

## 水位变化驱动下三峡库区香溪河库湾消落带土壤多环芳烃分布：胶体介导的迁移机制\*

席颖<sup>1,2</sup>, 龙经中<sup>1,2</sup>, 于水莲<sup>1,2</sup>, 陈婧怡<sup>1,2</sup>, 李锐<sup>1,2</sup>, 王思婷<sup>1,2</sup>, 胥焘<sup>2,3</sup>, 黄应平<sup>1,2</sup>, 吕元飞<sup>2\*\*</sup>

(1: 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

(2: 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

(3: 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002)

**摘要:** 三峡水库周期性水位消涨导致消落带不同海拔梯度土壤中多环芳烃 (PAHs) 呈现差异性分布特征, 土壤胶体具有比表面积大、有机质及表面电荷丰富的特性对其 PAHs 的迁移具有介导作用。基于土壤胶体-水位耦合视角, 本研究对比了一个完整消涨周期 (2022 年 6 月至 2023 年 6 月) 前后香溪河库湾多海拔 (155-185 m) 土壤的胶体特征与 PAHs 分布, 揭示了人工水位调度驱动 PAHs 再分布的机制。结果呈现: 水位消涨后消落带土壤 PAHs 总量降低了 10.8%~59.6%。消落带不同海拔土壤胶体均具有良好的稳定性, 能促进 PAHs 单体菲 (Phe) 在多孔介质中的迁移, 其中, 165 m 海拔土壤胶体特征以及 PAHs 分布对水位消涨响应最为敏感, 水位消涨显著改变其土壤胶体特征, 水位消涨后, 土壤胶体比表面积增加 70.7%, 胶体粒径降低了 13.3%, Zeta 电位绝对值提升 18.8%, 临界絮凝值 (CFC) 对比消涨前增加了 4 倍, 稳定迁移的能力增强。Pearson 相关性分析证实, 胶体稳定性和 Zeta 电位 ( $p < 0.01$ ) 是水位消涨过程中调控消落带土壤 PAHs 分布的主控因子, 表明人工水位调度通过调控胶体稳定性和理化性质驱动土壤 PAHs “汇-源” 转化。研究结果对于理解水位波动对消落带生态系统的影响以及防控水体 PAHs 污染具有指导意义。

**关键词:** 三峡库区; 水位消涨; 消落带; 土壤胶体; 多环芳烃迁移

## Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in Soil of the water-level fluctuation zone in Xiangxi River Bay in the Three Gorges Reservoir area driven by regulated water-level Variations: Mechanisms of colloid-facilitated transport\*

Xi Ying<sup>1,2</sup>, Long Jingzhong<sup>1,2</sup>, Yu Shuilian<sup>1,2</sup>, Chen Jingyi<sup>1,2</sup>, Li Kun<sup>1,2</sup>, Wang Siting<sup>1,2</sup>, Xu Tao<sup>2,3</sup>, Huang Yingping<sup>1,2</sup> & Lv Yuanfei<sup>2\*\*</sup>

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

(2. Engineering Research Center of Eco-Environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

(3. College of Biological and Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

**Abstract:** Periodic water-level fluctuations in the Three Gorges Reservoir have led to distinct distribution patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils across different elevations of the drawdown zone. From the perspective of coupling between soil colloids and water levels, this study compared the colloidal properties and PAH distribution in soils at multiple elevations (155–185 m) in the Xiangxi River bay before and after a complete water-level fluctuation cycle (from June 2022 to June 2023), to elucidate the redistribution mechanism of PAHs driven by artificial water-level regulation. The results showed that the total PAH content in soils of the drawdown area declined by 10.8–59.6% after water-level fluctuation. Soil colloids from different elevations exhibited high stability, which facilitated the transport of the PAH monomer phenanthrene (Phe) in porous

\* 2025-11-03 收稿; 2025-12-11 收修稿稿。

国家自然科学基金项目(42107441, 42177397, 22136003)、中国博士后科学基金项目(2023M742044)、湖北省自然科学基金项目(2025AFB069)和三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金(2024KGC04)联合资助。

\*\* 通信作者;E-mail: yuanfei@whu.edu.cn。

media. Among all elevations, soil colloid characteristics and PAH distribution at 165 m were most sensitive to water-level variations. Fluctuations markedly altered soil colloid properties at this elevation: after water-level variation, the specific surface area of soil colloids increased by 70.7%, colloid particle size decreased by 13.3%, the absolute value of the Zeta potential rose by 18.8%, and the critical flocculation concentration (CFC) increased fourfold compared to pre-fluctuation values, indicating enhanced colloidal stability and transport capacity. Pearson correlation analysis confirmed that colloid stability and Zeta potential ( $p < 0.01$ ) were the key factors controlling PAH distribution in drawdown area soils during water-level fluctuations. This implies that artificial water-level regulation drives the “sink–source” transformation of PAHs in soil by modifying colloid stability and physicochemical properties. These findings offer insights for understanding the impact of water-level fluctuations on exposed-zone ecosystems and for managing PAH pollution in reservoir waters.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; water-level fluctuation; water-level fluctuation zone; soil colloid; polycyclic aromatic hydrocarbons transport

三峡大坝是世界上规模最大的水利工程之一，其自 2003 年蓄水后形成的高强度、可控的周期性水位调节，兼顾了发电、泄洪与航运等功能<sup>[1]</sup>。这种强人为干预的水文模式，在库区形成了面积广达 300 km<sup>2</sup>、高程落差达 30 m 的典型水库消落带<sup>[2]</sup>。相较于天然湖泊相对平缓的季节性水位波动，水库消落带经历着剧烈、频繁且受人工严格调度的“淹没-落干”循环，深刻地重塑了消落带生态系统结构和功能。作为库岸与水库水体的关键过渡带，消落带是拦截陆源污染物和接收水体沉降物的关键区域，扮演着库区污染物重要的“汇”角色<sup>[3]</sup>。然而，在人工水位快速消涨的驱动下，该区域又极易转化为污染物（尤其是吸附性污染物）向水体释放的潜在“源”<sup>[4]</sup>。水位消涨通过其伴随的干湿交替、水力剪切及水化学条件的剧烈波动，会深刻影响土壤环境变化<sup>[5-7]</sup>，特别是土壤胶体的释放及其理化性质的改变，进而影响赋存污染物的环境行为与“汇-源”转化动态，对以三峡水库为代表的大型人工湖泊水质安全构成潜在威胁<sup>[8]</sup>。因此，深入解析人工水位调度对消落带污染物迁移转化的调控机制，对保障大型水库及下游水环境安全至关重要。

在消落带富集的多类污染物中，多环芳烃（Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs）因其高毒性和持久性而备受关注<sup>[9-11]</sup>。三峡库区航运活动、燃料燃烧等人类活动导致消落带土壤普遍存在 PAHs 污染<sup>[12]</sup>。值得注意的是，已有研究通过野外调查揭示了水位消涨前后消落带土壤 PAHs 宏观分布格局存在显著的差异性<sup>[13]</sup>。这一宏观现象表明，水位调度强烈地驱动了 PAHs 在消落带内的再分配过程。然而，导致这种再分配的内在微观机制，特别是“胶体介导的迁移”这一关键路径的具体贡献与运作方式，目前仍是一个尚未明晰的科学问题。现有研究多聚焦于宏观尺度库区 PAHs 的浓度分布与迁移行为<sup>[12]</sup>，对水位消涨驱动下水-土界面这一关键界面上，PAHs 迁移的微观过程与机制，特别是在人工调度引发的独特水动力和水化学条件下的响应机制，仍缺乏深入认知。厘清这一过程是理解水库运行独特生态效应、精准防控水库型湖泊污染风险的科学基础。

