鲍城成,石浩洋,宋林旭,等.长江中游典型洲滩 SDOM 和磷形态分布研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6285-6294.
Bao C C, Shi H Y, Song L X, et al. Distribution of SDOM and phosphorus speciation in typical fluvial bars of the Middle Yangtze River [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6285-6294.

长江中游典型洲滩 SDOM 和磷形态分布研究

鲍城成[1,2,3],石浩洋[2,3*],宋林旭[1**],朱鑫鑫[1,2,3],郭 辉[2,3],杨文俊[2,3] (1.三峡大学水利与环境工程学院,湖北 宜昌 443002；2.长江科学院水力学研究所,湖北 武汉 430010；3.长江科学院,流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室,湖北 武汉 430010)

摘要：以荆江段高水动力砂质洲滩三八滩和缓流淤积黏土洲滩乌龟洲为对象,采用三维荧光光谱-平行因子分析(EEMs-PARAFAC)和连续提取法,解析 SDOM 组分特征与磷形态的响应机制.结果表明:三八滩与乌龟洲 SDOM 的组成特征差异显著,三八滩以类蛋白组分为主,其高生物活性特征与 Fe/Al-P 的高占比共同主导磷形态分布;而乌龟洲以类腐殖质组分为主导,其高芳香性与强络合能力促进有机磷累积,显著高于三八滩;类蛋白组分与 Fe/Al-P 呈显著负相关(P<0.05),腐殖化指数与有机磷呈显著正相关(P<0.05),表明 SDOM 主要通过与金属氧化物竞争吸附位点、改变微生物代谢两种途径影响磷的形态;三八滩的 SDOM 更容易与铁铝氧化物结合形成沉淀,从而截留更多 Fe/Al-P,而乌龟洲中低分子量的类蛋白 SDOM 会加速有机磷的分解矿化.研究首次阐明长江中游洲滩 SDOM 对磷形态的影响,为大型河流水文调控磷截留功能提供理论依据.

关键词：长江中游；洲滩；沉积物溶解性有机质；沉积物磷形态
中图分类号：X522 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6285-10

Distribution of SDOM and phosphorus speciation in typical fluvial bars of the Middle Yangtze River. BAO Cheng-cheng[1,2,3], SHI Hao-yang[2,3*], SONG Lin-xu[1**], ZHU Xin-xin[1,2,3], GUO Hui[2,3], YANG Wen-jun[2,3] (1.College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China；2.Institute of Hydraulics, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China；3.Hubei Key Laboratory of Basin Water Resources and Eco-Environmental Science, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6285~6294

Abstract：This study focused on the high-hydrodynamic sandy shoal Sanba Tan and the slow-flow sedimentary clay shoal Wugui Zhou in the Jingjiang section of the Yangtze River. The response mechanisms between the composition of SDOM and phosphorus forms were analyzed using EEMs-PARAFAC and sequential extraction methods. Significant compositional differences were observed between the SDOM from Sanbatan and Wuguizhou. Sanbatan was dominated by protein-like components, whose high biological activity, coupled with a high proportion of Fe/Al-P, was found to jointly govern the distribution of phosphorus forms. In contrast, the SDOM from Wuguizhou was primarily characterized by humic-like components, whose high aromaticity and strong chelating capacity were identified to promote the accumulation of organic phosphorus, which was significantly higher than that in Sanbatan. A significant negative correlation was observed between protein-like components and Fe/Al-P (P<0.05), while the humification index was significantly positively correlated with organic phosphorus (P<0.05). These results suggested that SDOM influences phosphorus forms through two primary pathways: competition with metal oxides for adsorption sites and alteration of microbial metabolism. At Sanba Tan, SDOM was more readily precipitated with iron-aluminum oxides, thereby retaining more Fe/Al-P. Conversely, the low-to-medium molecular weight protein-like SDOM in Wuguizhou accelerated the decomposition and mineralization of organic phosphorus. The influence of SDOM on phosphorus forms in sandbars of the mid-Yangtze River was elucidated for the first time in this study, providing theoretical support for the phosphorus trapping function associated with the hydrological regulation of large rivers.

Key words：Middle Yangtze River；fluvial bars；sediment dissolved organic matter；sediment phosphorus speciation

磷的水体生物有效性直接调控浮游动植物生长及水华暴发[1-2].沉积物是磷形态转化的核心界面[3-4],有机磷的赋存形态与转化路径直接控制磷的生物可利用性[5],而其作为沉积物总磷库的重要组成部分(占比 20%~50%),对磷循环的调控作用尤为关键.SDOM 作为沉积物中活跃的有机组分,可通过两种关键途径影响磷循环:一是通过配位键、氢键等与磷(无机磷及有机磷)形成复合物,改变磷的迁移能

收稿日期：2025-04-03
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52130903);中央级科研院所基本科研业务费(CKSF20231026/SL)
* 责任作者，工程师，shihy@mail.crsri.cn; ** 副教授，280825327@qq.com

力与生物有效性[6];二是通过调节沉积物氧化还原电位、pH 及微生物活性,间接驱动有机磷的矿化与再分配[7].

近年来,SDOM 在湖泊营养循环中的作用逐渐受到关注[8],但研究多聚焦其对重金属的络合作用以及有机污染物迁移的影响上[9],对氮、磷等营养元素的调控机制关注较少.已有研究表明,SDOM 的浓度与化学组成可能影响有机磷的赋存稳定性:高浓度(尤其是高分子量)SDOM 可抑制有机磷的酶解矿化,降低沉积物释磷潜力[10];低浓度则因胶体保护减弱加速有机磷微生物矿化[11];此外,SDOM 中的类蛋白组分可能通过激活硫酸盐还原菌的异化铁还原过程,促进铁结合态有机磷的还原性溶解[12-13],而芳香性腐殖质(如胡敏酸)则通过吸附或共沉淀增强闭蓄态有机磷(如矿物结合态植酸)的稳定性[14-15].

随着长江三峡工程及上游梯级水库群的建成,清水下泄主导了长江中下游的水沙情势,在蜿蜒型河道以及洞庭湖复合水动力的双重作用下,塑造了长江中游段多样的洲滩类型[16].一方面,水库拦截泥沙改变中下游沉积物生物地球化学特性[17],清水冲刷导致河床粗化、细颗粒缺失,削弱了沉积物对氮磷的吸附能力; 另一方面,水动力与沉积物来源差异形成粗颗粒砂质洲滩(高水动力)与细颗粒黏土洲滩(缓流淤积)的空间分异,这种沉积物组成差异通过氧化还原条件与有机质输入途径影响 SDOM 特性及磷形态分布.尽管已有研究关注了长江段水体中溶解性有机质(DOM)的分布特征及其对水质的影响[18-21],但对大型河流内部洲滩 SDOM 的特点研究相对较少.而沉积物有机质是有机磷的重要载体,二者常呈现高相关性[22],这一关联在洲滩系统中的作用尚未明确.

选取长江中游典型洲滩(三八滩、乌龟洲)为研究对象,综合运用紫外-可见吸收光谱(UV- Vis)、三维荧光光谱(EEMs)结合平行因子分析(PARAFAC)等光谱分析技术,系统解析了洲滩 SDOM 的组成特征与来源,旨在阐明 SDOM 在磷转化过程中的作用机制,为深入理解沉积物中磷的赋存特征及其水体生物有效性提供理论支撑.研究成果可为长江流域水质管理、沉积物磷污染防控及水生态系统修复提供科学依据与理论指导.

