}$ 在该成分的载荷较高(>0.45),表明 PC3 代表 DOM 的腐殖化情况. 第 4 主成分方差贡献率为 7.05%,E3/E4 和 S_R 在该成分分别具有最高的正、负载荷(0.81、−0.41),表明 PC4 代表 DOM 腐殖质组分及粒径分布情况.

两个区域的 PCA 输出结果表明,碟形湖区和通江水域在 PC1 上不存在显著差异,可能与鄱阳湖换水周期较短有关. 黄爱平等[53]的研究通过设计不同工况,构建鄱阳湖水龄模型,得出鄱阳湖水龄季节性特征明显,四季平均水龄为 10~23 d. 即由于鄱阳湖换水能力较强,可能使得湖区不同区域沉积物 DOM 荧光组分差异较小. 而碟形湖区在 PC2、PC3 和 PC4 上得分略高于通江水域,表明碟形湖区沉积物 DOM 腐殖化程度略高于通江水域,这与上文对 UV_{254} 和 S_R 等荧光参数的研究结果一致.

3 结论

(1) 鄱阳湖通江区域沉积物 DOM 的 CDOM 相对浓度显著高于碟形湖区. 沉积物 DOM 光谱特征参数(S_R、E2/E4、FI、BIX 和 HIX)表明,鄱阳湖沉积物 DOM 以陆源输入为主,具有强腐殖化特征. $SUVA_{254}$ 和 $SUVA_{260}$ 值分析结果表明,鄱阳湖沉积物 DOM 的腐殖化程度及疏水性组分含量较高,且通江水域高于碟形湖区.

(2) 通过 PARAFAC 共解析出 4 种有效的荧光成分,分别为紫外腐殖质物质(C1)、类腐殖质(C2)、色氨酸(C3)和陆地腐殖质(C4),且各荧光组分之间具有同源性.

(3) C1 组分占比在碟形湖区和通江水域分别为 42% 和 46%,且碟形湖区沉积物 DOM 中色氨酸比重高于通江水域;鄱阳湖沉积物 DOM 荧光组分空间变化趋势大致相同,即自西向东增大,且高值都出现于都昌和南矶湿地水域附近.

参考文献:

[1] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, *et al*. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, **478**(7367): 49-56.

[2] 吴丰昌, 王立英, 黎文, 等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 1-12.
Wu F C, Wang L Y, Li W, *et al*. Natural organic matter and its significance in terrestrial surface environment[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, **20**(1): 1-12.

[3] Inamdar S, Finger N, Singh S, *et al*. Dissolved organic matter (DOM) concentration and quality in a forested mid-Atlantic watershed, USA[J]. Biogeochemistry, 2012, **108**(1-3): 55-76.

[4] Seekell D A, Lapierre J F, Cheruvelil K S. A geography of lake carbon cycling[J]. Limnology and Oceanography: Letters, 2018, **3**(3): 49-56.

[5] Ren H Y, Ma F Y, Yao X, *et al*. Multi-spectroscopic investigation on the spatial distribution and copper binding ability of sediment dissolved organic matter in Nansi Lake, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, **591**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125289.

[6] 聂云汉, 陈浩, 李磊, 等. 城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2272-2280.
Nie Y H, Chen H, Li L, *et al*. Molecular chemo-diversity of the dissolved organic matter occurring in urban stormwater runoff[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2272-2280.

[7] Coble P G, Del Castillo C E, Avril B. Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 southwest monsoon[J]. Deep Sea Research Part Ⅱ: Topical Studies in Oceanography, 1998, **45**(10-11): 2195-2223.

[8] 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.

[9] 吕晶晶, 龚为进, 窦艳艳, 等. PARAFAC 和 FRI 解析 ISI 中 DOM 分布[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 2039-2047.
Lü J J, Gong W J, Dou Y Y, *et al*. The distribution of DOM in aeration pretreatment improved soil infiltration system based on FRI and PARAFAC[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 2039-2047.

[10] 朱金杰, 邹楠, 钟寰, 等. 富营养化巢湖沉积物溶解性有机质光谱时空分布特征及其环境意义[J]. 环境科学学报,

2020, **40**(7): 2528-2538.
Zhu J J, Zou N, Zhong H, *et al*. Spatiotemporal characteristics and its environmental application of dissolved organic matter (DOM) in sediments from Chaohu Lake, a eutrophic lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(7): 2528-2538.

