

镜泊湖沉积物各形态磷分布特征及释放贡献

郑培儒^{1,2},李春华^{1*},叶春¹,魏伟伟¹,戴婉晴^{1,2},高尚超¹,郑向勇²,井芹·宁² (1.中国环境科学研究院,环境基准与风险评估国家重点实验室,湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室,北京 100012; 2.温州大学生命与环境科学学院,浙江温州 325035)

摘要: 将镜泊湖分为北部湖区、中部湖区、东部湖区、西部湖区、南部湖区共设置 23 个表层沉积物采样点和 10 个沉积柱芯采样点,采用 The Standards, Measurements and Testing Programme (SMT) 法测定沉积物中总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)、铁/铝结合态磷(NaOH-P)、钙结合态磷(HCl-P)。分析镜泊湖沉积物各形态磷的来源、空间分布特征和对磷释放的贡献。结果表明,镜泊湖湖区沉积物各形态磷有 3 个主要成分,其中成分 1 主要代表生活污水和工业废水,主成分 2 主要代表农业污染,主成分 3 主要代表碎屑岩、自生磷灰石和含磷矿物质等;镜泊湖沉积物各形态磷的空间分布具有一定的空间差异性,分布特征受镜泊湖水文特征和人类活动影响较大。湖区沉积物各形态磷含量整体而言随深度的增加不同程度的下降;对沉积物不同形态磷的磷释放贡献进行分析,分析表明,镜泊湖各湖区沉积物短时间尺度内以滞留为主,但在长时间尺度下具有一定的释放风险。

关键词: 沉积物; 磷形态; 空间分布; 镜泊湖

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6293(2021)02-0883-08

Distribution characteristics and release contribution of different phosphorus forms in sediments of Jingpo Lake. ZHENG Pei-ru^{1,2}, LI Chun-hua^{1*}, YE Chun¹, WEI Wei-wei¹, DAI Wan-qing^{1,2}, GAO Shang-chao¹, ZHENG Xiang-yong², NING Jing-qin², (1.National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China). *China Environmental Science*, 2021,41(2): 883~890

Abstract: Jingpo Lake was divided into the northern, central, eastern, western, and southern lake areas. Twenty-three surface sediment sample points and 10 sediment core sample points were installed in Jingpo Lake. The Standards, Measurements and Testing Programme (SMT) method was used to determine total phosphorus (TP), inorganic phosphorus (IP), organic phosphorus (OP), iron/aluminum combined phosphorus (NaOH-P), and calcium combined phosphorus (HCl-P) in the sediment. Researchers have analyzed the sources, spatial distribution characteristics and contribution to phosphorus release of different forms of phosphorus in Jingpo Lake sediments. The results showed that there were three main components in each form of phosphorus in Jingpo Lake sediments, of which component 1 mainly represented domestic sewage and industrial wastewater; main component 2 mainly represented agricultural pollution; main component 3 mainly represented detrital rock and authigenic apatite Stone and phosphorous minerals. The spatial distribution of different forms of phosphorus in Jingpo Lake sediments were greatly affected by the hydrological characteristics and human activities. The phosphorus content of different forms in lake sediments decreased with depth increased. Analyzed the released contribution of different forms phosphorus in sediments, the analysis showed that in a short time scale the phosphorus of sediments was staying mainly in Jingpo lake, but sediments phosphorus had release risks in a longer scale.

Key words: sediment; phosphorus forms; spatial distribution; Jingpo Lake

磷元素作为导致水体富营养化的限制性营养元素^[1],其在沉积物-水界面的迁移转化长期以来都备受关注。湖泊水体中磷来源分为外源和内源,随着外源输入的日益减少,湖泊内源磷污染成为了湖泊磷污染的主要污染源^[2]。沉积物中的 TP 在一定程度上可以反应湖泊受富营养化影响的程度,但无法对沉积物磷的释放贡献进行预测^[3]。沉积物中磷的不同形态和含量在富营养化中起着不同的作用^[4]。因此为了研究湖泊磷的循环和释放趋势有必要对

湖泊沉积物中不同形态磷含量分布和释放贡献进行研究。

SMT 沉积物磷形态分离方法^[5-6]将沉积物中的磷分为 TP、IP、OP、NaOH-P、HCl-P 五种形态,因其操作简便、适用性广多被用于测定沉积物各形态磷的赋存形态和含量。因此,本文采用 SMT 法对

收稿日期: 2020-07-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-005)

* 责任作者, 研究员, 297535203@qq.com

镜泊湖沉积物进行磷形态分离。

镜泊湖(43°46'N~44°03'N,128°37'E~129°03'E;海拔 350m)位于黑龙江省宁安市西南部,是我国最大的岩溶堰塞湖.湖泊面积 91.5km²,蓄水量达 11.8×108m³,最大水深 48m,平均水深约 13m^[7].湖区多年平均温度 4.1℃,湖泊冰期较长,是东北地区典型北方寒冷型深水湖泊.湖水主要由地表径流补给,入湖河流 30 余条,上游下游均为牡丹江^[8].大量污染物随入湖径流流入湖体,在沉积物中汇集大量氮、磷、有机质等污染物,成为湖泊的内源污染源.由于沉积物中各形态磷在不同的条件下对湖泊水环境产生不同的影响,因此我国科研人员对湖泊沉积物中各形态磷展开大量研究.但目前关于湖泊沉积物中各形态磷的研究多是基于各形态磷在湖泊表层沉积物中分布特征^[9-10];水生植物、藻类对沉积物中各形态磷含量的影响^[11-12]等.对湖泊沉积物中各形态磷沿垂直方向含量分布特征的研究多是关于浅水湖泊和湿地^[13-15],对深水湖泊沉积物中各形态磷沿垂直方向的变化和释放贡献都少有研究.因此,本文对采用 SMT 法,对镜泊湖 0~120cm 沉积物中各形态沉积物含量分布特征进行分析,并研究磷释放贡献,以期为

