

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM_{2.5}浓度调控模拟 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM_{2.5}碳质组分特征 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM₁中金属元素污染特征及健康风险评估 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM_{2.5}中多环芳烃污染特征及来源分析 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH₄、CO₂和N₂O浓度的时空变化特征及影响因素 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

不同淹水环境下湖泊沉积物 DOM 的特征与来源

陈佳¹, 李忠武^{1,2*}, 金昌盛¹, 文佳骏¹, 聂小东², 王磊²

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081)

摘要: 为揭示水位的空间差异对于湖泊沉积物溶解性有机质(DOM)特性的影响与作用途径,采用紫外可见光谱(UV-Vis)和三维荧光光谱结合平行因子分析(EEM-PARAFAC),探究东洞庭湖不同淹水环境对沉积物DOM的组成与来源的影响.结果表明,DOM中类蛋白组分[类色氨酸C2与类酪氨酸C3,(72.95±8.94)%]高于类腐殖酸组分[C1,(27.05±8.94)%].季节淹水下DOM具有更高的类蛋白组分和更低的类腐殖酸组分,而常年淹水下的DOM芳香性(SUVA₂₅₄)与疏水组分(SUVA₂₆₀)更高,在空间上表现为:湖中段>入湖段>出湖段,更有利于污染物迁移.通过对荧光参数FI(1.93)、BIX(0.91)和HIX(1.57)的计算发现,沉积物DOM具有内源为主和陆源较弱的混合特征.这可能受到人为输入与沉积物特性影响,季节淹水区沉积物裸露增强污水排放的直接作用,且黏粒和总氮(TN)含量与FI呈显著正相关,说明沉积物高营养成分和黏粒含量影响DOM的内源成分(FI>1.9);而常年淹水区具有外来径流输入,pH和C/N与HIX和C1呈显著正相关,说明沉积物DOM由于常年淹水的碱性环境(pH>7.5)和径流输入比季节淹水区具有更高的陆源成分(HIX=1.38±0.57).上述结果有助于揭示湖泊水文与人类活动过程中沉积物DOM对水质与污染响应的相关理论,为沉积物污染防治提供科学依据.

关键词: 溶解性有机质(DOM); 常年淹水区; 季节淹水区; 来源; 沉积物; 人类活动

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4566-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112090

Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments

CHEN Jia¹, LI Zhong-wu^{1,2*}, JIN Chang-sheng¹, WEN Jia-jun¹, NIE Xiao-dong², WANG Lei²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: The characteristics and sources of DOM in sediments are significantly affected by fluctuations in lake water levels. However, the impact of spatial differences on water levels remain unclear. Here, 36 sediment samples were collected from the flood passage and coastal beach of East Dongting Lake. The differences in the composition and source of DOM in sediments under perennial inundation and seasonal inundation were studied using UV-visible absorbance (UV-Vis) and fluorescent excitation-emission matrix (EEM)-parallel factor analysis (PARAFAC). Three fluorescent components of DOM in the sediment were identified. The relative abundance of protein-like components was as high as (72.95±8.94)%, including tryptophan (C2) and tyrosine (C3). However, the humic-like component (C1) abundance was (27.05±8.94)%. Compared with that in perennial inundation, DOM in seasonal inundation had a higher and lower relative abundance of protein-like components and humic-like components, respectively. Further, the aromatic and hydrophobic components were higher in perennial inundation, showing a spatial pattern of the middle > entrance > outlet of the lake, which was more conducive to the migration of pollutants. The high FI (1.93) and BIX (0.91) and low HIX (1.57) indicated that the DOM in sediments had the mixed characteristics of being mainly endogenous and relatively weakly terrigenous. This was mainly influenced by human input and sediment characteristics. The direct effect of sewage discharge was intensified by sediment exposure in the seasonal inundation zone. Additionally, the contents of clay and total nitrogen (TN) were significantly positively correlated with FI, indicating that high nutrients and clay in sediments enhanced the endogenous input of DOM (FI>1.9). The perennial inundation zone was influenced by external runoff input. At the same time, the pH and C/N were significantly positively correlated with HIX and C1, indicating that DOM in the sediments had higher terrigenous characteristics (HIX=1.38±0.57) than those in the seasonal inundation zone owing to the alkaline environment (pH>7.5) and runoff input. The results above revealed the relevant theories of the response of DOM in sediment to water quality and pollution in the process of hydrology and human activities and provide a scientific basis for the prevention and control of sediment pollution in lakes.

Key words: dissolved organic matter (DOM); perennial inundation zone; seasonal inundation zone; source; sediment; human activities

湖泊通过径流与泥沙汇入成为污染物重要的汇集地,且大部分污染物最终汇集在沉积物中^[1]. 溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是沉积物中重要的活性组分,影响着陆源水生系统的碳循环^[2],为微生物提供能量^[3],并影响重金属、营养盐和有机污染物等的生物地球化学环境行为^[4]. 与此同时,作为连接碳循环和污染物环境归趋的桥梁,DOM的化学性质不仅受到陆源、内源和人为来源的影响,也受到湖泊中水位波动、流速等水文过程的再处理与再分布^[5,6]. 因此,探究水文环境对沉积

物DOM组成与来源的影响,有助于进一步认知DOM的媒介作用,为湖泊不同区域的污染控制提供依据.

水位波动造成典型的淹水环境差异,从而造成湖泊/水库的土壤/沉积物DOM随淹水过程向上覆水释放^[7],并显著影响污染物的环境行为^[8,9]. 目

收稿日期: 2021-12-08; 修订日期: 2022-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(U19A2047, 51879103)

作者简介: 陈佳(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为沉积物DOM与重金属污染,E-mail: chenjiatia@hnu.edu.cn

