

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.03.2016071305

王亚平, 黄廷林, 周子振, 等. 金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价[J]. 环境化学, 2017, 36(3): 659-665.

WANG Yaping, HUANG Tinglin, ZHOU Zizhen, et al. Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen Reservoir [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(3): 659-665.

金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价*

王亚平 黄廷林** 周子振 李 扬 龙圣海 刘 飞 曾明正

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安, 710055)

摘 要 为探究西安黑河金盆水库表层沉积物中营养盐的分布特征及其污染状况, 本研究测定了表层沉积物中总氮(TN)、总磷(TP)和有机质(OM)的含量, 并与其它湖库进行比较, 分析了 TN、TP 和 OM 的相关性, 并探究了表层沉积物中营养元素的来源及其污染状况. 结果表明, TN 平均含量为 $1132 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP 平均含量为 $1131 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, OM 平均含量为 7.02%, 三者空间变化趋势基本一致, 从上游至库区, 含量先减小后增加. 与其它湖库相比, 金盆水库表层沉积物中 TN 含量相对较小, TP 和 OM 含量均处于中等水平. TOC/TN 值表明, 水库表层沉积物中 OM 均来源于高等陆生植物. TOC 与 TN、TP 均存在显著的相关性, 且与 TN 相关性更高, 表明金盆水库表层沉积物有机质的矿化过程与氮、磷, 尤其是氮的物质来源和沉积变化过程关系更为密切. 根据沉积物质量评价指南, TN、TP 和 TOC 含量均达到最低级别, 说明金盆水库已受到一定程度的污染.

关键词 金盆水库, 表层沉积物, 营养盐, 污染评价.

Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen Reservoir

WANG Yaping HUANG Tinglin** ZHOU Zizhen LI Yang
LONG Shenghai LIU Fei ZENG Mingzheng

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

Abstract: In order to explore distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Xi'an Heihe Jinpen Reservoir. Total nitrogen(TN), total phosphorus (TP) and organic matter (OM) of surface sediments were determined and compared with other lakes, and the correlation of TN, TP and OM was also analyzed. The results showed that the average contents of TN, TP and OM were $1132 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $1131 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 7.02%, respectively. All the three indices showed a similar spatial distribution in that the content first increased than decreased from upstream to the reservoir area. Compared with other lakes and reservoirs, the content of TN in surface sediments is relatively low, but the contents of TP and OM are in the middle level in Jinpen reservoir. TOC/TN values showed that OM came from higher plants. TOC was significantly correlated with TN, TP, and it was more related to TN, indicating that mineralization process of organic matter in surface sediments of Jinpen reservoir was related to nitrogen and phosphorus, and particularly correlated with source material and deposition process changes of nitrogen. According to the evaluation of sediments, contents of TN, TP and TOC in sediments all exceeded the standard value of the lowest level, and

2016年7月13日收稿(Received: July 13, 2016).

* 国家自然科学基金(51478378)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51478378).

** 通讯联系人, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

Corresponding author, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

Jinpen reservoir has been polluted to some extent.

Keywords: Jinpen reservoir, surface sediments, nutrients, pollution evaluation.

近年来,水库已逐渐成为城市重要的饮用水水源,但湖库富营养化问题日益严重,成为国内外十分关注的环境问题之一^[1-2].氮、磷等是水生生物生长所必需的营养元素,同时也是水体富营养化的限制因素,而有机质对污染物的迁移和释放起着至关重要的作用^[3].沉积物是氮、磷等生源要素的重要储存库^[4-6],它在净化上覆水环境的同时,也在一定程度上发挥着营养源的作用,对水生态系统的物质循环和能量流动发挥着重要作用,成为富营养化的主导因子,在一定程度上反映出水体的污染状况^[7-11].当外源污染得到控制或者外界因素(气候、水动力、pH、盐度、氧化还原电位、水温等)发生变化的时候,内源负荷的沉积物将对水体产生显著影响,进而恶化水体环境^[12].因此,沉积物中营养元素的分布特征在一定程度上能反映出湖库的污染程度及地球化学信息^[13].