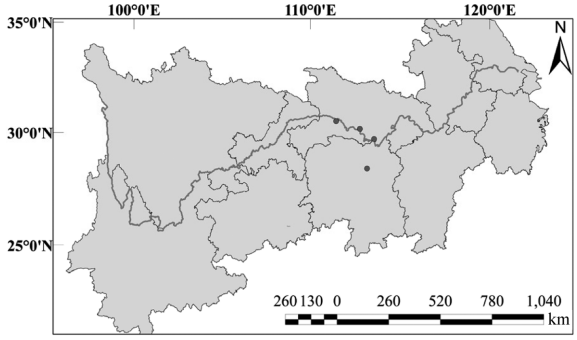


图 1 研究区域概况

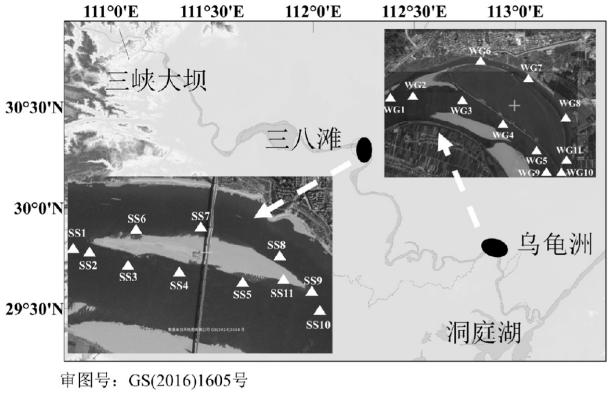
Fig.1 Location map of the study area

审图号:GS(2016)1605 号,下同

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于长江中游荆江河段,分别选取三八滩与乌龟洲作为研究对象.三八滩地处荆江中部(距三峡大坝约 160km),位于沙市河道的展宽段,受水流冲刷程度较高,导致沉积物以粗颗粒为主,洲滩植被稀疏,受三峡工程调度影响,滩体长期处于侵蚀状态;而乌龟洲位于荆江下游(距三峡大坝约 230km),邻近洞庭湖入江口,受洞庭湖洪水顶托作用[23]和缓流淤积影响,形成缓流淤积区,沉积物以细颗粒粉砂-黏土为主,洲滩植被茂密,受分汊河道缓冲影响,滩体稳定性较强,导致乌龟洲沉积物组成相较于三八滩更为复杂. 选用两个不同类型洲滩旨在对比揭示不同环境背景下溶解性有机质对沉积物磷形态的调控机制.



审图号：GS(2016)1605号

图 2 沉积物采样点分布

Fig.2 Distribution of sediment sampling sites

1.2 样品采集及处理

本研究基于洲滩地形特征与沉积物类型的空间异质性,在长江中游荆江河段的三八滩(30.31°N,112.22°E)与乌龟洲(29.79°N,112.91°E)采用系统布点法设置采样点(图 2).采样点覆盖了滩头、滩尾及洲滩左右两汊,其中三八滩和乌龟洲各布置 11 个采样点.2024 年 5 月,使用锥形沉积物采集器对三八滩和乌龟洲的表层沉积物进行样品采集(采集深度 0~10cm),每个采样点采集约 500g 沉积物样品,采集的样品保存于聚乙烯密封袋中,冷冻保存直至运至实验室.沉积物样品经冷冻干燥、研磨、过筛处理后,用于沉积物总磷、磷形态及三维荧光光谱的测定.

表 1　DOM 参数及其含义

Table 1　DOM parameters and their definitions

光谱参数	参数定义	表征含义
$SUVA_{365}$	365nm 处紫外吸收系数与 DOC 浓度比值	与 DOM 有机芳香度成正相关
$SUVA_{254}$	254nm 处紫外吸收系数与 DOC 浓度比值	与 DOM 腐殖化程度呈正相关[24]
E_2/E_3	250nm 与 365nm 处的紫外吸光度之比	与 DOM 相对分子质量成反比[24]
E_3/E_4	300nm 与 400nm 处的紫外吸光度之比	<3.5 时,表明 DOM 以胡敏酸为主,反之则以富里酸为主[25]
S_R	波段 275～295nm 与 350～400nm 处紫外光谱斜率的比值	与 DOM 的相对分子质量成反比;大于 1 时,表明 DOM 来源以内生源为主[24]
FI	*E*x=370nm 时,*E*m 在 470nm 与 520nm 下的荧光强度之比	>1.9 时,表示 DOM 主要来自内源的生物活动[26]
BIX	*E*x=310nm 时,*E*m 在 380nm 与 430nm 处的荧光强度之比	>1 时,表明 DOM 新近产生、自生源特性较强;介于 0.6~0.7 时,表明 DOM 主要来自陆源输入、自生源较少[27]
HIX	*E*x=255nm 时, *E*m 在 435~480nm 间及 300~345nm 间的荧光峰积分面积比值	与 DOM 腐殖化程度成正比[27]

1.3　沉积物磷形态测定

沉积物总磷(TP)采用过硫酸钾氧化分光光度法测定[28].沉积物不同磷形态采用四步连续提取法[29],该方法提取的磷形态包括活性磷(NH_4Cl-P)、铁锰螯合态磷(BD-P)、钙结合态磷(Ca-P)和难溶性磷(Residual-P).有机磷(OP)各形态的测定采用差减法,即通过过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测得的总磷(TP)与未经消解的无机磷(IP)之差来计算有机磷含量[30],有机磷形态包括活性有机磷($NaHCO_3$-Po)、盐酸提取有机磷(HCl-Po)、富里酸结合态有机磷(Ful-Po)、胡敏酸结合态有机磷(Hum-Po)和非活性有机磷(Res-Po).本研究采用的连续提取法与差减法参考文献[31],前期实验验证表明其磷形态回收率为 90%~110%,表明实验方法具有较好的准确性与可重复性.

1.4　UV-vis 及 EEMs 测定

SDOM 含量通过沉积物溶解性有机碳(DOC)的浓度来表征[32],通过德国耶拿 multiN/C3100 测定,利用紫外-可见分光光度计测定样品中 SDOM 的紫外-可见吸收光谱(UV-vis),扫描间隔为 0.5,扫描范围为 200~700nm.EEMs 使用 F4600 荧光光谱分析仪(HITACHI,日本)测定,激发波长(*E*x)为 200~500nm,发射波长(*E*m)为 200~550nm,波长间隔均为 5nm,扫描速度设置为 1200nm/min,使用 1cm 光程四通石英比色皿.在 MATLAB 软件中使用 DOMFlour 工具箱对 EEMs 数据进行建模,用平行因子分析法处理分析数据.

通过计算系列光谱参数可以揭示 SDOM 特征,具体参数及其含义如表 1 所示.

2　结果与分析

2.1　UV-vis 与 EEMs 指数分析

如图 3 所示,两个采样区域在 E_2/E_3、E_3/E_4、$SUVA_{254}$ 以及 S_R 等光谱参数上均呈现出显著差异(P<0.05).乌龟洲的 $SUVA_{254}$(5.00±1.12)显著高于三八滩(4.02±1.09),表明其水样中芳香族化合物的含量相对较高.此外,乌龟洲的 $SUVA_{365}$(1.44±0.36)也高于三八滩(1.17±0.36),说明乌龟洲 SDOM 具有更强的芳香性特征.相关研究表明,植被通过根系分泌物、凋落物分解以及木质素降解等生物地球化学过程,会持续向沉积物中输入富含芳香结构的有机质[33-34];同时,乌龟洲滩体稳定性较强,微生物对芳香性物质的好氧降解能力会更低[35].与三八滩相比,乌龟洲植被覆盖度较高,且因其特殊的地势条件,使得乌龟洲 SDOM 中不饱和键含量更高,芳香性特征更为显著.