土壤胶体（粒径 $<1 \mu\text{m}$ ），因其巨大的比表面积、强吸附能力和高迁移能力，公认为污染物在环境中迁移的重要载体<sup>[14, 15]</sup>。周期性人工水位消涨带来的高强度干湿交替、水力剪切及伴随的水化学条件（如离子强度、pH）的急剧变化<sup>[16]</sup>，已被证实会显著且区别于自然过程地破坏消落带土壤团聚体结构<sup>[5, 17]</sup>，促进土壤胶体的原位释放并增强其迁移潜力<sup>[18]</sup>。同时，这种独特的水位波动过程也可能显著改变释放胶体的理化性质（如比表面积、有机质含量、表面电荷等）<sup>[19]</sup>，这些性质共同决定了胶体自身的稳定性及其运载污染物的能力<sup>[20]</sup>。对于疏水性 PAHs 而言，其极易吸附于有机质丰富的胶体表面，以胶体-PAHs 共迁移的形式显著增强其向水体的迁移通量<sup>[21, 22]</sup>。因此，人工水位消涨通过改变土壤胶体释放动力学与性质，进而促进胶体介导的 PAHs 迁移，构成了水库消落带污染物“源-汇”转化中一个潜在且关键的作用链条。虽然室内实验已证实胶体对 PAHs 迁移的促进作用<sup>[21]</sup>，但在真实水库水位消涨情景下，土壤胶体特征动态变化如何响应人工调度引发的水位波动，并进而驱动消落带土壤 PAHs 空间分布格局的改变，其内在机理尚不明确。

本研究聚焦于人工水位消涨这一水库特有的核心环境过程，以三峡库区典型支流香溪河库湾消落带为研究对象，选取一个完整的水位消涨周期（2022 年 6 月 155 m 低水位至 2023 年 6 月回落至 155 m），系统研究：1）水位消涨前后，不同海拔消落带土壤 PAHs 组成与分布差异；2）水位消涨对上述海拔土壤胶体

稳定性及理化性质的影响；3）通过室内淋溶实验，定量评估土壤胶体对典型 PAHs 单体（菲，Phe）在多孔介质中迁移能力的动态变化；4）揭示水位消涨对消落带土壤 PAHs 分布的作用路径与机制。本研究从土壤胶体介导的污染物共迁移这一微观视角切入，旨在阐明人工水位调度驱动下三峡消落带土壤 PAHs 迁移再分布的内在机理。研究成果不仅将深化对复杂水动力条件下污染物界面行为规律的认识，更能为三峡及类似受人工调度影响的水库/湖泊的生态友好型水位调度策略、消落带污染精准阻控提供关键科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

采样区域临近三峡库区香溪河峡口镇(31°7'7.6"N, 110°46'30.4"E), 具体位置及样点设置如图 1 所示。分别于 2022 年 6 月及 2023 年 6 月水位跌落至全年最低点时进行采样（该时间段内最低水位在 150 m 左右），按纵向间隔 10 m 划分样带，其中海拔 155 m、165 m、175 m 为消落带区域，海拔 185 m 为未淹没对照区（文中所述海拔高度是指采样点基于国家高程基准的绝对高程，用以精确界定其在消落带中的垂直位置），每个样带水平间隔 5 m 设置 3 个样方。为消除土壤空间异质性对结果的影响，确保水位消涨前后样品的可比性，本研究采用了严格的定位措施。在 2022 年 6 月首次采样时，使用高精度 GPS（精度<2m）记录了所有样方的中心坐标，并在每个样方附近埋设了带有编号的水泥桩作为永久标记。在 2023 年 6 月进行第二轮采样时，依据 GPS 坐标和物理标记定位，确保了在完全相同的样方位置进行土壤采集。表层土壤的采样深度为 0~20 cm。剔除石块和植物根茎后，用洛阳铲采集土壤样品，置于聚乙烯自封袋中避光保存并运回实验室。将运回的土壤于阴凉处风干，研磨并过 100 目筛，避光保存。测定 PAHs 的土壤需使用冷冻干燥机（冠森生物，中国）进行干燥处理，然后研磨过筛处理成约 1 mm 的颗粒，-4 °C 保存，于两周内测定。

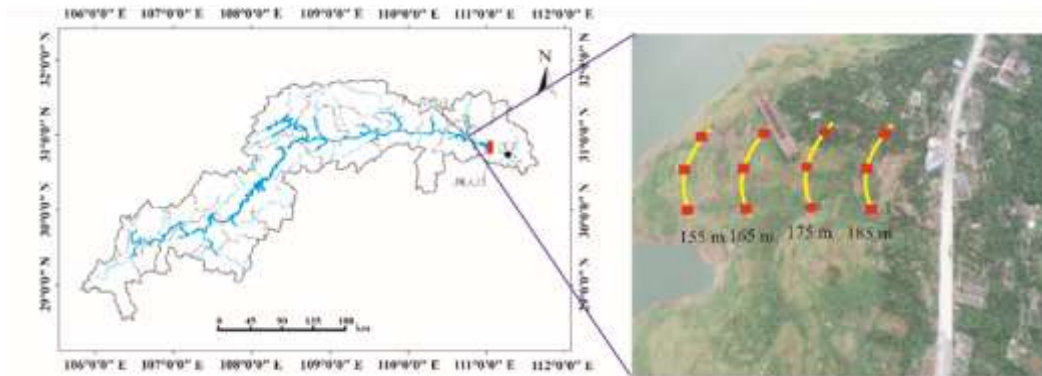


图 1 香溪河消落带样点布置图

Fig. 1 Sample sites in Water-level Fluctuation Zone of Xiangxi Bay

表 1 研究周期内各采样海拔水文参数估算

Table 1 Estimated hydrological parameters for each sampling elevation during the study period

海拔 (米)	淹没时长 (天)	落干时长 (天)	干湿交替频率 (淹没/落干)	水文特征
155	~270	~95	~2.84	长期淹没主导
165	~190	~175	~1.09	干湿交替均衡
175	~110	~255	~0.43	短期淹没主导
185	0	365	0	长期落干主导

## 1.2 土壤胶体的提取

土壤胶体的提取采用高速离心法<sup>[23]</sup>,通过设置不同的离心速度及离心时间,分级获得不同粒径的土壤颗粒,提取粒径小于 1  $\mu\text{m}$  的土壤胶体。具体方法为:按照土:水=1:30 的质量比混合土壤和去离子水,在超声波清洗机(春霖,中国)中超声 30 min,期间每隔 5 min 搅拌一次以保证胶体分散完全。超声后的溶液以 760  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  的转速离心 3 min,上清液再重复离心一次,此时上清液中均为小于 10  $\mu\text{m}$  的颗粒。上清液依次以 900  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、2000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  及 5000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  的转速离心,每次离心时间为 10 min,每一次离心均为上一步中的上清液,保留 5000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心后的沉淀物为粒径小于 1  $\mu\text{m}$  的土壤胶体。沉淀物冷冻干燥后使用玛瑙研钵研磨并过 100 目筛,混合均匀后于 -4  $^{\circ}\text{C}$  冰箱中保存待用。

## 1.3 土壤胶体理化参数表征

土壤胶体中的有机质(SOM)使用重铬酸钾氧化外加热法测量;Zeta 电位和粒径(GS)采用纳米粒径及 Zeta 电位分析仪(Zetasizer Nano ZS90,英国)测量;阳离子交换量(CEC)采用 HJ 889-2017《土壤阳离子交换量的测定 三氯化六氨合钴浸提-分光光度法》测定;比表面积(SA)和孔径(A)测定采用比表面积孔径分析仪(W-BK112,中国)。

