

# 向家坝水库沉积物理化特性及其营养释放风险

米武娟<sup>1</sup>,张地继<sup>2</sup>,许元钊<sup>1</sup>,孙志峰<sup>2</sup>,张春光<sup>2</sup>,刘芳枝<sup>2</sup>,毕永红<sup>1</sup>

(1.中国科学院淡水生态与生物技术国家重点实验室;水生生物研究所,武汉 430072;

2.中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心,湖北宜昌 443000)

**摘要:**为了解向家坝水库沉积物碳、氮、磷营养负荷及其释放风险,采集水库不同位点的沉积物检测其理化性状,通过室内静态模拟试验评估营养盐释放风险.结果表明,沉积物以细小颗粒粉沙和黏土等为主,粉砂占比最高;pH呈中性至弱碱性;含水率较高;氧化还原电位表现为较强还原性.总氮(TN),总磷(TP)和总有机碳(TOC)的质量含量分别为(1.03±0.19) g/kg,(0.78±0.13) g/kg,(8.30±2.07) g/kg.沉积物营养盐空间分布特征总体表现为干流高于支流库湾,坝前湖泊区高于库中过渡区;垂向方向变化幅度小,无明显规律.静态模拟释放试验结果表明TN,TP释放通量分别为1.48~5.26 mg/(m<sup>2</sup>·d)和1.46~2.10 mg/(m<sup>2</sup>·d);空间上呈现干流TN释放通量高于支流,支流TP释放通量高于干流的特征;TOC含量处于较低水平和较低的生态风险.TN与TP的来源多样,为水库的潜在污染源.

**关键词:**向家坝水库;沉积物;理化性质;营养盐释放

**中图分类号:**X524

**文献标志码:**A

沉积物是生态系统的重要组成部分,是水体碳、氮、磷等营养盐的主要蓄积库<sup>[1]</sup>.沉积物理化性质可作为人类活动对河流湖库影响的历史记录指标,同时也是研究氮、磷在水-沉积物界面迁移转化的基础信息<sup>[2]</sup>.积累在沉积物中的氮、磷等营养盐在自然扰动和外在作用下通过再悬浮、扩散和对流等形式可重新释放到上覆水中对生态系统产生影响<sup>[3]</sup>,是水体污染物的“源”与“汇”.

向家坝水库位于云南和四川接壤的金沙江下游河段,为典型河道型水库.2013年正常蓄水运行后,水文情势发生改变,局部水域水体交换能力变差,加上水库沿岸各种污染排入库,使得水体营养化水平升高.目前向家坝水库蓄水运行对生态环境影响的研究主要集中在水库水质、水温、温室气体、营养盐含量及滞留效应等方面<sup>[4-6]</sup>,而对水库沉积物理化特性及营养负荷研究较少.为深入认识沉积物的基本理化性状及其对水库水环境的潜在影响,本研究以向家坝水库为对象,分析了沉积物理化特性,营养盐含量及分布特征,同时评估了氮、磷静态释放风险,对了解向家坝水库沉积物现状,客观评价沉积物氮、磷营养盐潜在释放能力及其生态风险具有重要意义,为水库正常蓄水后的水体保护和沉积物研究与管理提供基础数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域和样品采集

在向家坝水库干支流共布设8个采样点(附图1),干流依次为S1~S4,沿程支流库湾为T1~T4,按照水库形态结构和水文特性进行分区,坝前水域S1,S2和T1为湖泊区,库中S3,S4,T2,T3和T4为过渡区,样点主要分布在库区水华易发河段、城镇人口聚集区以及渔业养殖区.于2019年9月采用柱状采泥器原位采样,柱状样品采集深度为20~22 cm,每5 cm为间隔分层,每个样点设3个平行.样品用自封袋分装并编号,

收稿日期:2021-04-01;修回日期:2021-05-02.

基金项目:国家自然科学基金(31971477);中国长江三峡集团有限公司2019年向家坝水库水华监测项目(SXSN/4495).

作者简介:米武娟(1984-),女,湖南邵阳人,中国科学院水生生物研究所实验师,研究方向为水域生态与水污染,E-mail:miwj@ihb.ac.cn.

通信作者:毕永红,中国科学院水生生物研究所研究员,博士生导师,E-mail:biyh@ihb.ac.cn.