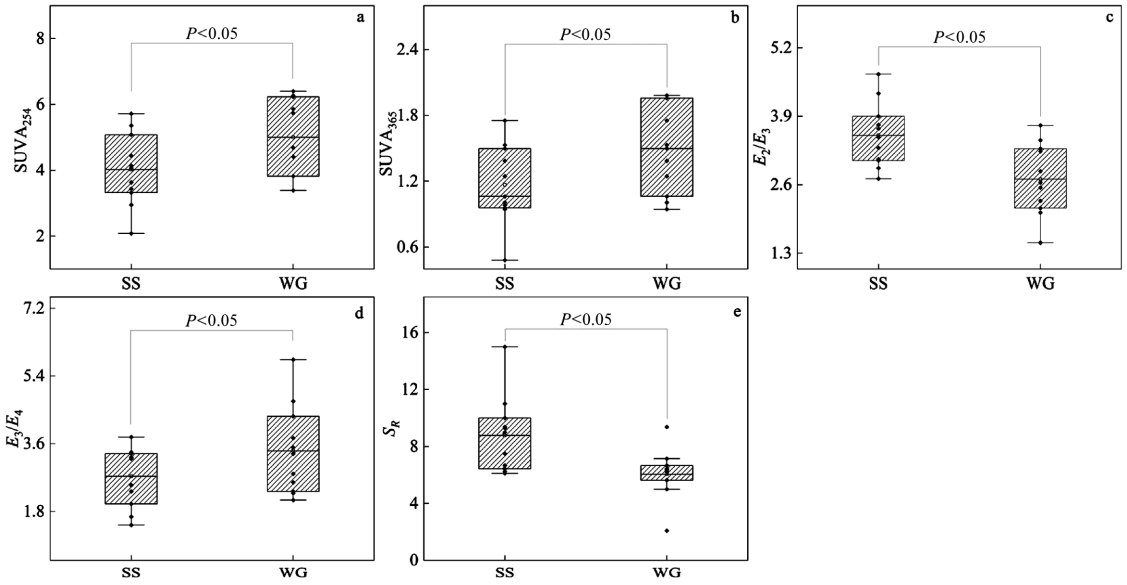


图 3 三八滩、乌龟洲 SDOM 紫外光谱参数

Fig.3 UV spectral parameters of SDOM in Sanbatan and Wuguizhou

此外,乌龟洲的 E_2/E_3(2.71±0.68)显著低于三八滩(3.54±0.61),表明乌龟洲 SDOM 的分子量可能更大.这一结果与 S_R(图 3(e))值的分析结果一致:乌龟洲的 S_R 值显著(P<0.05)低于三八滩,支持了其 SDOM 分子量较大的结论.同时,两个区域的 S_R 值均大于 1,表明 SDOM 主要以自生源为主.

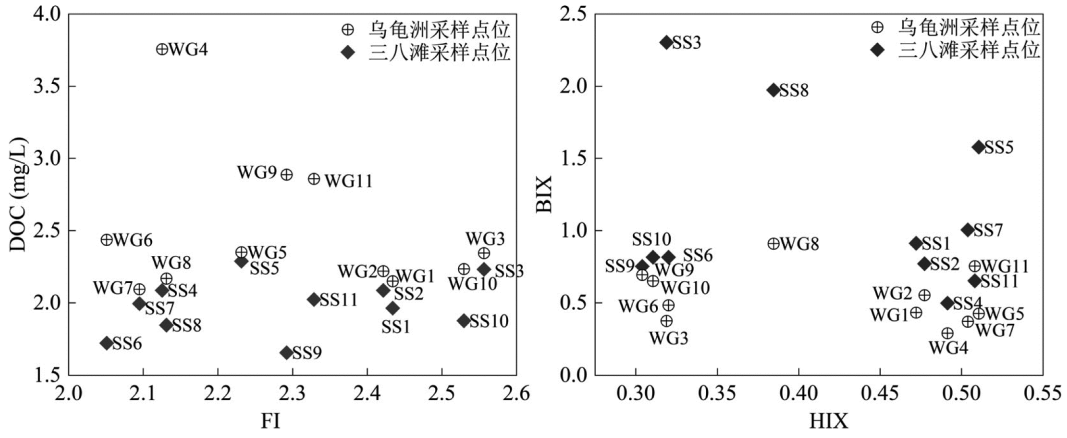


图 4 三八滩、乌龟洲 SDOM 荧光光谱参数

Fig.4 Fluorescence spectral parameters of SDOM in Sanbatan and Wuguizhou

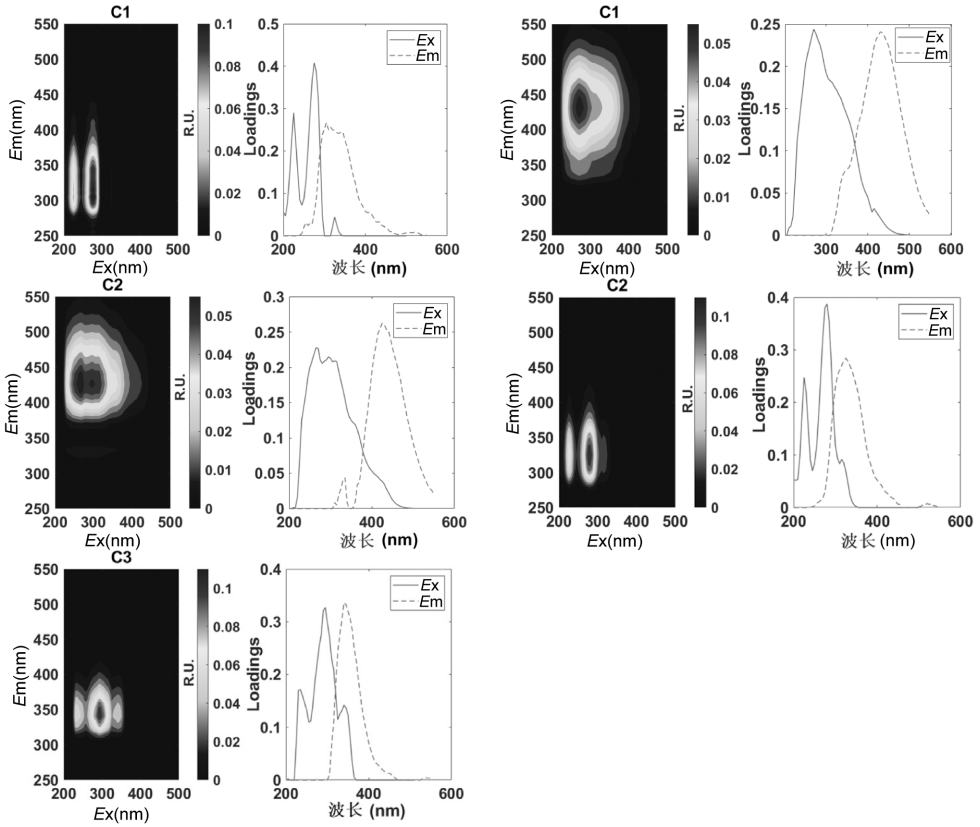
乌龟洲沉积物的 E_3/E_4 值(3.41±1.17)显著高于三八滩(2.73±0.78)(P<0.05),表明乌龟洲 SDOM 的腐殖化程度较高,以腐殖质为主,而富里酸含量较少.富里酸作为一种分子量较小且化学性质活泼的有机组分,其丰富的羟基等官能团不仅易于被生物吸收利用,还对污染物具有较强的络合能力,从而显著影响污染物在环境中的迁移、转化及归宿.