镜泊湖湖泊生态管理和保护提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概

本研究将镜泊湖湖区分为 5 个区域,分别为北部湖区、中部湖区、西部湖区、东部湖区和南部湖区,具体分区见图 1 所示.北部湖区分布有镜泊湖主要出湖口,中部湖区形状狭长、两侧为高山,西部湖区分布有入湖水量较大的尔站河入湖口,南部湖区分布有牡丹江入湖口,东部湖区与南部湖区之间设有闸坝,是镜泊湖区人口分布最为密集的区域.

1.2 样品采集及测定

1.2.1 样品采集 根据镜泊湖湖区特点、污染状况、河流入湖口等因素,将镜泊湖分为北部湖区、南部湖区、东部湖区、西部湖区、南部湖区五个湖区.进行沉积物采样点的布设,共布设表层沉积物采样点 23 个,沉积柱芯采样点 10 个,并利用 GPS 定位每个采样点的看经纬度坐标,具体湖区及采样点位分布如图 1 所示.样品采集后将样品密封在干净的聚乙烯袋内,带回实验室冷干,去除动植物残体、砂石等杂质后,进行研磨,过 0.15mm 筛,装入干净聚乙烯袋内备用.

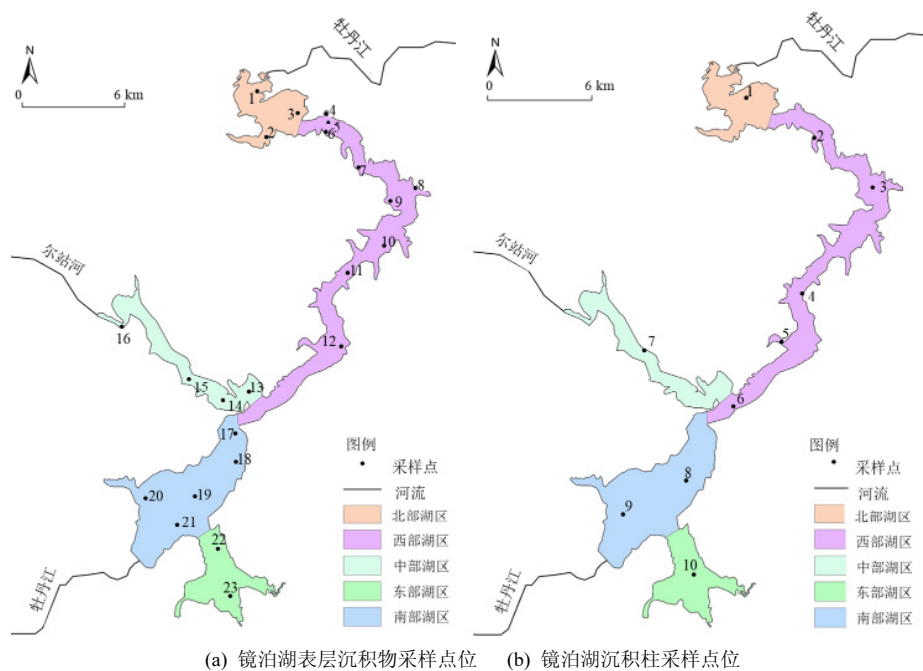


图 1 镜泊湖分区及沉积物采样点位示意

Fig.1 Schematic diagram of Jingpo Lake district and sediment sampling points

1.2.2 样品测定 对沉积物中有机质含量(OM)、

和各形态磷进行测定.其中采用 $K_2CrO_7-H_2SO_4$ 消化

法测定沉积物有机质含量^[16];采用 SMT 法对沉积物中各形态磷进行提取.采用钼锑抗比色法测定总磷(TP)、有机磷(OP)、无机磷(IP)、铁铝结合态磷(NaOH-P)、钙结合态磷(HCl-P)五种形态磷^[17].

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2016 进行数据处理,采用 GIS 插值法对镜泊湖污染空间分析,分析镜泊湖底泥中磷和有机质的空间分布,采用 Origin2018 进行图表绘制;采用 SPSS25 进行统计分析.采用 Hupfer 等^[18]提出的方法进行磷释放贡献率计算.磷释放贡献率分为快释放贡献率(V_1)和慢释放贡献率(V_2)2 种,快释放贡献率是通过计算柱状沉积物最上面 2 层磷含量变化百分比而得,慢释放贡献率 是通过计算柱状沉积物第 1 层和最后一层间磷含量变化百分比而得,计算公式如下:

$$V_1 = \frac{(k_1 - k_2)}{\sum_{i=1}^n |k_1 - k_3|} \times 100\% \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{(k_1 - k_3)}{\sum_{i=1}^n |k_1 - k_3|} \times 100\% \quad (2)$$

式中: k_1 为沉积柱芯第 1 层沉积物磷含量,mg/kg; k_2 为沉积柱芯第 2 层沉积物磷含量,mg/kg; k_3 为沉积柱芯最后一层沉积物磷含量,mg/kg; n 代表磷形态数量. V_1 和 V_2 为正值时,表示此种形态磷以释放为主, V_1 和 V_2 为负值时,表示此种形态磷以滞留为主.

