

王少林,李玉刚,郭心月,等.寒旱区典型湖泊内源磷库容量及迁移动力学特征 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3235-3244.

Wang S L, Li Y G, Guo X Y, et al. Characteristics of endogenous phosphorus pool and migration dynamics in typical lakes in cold and arid regions [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3235-3244.

寒旱区典型湖泊内源磷库容量及迁移动力学特征

王少林^{1,2},李玉刚¹,郭心月²,韩超^{2*},张雷²,王兆德²,刘成²,申秋实²,Odsuren Batdelger³,Narangerel Serdyanjiv³ (1.曲阜师范大学工学院,山东日照 276826; 2.中国科学院南京地理与湖泊研究所,湖泊与流域水安全重点实验室,江苏南京 211135; 3.蒙古科学院地理与地质生态研究所,乌兰巴托 15170)

摘要: 以5个典型寒旱区湖泊为对象,基于磷形态分级、薄膜梯度扩散(DGT)、DGT诱导的土壤通量的动态数值模型(DIFS)等方法分析沉积物磷库容量水平和磷迁移动力学特征,进一步使用结构方程模型厘清寒旱区湖泊内源磷库容量及迁移动力学的关键驱动因子。结果表明,5湖的水体总磷(TP_w)、总氮(TN_w)、氮磷比(TN_w/TP_w)均值分别为(0.81±1.31) mg/L、(3.40±1.87) mg/L、(26.13±22.75),均为磷限制性湖泊。5湖沉积物TP_s的平均含量为(763.48±563.70) mg/kg,钙形态磷(Ca-P)占沉积物中TP_s的51.09%,沉积物综合污染指数(FF)整体处于重度污染程度。生物有效磷(BAP)、溶解性活性磷(C_{DGT-P})、分配系数(K_d)均值分别为(193.54±55.94) mg/kg、(0.19±0.14) mg/L、(11.34±9.29) cm³/g,三者评估的磷库容量均低于东部平原湖区湖泊,表明寒旱区湖泊磷库容量较低。5湖的DIFS模型参数反应时间(T_c)范围为0.004~74170.00s,低于东部平原湖区湖泊,表明寒旱区磷迁移动力较低,补给到水体中的速率相对较慢。偏最小二乘路径建模(PLS-PM)分析表明,影响寒旱区5湖磷库容量的主要因素是沉积物性质(0.64, P<0.05)。影响磷迁移动力学的主要因素(0.95, P<0.05)是5湖水体的环境因子,受湖泊营养状态与浮游植物影响较小。

关键词: 磷库; 磷迁移动力学; 寒旱区湖泊; 结构方程模型; DIFS模型

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)06-3235-10

Characteristics of endogenous phosphorus pool and migration dynamics in typical lakes in cold and arid regions. WANG Shao-lin^{1,2}, LI Yu-gang¹, GUO Xin-yue², HAN Chao^{2*}, ZHANG Lei², WANG Zhao-de², LIU Cheng², SHEN Qiu-shi², Odsuren Batdelger³, Narangerel Serdyanjiv³ (1.College of Engineering, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China; 2.Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Science, Ulaanbaatar 15170, Mongolia). *China Environmental Science*, 2025,45(6): 3235~3244

Abstract: This study focuses on five typical lakes in cold-arid areas, analyzing the phosphorus pool capacity and phosphorus migration dynamics of sediments using methods such as phosphorus fractionation, diffusive gradients in thin films (DGT), and the DGT Induced Fluxes in Sediments model (DIFS). Partial least squares path modeling (PLS-PM) was further employed to identify the key driving factors for the endogenous phosphorus pool capacity and migration dynamics in these lakes. The results showed that the average values of total phosphorus (TP_w), total nitrogen (TN_w), and nitrogen-to-phosphorus ratio (TN_w/TP_w) in the water of the five lakes were (0.81 ± 1.31)mg/L, (3.40 ± 1.87)mg/L, and (26.13 ± 22.75), respectively, indicating that these were phosphorus-limited lakes. The average total phosphorus (TP_s) content in surface sediments was (763.48 ± 563.70)mg/kg, with calcium-bound phosphorus (Ca-P) accounting for 51.09% of the TP_s. The comprehensive pollution index (FF) values for sediments indicate a severe pollution level. The biologically available phosphorus (BAP) dissolved active phosphorus (C_{DGT-P}), and distribution coefficient (K_d) average (193.54 ± 55.94)mg/kg, (0.19 ± 0.14)mg/L, and (11.34 ± 9.29)cm³/g, respectively. All three indicators of phosphorus pool capacity were lower than those in lakes of the eastern plains, reflecting a relatively low phosphorus reservoir capacity in cold and arid lakes. The DIFS model shows that the reaction time (T_c) of the five lakes ranges from 0.004 to 74, 170s, lower than that of lakes in the eastern plains, indicating slower phosphorus migration dynamics and a relatively lower supply rate to the water body. PLS-PM analysis reveals that the primary factor influencing phosphorus reservoir capacity in these lakes was sediment properties (0.64, P<0.05). The main factor influencing phosphorus migration dynamics (0.95, P<0.05) was the environmental conditions of the water bodies, with limited influence from lake trophic state and phytoplankton.