由图 4 知,三八滩和乌龟洲的荧光指数(FI)变化范围为 2.0~2.6,差异不显著,且均值都大于 1.9,表明两者 SDOM 含有较高比例的微生物来源的有机物质,自生源特征明显,这与 SR 所得出的结果相似.DOC 浓度在三八滩和乌龟洲分别为 1.98±0.20mg/L 和 2.50±0.50mg/L ,乌龟洲显著高于三八滩,该差异主要来源于两个区域在有机物质来源和水体环境条件上的差异,乌龟洲周边植被覆盖度较高导致植物凋落物和根系分泌物的积累,从而导致 DOC 浓度较高[36-37].相比之下,三八滩为砂质河床,植被覆盖较低,水动力变化较快有利于有机质的分

解和迁移,导致 DOC 浓度相对较低,三八滩 SDOM 的生物源指数(BIX)显著高于乌龟洲.

2.2　SDOM 三维荧光光谱分析

利用 PARAFAC 模型对 SDOM 进行三维荧光光谱解析,在三八滩共解析出 3 个荧光组分,在乌龟洲共解析出 2 个荧光组分.



(a)三八滩　　(b)乌龟洲

图 5　三八滩、乌龟洲 SDOM 荧光组分的三维荧光光谱图谱及荷载

Fig.5　3D−EEMs spectra and loading plots of SDOM fluorescent components in Sanbatan and Wuguizhou

其中三八滩组分 C1(*E*x/*E*m=275nm/305nm)组分、C2(*E*x/*E*m=265nm/425nm)和 C3(*E*x/*E*m=295nm/340nm)的光谱特征如图 5(a)所示.

将组分信息与 OpenFlour 在线光谱数据库(https://openfluor.lablicate.com)中的相关数据进行比对,组分 C1、C3 表示类蛋白质 DOM[38-39](*E*x 匹配率 98.23%,*E*m 匹配率 99.43%),该组分的光谱特征与类蛋白物质中的色氨酸相似,常见于生物活性较强的水体中;组分 C3 的光谱特征与酪氨酸相似,更接近微生物代谢产物[40].组分 C2 表示类腐殖酸 DOM[38-39](*E*x 匹配率 99.1%,*E*m 匹配率 97.76%),类腐殖酸 DOM 的化学组成包括腐殖酸、富里酸,通常来源于植物或土壤有机质的降解[40-41].

乌龟洲组分 C1(*E*x/*E*m=270nm/430nm)、组分 C2(*E*x/*E*m=280nm/325nm)的光谱特征图如图 5(b)所示.组分 C1 表示类腐殖质 DOM[42](*E*x 匹配率 99.1%,*E*m 匹配率 97.76%),与三八滩中的组分 C2 相似.组分 C2 表示类蛋白质 DOM[43](*E*x 匹配率 98.29%,*E*m 匹配率 99.19%),与三八滩 C1、C3 相似.

三八滩、乌龟洲 SDOM 组分的相对丰度如图 6 所示.其中,三八滩 C1(50.44%)>C3(30.02%)>C2(19.54%),乌龟洲 C1(65.81%)>C2(34.19%).由此可见,三八滩 SDOM 以 C1 和 C3 组分为主,其总荧光强度占比达 80%,表明该区域溶解性有机质以类蛋白质为主导.而乌龟洲 SDOM 主要的溶解性有机质成分主要是类腐殖酸.乌龟洲沉积物中类腐殖酸比例较高,这一特征与鄱阳湖沉积物 DOM 的研究结果一致[44],即常年淹水区 SDOM 因陆源有机物持续输入和缺氧条件而呈现更高芳香性特征.作为河心滩的三八滩受强烈水动力作用波动影响,高频的沉积物−

水界面氧化还原交替显著刺激了微生物代谢活性,从而导致类色氨酸组分占比突出,此分异规律在洞庭湖心滩区亦得到验证[45-46].

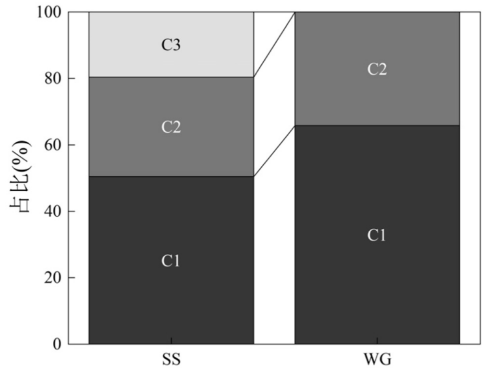


图 6 三八滩、乌龟洲 SDOM 组分荧光相对丰度

Fig.6 Relative abundance of SDOM fluorescent components in Sanbatan and Wuguizhou

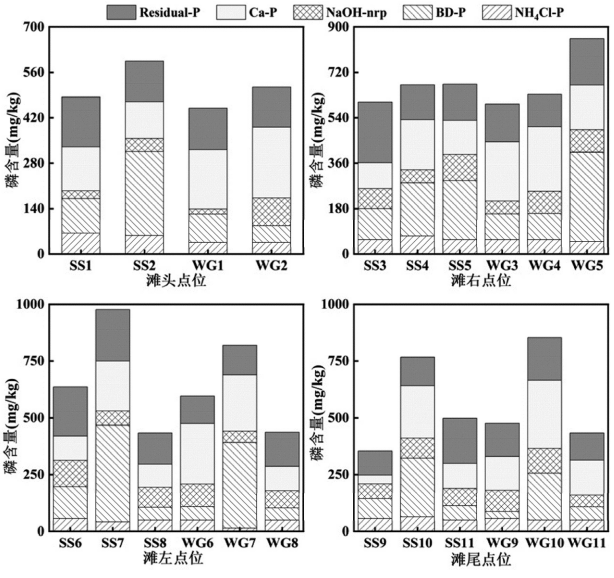
2.3 沉积物不同磷形态分布特征

三八滩、乌龟洲沉积物不同无机磷形态的含量如图 7 所示.三八滩、乌龟洲 TP 平均值为(972.08±317.14)mg/kg、(809.25±313.34)mg/kg.沉积物中无机磷的含量在滩体中部相对较高,而在滩头与滩尾则相对较低,呈现出“中间高、两侧低”的空间分布特征.这种空间差异可能归因于河道水动力条件,曲流段螺旋流产生的二次流作用导致粗颗粒物在凸岸持续堆积,细颗粒沉积物伴随吸附态磷向下游迁移,进而形成中间高、两侧低的纵向分布特征[47-49].