2 结果与讨论

2.1 镜泊湖沉积物各形态磷空间含量分布

镜泊湖湖区沉积物中各形态磷含量空间分布情况如图 2 所示,其中,沉积物中 TP 含量为 1346.36~3538.34mg/kg,平均值为 2446.63mg/kg.沉积物 TP 水平空间含量分布呈现中部湖区>北部湖区>南部湖区>西部湖区>东部湖区;沉积物 IP 含量为 1061.28~3210.21mg/kg,平均含量为 2189.55mg/kg.湖区沉积物 IP 的水平空间分布特征与沉积物 TP 含量的分布特征相似,总体呈现中部湖区含量最高,东部湖区含量最低.镜泊湖中部湖区两侧均为高山,面积狭长,无河流入湖口,并且由于镜泊湖主要出湖口在湖区北部,因此造成南部湖区和西部湖区处入湖河流携带的大量含磷泥沙在中部和北部湖区堆积,造成北部湖区和中部湖区沉积物 TP 和 IP 含量较高.东部湖区由于与南部湖区之间设有闸坝,入湖河流携带外源

磷对其影响较小.

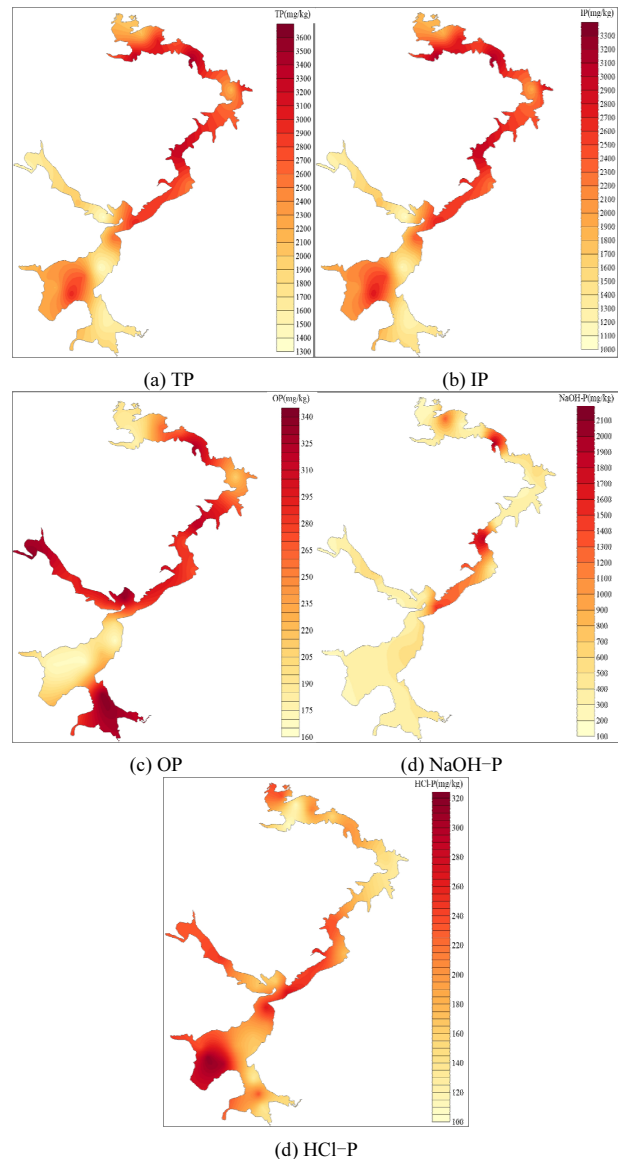


图 2 镜泊湖沉积物各形态磷含量水平空间分布
Fig.2 Horizontal spatial distribution of various forms of phosphorus content in Jingpo Lake sediments

湖区沉积物 OP 含量为 166.32~334.21mg/kg,平均含量 258.32mg/kg.湖区沉积物 OP 含量呈现东部湖区>西部湖区>中部湖区>北部湖区>南部湖区;湖区沉积物 NaOH-P 含量为 107.15~2065.37mg/kg,平均含量为 547.57mg/kg.根据相关性分析可知,镜泊湖沉积物 OP 和 OM 显著相关 ($P<0.01$).农业退水等农业面源污染、地表径流将作物秸秆、有机生活垃圾带入河流,使大量有机质沉降在沉积物会造成沉积物中 OP 含量较高^[19].由于东部湖区和西部湖区人口密集,农田面积较大,农业污水中含有大量的磷肥和