Key words: phosphorus pool; phosphorus migration kinetics; cold-arid lakes; structural equation model; DIFS model

收稿日期: 2024-11-05

基金项目: 国家重点研发项目(2023YFE0100500);日照市自然科学基金资助项目(RZ2022ZR18)

* 责任作者, 副研究员, chan@niglas.ac.cn

磷是控制湖泊生态系统藻和浮游植物等生物生长必需的营养因子,在调控水体生物群落结构和元素地球化学循环方面具有至关重要作用^[1].沉积物是湖泊生态系统最大的磷蓄积库,在当外源磷输入得到了有效控制背景下,内源磷向水体迁移释放仍能使水体富营养化持续几十年^[2].因此内源磷素循环逐渐成为影响湖泊生态系统的关键过程.内源磷形态复杂多变,其生物有效性取决于有效的磷库容量负荷以及有效态磷在沉积物-间隙水界面之间的吸附/解析、沉淀/溶解、扩散等动力学过程^[3].因此,控制内源磷迁移是影响治理成效的关键.全面认识寒旱区典型湖泊的磷库容量及释放动力学特征,对阐释寒旱区湖泊沉积物与间隙水之间磷的相互作用过程和机理,以及科学评估湖泊沉积物中的磷释放风险和流动性具有重要意义.

在传统的内源磷研究中,通常采用磷分级的方法来评估沉积物中磷的生物可利用性,但是这种方法缺乏对磷释放动力学过程的深入了解^[4].DGT (Diffusive Gradients in Thin-films)技术是一种原位被动采样技术,可以表征营养盐和污染物有效态,已被广泛用于水体、沉积物和土壤中磷、重金属和有机物等污染物有效态含量的测定^[5].DIFS(DGT Induced Fluxes in Sediments)模型已被成功地用于研究沉积物和间隙水之间营养物质的交换动力学,以及从沉积物活性磷库容量和再补给动力学参数角度解释沉积物中的 DGT 测量结果^[6].

中国北方寒旱区具有特殊的地理位置和大陆性气候,区域内的湖泊生态系统非常脆弱^[7].受人类活动和全球气候变化影响,寒旱区湖泊由于气候干旱,蒸发作用强烈,导致水体中的离子浓度增加,显著影响底泥内源磷库容量和迁移转化动力学过程,并导致区域内多数湖泊呈现出不同程度的富营养化等问题^[8].当前针对寒旱区湖泊磷素的研究集中在针对独立的湖泊水质^[9-11]、沉积物污染状况调查研究^[12-13]以及单个湖泊沉积物磷迁移动力的研究^[14].到目前为止,对中国北方寒旱区湖泊内源磷库容量和磷迁移动力学特征及二者的驱动因素的相关研究缺乏系统、全面和深入的认识,极大地限制了寒旱区湖泊水环境保护与管理.本研究选择寒旱区的 5 个典型湖泊为研究对象,利用传统的连续提取法和较先进的 DGT 动态信息表征技术,分析表层沉积物

磷赋存形态及其含量变化差异特征,评估沉积物活性磷库和内源释放潜力,并探讨寒旱区湖泊磷库容及动力学的关键驱动因子,以期为我国旱寒区湖泊水环境管理提供参考.

1 材料和方法

1.1 研究区域概况和样品采集

选择乌梁素海、哈素海、岱海、达里诺尔湖、红碱淖湖 5 个典型寒旱区湖泊为研究对象,这些湖泊地处蒙新高原,该区域冰封期长,气候干旱,与其他地区形成鲜明对比.5 湖都属北温带半干旱大陆性气候,年降雨量在 50~400mm 之间,年蒸发量在 1000~2000mm 之间.5 个湖泊整体平均水深为 3.83m,乌梁素海和红碱淖湖湖泊面积分别为 293、238km²,其余湖泊面积均小于 50km².