NH_4Cl-P 作为沉积物-水界面磷素交换的活跃组分,其平均含量占 TP 的 5%-15%[50].三八滩 NH_4Cl-P(56.99±7.8)mg/kg 高于乌龟洲(45.98±12.89)mg/kg,这可能与周期性淹水引发的沉积物再悬浮有关.有研究表明,水动力扰动增强固-液界面接触效率[51-52],促进磷酸盐在粘土矿物表面的物理吸附过程[53].BD-P 作为无机磷的主要形态(三八滩:(178.81±111.24)mg/kg; 乌龟洲:(135.08±123.23)mg/kg),主要受氧化还原条件的影响[54].三八滩作为典型的好氧沉积环境,表层沉积物中铁氧化物胶体在氧化条件下通过配位交换作用固定磷酸盐,类似于长江口潮滩 BD-P 富集现象[55-56];而乌龟洲处于厌氧环境,异化铁还原作用($Fe^{3+}\rightarrow Fe^{2+}$)导致铁氧化物溶解,伴随吸附态磷的二次释放,这与珠江口缺氧沉积物 BD-P 迁移规律具有一致性[57].Ca-P 在两区域呈现相反分布特征:三八滩 Ca-P 含量(156.64±83.18)mg/kg 低于乌龟洲(187.17±48.79) mg/kg.三八滩氧化环境抑制碳酸钙沉淀,导致 Ca-P 稳定性降低;而乌龟洲与东太湖沉积物相似[58],长期淹水促进碳酸盐缓冲体系形成,通过 $Ca^{2+}+HPO_4^{2-}\rightarrow CaHPO_4$ 的共沉淀反应实现磷素固定.

如图 7 所示,三八滩与乌龟洲沉积物中 OP 形态存在差异性.乌龟洲总有机磷含量(336.51±101.73)mg/kg 较三八滩(253.65±29.75)mg/kg 明显偏高,这一差异主要由两类环境过程共同驱动.首先,外源输入方面,乌龟洲周边较高的植被生物量通过凋落物输入贡献了更多植酸类有机磷,从而显著提升了沉积物中的有机磷含量;在磷素转化机制上,三八滩容易形成氧化-还原环境,能够有效激活磷酸酶活性,促进活性有机磷的微生物矿化过程,而乌龟洲相对稳定的淹水环境更有利于有机磷的保存.两区域截然不同的水动力条件与生物地球化学过程共同塑造了有机磷分布的异质性格局.

$NaHCO_3$-Po 作为弱吸附态组分(占三八滩 OP 的 11.3%、乌龟洲 13.5%),其释放潜力受控于沉积物-水界面氧化还原条件.三八滩高微生物活性促进磷向上覆水迁移.相反,乌龟洲厌氧条件下,富里酸的结构可能会发生一些变化,例如芳香环的还原或官能团的转化,这些变化可能导致其结合位点营养物质的释放[58],从而导致 Ful-Po 占比显著升高.此外,三八滩频繁的水力扰动导致细颗粒黏土矿物流失,使非活性有机磷占比(17.2%)显著低于乌龟洲(34.8%).



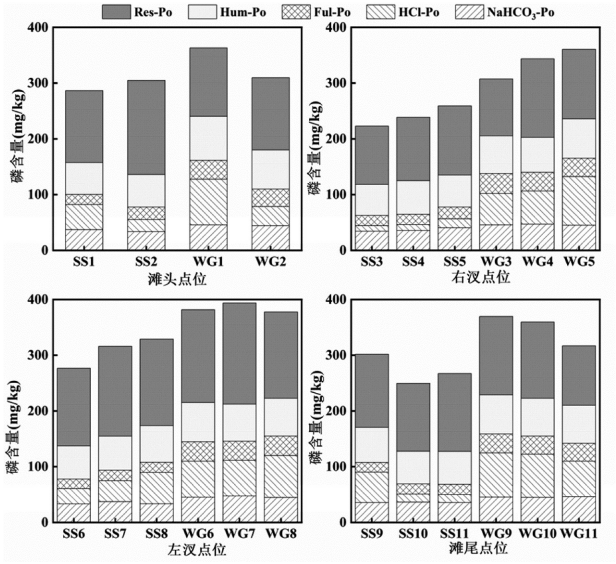


图 7　无机磷(左图)与有机磷(右图)形态含量

Fig.7　Morphological content of inorganic phosphorus (left) and organic phosphorus (right)

SDOM 具有较低的腐殖化程度和较高的生物活性,这主要归因于该区域的水文条件和微生物活动.相反,乌龟洲的 SDOM 腐殖化程度较高,这与其复杂的沉积物组成和植物凋落物的缓慢厌氧分解有关.

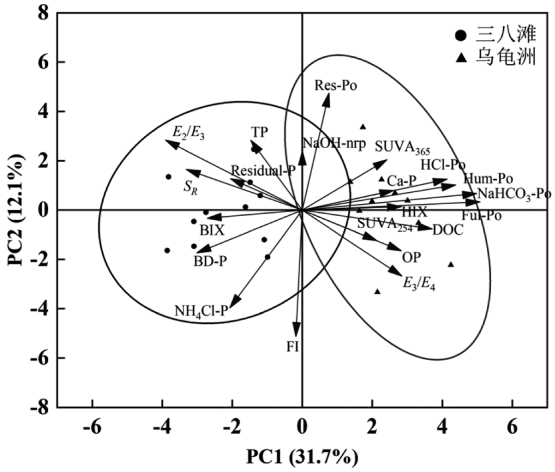


图 8　主成分分析

Fig.8　Principal component analysis diagram

3　讨论

3.1　SDOM 和磷形态差异形成原因分析

三八滩与乌龟洲的形态差异主要源于梯级水库调控下的水沙动力分异与河道形态交互作用.三峡工程及上游水库蓄水导致清水下泄,可能改变河道侵蚀与泥沙输移模式,促使泥沙在展宽河段沉积成洲,这一过程可能解释了三八滩以 Fe/Al-P 为主的无机磷富集特征.另一方面,洞庭湖洪水顶托效应可能增强乌龟洲的静水环境,从而促进腐殖质类 SDOM 累积及有机磷的滞留,这可能是两洲滩生态地球化学分异的关键机制之一[23].

PCA 分析表明 PC1、PC2 的方差贡献率分别为 31.7%和 12.1%,累计贡献率达 45.8%,有效揭示了数据集的主要变异.三八滩样本集中在 PC1 左侧,与无机磷、S_R、BIX 等参数显著相关,表明该区域 SDOM 腐殖化程度低、生物活性高,主要由微生物活动驱动.乌龟洲样本集中在 PC1 右侧,与 DOC、Ca-P、OP 等变量呈强正相关,表明该区域 SDOM 腐殖化程度高,可能与植物凋落物的厌氧分解过程相关.两区域样本在 PCA 空间中重叠较少,说明环境基质存在显著差异.

SDOM 的分子性质中,$SUVA_{254}$、$SUVA_{365}$、BIX 等参数具有较大载荷.这表明 SDOM 的腐殖化程度和生物活性是区分两个区域的关键因素.三八滩的

在 PC2 上,Ca-P、OP 及 DOC 含量具有较大载荷,这表明这些指标在反映沉积物磷形态差异方面具有重要作用.Ca-P 主要来源于外源输入的各种难溶性磷酸钙矿物,难以被生物利用,而 OP 则是有机物和微生物生物质结合的磷,其含量及占比会因水生植物残体的降解而升高.DOC 是水中溶解性有机碳的总量,与 DOM 的浓度直接相关.在三八滩,由于 SDOM 具有较高的生物活性,可能会促进有机磷的矿化和释放,从而影响 Ca-P 和 OP 的含量.而在乌龟洲,高腐殖化程度的 SDOM 可能与金属氧化物形成稳定的络合物,从而影响磷的吸附和释放行为.