农药,这可能导致东部湖区和西部湖区沉积物 OP 含量较高的主要原因。

沉积物 NaOH-P 含量的水平空间分布特征总体呈现中部湖区>北部湖区>南部湖区>东部湖区>西部湖区。NaOH-P 是与铁、铝氧化物或氢氧化物结合的磷形态^[20],是沉积物中容易受 pH 值和氧化还原电位影响而释放到水体中的磷形态^[18],受人为活动和外源输入影响较大^[21],其含量可以反映湖泊受污染情况,在受磷污染严重的沉积物中含量较高^[23]。由于 NaOH-P 含量易受人类活动影响,因此造成湖区沉积物 NaOH-P 含量分布特征的原因较为复杂,中部湖区和北部湖区含量较高的原因与 TP、IP 含量在此区域最高的原因可能相同,都与镜泊湖水文特点相关;南部湖区牡丹江来水影响较大,大量外源磷由此进入湖区,造成中部湖区 NaOH-P 含量偏高。镜泊湖东部湖区沉积物中 NaOH-P 含量高于西部湖区,这可能与东部湖区周边有大量的人口分布,大量的生活污水进入湖区有关。

湖区沉积物 HCl-P 含量为 106.03~313.56mg/kg,平均含量为 195.08mg/kg。湖区沉积物 HCl-P 含量的水平空间分布呈现南部湖区>西部湖区>中部湖区>北部湖区>东部湖区。HCl-P 主要来自于碎屑岩的陆源输入和自生磷灰石,是稳定性较高的非生物可利用性磷^[24]。仅在弱酸性环境下,一定程度上可以被释放^[25]。镜泊湖水体 pH 值在 7.2~7.6 之间,呈现弱碱性。除陆源输入外,有研究表明,在偏碱性的水体中,水体中钙离子会与溶解性态磷结合生成 HCl-P^[26]。由于南部和西部湖区入湖河流中带有动物排泄物及动植物残体中含有 Ca 离子,也可能为造成 HCl-P 含量较高的原因。中部湖区一方面受到水力作用,部分 HCl-P 在此处沉积,一方面由于中部湖区两侧均为高山,受降雨冲刷作用,碎屑岩沉积,造成 HCl-P 含量高于北部湖区和东部湖区。

2.2 镜泊湖沉积物各形态磷垂直含量分布

镜泊湖北部湖区(1号沉积柱)、南部湖区(8~9号沉积柱)、东部湖区(10号沉积柱)、西部湖区(7号沉积柱)、中部湖区(2~6号沉积柱)TP 的垂直空间分布特征如图 3a 所示,镜泊湖各湖区表层沉积物(0~5cm)TP 含量超出底层沉积物(110~120cm) 1.03~1.48 倍,沉积物 TP 含量均随深度的增加呈现不同程度降低趋势。沉积物 TP 含量在 0~50cm 随深

度增加波动尤为明显,其中,南部湖区和西部湖区 TP 含量波动最为明显,这与南部湖区和西部湖区受入湖河流影响较为明显,沉积物受水动力影响较大有关。

镜泊湖沉积物中 IP 含量垂直变化如图 3b 所示,镜泊湖各湖区表层沉积物(0~5cm)IP 含量超出底层沉积物(110~120cm)1.15~1.37 倍。北部湖区、中部湖区、西部湖区、南部湖区沉积物 IP 含量在 0~40cm 随深度的增加波动幅度明显,40~120cm 随深度的增加呈现缓慢下降的趋势。东部湖区沉积物 IP 含量随深度的增加波动较小,这可能跟东部湖区与南部湖区之间设有闸坝,沉积物 IP 含量受水动力作用较小有关。

镜泊湖沉积物中 OP 含量垂直变化如图 3c 所示,镜泊湖各湖区表层沉积物(0~5cm)OP 含量超出底层沉积物(110~120cm)1.01~1.29 倍。镜泊湖五个湖区表层(0~5cm)和次表层(5~10cm)沉积物 OP 随深度增加而降低。是由于表层沉积物含氧量较多,有机磷矿化作用明显。整体上看,镜泊湖沉积物 OP 含量随深度增加呈现降低的趋势。

镜泊湖沉积物中 NaOH-P 的垂直空间分布特征如图 3d 所示,镜泊湖各湖区表层沉积物(0~5cm)NaOH-P 含量超出底层沉积物(110~120cm)1.01~1.37 倍。镜泊湖沉积物 NaOH-P 含量整体上呈现随深度的增加不断下降的趋势,这可能是由于随着深度的增加,含氧量逐渐降低,下层沉积物被还原释放 PO_4^{3-} 与 Fe^{3+} 结合,形成铁磷矿物,造成 NaOH-P 在沉积物表层富集^[27]。南部湖区、西部湖区和北部湖区表层沉积物 NaOH-P 含量均小于次表层沉积物 NaOH-P 含量,这可能是由于出、入河口区沉积物扰动剧烈,加剧了沉积物与水界面之间磷交换与扩散的作用所导致的。东部湖区设有闸坝,沉积物 NaOH-P 含量矿化作用较为稳定,随深度增加波动幅度明显较小。

镜泊湖沉积物中 HCl-P 的垂直空间分布特征如图 3e 所示,镜泊湖各湖区表层沉积物(0~5cm)HCl-P 含量超出底层沉积物(110~120cm) 0.99~1.13 倍。南部湖区和西部湖区沉积物 HCl-P 含量随深度波动较为明显。镜泊湖沉积物中 HCl-P 含量较低,随深度的增加波动的幅度明显小于其他形态磷,这与 HCl-P 的主要来源是自生磷灰石或碎屑岩,受人类活动影响小于其余形态磷有关。

