

武汉北湖沉积物磷含量和分布特征

孙云瀚¹, 余俊爽^{1,2}, 王松波^{1*}, 蒲晓娟¹, 罗靖南¹, 曹艳敏¹

(1 中南民族大学 资源与环境学院, 武汉 430074; 2 长江水利水电开发集团(湖北)有限公司, 武汉 430010)

摘要 为研究北湖沉积物中不同形态磷的含量和分布现状, 参照改进的 Hedley 磷素分级提取法, 对武汉北湖柱状沉积物样品进行了详细的分析. 结果表明: 沉积物中总磷含量范围为 634.7~1543.7 mg·kg⁻¹, 平均值为 1165.4 mg·kg⁻¹, 属于重度污染水平. 无机磷是沉积物中磷的主要存在形式, 占总磷含量的比例超过 70.0%. 在水平方向上, 沉积物中总磷和无机磷含量从北至南递减, 且不同采样点之间存在显著差异; 在垂直方向上, 沉积物中各形态磷含量随深度增加而降低, 表明湖泊表层沉积物磷释放风险较大. 沉积物中各形态磷含量的大小顺序为: HCl-Pi>NaOH-Pi>NaHCO₃-Pi>NaOH-Po>NaHCO₃-Po>H₂O-Pi. HCl-Pi 和 NaOH-Pi 是沉积物中磷的主要形态, 占总磷的比例分别为 50.9% 和 17.1%, 较高的 NaOH-Pi 含量可能与北湖历史上曾作为某大型钢铁厂的工业污水接纳水体有关.

关键词 沉积物; 磷形态; 北湖; 垂直分布

中图分类号 X524 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2026)01-0024-08

doi: 10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20250814

Phosphorus content and distribution characteristics in sediments of North Lake in Wuhan

SUN Yunhan¹, YU Junshuang^{1,2}, WANG Songbo^{1*}, PU Xiaojuan¹, LUO Jingnan¹, CAO Yanmin¹

(1 College of Resources and Environment, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China;

2 Changjiang Water Resources and Hydropower Development Group (Hubei) Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract To investigate the content and distribution of phosphorus forms in the sediments of North Lake in Wuhan, a detailed analysis of columnar sediment samples was conducted using the refined Hedley phosphorus graded extraction method. The findings revealed that the total phosphorus content in the sediments varied between 634.7 and 1543.7 mg·kg⁻¹, with a mean concentration of 1165.4 mg·kg⁻¹, indicative of a high level of pollution. Inorganic phosphorus emerged as the predominant phosphorus species, accounting for over 70.0% of the total phosphorus. In the horizontal plane, both total and inorganic phosphorus concentrations decreased from the northern to the southern regions of the lake, with marked variations observed across different sampling sites. Vertically, the concentration of each phosphorus form in the sediments decreased with increasing depth, suggesting a higher risk of phosphorus release from the surface sediments. The order of various forms of phosphorus in the sediments was as follows: HCl-Pi>NaOH-Pi>NaHCO₃-Pi>NaOH-Po>NaHCO₃-Po>H₂O-Pi. HCl-Pi and NaOH-Pi were identified as the primary phosphorus forms, constituting 50.9% and 17.1% of the total phosphorus, respectively. The elevated NaOH-Pi levels may be associated with North Lake's history as a recipient of industrial wastewater from a large steel mill.

Keywords sediments; phosphorus forms; North Lake; vertical distribution

磷(P)是影响生物生长的重要营养元素, 它调节初级生产力并参与能量合成等过程^[1-2]. 在未受人类干扰的自然环境中, 磷主要通过矿化固定、吸附

解吸、沉淀溶解等方式进行循环与转化^[3]. 然而, 人类通过开采磷矿、使用磷肥及含磷物质, 改变了全球磷的循环, 磷的高频率使用增加了地表磷的含

收稿日期 2024-09-05

* 通信作者 王松波(1979-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 湖泊生态学, E-mail: 3088108@mail.scuec.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(42271165)

量^[1,4].含磷污染物通过降雨、径流等方式在湖泊中汇集,导致湖泊富营养化,引起藻类大量生长、生态平衡被破坏,甚至产生微囊藻毒素,危害人类健康^[5-6].沉积物中的颗粒物通过吸附磷酸盐使磷在沉积物中富集,从而减缓湖泊的富营养化进程^[7];在外源磷输入得到控制后,沉积物在一定条件下向水中释放磷,从而加剧湖泊污染负荷^[8].