* 通信作者,E-mail: lizw@hnu.edu.cn

前,关于淹水变化影响 DOM 的组成与来源的研究较为丰富,但主要集中在水体^[10-12],对沉积物 DOM 特征的关注较少. 湖泊中由于水位波动导致的淹水环境空间差异,其对 DOM 特性的影响仍不明确,尤其是缺乏常年淹水与季节淹水环境下沉积物 DOM 组成与来源异质性的研究. 有研究表明经历季节淹水的土壤 DOM 在淹水期比落干期具有更高的芳香性、腐殖化程度和疏水组分^[13]. 然而有研究证明,与季节淹水相比,深水区常年淹水的沉积物 DOM 的芳香性和腐殖化程度更高^[7],从而有利于污染物的迁移^[13]. 但也有研究发现干湿交替培养下,沉积物 DOM 在落干期具有更高的芳香性和疏水组分^[14],究其原因不同湖泊与水库 DOM 的组成和来源有所不同. 与此同时,不同淹水环境下,沉积物 DOM 来源也存在一定的差异. 水库季节淹水区水体 DOM 在淹水期比落干期具有更多的自生源特征,原因是沉积物中吸附更多的陆源 DOM^[11]; 同时,湖心(常年淹水)的沉积物 DOM 比湖滨(季节淹水)受到外源干扰更少,具有更高的自生源性^[15]. 然而,落干期的季节淹水区与常年淹水区存在天然的水位差异,这种淹水环境差异对 DOM 特性的影响尚未可知. 此外,淹水环境由于受到水文过程差异和人类活动的影响,DOM 的组成与来源也有所不同. 已有的研究发现常年淹水与季节淹水的沉积物在粒径、营养元素(C、N 等)、pH 和重金属等方面具有显著差异^[16-18]. 有研究报道富营养湖泊中湖滨沉积物 DOM 由于藻华暴发与废污水排放的影响具有比湖心更高的芳香性与类色氨酸组分^[15],说明真实湖泊环境下淹水的空间差异对 DOM 的影响较为复杂. 由于 DOM 不同组分具有特定的光谱特性,紫外可见光谱与三维荧光光谱结合平行因子分析被广泛用于探索 DOM 的组成与来源,具有灵敏度高、选择性强和对样品结构无损害等优点^[19]. 因此,有必要利用多光谱技术进一步明确在真实湖泊中不同淹水环境对沉积物 DOM 组成与来源的影响,为湖泊水质与污染物的精准调控提供科学依据.

本文以东洞庭湖为研究区域,运用光谱学技术探究东洞庭湖常年淹水与季节淹水的沉积物 DOM 的组成与来源,并结合统计学分析探讨淹水环境差异对 DOM 组成与来源的影响,揭示湖泊水位的空间差异对沉积物 DOM 特性的作用机制,以期为枯水期湖岸与洪道的污染控制提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区与样品采集

东洞庭湖(28°28' ~ 29°35'N, 112°19' ~ 113°05'

E)为洞庭湖最大湖区,属于典型的过水性洪道湖泊^[20],水位的季节变化大^[21],东部的行洪道与湖岸滩地形成典型的常年淹水区(perennial inundation zone, PIZ)和季节淹水区(seasonal inundation zone, SIZ). 随着围湖造田向自然保护的转变,东洞庭湖生态环境有所恢复,但重金属污染仍然需要重视^[22]. 以往的研究表明,东洞庭湖沉积物与水体中的 DOM 与湖泊水质、重金属迁移关系密切^[4,23]. 并且东洞庭湖东部作为洞庭湖的汇水区与沿岸经济快速发展地区,具有复杂的有机质来源.

沉积物样品于 2020 年 12 月采集自东洞庭湖东部,共 36 个采样点(图 1),包括湖岸滩地(S1 ~ S18)和行洪道(P1 ~ P18)两部分,分别表示季节淹水与常年淹水两种环境. 用采泥器采集适量表层(0 ~ 20 cm)沉积物样品. 根据行洪道水文特点^[24]和沿岸土地利用的分布,将研究区域分为入湖段(R:P1 ~ P3, S1 ~ S5)、湖中段(Z:P4 ~ P13, S6 ~ S13)和出湖段(C:P14 ~ P18, S14 ~ S18),每段的季节淹水与常年淹水分别用 RS、RP、ZS、ZP、CS 和 CP 表示. 采集的样品均于 4℃ 黑暗条件下保存. 运回实验室后,于 -24℃ 冰箱冷冻 24 h. 然后在黑暗条件下冷冻干燥,研磨后过 100 目筛,用聚乙烯自封袋密封保存备用. 根据已有研究测定沉积物的 pH、总碳(total carbon,

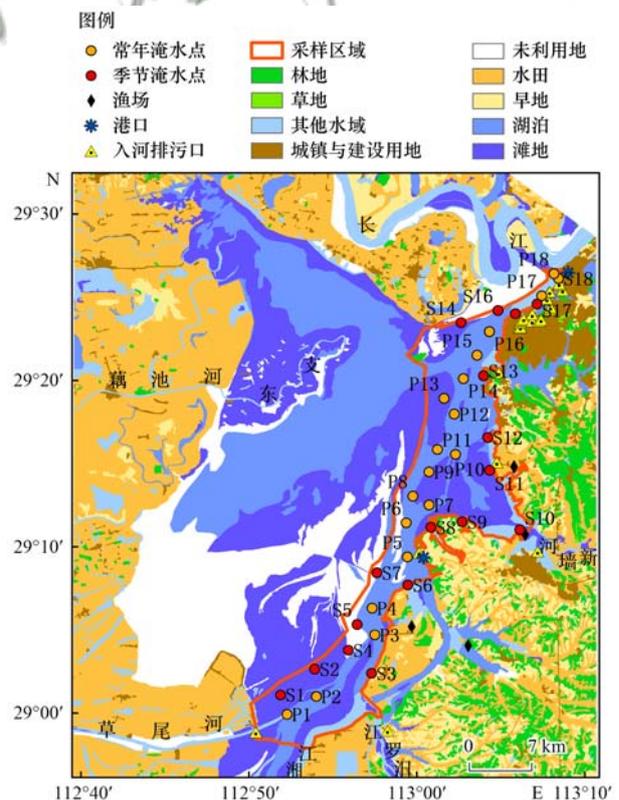


图 1 东洞庭湖沿岸土地利用类型与样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites and coastal land use types in East Dongting Lake

TC)、总氮(total nitrogen, TN)及总硫(total sulfur, TS)含量、碳氮比(C/N)和颗粒组成^[25]。

1.2 DOM 的提取与分析

用超纯水提取沉积物中的 DOM^[14]:将沉积物样品按土水比 1:5 加入超纯水中混合均匀,在室避光条件下以 $220 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 连续振荡 24 h,再以 $4\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 30 min,取上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 水系滤膜.滤液为沉积物 DOM,避光冷藏(4°C)保存,并在一周内使用.采用总有机碳分析仪(TOC-VCPH,日本岛津)测定溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)浓度,以表示 DOM 的含量^[22]。

紫外可见吸收光谱采用 UV-2550 型分光光度计测定,以超纯水为空白,扫描波长范围为 190 ~ 600 nm,间隔为 1 nm,每个样品测定 3 次.选取 SUVA_{254} 、 SUVA_{260} 和 E2/E3 来表征沉积物中 DOM 的芳香性、疏水组分含量与相对分子质量大小^[26]。

用 Hitachi F-7000 型荧光光谱分析仪对沉积物 DOM 进行 EEM 测定^[14].激发波长 E_e 与发射波长 E_m 的扫描范围分别为 200 ~ 500 nm 与 250 ~ 600 nm,采样间隔分别为 10 nm 与 2 nm,狭缝均为 5 nm,扫描速度为 $2\,400 \text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$,用 Milli-Q 超纯水作空白样测定.对 DOM 样品的 EEM 光谱进行 PARAFAC 分析,确定最优的 DOM 组分数目^[14].此外,选取荧光指数 FI、自生源指数 BIX 和腐殖化指数 HIX 来判断 DOM 的来源、自生源贡献和腐殖化程度^[27]。