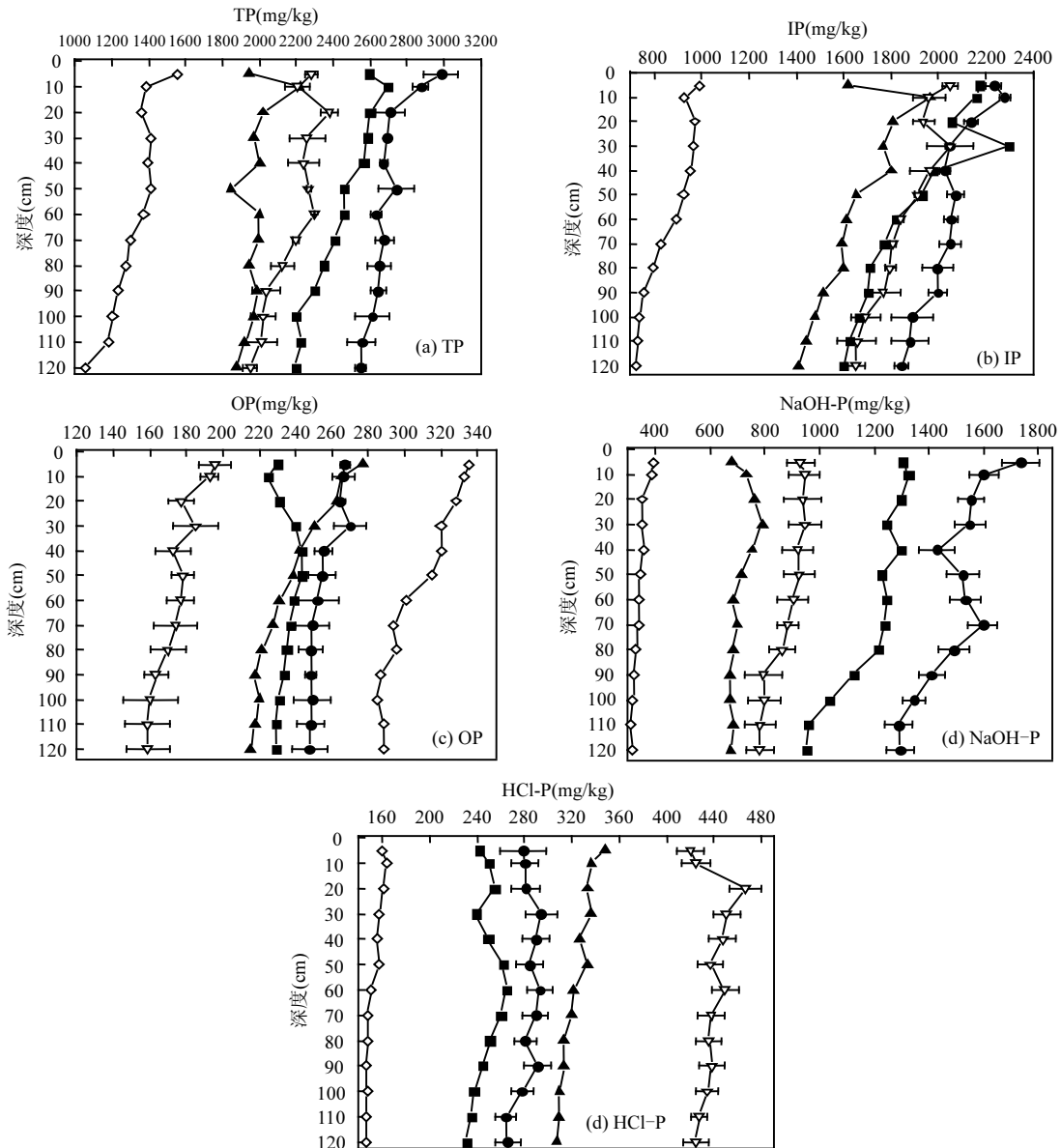


图3 镜泊湖沉积物各形态磷垂直含量变化

Fig.3 Variation of vertical phosphorus content in various forms of Jingpo Lake sediments

—■— 北部湖区 —▽— 南部湖区 —◇— 东部湖区 —▲— 西部湖区 —●— 中部湖区

2.3 镜泊湖沉积物各形态磷来源分析

利用主成分分析法对镜泊湖沉积物各形态磷来源进行分析,结果如表 1 所示,特征值大于 1 的主成分有 3 个,这 3 个主成分的累计贡献率为 88.46%,可以用于解释沉积物各形态磷的来源差异。

主成分 1 的方差贡献率为 44.79%,其中 TP、IP、NaOH-P 的荷载分别为 0.968、0.959、0.614.对湖区沉积物各形态磷进行相关性可知,湖区沉积物 TP 与 IP 含量($P<0.01$)、NaOH-P 含量($P<0.05$)呈显著正相关,说明三者来源大致相同.由于湖泊底泥沉积物中 NaOH-P 是 IP 的主要赋存形态^[28], NaOH-P 主要来

源于生活污水和工业废水^[29].因此,可以推断,主成分 1 主要代表生活污水和工业废水污染。

主成分 2 的方差贡献率为 23.15%,其中 OP 的荷载为 0.916.沉积物中 OP 主要包括水生生物的遗体、矿化降解的有机污染物.沉积物中 OP 的主要来源陆源输入和食物链等生物过程^[30],受外部农业等面源污染影响较大.结合镜泊湖流域土地利用类型推断,主成分 2 主要代表农业污染。

主成分 3 的方差贡献率为 20.51%,其中 HCl-P 的荷载为 0.936.沉积物中 HCl-P 主要来源于磷灰石、湖泊沉积的碳酸钙以及生物成因的含磷矿物,

是较为稳定的磷形态.主成分 3 主要代表碎屑岩、自生磷灰石和含磷矿物质等.