沉积物中的磷以多种形式存在,一般分为水溶性磷(SRP)、碳酸氢钠磷($\text{NaHCO}_3\text{-P}$)、金属结合态磷(NaOH-P)和钙结合态磷(HCl-P)^[9].不同湖泊由于受人为干扰或自然条件的影响,沉积物中磷的组成也有所不同^[10].南漪湖沉积物中P的主要成分为钙结合态磷^[11];大冶湖受周边工业废水影响,沉积物中P以金属结合态磷为主^[12];由于太湖周边人口密集,受人为干扰和农业面源污染影响,其沉积物中有机磷占易释放磷的比例超过50%^[13].不同形态的磷对湖泊富营养化的影响方式也不同.SRP主要成分为正磷酸盐,能被生物完全利用^[14].当SRP含量不足时,生物能通过水解将其他形态的磷转化为生物有效磷参与循环.生物对磷的利用随磷浓度的变化而变化,沉积物中磷浓度增加时,生物所能利用的磷也会增多,从而提高湖泊富营养化的风险^[15]. NaOH-P 含量易受溶解氧(DO)和水体扰动的影响,当DO含量降低时,金属离子与磷酸盐解吸,磷向水体中迁移,加剧湖泊的营养负荷^[16-17].由于pH值与DO含量的变化趋势具有一致性,当间隙水中DO含量下降时,pH值随之降低,在偏酸性环境中, HCl-P 与 Ca^{2+} 解吸,在浓度梯度作用下向上覆水体释放,从而增大对湖泊富营养化程度的影响.

北湖位于湖北省武汉市青山区(东经 $114^{\circ}30'49.91''$,北纬 $30^{\circ}36'8.21''$),汇水面积约为 198.2 km^2 ,临近的严东湖、严西湖、青潭湖和竹子湖都属于北湖水域.其保护面积 1.94 km^2 ,岸线长度约 7.0 km ,与多条沟渠直接或间接相连,是典型的城市浅水湖泊.近几十年来,由于武汉市经济发展迅猛,曾经作为周边地区纳污湖的北湖目前水环境恶劣,生态系统退化,湖泊富营养化严重.北湖是武汉市“三湖三河”中需重点改善的水体之一,北湖治理有助于构建北湖产业生态新城,促进武汉成为环境友好型城市.因此,研究北湖沉积物中磷含量及存在形态,可以为北湖富营养化治理提供基础数据支持.

1 材料与方法

1.1 野外采样

根据北湖面积和形貌特点,从北向南分别设置三个采样点(见图1).在采集样品之前,现场测定了电导率、pH、DO等指标.水深采用铅锤法进行测定,透明度用塞氏盘法进行测定.水质样品使用5 L有机玻璃采水器在水下0.5 m处采集,并分装于1 L棕色玻璃瓶中,然后放入便携式保温箱中带回实验室进一步分析.柱状沉积物样品则通过重力采样器获取.沉积物样品在上岸后立即进行分割,前10 cm按照2.5 cm的间隔进行切割,之后的样品则以5 cm的间隔切割,并使用封口袋密封保存.



图1 北湖采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in North Lake

1.2 室内分析

水质总氮(TN)和总磷(TP)分别按照HJ 636—2012和GB 11893—1989的标准进行测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})测定参考GB 11892—1989标准;叶绿素 a (Chl a)含量的测定参考《水和废水监测分析方法》(第四版).

沉积物样品在自然状态下风干,干燥后进行研磨,过200目筛,并置于干燥器中保存备用.称取 0.1 g 沉积物样品放入坩埚中,在马弗炉中于 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下灰化3 h,冷却取出后将样品转移到 10 mL 离心管中,并加入 8 mL 的 $3.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的HCl进行提取.随后在 $11000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 15 min ,取上清液,参考GB 11893—1989标准,使用钼酸铵分光光度法测定吸光度,并计算得出沉积物中总磷含量(TPs).本文采用SUI等改进的Hedley磷素分级法来提取沉积物中各形态磷^[18].取 0.5 g 样品放入 50 mL 离心管中,依次用纯水、 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ ($\text{pH}=8.50$)、 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 和 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 提取 16 h .样品提取后,在

11000 r·min⁻¹的转速下离心 15 min,取上清液,一部分用于测定各形态无机磷(Pi)含量,另一部分加入 K₂S₂O₈ 溶液消解后测定各形态磷的总含量.沉积物中各形态有机磷(Po)含量通过计算上清液中各形态 P 总含量与 Pi 含量的差值得出,残渣磷则通过沉积物中的 TPs 减去提取的各形态 P 含量来计算.每个样品设置 3 个重复.

1.3 底泥污染评价

参考广东省《城市河湖环保清淤及底泥处理处置技术规程》,在无背景值的情况下将湖泊底泥磷污染分为三个等级:重度污染水平(TPs>640 mg·kg⁻¹);中度污染水平(420 mg·kg⁻¹≤TPs≤640 mg·kg⁻¹);轻度污染水平(TPs<420 mg·kg⁻¹).

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 对数据进行整理,并用 Origin 2022 软件绘制相关图形,使用 SPSS Statistics 25.0 软件对数据进行单因素方差分析,设显著性水平 α=0.05.

2 结果与分析

2.1 水体理化性质

北湖水体理化性质结果分析见表 1.由表 1 可知:北湖平均水深 1.88 m,其中北部较浅,南部较深;水体透明度平均值为 0.35 m,表明能见度较低.三个采样点的 pH 值变化不大,平均值为 9.04,说明水体呈弱碱性;水体电导率最大值出现在 1[#] 采样点,为 725 μs·cm⁻¹,平均值为 655 μs·cm⁻¹,整体水平偏高;DO 的平均值为 12.13 mg·L⁻¹,整体处于富氧环境^[19].水体中 TN 含量平均值为 1.530 mg·L⁻¹,从北至南逐渐减小;TP、Chl a 和 COD_{Mn} 的含量平均值分别为 0.166 mg·L⁻¹、45.9 μg·L⁻¹ 和 11.4 mg·L⁻¹.三个采样点各测定指标的变异系数均较小.依据《地表水环境质量标准 GB 3838—2002》,该水体属于 V 类水质.

