

王亚平, 黄廷林, 周子振, 等. 黑河金盆水库表层沉积物中磷的形态和分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1977-1983.

WANG Ya-ping, HUANG Ting-lin, ZHOU Zi-zhen, et al. Forms and distribution of phosphorus in surface sediments of Jinpen Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10): 1977-1983.

黑河金盆水库表层沉积物中磷的形态和分布特征

王亚平, 黄廷林*, 周子振, 张海涵, 李扬, 龙圣海, 刘飞

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要:水源水库沉积物生源要素形态显著影响上覆水体水质, 为给深水型水源水库水质修复提供科学依据, 应用淡水沉积物中磷形态的标准测试程序(SMT), 对西安市黑河金盆水库库区和上游入库6个代表性沉积物样的理化特征及磷赋存形态进行研究。结果表明:金盆水库表层沉积物中总磷(TP)含量范围为 987~1326 mg·kg⁻¹, 从上游入库至库区, 总磷含量逐渐增加;无机磷(IP)是沉积物中磷的主要成分, 占总磷(TP)的比例为 62.5%~78.9%;Ca-P 是 IP 的主要组成成分, 占 IP 的比例为 72.0%~90.5%。沉积物-水界面存在明显的磷浓度梯度, 当氧化还原条件变化时溶解性磷易从间隙水扩散到上覆水中, 从而在一定程度上影响金盆水库整体的营养水平。TP 与 IP 变化趋势基本一致, 且 TP 的变化主要由 IP 决定, IP 的增减因 Ca-P 和 Fe/Al-P 而改变。

关键词:金盆水库;表层沉积物;间隙水;磷赋存形态

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)10-1977-07 doi:10.11654/jaes.2016-0411

Forms and distribution of phosphorus in surface sediments of Jinpen Reservoir

WANG Ya-ping, HUANG Ting-lin*, ZHOU Zi-zhen, ZHANG Hai-han, LI Yang, LONG Sheng-hai, LIU Fei

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Biological elements harbored in sediment of drinking water reservoir have an important influence on the quality of the overlying water. In this work, standard measurement and test(SMT) procedure of phosphorus forms in the freshwater sediments was used to determine surface sediments geochemical characteristics, the forms and distribution of phosphorus in Jinpen Reservoir located in Xi'an City. The results showed that total phosphorus(TP) content in sediments ranged from 987~1326 mg·kg⁻¹, from upstream storage to reservoir area, and the total phosphorus content increases. Meanwhile, inorganic phosphorus(IP) was the main component in sediment and accounted for 62.5%~78.9% of the total phosphorus(TP), and Ca-P accounted for 72.0%~90.5% of IP. A gradient of the soluble reactive phosphorus(SRP) occurred at the sediment-water interface, which indicated the SRP in the sediment could release to the overlying water and deteriorate the water quality. Variation trends of IP and TP are basically the same, and the change of TP is primarily determined by IP, but IP content was regulated by Ca-P and Fe/Al-P. The results from this work can provide scientific data for the water quality restoration in the deep drinking water reservoir.

Keywords: Jinpen Reservoir; surface sediments; interstitial water; phosphorus forms

磷是水体富营养化的主要限制因子^[1]。沉积物中的磷主要来自于河流带入的大量泥沙和营养物质^[2], 磷在沉积物中与铁、铝、钙等元素结合成不同的形态,

不同结合态的磷具有不同的地球化学行为, 某些形态的磷可在物理、化学等因素作用下, 通过解吸、溶解、还原等过程释放到上覆水中, 转化为生物可利用磷, 成为诱发湖泊富营养化的重要因素^[3-5]。沉积物记录了湖泊及其流域内环境的变化^[6], 沉积物中磷的形态对控制沉积物中磷的迁移及生物可利用性具有重要的作用^[7-9]。因此, 分析测定沉积物中磷的不同形态及含量, 对研究水体富营养化问题很有必要。

收稿日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478378)

作者简介: 王亚平(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理与微污染控制。E-mail: 18710807485@163.com

