

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018093002

严攀, 徐栋, 刘子森, 等. 杭州西湖沉积物磷分析及释放风险[J]. 环境化学, 2019, 38(7): 1479-1487.

YAN Pan, XU Dong, LIU Zisen, et al. Phosphorus analysis and release risk of sediments in West Lake, Hangzhou, China[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(7): 1479-1487.

杭州西湖沉积物磷分析及释放风险*

严攀^{1,2} 徐栋¹ 刘子森^{1,2} 韩帆³ 贺锋¹ 刘碧云¹
张义^{1**} 吴振斌¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉, 430072;
2. 中国科学院大学, 北京, 100049; 3. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉, 430070)

摘 要 本研究以杭州西湖的茅家埠、小南湖以及乌龟潭等 3 个子湖中的沉积物为研究对象, 研究其中沉积物磷赋存形态, 通过对沉积物磷吸附指数 (phosphorus sorption index, PSI) 与磷吸附饱和度 (phosphorus saturation, DPS) 进行测定与计算并根据两者对西湖沉积物磷的释放风险进行了客观评估. 对沉积物风险分析表明: 杭州西湖沉积物呈还原态, 表现出强氧化性; 沉水植物的生长会对沉积物的氧化还原电位产生影响, 沉水植物盖度越大, 沉积物氧化还原电位越高, 氧化性越强; 沉积物磷污染状况严重, 沉积物中磷的吸附容量主要与其中活性铁铝氧化物的含量有关; 杭州西湖不同区域的沉积物磷的吸附指数有较大的不同, 主要与区域的生态化逆境相关; 受各种相关因素影响, 杭州西湖沉积物磷的释放处于中度偏轻的风险状态.

关键词 杭州西湖, 沉积物磷吸附指数 (PSI), 磷吸附饱和度 (DPS), 释放风险分析.

Phosphorus analysis and release risk of sediments in West Lake, Hangzhou, China

YAN Pan^{1,2} XU Dong¹ LIU Zisen^{1,2} HAN Fan³ HE Feng¹
LIU Biyun¹ ZHANG Yi^{1**} WU Zhenbin¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;
3. School of Resource & Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070, China)

Abstract: The phosphorus (P) forms of sediments in three sub-lakes of West Lake, Hangzhou, China: Maojiabu, Xiaonanhu and Wuguitan were investigated, and the P release risk of the sediments was evaluated through the P sorption index (PSI) and degree of P saturation (DPS). The results showed that the sediment in West Lake mainly exists in the reduced state. The growth of submerged plants affected the redox potential of sediments, which was raised with the increase of submerged plants coverage, and the sediments oxidizability was increased. The concentration of P in the sediment was mainly related to the content of active iron-aluminum oxides. The adsorption index

2018 年 9 月 30 日收稿 (Received: September 30, 2018).

* 国家自然科学基金 (51709254), 中国科学院科技服务网络计划 (KFJ-STZ-ZDTP-038) 和中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51709254), Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-STZ-ZDTP-038) and Frontier Project of Youth Talents in Knowledge Innovation Engineering, Chinese Academy of Sciences.

** 通讯联系人, E-mail: zhangyi@ihb.ac.cn

Corresponding author, E-mail: zhangyi@ihb.ac.cn

of P in different areas of West Lake is different, mainly related to the ecological adversity. We concluded that the release of P in sediments of the three sub-lakes in West Lake was at a moderate risk after considering the various related factors.

Keywords: West Lake, Hangzhou, phosphorus (P) of sediments, release risk.

湖泊富营养化是我国水环境最为突出的问题^[1-2].湖泊中氮、磷等营养元素的增加是导致湖泊富营养化的主要因素^[3].沉积物中含有大量的营养盐及污染物,是湖泊内源营养盐的重要蓄积库^[3-4].由于诸多的环境因子对于水体沉积物磷释放具有十分复杂且重要的影响,对水体的营养盐水平等化学指标、透明度等物理指标、生产力和食物网等生物指标有制约作用^[5-6].目前,随着我国对污染排放控制及水体恢复管理力度的加大,外源磷的输入会逐步得到控制,内源磷释放所造成的二次污染将成为水体富营养化的重要来源^[7-9].为了对水体污染进行预测和控制研究沉积物磷释放,在环境保护与水污染治理上具有重要的理论意义和应用价值^[10].