表 1 镜泊湖沉积物各形态磷主成分分析

Table 1 Principal component analysis of various forms of phosphorus in Jingpo Lake sediments

磷形态	成分 1	成分 2	成分 3
TP	0.968	-0.112	-0.133
NaOH-P	0.614	0.438	0.326
OP	0.052	0.916	0.074
IP	0.959	-0.2	-0.14
HCl-P	0.062	-0.271	0.936
方差贡献率(%)	44.79	23.15	20.51
累计贡献率(%)	44.79	67.95	88.46

2.4 磷形态对沉积物磷释放的贡献

镜泊湖不同形态磷的释放贡献结果如表 2 所示,其中北部湖区、西部湖区、南部湖区 NaOH-P 在短时间尺度都为负值,表现为滞留状态.出现短时间以滞留状态为主,可能是由于表层沉积物易受到“沉积物-水”界面交换、扩散作用影响,水动力、生物扰动和人为活动都会对表层沉积物磷的迁移转化产生影响.南部湖区、西部湖区和北部湖区 3 个区域表层沉积物受水动力影响相对较大,出现沉积物再悬浮可能较大.Søndergaard 等^[31]研究发现,由于再悬浮作用影响,表层沉积物中的大量的磷进入水体中,造成水营养盐含量为之前的 20~30 倍,因此可能会导致沉积物最表层磷的含量低于次表层磷的含量.除此之外,有研究表明,相比厌氧条件,好氧条件有利于 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+} ,磷也被氢氧化铁吸附而逐渐沉降,造成磷在短时间尺度内以滞留状态为主^[32].中部湖区 NaOH-P 为短时间尺度都为正值,表现为释放状态.这可能是由于中部湖区沉积物中 NaOH-P 含量较高,在一定程度上成为沉积物磷释放的“源”^[33].东部湖区沉积物中 OM 含量较高,这使得沉积物对间隙水中磷有较强的吸附能力^[34],导致东部湖区沉积物中 NaOH-P 在短时间尺度内成释放状态.镜泊湖五个分区长时间尺度下,NaOH-P 呈现释放状态,这可能是由于 NaOH-P 受人为活动影响较大,会造成底部与表层含量相差较大;并且 NaOH-P 易受沉积物氧化还原条件的影响,环境条件变化时,NaOH-P 可向上覆水体释放或吸附溶解态磷^[35];镜泊湖水体为弱碱性,促进了 NaOH-P 向水体中释放^[36].综合以上这些原因,可能造成镜泊湖沉积物

NaOH-P 在长时间尺度下呈释放状态.

镜泊湖 HCl-P 短时间尺度以为滞留状态为主,可能是由于河流入湖口附近区域陆源的碎屑岩、自生磷灰石和难溶的磷酸钙矿物随降雨径流大量进入湖区,导致沉积物中稳定性磷含量较高.表现为释放状态的区域,可能是由于表层生物大量生长,产生的代谢产物和残体中含有大量的 Ca 元素,使得沉积物表层 HCl-P 含量增加^[37],呈现短时间尺度的释放状态.

结合表 3 可知,镜泊湖沉积物中 NaOH-P 含量较高,但与水体中 TP 含量之间并无显著的相关性.与滇池^[38]、太湖^[39]等湖泊水体中磷含量与沉积物中有效态磷含量相关性较高的结果不同.一方面是由于镜泊湖作为通江湖泊,换水速度较快,沉积物释放的磷被冲刷走;另一方面是与滇池、太湖等浅水湖泊不同镜泊湖为深水湖泊,水体-沉积物界面磷交换对水体中磷含量的影响在短期内不明显^[8].这导致镜泊湖水体中磷主要受外源水质影响较大.

表 2 不同形态磷沉积物磷释放贡献

Table 2 Contribution of phosphorus release from different phosphorus deposits

时间尺度	采样点	沉积物磷形态释放贡献率(%)	
		NaOH-P	HCl-P
V_1	北部湖区	-94.74	5.26
	中部湖区	59.94	-0.55
	西部湖区	-86.73	13.27
	南部湖区	-65.73	-34.28
	东部湖区	52.62	-47.38
V_2	北部湖区	89.63	-10.37
	中部湖区	95.35	4.65
	西部湖区	99.13	0.87
	南部湖区	87.72	11.80
	东部湖区	95.95	-4.05

表 3 沉积物 NaOH-P、HCl-P 与水体 TP 含量的相关关系

Table 3 Correlation between sediment NaOH-P, HCl-P and TP content in water

磷形态	水体 TP
NaOH-P	0.16
HCl-P	-0.10

综上所述,镜泊湖沉积物磷有一定的释放风险,以 NaOH-P 的贡献为主,HCl-P 的贡献率都较小.

其原因一为湖区沉积物 NaOH-P 含量较高;二是由于 NaOH-P 易受外源输入和人为活动影响;三是由于 HCl-P 组成及来源较为稳定,导致其释放贡献率较小.