[11] 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]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1198-1208.

[12] Han H, Cho H M, Kwon H K, *et al*. Fluorescent dissolved organic matter (FDOM) in the East Sea (Japan Sea): distributions, sources, and sinks[J]. Ocean Science Journal, 2021, **56**(2): 132-140.

[13] 孟永霞, 程艳, 李琳, 等. 匹里青河夏季有色溶解性有机质(CDOM)分布特征及来源分析[J]. 环境化学, 2020, **39**(11): 3213-3222.
Meng Y X, Cheng Y, Li L, *et al*. Distribution characteristics and source analysis of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Piliqing River in summer[J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(11): 3213-3222.

[14] 卜鸡明, 何佳, 焦立新, 等. 滇池流域入湖河流溶解性有机质的分布及来源[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(8): 2795-2804.
Bu J M, He J, Jiao L X, *et al*. Analysis of distribution characteristics and source of dissolved organic matter in the rivers that flow into the Dianchi Lake Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(8): 2795-2804.

[15] 王志寰, 范红霞, 朱立俊, 等. 长江洪水对鄱阳湖倒灌影响及微模型研究进展综述[J]. 泥沙研究, 2019, **44**(1): 59-66.
Wang Z H, Fan H X, Zhu L J, *et al*. Review on the influence to the Poyang Lake by flowing backward of the Yangtze River and the study processes of micro physical model[J]. Journal of Sediment Research, 2019, **44**(1): 59-66.

[16] 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 等. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5348-5357.
Fang N, Liu L L, You Q H, *et al*. Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang Lake wetland[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5348-5357.

[17] 刘丽贞, 黄琪, 吴永明, 等. 鄱阳湖 CDOM 三维荧光光谱的平行因子分析[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(1): 293-302.
Liu L Z, Huang Q, Wu Y M, *et al*. Fluorescent characteristics of CDOM in Poyang Lake analyzed by three-dimensional excitation-emission matrix spectroscopy and parallel factor analysis[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(1): 293-302.

[18] 申钊颖, 弓晓峰, 江良, 等. 利用荧光区域积分法解析鄱阳湖 DOM 组成及来源[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(5): 196-203.
Shen Z Y, Gong X F, Jiang L, *et al*. Analysis of the Composition and source of DOM in Poyang Lake by using regional integration method[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(5): 196-203.

[19] 李雅妮, 徐华成, 江和龙. 鄱阳湖水体溶解有机质分子量分布、荧光特征及对重金属分布的影响[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1029-1040.
Li Y N, Xu H C, Jiang H L. Molecular weight distribution, fluorescence characteristics of dissolved organic matter and their effect on the distribution of heavy metals of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(4): 1029-1040.

[20] 张祖芳. 鄱阳湖湿地生态功能重要性分区研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.

[21] Liu F, Xu B L, He Y, *et al*. Differences in transport behavior of natural soil colloids of contrasting sizes from nanometer to micron and the environmental implications[J]. Science of the Total Environment, 2018, **634**: 802-810.

[22] Nishijima W, Speitel G E Jr. Fate of biodegradable dissolved organic carbon produced by ozonation on biological activated carbon[J]. Chemosphere, 2004, **56**(2): 113-119.

[23] 梁俭, 江韬, 卢松, 等. 淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2496-2505.
Liang J, Jiang T, Lu S, *et al*. Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) releases from soils of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas: UV-Vis spectrum[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2496-2505.

[24] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 周村水库四季变化过程中水体溶解性有机物的分布与光谱特征[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(10): 3492-3502.
Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al*. Impact of seasonal variations on distribution and spectral characteristics of dissolved organic matter in Zhoucun Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(10): 3492-3502.

[25] 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.

[26] Salve P R, Lohkare H, Gobre T, *et al*. Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rainwater using fluorescence spectrophotometry[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, **88**(2): 215-218.

[27] 刘晶晶, 张彦, 翟洪艳, 等. 丰水期渤海湾水体中溶解性有机质的分布特征及来源[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(10): 4802-4810.
Liu J J, Zhang Y, Zhai H Y, *et al*. Distribution characteristics and sources of dissolved organic matter in Bohai Bay seawater during wet season[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(10): 4802-4810.