目前,国内外对于河流、湖泊、水库等沉积物磷有较多的相关分析及研究^[11-17],本研究旨在前期研究基础上,通过采集杭州西湖沉积物样品,对各个采样点沉积物磷的形态进行测定分析,了解沉积物中磷的形态组成及各组分所占比例;通过对表层沉积物的吸附容量以及吸附指数的测量,了解西湖沉积物磷吸附饱和度以及其吸附容量;评估西湖沉积物磷的释放风险,为西湖的治理及改善提供基础数据和参考.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域概况

西湖是我国著名的旅游胜地,地处杭州市西面,以景色秀丽、历史悠久和景区遗迹众多而中外驰名.西湖总水域面积约为 6.39 km²,平均水深在 2.27 m 左右,最深处为 2.9 m 左右,最浅处不到 1 m,水体容量约为 1429 万 m³,年平均水温为 17.6 °C^[18-20].茅家埠、小南湖和乌龟潭是西湖湖西区域的 3 个子湖.

1.2 样品采集

在西湖茅家埠湖区(N30 °14 '31.1 ",E120 °07 '34 ")、乌龟潭湖区(N30 °14 '1.5",E120 °07 '46 ")及小南湖湖区(N30°14'01.3",E120 °08 '16.2 ")分别设 3 个(M3、M9、M12)、1 个(W7)和 2 个(XNH8、XNH11)采样点(图 1),共计 6 个采样点.2017 年 3 月 15 日于采样点位,利用彼得森采样器(HNM1-2)当场采集样点表层 0—10 cm 沉积物鲜样置于先前准备好的自封袋中,每个采样点采集 3 个样品,在采集完毕后,将沉积物运送回实验室,风干后,对沉积物进行研磨,过 100 目(0.15 mm)筛,并按照四分法将样品混合均匀,置于封口袋中密封保存待用.

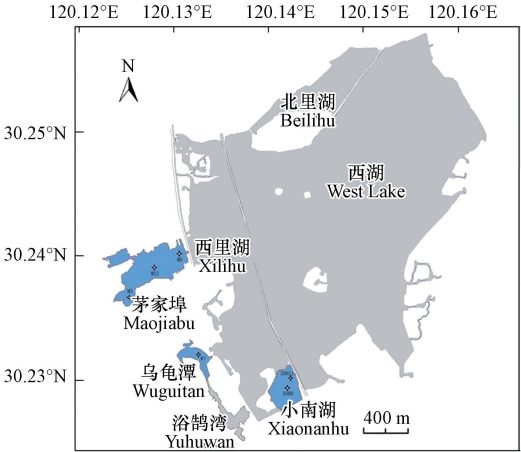


图 1 西湖沉积物采样点位置示意图

Fig.1 Geographical map of the sampling sites of sediments of West Lake, Hangzhou

1.3 样品分析

1.3.1 沉积物各形态磷的测定

沉积物磷形态分析采用 SMT 磷分级分离方法^[21],该法具有操作简单、5 种形态磷的提取相对独立、准确性好的特点,而且用此方法进行实验后测定值之间应存在相应的关系,可以互相检验.SMT 法可以测定沉积物中 5 种形态的磷,分别为:NaOH-P(NaOH 提取磷,指与铝、铁和锰的氧化物和氢氧化物相结合的磷)、HCl-P(HC 提取磷,主要指与 Ca 结合的磷)、OP(有机磷)、IP(无机磷)、TP(总磷).沉积物各种形态磷含量采用钼锑抗分光光度法测定,测定前需绘制标准曲线.

1.3.2 沉积物其他指标的测定

沉积物中有机质的测定采用灼烧失重法(105 ℃下烘 6 h,500 ℃下灼烧 6 h),准确称取一定量的样品于坩埚中,而后将盛有样品的坩埚进行称量记下对应质量,在灼烧后称量坩埚与剩余样品的总质量,利用重量之差计算沉积物中有机质的含量.pH 使用实验室 pH 计(ST 2100)进行测量.氧化还原电位(Eh)使用氧化还原(ORP)去极化法全自动测定仪(FJA-5)进行测定.每个样品做 3 个平行实验.

实验数据处理只要采用数理统计学方法,使用 Excel 2016 进行统计分析.

1.3.3 沉积物磷吸附指数及磷吸附饱和度的测定

在磷吸附指数的测定中,首先准确称取 1 g 已过筛混匀的沉积物样品于 50 mL 聚丙烯离心管中,加入 20 mL 配制在 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂溶液中的 75 mg·L⁻¹ KH₂PO₄溶液以及 2 滴氯仿,25 ℃振荡 24 h 后进行离心,离心完毕后进行过滤,并在过滤完毕后测定滤液中溶解磷的浓度.计算出沉积物样品中吸附磷的量 $X(\text{mg P} \cdot (100\text{g})^{-1})$,则磷的吸附指数可计算式可写为:

$$\text{PSI} = X/\lg C$$

式中,C 为滤液中溶解磷浓度(μmol·L⁻¹),PSI 单位为 $(\text{mg P} \cdot (100\text{g})^{-1}) \cdot (\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{-1}$.

