

天津于桥水库沉积物磷累积特征及其释放潜势

王乃丽¹, 王金梅¹, 李慧², 周滨², 邢美楠², 刘红磊²

(1. 天津市环科检测技术有限公司, 天津 300191;

2. 天津市环境保护科学研究院, 天津 300191)

摘要: 于桥水库是天津市唯一的城市集中式饮用水水源, 因其藻华影响供水安全, 沉积物内源磷问题受到广泛关注。采集于桥水库柱状沉积物, 利用²¹⁰Pb和¹³⁷Cs放射性同位素方法, 构建其沉积年代学, 分析磷及其赋存形态的历史分布特征, 计算其累计通量及演变过程, 评估水库内源磷释放通量和对上覆水的贡献。结果表明, 于桥水库沉积物中总磷含量范围为364~837 mg/kg; 1980年之前, 水库沉积物中TP含量较为恒定, 平均为(440±24.8) mg/kg, 之后呈现明显的累积特征, 均值上升为(579±136) mg/kg, 最高达837 mg/kg。沉积物中可交换态磷(Ex-P)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)和有机磷(Org-P)在时间上均呈现与总磷类似的逐渐累积的变化特征, 钙结合态磷和残渣磷是主要的成分。一维孔隙水扩散模型计算结果表明, 于桥水库沉积物-水释放通量为1.130~3.665 mg/(m²·d), 水库内源磷是藻华发生的重要物质来源。上述研究结果将为于桥水库藻华发生风险防控和水质管理提供支撑。

关键词: 于桥水库; 沉积物; 磷; 释放通量; 流域管理

中图分类号: X524

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.04.009

The Accumulation Characteristic of Sedimentary Phosphorus and Its Release Potential in Yuqiao Reservoir

WANG Naili¹, WANG Jinmei¹, LI Hui², ZHOU Bin², XING Meinan², LIU Honglei²

(1. Tianjin Huanke Testing Technology Co., Ltd, Tianjin 300191, China;

2. Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China)

Abstract: Yuqiao Reservoir is the only drinking water source for Tianjin City. The water quality in this reservoir is impacted by the algal blooms. Thus, the internal phosphorus of the sediment is widely concerned. In this study, the sediment cores were collected. The historical distribution characteristic of the total phosphorus (TP) and its formation were analyzed by the sedimentary chronology method with ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs. The accumulated flux and the evolution process were calculated. The release flux of the internal phosphorus and its contribution to the surface water were also evaluated. The results showed that the content range of sedimentary phosphorus in Yuqiao Reservoir was from 364 to 837 mg/kg. The TP content was relatively constant (440±24.8 mg/kg averagely) before 1980s. Then there was an obvious accumulation characteristic for the TP, the average value of the TP content increased to (579±136 mg/kg), the max value was 837 mg/kg. There was a similar accumulation trend between TP and the other fractions of phosphorus, including exchangeable phosphorus (Ex-P), phosphorus bounding to Fe and Al (Fe/Al-P), and organic phosphorus (Org-P). The calcite bounding phosphorus and residual phosphorus were the main components for the sedimentary phosphorus in this reservoir. The results calculated by the one dimensional holes diffusion of water model showed that the release flux of phosphate ranged from 1.130 to 3.665 mg/(m²·d). The internal phosphorus was an important contributor of the algal blooms in Yuqiao Reservoir. The findings in this study aims to provide a support on the risk prevention of the algal blooms in the reservoir and the water quality management.

Keywords: Yuqiao Reservoir; Sediment; Phosphorus; Release Flux; Watershed Management

CLC number: X524

水库大多作为城市生活饮用水水源地, 受人类活动影响较大^[1], 其污染来源广、途径多、种类复

杂, 累积在水库沉积物中营养盐和重金属等污染物在适宜条件下可从沉积物中重新释放到上覆水体^[2],

收稿日期: 2020-01-14

基金项目: 天津市科技计划项目(18ZYPTSF00050)

作者简介: 王乃丽(1973-), 女, 高级工程师。研究方向: 水环境监测研究。

通信作者: 刘红磊(1980-), 男, 教授级高级工程师。研究方向: 水环境水生态研究。hongleiliu@126.com

引用格式: 王乃丽, 王金梅, 李慧, 等. 天津于桥水库沉积物磷累积特征及其释放潜势[J]. 环境保护科学, 2020, 46(4): 56-61.