表 1 北湖水体理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of North Lake

理化指标	1 [#]	2 [#]	3 [#]	平均值	变异系数/%
水深/m	1.60	2.00	2.05	1.88	10.7
透明度/m	0.36	0.35	0.35	0.35	1.7
pH	8.95	9.05	9.13	9.04	0.8
电导率/(μs·cm ⁻¹)	725	607	634	655	7.7
ρ(DO)/(mg·L ⁻¹)	11.96	11.93	12.50	12.13	2.2
ρ(TN)/(mg·L ⁻¹)	1.701	1.578	1.311	1.530	10.6
ρ(TP)/(mg·L ⁻¹)	0.144	0.180	0.174	0.166	9.5
ρ(Chl a)/(μg·L ⁻¹)	40.2	44.3	53.2	45.9	11.8
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	11.1	11.1	11.9	11.4	3.3

2.2 沉积物中磷的水平分布

北湖沉积物中 TPs、Pi、Po 和残渣磷含量平均值变化如图 2 所示.1[#]-3[#] 采样点中 TPs 和 Pi 含量呈现递减趋势,且各样点之间均存在显著差异(P<0.05).其中,TPs 的最大值和最小值分别为 1308.9 mg·kg⁻¹ 和 964.0 mg·kg⁻¹,Pi 的最大值和最小值分别为 1040.7 mg·kg⁻¹ 和 748.2 mg·kg⁻¹.三个采样点中 Po 的含量均较低,约为 35.7 mg·kg⁻¹.2[#] 沉积物中残渣磷含量最高,为 316.5 mg·kg⁻¹,而 1[#] 和 3[#] 采样点的残渣磷含量相差不大,分别为 234.8 mg·kg⁻¹ 和 198.4 mg·kg⁻¹.Pi 是北湖沉积物中磷的主要存在形式,在三个采样点中占 TPs 的平均比例均超过 70.0%.

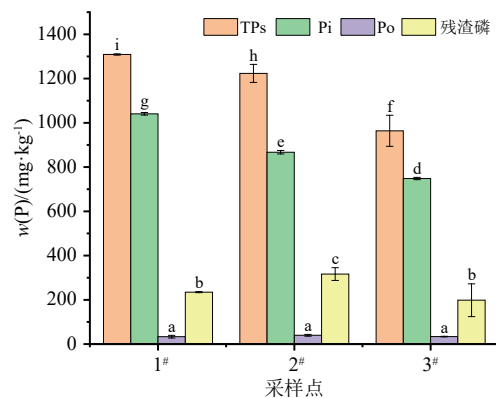


图 2 沉积物中 TPs、Pi、Po 和残渣磷的平均含量

Fig. 2 Mean values of TPs, Pi, Po and residual phosphorus in sediments

(不同的字母表示存在显著差异)

2.3 沉积物 TPs 与 Pi 垂直分布

随沉积物深度增加,TPs 和 Pi 含量均呈现先增大后减小的趋势(图 3).1[#] 采样点位于北湖的北部区域,TPs 和 Pi 在沉积物前 5 cm 分别从 1239.0 mg·kg⁻¹ 和 944.6 mg·kg⁻¹ 增加至 1543.7 mg·kg⁻¹ 和 1175.3 mg·kg⁻¹,之后 TPs 含量在沉积物 5~10 cm 深度内变化较小,其平均值为 1540.3 mg·kg⁻¹;而 Pi 在沉积物 5~15 cm 深度内变化也较小,含量平均值为 1208.1 mg·kg⁻¹.在沉积物 10~30 cm 深度内,TPs 含量从 1537.1 mg·kg⁻¹ 降低至 634.7 mg·kg⁻¹;而 Pi 则在沉积物 15~30 cm 深度内从 1237.7 mg·kg⁻¹ 减少至 542.0 mg·kg⁻¹(图 3(a)).3[#] 采样点位于北湖南部区域,TPs 和 Pi 的变化趋势相同,在沉积物 0~10 cm 深度内变化较小,其平均值分别为 1118.5 mg·kg⁻¹ 和 833.1 mg·kg⁻¹;在 10~30 cm 深度内,TPs 由 1125.1 mg·kg⁻¹ 下降至 650.2 mg·kg⁻¹;Pi 从 840.1 mg·kg⁻¹ 减少至 502.0 mg·kg⁻¹(图 3(c)).2[#] 采样点位于北湖中部区域,TPs 和 Pi 在沉积物 0~20 cm 深度内呈递增趋势,其含量分别由

1159.8 mg·kg⁻¹和 862.2 mg·kg⁻¹增加至 1350.1 mg·kg⁻¹和 1012.2 mg·kg⁻¹; 在 20~30 cm 深度内, Pi 含量递减至 660.1 mg·kg⁻¹, 而 TP_s 在 30 cm 处异常增加至 1334.7 mg·kg⁻¹(图 3(b)). 在 0~30 cm 深度范围内, 北湖 1# 底泥 TP_s 含量为 634.7~1543.7 mg·kg⁻¹, 2#

1082.5~1350.1 mg·kg⁻¹, 3# 为 650.2~1126.7 mg·kg⁻¹. 三个采样点各个深度底泥中 TP_s 含量除 1# 的最底层样品外, 均超过重度污染水平限值(640 mg·kg⁻¹), 表明北湖底泥整体处于重度污染水平, 底泥中磷释放风险较大.