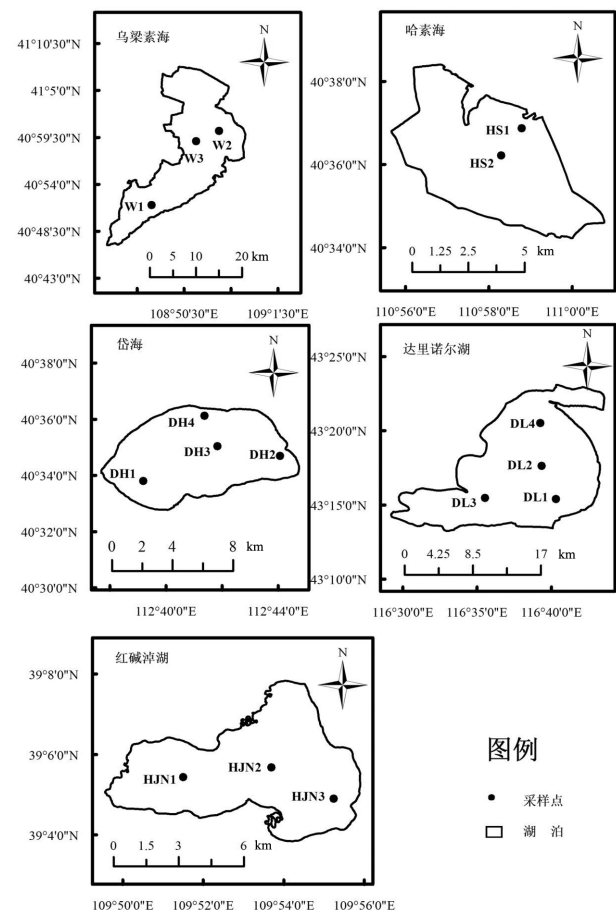


图 1 采样点分布示意

Fig.1 Sampling point distribution diagram

于 2023 年 9 月进行野外调查,采集 5 湖表层水样(图 1).并利用重力式柱状采泥器($\varphi 90\text{mm} \times 500\text{mm}$)

采集约 30cm 深度的沉积物柱芯,包裹黑色塑料袋运回实验室,采样及运输过程中缓慢稳定操作,并使用采样器自带的橡胶顶塞将顶部完全密封,保证沉积物柱芯在运输过程中顶部悬浮层不会晃动而产生扰动.现场使用抓斗式采样器采集表层沉积物,样品分别放在酸洗过的聚乙烯塑料袋中冷藏保存作进一步分析.

1.2 DGT 制备与现场应用

采用 ZrO-Chelex DGT 同步测定 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ($C_{\text{DGT-P}}$)、 Fe^{2+} ($C_{\text{DGT-Fe}}$),用 AgI DGT 测定 S^{2-} ($C_{\text{DGT-S}}$),其中固定膜制备参照文献[5],扩散膜制备参照文献[15].两种膜制备完成后,将其依次叠加放置在固定外壳的底板上,从下到上依次为固定膜、扩散膜和滤膜(Whatman,孔径 0.45 μm).轻轻排出膜间的气泡后,将盖板固定在装置上.最后,将组装好的装置浸泡在浓度为 0.01mol/L 的 NaCl 溶液中,并连续通入氮气曝气 16h 后备用.

投放时,将 ZrO-Chelex DGT 和 AgI-DGT 缓慢垂直插入稳定 1d 后的各个沉积物柱芯,记录水温,平衡 24h 后取出 DGT 装置.然后用超纯水冲洗去除膜表面附着物后,将 DGT 装置拆解,并取出 DGT 固定膜,使用记号笔标记沉积物-间隙水界面位置后装入封口袋密闭冷藏保存,最后带回实验室进一步分析.DGT 测定活性 P、Fe 和 S 浓度分析方法主要参考文献[16].最终选取沉积物-间隙水界面下 2cm 的 $C_{\text{DGT-P}}$ 、 $C_{\text{DGT-Fe}}$ 、 $C_{\text{DGT-S}}$ (DGT 测定的 P、Fe、S 浓度均值)进行分析.