3 结论

3.1 镜泊湖沉积物各形态磷空间分布具有一定的空间差异性,湖区沉积物 TP、IP、含量水平空间分布主要受牡丹江上游来水影响.湖区沉积物 OP 含量的水平空间分布受有机质的含量影响明显,人类活动及牡丹江上游来水造成沉积物 NaOH-P 分布具有空间差异性,陆源碎屑岩等地表径流进入湖区是影响沉积物 HCl-P 含量分布的主要原因.湖区沉积物各形态磷含量整体而言随深度的增加不同程度的下降.

3.2 主成分分析结果表明,镜泊湖沉积物各形态磷有三种主要来源,其中,主成分 1 主要代表生活污水和工业废水污染;主成分 2 主要代表农业污染;主成分 3 主要代表碎屑岩、自生磷灰石和含磷矿物质等.

3.3 沉积物不同形态磷的磷释放贡献在短时间尺度内以滞留为主,长时间尺度下湖区沉积物磷有释放的风险,以 NaOH-P 的贡献为主,HCl-P 的贡献率较小.

参考文献:

- [1] Memet V. Spatio-temporal changes in surface water quality and sediment phosphorus content of a large reservoir in Turkey [J]. *Environmental Pollution*, 2020,259:113860.
- [2] Ma H, Zhao B, Li L, et al. Fractionation trends of phosphorus associating with iron fractions: An explanation by the simultaneous extraction procedure [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019,190:41-49.
- [3] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus.[J]. *Science*, 2009,323:1014-1015.
- [4] Zhou X, Guo H, Zhang J, et al. Simulated study on phosphorus release from sediment in Changshou Lake influenced by environmental factors [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013,7(5): 1671-1675.
- [5] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999,1(1):51-56.
- [6] Ruban V, López-Sánchez 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*, 2001,370(2/3): 224-228.
- [7] 汪 星,刘录三,李 黎,等.镜泊湖浮游藻类组成及其与环境因子的相关分析 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(11):3403-3413.
Wang X, Liu L S, Li L, et al. Correlation analysis of algae composition and environmental factors in Jingpo Lake [J]. *China Environmental Science*, 2015,35(11):3403-3413.
- [8] 刘 辉,胡林娜,朱梦圆,等.沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 [J]. *环境科学*, 2019,40(9):4023-4032.
Liu H, Hu L N, Zhu M Y, et al. Applicability of bioavailable phosphorus in sediments to indicating trophic levels of lakes and reservoirs [J]. *Environmental Science* 2019,40(9):4023-4032.
- [9] 刘思儒,赵继东,肖尚斌,等.洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 [J]. *环境科学*, 2020,41(2):734-742.
Liu S R, Zhao J D, Xiao S B, et al. Spatio-temporal variation of release flux of sediment nitrogen and phosphorus in high-risk period of algal bloom in Lake Erhai [J]. *Environmental Science*, 2020,41(2): 734-742.
- [10] 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.
- [11] 邓 洪,包 立,杨浩瑜,等.蓝藻衰亡下滇池草海沉积物中各形态磷释放动态的模拟研究 [J]. *湿地科学*, 2019,17(2):249-254.
Deng H, Bao L, Yang H Y, et al. Simulation study on release dynamics of various forms of phosphorus in sediments of caohai, dianchi lake under decline of cyanobacteria [J]. *Wetland Science*, 2019,17(2):249-254.
- [12] 王立志,董 彬,宋红丽,等.沉水植物苦草对沉积物各形态磷时空分布的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2019,40(4):58-64.
Wang L Z, Dong B, Song H L, et al. Influence of vallisneria natans growth on spatial-temporal distribution of different forms of phosphorus in sediment [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019,40(4):58-64.
- [13] 郑 煌,杨 丹,金梦云,等.洪湖沉积柱中磷形态的垂直分布及指示意义 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(4):1540-1547.
Zheng H, Yang D, Jin M Y, et al. The vertical distribution of P forms and significance in a sediment core from Honghu Lake, China [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(4):1540-1547.
- [14] 王一楷,李振国,陈志彪.太湖西部沉积物磷形态剖面分布和成因分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2019,35(4):426-432.
Wang Y K, Li Z G, Chen Z B. Vertical distribution and cause analysis of phosphorus fractions in sediment of western taihu lake [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019,35(4):426-432.
- [15] 赖月婷,吴如林,龚开晟,等.闽江口湿地沉积物各形态磷分布特征及风险评价 [J]. *水土保持学报*, 2019,33(1):171-177,185.
Lai Y R, Wu R L, Gong K S, et al. Distribution characteristics and risk assessment of phosphorus speciation in the sediments of min river estuary wetland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1):171-177,185.
- [16] Oberson A, Fardeau J C, Besson J M, et al. Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1993,16(2): 111-117.
- [17] 王圣瑞.湖泊沉积物—水界面过程.基本理论与常用测定方法 [M]. 北京:科学出版社, 2014.