测定方法为:在 1 个干净的 100 mL 聚乙烯瓶中先后加入 2.5 g 沉积物样品和 50 mL 草酸铵提取剂(pH=3).将准备好的样品以及空白在暗室内振荡后静置而后用滤膜过滤提取液.移取过滤后的沉积物提取液 10 mL 于 50 mL 比色管,而后加入 40 mL 0.01 mol·L⁻¹ HCl 至刻度线,摇匀,使其充分混合.同时需配置系列标准溶液.在一周内用 ICP-AES 测定提取液中 Al、P 和 Fe 3 种元素的含量.整个过程进行 3 次平行实验,根据测得提取液中 3 种元素的含量分别计算出草酸铵提取的磷量(P_{ox}, mmol·kg⁻¹)与提取的铝(Al_{ox}, mmol/kg)和铁(Fe_{ox}, mmol·kg⁻¹)的量.而沉积物的 DPS 可估算为 P_{ox}与 Al_{ox}和 Fe_{ox}总量之一半的摩尔百分比值,即

$$\text{DPS}(\%) = 100\text{P}_{\text{ox}}/0.5(\text{Al}_{\text{ox}}+\text{Fe}_{\text{ox}})$$

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 西湖沉积物的理化性质分析

探讨杭州西湖沉积物磷吸附容量以及沉积物中磷的释放风险,研究西湖沉积物的主要理化性质是十分必要的基础.其理化性质测定结果见表 1.

表 1 杭州西湖沉积物的理化性质
Table 1 Physicochemical parameters of sediments in West Lake, Hangzhou

理化性质 Physicochemical parameters	XNH11	XNH8	W7	M3	M9	M12
T/℃	17.50	16.82	15.61	16.95	17.00	17.10
Eh/mV	228	200.7	198	192.8	53	135.2
pH	6.84	6.83	6.84	6.83	6.84	6.83
有机质/%	15.14	14.10	14.26	11.43	18.82	13.04

采样时间在 3 月中旬,沉积物温度为 15.6—17.5 ℃,与此时的气候条件有关.由表可以看出,各采样点沉积物的 pH 相差不大,均属中性偏酸.沉积物的氧化还原电位多集中在 190—230 mV 之间,呈还原态,表现出强氧化环境特征.在茅家埠水域所选取的 3 个样点中,沉积物氧化还原电位(Eh)的差别较大,

M9 点的 Eh 值最小,M3 点的 Eh 值最大,说明在茅家埠水域沉积物的还原性有所区别,但是在小南湖水域却相差不大.茅家埠各采样位点沉水植物的盖度有所差异,而小南湖的两个采样位点均无沉水植物生长,茅家埠湖区各样点沉积物 Eh 有所差异可能与沉水植物生长有关^[22-24].沉积物的有机质(TOC)含量在 11%—19%之间,小南湖与乌龟潭水域的有机质含量均在 15%左右,差别不大,但是在茅家埠水域,沉积物的 TOC 含量在 11%—18%间波动,波动较大.沉水植物的死亡会使得表层沉积物中有机质的含量增加,而其生长也能加快沉积物中有机质的降解,茅家埠水域沉水植物呈斑块状分布,分布不均,可能是导致茅家埠水域沉积物中 TOC 含量在地理分布上不均的主要原因^[25-27].

2.2 西湖沉积物磷的分布特征

2.2.1 沉积物总磷(TP)的分布特征

杭州西湖沉积物的 TP 含量范围在 812.89—2039.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值是 1209.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.江苏太湖沉积物中总磷含量的平均值为 576.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,武汉东湖沉积物中总磷含量平均值为 771 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,安徽巢湖沉积物中总磷含量平均值为 561.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,杭州西湖总磷平均含量均高于三者^[28-30].对比美国评价标准,所有各湖区样点沉积物总磷含量均超过 600 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均为重度污染;对比加拿大评价标准 XNH11 点 TP 含量超过 2000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有严重生态毒性效应,茅家埠湖区虽较低但均超过最低生态毒性效应($\text{TP}=600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[28].由以上数据可以看出,小南湖水域沉积物总磷含量较高,说明小南湖水域较茅家埠及乌龟潭水域的沉积物磷污染严重.小南湖应当作为预防水体富营养化的重点监测对象,预防水体富营养化情况的发生.