*通信作者: 黄廷林 E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

目前,国内关于磷赋存形态的研究主要集中在海洋^[2,10-13]、河口^[4-5,14-17]、湖泊^[6,19-23]以及浅水型水库^[24-29]。王忠威等^[2]认为沉积物无机磷赋存形态含量高是洱海水水质较好的原因;李秋华等^[21]研究表明影响磷含量和分布的主要因素是土壤的有机质和酸碱性;苏玉萍等^[24]研究了福建山仔水库沉积物磷形态对水体的贡献,认为沉积物-水界面明显的活性磷梯度在一定程度上影响水库水体营养水平;鲁婷等^[17]、黄廷林等^[25]和张丽媛等^[27]研究认为环境变化会导致 Fe/Al-P 释放,从而威胁水库水质。而对峡谷深水型水源水库(平均水深 60.0~95.0 m)的研究未见相关报道。另外,此类水库大多是下游城市的水源地,其富营养化风险控制问题十分重要。考虑到内源磷释放过程与其赋存形态密切相关^[18,39-40],开展此类峡谷深水水库沉积物磷及其形态的研究具有重要的现实意义。本研究应用淡水沉积物中磷形态的标准测试程序(SMT),对西安黑河金盆水库沉积物中磷及其赋存形态进行了分析,同时结合沉积物的理化特征及其间隙水与上覆水中营养盐的浓度,探讨黑河金盆水库沉积物磷赋存形态及其主要影响因素,旨在为正确评价该水库的营养状况及改善水库水质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 水库概况

黑河是渭南南岸主要支流,流域纵贯周至县南北,发源于周至县西南部厚畛子乡秦岭主脊北侧的太白山东南坡二谷海(海拔 3650 m)。全流域面积 2258 km²,干流总长 126 km,河道平均比降 0.877%。黑河流域植被良好,河水清澈,河流悬移质含沙量小,泥沙主要为推移质。

黑河金盆水库是西安市黑河引水系统的主要水源地,是一座以城市供水为主,兼有防洪、发电、灌溉的峡谷深水型水库,2002 年建成供水。水库位于周至县黑河峪口以上 1.50 km 处,距西安 86.0 km。坝址以上流域面积 1481 km²,多年平均径流量 6.67 亿 m³。水库大坝为粘土心墙砂砾石重力坝,最大坝高 129 m。黑河水库总库容 2.00 亿 m³,年调节水量 4.28 亿 m³,其中城市供水占 71.2%为 3.05 亿 m³,日平均供水量 80.0 万 m³,供水保证率 95.0%。金盆水库地层除基岩外,第四系松散岩层覆盖面积也较广。基岩为前震旦系宽坪群大镇沟组,为中等深度变质的片岩,钙质石英岩夹云斜煌斑岩,斜一民斑岩脉。沿上游河流分布有散落的村镇,居民数量虽然不多但也会长期持续性

排放少量的生活污水,对水库水质产生一定的影响。加之水库径流量较大,氮磷等污染物长期富集,沉积于库底,使沉积物颗粒中污染物含量不断增加。该水库目前水质状况良好,其中总氮含量为 1.03~1.63 mg·L⁻¹,总磷含量为 0.014~0.036 mg·L⁻¹。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

2015 年 11 月下旬,在西安黑河金盆水库中设置 S1(上游,水深=63.0 m)、S2(入库口,水深=77.3 m)、S3(副库,水深=16.2 m)、S4(主库,水深=82.0 m)、S5(主库,水深=82.1 m)、S6(主库,水深=82.8 m 接近大坝)6 个采样点(图 1)。采样时水库正处于水体混合期。

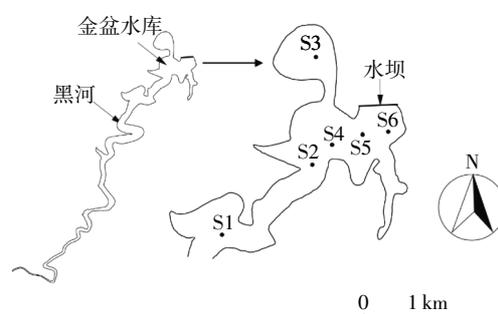


图 1 黑河金盆水库采样点位置示意图

Figure 1 Sampling locations in Jinpen Reservoir

采用彼得森抓斗式采样器采集各采样点的表层沉积物样品,每个采样点取泥三次,将三次取得的表层泥样混匀作为该点沉积物样品,泥样用封口袋密封运回实验室。样品经冷冻干燥后,研磨、过筛,置于密封袋中保存备用。

不同点位同时取其上覆水(离底部 0.5 m 左右)和间隙水样,其中,间隙水样是通过将沉积物样品离心(6000 r·min⁻¹, 5 min)而得。

1.2.2 样品分析

用钼-锑-抗分光光度法测上覆水和间隙水中的正磷酸盐、总磷和溶解性总磷。上覆水 pH 值和 DO 用 DS5 测得。

沉积物中含水率和烧失量的测定采用烘干和灼烧法;用激光粒度分布测定仪测得沉积物的机械组成;用碱式过硫酸钾法测定沉积物的总氮(TN);用烧失量法测定沉积物的有机质(OM)含量。每个样品采用三个平行。