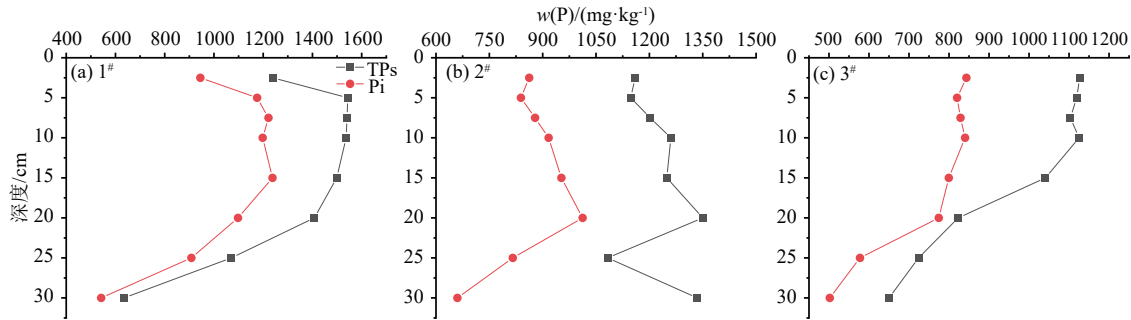


图 3 沉积物中 TP_s 和 Pi 的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of TP_s and Pi in sediments

2.4 沉积物中各形态 P 含量

北湖沉积物中各形态 P 含量大小顺序为 HCl-Pi > NaOH-Pi > NaHCO₃-Pi > Po > H₂O-Pi (见表 2). 北湖沉积物中 H₂O-Pi 含量为 2.1~6.9 mg·kg⁻¹, 在所有磷形态中含量最低, 约占 TP_s 的 0.4%. 北湖沉积物中 NaHCO₃-Pi 的含量范围为 48.9~162.0 mg·kg⁻¹, 平均值为 95.1 mg·kg⁻¹, 在 TP_s 中的占比相对较少(约为 3.7%~11.4%). NaOH-Pi 在沉积物中的含量为 115.1~315.5 mg·kg⁻¹, 占 TP_s 含量的比例为 9.7%~22.0% (平均值为 17.1%). 北湖沉积物中 HCl-Pi 的含量为 320.0~761.5 mg·kg⁻¹, 其在 TP_s 中占比最高, 平均值为 50.9% (范围为 35.9%~59.1%). Po 由 NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 相加组成, 平均值为 35.7 mg·kg⁻¹.

表 2 北湖沉积物中各形态磷含量

Tab. 2 Phosphorus content of various forms in sediments in North Lake

不同形态的磷	不同指标			标准差
	最大值 /(mg·kg ⁻¹)	最小值 /(mg·kg ⁻¹)	平均值 /(mg·kg ⁻¹)	
H ₂ O-Pi	6.9	2.1	4.2	1.2
NaHCO ₃ -Pi	162.0	48.9	95.1	33.0
NaOH-Pi	315.5	115.1	199.2	59.0
HCl-Pi	761.5	320.0	586.9	118.4
Po	60.5	13.5	35.7	12.7

在三个采样点中, H₂O-Pi 含量最低, 且差异不大, 约为 4.2 mg·kg⁻¹, 其在不同采样点、不同深度沉积物中占可提取态磷总量(TP_{ex})的百分比均在 0.5% 左右. 如图 4 所示, 1# 沉积物中 NaHCO₃-P 含量(136.9 mg·kg⁻¹)显著大于 2# 与 3# 的 NaHCO₃-P 含量

(约 85.7 mg·kg⁻¹). 在垂直剖面上, NaHCO₃-Pi 在三个采样点不同深度处占 TP_{ex} 的百分比变化范围均不大, 分别约为 12.1%、8.4% 和 10.1% (图 5). NaOH-Pi 含量在 1# 沉积物中最多, 平均为 271.3 mg·kg⁻¹, 2# 为 217.2 mg·kg⁻¹, 均显著大于 3# 的 193.1 mg·kg⁻¹ (图 4). NaOH-Pi 占 TP_{ex} 的百分比最大值为 25.6%, 位于 1# 沉积物 7.5~10 cm 处, 最小值在 1# 的 20~25 cm 处, 为 15.9% (图 5(a)), 在三个采样点, 其占 TP_{ex} 的比例平均分别为 22.3%、20.5% 和 21.5% (图 5). HCl-Pi 含量在三个采样点均存在显著差异, 最大值出现在 1#, 为 660.8 mg·kg⁻¹, 2# 和 3# 分别为 600.5 mg·kg⁻¹ 和 499.2 mg·kg⁻¹ (图 4). HCl-Pi 平均含量占沉积物 TP_{ex} 含量百分比均超过 60% (图 5). 三个采样点的 Po 含量均很少, 其中 NaOH-Po > NaHCO₃-Po, 两者合计占 TP_{ex} 的百分比分别为 3.1%、4.4% 和 4.2% (图 5).