遮光低温保存运回实验室进行前处理和后续分析,一部分样品用于粒径分析和碳、氮、磷等测定,一部分用于沉积物氮、磷营养盐静态释放模拟试验。

## 1.2 样品分析方法

使用 WTW 多参数测定仪现场测定沉积物 pH,氧化还原电位(ORP),含水率利用干湿质量差值测定。样品筛剔除 1 000  $\mu\text{m}$  以上颗粒物后采用马尔文激光粒度仪 Mastersizer 3000 测定粒径分布,根据国际上应用较广的伍登-温特华斯(Udden-Wentworth)的粒度分级方案<sup>[7]</sup>进行分级。样品风干研磨过 100 目筛后,总氮(TN)测定采用凯氏法(HJ 717-2014),总磷(TP)测定采用碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ 632-2011),总有机碳(TOC)使用 TOC/TN 分析仪(德国耶拿 MultiN/C 3100)测定。水体中 TN,TP 的测定分别采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法(GB 11893-89),钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)。

营养盐静态释放试验装置采用直径 10 cm,高 60 cm 的玻璃圆柱形容器。每个装置内装入 10 cm 厚柱样,沿壁缓慢注入 4.5 L 去离子水后静置,在室温 25.0  $^{\circ}\text{C}$  下进行静态培养试验。每 5 d 从装置上层和下层各取 25 mL 水样测定氮、磷含量。取样时尽量减少对沉积物样品的扰动,保持试验环境条件不变。试验共 35 d,氮、磷释放通量计算采用以下公式<sup>[8]</sup>:

$$R_t = (V(C_f - C_0) + \sum_{i=1}^n V_i C_i) / (A \cdot t), \quad (1)$$

式中, $R_t$  为到第  $t$  天为止沉积物氮、磷的释放通量( $\text{mg/L}$ ); $V$  为反应装置中上覆水的体积( $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ); $C_f$  和  $C_0$  分别为取样结束和初始氮、磷质量浓度(L); $V_i$  是第  $i$  次取样的水样体积(L); $C_i$  为第  $i$  次取样时氮、磷的质量浓度( $i=1,2,\dots,n$ )( $\text{mg/L}$ ); $A$  为释放面积(有机玻璃柱的横截面积)( $\text{m}^2$ ); $t$  为释放时间(d)。

## 1.3 数据处理与统计分析

数据使用 Excel 2007 和 SPSS 22.0 进行整理和统计分析,使用 Origin 9.1 软件进行绘图。

# 2 结果与分析

## 2.1 理化性状

向家坝水库表层沉积物粒径小于 1 000  $\mu\text{m}$  的粒度分布结果见附图 II,粒径分布主要在 0.5~200  $\mu\text{m}$  范围内,干流粒径中位数范围为 11.75~12.49  $\mu\text{m}$ ,支流中位数范围为 7.51~14.28  $\mu\text{m}$ 。根据伍登-温特华斯的粒度分级方案,粒径组成包括黏土、粉砂和砂,其中粉砂所占比例最高,细小颗粒中以粉沙为主,即小于 63  $\mu\text{m}$  粒级的部分。不同区域上,干支流略有差异,干流样点粉砂比例在 53.0% 以上,黏土次之,为 27.0%~31.0%;支流粉砂占比为 82.0%,其次为砂(极细砂),占 5.7%~14.1%。

向家坝水库沉积物基本理化指标结果见附表 I。沉积物含水率为  $(36.04 \pm 4.19)\%$ ,表层(0~5.0 cm)高于底层(15.0~20.0 cm)。干支流沉积物 pH 值分别为  $7.50 \pm 0.08$ , $7.27 \pm 0.19$ ,呈中性偏弱碱性,干流不同区域和不同分层之间 pH 值无显著差异,支流随深度增加呈下降变化趋势。沉积物 ORP 范围为 -194.51~137.70 mV,干流高于支流库湾,ORP 为负值,表现为较强的还原性;垂直分布上,随深度增加各点 ORP 逐渐下降。总体上,研究区域 pH,含水率差异较小,ORP 空间分布差异明显。

## 2.2 碳、氮、磷含量及分布特征

沉积物 TN 值在 0.56~1.35 g/kg 之间, $(1.03 \pm 0.19)$  g/kg;TP 值在 0.55~1.00 g/kg 之间, $(0.78 \pm 0.13)$  g/kg;有机碳 TOC 值在 4.69~12.35 g/kg 之间, $(8.30 \pm 2.07)$  g/kg。各营养物质质量浓度的空间分布结果见图 1。从各柱状样均值含量来看,向家坝水库干流沉积物 TOC 值高于支流库湾,干流 S2 点 TOC 值最高,干流 S3 和支流 T4 沉积物中 TOC 值较低。垂向分布上,各点 TOC 值随深度变化呈不规则分布。干流沉积物 TN 质量浓度在坝前湖泊区 S2 最高,库中过渡区 S3 最低;支流库湾为 T2 最高,T4 最低;干支流沉积物 TN 质量浓度水平相当。TN 质量浓度垂向分布较为均匀,随深度变化幅度较小,中表层(0~10 cm)沉积物中 TN 质量浓度均值略高于中下层(10~20 cm)。沉积物 TP 柱状样含量分布状况和 TN 相似,干流最高值在 S2,S3 最低;支流库湾 T1 最高,T4 最低。整体上,干流 TP 均值高于支流库湾。各点 TP 分布在垂直方向 0~20 cm 深度范围内呈上下波动趋势,无明显的梯度变化;干流 S3,S4 和支流 T1,T2

呈现 5~20 cm 各分层 TP 高于表层 0~5 cm.