沉积物中各形态磷的测定采用欧洲标准测试委员会框架下发展的淡水沉积物磷形态分离 SMT 法^[30-31],每个样品采用三个平行。将沉积物中的磷分为总磷

(TP)、有机磷(OP)、无机磷(IP)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)、钙磷(Ca-P),主要步骤如下。

(1)称取 200 mg 沉积物样品,加入 20 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH,振荡 16 h 后离心;取 10 mL 上清液加入 4 mL $3.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl,静置 16 h 后离心,钼锑抗比色法测定磷含量^[39],得到铁铝结合态磷(Fe/Al-P);提取后的残渣用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 洗涤,加入 20 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl,振荡 16 h 后离心,得到钙磷(Ca-P)。

(2)称取 200 mg 沉积物样品,加入 20 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl,振荡 16 h 后离心,得到无机磷(IP);残渣用去离子水洗涤 2 次,超声干燥后,于 $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 马弗炉中灰化 3 h,加入 20 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 振荡 16 h 后离心,得到有机磷(OP)。

(3)称取 200 mg 沉积物样品,于 $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 马弗炉中灰化 3 h,加入 20 mL $3.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 振荡 16 h 后离心,得到总磷(TP)。

2 结果与讨论

2.1 上覆水与间隙水水质

各取样点的上覆水与间隙水中 TP、DTP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度如图 2 所示。间隙水中 TP、DTP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为 $0.090\sim 0.440$ 、 $0.030\sim 0.100$ 、 $0.030\sim 0.070 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 而相应的上覆水中浓度为 $0.060\sim 0.120$ 、 $0.030\sim 0.040$ 、 $0.010\sim 0.020 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。间隙水中活性磷浓度高于上覆水,沉积物-水界面存在明显的活性磷梯度,浓度梯度的存在是扩散发生的重要条件,沉积物中的活性磷存在自间隙水向上覆水扩散的风险,并可能影响水库上层水体中的营养盐浓度,进而引发水体富营养化,在一定程度上影响水库的营养水平。

2.2 沉积物理化性质

沉积物理化性质见表 1。含水率可以反映沉积物的再悬浮能力,沉积物含水率越高,就越容易在外界扰动下再悬浮^[24]。金盆水库除 S3 含水率为 34.8%,其他采样点含水率均在 60%左右,说明各采样点表层沉

积物具有较大的不稳定性,易发生再悬浮。S3 位于副库,水深较浅,经常处于干涸状态。烧失量最大的采样点是 S1,最小是 S3。烧失量反映了沉积物中有机质的含量。S1 处有机质含量最高,一方面是因为河道两旁