1.3 指标分析和污染评价

水温(WT)、水深(WD)、pH 值、溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)等用多参数水质测量仪(日本,Horiba)现场测量.水体中 TN_w 、 TP_w 含量、叶绿素 a (Chl a)的处理和测定方法参照《水和废水监测分析方法》^[17].对于混匀的表层 2cm 沉积物,取一部分采用烘干法测定沉积物的孔隙度(Porosity),有机质选择油浴加热法进行分析^[18],另取部分用过硫酸钾联合消解法测定 TN_s 、 TP_s 含量^[19].沉积物磷赋存形态(Ex-P、Fe-P、Al-P、Org-P、Ca-P、Res-P)采用连续分级提取法^[20].

沉积物的污染评价采用了综合污染指数(FF)进行评定.单项污染指数(S_i)为评价因子 i 的实测值与 i 的标准值的比值,其中 TN_s 、 TP_s 的标准值分别为

670,440mg/kg.FF 计算见式(1),其中 S_{AVE} 为 S_i 平均值; S_{MAX} 为 S_i 最大值.

$$\text{FF} = \sqrt{\frac{S_{\text{AVE}}^2 + S_{\text{MAX}}^2}{2}} \quad (1)$$

沉积物氮磷污染物污染程度分级标准见表 1.

表 1 沉积物综合污染程度分级标准

Table 1 Standards of comprehensive pollution levels in lake sediments

污染程度	S_{TN}	S_{TP}	FF	等级
未受污染	<1.0	<0.5	≤1.0	清洁
轻度污染	1.0~1.5	0.5~1.0	1.0~1.5	轻度污染
中度污染	1.5~2.0	1.0~1.5	1.5~2.0	中度污染
重度污染	≥2.0	≥1.5	≥2.0	重度污染

1.4 DIFS 模型计算

DIFS 模型可以定量表征磷从沉积物固相到间隙水液相的补给能力(R),模拟影响磷在沉积物中迁移的动力学特征和 R 随 DGT 装置部署时间的变化情况. $C_{\text{DGT-P}}$ 是利用 DGT 装置测定的间隙水中的溶解态磷浓度, R 为 $C_{\text{DGT-P}}$ 与沉积物间隙水中磷含量(C_{sol})之比, R 越大,沉积物中磷从固相补充到液相能力越大. K_d 为分配系数,是沉积物可交换态磷浓度与间隙水可溶性磷酸盐含量的比值,用于表征磷在沉积物固相与水相之间的分配平衡. K_d 侧面表明沉积物固相可以向间隙水液相再补给能力的大小,反映了沉积物固相向液相中释放磷的潜在能力,本文使用 K_d 研究磷库容量. DIFS 模型所求参数吸附、解吸速率常数(K_1 、 K_{-1}), K_1 代表磷从间隙水液相吸附到沉积物固相的速率,其值越大,表明间隙水液相中吸附到沉积物固相的速率越大, K_{-1} 与之相反. T_c 代表当沉积物系统受到扰动时,重新达到固液平衡位置 63% 的特征时间,可用来研究磷迁移动力. T_c 为 1 与 K_1 和 K_{-1} 之和的比值. K_d 和 T_c 分别决定沉积物固相对液相短期和长期的补给能力.

1.5 结构方程模型构建及评价标准

磷库容量变化的原因较复杂,磷动力学的变化也是多个因素相互作用的结果.为阐明寒旱湖泊沉积物中活性磷库容量及复杂的迁移动力特征,采用偏最小二乘结构方程模型(PLS-PM)来估算潜在变量之间的复杂关系.结构方程模型综合了方差分析、回归分析、因子分析及路径分析,可以同时分析揭示包含多个变量块的系统的结构关系,从而反映各变

量间的影响路径,如:研究水体理化参数对氮磷迁移转化的驱动机制^[21].本研究将环境因子(WT、WD、Alk、DO、pH值、Eh、 HCO_3^-)、浮游植物(Chl a)、营养状态(TN_w/TP_w 、 NO_3^- -N)、沉积物(Porosity、OM、 $C_{\text{DGT-S}}$ 、 $C_{\text{DGT-Fe}}$ 及FF)作为独立变量,并设定潜在路径:(1)环境因子、浮游植物、营养状态、沉积物对磷库容量和磷动力学均有直接影响;(2)环境因子、沉积物能直接影响营养状态;(3)环境因子、营养状态能直接影响浮游植物.PLS-PM的拟合优度(GOF)指数可以解释测量模型和结构模型的模型质量^[22].