目前,国内外对河流^[8,12,14]、湖泊^[1,7,13,15]、水库^[5,16-17]等沉积物中总磷、总氮的形态、空间分布特征、释放机理及相关分析有较多研究,本文在前人研究的基础上^[5,18-19]分析沉积物对水库水质的影响,通过采集黑河金盆水库6个典型位置的表层沉积物,测定了其总氮、总磷和有机质的含量,并与国内其它湖库进行比较;分析了沉积物中总氮、总磷及其有机质的来源,并对它们的相关性进行分析;采用沉积物质量评价指南对研究区域内的表层沉积物污染状况进行了评价,以期控制水库富营养化程度、改善水库水环境质量以及生态系统修复提供科学的基础资料.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域概况

黑河是渭河南岸主要支流,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).黑河全流域面积为2258 km²,干流总长为126 km,河道平均比降8.77‰.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1.5 km处,距西安86 km.坝址以上流域面积1481 km²,多年平均径流量6.67亿 m³.水库大坝为黏土心墙砂砾石重力坝,最大坝高129 m.黑河水库总库容2亿 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80万 m³,供水保证率95%.平均水深70 m.沿上游河流分布有散落的村镇,居民数量虽然不多但因长期持续性排放少量的生活污水,会对水库水质产生一定的影响.加之汛期上游入流携带大量颗粒态污染物,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

在西安黑河金盆水库共布置6个采样点(S1—S6),如图1所示.其中S1代表水库上游(水深63.0 m),S2代表主库区入库口(水深77.3 m),S3代表副库(水深16.2 m),S4代表主库区最深点(水深83.0 m),S5代表主库(水深80.1 m),S6代表主库接近大坝(水深81.8 m).2016年3月下旬(水库处于水体混合期),采用DXCN-3821加重型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3次,并混匀作为此点的沉积物样品.样品采集后立即运往实验室,经冷冻干燥,研磨、过筛,置于密封袋中保存备用.

1.3 样品分析

沉积物总氮的测定采用沉积物总氮、总磷联合测定分析方法^[20];沉积物总磷的测定采用SMT法^[21];沉积物有机质的测定采用烧失量法^[22];沉积物TOC的测定采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法^[23].每个采样点的泥样均为3个平行,对平行样结果取平均后进行分析.其中TN、TP和OM的误差范围分别为0.824—46.2 mg·kg⁻¹、4.09—31.9 mg·kg⁻¹、0.02—0.24%.数据处理及作图采用Excel2003和Origin8,用SPSS19.0进行相关性分析.

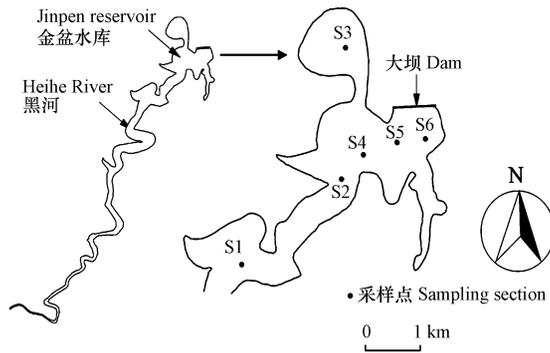


图1 黑河金盆水库采样点位置示意图

Fig.1 Sampling locations in Jinpen Reservoir

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 金盆水库表层沉积物污染状况评价

目前国内外对水库沉积物中有机质及 N、P 等营养元素没有比较统一的评价方法.本研究采用加拿大环境部(1992 年)制定的沉积物环境质量评价指南的方法,对金盆水库表层沉积物营养元素污染状况进行评价^[16].

表层沉积物质量对底栖生物生存环境有重要影响,若污染超过某一水平将对底栖生物产生毒性效应.加拿大环境部(1992 年)制定的环境质量评价指南(表 1)根据沉积物中污染物对底栖生物所造成的生态毒性效应,将沉积物分为 3 个等级:(1)安全级,表示在水生生物中未发现中毒效应;(2)最低级,表示沉积物虽已污染,但多数底栖生物仍可承受;(3)严重级,表示底栖生物群落已遭明显损害^[24].

表 1 环境质量评价指南

Table 1 Environmental quality assessment standard

生态毒性效应 Ecological toxicity	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TOC/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
安全级别	<550	<600	<10
最低级别	550—4800	600—2000	10—100
严重级别	≥ 4800	≥ 2000	≥ 100

金盆水库表层沉积物中, TN、TP 和 TOC 含量分别为 424—1460 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 987—1228 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 24.7—60.0 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$.如表 2 所示, TN 除了 S3, 其余取样点均处于最低级别, 表明沉积物已然受到氮污染, 只是底栖动物尚可承受.所有取样点中 TP 与 TOC 值均处于最低级别, 说明金盆水库已受到严重的磷污染和有机污染.6 个取样点沉积物中 TN、TP 和 TOC 含量均存在生态毒性, 对环境有潜在的危害.因此控制营养物质的输入对降低金盆水库的富营养化具有重要意义.