## 1.4 土壤胶体稳定性评价

土壤胶体的稳定性通过临界絮凝值(CFC)表示,CFC 值越大,则土壤胶体体系越稳定,表现为抗凝聚能力更强。定义其相对分散浓度  $A/A_0 = 0.2$  时为临界絮凝值 CFC,其中 A 为不同水化条件下土壤胶体溶液静置 3 h 后上清液的吸光度, $A_0$  为相同时间下未作任何处理的土壤胶体悬浮液吸光度。 $A/A_0 > 1$  时,定义为胶体体系完全分散, $A/A_0 < 0.2$  时,定义为胶体体系基本凝聚<sup>[24]</sup>。

通过室内静态实验考察 pH 和不同  $\text{Na}^+$  离子强度对消落带土壤胶体稳定性的影响。首先配制 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的土壤胶体溶液,用盐酸和氢氧化钠溶液调节其 pH 值分别为 3、5、7、9、11;用 NaCl 溶液调节胶体溶液至不同的  $\text{Na}^+$  离子强度(10  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、20  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、40  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、60  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、80  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、200  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、300  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、400  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、500  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),取 25 mL 胶体溶液置于比色管中并充分混匀,静置 3 h 后取 3 mL 上清液,以蒸馏水做参比,使用紫外分光光度计测量 400 nm 处吸光度<sup>[23]</sup>。

## 1.5 土壤 PAHs 测定

采用固相萃取-高效液相色谱法<sup>[25]</sup>分析测定 16 种土壤 PAHs 单体:萘(Nap)、蒎(Acy)、二氢蒎(Ace)、芴(Fluo)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Flua)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、蒾(Chry)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DBA)、苯并[ghi]芘(Bghip)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)。高效液相色谱仪型号为 Waters 2695,搭配 2998 二极管(PDA)检测器,发射波长 254 nm,色谱柱为 Waters C18 反向 PAHs 专用色谱柱(4.6  $\times$  250 mm, 5  $\mu\text{m}$ ),流动相 A 为乙腈,流动相 B 为水,梯度洗脱条件为:5 min 50%A, 20 min 100%A, 28 min 100%A, 32 min 50%A,进样量为 20  $\mu\text{L}$ ,柱温设定为 30  $^{\circ}\text{C}$ ,流速为 1.50  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

以石英砂和样品分别进行空白加标和基体加标实验,待测样品中加入 50  $\mu\text{L}$  40  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  十氟联苯为回收率指示物,以此来校准实验中的误差。测得空白加标回收率为 73.2% ~ 84.8% (n=7),基体加标回收率为 74.1% ~ 91.3% (n=7),满足测定要求。

## 1.6 土壤胶体对 PAHs 的运移作用

为直接验证前文所述的、由水位消涨引致的土壤胶体性质变化是否确实会增强其运移 PAHs 的能力,我们开展了室内柱淋溶实验。该实验旨在评估经过一个完整水位消涨周期后,不同海拔土壤所释放的胶体在运移 PAHs 能力上的变化。实验中所使用的土壤胶体,即分别采集自水位消涨前(2022 年 6 月)和水位消涨后(2023 年 6 月)的不同海拔(155, 165, 175, 185 m)的样品(提取方法见 1.2 节),通过柱淋溶实验来探究土壤胶体对 PAHs 的共迁移作用。实验采用石英玻璃柱(高 15 cm,内径 5 cm),底部配有砂芯,阀门为聚四氟乙烯材质,使用蠕动泵从顶端输入液体,玻璃柱底部收集淋出液,填充物选用石英砂模拟多孔介质,堆积密度为 1.7  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,石英砂购于铭海石英砂厂,规格为 16~26 目,装填前依次用 0.05  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaOH、0.05  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{HNO}_3$ 、5%  $\text{H}_2\text{O}_2$  浸泡 3 h,再用去离子水反复冲洗至 pH 为中性,烘干后避光保存<sup>[26]</sup>。装填石英砂前在底部出水口处放入孔径为 1  $\mu\text{m}$  的尼龙滤膜,防止石英砂下渗的同时确保淋出液中均为小

于 1  $\mu\text{m}$  的土壤胶体。采用湿法装柱，总高 5 cm，以公式 (1) 确定填砂孔隙度，公式 (2) 确定孔隙体积 (PV)。

$$\vartheta = 1 - \frac{m}{\rho v} \quad (1)$$

$$PV = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times L \times \vartheta \quad (2)$$

式中,  $m$  为填砂质量(g);  $V$  是填充柱的体积( $\text{cm}^3$ );  $\rho$  为沙粒的密度(取堆积密度 1.7  $\text{g}/\text{cm}^3$ )。PV 为孔隙体积, (ml);  $D$  和  $L$  分别为柱的直径和长度(cm)。

淋溶实验具体操作为, 首先配制 300 mL 0.1 mg/L Phe 溶液, 加入 60 mg 土壤胶体, 以 140 转/min 的转速震荡 24 h, 保证胶体和 Phe 充分吸附; 先使用背景溶液去离子水冲洗至少 10 个孔隙体积 (PV), 以在体系中建立稳定的地球化学条件; 然后将 15 PV 的 Phe-胶体溶液引入柱中, 用蠕动泵调节输入溶液流速为 0.2 PV·/min, 柱口覆封口膜以防挥发, 再用 5 PV 背景溶液洗脱。使用棕色带聚四氟乙烯垫片盖的玻璃离心管每 1 PV 收集一次样品, 对淋出液进行 Phe 浓度检测, 并绘制  $C/C_0$ -PV 图。对照实验不加土壤胶体, 为单一 Phe 溶液, 其余步骤相同。

### 1.7 数据分析

数据处理采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件完成, 通过 Levene 检验评估方差齐性, 并运用单因素方差分析 (ANOVA) 及 Tukey HSD 多重比较法分析组间差异显著性, 运用 Pearson 相关分析法探讨变量间相关性。采样点位分布图基于 ArcMap 10.8 平台绘制, 其余图表均使用 Origin 2024 软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 水位消涨对消落带土壤胶体理化性质的影响

水位消涨对消落带土壤胶体的理化性质产生了选择性影响 (表 2)。消落带土壤化学性质对水位消涨响应敏感, 消落带海拔 155 m 和 165 m 处土壤胶体 SOM、CEC 和 Zeta 电位绝对值相对于水位消涨前均升高, 而 175 m 呈小幅度下降。其中 165 m 土壤胶体的 SOM、CEC 和 Zeta 电位绝对值对水位消涨响应最敏感, 分别升高了 6.89%、22.19%和 18.86%。这主要归因于 165 m 海拔频繁的干湿交替 (表 1)。该过程一方面破坏土壤团聚体, 释放被保护的原有 SOM; 同时, 其产生的物理碾磨作用促进了有机-无机复合胶体的形成。尽管落干期可能增强分解, 但强烈的物理扰动将更多有机质“转移”并“富集”于胶体组分中, 此为主导效应, 最终表现为胶体 SOM 的测量值升高<sup>[27-30]</sup>。土壤 SOM 通过提供负电荷位点来增加土壤的 CEC<sup>[31]</sup>, 这些负电荷位点可以吸附大量的负电荷离子, 从而增加土壤 Zeta 电位绝对值<sup>[32, 33]</sup>。同时, 消落带土壤胶体的物理性质在水位消涨后也发生了明显的改变, 具体表现为水位消涨后消落带 (除 155 m) 土壤胶体 SA 整体增加, GS 和 A 则整体表现为降低的趋势。其中 165 m 消落带土壤胶体的变化幅度最大, SA 增加了 70.68%, GS 减少了 13.32%, A 减少了 21.40%。主要是由于 165 m 处消落带在一个水位消涨周期内干湿交替频率接近 1:1, 该频率的干湿交替对土壤团聚体的结构破坏较大, 土壤颗粒逐渐分解为粒径更小比表面积更大的土壤胶体<sup>[34]</sup>。而海拔 155 m 土壤胶体 GS 的增加可能是由于在低海拔的 155 米区域, 水动力条件可能更强, 导致细小的胶体颗粒优先被水流选择性迁出<sup>[35]</sup>; 同时, 该区域可能经历更长的静水淹没期, 水化学条件的变化也促进了剩余胶体颗粒的聚沉<sup>[36]</sup>。这两种过程的净效应共同导致了该海拔土壤胶体中细颗粒组分的减少, 从而表现为提取出的胶体平均粒径 (GS) 增大。同时, 在未受水位直接淹没的 185 米对照区, 土壤胶体性质 (如比表面积) 在两个采样期间亦存在一定变化 (见表 2), 这清晰地揭示了季节性气候变化、大气沉降及周边人类活动等非水文因素对库岸土壤的普遍影响<sup>[11]</sup>。然而, 与消落带内海拔 (特别是 165 米关键界面) 所观测到的变化之剧烈、响应之敏感以及模式之规律相比, 对照区的变化在幅度和一致性上均处于从属地位。这种量级与模式上的显著差异证明, 尽管存在背景干扰, 周期性的人工水位调度仍是重构消落带环境并驱动其“汇-源”功能转化的压倒性驱动力。未来研究可通过设置更多远离水体的背景对照点, 以更精确地量化各类因素的相对贡献。