将会威胁水库水质安全进而影响人体健康^[3]。磷是湖库富营养化的限制因子,水库沉积物中磷的沉积总量及赋存形态^[4],湖泊物理化学过程等^[5],都对沉积物磷生物地球化学过程,对上覆水磷含量有着深远的影响^[6]。因此,研究水库沉积物中磷的累积特征和赋存形态,评估其释放强度和影响,对于藻华发生风险防控和区域供水安全保障至关重要。

于桥水库是引滦入津最重要调蓄湖泊^[7],也是天津市唯一的集中式饮用水水源^[8],承担着天津千万人口的饮用水供给功能。于桥水库磷污染及富营养化问题对于供水安全的影响^[9],受到广泛关注。自1997年于桥水库发生首次藻华事件以来^[10],水库一直处于富营养化向重度营养化过渡、接近重度营养化边缘^[11]。磷是于桥水库富营养化的限制性因子,水库TP浓度自2008~2016年呈现逐步上升的趋势^[8],推测上游流域和沉积物内源是磷的主要来源。迄今为止,对于桥水库的研究报道主要集中在水质、水量和环境治理方面,而对其沉积物磷赋存形态历史分布特点,以及其释放潜势和贡献的研究较少,仅有部分学者对其表层沉积物中磷赋存形态分布进行了调查^[12-13]。作为水环境组成的重要部分,对沉积物的研究尤其是磷累积历史、赋存形态和释放通量的评估是对于桥水库水环境质量评价研究不可或缺的组成部分。

随着于桥水库上游流域治理力度加大,上游磷输入负荷逐渐削减,但藻华现象仍时有发生^[10],推测可能与水库沉积物内源磷释放有关。于桥水库建于1959年^[8],经过50多年累积,水体中磷以颗粒态形式赋存及颗粒吸附的磷在库底聚集,沉积物中磷含量已趋于饱和^[14]。鉴于此,采集于桥水库柱状沉积物,利用²¹⁰Pb和¹³⁷Cs放射性同位素方法,构建其沉积年代学,分析磷及其赋存形态的历史分布特征,计算其累计通量及演变过程,评估水库内源磷释放通量和对上覆水的贡献,探讨于桥水库藻华爆发的驱动因素,以期为藻华发生风险防控和水质管理提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于桥水库位于天津市蓟县城东,是天津市生活及工农业用水的重要水源地之一。于桥水库正

常蓄水位21.16 m,蓄水水面86.8 km²,总库容15.59亿 m³;水库流域面积2 035 km²,其中天津境内共涉及10个乡镇、200多个自然村,约16万人,流域土地利用类型主要为果园、旱地、村庄建设用地等,产业结构以旅游业、农业为主。于桥水库流域属温带大陆性季风性半湿润气候,年平均气温为10.4~11.5℃,多年平均降水量为748.5 mm,主要集中在6~9月。水库汇水主要包括流域内地表径流汇水、引滦输水和地下水汇入,流域内主要入库河流为果河和滦河,分别位于水库东南岸和东北岸,果河由沙河和黎河汇入而成,黎河为引滦输水通道。于桥水库地理位置和柱状沉积物采样布点见图1。

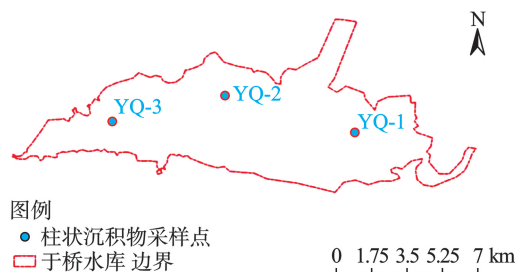


图1 于桥水库地理位置和柱状沉积物采样布点 (YQ-1, YQ-2 和 YQ-3)

1.2 沉积物样品采集

沉积物于2017年6月采集,利用奥地利Uwitec公司的柱状采泥器采集,每个采样点采集样柱3根,共采集9根沉积样柱,确保采集样柱未扰动、管内上覆水澄清。选取一根样柱在现场按1 cm分层,然后分别放入自封袋中密封,运回实验室冷冻保存,主要用于沉积物中磷和重金属的分析。另两根保持原始采样状态(包含上覆水)静置运回实验室,分别用于沉积物孔隙水中磷分析和沉积物年代学序列构建。