1.6 数据处理

本研究所有数据图使用 Origin 2021 软件绘制.使用 ArcGIS 10.8 软件绘制研究区样点分布图.使用 R(4.3.0)中“plspm”包进行沉积物磷库容量及动力学分析,设置 Bootstrap 1000 次检验确定路径系数的显著性.

2 结果与讨论

2.1 寒旱区湖泊氮磷污染特征

中国北方寒旱区 5 湖水体的 TN_w 、 TP_w 浓度及氮磷比(TN_w/TP_w)具有较大差异(图 2).水体 TN_w 含量为 0.44~5.17mg/L,平均值为(3.40±1.87) mg/L, TP_w 含量为 0.03~3.20mg/L,平均值为(0.81±1.31) mg/L,乌梁素海和哈素海 TN_w 含量较低, TP_w 含量最高出现在达里诺尔湖.达里诺尔湖水体表现出较高的盐度、碱度、pH 值及 Na^+ 含量,这些水化学特点为水体富营养化的发生与发展提供了重要的生物学基础.在富营养化过程中,藻类大量繁殖并随之死亡,其分解释放出的营养盐被再次吸收利用,从而形成了营养盐的自我循环.这种循环机制不仅促进了藻类的进一步繁殖,还使营养盐在湖泊水体中持续累积,导致富营养化问题的长期化和不断加剧^[23].整体来看,5 湖水体 TP_w 和 TN_w 含量远高于东部平原湖区湖泊(表 2).近代以来人类活动加速了干旱与半干旱地区内陆闭塞湖泊咸化、萎缩的过程.高盐环境下,湖泊生物多样性减少,湖体有机、无机污染物累积严重、水环境持续恶化,水质变差^[24],这可能是寒旱区湖泊氮磷含量较高的原因. TN_w/TP_w 是用于评估河流水体营养盐限制因素及调节浮游植物群落的重要指标,同时也是影响藻类水华爆发的关键因素之

—^[25].依据 Guildford 等^[26]提出的水中营养物限制标准.5 湖的 TN_w/TP_w 整体介于 1.56~68.80,均值为(26.13±22.75),差异性较大,但总体上为磷限制状态.我国干旱半干旱地区最具代表性的内陆湖泊博斯腾湖也是磷限制湖泊(表 2).北方寒旱区湖泊的呼伦湖,近年来处于氮磷共同限制状态.整体来看,5 湖 TN_w/TP_w 远高于东部平原湖区湖泊,表明相比于人类活动更多的东部平原湖区,近代以来人类活动导致寒旱区发生了富营养化风险,而通过有效调控湖泊中的磷浓度,可以减轻湖泊的富营养化污染.

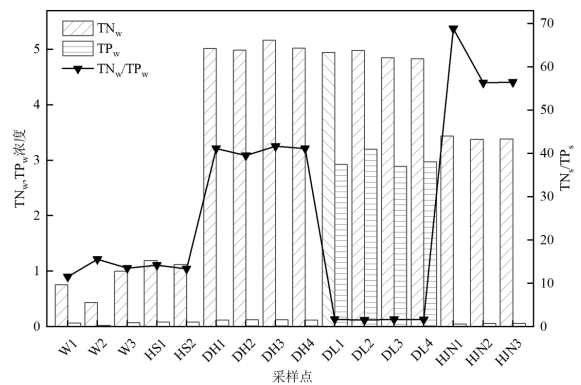


图 2 5 湖各采样点的 TN_w 、 TP_w 、 TN_w/TP_w

Fig.2 TN_w 、 TP_w and TN_w/TP_w at sampling point of the five lakes

表 2 不同类型湖泊的氮磷污染特征

Table 2 Characteristics of nitrogen and phosphorus pollution in different types of lakes

类型	湖泊	$\text{TP}_w(\text{mg/L})$	$\text{TN}_w(\text{mg/L})$	TN_w/TP_w	FF
	5 湖均值	0.81±1.31	3.40±1.87	26.13±22.75	5.46
寒旱区湖泊	博斯腾湖 ^[27]	0.014	0.91	65.00	-
	呼伦湖 ^[28-29]	0.21	2.18	10.38	≥2.0
非寒旱区湖泊	太湖 ^[30-31]	0.075	1.27	16.93	2.00
	巢湖 ^[32-33]	0.11	0.76	6.91	1.32
	鄱阳湖 ^[34]	0.27	2.14	7.93	-