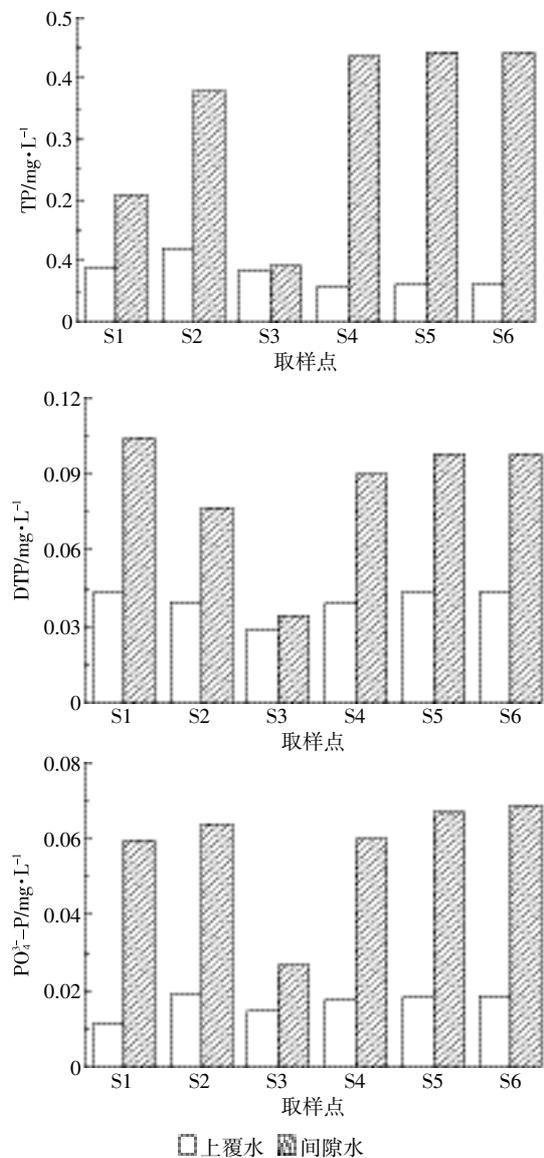


图 2 上覆水与间隙水水质指标

Figure 2 Water-quality index of overlying water and pore water

表 1 沉积物理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the sediments

取样点	水深/m	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH	DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	含水率/%	烧失量/%	有机碳/%
S1	63.0	13.0	7.49	2.01	54.7	7.3	4.2
S2	77.3	13.0	7.52	1.11	51.0	6.0	3.5
S3	16.2	12.5	7.55	1.19	34.8	4.3	2.5
S4	82.0	12.3	7.50	2.41	58.5	6.2	3.6
S5	82.1	12.6	7.64	2.39	57.8	6.2	3.6
S6	82.8	12.4	7.49	2.83	58.0	6.1	3.5

有散落的村镇,有生活污水持续的进入河道使得有机质含量高于其他地方;另一方面则是河道两旁被大量山林植被覆盖,而山林冲刷带来大量森林腐殖质也是沉积物有机质的重要来源。

表2是该水库表层沉积物的粒度分布。沉积物的粒度可反映流域的物质输入和沉积物的再悬浮能力^[24-25],对其吸附磷有重要影响。粒径最小的在S6,中位数(Median)为6.08 μm ,平均粒径(Mean)为5.54 μm ,该点处于主库区,接近大坝,是水库最宽的区域,水体流速缓慢,利于小的颗粒沉积,沉积物吸附的磷含量较其他点位高。粒径最大的则在S1,中位数(Median)为11.4 μm ,平均粒径(Mean)为10.6 μm ,该点在水库上游的河流区,水流速度快,大的颗粒容易沉降,加之该水库受地表径流影响很大,被冲刷的泥土进入河道也使沉积物粒度比较大。

2.3 沉积物中各形态磷的含量及空间分布特征

2.3.1 总磷(TP)

金盆水库各采样点表层沉积物样品的分析如图3所示。沉积物中TP的含量为987~1326 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据研究^[33],将沉积物按照TP含量的多少分为严重污染($\text{TP}>1000 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、中度污染($500 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}<\text{TP}<$

$1000 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和未污染($\text{TP}<500 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)3类。除了S3,TP含量为987 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于中度污染外,研究区域其他各采样点(S1、S2、S4、S5、S6)TP含量为1227~1326 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均属于严重污染。沉积物总磷含量在国内有不少报道(表3),与各地沉积物总磷含量分布比较,金盆水库沉积物磷的含量处于中等污染水平,较易发生富营养化。

由图3可以看出,从上游到主库,总磷含量没有显著差别,均较高。表层沉积物中磷的最高值出现在S6,主要因为河水的流速在上游较大而到下游逐渐减缓,磷的沉降作用增大导致下游主库区沉积物磷含量显著升高。最小值出现在S3,副库水深较浅,且常处于干涸状态,营养物质缺乏,故而受污染小。

2.3.2 无机磷(IP)

所有采样点表层沉积物IP含量为768~855 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最高值出现在S6,最小值出现在S3。从图3可以看出,IP含量的变化趋势与TP基本一致,且占TP的62.5%~78.9%,表明在研究区域内IP是沉积物中磷的主要成分。这一结果与洋河水库^[27]、三峡水库^[28]、九龙江河流库区系统^[17]等研究一致。由于水库地质环境影响,导致表层沉积物中IP含量均较高。

2.3.3 有机磷(OP)

该水库OP含量为89.1~236 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占TP的9.0%~19.2%。OP含量最高值出现在S1,最小值出现在S3。OP可部分被生物利用,主要来源于农业面源污染^[30]。有研究发现^[8],50.0%~60.0%的OP可转化为生物可利用的磷,对水体富营养化影响较大。上游入库水的OP大于库区,则与上游的人类活动有关。

2.3.4 铁铝结合态磷(Fe/Al-P)

表层沉积物不同形态IP的含量分布特征见图4。

表3 金盆水库表层沉积物TP含量与其他湖库比较

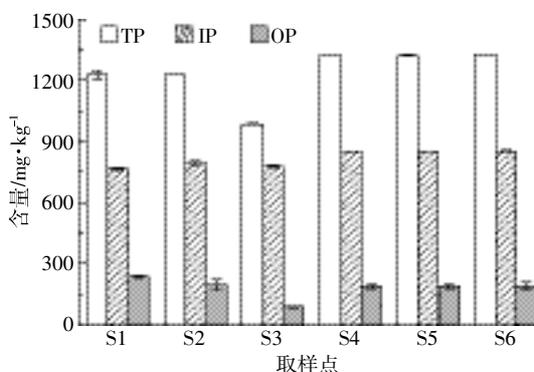
Table 3 Comparisons of TP in the surface sediments of Jinpen Reservoir and other lakes