2.2 表层沉积物中 TN、TP 和 OM 含量及分布特征

氮、磷是水库沉积物中主要的营养元素, 沉积物中的 TN 和 TP 含量能够反映其污染程度^[16-17]. TN 含量变化范围为 424—1460 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 1132 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.从上游到库区, TN 含量先减小后增加.呈现库区积累的现象, 总氮含量较高和该区域水较深且水动力交换较弱有关, 泥沙淤积的时间较长, 淤积较严重; 另外, 水流从入库区流入库区时, 断面突然拓宽, 流速减慢, 泥沙都在此处沉积, 并且受到水库水流顶托的影响, 此处的泥沙淤积也较严重^[1].最高值出现在 S1 点的上游河流区, 两旁是陡峭的山体, 被大量的森林植被覆盖, 雨水形成的地表径流冲刷强度大, 降雨形成的径流携带富含营养的土壤和岩石碎屑进入河流, 沉积使得上游表层沉积物中总氮含量增高.

表2 金盆水库沉积物营养元素污染程度评价

Table 2 Pollution assessment of nutrients in Jinpen Reservoir

研究区域 Sampling locations	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	生态毒性 Ecotoxicity	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	生态毒性 Ecotoxicity	TOC/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	生态毒性 Ecotoxicity	TOC/TN	TOC/TP	TN/TP
S1	1460	最低级别	1228	最低级别	60.0	最低级别	40.6	49.5	1.16
S2	1060	最低级别	1130	最低级别	30.9	最低级别	30.0	26.5	0.94
S3	424	安全级别	987	最低级别	24.7	最低级别	58.3	25.1	0.43
S4	1200	最低级别	1163	最低级别	38.8	最低级别	32.2	33.6	1.04
S5	1238	最低级别	1123	最低级别	42.7	最低级别	34.5	37.7	1.09
S6	1411	最低级别	1153	最低级别	47.2	最低级别	34.8	40.6	1.13

金盆水库表层沉积物 TP 的含量为 987—1228 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 1131 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 变化幅度比 TN 小. 有研究表明^[23], 将沉积物按照 TP 含量分为严重污染 ($\text{TP}>1000 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、中度污染 ($500 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}<\text{TP}<1000 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和未污染 ($\text{TP}<500 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 等 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 1123—1228 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 均属于严重污染. 从上游到入库, 总磷含量沿程降低, 从入库到库区, 总磷含量相差不大, 均较高. 因为库区水体常年处于背风缓流状态, 水深较深, 水体交换量小, 使得营养物质随水流在沉积物中逐渐积累, 从而导致库区表层沉积物中总磷含量高.

有机质 (OM) 一般来自生活污水、农业退水、水生植物以及流域侵蚀带来的陆源植物碎屑, 是反映沉积物有机营养程度的重要指标^[25]. OM 含量变化范围为 4.26%—10.35%, 平均值为 7.02%. 整体来看, OM 含量从上游至库区, 先减小后增加. 这一基本分布与 TN 分布一致, 揭示了 OM 与 TN 间有较强的相关性.

2.2 表层沉积物 TOC/TN、TOC/TP、TN/TP 特征分析

研究表明^[16], 营养元素比值的不同可反映营养来源的特点, 其中 TOC/TN 比值能够在一定程度上反映有机质的来源及生物种类的差别. 有纤维束植物碎屑 TOC/TN 值大于 20, 高等陆生植物为 20—160, 无纤维束植物的 TOC/TN 值为 4—12, 浮游动物的 TOC/TN 值一般小于 7, 浮游植物的 TOC/TN 值为 6—14, 藻类的 TOC/TN 值为 4—10^[16,26]. 总体来说, TOC/TN 值较高的一般表明为陆源有机质, 较小的代表水体自身有机质^[27].