3.2　SDOM 来源与组分对磷形态的影响

通过紫外光谱参数与三维荧光指数分析,揭示了三八滩与乌龟洲 SDOM 来源及腐殖化程度的显著差异.乌龟洲 SDOM 具有更高的腐殖化程度(HIX:0.49±0.09;$SUVA_{254}$:5.00±1.12),表明其以陆源腐殖质为主导.三维荧光组分中类腐殖酸(C1:*E*x/*E*m=270nm/430nm)占比达 65.81%,其高芳香性($SUVA_{254}$>4.0)进一步印证了腐殖化产物的累积.相比之下,三八滩 SDOM 腐殖化程度较低(HIX:0.42±0.3;$SUVA_{254}$:4.02±1.09),但类蛋白组分(C1: *E*x/*E*m=275nm/305nm;C3:*E*x/*E*m=295nm/ 340nm)占比高达 80.46%.另外,三八滩的 BIX(1.12±0.53)显著高于乌

龟洲(0.66±0.46),表明其 SDOM 可能受微生物活动的驱动.

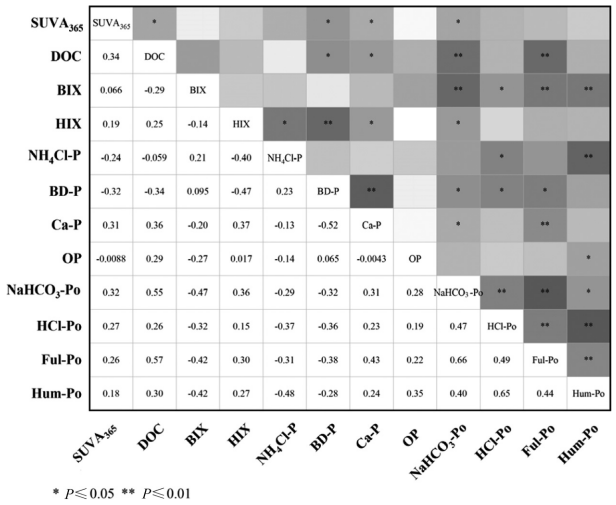


图 9 相关性分析热图

Fig.9 Correlation analysis heat map

乌龟洲高腐殖化 SDOM 通过多途径调控沉积物磷的赋存形态与稳定性.腐殖酸中的羧基与酚羟基可能优先与 Fe^{3+}/Al^{3+}结合,从而降低 Fe/Al−P 的固定效率,导致其占比(16.7%)低于三八滩(18.4%).同时,腐殖酸与 Ca^{2+}形成的络合物可能促进磷灰石结晶,使乌龟洲 Ca−P 占比显著升高.此外,三八滩长期以冲刷为主,细颗粒矿物流失,导致乌龟洲闭蓄态 Res−Po 占比(34.8%)显著高于受水力扰动影响的三八滩(17.2%).相关性分析进一步验证上述机制:HIX 与 Fe/Al−P 呈显著负相关(P<0.01),与 Ca−P 正相关(P<0.05);SUVA254 与 Res−Po 正相关,表明腐殖化程度高能增强磷的封存能力.反观三八滩,低腐殖化、高生物活性的 SDOM 可能通过微生物介导的矿化作用影响磷形态.例如,类蛋白组分(如色氨酸、酪氨酸)可能作为电子供体,促进 Fe−P 解吸与有机磷转化[59].此外,水体波动较大可能加速富里酸结合态磷的矿化从而增加活性磷的释放潜力[60].

4 结论

4.1 三维荧光光谱与紫外参数共同揭示了两地 SDOM 的差异.乌龟洲沉积物有机质以腐殖质为主导,其高芳香性特征受植物凋落物厌氧分解驱动;而三八滩则以微生物源类蛋白组分为主,干湿交替的水位波动刺激了微生物代谢活性,促进小分子 SDOM 生成.

4.2 磷形态在长江中游洲滩的分布存在显著差异.三八滩以 Fe/Al−P 为主,而乌龟洲则以 OP 为主,可能是植物来源的有机磷.

4.3 磷形态含量差异与 SDOM 特性存在相关性.相关性分析表明,有机质 HIX 与 Fe/Al−P 呈显著负相关,而类蛋白组分荧光强度与有机磷呈正相关,推测高腐殖化 SDOM 可能抑制铁铝氧化物吸磷,促进钙结合态磷稳定,而低腐殖化 SDOM 驱动活性磷释放,增加了活性磷的释放潜力.

参考文献:

[1] 李学梅,刘 璐,龚森森,等.江汉平原长湖浮游植物初级生产力的季节性变化及其驱动因子 [J]. 湖泊科学, 2023,35(3):833−843.
Li X M, Liu L, Gong S S, et al. Seasonal variation and driving factors of primary productivity of phytoplankton in Lake Changhu, Jianghan Plain [J]. Journal of Lake Sciences, 2023,35(3):833−843.

[2] 阙子亿,王晓锋,袁兴中,等.梯级筑坝下小型山区河流水体碳氮磷的时空特征及富营养化风险 [J]. 湖泊科学, 2022,34(6):1949−1967.
Que Z Y, Wang X F, Yuan X Z, et al. Spatial−temporal distribution of carbon,nitrogen and phosphorus concentrations and eutrophication evaluation of mountainous small river in a cascaded damming [J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(6):1949−1967.

[3] 陈 洁,许 海,詹 旭,等.湖泊沉积物−水界面磷的迁移转化机制与定量研究方法 [J]. 湖泊科学, 2019,31(4):907−918.
Chen J, Xu H, Zhan X, et al. Mechanisms and research methods of phosphorus migration and transformation across sediment−water interface [J]. Journal of Lake Sciences, 2019,31(4):907−918.

[4] Lukawska−Matuszewska K, Vogt R D, Xie R. Phosphorus pools and internal loading in a eutrophic lake with gradients in sediment geochemistry created by land use in the watershed [J]. Hydrobiologia, 2013,713(1):183−197.

[5] Gao L, Zhang L, Shao H. Phosphorus bioavailability and release potential risk of the sediments in the coastal wetland: A case study of rongcheng swan lake, shandong, china [J]. CLEAN - Soil, Air, Water, 2014,42(7):963−972.

[6] 龙云川.贵州草海表层沉积物 DOM 与微生物对磷的地球化学特征影响研究 [D]. 贵阳:贵州大学, 2022.
Long Y C. Research on the impact of surface sediment DOM and microorganisms on the geochemical characteristics of phosphorus in the Grass Lake, Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.

[7] 文帅龙,刘静静,戴家如,等.铁(氢)氧化物介导的溶解性有机质、无机磷的固定及相互作用研究进展 [J]. 湖泊科学, 2022,34(5):1428−1440.
Wen S L, Liu J J, Dai J R, et al. Iron(hydr) oxides mediated immobilization and interaction of dissolved organic matter and inorganic phosphate:A review [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5):1428−1440.

[8] 马晓阳,牛凤霞,肖尚斌,等.高磷沉积物有机磷形态分布及释放动力学特征——以宜昌西北口水库为例 [J]. 中国环境科学, 2022,42(1):293−301.
Ma X Y, Niu F X, Xiao S B, et al. Distribution and release dynamics of organic phosphorus forms in high phosphorus sediments—Taking the Yichang Xibao Reservoir as an example [J]. China Environmental Science, 2022,42(1):293−301.