名称	TP/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
长江河口水库 ^[18]	535~911
茗溪流域 ^[5]	587~1794
淀山湖 ^[34]	266~1146
大辽河水系 ^[16]	323~2619
天津于桥水库 ^[26]	354~581
汤峪水库 ^[25]	1215~1593
九龙江河流-库区系统 ^[17]	387~2092
三峡水库 ^[28]	362~1034
洋河水库 ^[27]	312~818
金盆水库	987~1326

表2 各采样点沉积物粒度分布

Table 2 Grain size distribution of the sediments

颗粒质量 分数/%	颗粒粒度/ μm					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
<10	2.24	1.72	1.81	2.50	1.47	1.49
<25	5.22	3.72	4.39	6.00	2.96	3.00
<50	11.4	8.08	11.5	9.12	6.08	6.08
<75	22.6	16.0	23.2	19.7	11.0	10.8
<90	43.0	28.6	34.8	30.2	17.4	17.1



图中数据为平均值±标准误差(means±S.D.)($n=3$),下同

图3 表层沉积物中TP、IP、OP含量

Figure 3 Distribution of TP, IP, OP in surface sediments

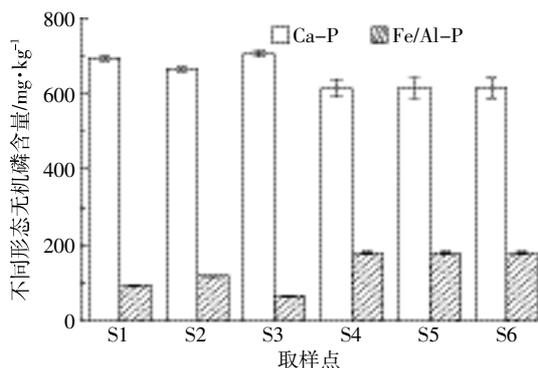


图4 表层沉积物中各形态无机磷分布

Figure 4 Distribution of different forms of IP in surface sediments

该水库表层沉积物中 Fe/Al-P 含量为 64.9~180 mg·kg⁻¹, 占 TP 的 6.6%~13.6%。最高值出现在 S6, 最小值出现在 S3。库区的 Fe/Al-P 高于其他地方, 与 IP 的变化一致。Fe/Al-P 含量是判断沉积物污染来源的指标之一, 说明水库沉积物受人为污染的磷所占比例。Fe/Al-P 是被 Fe、Mn、Al 氧化物及其氢氧化物所包裹的磷, 同时也是生物可利用磷的主要形式, 随氧化还原电位的变化而变化, 且该部分磷易释放、易被生物所利用^[30, 35-36]。当氧化还原电位降低时, 三价铁被还原并被溶解, 膜内的磷酸盐释放出来进入间隙水, 进而在浓度梯度的作用下进入上覆水中^[24]。该水库水质常年呈弱碱性, 其相对高的 pH 会加快 Fe/Al-P 的释放, 且沉积物的氧化还原电位容易受到诸如溶解氧、温度、pH 等外界因素干扰而变化, 当水库处于分层期, 底部溶解氧低至 0, 水体中铁、磷浓度均将升高^[37]。所以 Fe/Al-P 是容易释放的 IP 形式。

2.3.5 钙磷(Ca-P)

金盆水库表层沉积物中 Ca-P 含量为 614~705 mg·kg⁻¹, 占 TP 的 46.5%~71.4%。由图 4 可以看出, 表层沉积物中 Ca-P 为 IP 的主要成分, 占 IP 的 72.0%~

90.5%。据报道, 国内许多水库沉积物以钙结合态磷为主, 如天津于桥水库^[26]、三峡水库^[28]、洋河水库^[27]和长江河口水库^[18]等。金盆水库表层沉积物 Ca-P 含量最高值出现在 S3, 最小值出现在 S4。整体来看, 库区 Ca-P 小于入库和副库中 Ca-P。Ca-P 含量取决于库区的地质环境, 这也是北方固有的碱性土壤所决定的。河道中 Ca-P 含量也很高, 除了因为地质环境, 还有来自山区降水的冲刷堆积作用, 经径流和土壤流失等作用将营养物质带入河道并沉积。Ca-P 是沉积物中偏惰性的磷组分, 被认为是生物难利用磷。主要由原生矿物颗粒中包含的磷通过生物作用沉积、固结的颗粒磷及 CaCO₃ 的吸附沉积磷组成^[31-32]。但在弱酸条件下可产生一定的释放^[38]。