研究发现^[7], TOC/TN 值愈大, 说明陆源输入的有机质成分愈大. 因此黑河金盆水库表层沉积物中 OM 均来源于高等陆生植物. 由表 2 可见, 主库区 TOC/TN 值较高, 为 30.0—58.0, 一方面可能是因为金盆水库陆源物质输入相对较多, 另一方面金盆水库相比一般水源水深较深, 换水周期较长, 沉积物中的有机质基本没有迁移, 长期淤积, 另外正由于水深较深, 容易形成厌氧环境, 反硝化作用会降低 N 的含量, 进一步使 TOC/TN 值增高; 上游 TOC/TN 值较大, 与陆源有机质进入水体后未能迅速分解氧化而沉积下来有关.

TOC/TP 值在一定程度上能反映沉积物中有机碳和磷化合物的分解速率. TOC/TP 值从上游至库区, 先减小后增加, 因为上游有沿岸排放的生活污水, 导致含磷污染物在沉积物表层积累, 形成表层富集现象, 随着水流的稀释作用, 随水流方向的 TOC/TP 值减小; 库区至坝前, 因为水深较深, 生物死亡后, 磷快速的分解释放, 尤其是其中的 Fe/Al-P 和 OP, 而碳的释放则较慢, 因此库区 TOC/TP 值较大.

沉积物中氮磷含量和比值通常为水中氮磷聚积、沉积以及沉积物溶出、释放两种动态过程的综合反映^[19]. 金盆水库 TN/TP 值在 0.430—1.16, 说明其氮磷聚积量并不是很大.

2.3 表层沉积物中营养元素相关性分析

金盆水库表层沉积物中各营养元素间的相关性如表 3 所示. 由表 3 可见, 表层沉积物中 OM 与 TN、TP 均显著相关, 且 OM 与 TN 的相关系数更高, 表明金盆水库表层沉积物有机质的矿化过程与氮、磷, 尤其是氮的物质来源和沉积变化过程关系更密切. OM 与 TN、TP 的相关性不同, 可能是氮、磷沉积过程的差异而导致的^[1]. TN 与 TP 也具有显著相关性, 表明伴随着沉积物富营养化程度的变化氮、磷在沉积物积累过程中有较高的同步性. 有研究发现^[28], 有机碎屑的分解过程一般都伴随着氮、磷营养元素的释放.

有机质的分解过程是控制沉积物中氮、磷释放的关键因素^[29]。

表 3 金盆水库表层沉积物中总氮、总磷及有机质相关性分析($n=6$)

Table 3 Correlations analysis of TN, TP and OM in the surface sediments of Jinpen Reservoir($n=6$)

	TN	TP	OM
TN	1		
TP	0.942**	1	
OM	0.866**	0.857**	1

注: * $P < 0.01$.

2.4 与其他湖库比较

将金盆水库与国内不同区域 2 个湖泊和 7 座水库中沉积物的 TN、TP 和 OM 进行比较,如表 4 所示。通过对比发现,金盆水库表层沉积物中 TN 含量与江浙太湖^[7]和天津于桥水库^[28]接近,高于福建山美水库^[30],低于其他湖库;TP 含量处于较高水平,其含量低于山东周村水库^[16],而高于其他湖库;OM 含量低于山东周村水库^[16],高于其他湖库。由此可见,金盆水库与国内其他湖库相比,TP 与 OM 含量均处于较高水平,其内源负荷不容忽视。

表 4 金盆水库表层沉积物 TN、TP 和 OM 平均含量与其他湖库比较

Table 4 Comparisons of average contents of TN, TP and OM in the surface sediments of Jinpen Reservoir and other lakes

	TN/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TP/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	OM/%
江浙太湖 ^[7]	1349	486	1.05
江浙大溪水库 ^[7]	1657	324	1.20
江浙泰山水库 ^[7]	1499	505	1.27
山东周村水库 ^[16]	3900	1600	11.1
天津于桥水库 ^[28]	1365	480	3.60
福建山美水库 ^[30]	750	566	
青海湖 ^[51]	1740	599	1.85
北京密云水库 ^[32]	1900	895	
广州高州水库 ^[32]	1608	543	
西安金盆水库	1132	1131	7.02

3 结论 (Conclusion)

(1) 金盆水库 TN 含量变化范围 424—1460 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 1132 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; TP 含量变化范围 987—1228 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 1131 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 从上游到库区, TN 含量先减小后增加, OM 平均含量为 7.02%, 其分布特征与 TN 一致. TP 含量的空间分布差异并不显著, 与其它湖库相比, TN 含量相对较小, TP 和 OM 含量均处于中等水平, 说明金盆水库水体面临一定的威胁。