[9] Kragh T, Søndergaard M, Tranvik L. Effect of exposure to sunlight and

phosphorus-limitation on bacterial degradation of coloured dissolved organic matter (CDOM) in freshwater [J]. FEMS Microbiology EcologyFEMS Mi-crobiology Ecology, 2008,64(2):230-239.

[10] Evans C D, Jutterström S, Stadmark J, et al. Four decades of changing dissolved organic matter quality and stoichiometry in a swedish forest stream [J]. Biogeochemistry, 2024,167(9):1139-1157.

[11] 张晓燕,罗专溪,王振红.微藻及其分泌物对溶解性有机磷矿化的促进效应 [J]. 中国环境科学, 2023,43(1):341-350.
Zhang X Y, Luo Z X, Wang Z H. Promoting effect of microalgae and its secretions on dissolved organophosphate mineralization [J]. China Environmental Science, 2023,43(1):341-350.

[12] Iles J A, Pettit N E, Donn M J, et al. Phosphorus sorption characteristics and interactions with leaf litter - derived dissolved organic matter leachate in iron - rich sediments of a subtropical ephemeral stream [J]. Aquatic Sciences, 2022,84(4):1-16.

[13] Wang H B, Liu X, Jin B, et al. High-molecular-weight dissolved organic matter enhanced phosphorus availability in paddy soils: evidence from field and microcosm experiments [J]. Soil & Tillage Research Editorial, 2024,240.

[14] 马鑫雨,杨　盼,张　曼,等.湖泊沉积物磷钝化材料的研究进展 [J]. 湖泊科学, 2022,34(1):1-17.
Ma X Y, Yang P, Zhang M, et al. Advances in researches on phosphorous inactivation materials in lake sediment [J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(1):1-17.

[15] 吴文丽,闫金龙,江　韬,等.天然有机质-金属离子/氧化物-磷复合物的研究进展 [J]. 生态与农村环境学报, 2019,35(9):1089-1096.
Wu W L, Yan J L, Jiang T, et al. Research progress on natural organic matter-metal ion/oxide-phosphorus complexes [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019,35(9):1089-1096.

[16] 余文畴.长江中游下荆江蜿蜒型河道成因初步研究 [J]. 长江科学院院报, 2006,23(6):9-13.
Yu W C. Preliminary Study on forming condition of lower Jingjiang meandering channels of Middle Yangtze River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006,23(6):9-13.

[17] 卢金友,刘兴年,姚仕明.长江泥沙调控与干流河床演变及治理中的关键科学技术问题与预期成果展望 [J]. 工程科学与技术, 2017,49(1):8.
Lu J Y, Liu X N, Yao S M. Key technical problems and expected achievements in the sediment control of the Yangtze River and the red evolution of its mainstream [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1):8.

[18] 王安月,张　凯,何　丁,等.夏季长江口水体可溶性有机质组成的空间分布特征及其控制因素 [J]. 地球化学, 2021,50(3):317-328.
Wang A Y, Zhang K, He D, et al. Spatial distribution and controlling factors of dissolved organic matter composition in the Yangtze Estuary in summer [J]. Geochimica, 2021,50(3):317-328.

[19] 甘淑钗,吴　莹,鲍红艳,等.长江溶解有机质三维荧光光谱的平行因子分析 [J]. 中国环境科学, 2013,33(6):1045-1052.
Gan S C, Wu Y, Bao H Y, et al. Characterization of DOM (dissolved organic matter) in Yangtze River using 3-D fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis [J]. China Environmental Science, 2013, 33(6):1045-1052.

[20] Zhan X, Bao H, Niggemann J, et al. Beyond hydrology: Exploring the factors influencing the seasonal variation of the molecular composition of riverine dissolved organic matter [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2024,129(9):e2024JG008014.

[21] Zhou Y, Yao X, Zhou L, et al. How hydrology and anthropogenic activity influence the molecular composition and export of dissolved organic matter: observations along a large river continuum [J]. Limnology and Oceanography Letters, 2021,66(5):1730-1742.

[22] 张雪瑞,郭一玮,王晓燕,等.密云水库沉积物—水界面磷交换特征及其对环境因子的响应 [J]. 湖泊科学, 2024:1-17.
Zhang X R, Guo Y W, Wang X Y, et al. Characteristics of phosphorus exchange at sediment-water interface and its response to environmental factors in Miyun Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2024:1-17.

[23] 杨春瑞,邓金运,陈　立,等.长江中游通江湖泊对干流顶托作用变化规律 [J]. 水科学进展, 2024,35(1):98-111.
Yang C R, Deng J Y, Chen L, et al. Study on the change of backwater effect of the connected lakes in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Advances in Water Science, 2024,35(1):98-111.

[24] Wang L, Wu F, Zhang R, et al. Characterization of dissolved organic matter fractions from lake hongfeng, southwestern china plateau [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009,21(5):581-588.

[25] Artinger R, Buckau G, Geyer S, et al. Characterization of groundwater humic substances: influence of sedimentary organic carbon [J]. Applied Geochemistry, 2000,15(1):97-116.

[26] Mcknight, Dm, Boyer, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. Limnology and Oceanography Letters, 2001,46(1):38-48.

[27] 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.

[28] 黄　伟,张　钘,罗晓佼,等.三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 [J]. 环境科学, 2022,43(3):1356-1364.
Huang W, Zhang X, Luo X J, et al. River-lake two-state and its effect on the content of different forms of phosphorus in sediments of the Three Gorges Reservoir tributaries [J]. Environmental Science, 2022, 43(3):1356-1364.

[29] 席　银,王圣瑞,赵海超,等.覆盖不同材料对湖泊沉积物磷释放影响机制 [J]. 环境化学, 2017,36(3):532-541.
Xi Y, Wang S R, Zhao H C, et al. Mechanism of different covering materials on phosphorus release from lake sediments [J]. Environmental Chemistry, 2017,36(3):532-541.

[30] Hedley M J S J W B. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. Soil Science, 1982.

[31] 王书航,张　博,姜　霞,等.采用连续分级提取法研究沉积物中磷的化学形态 [J]. 环境科学研究, 2015,28(9):1382-1388.
Wang S H, Zhang B, Jiang X, et al. Analysis of phosphorus fractions in sediments by sequential extraction [J]. Research of Environmental Sciences. 2015,28(9):1382-1388.

[32] 龙云川,王龙燕,胡　菁,等.基于UV-Vis和EEM-PARAFAC的草海沉积物DOM时空分布特征 [J]. 环境科学研究, 2024,37(12):2698-2709.
Long Y C, Wang L Y, Hu J, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of DOM in sediments from guizhou caohai based on UV-Vis and EEM-PARAFAC [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(12):2698-2709.

[33] 陈尚洁.植被根系分泌物强化覆盖土微生物降解氯代芳烃的机理研究 [D]. 重庆:重庆理工大学, 2024.
Chen S J. Mechanism of vegetation root exudates enhancing microbial degradation of chlorinated aromatic hydrocarbons in cover soil [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024.

[34] 吴林坤,林向民,林文雄.根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望 [J]. 植物生态学报, 2014,38(3):298-310.
Wu L K, Lin X M, Lin W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014,38(3):298-310.