2.2.2 沉积物各形态磷分布特征

如图 3 所示,杭州西湖 3 个子湖采样点沉积物 IP、OP、NaOH-P、HCl-P 的平均含量分别为 915.09、294.05、495.1、545.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 TP 含量的 75.68%、23.32%、40.95%和 45.14%.杭州西湖沉积物中 IP 含量显著高于 OP 含量.NaOH-P 是沉积物中可以被生物利用的 P,NaOH-P 更易从沉积物间隙水进入上覆水而被生物利用^[17,31],在氧化还原环境变化下,沉积物中磷与铁的同步释放是影响沉积物内源负荷的重要因素^[32-33];HCl-P 主要是指与自生磷灰石、沉积碳酸钙等含磷矿物有关的沉积磷存在形态,主要来自生物颗粒的沉积和早期沉积作用形成的氟磷灰石^[34],是沉积物较为稳定的磷形态.由图 3 可知,在小南湖区域沉积物 NaOH-P 含量高于 HCl-P 含量,而乌龟潭区域及茅家埠区域沉积物 NaOH-P 含量低于 HCl-P 含量,在小南湖区域沉积物磷内源负荷相对较高,沉积物中磷更容易发生释放.

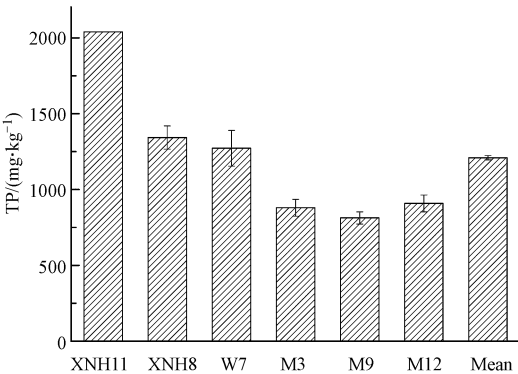


图 2 沉积物总磷含量

Fig.2 Total phosphorus content of sediment

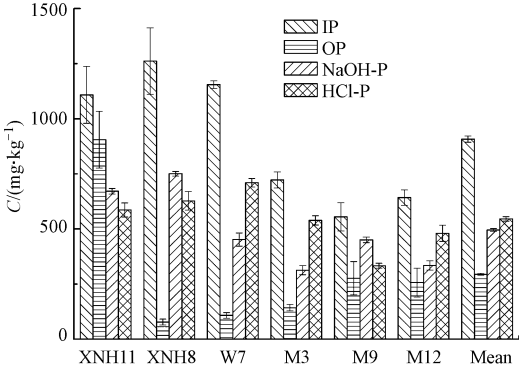


图 3 沉积物各形态磷含量

Fig.3 Content of each forms of phosphorus of sediments

对比国内典型富营养湖泊,太湖沉积物中 IP、OP、NaOH-P、HCl-P 的平均含量分别为 401.43、175.37、25.53、377.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,武汉东湖沉积物中 IP、OP、NaOH-P、HCl-P 的平均含量分别为 553、173、105、462 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,安徽巢湖沉积物中 IP、OP、NaOH-P、HCl-P 的平均含量分别为 538.4、23.54、92.88、306.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,杭州西湖沉积物中各形态磷含量均高于太湖等富营养湖泊沉积物各形态磷沉积物含量^[28-30],沉积物各形态磷平均含量排序为:IP>HCl-P>NaOH-P>OP,表明沉积物中各形态磷含量分布有一定相关性.

2.3 西湖沉积物中草酸铵提取的铁、铝、磷的分布

沉积物对磷的吸附容量会受到沉积物中无定形存在的铝、铁水合氧化物(即活性铁铝氧化物)的含量的影响^[35-36].如表 2 所示,杭州西湖沉积物中草酸铵提取的活性铁(Fe_{ox})变化范围为 88.82—124.58 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 108.19 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;草酸铵提取的活性磷(P_{ox})变化范围为 3.90—7.42 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 5.39 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;草酸铵提取的活性铝(Al_{ox})变化范围为 153.64—479.43 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 330.40 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.根据表中的数据可以明显看出小南湖沉积物中 Al_{ox} 的含量明显高于乌龟潭和茅家埠沉积物中 Al_{ox} 的含量,说明小南湖沉积物中铝盐的含量是明显高于其他两个湖区的,这也可能是导致在正常状态下小南湖水域水生沉水植物比较难于生长的原因^[37-38].而沉积物中 Fe_{ox} 的含量在小南湖、茅家埠和乌龟潭三个湖区的分布没有太大的区别, Fe_{ox} 的含量值都比较接近.从各采样点 P_{ox} 的含量值中可以看出,虽然 3 个湖区的各位点草酸铵提取的 P_{ox} 含量都较低,但是茅家埠水域沉积物中 P_{ox} 的量明显低于乌龟潭和小南湖的沉积物中 P_{ox} 的含量,然而在 3 个湖区中小南湖沉积物中草酸铵提取的 P_{ox} 含量以及 TP 含量明显高于其他两个湖区,有可能是因为沉水植物的作用而使得沉积物中活性磷的含量有所不同^[18,22-24].