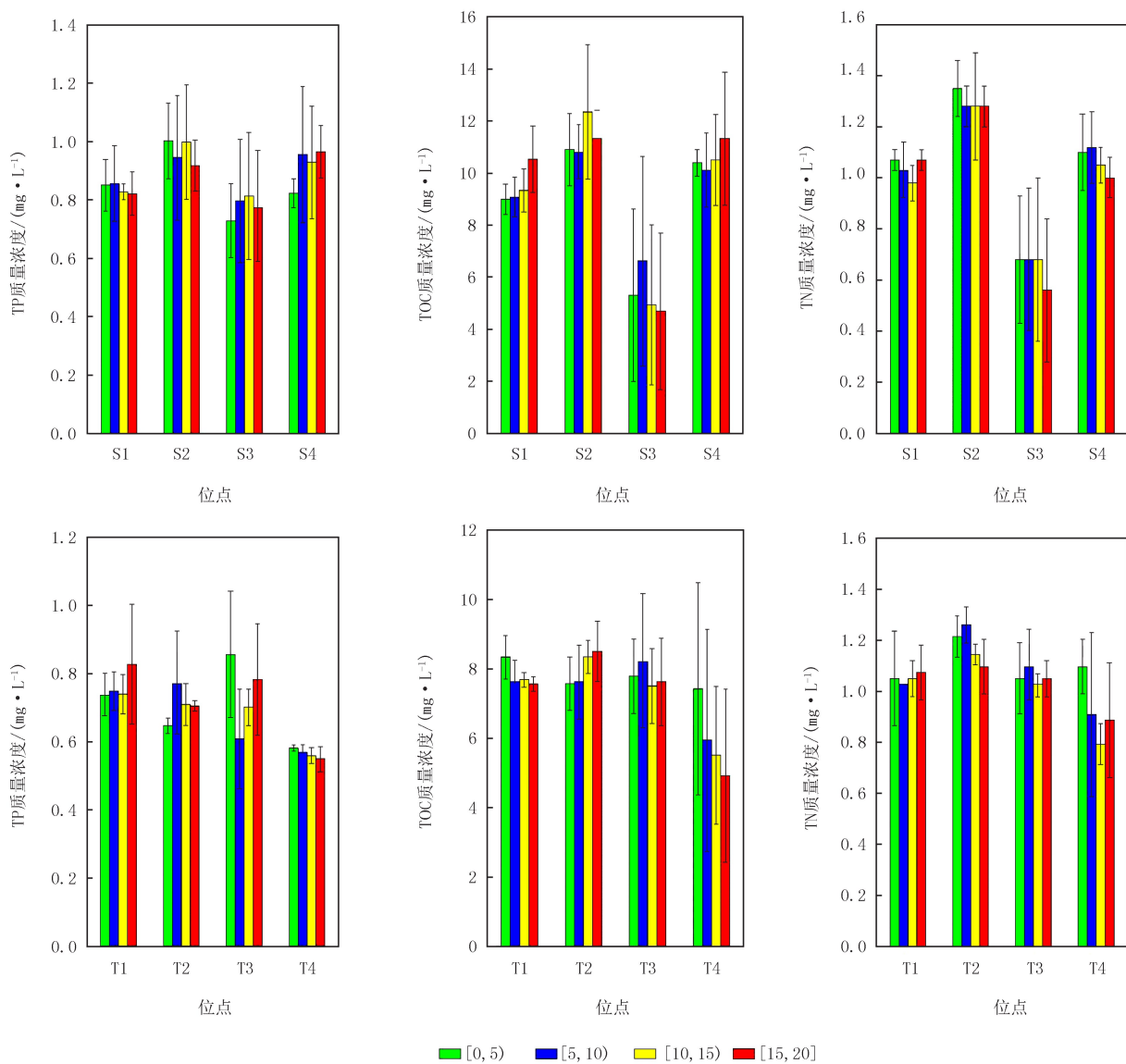


图1 向家坝水库沉积物碳、氮、磷分布特征

Fig.1 Characteristics of carbon,nitrogen and phosphorus in sediments of Xiangjiaba Reservoir

### 2.3 沉积物碳,氮,磷相关性分析

对表层沉积物 TN,TP 和 TOC 进行 Pearson 相关分析(附表 II),结果显示 TN 与 TOC 呈显著相关 ( $r=0.778, P<0.05$ ),TN 和 TOC 沉积具有协同性,碳氮相关性高.TP 与 TOC 无显著相关性 ( $r=0.656$ ),TP 与 TN 相关性也不大 ( $r=0.327$ ),表明 TP 与 TN 可能具有不同的来源.