表 2 土壤胶体理化性质

Tab.2 Physical and chemical properties of soil colloidal

采样时间	海拔	有机质 (SOM)	Zeta 电位	粒径 (GS)	阳离子交换量 (CEC)	比表面积 (SA)	孔径 (A)
年-月	/m	/g·kg <sup>-1</sup>	/mV	/nm	/cmol·L <sup>-1</sup>	/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	/nm
2022-06 (消涨 前)	155	32.72±2.56 <sup>a</sup>	- 23.47±0.21 <sup>a</sup>	295.50±3.50 <sup>b</sup>	6.37±0.09 <sup>b</sup>	45.36±2.11 <sup>a</sup>	15.28±0.87 <sup>b</sup>
	165	33.79±2.01 <sup>a</sup>	- 19.27±0.40 <sup>b</sup>	323.35±11.64 <sup>a</sup>	6.78±0.46 <sup>b</sup>	32.81±3.52 <sup>b</sup>	19.49±1.42 <sup>a</sup>
	175	20.52±1.37 <sup>a</sup>	-22.7±0.23 <sup>a</sup>	318.57±4.32 <sup>a</sup>	6.69±0.12 <sup>a</sup>	38.20±2.65 <sup>b</sup>	18.27±1.23 <sup>a</sup>
	185	17.08±0.85 <sup>a</sup>	-25.9±0.56 <sup>a</sup>	303.00±8.29 <sup>a</sup>	7.41±0.22 <sup>a</sup>	41.73±3.07 <sup>b</sup>	16.93±2.20 <sup>a</sup>
2023-06 (消涨 后)	155	33.38±1.77 <sup>a</sup>	- 24.03±0.40 <sup>a</sup>	319.47±10.63 <sup>a</sup>	6.83±0.11 <sup>a</sup>	35.53±2.88 <sup>b</sup>	18.73±1.66 <sup>a</sup>
	165	36.12±2.14 <sup>a</sup>	- 22.90±0.50 <sup>a</sup>	280.27±2.47 <sup>b</sup>	8.29±0.34 <sup>a</sup>	56.00±2.47 <sup>a</sup>	15.32±2.30 <sup>b</sup>
	175	19.71±1.67 <sup>a</sup>	- 22.07±0.99 <sup>a</sup>	292.83±10.68 <sup>b</sup>	6.33±0.21 <sup>b</sup>	47.87±1.98 <sup>a</sup>	15.54±1.77 <sup>a</sup>
	185	16.52±1.41 <sup>a</sup>	- 25.57±0.61 <sup>a</sup>	287.47±3.35 <sup>b</sup>	7.03±0.14 <sup>b</sup>	47.69±2.54 <sup>a</sup>	15.68±0.92 <sup>a</sup>

注：不同字母表示不同土壤的理化性质存在显著性差异 ( $p < 0.05$ )

## 2.2 水位消涨对消落带土壤胶体稳定性的影响

土壤胶体的稳定性通过其相对分散浓度 ( $A/A_0$ ) 来表征 (详见 1.4 节), 不同水化条件下各海拔消落带土壤胶体的稳定性如图 2 所示。经过一轮消涨周期后, 消落带土壤胶体的稳定性发生了显著变化。消落带土壤胶体的稳定性随着 pH 值的增加而增加 (图 2 a, b), 主要是由于随着 pH 值的升高, 土壤胶体表面的负电荷密度增加, 从而增强了胶体颗粒间的静电斥力, 抑制了胶体的絮凝和沉降<sup>[30, 37]</sup>。不同 pH 条件下, 水位消涨前消落带各海拔土壤胶体处于稳定的 pH 范围略大于水位消涨后, 但是差别并不显著, 说明水位消涨对不同 pH 条件下消落带土壤胶体的稳定性影响不明显。土壤中的离子浓度是影响土壤胶体电荷的重要因素之一<sup>[30]</sup>。然而, 当 pH 值变化引起的离子浓度变化幅度较小时, 这种变化对土壤胶体电荷的影响也可能较小。土壤胶体表面的电荷和吸附的阳离子种类在离子浓度小幅波动时, 土壤胶体稳定性变化不明显<sup>[38]</sup>。消落带上缘 185 m 土壤胶体 CFC 数值在水位消涨前后也没有显著变化。

不同 Na<sup>+</sup>强度下土壤胶体的稳定性随着 Na<sup>+</sup>浓度的增加而逐渐降低 (图 2 c, d), 主要是由于土壤胶体带负电荷, 随着 Na<sup>+</sup>浓度的增加, 静电中和作用增强, 导致胶体间的静电斥力减弱, 从而容易致使土壤胶体絮凝失稳<sup>[39]</sup>。水位消涨前后不同 Na<sup>+</sup>强度下消落带不同海拔土壤胶体的稳定性变化不同。表现为水位消涨后 165 m 海拔消落带土壤胶体 CFC 数值增大了 4 倍, 稳定性显著增加, 具有较强的向水体迁移的风险。而 155 m 海拔消落带土壤 CFC 数值则在消涨后降低了 83%, 说明 155 m 海拔消落带土壤胶体对水位消涨的响应是稳定性降低。水位消涨前后消落带各海拔土壤胶体稳定性变化的原因可能与土壤胶体的理化性质变化有关。165 m 消落带土壤胶体比表面积显著增加, 而 155 m 土壤胶体比表面积则降低。土壤胶体通过较大的比表面积可以吸附更多的负电荷, 使得 Zeta 电位绝对值显著增加, 有利于保持胶体的稳定<sup>[30]</sup>。消落带上缘土壤胶体稳定性整体变化幅度 (50%) 较消落带土壤更低, 说明水位消涨过程是影响消落带土壤胶体稳定性的重要因素。

结合前期野外观测数据, 研究区域香溪河水体 pH 值长期稳定在 7.9~8.9, Na<sup>+</sup>强度稳定在 0.34~0.52 mmol·L<sup>-1</sup><sup>[6, 40]</sup>, 基于不同水化条件下土壤胶体稳定性的变化规律可知, 消落带土壤胶体在真实的长江水体中处于稳定状态, 具有良好的迁移能力, 可能成为污染物迁移的载体, 对水质安全存在隐患。