1.3 样品分析测试方法

1)沉积物孔隙水中TP测定。沉积物柱芯采集后运回实验室,静置24 h,然后用虹吸管缓慢移除上覆水。再按照每0.5 cm分层(0~5 cm内)和1 cm分层(>5 cm之后),分别抽滤采集各层沉积物孔隙水。然后用全自动化学分析仪(Smart Chem 200, AMS, USA)对孔隙水中的活性磷酸盐(SRP)进行定量分析。

2)沉积物中总磷和有机磷测定。分层后的沉积物样品利用冷冻干燥机(FD-1,北京德天佑科技

有限公司)冷冻干燥,然后压散,剔除砾石、贝壳等杂质,研磨后过 150 μm 筛后备用。沉积物总磷测定采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消煮法^[15],利用微波消解仪(MARS X, CEM, USA)进行消解,然后用等离子体发射光谱仪 ICP-OES(Prodigy, Leeman, USA)进行定量。每批次分析均采用 6 个空白样品和 3 个标准样品(水系沉积物成分分析标准物质 GSD-12, GBW07312, 国土资源部物化探研究所)进行质量控制。磷分级提取方法参考文献^[16],用不同化学浸提液提取,将总磷分为可交换态磷(Ex-P),铁铝结合态磷(Fe/Al-P),有机磷(Org-P),钙结合态磷(Ca-P)和残渣磷(Res-P)测定过程中所用试剂均为优级纯,所用的水均为超纯水(Milli-Q Advantage A10, Millipore, USA)。

3) ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 放射性同位素比活度测定和年代学构建。沉积柱的年代序列通常采用高纯锗 γ 能谱仪(GSW1522, CANBERRA, 法国)进行测定。称取大约 5 g 左右沉积物干燥样品置于 7 mL 离心管中,用薄膜密闭封口,静置一个月左右。每个样品上机测定 24 h,利用标准样品定量,计算得到各核素的比活度值。沉积物样品的 ^{226}Ra (以子同位素 ^{214}Pb 指示,沉积物本底 ^{210}Pb)和 ^{210}Pb 的比活度,两者的差即为过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)的比活度值。然后采用恒定补给速率模型计算于桥水库沉积柱每层对应的年代和沉积速率。同理可获得 ^{137}Cs 的比活度剖面,由于 ^{137}Cs 是核爆炸产生的一种人工放射性元素,从 20 世纪 50 年代开始北半球的 ^{137}Cs 开始明显增加,1964 年达到最大值,利用该时标峰可以构建 ^{137}Cs 年代学。将 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 年代学结果相互比较引证,可以保证沉积物年代学的准确性。

1.4 沉积物磷扩散通量估算方法

沉积物-上覆水界面磷转移过程主要包含了分子扩散,湍流,生物扰动等多个过程,其中,分子浓度梯度扩散是唯一可以采用数学模型定量的过程。通常采用 Fick 第一定律估算磷酸盐的扩散通量,见公式(1)。

$$F = \varphi_0 D_s \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (1)$$

式(1)中, F 为沉积物-水界面磷酸盐扩散通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; $\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0}$ 为孔隙水磷酸盐浓度梯度, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{cm})$; D_s 为校正的沉积物磷酸盐扩散系数,

m^2/s ; 其与孔隙度之间的经验关系式: $D_s = \varphi D_0$ ($\varphi < 0.7$); $D_s = \varphi^2 D_0$ ($\varphi > 0.7$), 其中 D_0 为理论扩散系数; φ 为沉积物孔隙度, 见公式(2)。

$$\varphi/\% = \frac{[W_w(g) - W_d(g)] \times 100\%}{[W_w(g) - W_d(g)] + W_d(g)/\rho} \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 于桥水库沉积速率变化