[28] 晏彩霞, 杨雪, 文鑫梅, 等. 南昌市灰尘中可淋溶态 DOM 的光谱特性[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(5): 1452-1463.
Yan C X, Yang X, Wen X M, *et al*. Spectral characterization of leaching dissolved organic matter (LDOM) from the dust in Nanchang City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(5): 1452-1463.

[29] Yao X, Zhu G W, Cai L L, *et al*. Geochemical characteristics of amino acids in sediments of Lake Taihu, a large, shallow, eutrophic freshwater lake of China[J]. Aquatic Geochemistry, 2012, **18**(3): 263-280.

[30] 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.

[31] Lawaetz A J, Stedmon C A. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water[J]. Applied Spectroscopy, 2009, **63**(8): 936-940.

[32] 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.

[33] Yan C X, Liu H H, Sheng Y R, *et al*. Fluorescence characterization of fractionated dissolved organic matter in the five tributaries of Poyang Lake, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **637-638**: 1311-1320.

[34] 冯伟莹, 朱元荣, 吴丰昌, 等. 太湖水体溶解性有机质荧光特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 475-482.
Feng W Y, Zhu Y R, Wu F C, *et al*. The fluorescent characteristics and sources of dissolved organic matter in water of Tai Lake, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 475-482.

[35] 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.

[36] Lu Y H, Bauer J E, Canuel E A, *et al*. Photochemical and microbial alteration of dissolved organic matter in temperate headwater streams associated with different land use[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, **118**(2): 566-580.

[37] 宁成武, 包妍, 黄涛, 等. 夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3743-3752.
Ning C W, Bao Y, Huang T, *et al*. Sources and spatial variation of dissolved organic matters in summer water of inflow rivers along Chaohu watershed[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3743-3752.

[38] Li M M, Kong F L, Li Y, *et al*. Ecological indication based on source, content, and structure characteristics of dissolved organic matter in surface sediment from Dagu River estuary, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(36): 45499-45512.

[39] Dilling J, Kaiser K. Estimation of the hydrophobic fraction of dissolved organic matter in water samples using UV photometry[J]. Water Research, 2002, **36**(20): 5037-5044.

[40] 何伟, 白泽琳, 李一龙, 等. 溶解性有机质特性分析与来源解析的研究进展[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 359-372.
He W, Bai Z L, Li Y L, *et al*. Advances in the characteristics analysis and source identification of the dissolved organic matter[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 359-372.

[41] Jaffé R, Boyer J N, Lu X, *et al*. Source characterization of dissolved organic matter in a subtropical mangrove-dominated estuary by fluorescence analysis[J]. Marine Chemistry, 2004, **84**(3-4): 195-210.

[42] 陈昭宇, 李思悦. 三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 195-203.
Chen Z Y, Li S Y. Seasonal variation of DOM spectral characteristics of rivers with different urbanization levels in the Three Gorges Reservoir area[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 195-203.

[43] 许金鑫, 王初, 姚东京, 等. 崇明东滩湿地土壤溶解性有机质的光谱特征分析[J]. 环境工程, 2020, **38**(11): 218-225.
Xu J X, Wang C, Yao D J, *et al*. Spectral characteristics of soil dissolved organic matters in Chongming Dongtan wetland[J]. Environmental Engineering, 2020, **38**(11): 218-225.

[44] Liu C, Li Z W, Berhe A A, *et al*. Characterizing dissolved organic matter in eroded sediments from a loess hilly catchment using fluorescence EEM-PARAFAC and UV-Visible absorption: insights from source identification and carbon cycling[J]. Geoderma, 2019, **334**: 37-48.

[45] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy[J]. Marine Chemistry, 1996, **51**(4): 325-346.

[46] Fellman J B, Hood E, Spencer R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: a review[J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(6): 2452-2462.

[47] 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.

[48] Balcarczyk K L, Jones J B Jr, Jaffé R, *et al*. Stream dissolved organic matter bioavailability and composition in watersheds underlain with discontinuous permafrost[J]. Biogeochemistry, 2009, **94**(3): 255-270.