表 2 草酸铵提取的铁、铝、磷含量
Table 2 Concentration of Fe_{ox} , Al_{ox} , P_{ox} extracted from sediment by ammonium oxalate

样品名称 Sampling sites	XNH11	XNH8	W7	M3	M9	M12
$\text{P}_{\text{ox}}/(\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1})$	6.84	7.42	5.49	4.42	3.90	4.24
$\text{Al}_{\text{ox}}/(\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1})$	479.43	477.32	385.00	300.80	153.64	186.21
$\text{Fe}_{\text{ox}}/(\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1})$	120.54	111.25	111.31	92.65	124.58	88.82

2.4 西湖沉积物中磷吸附指数与磷吸附饱和度的分布

2.4.1 磷吸附指数分布

磷吸附指数(PSI)可以反映沉积物对磷的缓冲能力.其中,PSI 值越高,说明该沉积物对磷的缓冲能力越强,同时说明沉积物磷释放的风险也就越低.由图 4 可知,杭州西湖沉积物的 PSI 变化范围为 23—42 $(\text{mg P}\cdot(100\text{g})^{-1})\cdot(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}$.从空间来看,乌龟潭的磷吸附指数最大为 41.50 $(\text{mg P}\cdot(100\text{g})^{-1})\cdot(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}$,而小南湖和茅家埠的沉积物磷吸附指数则处在 27.50 $(\text{mg P}\cdot(100\text{g})^{-1})\cdot(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}$ 左右.说明在 3 个湖区沉积物中,乌龟潭的沉积物对磷的缓冲能力最强,其沉积物中磷释放进入水体的风险为最低,而小南湖和茅家埠的沉积物对磷的缓冲能力则相对较弱.各区域对磷的缓冲能力的变化,是由于各区域沉积物理化性质的不同导致的,不同沉积物对磷的缓冲能力不同^[39-41].

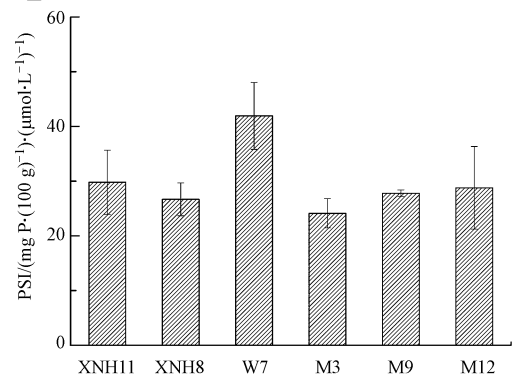


图 4 沉积物磷吸附指数
Fig.4 Phosphorus sorption index (PSI) of sediments in West Lake, Hangzhou

2.4.2 磷吸附饱和度分布

磷吸附饱和度(DPS)在很大程度上可以决定湖泊沉积物向水体释磷的量.DPS 值也可作为沉积物对磷的吸附水平和吸附容量的指标.DPS 值越大说明沉积物中固磷能力较强的吸附位已经被大量占据,沉积物中的磷释放进入上覆水的风险也就越大.各位点 DPS 分布如图 5 所示,从整体来看,杭州西湖沉

积物磷的吸附饱和度均较小,说明杭州西湖沉积物仍有一定的固磷能力,对磷的吸附容量仍较大.从3个湖区分开来看,乌龟潭沉积物的 DPS 值最小,说明乌龟潭的沉积物与小南湖和茅家埠的沉积物相比有更大的磷吸附容量,可以容纳更多的外源磷负荷,在有外源磷污染输入的时候,乌龟潭的生态稳定性较茅家埠和小南湖更强.

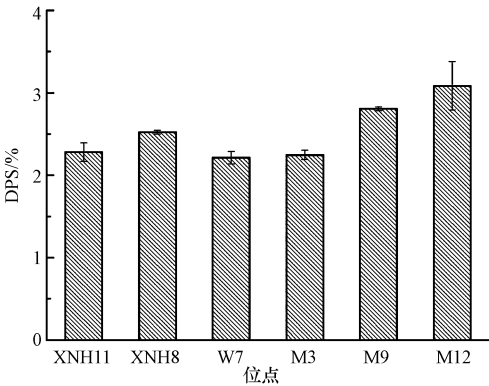


图 5 沉积物磷吸附饱和度
Fig.5 Degree of phosphorus saturation (DPS) of sediments in West Lake Hangzhou