(2) TOC/TN 变化范围为 30.0—58.3, 表明金盆水库表层沉积物中 OM 均来源于高等陆生植物. OM 与 TN、TP 均呈极显著正相关, Pearson 系数分别为 0.866 和 0.857; 表明金盆水库表层沉积物有机质的矿化过程与氮、磷, 尤其是氮的物质来源和沉积变化过程关系更密切。

(3) 沉积物环境质量评价结果显示, 除了 S3, 其他采样点表层沉积物中 TN、TP 和 OM 均处于最低级别, 说明金盆水库已受到污染, 须引起高度重视。

参考文献 (References)

- [1] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 393-398.
LU S Y, XU M S, JIN X C, et al. Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China[J]. Environmental Science, 2012, 33(2): 393-398 (in Chinese).
- [2] 黄廷林, 柴蓓蓓. 水源水库水质污染与富营养化控制技术的研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 588-596.

- HUANG T L, CHAI B B. Advances in the study of controlling mechanisms and technology for source water reservoir quality [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 588-596 (in Chinese).
- [3] XU H, PAERL H W, QIN B Q. Nitrogen and Phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Association for the Sciences of Limnology and Oceanography*, 2010, 55(1): 420-432.
- [4] KAISERLI A, VOUTSA D, SAMARA C. Phosphorus fractionation in lake sediments-lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. *Chemosphere*, 2002, 46(8): 1147-1155.
- [5] 马越, 郭庆林, 黄廷林, 等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征 [J]. *水利学报*, 2013, 44(4): 406-415.
MA Y, GUO Q L, HUANG T L, et al. Response characteristics of water quality to the seasonal thermal stratification in Jin-pen reservoir along the Heihe river, Xian City in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(4): 406-415 (in Chinese).
- [6] HEYDEN C J A, NEW M G. Sediment chemistry a history of mine contaminant remediation and an assessment of processes and pollution potential [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, 82: 35-57.
- [7] 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): 3057-3063.
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 (in Chinese).
- [8] JARVIE H P M D, JURGENS R J, WILLIAMS, et al. Role of bed sediments as sources and sinks of phosphorus across two major eutrophic UK river basins: The Hampshire Avon and Herefordshire Wye [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/2/3/4): 51-74.
- [9] ZHOU A M, TANG H X, WANG D S. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition [J]. *Water Research*, 2005, 39(7): 1245-1254.
- [10] AIGARS J, CARMAN R. Seasonal and spatial variations of carbon and nitrogen distribution in the surface sediments of the Gulf of Riga, Baltic Sea [J]. *Chemosphere*, 2001, 43(3): 313-320.
- [11] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价 [J]. *环境科学*, 2010, 31(4): 961-968.
YU H, ZHANG W B, LU S Y, et al. Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in lake Hongze and their pollution status evaluation [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(4): 961-968 (in Chinese).
- [12] 薄录吉, 王德建, 张刚, 等. 苏南典型村镇河网区沉积物重金属与营养盐污染评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 1033-1040.
BO L J, WANG D J, ZHANG G, et al. Assessment of heavy metal and nutrient pollution in surface sediments from rural river network in southern Jiangsu Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 1033-1040 (in Chinese).
- [13] 孟亚媛, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 [J]. *环境科学*, 2015, 36(2): 471-479.
MENG Y Y, WANG S R, JIAO L X, et al. Characteristics of nitrogen pollution and the potential mineralization in surface sediments of Dianchi Lake [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2): 471-479 (in Chinese).
- [14] 张台凡, 宋进喜, 杨小刚, 等. 渭河陕西段沉积物中总磷、总氮时空分布特征及其影响因素研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1393-1399.
ZHANG T F, SONG J X, YANG X G, et al. Study on the temporal-spatial distribution characteristics and influencing factors of TP and TN in river sediments for the Weihe River of Shaanxi Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5): 1393-1399 (in Chinese).
- [15] 潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 等. “引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 [J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2800-2808.
PAN X X, MA Y Q, QIN Y W, et al. Nutrients input characteristics of the Yangtze River and Wangyu River during the “Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River” [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2800-2808 (in Chinese).
- [16] 黄廷林, 刘飞, 史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 [J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 166-172.
HUANG T L, LIU F, SHI J C. Distribution characteristics and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(1): 166-172 (in Chinese).
- [17] 苏玉萍, 赖寿辉, 林佳, 等. 富营养化饮用水源地山仔水库限制性营养元素研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(10): 3107-3113.
SU Y P, LAI S H, LIN J, et al. Research on the limiting nutrient in Shanzi Reservoir, an eutrophied drinking water source [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(10): 3107-3113 (in Chinese).
- [18] 巨拓, 黄廷林, 马卫星, 等. 稳定分层水库水质的季节性变化特征及扬水曝气水质改善 [J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 819-828.
JU T, HUANG T L, MA W X, et al. Characteristics of seasonal variation and water-lifting aerator improvement of water quality in a steady stratified reservoir [J]. *Journal of Lake Science*, 2015, 27(5): 819-828 (in Chinese).
- [19] 马越, 黄廷林, 丛海兵, 等. 扬水曝气技术在河道型深水水库水质原位修复中的应用 [J]. *给水排水*, 2012, 38(4): 7-12.
MA Y, HUANG T L, CONG H B, et al. Application of the technology of water-lifting and aeration on water quality in-situ restoration in a deep channel reservoir [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(4): 7-12 (in Chinese).
- [20] 杨柳燕, 赵兴青, 肖琳, 等. 沉积物总氮、总磷联合测定分析方法 [P]. 中国专利: 1869656, 2006-11-29.
YANG L Y, ZHAO X Q, XIAO L, et al. Sediment joint analysis method of TN and TP [P]. Chinese Patent: 1869656, 2006-11-29.
- [21] RUBAN V, J F LOPEZ-SANCHEZ, P PARDO, 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: 224-228.
- [22] WATTS C J. Seasonal phosphorus release from exposed, re-inundated littoral sediments of two Australian reservoirs [J]. *Hydrobiologia*,