5 湖所有点位表层沉积物综合污染指数如图 3, 单项评价指数 S_{TN} 均为重度污染, S_{TP} 的中度及重度污染比例为 82%.其中,达里诺尔湖和岱海多数采样点的 S_{TP} 为重度污染.FF 值在 3.43~11.18 之间,均值为(5.46±1.86),变异系数为 35.19%,等级为重度污染.寒旱区呼伦湖沉积物综合污染指数也是重度污染(表 2).整体来看,5 湖表层沉积物营养盐污染严重,远高于东部平原湖区湖泊.东部平原湖区湖泊人类活动较多,农业径流(氮磷)、工业废水(重金属)、生活

污水等外源污染较多,持续输入污染物导致沉积物累积污染.而寒旱区 FF 值仍然很高,表明内源污染,如沉积物中的磷释放是重要污染源,未来可能会对水生生态系统造成威胁污染.因此对沉积物活性磷库和内源释放潜力的评估研究十分必要.

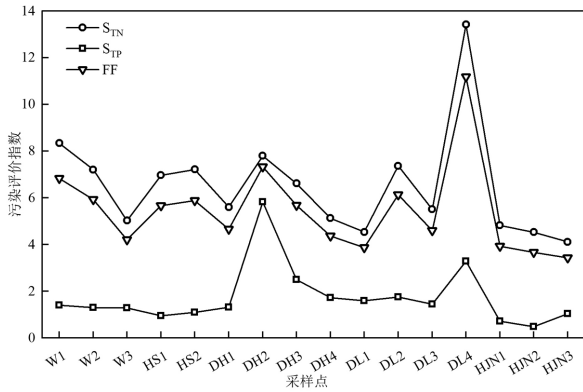


图3 5湖沉积物污染指数
Fig.3 Pollution index of sediments in the five lakes

2.2 寒旱区湖泊沉积物不同磷赋存特征和释放潜力

5湖表层沉积物中 TP_s 含量为 212.12~2565.79mg/kg,平均含量为(763.48±563.70) mg/kg,其中,岱海和达里诺尔湖表层沉积物 TP_s 平均含量为 1251.99, 888.47mg/kg,远高于其他湖泊,可能与两湖年蒸发远高于降水量,近年来在气候和人类活动的双重影响下,湖泊水位逐渐下降、湖面不断萎缩,水质恶化^[35],引起表层沉积物物理、化学和生物特征的变化,导致 TP_s 含量升高.与东部平原湖区的湖泊相比(表 3),5湖表层沉积物中 TP_s 含量较高,而 5湖沉积物综合污染指数均为重度污染,更加说明沉积物中的磷释放可能是 5湖富营养化的重要污染源.寒旱区人口较少,农业及废水污染较少,但寒旱区的湖泊存在更为显著的自然过程如地质风化过程、岩石和土壤中的磷释放等来源的磷输入,不断累积,汇集到湖泊沉积物中,导致沉积物中磷含量较高.在图 4 中,5湖沉积物磷形态含量变化趋势为 Ca-P (51.09%±0.07%)>Res-P(25.70%±0.05%)>BD-P(20.7%±0.06%)>Org-P(1.32%±0.06%)>Ex-P(1.19%±0.01%).其中无机磷超过 90%,且 Ca-P 占比超过 50%,这可能与湖泊流域的岩石风化和土壤侵蚀导致的磷输入有关.近代以来寒旱区部分湖泊水体咸化,pH 值较高,湖泊面积不断减小,而 5个湖泊水体属于碳酸钙镁

型水且碱性程度较高,极易与外源磷素共沉淀形成难溶磷酸钙并蓄积在沉积物,因而沉积物中磷主要以 Ca-P 为主.