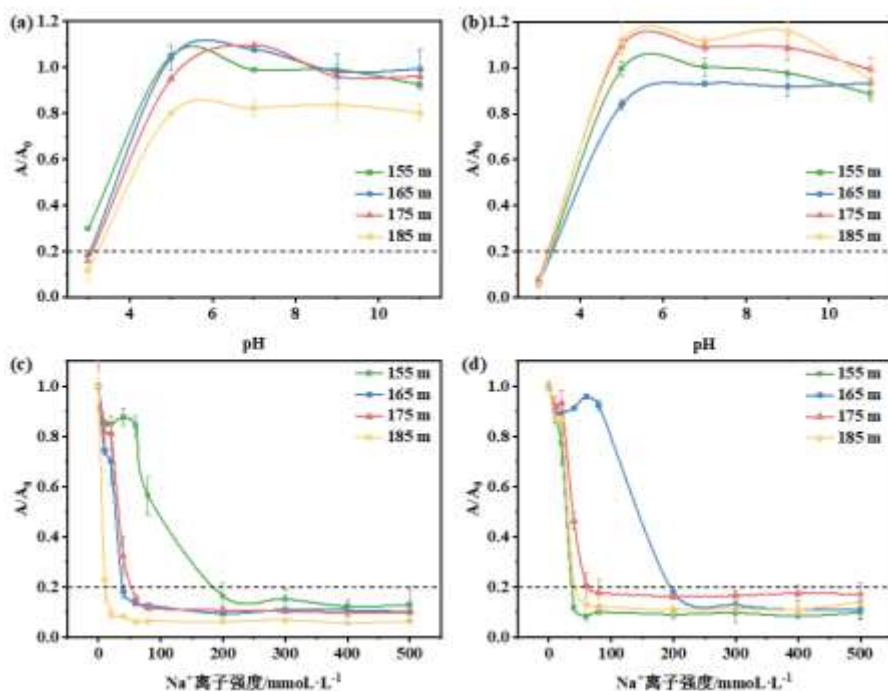


图 2 不同水化条件下土壤胶体的稳定性:水位消涨前 (a, c); 水位消涨后 (b, d); 不同 pH 条件 (a, b); 不同 Na<sup>+</sup>强度 (c, d)  
 Fig. 2 The stability of soil colloid under different hydration conditions: before water level fluctuation (a, c); After water level fluctuation (b, d); Different pH conditions (a, b); Different Na<sup>+</sup> intensities (c, d)

### 2.3 水位消涨对消落带土壤 PAHs 迁移的影响

比表面积较大的土壤胶体对疏水性有机污染物吸附能力强,可作为其环境迁移的载体,从而促进污染物在水土界面的迁移(即“促迁移”<sup>[35]</sup>)。水位消涨前后各海拔土壤胶体对 PAHs 单体 Phe 的促迁移情况如图 3 a, b 所示。由图可知,与空白无胶体的对照相比,土壤胶体的存在极大的促进了土壤 PAHs 单体 Phe 的迁移。主要是由于土壤胶体具有极大的比表面积,提供了更多的表面吸附位点,从而增强了其对 PAHs 的吸附能力<sup>[44]</sup>。并且土壤胶体表面通常带有负电荷,能够通过疏水作用有效吸附中性的 PAHs 分子,使其在水位消涨的扰动下,更容易向水体迁移。而不同海拔消落带土壤胶体对 Phe 迁移的促进作用在水位消涨前后有明显的区别,具体表现为,水位消涨后消落带及消落带上缘土壤胶体对 Phe 的促迁移作用增强。其中消落带 165 m 土壤胶体对 Phe 促迁移作用增量由消涨前 (36.76%) 提升到消涨后 (50.82%), 主要是由于水位消涨增加了 165 m 的 SA、Zeta 电位绝对值;增加的 SA 提供了更多吸附位点,促进了 Phe 的吸附。同时,更大的 CEC 使土壤胶体表面吸附了更多的负电荷,使得 Zeta 电位绝对值升高<sup>[44]</sup>,从而增加了带负电荷的胶体颗粒间的静电斥力,促进了土壤胶体的稳定<sup>[36]</sup>。稳定性增强,吸附容量升高,使得 165 m 土壤胶体对 Phe 的促迁移作用增强。而 155 m 土壤胶体对 Phe 的促迁移作用则在水位消涨后降低了 9.87%, 这种降低的趋势同样与 155 m 土壤胶体比表面积和土壤胶体稳定性的降低有直接联系。消落带 175 m 土壤胶体在水位消涨前后土壤胶体稳定性及比表面积具有小幅度提升,其对应的 Phe 迁移性能也小幅上涨,而消落带上缘 185 m 土壤胶体在水位消涨后对 Phe 促迁移的作用表现为增强,这个变化与 185 m 土壤胶体的比表面积的变化一致,比表面积的增加可能是消落带上缘土壤胶体促迁移作用增强的主要原因。但是与消落带土壤胶体不同的是,影响消落带上缘土壤胶体比表面积增加的原因不是水位消涨过程,而是库岸自然环境条件以及人为因素的作用。需要说明的是,室内淋溶实验采用均一石英砂旨在剥离土壤异质性,以凸显胶体自身性质的主导作用。真实环境中的复杂效应是未来研究的重要方向。

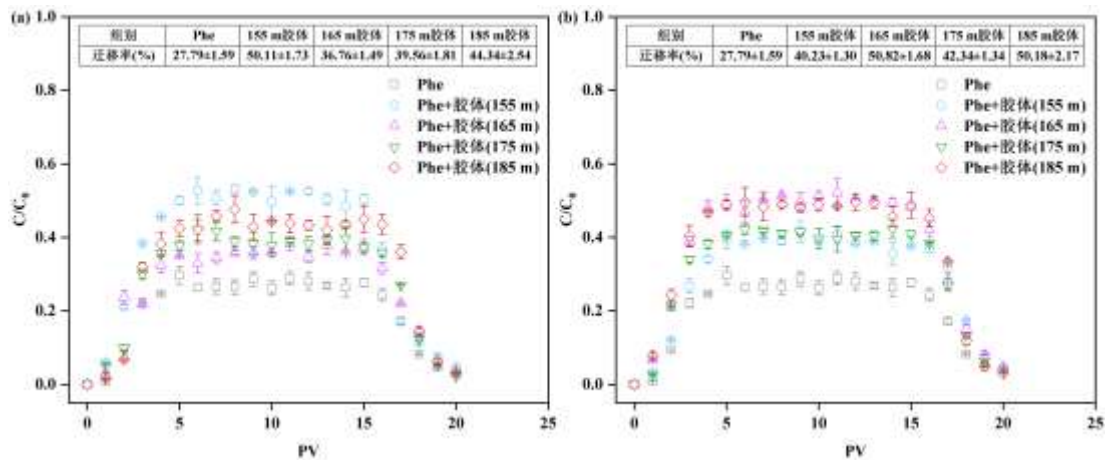


图 3 土壤胶体对 Phe 的迁移作用在水位消涨前 (a) 和水位消涨后 (b)

Fig.3 The migration of Phe under the effect of soil colloid before (a) and after (b) water level fluctuation