### 2.4 沉积物氮、磷释放风险

选取向家坝水库典型区域干流新滩镇养殖区 S2 和支流大汶溪 T3 沉积物样品进行室内静态培养模拟试验.静态培养下上覆水氮、磷变化如图 2 所示.干流 S2 上覆水中 TN 变化在 0.240~0.400 mg/L 间.上覆水中 TN 在 0~25 d 随时间呈逐渐增加的趋势,0~10 d 内处于快速释放阶段,10~25 d TN 增加较为平缓,25~35 d 呈先下降后趋于平稳趋势.支流 T3 上覆水中 TN 低于干流,在 0.055~0.111 mg/L 之间,TN 增加相对平缓.T3 点在 5~25 d 内试验前后上覆水中 TN 无显著变化,表明 T3 沉积物对氮的释放与吸附趋于动态平衡;25~35 d 内上覆水中 TN 和干流变化趋势一致.静态培养下干流 S2 上覆水 TP 在 0.011~0.085 mg/L

之间.上覆水中 TP 随时间呈逐渐增加的趋势,在 0~10 d 内增加较快,10~35 d 增加平缓并趋于稳定,平均从 0.064 mg/L 增加至 0.085 mg/L.支流 T3 上覆水中 TP 在 0~10 d 内增加较快,10~20 d 增加平缓,20~35 d 增加幅度较为明显,平均从 0.063 mg/L 增加至 0.124 mg/L.

根据(1)式计算 S2 和 T3 沉积物 TN 释放通量分别为 5.26 mg/(m<sup>2</sup>·d),1.48 mg/(m<sup>2</sup>·d),干流 TN 释放通量显著高于支流.TP 释放通量分别为 1.46 mg/(m<sup>2</sup>·d),2.10 mg/(m<sup>2</sup>·d),TP 释放通量则为支流高于干流.

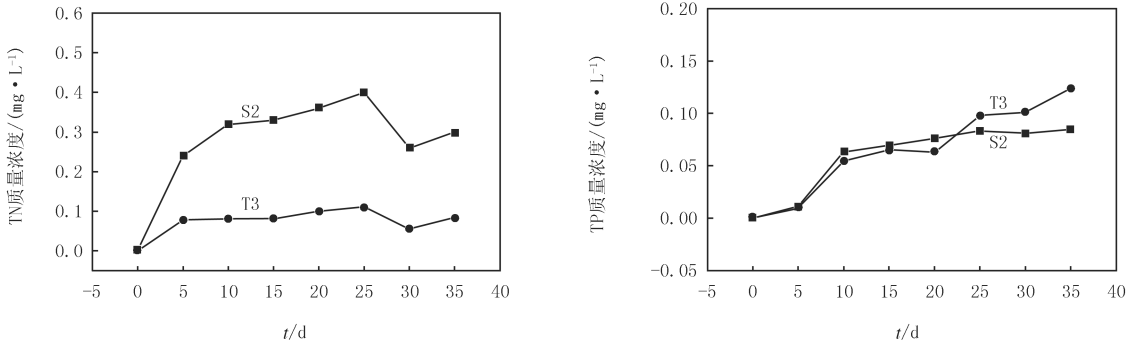


图2 静态培养下上覆水总氮、总磷变化

Fig.2 The content of TN and TP of overlying water in the static culture condition

## 3 讨论

### 3.1 沉积物理化特性

粒径分布结果显示向家坝水库表层沉积物细小颗粒以粉沙为主,即小于 63 μm 粒级的部分,是水体悬移质的主要成分,其吸附和携带的污染物质容易悬浮在流动水体中.水库蓄水后,水体流速减缓,水动力变弱,水体携带的泥沙颗粒物从入库至坝前逐渐分层淤积沉淀,可能是表层沉积物颗粒变细的原因.细的黏粒和粉砂比表面积较大,对氮、磷等物质的吸附能力更强.含水率反映沉积物的松散程度,与再悬浮能力密切相关<sup>[9]</sup>.水库表层沉积物含水率较高,表明沉积物质地较为疏松,在风浪等外界条件下易再悬浮和释放营养盐.沉积物 ORP 表现为还原性,与三峡水库香溪河<sup>[10]</sup>沉积物 ORP 研究结果相似,沉积物均趋于还原状态.还原环境对磷营养盐的释放具有促进作用,是影响内源释放控制的重要因素,另一方面,微生物在还原状态条件下进行反硝化反应,可促进沉积物内源氮的释放.从沉积物理化特性来看,沉积物理化环境对氮磷营养盐的吸附和释放均存在一定影响.

### 3.2 沉积物营养盐含量及差异原因

参考加拿大安大略省环境和能源部沉积物质量评价指南中的评价标准<sup>[11]</sup>,各点氮、磷含量基本高于评价标准的安全级(TN 质量含量 < 0.55 g/kg; TP 质量含量 < 0.60 g/kg),但处于最低级别范围内(0.55 g/kg ≤ TN 质量含量 ≤ 4.80 g/kg, 0.60 g/kg ≤ TP 质量含量 ≤ 2.00 g/kg),该级别下沉积物已受污染,但属于多数底栖生物可以承受的污染水平;75%样点 TOC 低于评价标准的安全级(TOC 质量含量 < 10.00 g/kg).与国内其他河流水库研究结果相比,沉积物 TN 总体低于三峡水库<sup>[12]</sup>、山仔水库<sup>[13]</sup>研究结果.TP 与三峡水库<sup>[14]</sup>、山美水库<sup>[15]</sup>沉积物结果较为一致.从沉积物碳、氮水平来看,沉积物存在氮、磷污染,TOC 处于较低水平;沉积物具有较低生态风险,生态风险来源主要为氮、磷营养盐.