1.3 统计分析绘图

利用 Excel 2010 和 Origin Pro 2021 软件对 DOM 样品的光谱数据进行分析处理以及作图.用 SPSS Statistics 23 进行非参数检验(Mann-Whitney, U ; Kruskal-Wallis, H)和 Spearman 相关性分析,分别说明沉积物特性和 DOM 的差异(两种淹水;3 个分段)显著性与二者的关系.利用 ArcGIS 10.2 软件绘制土地利用类型与样点分布示意图、光谱参数的空间插值图(反距离加权法).其中,2020 年 30 m 分辨率的土地利用/覆盖数据来源于文献[28],城镇与工业入河排污口等数据来源于湖南省水利厅(<http://yzt.hnswkj.com:9090/#/>)和实地考察。

2 结果与分析

2.1 沉积物基本理化性质与 DOC 浓度差异

表 1 和图 2 反映了常年淹水与季节淹水的沉积物性质.如表 1 所示,两种淹水环境的沉积物均以砂粒为主.与 SIZ 相比,PIZ 的沉积物具有更多粉粒含量,更少的黏粒含量.如图 2(b)所示,PIZ 的沉积物呈碱性($\text{pH} = 7.99 \pm 0.25$);而 SIZ 的沉积物整体呈中性,但在入湖段主要呈碱性(除 S3, pH 为 6.14),湖中段主要呈中性(除 S9 和 S10, $\text{pH} < 6.5$);出湖段由酸性到碱性^[29].SIZ 的沉积物中 TC 和 TN 的平均含量均高于 PIZ, C/N 显著低于 PIZ. TS 的平均含量在湖中段与出湖段的 SIZ 较高. $\omega(\text{DOC})$ 的平均值为 $(0.22 \pm 0.09) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,并且 PIZ 在湖中段的南部与入湖段出现高值;SIZ 在湖中段最高[图 3(a)].

表 1 不同淹水环境下的沉积物特性与 DOC 含量¹⁾

Table 1 Sediment characteristics and DOC content under different inundation environments

采样区	$\omega(\text{DOC})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	颗粒组成/%			pH	$\omega(\text{TC})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TN})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TS})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	C/N
		黏粒	粉粒	砂粒					
SIZ	0.20 ± 0.07	23.46 ± 6.30	34.94 ± 3.43	41.60 ± 8.68	$7.16 \pm 0.89^*$	16.37 ± 9.06	1.81 ± 0.85	0.73 ± 0.22	$8.84 \pm 2.29^*$
PIZ	0.23 ± 0.10	21.05 ± 2.70	37.27 ± 4.52	41.68 ± 6.79	$7.99 \pm 0.25^*$	15.36 ± 3.99	1.32 ± 0.26	0.74 ± 0.32	$11.98 \pm 3.62^*$

1) 数值表示平均值 \pm 标准差; * 表示两种淹水情况之间的差异显著, $P < 0.01$

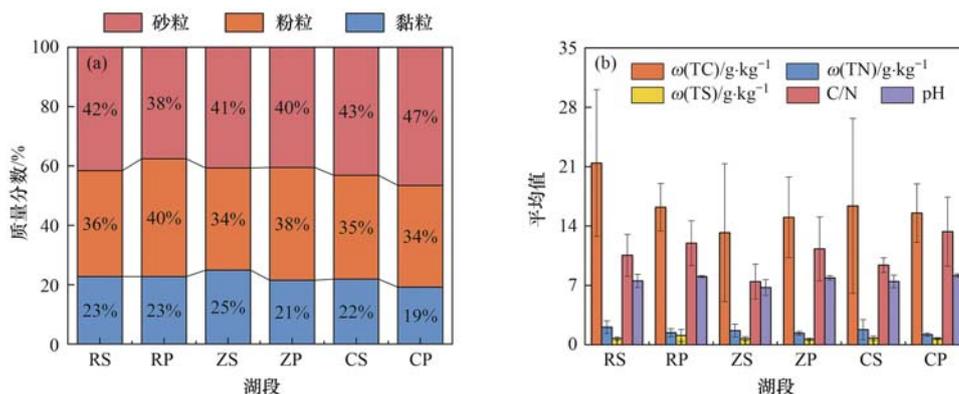


图 2 东洞庭湖东部不同湖段沉积物特性变化

Fig. 2 Variation in sediment characteristics in different subsections in the eastern part of East Dongting Lake

2.2 沉积物 DOM 的紫外可见光谱特征差异

不同淹水环境下沉积物 DOM 的 $SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 和 E2/E3 如图 3 和图 4 所示. $SUVA_{254}$ 和 $SUVA_{260}$ 在 PIZ 的平均值分别为 4.84 ± 3.88 和 4.71

± 3.81 , 均显著高于 SIZ (2.55 ± 1.99 和 2.45 ± 1.90); 空间上呈现: 湖中段 > 出湖段 > 入湖段 ($P < 0.05$). E2/E3 值越大, DOM 的相对分子质量越小^[26]. 所以 DOM 的相对分子质量在 PIZ 显著高于