#### 2.4 水位消涨对消落带土壤 PAHs 分布的影响

不同海拔土壤的 PAHs 分布在消涨前后差异显著 (图 4 a, c), 具体表现为, 水位消涨前 (2022 年 6 月) 消落带土壤 16 种 PAHs 单体总量 ( $604.50 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}\sim 1066.53 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 显著大于水位消涨后消落带土壤 PAHs 的总量 ( $403.98 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}\sim 538.93 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 说明经过一个周期的水位消涨后, 消落带土壤 PAHs 发生明显的迁移或转化。水位消涨前后不同海拔土壤 PAHs 分布呈现出显著的差异。表现为水位消涨前土壤 PAHs 总量大小顺序为  $165 \text{ m} > 175 \text{ m} > 185 \text{ m} > 155 \text{ m}$ ; 水位消涨后, 土壤 PAHs 总量大小顺序为:  $155 \text{ m} > 165 \text{ m} > 175 \text{ m} > 185 \text{ m}$ 。其中 165 m 土壤 PAHs 总量降低幅度最大 (59.6%), 反映了大坝调度下消落带环境的特殊性。高强度、周期性的人工水文扰动, 通过剧烈改变土壤胶体的稳定性与迁移能力 (如 CFC 提升 4 倍), 启动了一个高效的“胶体介导的物理迁移通道”。淋溶实验证实, 此通道对 Phe 的迁移效率可达 50.82%。相较于以“转化”为特征的降解过程, 这种以“输运”为特征的物理迁移能够在短期内更直接、更大量地导致局部土壤中污染物总量的下降<sup>[44]</sup>。各海拔消落带土壤 PAHs 组成比例对水位消涨的规律存在差异 (图 3 b, d), 消落带 175 m 土壤低环 (2 环) PAHs 比例增加; 165 m 土壤中环 (3-4 环) PAHs 比例增加, 155 m 土壤中环和高环 (5-6 环) PAHs 比例增加, 总体表现为中高环 PAHs 单体逐渐向低海拔消落带土壤累积的趋势, 主要是由于中高环 PAHs 的疏水性更强<sup>[42]</sup>, 更容易与土壤胶体结合, 以“胶体+PAHs”的形式迁移<sup>[18, 43]</sup>。“胶体+PAHs”迁移过程中土壤胶体颗粒相互碰撞可能会导致胶体的聚沉, 从而沉降到较低海拔土壤上。消落带上缘土壤 PAHs 组成比例在两个时间段的变化不受水位消涨的影响, 主要是由 PAHs 来源决定, PAHs 来源不同, 其组成特征不同<sup>[44]</sup>。

对比 2022 与 2023 年水位消涨前的数据, 不同海拔 PAHs 总量的初始分布顺序存在差异, 表明水库消落带 PAHs 负荷具有显著的年际变异性。这种变异可能源于年际水文调度、气候条件及人类活动等因素的波动, 共同影响每年 PAHs 的输入通量与初始空间分配, 形成各周期独特的“起始背景”。本研究作为一项深入案例, 核心在于揭示在一个完整水文周期内, 由人工水位调度驱动、通过改变胶体性质而实现的 PAHs 迁移再分布机制。尽管初始背景存在差异, 该机制仍持续主导 PAHs 的再分布过程。本研究基于单一年份数据, 成功捕捉到这一机制的明确“信号”。未来仍需开展多年连续观测, 以区分年际输入与水文清除的相对贡献, 并验证该迁移规律的长期稳定性。

#### 2.5 消落带土壤 PAHs 分布与胶体特征相关性分析

为定量揭示土壤胶体特征与 PAHs 分布之间的关系, 采用 Pearson 相关性分析对二者进行了剖析 (图 5)。结果显示, 胶体-PAHs 复合物的迁移主要受胶体稳定性和 Zeta 电位调控。具体而言, 在水位消涨前, 土壤 PAHs 总量与胶体迁移量呈正相关, 表明胶体释放虽能促进 PAHs 运移, 但由于其自身稳定性较低,

在迁移过程中易发生絮凝滞留，反而导致 PAHs 在局部积累。然而，经过一个周期的水位消涨后，这一系统被显著重构——土壤 PAHs 总量与迁移量转为负相关。这一关键转变意味着，胶体稳定性已成为控制 PAHs 最终分布格局的主导因素：水位消涨过程通过提升胶体比表面积与 Zeta 电位绝对值、优化其粒径分布，使胶体稳定性倍增（CFC 增至 4 倍），从而驱动胶体-PAHs 复合体更高效地迁出水土界面（Phe 迁移率提升至 50.82%）。这最终导致消落带内 PAHs 总量整体下降（10.8%–59.6%），并促使疏水性更强的中高环 PAHs 向低海拔（155 m）富集。相关性系数在水位消涨前后发生明显变化，印证了水位消涨通过多因子协同作用，深刻改变了胶体理化性质，进而显著影响了其对 PAHs 的迁移路径与最终归宿。

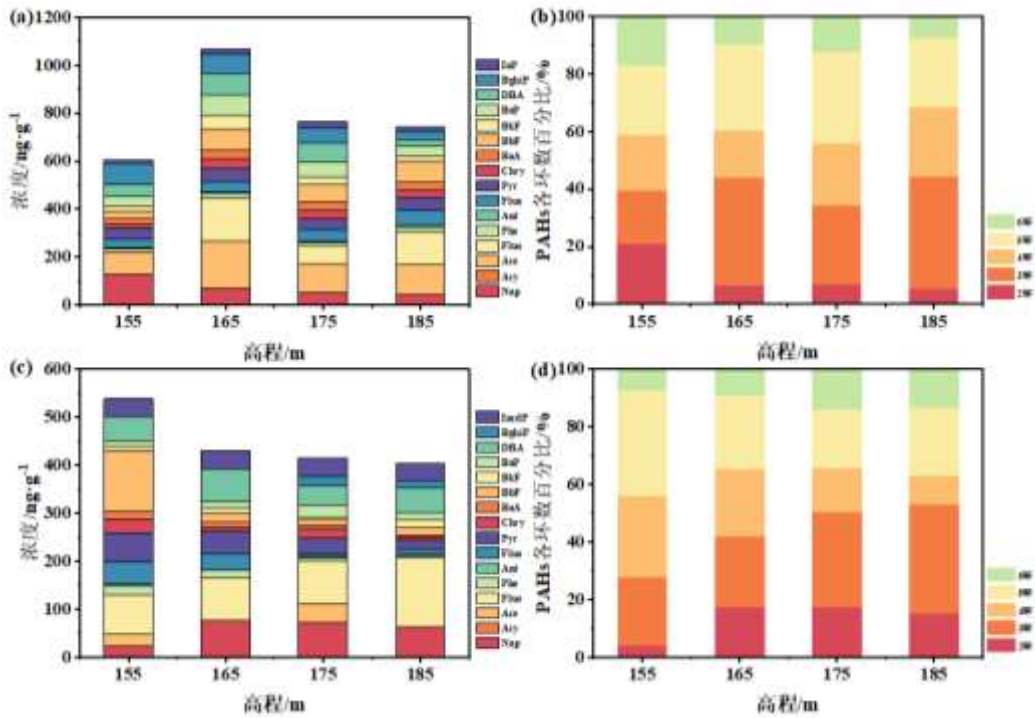


图 4 消落带土壤 PAHs 含量及组成在水位消涨前 (a, b) 和水位消涨后 (c, d)

Fig. 4 The content and composition of PAHs in soil of the WLFZ before (a, b) and after (c, d) water level fluctuation

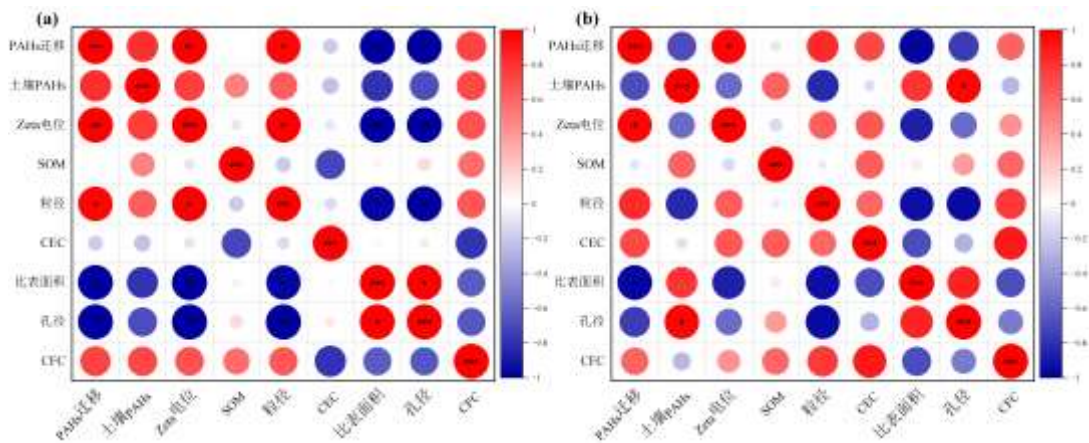


图 5 土壤胶体特征与 PAHs 分布之间相关性分析在水位消涨前 (a) 和水位消涨后 (b) (\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ )

Fig. 5 Correlation analysis between soil colloid characteristics and soil PAHs distribution before (a) and after (b) water level fluctuation

(\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ )

基于上述分析,本研究进一步揭示了一个潜在稳定的环境过程:在经过一个完整的水位消涨周期后,165 m 海拔的土壤胶体性质与 PAHs 迁移能力发生了最为剧烈的变化。这一现象的核心驱动力在于该海拔独特的、接近 1:1 的干湿交替频率(表 1)。因此,可以推断只要三峡水库维持其现有的水位调度模式,这一物理驱动过程就会持续在 165 m 关键界面发挥最强作用,从而使“胶体活化-污染物迁移”机制成为一个稳定、可重复的环境过程。本研究观测到的显著变化幅度,可能代表了土壤系统从初始状态向受水文周期调控的动态平衡态转变的“首次响应”。未来的长期观测将有助于验证这一动态平衡,并精确量化该迁移通量的长期稳定值。

### 3 结论

本研究基于土壤胶体介导 PAHs 迁移的新视角,揭示了人工水位调度驱动三峡库区消落带 PAHs 再分布的核心机制,即水位消涨通过调控胶体理化性质,影响胶体稳定性,从而改变 PAHs-胶体复合体的迁移效率,从而重塑 PAHs 的空间分配格局。主要结论如下:

1) 消落带 165 m 海拔是水文调控的关键界面,165 m 海拔消落带特殊的干湿交替频率使该区域胶体理化性质响应最敏感——比表面积增加 70.7%、Zeta 电位绝对值增加 18.8%,临界絮凝值(CFC)提升 4 倍,成为胶体稳定性增强和 Phe 迁移效率跃升的核心区域。

2) 胶体介导的消落带土壤 PAHs “汇-源”转化机制,Pearson 相关性分析表明,胶体稳定性与 Zeta 电位是 PAHs 迁移的主控因子;胶体-PAHs 共迁移导致消落带 PAHs 总量降低 10.8%–59.6%,并驱动中高环 PAHs 向 155 m 低海拔富集,形成“高迁移-低残留”模式。

3) 从湖泊水库的管理角度,需要对库区消落带 165 m 区域进行重点管控,通水位调度过程中控制淹水落干时间对土壤胶体性质进行调控,具体调控方案需未来结合室内控制实验进一步探究淹水落干时间比土壤胶体性质的影响来确定。

综上所述,本研究揭示了水位消涨对三峡库区消落带土壤 PAHs 再分布的影响机制。水位消涨通过改变土壤胶体的理化性质和稳定性,进而影响土壤 PAHs 的迁移和分布。需要指出的是,本研究主要通过高速离心法提取并聚焦于土壤基质来源的胶体( $<1\ \mu\text{m}$ )。尽管这部分胶体被证实对 PAHs 迁移有关键影响,但真实环境中存在的生物胶体(如细菌、病毒)以及溶解性有机质同样会与污染物发生相互作用。这些组分之间的复杂协同或竞争效应,是未来研究中需要进一步厘清的重要科学问题。并且,年际间的水文调度、气候条件等因素可能产生影响,未来需要通过多年份、多点的连续观测,以验证本研究发现规律的普适性和稳定性。

### 4 参考文献

- [1] Qiu RJ, Wang D, Singh VP, et al. Integration of deep learning and improved multi-objective algorithm to optimize reservoir operation for balancing human and downstream ecological needs. *Water Research*, 2024, **253**: 121314.
- [2] Zhang AR, Qiu LX, Chen JY, et al. Diffusion Behavior of PAHs in the Soil of Water Level Fluctuation Zone during the Dry-Wet Alternation Process in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2024, **70**(1): 17-26. [张傲然, 邱霖萱, 陈婧怡, 等. 三峡库区干湿交替过程中消落带土壤多环芳烃的扩散行为. 武汉大学学报(理学版), 2024, **70**(1): 17-26.]
- [3] Zhong ZL, Bing HJ, Wu YH, et al. Distribution of cadmium in soils along the altitude of riparian zone (Fengdu-Zhongxian section) in the Three Gorges Reservoir region. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(6): 1601-1611. [钟志淋, 邴海健, 吴艳宏, 等. 三峡库区丰都-忠县段消落带不同高程土壤镉及其形态的分布特征. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1601-1611.]
- [4] Wang J, Henkelmann B, Bi Y, et al. Temporal variation and spatial distribution of PAH in water of Three Gorges Reservoir during the complete impoundment period. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(10): 7071-7079.
- [5] Ni YZ, Xia ZY, Yang YS. Spatial and temporal evolution and factors influencing soil aggregate stability in the riparian zone during exposure A case study of the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2024, **957**: 177408.