2.5 沉积物磷释放风险评估

沉积物磷的吸附容量往往控制着沉积物中生物有效性磷的释放,其通常亦是淡水湖泊富营养化发生的重要因素.在一定程度上,湖泊中的沉积物磷的吸附容量可以用来表征但不能决定湖泊富营养化风险.根据黄清辉等对太湖沉积物磷释放风险评估体系^[42],将杭州西湖沉积物磷释放风险也分为 4 个等级如表 3 所示,由沉积物磷吸附指数和磷吸附饱和度两个因素构成的磷释放风险指数(ERI),可表示为:

$$ERI = \frac{DPS}{PSI} \times 100\%$$

式中,ERI 和 DPS 均为百分比值(%),PSI 单位为 $(\text{mg P} \cdot (100 \text{ g})^{-1}) \cdot (\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{-1}$.

表 3 沉积物磷释放风险等级

Table 3 Risk level of phosphorus release of sediments			
高度释放风险 Extremely high release risk	较高释放风险 High release risk	中度释放风险 Medium release risk	较低释放风险 Low release risk
ERI>25	20<ERI<25	10<ERI<20	ERI<10

根据数据分析及计算的结果如表 4 所示.茅家埠 M9 和 M12 点位均处于中度释放风险区,M3 点位和小南湖 XNH8 点位临近中度释放风险区,乌龟潭 W7 点位处于较低释放风险区.由于杭州西湖沉积物磷吸附饱和度较低,且磷吸附指数均较高,整体来说 3 个湖区采样点处于中度释放风险和较低释放风险状态.分区域分析,茅家埠水域为沉积物磷释放中度风险区,小南湖水域的沉积物磷释放也处在轻度和中度的边缘,而乌龟潭水域沉积物磷的释放风险明显低于小南湖和茅家埠.

表 4 杭州西湖沉积物磷释放风险评价

Table 4 Sediment phosphorus release risk assessment of sediments in West Lake, Hangzhou				
样品名称 Sampling sites	DPS/%	PSI/ $((\text{mg P} \cdot (100 \text{ g})^{-1}) \cdot (\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{-1})$	ERI/%	风险等级 Risk level
XNH11	2.28	29.08	7.84	较低释放风险区
XNH8	2.52	26.48	9.52	较低释放风险区
W7	2.21	41.50	5.33	较低释放风险区
M3	2.25	23.94	9.38	较低释放风险区
M9	2.81	27.79	10.09	中度释放风险区
M12	3.09	27.39	11.27	中度释放风险区

而乌龟潭水域沉积物磷释放风险明显低于其他的最主要的原因是该区域沉积物的磷吸附指数较高,沉积物拥有较大的磷吸附容量,而目前的磷吸附饱和度与其他水域相比处于相当的水平,故该区域属于较低释放风险区。

3 结论(Conclusion)

(1) 杭州西湖沉积物呈还原态,表现出强氧化性。

(2) 杭州西湖 3 个子湖采样点沉积物的 TP 含量范围在 812.89—2039.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,小南湖水域较茅家埠及乌龟潭水域的沉积物磷污染严重。IP、OP、NaOH-P、HCl-P 的平均含量分别 915.09、294.05、495.10、545.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, IP 含量明显高于 OP 含量。

(3) 杭州西湖 3 个子湖沉积物的 PSI 变化范围为 23—42 ($\text{mg P}\cdot(100\text{g})^{-1}\cdot(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}$),其中乌龟潭最大为 41.50 ($\text{mg P}\cdot(100\text{g})^{-1}\cdot(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}$),而小南湖和茅家埠的沉积物磷吸附指数则处在 27.50 ($\text{mg P}\cdot(100\text{g})^{-1}\cdot(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}$) 左右。

(4) 3 个子湖沉积物磷的吸附饱和度均较小,说明仍有一定的固磷能力。3 个湖区中乌龟潭沉积物的 PSI 最小,说明乌龟潭的沉积物与小南湖和茅家埠的沉积物相比有更大的磷吸附容量。

(5) 通过风险评估分析发现茅家埠位于中度释放风险区,小南湖临近中度释放风险区,乌龟潭处于较低释放风险区,整体来说 3 个湖区的采样点处中度释放风险和较低释放风险状态。需针对不同湖区特性,通过底泥疏浚等异位处理,生态友好型材料原位覆盖及以水生植物修复为主的生态综合控制技术等措施进行内源磷污染控制。

参考文献(References)