沉积物 TN 高值主要集中在坝前湖泊区,该区域水面开阔,水深较深,水体流速缓慢,受水库水流顶托作用影响,垃圾漂浮物和网箱养殖活动所产生的分解物以及外源营养物质不能及时扩散,被悬浮物质吸附沉淀.干流 S2 位于新滩镇,该区域长期进行鱼类网箱养殖活动,鱼类粪便、残饵等在水底沉积,造成沉积物氮含量较高.S3 点位于绥江县小汶溪江口,其 TN 较低,经调查发现小汶溪江口围填,所采集的沉积物表层覆盖有新填充泥土;另一方面,相比坝前湖泊区,较大流速使得部分污染物不易沉积,也与其沉积物累积时间较短有关.支流库湾 T1, T2, T3 所在区域沿岸为城镇村集中分布区,各点沉积物 TN 差异较小,主要受点源和面

源污染的影响。TP 从库中过渡区至坝前湖泊区总体呈递增的趋势,可能是由于流速减缓,水体中携带的颗粒态磷逐渐沉降蓄积,导致坝前水域沉积物中磷含量上升。库中区 S3 受水动力及外部干扰影响,沉积物中部分磷释放到水体中,沉积物 TP 降低。沉积物中 TOC 与有机质本身积累、水体流动性、污染排放、养殖活动等因素有关<sup>[16]</sup>。向家坝水库沉积物中 TOC 不高,可能是由于深水湖库水体底层与表层交换缓慢,沉积物中溶解氧含量相对低,随着深度的增加,溶氧逐渐降低,在缺氧条件下 TOC 矿化分解为 CO<sub>2</sub> 释放。干流 S2 点 TOC 高于其他样点,与坝前湖泊区流速变缓、网箱养殖活动等所产生的有机碎屑残体堆积有关。干流 S3 和支流 T4 主要受水动力条件和水文风向的影响,藻类和有机碎屑不容易堆积沉降,有机碳含量相对较低。

垂向分布上,沉积物 TN,TP,TOC 无明显规律性变化,未出现表层明显富集趋势。可能的原因一是研究断面采集的柱状沉积物样品深度 20~22 cm,低于向家坝水库沉积物冲刷或淤积的厚度,朱玲玲等<sup>[17]</sup> 研究表明向家坝 2013 蓄水运行平均淤积厚度为 0.6 m,而新市镇以下至坝前平均淤积为 1.0 m,沉积物矿化成岩作用导致的营养盐垂向分布差异在所采集的柱状样品中尚未显现。二是样品采集时间为 9 月,向家坝水库已进入蓄水运行前期,沉积物处于淤积与冲刷的交替过程,与相对封闭且具有较为稳定沉积环境的湖泊水体相比,随深度增加未出现趋势性的变化特征。

碳、氮、磷含量总体呈现坝前湖泊区高于库中过渡区,干流略高于支流的空间分布特征。氮、磷等污染物在深水水库沉积物-水界面和深水区的自净作用速率可能并不高,而污染物的沉积作用更为明显,由此产生了氮、磷等污染物在坝前湖泊区的累积<sup>[18]</sup>,水库沉积物营养盐含量及其空间分布的差异性与水库水动力条件密切相关。从碳、氮、磷相关性及来源来看,TN 主要来源于网箱养殖、沿岸城镇污水排放以及农业活动等<sup>[5]</sup>,而 TP 除上述来源外,可能的主要来源为泥沙携带,进一步反映了向家坝水库干支流沉积物碳、氮、磷的空间分布总体上具有相似性,同时在不同空间上又有所差别。综上,沉积物及其营养负荷受所在地的地形地貌条件、人类活动、水体流速等诸多因素的影响。

### 3.3 营养盐释放风险

静态模拟试验条件下,营养盐释放速率及释放通量主要与沉积物-水界面浓度梯度,沉积物理化特性和本身氮、磷含量水平相关。释放模拟试验初期,试验条件上覆水为去离子水,沉积物与水体中的营养盐浓度梯度效应明显,扩散作用较强,处于快速释放阶段;随着上覆水中氮、磷浓度变化,释放速率逐渐趋于平缓下降并处于动态平衡的过程。干流 TN 释放通量显著高于支流,可能与干流 S2 水体表层沉积物氮含量较高有关;而支流 TP 释放通量高于干流,主要与 TP 来源为泥沙及悬浮颗粒物携带和表层含水率高相关。与代政等<sup>[19]</sup> 对北大港水库沉积物在静置条件下氮、磷释放通量研究结果相比,本研究 TN 释放通量较为接近,TP 释放通量水平较高,沉积物氮、磷均存在向水体释放的生态风险。实际水体环境中沉积物营养盐释放受氮、磷赋存形态,扰动,氧化还原条件,pH 等环境因子影响。一般而言,一定程度的扰动或水动力条件增强等可增加沉积物氮、磷向上覆水中的释放速率。随着水库不同水位蓄水运行,水体流态及悬浮物沉降条件发生改变,支流库湾相比干流水深要浅,受水位波动和外部扰动影响更为显著,因此相比干流而言,支流库湾沉积物营养盐释放的风险更高,成为藻类增殖水华暴发的敏感水域。本研究释放试验为上覆水为蒸馏水条件下的静态释放,仅反映释放潜能和风险水平,后续研究中将开展不同条件下沉积物营养盐释放研究,探讨不同环境因子对氮、磷迁移转化的生态环境效应。