于桥水库沉积物柱芯中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度垂直分布剖面见图 2a。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度随着深度的增加呈现下降趋势,但在不同深度依然有波动。分别拟合 3 根沉积物柱芯 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度随沉积深度变化的指数衰减关系,柱芯 YQ-1、YQ-2 和 YQ-3 的线性拟合的相关系数 R^2 分别为 0.949, 0.930 和 0.834。根据上述拟合关系,采用恒定 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 量和恒定沉积速率模式(Constant Flux and Constant Sedimentation Model, CFS),得到 3 个区域的平均线性沉积物速率(Linear sedimentation rate, LSR)为 0.348 cm/yr 。上述 3 个沉积物柱芯 ^{137}Cs 比活度的最大峰值分别出现在 16 cm 层处(图 2b)。分别以此 3 处作为 1964 年计年时标,计算得到 3 个柱芯的平均沉积速率为 0.333 cm/yr 。上述 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 计算得到的平均沉积速率误差为,表明本研究中利用沉积物反演构建的年代学系列是合理的。此外,一般的湖库沉积物的沉积速率的范围为 0.1 ~ 1.0 cm/yr ^[17],于桥水库的沉积速率也处于该合理范围之内。

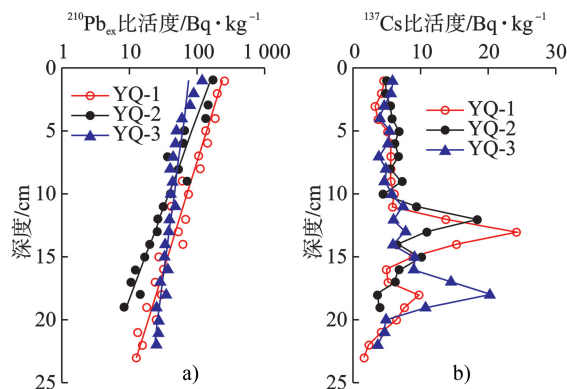


图 2 于桥水库沉积物柱芯 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 剖面分布

2.2 于桥水库磷沉积过程

于桥水库 3 个沉积柱中全磷含量和累积量历史分布见图 3。

图 3 可见,于桥水库沉积物中总磷(TP)含量范围为 364 ~ 837 mg/kg (图 3a)。在时间尺度上,

1980 年之前, 水库沉积物中 TP 含量较为恒定, 平均为 $(440 \pm 24.8) \text{ mg/kg}$, 3 个沉积物柱芯间的差异也较小。但 1980 年以来, TP 呈现明显的累积特征 (图 2), 均值为 $(579 \pm 136) \text{ mg/kg}$, 3 根柱芯最高值分别为 837、814 和 605 mg/kg 。研究表明^[18], 在改革开放 (1978 年) 之后, 全国工农业经济迅速发展, 城镇废污水量稳步增加, 加之污水收集和处理设施相对落后, 大部分污染物, 如氮磷等, 排入湖库并在沉积物中累积。不仅如此, 为提高粮食产量, 化肥使用量和强度也逐年增加^[4], 由于磷肥利用率较低, 过量的磷肥以地表径流或者壤中流的形式, 最终排入湖库等末端水体。于桥水库上游流域以农业生产为主^[19], 肥料的使用强度, 这可能是导致于桥水库沉积物中磷含量剧增的重要原因。

综合磷含量和沉积速率, 可以得到于桥水库沉积物磷的质量累积速率 (Mass accumulation rate of phosphorus, P-MAR), 结果见图 3b。和磷含量分布特点类似, 在 1980 年之前, 全磷的累积速率虽有波动, 但维持在 $50 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{yr})$ 。之后累积速率逐渐

上升, 尤其是靠近大坝的 YQ-3 区域, 在 2010 年左右超过了 $150 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{yr})$ 。对于 YQ-1 和 YQ-2 两个柱芯, 其全磷累积速率小幅上升, 这可能与沉积速率的变化有关^[20]。上述研究结果表明, 改革开放之后于桥水库受到流域人类活动强烈影响, 流域人口的增加、工业的发展、闸坝的修建等增加了水库营养盐的输入。