[35] 唐涛涛,李　江,杨　钊,等.多环芳烃生物降解及转化途径的研究进展 [J]. 石油学报(石油加工), 2019,35(2):403-413.
Tang T T, Li J, Yang Z, et al. Research progress on the biodegradation and

transformation pathways of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2019,35(2):403-413.

[36] 王志成,刘新华,贾付生,等.近 10a 阿克苏流域植被覆盖时空演变特征及影响因素 [J]. 长江科学院院报, 2017,34(9):24-28.
Wang Z C, Liu X H, Jia F S, et al. Vegetation cover in Aksu river basin over the past decade: spatio-temporal variation and impact factors [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2017,34(9):24-28.

[37] 赵祖伦,赵卫权,威 李,等. FAST 周边植被覆盖度时空演变特征及影响机制研究 [J]. 绿色科技, 2020,(14):1-7.
Zhao Z L, Zhao W Q, Wei L, et al. Study on the spatial and temporal evolution characteristics and influence mechanism of fractional vegetation coverage around FAST [J]. Journal of Green Science and Technology, 2020,(14):1-7.

[38] Ryan K A, Palacios L C, Encina F, et al. Assessing inputs of aquaculture-derived nutrients to streams using dissolved organic matter fluorescence [J]. Science of The total Environment, 2022, DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.150785.

[39] Chen M, Kim S, Jung H, et al. Dynamics of dissolved organic matter in riverine sediments affected by weir impoundments: production, benthic flux, and environmental implications [J]. Water Research, 2017,121:150-161.

[40] Eder A, Weigelhofer G, Pucher M, et al. Pathways and composition of dissolved organic carbon in a small agricultural catchment during base flow conditions [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2022,22(1):96-112.

[41] Stedmon C A, Thomas D N, Papadimitriou S, et al. Using fluorescence to characterize dissolved organic matter in antarctic sea ice brines [J]. Journal of Geophysical Research, 2011,116(G3):027.

[42] Wang Y X, Hu H Z, Zhou Y J. Evolving characteristics of dissolved organic matter in soil profiles during 56 years of revegetation in mu us sandy land [J]. Plant Soil, 2024,497(112):567-584.

[43] Zhou X Z, Johnston S E, Bogard M J, et al. Organic matter cycling in a model restored wetland receiving complex effluent [J]. Biogeochemistry, 2022,162(2):237-255.

[44] 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.

[45] 陈 佳,李忠武,金昌盛,等.不同淹水环境下湖泊沉积物 DOM 的特征与来源 [J]. 环境科学, 2022,43(9):4566-4575.
Chen J, Li Z W, Jin C S, et al. Characteristics and sources of DOM in lake sediments under different inundation environments [J]. Environmental Science, 2022,43(9):4566-4575.

[46] 庄 奔,李 冰,郭燕妮,等.洞庭湖溶解性有机物组成与有机碳收支对江湖水力连通的响应 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1466-1475.
Zhuang B, Li B, Guo Y N, et al. Composition of dissolved organic matter in Dongting Lake and the response to organic carbon budget on river-lake hydraulic connectivity [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1466-1475.

[47] 赖志云.荆江三八滩现代沉积特征——兼论滩体的成因、演变 [J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1984,(1):12-13.
Lai Z Y. Jingjiang Sanbaotan modern sedimentary features —— Also discuss the origin and evolution of the beach body [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1984,(1):12-13.

[48] 谢小平,张松林,王永栋,等.长江中游曲流河段河道的近代演化过程研究 [J]. 第四纪研究, 2008,(2):326-331.
Xie X P, Zhang S L, Wang Y D, et al. Research on the modern evolution process of the river channel in the middle reach of the Yangtze River [J]. Quaternary Sciences, 2008,(2):326-331.

[49] 岳大力,吴胜和,谭河清,等.曲流河古河道储层构型精细解剖——以孤东油田七区西馆陶组为例 [J]. 地学前缘, 2008,(1):101-109.
Yue D L, Wu S H, Tan H Q, et al. An anatomy of paleochannel reservoir architecture of meandering river reservoir——a case study of Guantao formation, the west 7th block of Gudong oilfield [J]. Earth Science Frontiers, 2008,(1):101-109.

[50] Luo H, Liu D, Huang Y, et al. Study on phosphorus characteristics in sediments of xiangxi bay, china three-gorge reservoir [J]. Journal of Environmental Protection, 2015,(4):281-289.

[51] 李大鹏,黄 勇,李伟光.再悬浮条件下底泥中磷赋存形态的转化研究 [J]. 环境科学, 2008,(5):1289-1294.
Li D P, Huang Y, Li W G. Research on the transformation of phosphorus occurrence forms in sediments under simulated submergence conditions [J]. Environmental Science, 2008,(5):1289-1294.

[52] 蔡顺智,李大鹏,王 忍,等.多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 [J]. 环境科学, 2016,37(11):4203-4211.
Cai S Z, Li D P, Wang R, et al. The impact of multiple disturbances on the migration and transformation of endogenous phosphorus in lakes [J]. Environmental Science, 2016,37(11):4203-4211.

[53] 范成新,张 路,包先明,等.太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及定量化——2．磷释放的热力学机制及源-汇转换 [J]. 湖泊科学, 2006,(3):207-217.
Fan C X, Zhang L, Bao X M, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu:Ⅱ. chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition [J]. Journal of Lake Sciences, 2006,(3):207-217.

[54] Yan X, Yang W, Chen X, et al. Soil phosphorus pools, bioavailability and environmental risk in response to the phosphorus supply in the red soil of southern china [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(20):7384.

[55] 刘 敏,许世远,侯立军,欧冬妮.长江口滨岸潮滩沉积物中磷的存在形态和分布特征 [J]. 海洋通报, 2001,(5):10-17.
Liu M X S Y. The existence and distribution characteristics of phosphorus in the beach sediments at the Yangtze River estuary [J]. Hai Yang Tong Bao, 2001,(5):10-17.

[56] 毛雪静,黄廷林,李 楠,等.金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 [J]. 环境科学, 2019,40(6):2738-2744.
Mao X J, Huang T L, Li N, et al. Sources and distribution of phosphorus in sediments of the jinpen reservoir [J]. Environmental Science, 2019,40(6):2738-2744.

[57] Zhuang L, Tang Z, Ma J, et al. Enhanced anaerobic biodegradation of benzoate under sulfate-reducing conditions with conductive iron-oxides in sediment of pearl river estuary [J]. Frontiers in Microbiology, 2019,10(MAR):374.

[58] 徐升宝.东太湖内源氮、磷释放及两种沉水植物净化作用的研究 [D]. 苏州:苏州大学, 2011.
Xu S B. Research on the release of endogenous nitrogen and phosphorus in East Taihu Lake and the purification function of two aquatic plants [D]. Suzhou: Suzhou University, 2011.

[59] Xu B, Cho Q A C, Ng T C A, et al. Enriched autoinducer-2 (AI-2)-based quorum quenching consortium in a ceramic anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for biofouling retardation [J]. Water Research, 2022,214:118203.

[60] Lee J, Zachara J M, Fredrickson J K, et al. Fe(II)- and sulfide-facilitated reduction of 99tc(VII)o4- in microbially reduced hyporheic zone sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014,136: 247-264.

作者简介：鲍城成(2001-),女,湖北当阳人,三峡大学硕士研究生,主要从事河流生态修复的研究.2401196722@qq.com.