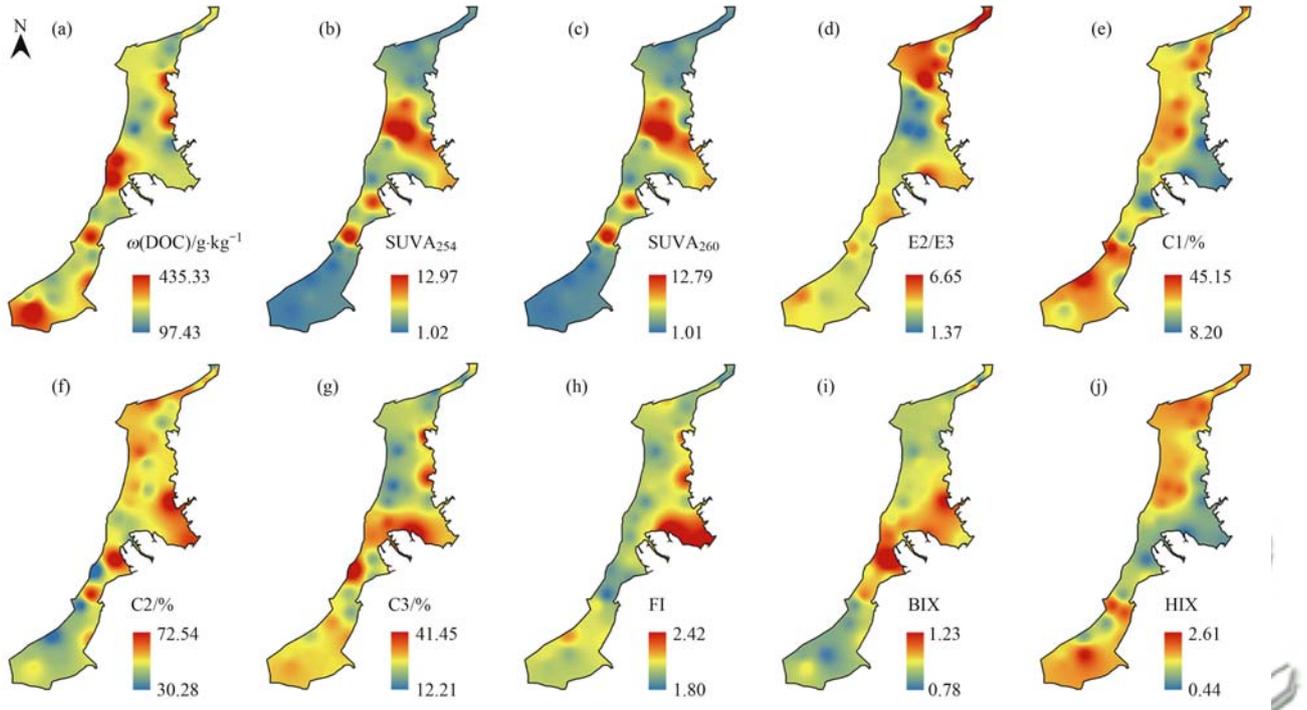


图 3 东洞庭湖东部沉积物 DOM 的 DOC 含量、紫外可见光谱特征 ($SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 、E2/E3) 和三维荧光光谱特征 (C1、C2、C3、FI、BIX、HIX) 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of DOC content, UV-vis spectral characteristics ($SUVA_{254}$, $SUVA_{260}$, E2/E3) and fluorescence spectral characteristics (C1, C2, C3, FI, BIX, HIX) of sediment DOM in the eastern part of East Dongting Lake

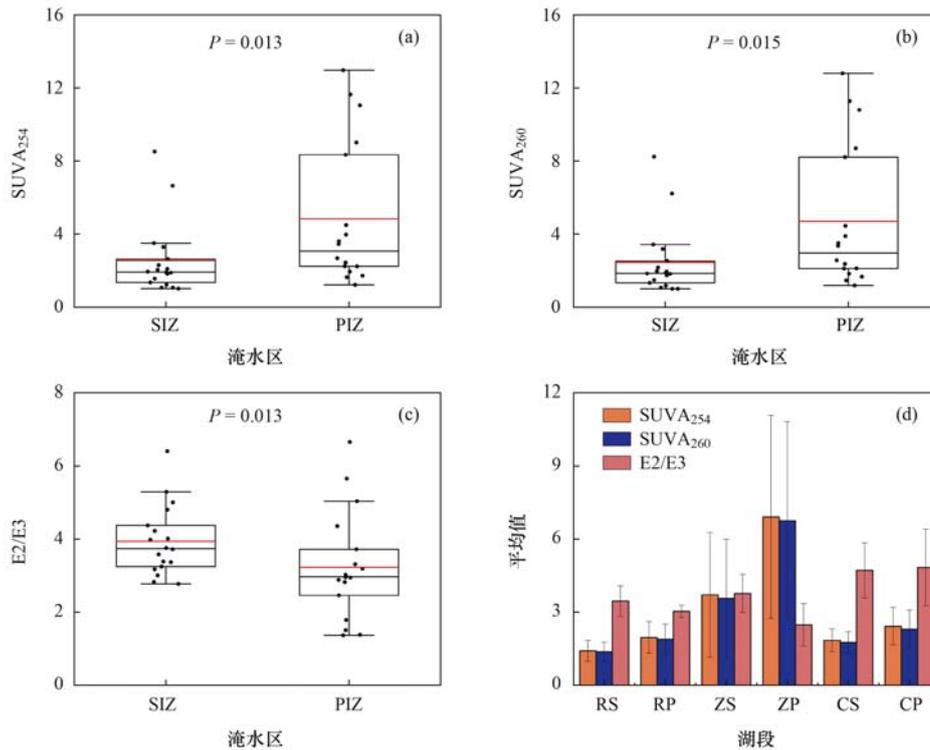


图 4 两种淹水环境下沉积物 DOM 的紫外可见光谱特征与空间变化

Fig. 4 UV-Vis spectral characteristics and spatial variations of DOM and in sediments under two inundation environments

SIZ ($P < 0.05$), 湖中段的 PIZ 最高。

2.3 沉积物 DOM 的荧光组分与荧光指数特征差异

利用 PARAFAC 分析从沉积物 DOM 的荧光 EEM 数据中提取了 3 种荧光组分(图 5), 包括 1 个类腐殖酸组分和 2 个类蛋白组分. 组分 1 (C1) 的主峰 ($E_x/E_m = 240/418$ nm) 表示类腐殖酸组分, 在废水、湿地和农业环境中有所发现^[30]. 组分 2 (C2) 分别在 230/330 nm 和 280/330 nm 处具有主峰和次峰, 表示类色氨酸物质, 是一种可生物降解的类蛋白质^[27]. 组分 3 (C3, $E_x/E_m = 200/292$ nm) 表示微生

物降解产生的内源类蛋白中的酪氨酸物质^[27,31].

如图 3 和图 5 (d) 所示, 沉积物 DOM 的类蛋白组分 (C2 + C3) 相对丰度高达 (72.95 ± 8.94)%, 且 SIZ 高于 PIZ. C2 与 C3 的相对丰度分别在出湖段和湖中段最高, 且 PIZ 显著低于 SIZ ($P < 0.05$). PIZ [$(29.30 \pm 7.25)\%$] 的 DOM 相较于 SIZ [$(24.80 \pm 10.07)\%$] 具有更高的 C1 组分, 并且出湖段显著更高 ($P < 0.05$). 因此, 枯水期沉积物 DOM 以类蛋白组分为主, 在湖中段与出湖段的季节淹水区相对丰度更高; 而类腐殖酸组分在出湖段的常年淹水区更高。