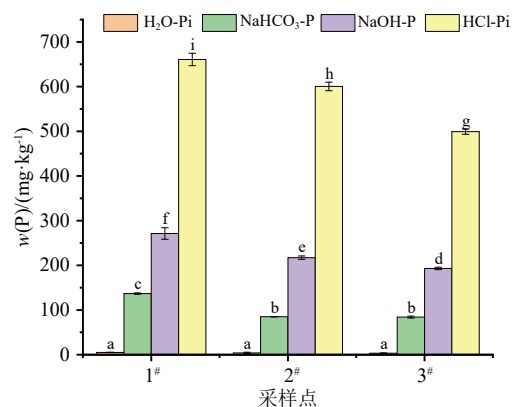
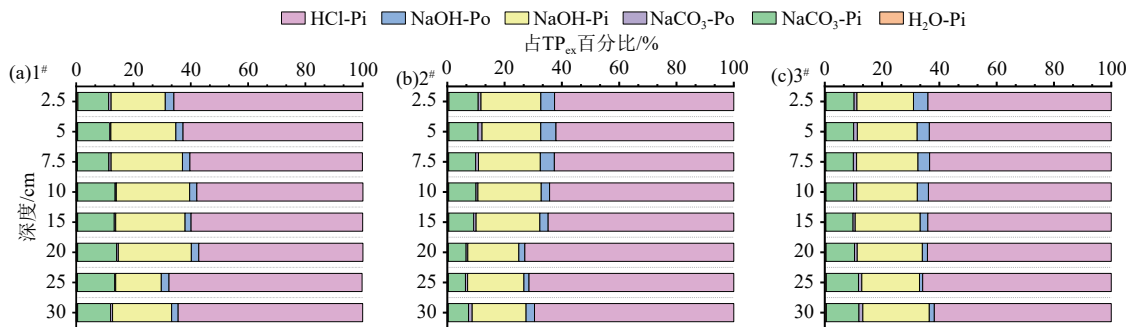


图 4 沉积物中不同形态磷的平均含量

Fig. 4 Mean content of different forms of phosphorus in sediments (不同的字母表示存在显著差异)

图5 沉积物中不同形态磷占 TP_{ex} 百分比垂直分布Fig. 5 Vertical distribution of various phosphorus forms as a percentage of TP_{ex} in sediments

2.5 沉积物各形态P垂直分布

在垂直方向上,沉积物中不同形态的P分布存在显著差异(图6). H_2O -Pi在三个采样点间含量均很低,在垂直方向上变化也不明显(图6(a)).

在沉积物0~10 cm深度范围内,1#采样点的 $NaHCO_3$ -Pi含量从 $105.0 mg \cdot kg^{-1}$ 增加至 $162.0 mg \cdot kg^{-1}$,随后在>10~30 cm内递减至 $64.2 mg \cdot kg^{-1}$;2#和3#的变化趋势一致,在沉积物0~30 cm内分别由93.3、 $87.9 mg \cdot kg^{-1}$ 减少至48.9、 $59.0 mg \cdot kg^{-1}$ (图6(b)). $NaHCO_3$ -Po含量随沉积物深度变化不明显,整体呈现减小趋势(图6(c)).

在沉积物0~15 cm深度范围内,1#采样点的NaOH-Pi从 $186.3 mg \cdot kg^{-1}$ 增加至 $315.5 mg \cdot kg^{-1}$ 后减少至 $307.4 mg \cdot kg^{-1}$;2#则是从 $191.2 mg \cdot kg^{-1}$ 增加至 $220.3 mg \cdot kg^{-1}$,而3#在此范围含量变化较小,其平均值为 $184.1 mg \cdot kg^{-1}$.在>15~30 cm内,1#、2#和3#均保持递减趋势,分别从307.4、220.3和 $187.7 mg \cdot kg^{-1}$ 减少至115.1、130.0和 $120.2 mg \cdot kg^{-1}$ (图6(d)).在沉积物0~10 cm内,1#的NaOH-Po含量约为 $30.8 mg \cdot kg^{-1}$,在>10~30 cm内由 $30.4 mg \cdot kg^{-1}$ 减少至 $13.1 mg \cdot kg^{-1}$.而2#和3#沉积物在0~25 cm内分别由43.7、 $45.5 mg \cdot kg^{-1}$ 减少至14.9、 $6.6 mg \cdot kg^{-1}$,之后在30 cm处稍有增加(图6(e)).

1#采样点的HCl-Pi在沉积物0~5 cm内从 $647.8 mg \cdot kg^{-1}$ 增加至 $758.6 mg \cdot kg^{-1}$,之后在>5~15 cm内变化较小,平均值为 $749.1 mg \cdot kg^{-1}$.在>15~30 cm内,HCl-Pi含量从 $761.4 mg \cdot kg^{-1}$ 减少至 $360.2 mg \cdot kg^{-1}$;2#则在沉积物0~20 cm内从 $572.3 mg \cdot kg^{-1}$ 增加至 $758.8 mg \cdot kg^{-1}$,之后在>20~30 cm内递减至 $479.4 mg \cdot kg^{-1}$;3#沉积物在0~30 cm内从 $574.5 mg \cdot kg^{-1}$ 减少至 $320.0 mg \cdot kg^{-1}$ (图6(f)).