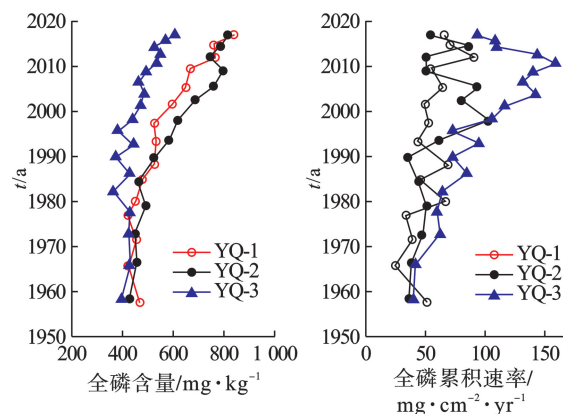


图 3 于桥水库 3 个沉积柱中全磷含量和累积量历史分布

3 个沉积物柱芯中磷的赋存形态见图 4。

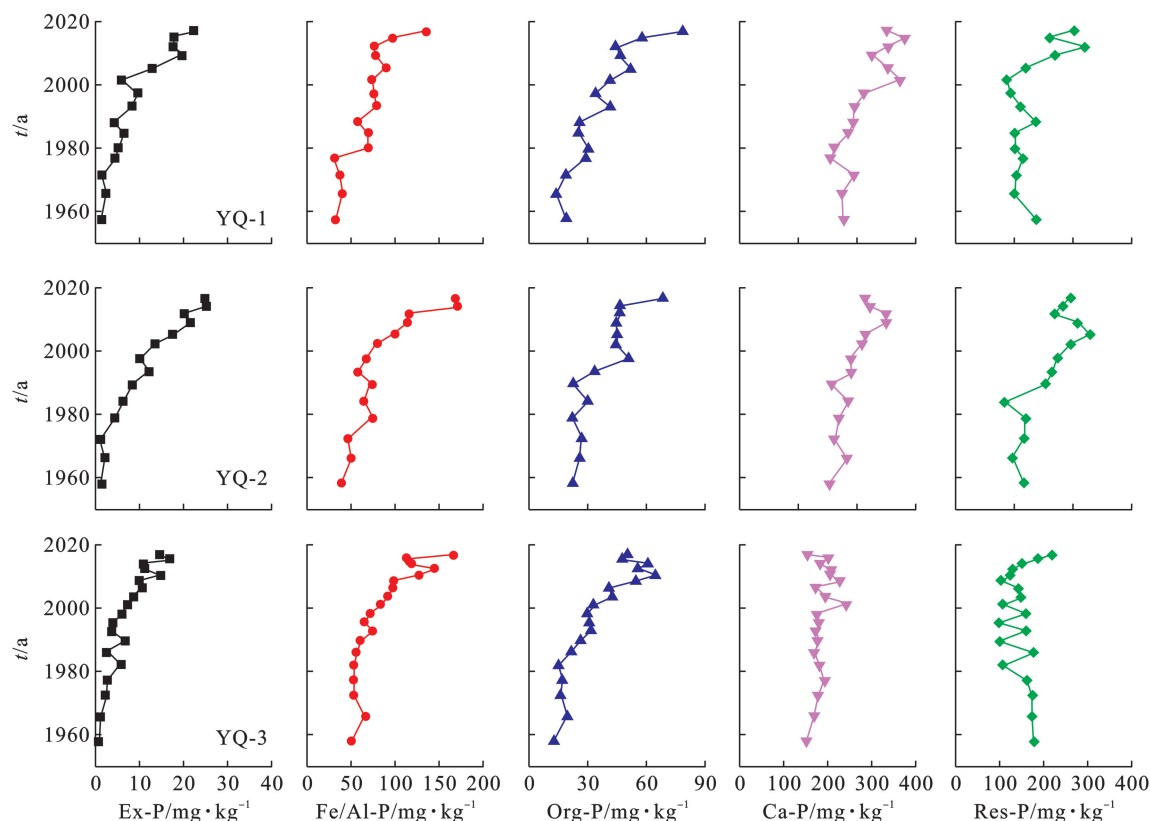


图 4 于桥水库 3 个沉积柱中磷赋存形态的历史分布

沉积物中 Ex-P 一般代表了沉积物无机磷的易解析组分。这部分磷活性较强, 具有直接的生物

可利用性, 对于植物生长以及控制上覆水体磷浓度具有重要影响^[21]。Ex-P 含量在 $0.94 \sim 25.4 \text{ mg/kg}$,

占全磷比例的 0.24% ~ 3.23%。在时间序列上,与全磷的分布类似, Ee-P 在时呈现明显的累积特征。尤其是 2000 年以后, 其累积趋势进一步加强, 研究表明^[21], 湿地沉积物中 KCl-P 一般为全磷含量 2% 左右, 于桥水库中 Ex-P 含量说明吸附于水库沉积物上的磷的易解析组分较高, 其直接的生物可利用性较强。沉积物中 Fe/Al-P 组分一般视为无定形态或弱晶型 Fe/Al 水合氧化物和氢氧化物结合的磷形态, 是潜在的生物可利用性磷库^[21]。Fe/Al-P 占全磷的 6.9% ~ 27.3%, 此类赋存形态的磷影响着沉积物孔隙水中的磷酸盐浓度, 对磷释放过程有着重要影响。与全磷和 Ex-P 分布特征类似, 从时间尺度上看, 也呈现增长趋势, 且在 2000 年后进一步增强。活性有机磷(Org-P)代表了沉积物中具有生物活性的有机磷组分, 既包括可以被快速生物利用的有机磷, 也包括了可以被缓慢利用的有机磷组分^[21], 是潜在的生物可利用性磷源之一。Org-P 在于桥沉积物中的含量较低, 在 80 mg/kg 以下。钙镁结合的无机磷组分(Ca-P)代

表了水塘沉积物中与 Ca 和 Mg 矿物结合形成稳定化合物的磷形态, 一般很难被生物体利用^[21]。Ca-P 含量在 153 ~ 372 mg/kg, 占全磷比例的 25.5% ~ 60.6%, 是于桥水库磷的主要赋存形态, 这与我国南方沉积物完全不同^[16], 与南北土壤中的钙镁含量差异有关。经过连续浸提后残渣中剩余的磷组分(Res-P)一般代表了沉积物中高度惰性的有机磷和不能被酸碱提取的矿物结合态磷^[21]。通常认为 Res-P 不具有生物可利用性。于桥水库沉积物中 Res-P 平均含量在 174 mg/kg 左右。除近年来稳步增加外, 总体而言, Res-P 含量在沉积物中保持相对稳定水平。