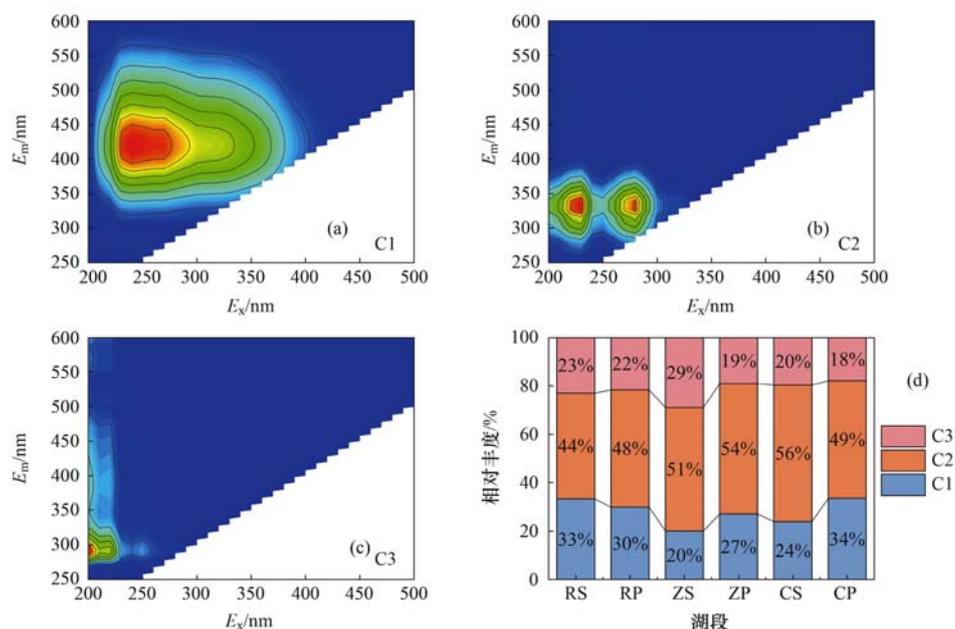


图 5 沉积物中 DOM 的荧光组分及其相对丰度在分段上的变化

Fig. 5 Fluorescence component diagrams for DOM in sediments and variation in their relative abundance in subsections

沉积物 DOM 的荧光指数 (FI)、自生源指数 (BIX) 和腐殖化指数 (HIX) 的值与空间分布如图 6 和图 3 (h) ~ 3 (j) 所示. FI 值在 1.80 ~ 2.42 之间 (平均值为 1.93), 表明沉积物 DOM 受到以微生物源为主的陆源与微生物源共同作用^[27]. BIX 在 0.78 ~ 1.23 之间 (平均值为 0.91), 反映沉积物 DOM 总体自生源特征较显著^[27]. HIX 值的范围为 0.44 ~ 2.61 (平均值为 1.57), 指示沉积物 DOM 总体表现为较弱的腐殖质特征和明显的内源特征^[27].

SIZ 的 FI 值显著高于 PIZ (1.98 ± 0.14 和 1.88 ± 0.04 , $P < 0.05$); 而 HIX 值显著低于 PIZ (1.38 ± 0.57 和 1.77 ± 0.52 , $P < 0.05$). BIX 在湖中段南部的 PIZ 和中部的 SIZ 出现高值, $BIX > 1$; 在 P2 与 P17 的 BIX 值 < 0.8 . HIX 在湖中段的 SIZ 均 < 1.5 , 显著低于 PIZ ($P < 0.05$).

2.4 DOM 特征的 PCA 分析与 RDA 分析

选取淹水环境下差异显著的 $SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 、FI、HIX、C1 和 C2 + C3 这 6 个参数作为

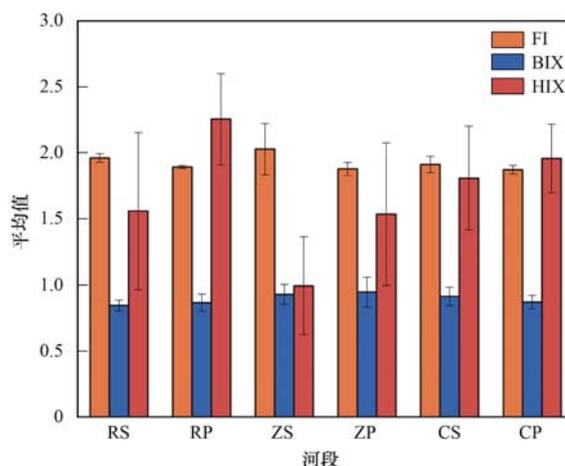
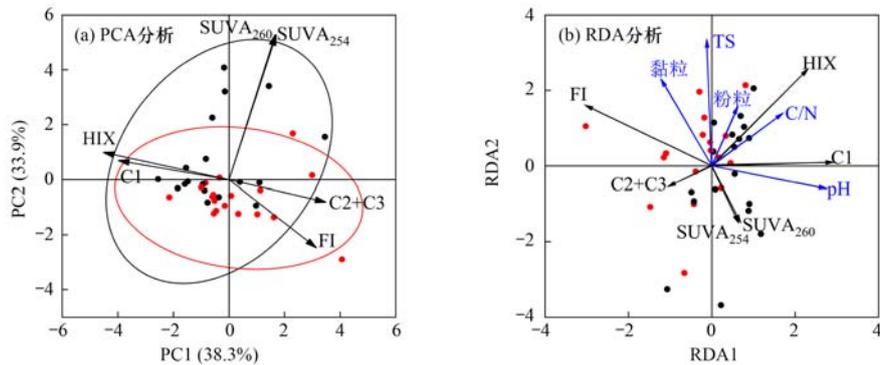


图 6 东洞庭湖东部不同湖段沉积物中 DOM 的荧光参数变化

Fig. 6 Fluorescence index variation in DOM in sediments of different subsections in the eastern part of East Dongting Lake

变量进行 PCA 分析, 提取两个特征值 > 1 的主成分, 解释了总方差的 72.2% [图 7 (a)]. PC1 由 C2 + C3 和 FI 的强正载荷与 HIX 与 C1 的强负载荷共同解释了 DOM 变化 38.3%. PC2 (33.9%) 与 $SUVA_{254}$ 和



其中点为沉积物 DOM 样点, 椭圆为 95% 的置信区间, 红色和黑色分别表示季节淹水和常年淹水, 蓝色箭头表示沉积物因素, 黑色箭头表示 DOM 的变量

图 7 两种淹水环境下沉积物 DOM 组成与来源及影响因素的 PCA 分析与 RDA 分析

Fig. 7 PCA analysis and RDA analysis of DOM composition, source, and influencing factors of sediments under two inundation environments

SUVA₂₆₀ 高度正相关, 与 HIX、C1 弱正相关。

采用 RDA 与 Spearman 相关性分析, 将 pH、C/N、TC、TN、TS 和砂粒、粉粒及黏粒的含量作为因素, 探讨主要沉积物特性对 DOM 的影响。通过 VIF < 10 的分析, 筛选了 TC、TN 和砂粒含量, 结果如图 7(b) 和表 2。第 1、2 排序轴共解释总方差的 25.37%。其中 RDA1 反映了 pH 与 C/N 的显著影响, pH 和 C/N 均与 C1、HIX 呈显著正相关, 与 C2

+ C3 呈显著负相关, TN 与 FI 呈显著正相关。RDA2 反映了 TS 与黏粒含量对 DOM 的影响, 其中, TS 与 SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₆₀ 呈显著负相关; 黏粒含量与 FI 显著正相关。因此, 在沉积物的基本特性中, pH 和 C/N 显著影响 DOM 的特征, TS 和黏粒含量次之。结合图 7(b) 中采样点的分布与表 2, DOM 在常年淹水区主要受到 pH 和 C/N 的影响, 而季节淹水区主要是 TS、TN 和黏粒含量的影响。