- [6] Wang K, Pang Y, He C, et al. Three Gorges Reservoir construction induced dissolved organic matter chemistry variation between the reservoir and non-reservoir areas along the Xiangxi tributary. *Science of The Total Environment*, 2021, **784**: 147095.
- [7] Zhang A, Xie Z. C4 herbs dominate the reservoir flood area of the Three Gorges Reservoir. *Science of The Total Environment*, 2021, **755**: 142479.
- [8] Xi Y, Chen JY, Ji DB, et al. Research Progress on Eco-Environmental Impact of the Water Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Wuhan University(Natural Science Edition)*, 2024, **70**(1): 1-6. [席颖, 陈婧怡, 纪道斌, 等. 三峡库区消落带生态环境影响研究进展. 武汉大学学报(理学版), 2024, **70**(1): 1-6.]
- [9] Liu D, Luo Y, Bao W H, et al. Data-Driven Insights into the Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Marine Bays. *Environmental Science & Technology*, 2024, **58**: 15202-15213.
- [10] Wei LJ, Lv JY, Zuo PJ, et al. The occurrence and sources of PAHs, oxygenated PAHs (OPAHs), and nitrated PAHs (NPAHs) in soil and vegetation from the Antarctic, Arctic, and Tibetan Plateau. *Science of The Total Environment*, 2024, **912**: 169394.
- [11] Huang YP, Jin L, Zhu C, et al. Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3808-3819. [黄应平, 金蕾, 朱灿, 等. 三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价. 环境科学, 2021, **42**(8): 3808-3819.]
- [12] Wang FW, Zhao DY, Lu PL, et al. Air-plant interaction and air-soil exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons in a large human-influenced reservoir in southwest China. *Environmental Pollution*, 2024, **355**: 124216.
- [13] Huang YP, Li K, Liu HG, et al. Distribution, sources and risk assessment of PAHs in soil from the water level fluctuation zone of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, **44**(8): 2615-2628.
- [14] Wang JL, Han ZM, Zhang CH, et al. Effects of soil colloids on adsorption and migration of benzo(a)pyrene on contaminated sites under runoff infiltration processes. *Environmental Pollution*, 2024, **353**: 124150.
- [15] Xu DP, Cui FF, Li HL, et al. Releasing characteristics of colloids from contaminated-soil and their effect on transportation of zinc. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(5): 2495-2502. [许端平, 崔芳菲, 李翰良, 等. 污染土壤胶体释放特征及其对锌运移的作用. 环境工程学报, 2015, **9**(5): 2495-2502.]
- [16] Jahan S, Alias YB, Bakar AFBA, et al. Transport and retention behavior of carbonaceous colloids in natural aqueous medium: Impact of water chemistry. *Chemosphere*, 2019, **217**: 213-222.
- [17] Gratien N, Li H, Bao YH, et al. Soil aggregate disintegration effects on soil erodibility in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Research*, 2023, **217**: 114928.
- [18] Zhang W, Sun HL, Tang XY. Soil colloid release and transport in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(1): 188-194. [张维, 孙虹蕾, 唐翔宇. 三峡水库消落带土壤胶体释放与迁移特征. 农业工程学报, 2021, **37**(1): 188-194.]
- [19] Zhao Y, Fan D, Ma JB, et al. Visualization of phenanthrene effect on biochar colloids transport in porous media. *Science of The Total Environment*, 2024, **927**: 171867.
- [20] Shang Q, Chi J. Mechanistic insight into the effects of interaction between biochar and soil with different properties on phenanthrene sorption. *Journal of environmental management*, 2024, **367**: 121961.
- [21] Pal P, Corpuz AG, Hasan SW, et al. Treatment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from aqueous solutions by flotation using colloidal gas aphyrons. *Separation and Purification Technology*, 2022, **285**: 120367.
- [22] Zhao L, Shanguan Y, Yao N, et al. Soil migration of antimony and arsenic facilitated by colloids in lysimeter studies. *Science of The Total Environment*, 2020, **728**: 138874.
- [23] Du XL, Liang H, Fang X, et al. Characteristics of colloids and their affinity for heavy metals in road runoff with different traffic in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(16): 20082-20092.
- [24] Shang S B, Wang F Y, Li X Q. Study on Stability and Mobility of Soil Colloids Based on Physicochemical Property. *Soils*, 2010, **42**(6): 1015-1019. [尚书波, 王丰雨, 李绪谦. 土壤胶体理化性质对其稳定性和可移动性的影响研究. 土壤, 2010, **42**(6): 1015-1019.]
- [25] Cai J, Wu X, Yang J, et al. Does higher ratio of wheat straw addition decrease PAHs degradation in PAHs-contaminated paddy

- soils and PAHs concentrations in rice? *Science of The Total Environment*, 2024, **954**: 176533.
- [26] Lv JJ, Xu DP, Li FS. Effects of Different Environmental Factors on the Transportation of Black Soil Colloid in Saturated Porous Media. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(8): 875-881. [吕俊佳, 许端平, 李发生. 不同环境因子对黑土胶体在饱和和多孔介质中运移特性的影响. *环境科学研究*, 2012, **25**(8): 875-881.]
- [27] Jiang W, Li T, Ma J, et al. Organic materials input promotes the soil aggregate sequestration through changing soil aggregates structure and stability. *Journal of Environmental Management*. 2025, **393**: 127027.
- [28] Cao S, Zhou Y, Zhou Y, et al. Soil organic carbon and soil aggregate stability associated with aggregate fractions in a chronosequence of citrus orchards plantations. *Journal of Environmental Management*. 2021, **293**: 112847.
- [29] Menon M, Mawodza T, Rabbani A, et al. Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability. *Geoderma*. 2020, **366**: 114259.
- [30] Pan Y, Chen C, Shang J. Effect of reduced inherent organic matter on stability and transport behaviors of black soil colloids. *Chemosphere*. 2023, **336**: 139149.
- [31] Bi XQ, Chu H, Fu MM, et al. Distribution characteristics of organic carbon (nitrogen) content, cation exchange capacity, and specific surface area in different soil particle sizes. *Scientific Reports*, 2023, **13**(1): 12242.
- [32] Liu Y, Zhuang Y, Liu Z. Micro-mechanism for reverse electro-osmotic flow in kaolin with negative zeta potential. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2025, **55**(6): 1571-1586.
- [33] Jiang TY, Jiang J, Xu RK, et al. Effect of Biochar from Rice Straw on Adsorption of Cd(II) by Variable Charge Soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(6): 1111-1117. [蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 等. 稻草生物质炭对 3 种可变电荷土壤吸附 Cd(II)的影响. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(6): 1111-1117.]
- [34] Lu ZC, Bao XY, Xiao L, et al. Stability of Soil Aggregates in Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Studied Using the Le Bissonnais Method. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, **37**(5): 115-120. [陆铸畴, 包忻怡, Xiao LIU, 等. 应用 Le Bissonnais 法研究三峡库区消落带土壤水稳性团聚体稳定性. *灌溉排水学报*, 2018, **37**(5): 115-120.]
- [35] Liu F, Xu B, He Y, et al. Differences in transport behavior of natural soil colloids of contrasting sizes from nanometer to micron and the environmental implications. *Science of The Total Environment*. 2018, **634**: 802-810.
- [36] Chen Y, Ma J, Wu X, et al. Sedimentation and Transport of Different Soil Colloids: Effects of Goethite and Humic Acid. *Water*. 2020, **12**(4).
- [37] Zhang R, Chen YL, Wu XJ, et al. Stability of different types of soil colloids under the influence of ionic strength and humic acid. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(6): 2347-2357. [张然, 陈雅丽, 武晓娟, 等. 离子强度和胡敏酸影响下不同土壤胶体稳定性研究. *环境科学学报*, 2021, **41**(6): 2347-2357.]
- [38] Zhang YK, Tian R, Tang J, et al. Specific ion effect of H<sup>+</sup> on variably charged soil colloid aggregation. *Pedosphere*, 2020, **30**(6): 844-852.
- [39] Liu XW, Shao MY, Xu SH, et al. Effect of pH and cations on co-transport of ciprofloxacin and soil colloids. *China Environmental Science*, 2023, **43**(9): 4768-4779. [刘晓雯, 邵明艳, 徐绍辉, 等. pH 值和阳离子对环丙沙星与土壤胶体共运移的影响. *中国环境科学*, 2023, **43**(9): 4768-4779.]
- [40] Fang LC, Ren YF, Bi YH, et al. Responses of phytoplankton functional groups to water level fluctuations in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(5): 1538-1548 [方灵超, 任玉峰, 毕永红, 等. 三峡水库香溪库湾浮游植物功能群对水位变化的响应. *湖泊科学*, 2023, **35**(5): 1538-1548.]
- [41] Farahani E, Emami H, Fotovat A, et al. Effect of different K:Na ratios in soil on dispersive charge, cation exchange and zeta potential. *European Journal of Soil Science*, 2018, **70**: 311-320.
- [42] Li W, Wang HW, Meng XY, et al. Research on the efficiency of surfactant leaching coupled with chemical oxidation on high rings polycyclic aromatic hydrocarbons removal from coking contaminated soil. *China Environmental Science*, 2023, **43**(12): 6474-6481. [李伟, 王华伟, 孟祥宇, 等. 表面活性剂淋溶-化学氧化处理焦化场地高环多环芳烃污染土壤. *中国环境科学*, 2023, **43**(12): 6474-6481.]
- [43] Chen J, Wang XJ, Tao S. The Influences of Soil Total Organic Carbon and Clay Contents on PAHs Vertical Distributions in Soils

in Tianjin Area. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(4): 79-83. [陈静, 王学军, 陶澍. 天津地区土壤有机碳和粘粒对 PAHs 纵向分布的影响. *环境科学研究*, 2005, **18**(4): 79-83.]

- [44] Wang Z, Liu YJ, Zhang AN, et al. Occurrence characteristics, environmental trend, and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water environment of industrial zones. *Environmental research*, 2024, **245**: 118053.