2.3 于桥水库沉积物磷释放通量估算

基于上述磷赋存形态分析, 于桥水库沉积物磷 Ex-P 和 Fe/Al-P 可能具有较高的释放潜势。对于水库等水体的沉积物-水界面, 上覆水的流速一般都非常低, 浓度梯度扩散是磷酸盐迁移的最重要形式^[22]。因此, 采用沉积物孔隙水一维扩散模型, 估算了正磷酸盐的扩散通量, 结果见表 1。

表 1 于桥水库水-沉积物界面 PO_4^{3-}P 的扩散通量

采样点	$dc/dx/\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{cm})^{-1}$	$\gamma_0/\%$	$D_0\times 10^{-6}/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$D_s\times 10^{-6}/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$F/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$
YQ-1	0.81	86.7±3.19	6.12	4.60	2.791
YQ-2	0.98	89.1±1.05	6.12	4.86	3.665
YQ-3	0.372	81.4±1.24	6.12	4.06	1.130

注: 1) D_0 、 D_s 的含义同上; 2) dc/dx 和 F 的数值为正表示磷酸盐由孔隙水向上覆水扩散。

表 1 可知, 三个沉积物采集位置(YQ-1, YQ-2 和 YQ-3)的磷酸盐扩散通量分别为 2.791、3.665 和 1.130 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 均表现为由沉积物向上覆水释放, 且在库中(YQ-2)和库尾(YQ-1)的释放通量要明显高于坝前位置(YQ-3), 这可能与支流输入, 以及水库藻华发生的特征有关。已有研究表明, 上游支流是于桥水库氮磷等物质的主要来源^[14]。在支流汇入区, 随着水流速度降低, 支流来水中的颗粒物携带氮磷沉积, 形成了富含磷的沉积物, 因此也产生了较高的磷扩散通量。不仅如此, 由于于桥水库藻华主要发生在水库西北岸, 严重时发展到库心区^[8], 藻华发生也会在沉积物表层形成富含有机质的沉积层, 有机质矿化过程可能导致磷释放^[23], 进而表现出较高的磷释放通量。而在坝前位置, 随着有机质矿化过程的完成, 沉积物中的磷活性降