表 2 沉积物因子与 DOM 组成和来源变量的相关性¹⁾

Table 2 Correlation between sediment factors and DOM composition and source variables

	pH	TC	TN	C/N	TS	黏粒	粉粒	砂粒
SUVA ₂₅₄	0.120	-0.360*	-0.288	-0.132	-0.367*	-0.009	0.254	-0.072
SUVA ₂₆₀	0.128	-0.356*	-0.272	-0.133	-0.382*	-0.011	0.261	-0.071
FI	-0.516**	0.210	0.413*	-0.305	0.238	0.411*	0.066	-0.294
HIX	0.467**	0.254	-0.103	0.422*	0.219	0.044	0.331*	-0.254
C1	0.610**	0.256	-0.127	0.544**	-0.016	-0.272	0.135	0.072
C2 + C3	-0.610**	-0.256	0.127	-0.544**	-0.016	0.272	-0.135	-0.072

1) ** 为 $P < 0.01$, * 为 $P < 0.05$

3 讨论

3.1 东洞庭湖两种淹水环境下沉积物 DOM 的来源

PCA 的结果表明, PC1 表示 DOM 类蛋白组分的丰度, 反映 DOM 具有人为输入 (C2) 和内源特征 (FI、C3)^[32]。PC2 表示 DOM 的芳香性 (SUVA₂₅₄) 与疏水性 (SUVA₂₆₀), 与 DOM 的 C1 和 HIX 共同指示陆源输入^[32]。因此, 在东洞庭湖东部的沉积物中, DOM 具有内源与陆源输入的混合来源, 受人为输入的影响。然而两种淹水环境下 DOM 的显著差异也反映了 DOM 来源的差异, 并在不同的分段具有空间差异。

两种淹水条件下沉积物 DOM 以类蛋白质 (C2 与 C3 组分) 为主, 类腐殖酸物质 (C1) 较少 (图 5)。这可能是由于东洞庭湖东部枯水期由于长江、湘江、新墙河等河流入湖水沙的减少, 水流速度的

减缓, 沉积物 DOM 组成可能由以类腐殖质为主转变为以类蛋白质为主^[4], 并且以新产生的可生物降解的类色氨酸物质为主 [图 5(d)]。在东洞庭湖枯水期的水体中发现同样的结果^[31]。因此, 东洞庭湖东部 DOM 的内源特征显著, 陆源输入较少, 这与水产养殖、工业、城镇与船舶等的污水排放以及微生物活动密切相关^[30,33]。

湖中段与出湖段的季节淹水区为分布着大量的渔场与入河排污口 (图 1)。湖岸的岳阳县为农业大县^[34], 据文献^[35], 岳阳县 2019 年化肥施用量高达 128 345 t, 牧业产值为全市最高, 因此湖中段新墙河携带营养元素在入湖口随泥沙沉积积累, 加上水产养殖尾水未经处理直接排放入湖^[36], 大量营养物质富集 (TC 和 TN 含量高) 增强微生物活性, 增加类蛋白物质的内源输入, FI 与 BIX 值证实了本地生产的 DOM 的新鲜度^[37] (图 6)。除此之外, 湖中段与出湖

段沿岸大量的工业、城镇生活污水的排放,也促进类酪氨酸组分与类色氨酸组分的比例上升^[33,38],显著降低的芳香性与相对分子质量印证了人为输入^[27].而在湖中段的常年淹水区,由于远离湖岸,受到生活与养殖污水的影响减小,新墙河与西侧藕池河东支带来的水沙混合^[39],使得类腐殖酸组分含量较高(图3),显著更高的相对分子质量与腐殖化程度也反映了DOM的陆源输入(图4和图5).而出湖段常年淹水区为湖泊出湖径流,加上冬季三峡放水增强了长江在出湖口的阻断作用^[40],湖泊与长江的水沙混合沉积,虽然仍以人为输入的类型色氨酸为主,但陆源输入的类型腐殖酸也占有较高的比例[图5(d)].

入湖段的沉积物DOM的来源受到西侧芦苇场和上游河湖混合的影响.西侧的季节淹水区水位下降后大量芦苇的分解产物存在于沉积物中^[41],内源特征显著(图5)^[41];常年淹水区DOM较高的腐殖化与C3组分反映河流带来的陆源输入与南洞庭湖内源输入的混合[图3(g)和3(j)],而不显著的C1组分[图6(e)]可能受到草尾河造纸厂污水输入的影响^[33].除此之外,P4和P5由于入湖后流速的减缓^[21],具有芦苇分解产物、生产污水和陆源径流多重影响的沉积物在此经历更长的停留(较高的DOC浓度),因此光降解与微生物降解作用明显^[27,42,43],使得沉积物中的DOM相对分子质量减小而仍然具有较高的芳香性与疏水组分.

3.2 淹水环境对沉积物DOM组成与来源的影响

沉积物/土壤特性影响溶解性有机质的组成与来源^[17].其中,沉积物的pH对DOM的类型腐殖酸组分和内源特征影响最为显著(图7与表2).人类活动可能使得沉积物pH升高,因此东洞庭湖东部的沉积物主要呈碱性;而湖中段和出湖段的季节淹水区局部呈现酸性,与湖泊沿岸湖沼土盐基淋溶作用强有关^[29].有研究发现碱性沉积环境更有利于陆源难降解的多酚和多环芳香族化合物的积累^[44],因此常年淹水相较于季节淹水具有显著更高的芳香性、疏水组分和相对分子质量(图2),促进污染物的迁移^[13].而相对分子质量在出湖段的降低也与水深的增加产生更强的厌氧分解的低分子质量DOM有关^[45].同时,高pH和厌氧环境增强反硝化作用,导致更多 N_2O 的排放^[46],因此常年淹水下沉积物TN含量减少,比季节淹水具有显著更高的C/N比值(表1).C/N比值作为区分有机质来源的常用参数,比值高(>10)、低(4~10)反映陆生和水生有机物的蛋白质含量^[47,48].因此,季节淹水沉积物的低C/N值反映明显的蛋白质特征,但在入湖段和出湖段

的常年淹水区具有一定的陆源有机质,这和C/N与HIX、C1的显著正相关相印证(表2).水生系统中硫的含量一定程度上反映人类活动带来的污水排放^[49],因此季节淹水的沉积物中相对较高TS再次证实了人为输入对DOM的影响.相较而言,常年淹水下沉积物的颗粒组成对DOM组成与来源影响较小,说明沉积物/土壤的物理组成对DOM的影响在水生系统中被减弱,这在以往的研究中得以证实^[42].但沉积物的细颗粒对于有机碳具有吸附作用^[17].季节淹水区在枯水期沉积物出露,减少了水动力对沉积物颗粒的分选但保持潮湿的环境,因此黏粒含量相对较高,更有利于微生物产物的积累^[44],从而DOM具有更高的内源特征.