5湖磷分级结果中,除达里诺尔湖外,Ex-P 占比仅为 0.64%,这有可能与寒旱区沉积物中磷主要以 Ca-P 为主,而 Ca-P 具有很强的吸附能力,导致高活性的 Ex-P 很难迁移释放.BAP 通常被认为是评估沉积物中潜在的容易释放出来被水生生物直接利用的或可通过自然过程转化为有效形式的磷,其含量根据各形态磷的活性大小,以 Ex-P、Al-P、Fe-P、Org-P 之和计算^[36].与绝大多数东部平原湖区湖泊(表 3)相比,寒旱区湖泊沉积物中 BAP 含量明显较低,BAP 含量范围为 136.35~366.04mg/kg,平均含量为 (193.54±55.94)mg/kg(图 5),BAP 占 TP_s 的比例为 12.11%~41.96%,平均占比为 23.51%,表明沉积物中大部分磷是稳定的赋存形态,实际可以被藻类和植物直接利用的磷很少,5湖沉积物磷释放风险相对较低.

表 3 不同湖泊的磷赋存特征和释放潜力

Table 3 The phosphorus storage characteristics and release potential of different lakes

湖泊	TP _s (mg/kg)	BAP(mg/kg)	C _{DGT-P} (mg/L)
5湖均值	763.48±563.70	193.54±55.94	0.19±0.14
太湖 ^[1,37]	532	601.61	0.09
巢湖 ^[3,37-38]	585	120.99	1.23
洞庭湖 ^[37,39]	609.84	524.65	0.17
鄱阳湖 ^[37]	385.26	258.49	0.32
洪泽湖 ^[37]	642.07	317.27	-

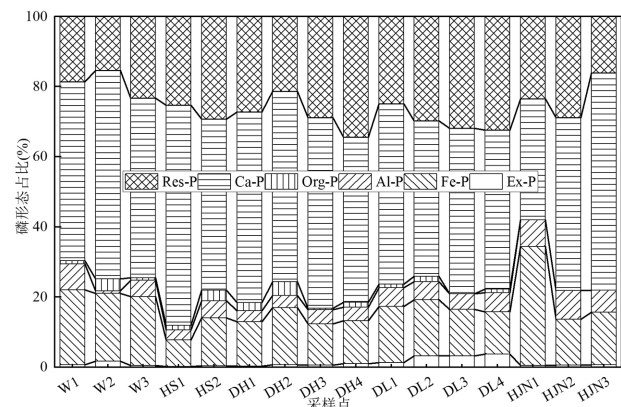


图4 5湖沉积物磷形态占比
Fig.4 Proportion of phosphorus fractionation in sediments of five lakes

沉积物中 C_{DGT-P} 可以反映固相磷的解吸或溶解

对局部溶解态离子的补给缓冲能力^[40].5 湖表层沉积物 C_{DGT-P} 的变化范围为 0.06~0.50mg/L,平均浓度为(0.19±0.14) mg/L.5 湖 C_{DGT} 均值含量依次为:达里诺尔湖(0.41mg/L)> 岱海(0.15mg/L)> 红碱淖湖(0.14mg/L)> 乌梁素海(0.09mg/L)> 哈素海(0.06mg/L),表明达里诺尔湖沉积物内源磷活化较强,释放潜力较高,结合之前达里诺尔湖的 TP_w 含量是 5 湖中最高,表明达里诺尔湖内源释放磷潜力较强,未来需重点关注达里诺尔湖水质变化.5 湖 C_{DGT-P} 低于东部平原湖泊(表 3),这与寒旱区沉积物中磷主要以 Ca-P 为主,水体 pH 值较高,导致沉积物-间隙水界面有效态磷迁移能力不强有关.本研究中 C_{DGT-P} 空间变化趋势基本上与 BAP 变化趋势一致,进一步证实 C_{DGT-P} 可以反映沉积物有效磷水平.

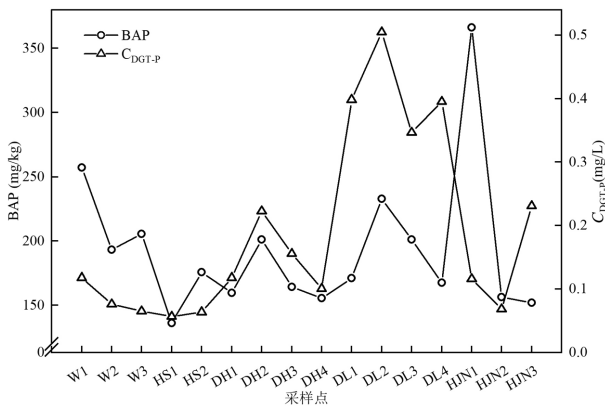


图 5 5 湖沉积物中 BAP 和 C_{DGT-P} 含量
Fig.5 BAP and C_{DGT-P} in sediments of five lakes