低, 因此表现出相对较低的磷扩散通量。

3 结论

本研究基于²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 年代学方法, 建立了于桥水库建库(1959 年)以来沉积物总磷的历史累积特征。水库总磷含量范围为 364 ~ 837 mg/kg; 1980 年之前, 水库沉积物中 TP 含量较为恒定, 平均为 (440±24.8) mg/kg, 之后呈现明显的累积特征, 均值上升为 (579±136) mg/kg, 最高达 837 mg/kg。沉积物中可交换态磷(Ex-P)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)和有机磷(Org-P)在时间上均呈现与总磷类似的逐渐累积的变化特征, 钙结合态磷和残渣磷是主要的成分。于桥水库沉积物-水释放通量分为 1.130 ~ 3.665 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 水库内源磷是藻华发生的重要物质来源, 内源磷控制可能是减少于桥水库藻华发生

概率的有效途径。

参考文献

- [1] 丁越岩, 张洪, 单保庆. 海河流域河流空间分布特征及演变趋势[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 47–54.
- [2] ZHANG H, PERNETCOUDRIER B, WEN S, et al. Budget and Fate of Phosphorus and Trace Metals in a Heavily Loaded Shallow Reservoir (Shahe, Beijing City)[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2015, 43(2): 210–216.
- [3] 张伯镇, 王丹, 张洪, 等. 官厅水库沉积物重金属沉积通量及沉积物记录的生态风险变化规律[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 458–465.
- [4] ZHANG H, SHAN B. Historical records of heavy metal accumulation in sediments and the relationship with agricultural intensification in the Yangtze-Huaihe region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 399(1): 113–120.
- [5] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(3): 506–511.
- [6] 狄贞珍, 张洪, 单保庆. 太湖内源营养盐负荷状况及其对上覆水水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(12): 3872–3882.
- [7] 张晨, 陈孝军, 王立义, 等. 于桥水库菹草过度生长对水质的影响及成因分析[J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2011, 44(1): 1–6.
- [8] 岳昂, 戢运峰, 刘红磊, 等. 基于 Landsat8 影像的于桥水库藻华分布反演及其影响因素分析[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(4): 1448–1455.
- [9] 陆海明, 尹澄清, 王夏晖, 等. 于桥水库周边农业小流域氮素流失浓度特征[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 349–355.
- [10] 徐媛, 谢汝芹, 卢蔚, 等. 于桥水库富营养化评价及空间分布特征研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(1): 1–6.
- [11] 李玉英, 侯任合. 于桥水库富营养化趋势及成因[J]. *水利水电技术*, 2001, 32(8): 61–63.
- [12] 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.
- [13] 江雪, 文帅龙, 姚书春, 等. 天津于桥水库沉积物磷赋存特征及其环境意义[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(3): 50–61.
- [14] 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 等. 于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2154–2164.
- [15] LI J, LU Y, SHIM H, et al. Use of the BCR sequential extraction procedure for the study of metal availability to plants[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, 12(2): 466–471.
- [16] ZHANG H, SHAN B. Historical Distribution and Partitioning of Phosphorus in Sediments in an Agricultural Watershed in the Yangtze-Huaihe Region, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(7): 2328–2333.
- [17] DITORO D M, PEIFFER S. Book Reviews: Sediment Flux Modeling[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2001, 1(3): 197.
- [18] LU Y, ZHANG Y, CAO X, et al. Forty years of reform and opening up: China's progress toward a sustainable path[J]. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaau9413.
- [19] 胡晓芳, 王祖伟, 宋晓旭, 等. 于桥水库上游支流沉积物重金属含量及生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(6): 1210–1218.
- [20] 张含笑, 霍守亮, 张靖天, 等. 于桥水库藻类群落演替过程及影响因素[J/OL]. *环境科学研究*: 1-10[2020-07-21]. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.05.06>.
- [21] REDDY K R, DIAZ O, SCINTO L J, et al. Phosphorus dynamics in selected wetlands and streams of the lake Okeechobee Basin[J]. *Ecological Engineering*, 1995, 5(2/3): 183–207.
- [22] 潘延安, 雷沛, 张洪, 等. 重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算[J]. *环境科学*, 2014, 35(5): 1727–1734.
- [23] TANG W, ZHANG H, ZHANG W, et al. Biological invasions induced phosphorus release from sediments in freshwater ecosystems[J]. *Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects*, 2013, 436: 873–880.