因此,湖泊枯水期淹水环境对沉积物DOM特征的可能作用机制为:季节淹水区水位的显著下降使沉积物保持高黏粒含量的湿润环境.同时沉积物的裸露使得沿岸污水直接排放到沉积物中,再进入湖泊水体,营养元素(高TN、TC和低C/N)含量高,增强沉积物中的微生物活性,因此季节淹水区DOM具有更多的类蛋白质与自生源特征.而常年淹水区由于径流的输入减少,水动力作用减弱,以及受到一定沿岸与船舶污水排放的影响,DOM仍然以自生源的类蛋白质为主,但是常年淹水导致碱性的沉积环境与径流作用使得DOM具有显著更高的芳香性、腐殖化程度、相对分子质量、疏水组分和一定比例的类型腐殖酸组分,对污染物的迁移具有重要影响.其中,淹水环境导致的沉积物pH、C/N和黏粒含量与DOM的来源与组成显著相关($P < 0.05$),但冗余分析的解释度并不高(25.37%),这与人类活动的强烈影响有关^[33].同时,有研究表明沉积物中氧化还原条件与铁锰氧化物对淹水环境具有更多的响应^[50],并且DOM的持久性受到其内在分子组成的影响^[42].淹水环境的季节性与内外因素对于DOM组成与来源的作用需进一步研究,并在此基础上探究DOM在不同淹水环境下与湖泊重金属污染的关系.

4 结论

(1) 枯水期两种淹水环境下DOM以类蛋白组分(C2+C3)为主.与季节淹水相比,在常年淹水的沉积物中具有更高的类型腐殖酸组分(C1)与更低的类蛋白组分.常年淹水下DOM具有更高的芳香性与疏水组分,在空间上表现为:湖中段>入湖段>出湖段.

(2) 沉积物DOM的内源特征显著,陆源特征较弱.人为输入直接影响沉积物,降低了DOM的芳香

性与相对分子质量,增强了类蛋白组分与内源特征。这在人为活动频繁的湖中段与出湖段的季节淹水区突出。

(3)淹水环境对沉积物 DOM 特征的可能作用机制与沉积物特性和人类活动显著相关。其中,季节淹水区 DOM 受沉积物 TN 和黏粒含量与污水排放的影响显著;而常年淹水区 DOM 主要受沉积物 pH 和 C/N 与径流输入的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Williams C J, Frost P C, Morales-Williams A M, *et al.* Human activities cause distinct dissolved organic matter composition across freshwater ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(2): 613-626.
- [3] Qualls R G, Haines B L. Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution, and stream water[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(2): 578-586.
- [4] Li Y P, Zhang L, Wang S R, *et al.* Composition, structural characteristics and indication of water quality of dissolved organic matter in Dongting Lake sediments[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **97**: 370-380.
- [5] 闫晓寒, 韩璐, 文威, 等. 辽河保护区水体溶解性有机质空间分布与来源解析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(4): 1419-1427.
- [5] Yan X H, Han L, Wen W, *et al.* Spectral characteristics and spatial distribution of DOM in surface water of Liaohe reservation zone[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(4): 1419-1427.
- [6] Ma Y M, Mao R, Li S Y. Hydrological seasonality largely contributes to riverine dissolved organic matter chemical composition: insights from EEM-PARAFAC and optical indicators [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **595**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.125993.
- [7] 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.
- [7] 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.
- [8] Fan X F, Ding S M, Chen M S, *et al.* Peak chromium pollution in summer and winter caused by high mobility of chromium in sediment of a eutrophic lake: in situ evidence from high spatiotemporal sampling [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(9): 4755-4764.
- [9] Chen M S, Ding S M, Li C, *et al.* High cadmium pollution from sediments in a eutrophic lake caused by dissolved organic matter complexation and reduction of manganese oxide [J]. *Water Research*, 2021, **190**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116711.
- [10] Huang Y, Fu C, Li Z, *et al.* Effect of dissolved organic matters on adsorption and desorption behavior of heavy metals in a water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **185**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109695.
- [11] Jiang T, Wang D Y, Wei S Q, *et al.* Influences of the alternation of wet-dry periods on the variability of chromophoric dissolved organic matter in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 249-259.
- [12] 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: 荧光光谱[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2506-2514.
- [12] 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: fluorescence spectra[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2506-2514.
- [13] 郝蓉, 徐召玉, 沈祠福, 等. 消落带夏冬季土壤溶解有机质的组成特征及来源[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(6): 1127-1133.
- [13] Hao R, Xu Z Y, Shen C F, *et al.* Chemical characteristics and sources of dissolved organic matter in soils of water-level fluctuation zones in summer and winter [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(6): 1127-1133.
- [14] Zhou M, Li Z W, Huang M, *et al.* Impact of drying/wetting conditions on the binding characteristics of Cu(II) and Cd(II) with sediment dissolved organic matter [J]. *RSC Advances*, 2020, **10**(57): 34658-34669.
- [15] 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.
- [15] 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.
- [16] Yin D L, Peng F C, He T R, *et al.* Ecological risks of heavy metals as influenced by water-level fluctuations in a polluted plateau wetland, southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **742**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140319.
- [17] López P, López-Tarazón J A, Casas-Ruiz J P, *et al.* Sediment size distribution and composition in a reservoir affected by severe water level fluctuations [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **540**: 158-167.
- [18] Wu X C, Ma T, Du Y, *et al.* Phosphorus cycling in freshwater lake sediments: influence of seasonal water level fluctuations [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **792**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148383.
- [19] 谢秀凤, 郝敏, 李悦, 等. 湿地溶解性有机质 (DOM) 源识别方法研究[J]. *地质论评*, 2014, **60**(5): 1102-1108.
- [19] Xie X F, Xi M, Li Y, *et al.* Research of the source identification methods for dissolved organic matter (DOM) in wetland [J]. *Geological Review*, 2014, **60**(5): 1102-1108.
- [20] 李有志, 刘芬, 张灿明. 洞庭湖湿地水环境变化趋势及成因分析[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(S2): 1295-1300.
- [20] Li Y Z, Liu F, Zhang C M. Analysis of change trend of water environment and cause in the Dongting Lake wetland [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(S2): 1295-1300.
- [21] 刘虎英. 城陵矶建闸对洞庭湖主要航道影响分析[J]. *交通科学与工程*, 2018, **34**(1): 50-55.
- [21] Liu H Y. Analysis of the influence of Chenglingji project on main channel in Dongting Lake [J]. *Journal of Transport Science and*