2.4 沉积物磷的相关性分析

金盆水库表层沉积物中各形态磷之间的相关性如表 4 所示。TP 与 IP 显著正相关($r=0.836, P<0.01, n=18$), 与 Ca-P 显著正相关($r=0.784, P<0.01, n=18$), 与 Fe/Al-P 显著正相关($r=0.969, P<0.01, n=18$), 与有机质显著正相关($r=0.861, P<0.01, n=18$)。其中 TP 与 Fe/Al-P 相关性最高, 表明 Fe/Al-P 对 TP 的贡献最大。在各形态磷中, IP 与 Ca-P 显著正相关($r=0.831, P<0.01, n=18$), 与 Fe/Al-P 显著正相关($r=0.803, P<0.01, n=18$), 表明沉积物中 IP 的变化与 Ca-P 和 Fe/Al-P 均有关, 而 OP 与 Ca-P 之间没有明显的相关性。另外, 间隙水 PO₄³⁻与表层沉积物中 TP 和 OP 均显著相关, 表明间隙水中磷主要来自沉积物中 OP 释放; 有机质与表层沉积物中 Fe/Al-P 相关性最好($r=0.897, P<0.01, n=18$), 表明该水库沉积物主要来自径流冲刷^[31]。

3 结论

(1) 间隙水中 TP、DTP、PO₄³⁻-P 的含量均高于相应的上覆水中含量, 而这一浓度梯度引起的扩散是造

表4 沉积物中各形态磷与总磷、无机磷的相关性

Table 4 Correlation coefficients between phosphorus forms and TP, IP

相关性	TP	OP	IP	Ca-P	Fe/Al-P	有机质	间隙水 PO ₄ ³⁻
TP	1						
OP	0.485*	1					
IP	0.836**	0.376	1				
Ca-P	0.784**	0.093	0.831**	1			
Fe/Al-P	0.969**	0.511*	0.803**	0.747**	1		
有机质	0.961**	0.671**	0.692**	0.539*	0.897**	1	
间隙水 PO ₄ ³⁻	0.949**	0.861*	0.549	-0.703	0.756	0.840	1

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 在 0.01 水平(双侧)上极显著相关, 样本数 $n=18$ 。

成污染物释放的主要动力之一,进而影响水库的营养水平。

(2)金盆水库表层沉积物 TP 含量为 987~1326 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。无机磷(IP)是沉积物中磷的主要成分,占总磷(TP)的 62.5%~78.9%;Ca-P 是 IP 的主要组成成分,占总磷的 46.5%~71.4%。

(3)金盆水库表层沉积物 TP 空间分布特征总体表现为库区大于入库,同时该水库中 Fe/Al-P 和 OP 具有极大的释放潜能。TP 与 IP 变化趋势基本一致,且 TP 的变化主要由 IP 决定,IP 的增减因 Ca-P 和 Fe/Al-P 而改变。

参考文献:

- [1] Wu F, Guo W D, Zheng P R, et al. Distribution of phosphorus species in sediments of maricultural waters in Sandu Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(4):24-27.
- [2] 王忠威,王圣瑞,戴建军,等.洱海沉积物中磷的赋存形态[J].环境科学研究,2012,25(6):652-658.
WANG Zhong-wei, WANG Sheng-rui, DAI Jian-jun, et al. Fractions of phosphorus in sediments of Lake Erhai[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(6):652-658.
- [3] Fisher T R. Nutrient limitation of phytoplankton and eutrophication of inland, estuarine and marine waters[C]// Tiessen H(Eds.). Phosphorus in the global environment:Transfers, cycles and management. New York: Wiley, 1996.
- [4] 张芳,常春平,李发东,等.德州引黄灌区主要河流沉积物各形态磷分布研究[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2223-2229.
ZHANG Fang, CHANG Chun-ping, LI Fa-dong, et al. Phosphorus fractions in sediments along three major rivers of irrigation districts of Yellow River in Dezhou City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2223-2229.
- [5] 陈海龙,袁旭音,王欢,等.茗溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析[J].环境科学,2015,36(2):464-470.
CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, et al. Distributions of phosphorus fractions in suspended sediments and surface sediments of Tiaoxi mainstreams and cause analysis[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2):464-470.
- [6] 王莹,胡维平.太湖湖滨湿地沉积物营养元素分布特征及其环境意义[J].中国环境科学,2015,35(1):204-210.
WANG Ying, HU Wei-ping. Nutrients distribution characteristics and their environmental significance of Taihu lakeside wetland sediments[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(1):204-210.
- [7] Sondergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Eight years of internal phosphorus loading and changes in the sediment phosphorus profile of Lake Sobygaard, Denmark[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 253(1-3):345-356.
- [8] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7):2037-2042.
- [9] Petticrew E L, Arocena J M. Evaluation of iron phosphate as a source on internal lake phosphorus loadings[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 266(1-3):87-93.
- [10] 钱嫦萍,陈振楼,胡玲珍,等.崇明东滩沉积物再悬浮对沉积物-水界面氮、磷交换行为的影响[J].环境科学,2003,24(5):114-119.
QIAN Chang-ping, CHEN Zhen-lou, HU Ling-zhen, et al. Effects of sediment resuspension on nitrogen and phosphate exchange at the sediment-water interface in East Chongming tidal flat[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(5):114-119.
- [11] 戴纪翠,宋金明,李学刚,等.胶州湾沉积物中的磷及其环境指示意义[J].环境科学,2006,27(10):1953-1962.
DAI Ji-cui, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, et al. Phosphorus and its environmental marker function in Jiaozhou Bay sediments[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(10):1953-1962.
- [12] 宋金明,李学刚,邵君波,等.南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为[J].海洋与湖沼,2006,37(4):370-376.
SONG Jin-ming, LI Xue-gang, SHAO Jun-bo, et al. Biogeochemical characteristics of nitrogen and phosphorus in the south Yellow Sea sediments[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2006, 37(4):370-376.
- [13] 赵海超,王圣瑞,焦立新,等.洱海沉积物中不同形态磷的时空分布特征[J].环境科学研究,2013,26(3):227-234.
ZHAO Hai-chao, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of different forms of phosphorus in the sediments of Erhai Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(3):227-234.
- [14] Sun S J, Huang S L, Sun X M, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(3):291-295.
- [15] 张宪伟,潘纲,王晓丽,等.内蒙古段黄河沉积物对磷的吸附特征研究[J].环境科学,2009,30(1):172-177.
ZHANG Xian-wei, PAN Gang, WANG Xiao-li, et al. Characteristics of phosphorus sorption on Yellow River sediments from Inner Mongolia reach[J]. *Environmental Sciences*, 2009, 30(1):172-177.
- [16] 王世亮,王志刚,王萍,等.大辽河水系沉积物剖面磷的形态和分布特征[J].环境科学,2009,30(12):3494-3500.
WANG Shi-liang, WANG Zhi-gang, WANG Ping, et al. Chemical forms and distribution of phosphorus in the sediment profiles of the Daliaohe River systems[J]. *Environmental Sciences*, 2009, 30(12):3494-3500.
- [17] 鲁婷,陈能汪,陈朱虹,等.九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义[J].环境科学,2013,34(9):3430-3436.
LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, et al. Characteristics of sediment phosphorus in the Jiulong River-reservoir system and its ecological significance[J]. *Environmental Sciences*, 2013, 34(9):3430-3436.
- [18] 金晓丹,吴昊,陈志明,等.长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J].环境科学,2015,36(2):448-456.
JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, et al. Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze estuary reservoir, China[J]. *Environmental Sciences*, 2015, 36(2):448-456.
- [19] Lake B A, Coolidge K M, Norton S A, et al. Factors contributing to the internal loading of phosphorus from anoxic sediments in six Maine, US-