- Wang S R. Sediment-water interface process of lakes.theories and methods [M] Beijing:Science Press, 2014.
- [18] Hupfer M, Lewandowski, Jörg. Retention and early diagenetic transformation of phosphorus in Lake Arendsee (Germany) – consequences for management strategies [J]. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 2005,164(2):143–167.
- [19] 赵林,方东明,宋伟男,等.海河干流表层沉积物中磷形态的空间分布特征及其对水相磷的影响 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(2):603–609.
- Zhao L, Fang D L, Song W N, et al. Spatial distribution of phosphorus fractions in surface sediments and its impact on soluble phosphorus in mainstream of haihe river [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014,44(2):603–609.
- [20] Maine M A, Hammerly J A, Leguizamon M S, et al. Influence of the pH and redox potential on phosphate activity in the Parana Medio system [J]. *Hydrobiologia*, 1992,228(1):83–90.
- [21] 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 H C, Wang S R, Jao L X, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of different forms of phosphorus in the sediments of Erhai Lake [J]. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2013, 26(3):227–234.
- [22] 王振华,王圣瑞,刘元英,等.Fe和Al对湖泊沉积物中磷赋存形态的影响 [J]. *环境科学研究*, 2012,25(5):556–562.
- WANG Z H, Wang S R, LIU Y Y, et al. Effects of iron and aluminum on phosphorus fractions in lake sediments [J]. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2012,25(5):556–562.
- [23] 袁和忠,沈吉,刘恩峰.太湖不同湖区沉积物磷形态变化分析 [J]. *中国环境科学*, 2010,30(11):1522–1528.
- Yuan H Z, Shen J, Liu E F. Analysis of phosphorus forms in different regions of Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2010,30(11): 1522–1528.
- [24] 万杰,袁旭音,叶宏萌,等.洪泽湖不同入湖河流沉积物磷形态特征及生物有效性 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(10):4568–4579.
- Wan J, Yuan X Y, Ye H M. Characteristics and bioavailability of different forms of phosphorus in sediments of rivers flowing into Hongze Lake [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(10):4568–4579.
- [25] Bai J, Yu L, Ye X, et al. Dynamics of phosphorus fractions in surface soils of different flooding wetlands before and after flow-sediment regulation in the Yellow River Estuary, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,580:124256.
- [26] 金晓丹.水体和表层沉积物不同形态磷分布及其迁移转化——以青草沙水库为例 [D]. 上海:上海交通大学, 2014.
- Jin X D. The phosphorus distribution and transformation in water and sediment of Qingcaosha reservoir [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [27] Cui S B, Zhang H Y, Liu B B. Phosphorus fractionation in the sediment of a natural lake [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 361–363:751–754.
- [28] 李铭敏.江西省湖泊底泥沉积物磷赋存形态对水体营养状况的影响 [D]. 南昌:华东交通大学, 2019.
- Li M M. Effects of phosphorus forms in sediments of lake sediments on water nutrition in Jiangxi province [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2019.
- [29] 吴忧.巢湖流域富磷地质区地表、地下水磷时空分布特征及磷源探究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2018.
- Wu Y. Exploring of phosphorus spatial and temporal distribution characteristics and phosphorus sources of surface and groundwater in the phosphorus-rich geological area of the Chaohu lake basin [D] Hefei:Hefei University of Technology, 2018.
- [30] Turner B L, Cade-Menun B J, Condron L M, et al. Extraction of soil organic phosphorus [J]. *Talanta*, 2005,66(2):294–306.
- [31] Søndergaard M, Rikke B, Erik J. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2013,710(1):95–107.
- [32] 张健,郑西来,董慧,等.河口表层沉积物中磷酸盐释放的动力学特征 [J]. *海洋地质前沿*, 2012,28(3):1–6.
- Zhang J, Zheng X L, Dong H, et al. Kinetic characteristics of phosphate release from surface sediments in estuaries [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012,28(3):1–6.
- [33] 黄威,刘星,赵丽,等.岱海沉积物内源磷释放特征的研究 [J]. *环境科学研究*, 2020,33(9):2094–2102.
- HUANG W, LIU X, ZHAO L, et al. Release characteristics of phosphorus in sediment from Daihai Lake [J]. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2020,33(9):2094–2102.
- [34] Zhang L, Wang S, Jiao L, et al. Effects of organic matter content and composition on ammonium adsorption in lake sediments [J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2015,23(7): 1–9.
- [35] Mort H P, Slomp C P, Gustafsson B G, et al. Phosphorus recycling and burial in Baltic Sea sediments with contrasting redox conditions [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2010,74(4):1350–1362.
- [36] Liu X, Pan B, Song L, et al. Study on the mechanism of the influence of flood storage at the end of the Three Gorges Reservoir on the phosphorus forms in the sediments of the tributary reservoir bay [J]. *Aquatic Sciences*, 2020,82(2):617–629.
- [37] 李乐,王圣瑞,焦立新,等.滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 [J]. *环境科学*, 2016,37(9):3384–3393.
- Li L, Wang S R, Jao L X, et al. Vertical variation of phosphorus forms in Lake Dianchi and contribution to release [J]. *Environmental Science*, 2016,37(9):3384–3393.
- [38] 黎睿.滇池沉积物磷负荷及沉积物-水界面控释材料研发 [D]. 宜昌:三峡大学, 2015.
- Li R. Internal phosphorus loading in lake Dianchi and synthetic material for controlling its sediment-water interface flux [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2015.
- [39] 贺拓.太湖西岸宜兴三沉沉积物磷形态分布及释放特征 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- He T. Phosphorus fractions and its release characteristics of sediments in Sanjiu lakes of Yixing,west Taihu Lake [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.

作者简介: 郑培儒(1996-),女,山东东营人,温州大学硕士研究生,主要从事湖泊生态修复研究。