## 4 结 论

1) 向家坝水库干支流表层沉积物细小颗粒粒径分布主要在 0.5~200 μm 范围内,以粉砂为主。沉积物表层含水率较高,pH 呈中性偏弱碱性,氧化还原电位呈现还原性。

2) 向家坝水库底泥沉积物中氮、磷含量高于评价标准的安全级,但在多数底栖生物可以承受的最低级污染水平范围内;沉积物具有较低的生态风险,生态风险来源主要为氮、磷营养盐。沉积物碳、氮、磷空间分布呈现坝前湖泊区高于库中过渡区,垂向分布无明显规律性变化。

3) 不同区域释放速率存在差异,干流养殖区和支流大汶溪的沉积物氮、磷存在一定的释放风险。

## 附录

附图、附表见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2022.05.016).

## 参 考 文 献

- [1] 程先,孙然好,孔佩儒,等.海河流域水体沉积物碳、氮、磷分布与污染评价[J].应用生态学报,2016,27(8):2679-2686.  
CHENG X,SUN R H,KONG P R,et al.Spatial distribution characteristics of carbon,nitrogen and phosphorous and pollution status evaluation of sediments in the Haihe River Basin,China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(8):2679-2686.
- [2] 李世龙,赵增锋,邱小琮,等.宁夏清水河流域重金属分布特征及风险评价[J].灌溉排水学报,2020,39(7):128-137.  
LI S L,ZHAO Z F,QIU X C,et al.Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in Qingshui River Basin of Ningxia [J].Journal of Irrigation and Drainage,2020,39(7):128-137.
- [3] 方家琪,祁闯,张新厚,等.太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价[J].环境科学,2019,40(12):5367-5374.  
FANG J Q,QI C,ZHANG X H,et al.Spatial distribution and pollution evaluation of carbon,nitrogen,and phosphorus in sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake[J].Environmental Science,2019,40(12):5367-5374.
- [4] 龙良红,徐慧,纪道斌,等.向家坝水库水温时空特征及其成因分析[J].长江流域资源与环境,2017,26(5):738-746.  
LONG L H,XU H,JI D B,et al.Temporal and spatial characteristics of water temperature in xiangjiaba reservoir[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2017,26(5):738-746.
- [5] 张斌.金沙江下游梯级水库水体  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  分布与源汇特征研究[D].重庆:中国科学院重庆绿色智能技术研究院,2019.  
ZHANG B.Solubility and Air-Water fluxes of  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  of cascade reservoirs in lower reaches of Jinsha River[D]. Chongqing: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [6] 王耀耀,吕林鹏,纪道斌,等.向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应[J].环境科学,2019,40(8):3530-3538.  
WANG Y Y,LYU L P,JI D B,et al.Spatial and temporal distribution characteristics and the retention effects of nutrients in xiangjiaba reservoir[J].Environmental Science,2019,40(8):3530-3538.
- [7] 侯俊,王超,王沛芳,等.太湖表层沉积物粒度组成时空分布特征及分类命名[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(2):114-119.  
HOU J,WANG C,WANG P F,et al.Temporal variability and spatial distribution of granulometric composition of surface sediments and classification in Taihu Lake[J].Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(2):114-119.
- [8] 张红,陈敬安,王敬富,等.贵州红枫湖底泥磷释放的模拟实验研究[J].地球与环境,2015,43(2):243-251.  
ZHANG H,CHEN J A,WANG J F,et al.A simulation study on the release of phosphorus from sediments in lake Hongfeng,Guizhou Province,China[J].Earth and Environment,2015,43(2):243-251.
- [9] 宋迪,陈毅良.泸沽湖沉积物中氮、磷等垂向分布特征研究[J].环境科学导刊,2016,35(1):1-4.  
SONG D,CHEN Y L.Vertical distribution of nitrogen and phosphorus in the sediments of Lugu Lake[J].Environmental Science Survey, 2016,35(1):1-4.
- [10] 罗玉红,聂小倩,李晓玲,等.香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算[J].环境科学,2017,38(6):2345-2354.  
LUO Y H,NIE X Q,LI X L,et al.Distribution and emission flux estimation of phosphorus in the sediment and interstitial water of Xiangxi River[J].Environmental Science,2017,38(6):2345-2354.
- [11] KENDALL C,SILVA S R,KELLY V J.Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States[J].Hydrological Processes,2001,15(7):1301-1346.
- [12] 卢珏安.三峡库区主要支流氮磷与金属元素分布特征、来源及风险评价[D].绵阳:西南科技大学,2019.  
LU J A.Distribution characteristics,sources and risk assessment of nitrogen,phosphorus and metal elements in the Three Gorges Reservoir[D].Mianyang:Southwest University of Science and Technology,2019.
- [13] 刘怡靖.山仔水库表层沉积物氮负荷与释放研究[J].亚热带资源与环境学报,2015,10(2):49-55.  
LIU Y J.Internal loadings and fluxes of surface sediment nitrogen in Shanzi Reservoir[J].Journal of Subtropical Resources and Environment,2015,10(2):49-55.
- [14] 潘婷婷,赵雪,袁轶君,等.三峡水库沉积物不同赋存形态磷的时空分布[J].环境科学学报,2016,36(8):2968-2973.  
PAN T T,ZHAO X,YUAN Y J,et al.Spatio-temporal distribution characteristics of different phosphorus forms in sediments from the Three Gorges Reservoir[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2016,36(8):2968-2973.
- [15] 邱祖凯,胡小贞,姚程,等.山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J].环境科学,2016,37(4):1389-1396.  
QIU Z K,HU X Z,YAO C,et al.Pollution characteristics and evaluation of nitrogen,phosphorus and organic matter in sediments of Shanmei Reservoir in Fujian,China[J].Environmental Science,2016,37(4):1389-1396.
- [16] 杨洋,刘其根,胡忠军,等.太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J].环境科学学报,2014,34(12):3057-3064.  
YANG Y,LIU Q G,HU Z J,et al.Spatial distribution of sediment carbon,nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment

- in Taihu Lake Basin[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2014,34(12):3057-3064.
- [17] 朱玲玲,董先勇,陈泽方.金沙江下游梯级水库淤积及其对三峡水库影响研究[J].长江科学院院报,2017,34(3):1-7.  
ZHU L L,DONG X Y,CHEN Z F.Sediment deposition of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and its impact on Three Gorges Reservoir[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2017,34(3):1-7.
- [18] 孙文,王理明,刘吉宝,等.北运河沙河水库沉积物营养盐分布特征及其溯源分析[J].环境科学学报,2019,39(5):1581-1589.  
SUN W,WANG L M,LIU J B,et al.Nutrients distribution and its sources analysis of sediments in Shahe Reservoir of Northern Canal[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2019,39(5):1581-1589.
- [19] 代政,祁艳丽,唐永杰,等.上覆水环境因子对滨海水库沉积物氮磷释放的影响[J].环境科学研究,2016,29(12):1766-1772.  
DAI Z,QI Y L,TANG Y J,et al.Effects of environmental factors of overlying water on the release of nitrogen and phosphorus from sediment of coastal reservoir[J].Research of Environmental Sciences,2016,29(12):1766-1772.

## Physical and chemical characteristics and nutrient release risk of sediments in Xiangjiaba Reservoir

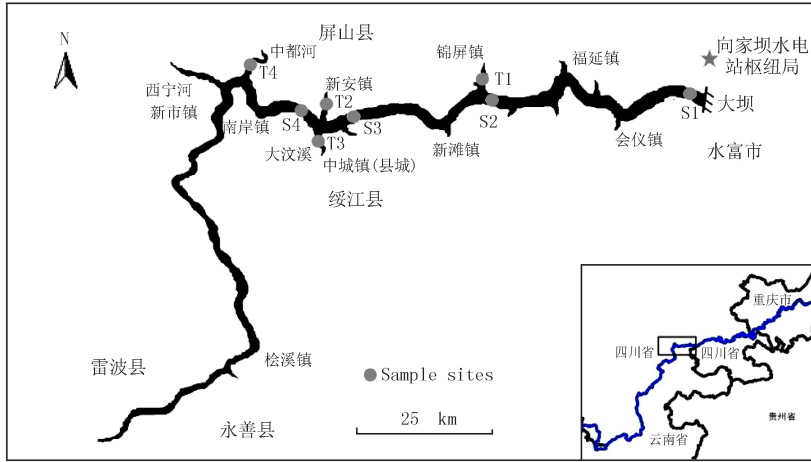
Mi Wujuan<sup>1</sup>, Zhang Dijun<sup>2</sup>, Xu Yuanzhao<sup>1</sup>, Sun Zhifeng<sup>2</sup>,  
Zhang Chunguang<sup>2</sup>, Liu Fangzhi<sup>2</sup>, Bi Yonghong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fresh Water Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. River Basin Complex Administration Centre, China Three Gorges Corporation, Yichang 443000, China)