- [1] 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 Y P, HUANG T L, ZHOU Z Z, et al. Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen Reservoir [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(3): 659-665 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] HAI X, PAERL H W, QIN B Q, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Limnology & Oceanography, 2010, 55(1): 420-432.
- [4] 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. 2014. Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(12): 3057-3064 (in Chinese).
- [5] ZHANG Y, HE F, LIU Z, et al. Release characteristics of sediment phosphorus in all fractions of West Lake, Hang Zhou, China [J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 645-651.
- [6] ZHANG Y, HE F, KONG L, et al. Release characteristics of sediment P in all fractions of Donghu Lake, Wuhan, China [J]. Desalination & Water Treatment, 2016, 57(53): 1-9.
- [7] 寇丹丹, 张义, 黄发明, 等. 水体沉积物磷控制技术[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 81-85.
KOU D D, ZHANG Y, HUANG F M, et al. Control technology of phosphorus in the aquatic sediment [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(10): 81-85 (in Chinese).
- [8] 王春玲, 赵兴敏, 赵兰坡. 富营养化水体内源磷释放和稳定化研究进展[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(1): 26-30.
WANG C L, ZHAO X M, ZHAO L P. Research progress of phosphorus release and stabilization in sediments in eutrophic water [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(1): 26-30 (in Chinese).
- [9] 鲍林林, 李叙勇, 苏静君. 筑坝河流磷素的迁移转化及其富营养化特征[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4663-4670.
BAO L L, LI X Y, SHU J J, et al. Phosphorus cycling and the associated ecological effects of eutrophication in dam-regulated rivers [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4663-4670 (in Chinese).
- [10] 路丁, 郭沛涌. 湖泊沉积物磷污染及其释放风险研究[J]. 能源与环境, 2015(3): 20-21.
LU D, GUO P Y. Phosphorus pollution in lake sediments and its release risk [J]. Energy and Environment, 2015(3): 20-21 (in Chinese).
- [11] 孔樟良, 谢国雄, 章明奎. 新安江库区消落带土壤向水体释放磷的潜在风险研究[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(11): 1971-1976.
KONG Z L, XIE G X, ZHANG M K. Potential risk of phosphorus release to water from soils of riparian zone of Xin'anjiang reservoir region [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(11): 1971-1976 (in Chinese).

- [12] 孙刚, 房岩, 毕语涵, 等. 环境因子对水体沉积物磷释放的影响[J]. 农业与技术, 2014(10):3-3.
SUN G, FANG Y, BI Y H, et al. Effects of environmental factors on phosphorus release from water sediments[J]. Agriculture and Technology, 2014(10):3-3(in Chinese).
- [13] 秦丽欢, 曾庆慧, 李叙勇, 等. 密云水库沉积物磷形态分布特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3):774-781.
QIN L H, ZENG Q H, LI X Y, et al. The distribution characteristics of P forms in Miyun Reservoir sediments[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(3):774-781(in Chinese).
- [14] HICKEY C W, GIBBS M M. Lake sediment phosphorus release management—Decision support and risk assessment framework[J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 2009, 43(3):819-856.
- [15] SØNDERGAARD MARTIN, JENSE P J, ERIK JEPPESEN. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 2003, 506-509:135-145.
- [16] RYDIN E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. Water Research, 2000, 34(7):2037-2042.
- [17] ZHOU Q, GIBSON C E, ZHU Y. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. Chemosphere, 2001, 42(2):221-225.
- [18] 蔺庆伟. 杭州西湖西进水域沉水植物斑块镶嵌格局优化及稳定化研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2015.
LIN Q W. The study on patches mosaic pattern building and stabilization of submerged plant in the West Lake, Hangzhou, China[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2015(in Chinese).
- [19] 杨俊, 吴芝瑛, 徐骏, 等. 西湖不同湖区营养盐特征及富营养化现状研究[J]. 环境科学导刊, 2014, 33(3):8-12.
YANG J, WU Z Y, XU J, et al. Analysis of the Nutrient characteristics and eutrophication status in different areas of West Lake[J]. Environmental Science Survey, 2014, 33(3):8-12(in Chinese).
- [20] 张垚磊. 多孔陶瓷滤球和沉水植物联合作用处理富营养化湖泊沉积物磷[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
ZHANG Y L. Porous ceramic filter balls combine with submerged plants treatment for phosphorous in the sediments of eutrophic lakes[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015(in Chinese).
- [21] RUBAN V, J F López-Sánchez, 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, 370(2-3):224-228.
- [22] 王立志, 王国祥. 衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(17):5426-5437.
WANG L Z, WANG G X. Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17):5426-5437(in Chinese).
- [23] SUN S, HUANG S, SUN X, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(3):291-295.
- [24] 包先明. 水生植被原位恢复对底泥磷释放的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2):68-72.
BAO X M. Effect of macrophyte rehabilitation on phosphorus release in mesocosm enclosures[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2):68-72(in Chinese).
- [25] 王艳云, 王川, 徐思, 等. 杭州西湖表层沉积物中水溶性有机碳含量的时空分布特征[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(4):57-62.
WANG Y Y, WANG C, XU S, et al. Spatial and temporal variations of water-soluble carbon in surface sediments of West Lake, Hangzhou[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(4):57-62(in Chinese).
- [26] 倪兆奎, 李跃进, 王圣瑞, 等. 太湖沉积物有机碳与氮的来源[J]. 生态学报, 2010, 31(16):4661-4670.
NI Z K, LI Y J, WANG S R, et al. The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16):4661-4670(in Chinese).
- [27] 王毛兰, 赖建平, 胡珂图, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机碳、氮同位素特征及其来源分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4):1019-1025.
WANG M L, LAI J P, HU K T, et al. Compositions and sources of stable organic carbon and nitrogen isotopes in surface sediments of Poyang Lake[J]. China Environmental Science, 2014, 34(4):1019-1025(in Chinese).
- [28] 季雨珊, 方芳, 王辉彬, 等. 光度法研究太湖表层沉积物中磷形态分布及动力学特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(5):1508-1513.
JI Y S, FANG F, WANG H B, et al. Distribution of Phosphorus fractions and kinetics characteristics in surface sediments of Taihu Lake by using spectrophotometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(5):1508-1513(in Chinese).
- [29] LIU Z S, ZHANG Y, LIU B Y, et al. Adsorption performance of modified bentonite granular (MBG) on sediment phosphorus in all fractions in the West Lake, Hangzhou, China[J]. Ecological Engineering. 2017(106):124-131.
- [30] 温胜芳, 单保庆, 张洪. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究[J]. 环境科学, 2012, 33(7):2322-2329.
WEN S F, SHAN B Q, ZHANG H. Spatial distribution character of phosphorus fractions in surface sediment of Chaohu Lake[J]. Environmental Science, 2012, 33(7):2322-2329(in Chinese).
- [31] WANG S, JIN X, BU Q, et al. Effects of dissolved oxygen supply level on phosphorus release from lake sediments[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2008, 316(1):245-252.