2000,431:27-39.

- [23] 刘鸿亮,金相灿,荆一风.湖泊底泥环境疏浚技术[J].中国工程科学,1999,1(1):81-84.
LIU H L, JIN X C, JING Y F, et al. Environment dredging technology of lake sediment[J]. Engineering Science, 1999, 1(1): 81-84 (in Chinese).
- [24] 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.
- [25] ANGELER D G, SÁNCHEZ-CARRILLO S, GARCÍA G, et al. The influence of *Procambarus clarkii* (Cambaridae, Decapoda) on water quality and sediment characteristics in a Spanish floodplain wetland[J]. Hydrobiologia, 2001, 464(1-3): 89-98.
- [26] D'ANGELO E M, REDDY K R. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: I. Distribution of dissolved nutrients in the soil and water column[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(5): 928-936.
- [27] 袁和忠,沈吉,刘恩峰,等.太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J].环境科学,2010,31(4):954-960.
YUAN H Z, SHEN J, LIU E F, et al. Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu Lake[J]. Environment Science, 2010, 31(4): 954-960 (in Chinese).
- [28] 吴光红,曹珊珊,于雅琴,等.天津典型水环境表层沉积物中营养盐含量及动态特征[J].环境科学,2009,30(3):726-732.
WU G H, CAO S S, YU Y Q, et al. Distribution and enrichment of nutrients in superficial sediment in tianjin typical waters[J]. Environment Science, 2009, 30(3): 726-732 (in Chinese).
- [29] 原居林,李明,杨元杰,等.义乌市岩口水库底泥特征、营养盐含量及污染现状分析[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2015,34(3):255-262.
HYUAN J L, LI M, YANG Y J, et al. Analysis of characterization, nutrient content and pollution status of sediment in Yankou reservoir, Yiwu city[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2015, 34(3): 255-262 (in Chinese).
- [30] 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.
XIU 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 (in Chinese).
- [31] 陈学民,朱阳春,伏小勇,等.青海湖表层沉积物营养元素分布特征及相关性分析[J].农业环境科学学报,2012,31(2):395-401.
CHEN X M, ZHU Y C, FU X Y, et al. Investigation of eutrophic elements distribution and their correlation in Qinhai Lake surface sediments [J]. Journal of Agm-Environmment Science, 2012, 31(2): 395-401 (in Chinese).
- [32] 苟婷,李思阳,许振成,等.高州水库沉积物中总氮与总磷的分布特征研究[J].环境科学与管理,2014,39(7):31-35.
GOU T, LI S Y, XU Z C, et al. Temporal-spatial distribution of total nitrogen and total phosphorus in sediments of Gaozhou Reservoir[J]. Environment Science and Management, 2014, 39(7): 31-35 (in Chinese).