[49] Walker S A, Amon R M W, Stedmon C A. Variations in high-latitude riverine fluorescent dissolved organic matter: a comparison of large Arctic rivers[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, **118**(4): 1689-1702.

[50] Søndergaard M, Stedmon C A, Borch N H. Fate of terrigenous dissolved organic matter (DOM) in estuaries: aggregation and bioavailability[J]. Ophelia, 2003, **57**(3): 161-176.

[51] D'Andrilli J, Junker J R, Smith H J, *et al*. DOM composition alters ecosystem function during microbial processing of isolated sources[J]. Biogeochemistry, 2019, **142**(2): 281-298.

[52] 宋炎炎, 张奇, 姜三元, 等. 鄱阳湖湿地地下水埋深及其与典型植被群落分布的关系[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(1): 123-133.
Song Y Y, Zhang Q, Jiang S Y, *et al*. Groundwater depth and its relation with typical vegetation distribution in the Poyang Lake wetland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(1): 123-133.

[53] 黄爱平, 刘晓波, 彭文启, 等. 鄱阳湖水龄时空特征和影响因素分析[J]. 水利学报, 2021, **52**(9): 1082-1090.
Huang A P, Liu X B, Peng W Q, *et al*. Spatial and temporal characteristics and influencing factors of water age in Poyang Lake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, **52**(9): 1082-1090.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 2

Feb. 15, 2022

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China ····· LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, *et al.* (577)

Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability ····· ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)

Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou ····· HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)

$PM_{2.5}$ Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models ····· WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, *et al.* (608)

Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in $PM_{2.5}$ During Summer in Central China ····· SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, *et al.* (619)

Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City ····· CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, *et al.* (629)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in $PM_{2.5}$ in Zhejiang Province ····· LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, *et al.* (639)

Impact of Meteorological Conditions on $PM_{2.5}$ in Jiangsu Province from 2001 to 2019 ····· PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)

Comparison and Analysis of $PM_{2.5}$ Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model ····· GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, *et al.* (663)

Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020 ····· FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, *et al.* (675)

Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O_3 Pollution Event in Ji'nan ····· SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, *et al.* (686)

Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong ····· YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, *et al.* (696)

Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass ····· ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, *et al.* (707)

Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer ····· YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, *et al.* (714)

Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China ····· ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, *et al.* (723)

Emission Characterstics of VOCs and *n*-alkanes from Diesel Forklifts ····· ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, *et al.* (735)

Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 ····· TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)

Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}C_{DIC}$ in a Karst River Basin, Southwestern China ····· XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)

Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake ····· XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, *et al.* (762)

Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events ····· ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, *et al.* (770)

Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen ····· BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, *et al.* (782)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City ····· PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, *et al.* (795)

Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River ····· GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, *et al.* (803)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example ····· CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, *et al.* (813)

Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai ····· YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, *et al.* (826)

Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang ····· GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, *et al.* (837)

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake ····· LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, *et al.* (847)

Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake ····· LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, *et al.* (859)

Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation ····· WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic ····· ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, *et al.* (878)

Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration ····· QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, *et al.* (887)

Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar ····· CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, *et al.* (896)

Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water ····· ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, *et al.* (907)

Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PN/A Granular Sludge ····· HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, *et al.* (920)

Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance ····· FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, *et al.* (928)

Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan ····· LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, *et al.* (936)

Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain ··· ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)

Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example ····· JU Tie-nan, LEI Mei (957)

Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China ····· MU De-miao, SUN Yue-bing (965)

Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area ····· HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, *et al.* (975)

Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas ····· ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, *et al.* (985)

Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years ····· REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, *et al.* (995)

Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth ····· CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, *et al.* (1004)

Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments ····· WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, *et al.* (1015)

Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation ··· CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, *et al.* (1023)

Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat ····· LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, *et al.* (1031)

Responses of Soil *PhoC* and *PhoD* Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers ····· YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, *et al.* (1040)

Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of *Robinia pseudoacacia* ····· LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, *et al.* (1050)

Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of *Pinus massoniana* Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas ····· JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, *et al.* (1059)

Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils ····· DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, *et al.* (1069)

Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil ····· HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, *et al.* (1077)

Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine ····· HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, *et al.* (1089)

Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province ····· WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, *et al.* (1097)

Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta ····· XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, *et al.* (1108)