- Engineering, 2018, **34**(1): 50-55.
- [22] Ding X, Xu W H, Li Z W, *et al.* Phosphate hinders the complexation of dissolved organic matter with copper in lake waters[J]. Environmental Pollution, 2021, **276**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116739.
- [23] Huang M, Li Z W, Chen M, *et al.* In situ investigation of intrinsic relationship between protonation behavior and HA characteristics in sediments [J]. Science of the Total Environment, 2019, **683**: 258-266.
- [24] 吴可方, 欧伏平, 王丑明. 东洞庭湖秋季氮磷营养盐结构及水华风险分析[J]. 人民长江, 2018, **49**(23): 21-26, 73.
Wu K F, Ou F P, Wang C M. Nitrogen and phosphorus nutrient structure characteristic and risk analysis of cyanobacterial bloom in East Dongting lake in autumn[J]. Yangtze River, 2018, **49**(23): 21-26, 73.
- [25] Liao W F, Tong D, Li Z W, *et al.* Characteristics of microbial community composition and its relationship with carbon, nitrogen and sulfur in sediments[J]. Science of the Total Environment, 2021, **795**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148848.
- [26] 丁翔, 李忠武, 徐卫华, 等. DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3837-3846.
Ding X, LI Z W, XU W H, *et al.* Promotion and mechanisms of DOM on copper adsorption by suspended sediment particles[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3837-3846.
- [27] 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 matter in summer water of inflow rivers along Chaohu Lake watershed[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3743-3752.
- [28] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[Z]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, 2018, doi: 10.12078/2018070201.
- [29] 欧芙蓉, 吕殿青, 赵丹丹. 东洞庭湖湖滨带土壤酸碱度的分布及对重金属含量的影响[J]. 环境科学导刊, 2014, **33**(5): 10-13.
Ou F R, Lv D Q, Zhao D D. Effects of the distribution of pH value on the content of heavy metal in soil of the Eastern Dongting Lakeside belt [J]. Environmental Science Survey, 2014, **33**(5): 10-13.
- [30] 周蕾, 周永强, 张运林, 等. 重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3709-3718.
Zhou L, Zhou Y Q, Zhang Y L, *et al.* Characterizing sources and composition of chromophoric dissolved organic matter in a key drinking water reservoir lake Tianmu [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3709-3718.
- [31] 郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 等. 大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2198-2209.
Guo Y N, Li Y P, Shi Y, *et al.* Response of chromophoric dissolved organic matter dynamics to different hydrological scenarios in the two largest freshwater lakes connected to the Yangtze River [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2198-2209.
- [32] Wang K, Li P H, He C, *et al.* Hydrologic heterogeneity induced variability of dissolved organic matter chemistry among tributaries of the Three Gorges Reservoir[J]. Water Research, 2021, **201**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117358.
- [33] Du Y X, Lu Y H, Roebuck J A Jr, *et al.* Direct versus indirect effects of human activities on dissolved organic matter in highly impacted lakes [J]. Science of the Total Environment, 2021, **752**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141839.
- [34] 卢少勇, 张萍, 潘成荣, 等. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(6): 2278-2286.
Lu S Y, Zhang P, Pan C R, *et al.* Agricultural non-point source pollution discharge characteristic and its control measures of Dongtinghu Lake[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(6): 2278-2286.
- [35] 岳阳市统计局. 岳阳统计年鉴 2020[M]. 岳阳: 岳阳市统计局, 2020.
- [36] 谈毅奇, 李向前, 殷文洁, 等. 岳阳县东洞庭湖自然保护区实验区水产养殖污染现状及综合治理对策研究[J]. 当代水产, 2020, **45**(8): 80-81.
- [37] 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.
- [38] 赵辰, 周玉萍, 庞宇, 等. 富营养化条件下浙江象山港可溶性有机质的光谱和分子特征初探[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, **51**(8): 1258-1274.
Zhao C, Zhou Y P, Pang Y, *et al.* The optical and molecular signatures of DOM under the eutrophication status in a shallow, semi-enclosed coastal bay in southeast China[J]. Science China Earth Sciences, 2021, **64**(7): 1090-1104.
- [39] 王小毛, 欧伏平, 王丑明, 等. 洞庭湖底栖动物长期演变特征及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(2): 336-345.
Wang X M, Ou F P, Wang C M, *et al.* Long-term evolution and influencing factors of macrozoobenthos in Dongting Lake [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(2): 336-345.
- [40] Dai X, Yang G S, Wan R R, *et al.* The effect of the Changjiang River on water regimes of its tributary Lake East Dongting [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, **28**(8): 1072-1084.
- [41] 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 等. 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 847-858.
Luo Y Q, Wan Z W, Yan C X, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in sediments from Poyang Lake [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 847-858.
- [42] Kellerman A M, Kothawala D N, Dittmar T, *et al.* Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics[J]. Nature Geoscience, 2015, **8**(6): 454-457.
- [43] Zhang X K, Li B L, Deng J M, *et al.* Regional-scale investigation of dissolved organic matter and lead binding in a large impacted lake with a focus on environmental risk assessment [J]. Water Research, 2020, **172**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115478.
- [44] Ding Y, Shi Z Q, Ye Q T, *et al.* Chemodiversity of soil dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(10): 6174-6184.
- [45] Zhu T B, Duan P F, He J G, *et al.* Sources, composition, and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter extracted from sediments in an anthropogenic-impacted river in Southeastern China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(32): 25431-25440.
- [46] Hu C, Li F, Xie Y H, *et al.* Spatial distribution and stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus along an

- elevation gradient in a wetland in China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, **70**(6): 1128-1140.
- [47] 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.
- [48] 王启栋, 宋金明, 李学刚. 黄河口湿地有机碳来源及其对碳埋藏提升策略的启示[J]. *生态学报*, 2015, **35**(2): 568-576.
- Wang Q D, Song J M, Li X G. Sources of organic carbon in the wetlands of the Yellow River estuary and instructions on carbon burial promotion strategies[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(2): 568-576.
- [49] Li S Y, Luo J C, Xu Y J, *et al.* Hydrological seasonality and nutrient stoichiometry control dissolved organic matter characterization in a headwater stream[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **807**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150843.
- [50] Chen C M, Hall S J, Coward E, *et al.* Iron-mediated organic matter decomposition in humid soils can counteract protection [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1), doi: 10.1038/s41467-020-16071-5.

环境科学

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i>	(4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i>	(4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i>	(4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i>	(4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i>	(4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i>	(4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i>	(4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i>	(4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i>	(4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i>	(4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i>	(4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i>	(4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i>	(4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i>	(4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i>	(4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i>	(4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i>	(4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i>	(4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i>	(4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i>	(4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i>	(4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i>	(4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i>	(4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i>	(4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i>	(4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i>	(4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i>	(4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i>	(4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i>	(4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i>	(4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i>	(4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i>	(4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i>	(4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i>	(4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i>	(4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i>	(4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i>	(4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i>	(4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i>	(4911)