3 讨论

根据测得的水体理化指标,北湖的水质偏碱性,

且属于地表水V类水质.TN、TP、 COD_{Mn} 均超标,富营养化程度高.城市湖泊大多都为浅水型湖泊,具有维护生物多样性、补充地下水和调节径流等一系列作用.然而,随着城市的快速发展,城市湖泊水污染问题日益严重.例如,位于长江流域的淀山湖、石臼湖和玄武湖等湖泊的富营养化与人为活动密切相关^[20-21].北湖的平均水深1.88 m,容积小、补给系数大,是典型的浅水型湖泊.有十余条沟渠与北湖直接或间接相通,这些汇水渠半数以上为劣V类水体.由于北湖中沉水植物群落消亡,其水生态系统结构脆弱,净化水质能力有限,从而加剧了北湖营养负荷.

沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分,其中的N、P含量大部分是外源污染输入后在湖中沉降的结果,能够反映湖泊营养状况和污染程度^[22-23],当外源污染得到控制时,沉积物就成为富营养化湖泊治理的重点.通过对底泥污染进行评价,能够为北湖生态治理和精准清淤提供基础数据支持.综合来看,北湖底泥在0~30 cm范围均处于重度污染水平.作为相近区域的城市水体,墨水湖和龙阳湖沉积物中TPs含量分别分布在 $671.5 \sim 2674.4 mg \cdot kg^{-1}$ 、 $888.6 \sim 1694.9 mg \cdot kg^{-1}$,底泥同样都处于重度污染水平^[24].湖泊沉积物中磷含量过高会对水体富营养化造成巨大影响.为控制、削减沉积物中磷含量,可对北湖采取清淤行动,减少沉积物存量,同时使用沉水植物修复法,种植苦草、黑藻等沉水植物吸收沉积物和水体中的磷,改善水质,修复水体环境.

$NaHCO_3$ -Pi包括部分吸附态磷和少量微溶性磷,是土壤有效磷,易于释放进入水体,通常用来指示沉积物的营养状况.北湖表层沉积物(0~5 cm)中 $NaHCO_3$ -Pi含量为 $99.6 mg \cdot kg^{-1}$,占TPs比例约为8.1%.巢湖表层沉积物中 $NaHCO_3$ -Pi的含量约为 $59.3 mg \cdot kg^{-1}$,占TPs的比例为10.0%^[25];瑶湖表层沉积物中 $NaHCO_3$ -Pi含量仅为 $29.6 mg \cdot kg^{-1}$,占TPs含量的3.4%^[26].北湖中较高的 $NaHCO_3$ -Pi含量可能与