**Abstract:** In order to understand the carbon, nitrogen and phosphorus nutrient load and release risk of sediments in Xiangjiaba Reservoir, the physical and chemical properties of sediments at different sites of the reservoir were collected and tested, and the nutrient release risk was evaluated through static indoor simulation experiment. The results showed as follows: the sediment was mainly fine particles such as fine sand and clay, and the proportion of fine sand was the highest. The pH was neutral to slightly alkaline. The moisture content was high in the sediments. The redox potential showed strong reductibility. The contents of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total organic carbon (TOC) were  $(1.03 \pm 0.19)$  g/kg,  $(0.78 \pm 0.13)$  g/kg and  $(8.30 \pm 2.07)$  g/kg, respectively. The spatial distribution characteristics of nutrient salt were as follows: the main stream was higher than the tributary reservoir bay and the lake area in front of the dam was higher than the transition area in the reservoir. The vertical direction change amplitude is small and there is no obvious rule. The static simulated release experiment results showed that TN and TP release fluxes were  $1.48-5.26$  mg/(m<sup>2</sup>·d) and  $1.46-2.10$  mg/(m<sup>2</sup>·d), respectively. The TN release flux of the main stream is higher than that of the tributary, and the TP release flux of the tributary is higher than that of the main stream. The results showed that the TOC content was at a low level with a low ecological risk. The sources of TN and TP are diverse. Nitrogen and phosphorus are potential pollution sources of reservoirs, which deserve attention and attention.

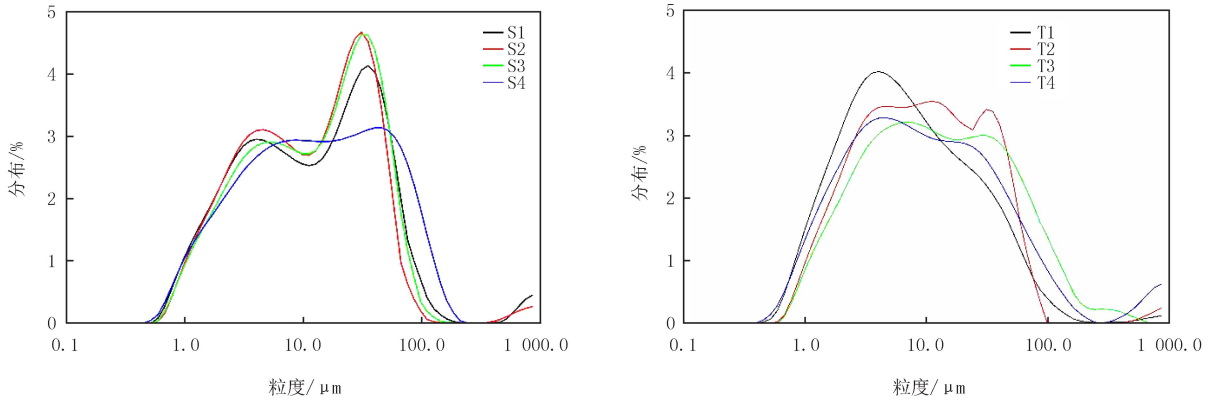
**Keywords:** Xiangjiaba Reservoir; sediment; physical and chemical properties; nutrient release

[责任编辑 刘洋 杨浦]



附图 I 研究区域样点分布示意图

Attached Fig. I Study area and sampling sites



附图 II 干支流表层沉积物粒度分布图

Attached Fig. II Granulometric composition of surface sediments in main channel and tributaries



附表 I 沉积物基本理化指标

Attached Tab. I The physical and chemical properties of column sediments

样点	含水率/%				pH				ORP/mV			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
S1	48.92	37.61	35.71	41.78	7.55	7.52	7.66	7.55	-123.00	-145.70	-169.83	-175.20
S2	35.44	36.54	37.43	34.11	7.50	7.40	7.41	7.42	-118.20	-134.77	-165.57	-194.53
S3	32.61	32.54	31.44	32.55	7.56	7.43	7.52	7.39	137.70	111.00	86.17	-84.07
S4	36.10	33.83	34.59	35.75	7.58	7.44	7.45	7.60	-93.13	-122.30	-136.87	-154.30
T1	39.90	42.67	38.91	36.35	7.50	7.51	7.42	7.48	80.80	-95.85	-146.55	-140.45
T2	41.33	29.98	34.17	37.92	7.52	7.20	7.14	7.01	-119.20	-145.30	-150.85	-158.85
T3	38.76	33.56	40.12	36.61	7.47	7.29	7.38	7.18	-83.85	-106.40	-160.20	-160.30
T4	34.68	31.36	28.67	31.20	7.30	6.99	7.02	6.87	-113.35	-141.25	-149.30	-169.75

注:A表示0~5 cm,B表示5~10 cm,C表示10~15 cm,D表示15~20 cm.

附表 II 水库表层沉积物 TN,TP,TOC 相关性

Attached Tab. II Correlation between total nitrogen,total phosphorus and TOC in surface sediments

参数	TN	TP	TOC	参数	TN	TP	TOC	参数	TN	TP	TOC
TN	1.000	0.327	0.778*	TP		1.000	0.656	TOC			1.000

注:\*表示 $P < 0.05$ .