- A, lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2/3):534-541.
- [20] Lin X S, Zhou W B. Phosphorus forms and distribution in the sediments of Poyang Lake, China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(2):230-238.
- [21] 金相灿, 庞燕, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):279-285.
JIN Xiang-can, PANG Yan, WANG Sheng-rui, et al. Phosphorus forms and its distribution character in sediment of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):279-285.
- [22] 李秋华, 陈峰峰, 龙健, 等. 贵州百花湖消落区土壤磷赋存形态初步研究[J]. 地球与环境, 2013, 41(5):490-496.
LI Qiu-hua, CHEN Feng-feng, LONG Jian, et al. Preliminary study on phosphorus forms in soils in the water-level-fluctuating zone of the Baihua Reservoir[J]. *Earth and Environment*, 2013, 41(5):490-496.
- [23] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕. 太湖沉积物磷形态及pH值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6):701-711.
JIN Xiang-can, WANG Sheng-rui, PANG Yan. The influence of phosphorus forms and pH on release of phosphorus from sediments in Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(6):701-711.
- [24] 苏玉萍, 郑达贤, 林婉珍, 等. 福建省富营养化水库沉积物磷形态及对水体的贡献[J]. 湖泊科学, 2005, 17(4):311-316.
SU Yu-ping, ZHENG Da-xian, LIN Wan-zhen, et al. Phosphorus forms in sediment and release potential of phosphorus to water in eutrophic Shanzi Reservoir, Fujian Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(4):311-316.
- [25] 黄廷林, 延霜, 柴蓓蓓, 等. 水源水库沉积物磷形态分布及其释放特征[J]. 天津大学学报, 2011, 44(7):607-612.
HUANG Ting-lin, YAN Shuang, CHAI Bei-bei, et al. Phosphorus forms and its distribution in source water reservoir sediment[J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(7):607-612.
- [26] 朱兴旺, 刘光逊, 梁丽君, 等. 天津于桥水库沉积物理化特征及磷赋存形态研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):168-173.
ZHU Xing-wang, LIU Guang-xun, LIANG Li-jun, et al. Physical-chemical characteristics and phosphorus speciation in the sediments of the Tianjin Yuqiao Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):168-173.
- [27] 张丽媛, 王圣瑞, 储昭升, 等. 洋河水库流域土壤与库区沉积物中磷形态特征研究[J]. 中国环境科学, 2010, 30(11):1529-1536.
ZHANG Li-yuan, WANG Sheng-rui, CHU Zhao-sheng, et al. Distribution characteristics of phosphorus in sediment of Yanghe Reservoir and in soil of its basin[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(11):1529-1536.
- [28] 张琳, 毕永红, 胡征宇, 等. 三峡水库湖北段沉积物磷形态及其分布特征[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6):6-9.
ZHANG Lin, BI Yong-hong, HU Zheng-yu, et al. Phosphorus forms and its distribution character in sediment of Three Gorges Reservoir in Hubei[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(6):6-9.
- [29] 何芳, 李富生, 王立国, 等. 浅水型水库活性区沉积物氮磷释放特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2):783-788.
HE Fang, LI Fu-sheng, WANG Li-guo, et al. Release characteristics of nitrogen and phosphorus by sediment of activated zone in shallow reservoirs[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2012, 43(2):783-788.
- [30] Ruban V, Lopez-Sanchez J F, Pardo P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments: A synthesis of recent works[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, 307(2/3):224-228.
- [31] 孙境蔚. 沉积物磷的分级提取方法及提取相的共性分析[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(2):110-114.
SUN Jing-wei. Commonness analysis of species in different fractionation of phosphorus in sediments[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 30(2):110-114.
- [32] Pardo P, Rauret G, López-Sánchez J F. Shortened screening method for phosphorus fractionation in sediments: A complementary approach to the standards, measurements and testing harmonised protocol[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 508(2):201-206.
- [33] 刘鸿亮, 金相灿, 荆一风. 湖泊底泥环境疏浚工程技术[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1):81-84.
LIU Hong-liang, JIN Xiang-can, JING Yi-feng. Environmental dredging technology of lake sediment[J]. *Engineering Science*, 1999, 1(1):81-84.
- [34] 康丽娟, 孙从军, 李小平, 等. 淀山湖沉积物磷分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1):190-196.
KANG Li-juan, SUN Cong-jun, LI Xiao-ping, et al. Forms and distribution of phosphorus in sediments of Dianshan Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1):190-196.
- [35] 周小宁, 王圣瑞, 金相灿. 沉水植物黑藻对沉积物有机、无机磷形态及潜在可交换性磷的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(12):2421-2425.
ZHOU Xiao-ning, WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can. Influences of submerged vegetation *Hydrilla verticillata* on the forms of inorganic and organic phosphorus and potentially exchangeable phosphate in sediments[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(12):2421-2425.
- [36] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments[J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37(7):1460-1482.
- [37] Zhou Z Z, Huang T L, Ma W X, et al. Impacts of water quality variation and rainfall runoff on Jinpen Reservoir, in Northwest China[J]. *Water Science and Engineering*, 2015, 8(4):301-308.
- [38] 李军, 刘丛强, 王仕禄, 等. 太湖五里湖表层沉积物中不同形态磷的分布特征[J]. 矿物学报, 2004, 24(4):405-410.
LI Jun, LIU Cong-qiang, WANG Shi-lu, et al. Distribution characteristics of different forms of phosphorus in surficial sediments from Wuli, Taihu Lake, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(4):405-410.
- [39] 翁圆, 苏玉萍, 张玉珍, 等. 福建山仔水库不同季节表层沉积物内源磷负荷分析[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6):871-878.
WENG Yuan, SU Yu-ping, ZHANG Yu-zhen, et al. Internal phosphorus loadings and fluxes of surface sediments in four seasons in Shanzi Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(6):871-878.
- [40] Carman R, Edlund G, Damberg C. Distribution of organic and inorganic phosphorus compounds in marine and lacustrine sediments: A 31 P NMR study[J]. *Chemical Geology*, 2000, 163(1):101-114.