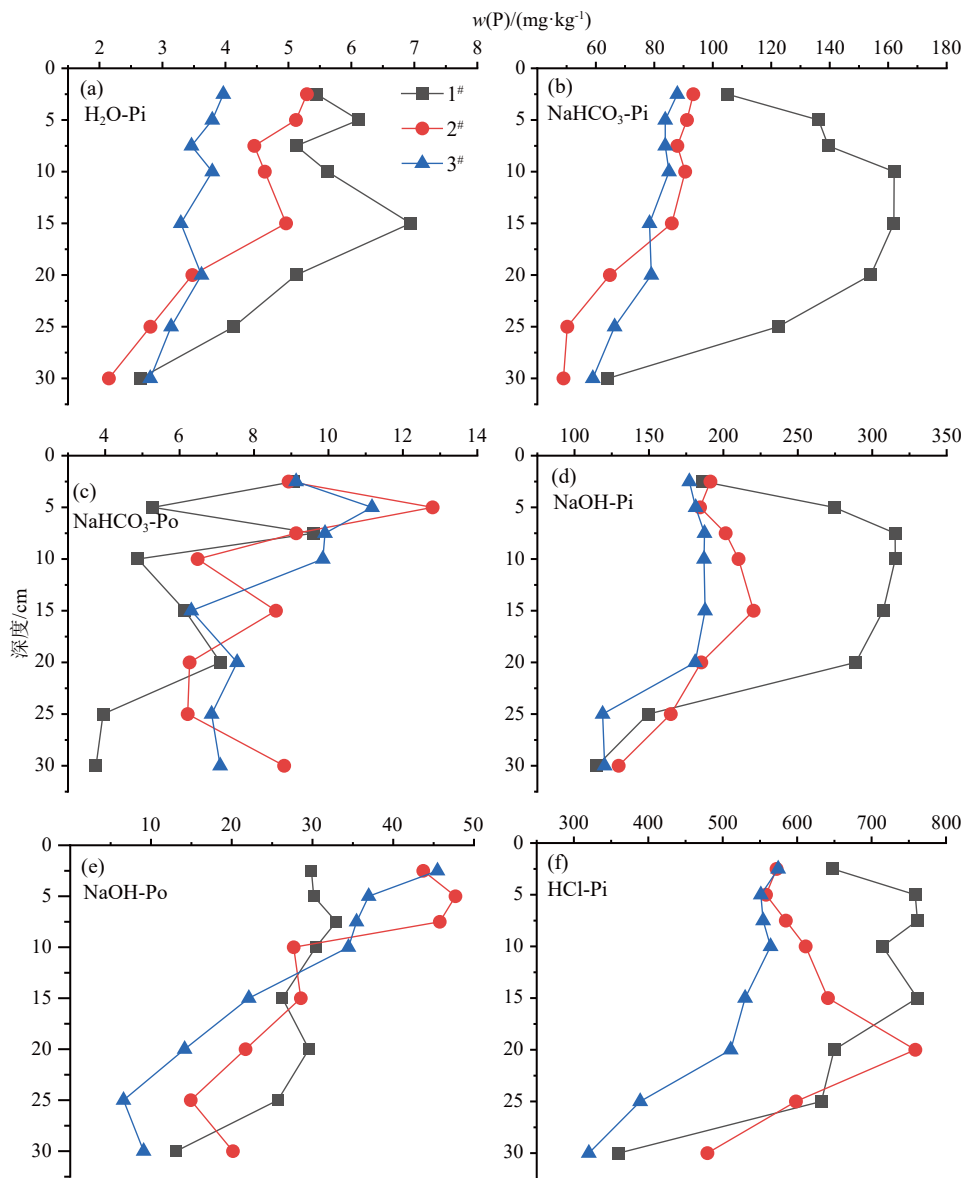


图 6 各采样点沉积物中各形态磷的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of various phosphorus forms in sediments

目前北湖沉积物中的 P 处于重度污染水平有关。

NaOH-Pi 是通过化学作用吸附在 Fe/Al 氧化物及其氢氧化物表面的 P, 能够反映湖泊沉积物污染的基本情况。 NaOH-Pi 主要受工业废水影响, 由于工业生产所产生的废水中可能含有大量金属离子, 入湖后金属氧化物、氢氧化物与磷酸盐结合从而促进底泥污染。北湖沉积物中 NaOH-Pi 含量为 $115.1\sim 315.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 约占 Pi 含量的 $16.5\%\sim 26.3\%$, 其平均值为 $199.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 衡水湖沉积物中 NaOH-Pi 含量为 $142.0\sim 193.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $169.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[27]; 梁子湖中 NaOH-Pi 含量为 $86.1\sim 136.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $114.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[28]。北湖沉积物中 NaOH-Pi 含量较高, 这可能与北湖历史上曾长期作为某大型钢铁厂工

业废水的受纳水体有关。

HCl-Pi 主要来自磷石灰以及动物骨骼等含 P 物质在沉积物中的积累。青山区地层以原古生界为基底, 自震旦纪以来, 长期接受沉积, 地层发育极为良好。北湖沉积物中 HCl-Pi 含量范围为 $320.0\sim 761.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 Pi 含量的 $59.2\%\sim 75.0\%$, 是沉积物中 P 的主要存在形式。我国很多水域沉积物中的 P 都以 HCl-Pi 为主, 例如金山湖沉积物中 HCl-Pi 的含量为 $379.7\sim 576.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 Pi 含量的 $41.9\%\sim 90.1\%$ ^[29], 而华北东平湖中 HCl-Pi 含量为 $230.7\sim 417.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 TPs 比例为 $51.1\%\sim 68.9\%$ ^[30]。 HCl-Pi 只有在 pH 较低环境中才可能释放^[31], 随水深增加, DO 减少, 水体环境由碱性向酸性变化, 这在一定程度上可能促

进沉积物中 HCl-Pi 的释放。

沉积物中的 Po 包括 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 和 NaOH-Po 等, 一般认为 Po 来自水生动植物残渣、藻类和农业面源污染, 部分 Po 能够分解转化为 Pi 并向上覆水体释放^[32]。北湖沉积物中 Po 的分布较为均匀, 三个采样点的平均含量分别为 33.5、39.7 和 34.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 TPs 的比例约为 3.1%。洪湖沉积物中 Po 含量为 145.0~265.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 约占 TPs 的 31.3%^[33]; 军山湖中 Po 的含量为 189.3~401.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 TPs 比例为 49.6%~58.5%^[34]。北湖沉积物中 Po 的含量低于洪湖和军山湖, 这可能是因为军山湖和洪湖进行水产养殖, 沉水植物消亡, 加上周边农业污染, 使得沉积物中 Po 含量较高; 而北湖地处中心城市工业区周边, 农业面源污染小, Po 并非沉积物中 P 的主要赋存形态。

4 结论

通过使用 Hedley 磷素分级法对北湖不同位置柱状沉积物中的磷进行分析, 发现其在水平和垂直方向上污染存在一定变化趋势, 具体结论如下。

(1) 北湖沉积物 TPs 含量为 634.7~1543.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pi 是沉积物中 P 的主要成分, 占 TPs 含量的比例大于 70.0%。沉积物中 TPs 由北至南呈现递减趋势; 在沉积物 0~30 cm 范围内, 北湖沉积物处于重度污染水平。