- [32] HUPFER M, JÄRG Lewandowski. Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments: A long-lasting paradigm in limnology [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2010, 93(4-5):415-432.
- [33] LIU C, SHAO S, SHEN Q, et al. Effects of riverine suspended particulate matter on the post-dredging increase in internal phosphorus loading across the sediment-water interface[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 211:165-172.
- [34] GONSIORCZYK T, CASPER P, KOSCHEL R. Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of the Baltic Lake District (Germany)[J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37(3):51-58.
- [35] LOPEZ P, LLUCH X, VIDAL M, et al. Adsorption of phosphorus on sediments of the balearic islands (Spain) related to their composition [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1996, 42(2):185-196.
- [36] 李敏, 韦鹤平, 王光谦, 等. 长江口、杭州湾水域沉积物中磷的化学形态分布特征[J]. *海洋学报*, 2004, 26(2):125-131.
LI M, WEI H P, WANG G Q, et al. Study on the distribution and different forms of phosphorus in sediments from the Changjiang Estuary and the Hangzhou Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(2):125-131 (in Chinese).
- [37] LIN Q W, HE F, MA J M, et al. Impacts of residual aluminum from aluminate flocculant on the morphological and physiological characteristics of *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 145:266-273.
- [38] LIN Q W, LIU B Y, MIN F L, et al. Effects of aluminate flocculant on turion germination and seedling growth of *Potamogeton crispus*[J]. *Aquatic Toxicology*, 2017, 193:236-244.
- [39] 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2014, 35(3):951-957.
CHUAI X M, YANG L Y, CHENG S B, et al. Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on sediment in Lake Taihu and Lake Hulun[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3):951-957 (in Chinese).
- [40] 张义, 刘子森, 张垚磊, 等. 环境因子对杭州西湖沉积物各形态磷释放的影响[J]. *水生生物学报*, 2017, 41(6):1354-1361.
ZHANG Y, LIU Z S, ZHANG Y L, et al. Effects of varying environmental conditions on release of sediment phosphorus in West Lake, Hangzhou, China[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(6):1354-1361 (in Chinese).
- [41] 安文超, 李小明. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. *环境科学*, 2008, 29(5):1295-1302.
AN W C, LI X M. Phosphate adsorption characteristics on surface sediments of Nansi Lake and its main inflow rivers[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5):1295-1302 (in Chinese).
- [42] 黄清辉, 王子健, 王东红, 等. 太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(2):98-105.
HUANG Q H, WANG Z J, WANG D H, et al. Phosphorus sorption capacity of the surface sediment in the Lake Taihu and risk assessment of phosphorus release[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(2):98-105 (in Chinese).