(2) 北湖沉积物中各形态 P 按含量排序为: $\text{HCl-Pi} > \text{NaOH-Pi} > \text{NaHCO}_3\text{-Pi} > \text{NaOH-Po} > \text{NaHCO}_3\text{-Po} > \text{H}_2\text{O-Pi}$, HCl-Pi 是沉积物中 P 的主要赋存形态, 占 TPs 的 35.9%~62.1%; 其次是 NaOH-Pi, 占 TPs 的 9.7%~22.0%。NaOH-Po 含量为 6.6~47.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 Po 中的主要形态。在沉积物垂直方向上, 随深度增加沉积物中各形态 P 含量呈递减趋势, 表明湖泊表层沉积物 P 污染严重且存在较大释放风险。

参 考 文 献

- [1] 曹晶潇, 刘军武, 蔡静菊, 等. 影响沉积物释磷强度环境因素研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(27): 35-43.
- [2] 刘英杰, 张丽红, 张宏, 等. 溶磷微生物在土壤磷循环中的作用研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50(8): 3671-3687.
- [3] YUAN Z, JIANG S, SHENG H, et al. Human perturbation of the global phosphorus cycle: Changes and consequences[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(5): 2438-2450.
- [4] TEMPORETTI P, BEAMUD G, NICHELA D, et al. The effect of pH on phosphorus sorbed from sediments in a river with a natural pH gradient[J]. Chemosphere, 2019, 228: 287-299.
- [5] 王永强, 国晓春, 卢少勇, 等. 高原富营养化湖泊杞麓湖微囊藻毒素分布特征、相关因子及其健康风险分析[J]. 湖泊科学, 2024, 36(1): 52-63.
- [6] 陈月, 林琪, 刘恩峰, 等. 泸沽湖沉积物中磷累积的时空变化及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2021, 41(4): 1206-1215.
- [7] 李松贵. 城市小型浅水湖泊沉积物磷的吸附释放特性及覆盖控制研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2019.
- [8] 吴来燕, 薛怀军, 何文豪, 等. 武汉市菱角湖沉积物中营养元素的分布特征[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 22-24.
- [9] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 970-976.
- [10] LEPORI F, CAPELLI C. Effects of phosphorus control on primary productivity and deep-water oxygenation: Insights from Lake Lugano (Switzerland and Italy)[J]. Hydrobiologia, 2021, 848(3): 613-629.
- [11] 谢发之, 罗锟, 朱元荣, 等. 南漪湖沉积物磷的赋存形态及对上覆水的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(11): 5318-5327.
- [12] 刘欣月, 李海波, 刘胜山, 等. 大冶湖沉积物氮磷形态分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2024, 44(6): 161-173.
- [13] 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 等. 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5358-5366.
- [14] THOMPSON S K, COTNER J B. Bioavailability of dissolved organic phosphorus in temperate lakes[J]. Frontiers in Environmental Science, 2018, 6: 62.
- [15] WANG S, JIN X, BU Q, et al. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River region, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(7): 1491-1498.
- [16] 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): 628-639.
- [17] 胡俊杰, 万年新, 王涛, 等. 底栖细鞘丝藻对沉积物磷释放的影响[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2021, 40(6): 574-578.
- [18] SUI Y, THOMPSON M L, SHANG C. Fractionation of

- phosphorus in a mollisol amended with biosolids [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1174-1180.
- [19] 孙猛,包宇飞,王雨春,等. 澜沧江梯级水库沉积物磷形态特征及释放风险[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(7): 3634-3643.
- [20] 康丽娟,孙从军,李小平. 淀山湖沉积物磷分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(1): 190-196.
- [21] 刘涛. 江苏省西部湖泊水环境现状及沉积物营养盐赋存与释放差异性[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [22] 张枫,桂梓玲. 武汉市东湖底泥污染风险评估及精细化清淤研究[J]. *人民长江*, 2024, 55(6): 45-52.
- [23] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1229-1243.
- [24] 周峰,李朋,邢新丽,等. 武汉龙阳湖、墨水湖沉积物重金属生态风险评估[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(10): 5433-5443.
- [25] ZAN F, HUO S, XI B, et al. Phosphorus distribution in the sediments of a shallow eutrophic lake, Lake Chaohu, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(8): 1643-1653.
- [26] 江立文,关广禄,廖春玲. 瑶湖沉积物中磷的赋存形态及其空间分布特征[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2756-2760.
- [27] 张嘉雯,魏健,刘利,等. 衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, 41(12): 5389-5399.
- [28] 张文,刘小欢,尹刚,等. 鄂东南湖群表层沉积物磷的赋存形态与生物有效性[J]. *地球与环境*, 2023, 51(5): 505-515.
- [29] 邱坚,原璐彬,邢书语,等. 镇江市金山湖沉积物磷元素分布特征研究[J]. *环境监控与预警*, 2023, 15(6): 85-92.
- [30] CHEN Y, CHEN S, YU S, et al. Distribution and speciation of phosphorus in sediments of Dongping Lake, North China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 3173-3182.
- [31] 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.
- [32] 刘永九,黄素珍,张璐,等. 洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险[J]. *环境科学*, 2021, 42(7): 3198-3205.
- [33] 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.
- [34] 刘路明. 军山湖沉积物磷赋存形态的分布及对湖泊水质的影响[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.

(责编&校对 刘钊)