2.3 寒旱区湖泊沉积物中磷库容量及迁移动力学特征

如表 4 所示, K_d 比传统的基于总磷的评估方法能够更好的反映沉积物固相向间隙水释放潜在有效磷容量的大小.5 湖泊表层沉积物的 K_d 范围为 2.50~30.20 cm^3/g ,均值为(11.34±9.29) cm^3/g .表明参与再补给的固相磷相对含量偏低.其中,达里诺尔湖 K_d 为 23.35 cm^3/g ,远高于其他湖泊,说明达里诺尔湖表层沉积物对磷的吸附能力较高,即沉积物固相中的磷容易被吸附固定,较难释放到间隙水中,磷库容量较高.另外,很明显各湖泊间和同湖泊不同监测区域存在较大的差异,这反映了研究沉积物中活性磷库容量的大小差异.与东部平原湖区的湖泊相比(表 5),5 湖的 K_d 较低,磷库容量较低,沉积物对磷的吸附

能力较弱,即沉积物固相中的磷不易被吸附固定,更容易释放到间隙水中,从而增加了磷的生物可利用性.可能的原因是寒旱区沉积物中磷主要以 Ca-P 为主, Ca-P 在沉积物中主要以惰性形式存在,在碱性条件下,更不易释放到水体中. K_d 的结果与 5 湖表层沉积物中 Ex-P、BAP 及 C_{DGT-P} 含量趋势在 5 湖整体一致,表明使用 DIFS 模型在评估内源磷库容量的方法是非常可靠的.因而本文使用 DIFS 模型计算的其它参数(R 、 T_c 、 K_{-1})进一步分析 5 湖的磷迁移动力特征.

表 4 5 湖沉积物中磷的迁移动力学参数

Table 4 Kinetic parameters of phosphorus migration in sediments of the five lakes

采样点	R	$K_d(cm^3/g)$	$T_c(s)$	$\log k_1(d^{-1})$	$\log k_{-1}(d^{-1})$
W1	0.2	9.43	6666.00	-3.87	-4.79
W2	0.11	19.30	58210.00	-4.79	-6.01
W3	0.09	5.46	14870.00	-4.26	-4.93
HS1	0.09	4.11	12670.00	-4.21	-4.76
HS2	0.08	4.10	50030.00	-4.81	-4.36
DH1	0.14	2.50	7451.00	-4.04	-4.37
DH2	0.31	7.68	1.42	-0.21	-1.04
DH3	0.25	8.90	716.20	-2.91	-3.80
DH4	0.13	11.12	18740.00	-4.32	-5.30
DL1	0.38	8.68	0.004	2.32	1.45
DL2	0.46	26.21	0.23	0.62	-0.74
DL3	0.32	28.32	1551.00	-3.21	-4.60
DL4	0.43	30.20	0.23	0.63	-0.79
HJN1	0.11	3.46	60460.00	-4.91	-5.38
HJN2	0.1	6.22	74170.00	-4.94	-4.68
HJN3	0.26	5.72	1.45	-0.24	-0.94

由 C_{DGT-P} 和间隙水 SRP 计算获得 R 可以反应沉积物磷从固相到间隙水的补给能力,即磷的迁移能力.5 湖表层沉积物再补给系数 R 介于 0.08~0.46,均值为(0.22±0.13).其中乌梁素海、哈素海和红碱淖湖沉积物 R 整体都小于 0.20,沉积物中磷由固相向间隙水补给过程普遍较慢.达里诺尔湖沉积物 R 最高(0.40±0.06),表明达里诺尔湖沉积物中磷向间隙水补给能力较强,与达里诺尔湖 Ex-P、BAP、 C_{DGT-P} 、 K_d 含量最高均一致,可能的原因是达里诺尔湖沉积物磷活性较强,向湖泊水体释放磷的风险更大. T_c 和 K_{-1} 直接影响其再补给的速率,寒旱区 5 湖沉积物 T_c 值范围为 0.004~74170.00s. 5 湖的吸(解)附响应时间均值依次为:红碱淖湖(44877.15s)> 哈素海(31350.00s)> 乌梁素海(26582.00s)> 岱海(6727.16s)>

达里诺尔湖(387.87s).其中,达里诺尔湖表层沉积物的 T_c 最小, K_{-1} 和 K_1 更大,即达到吸附/解吸速率和平衡更快,磷迁移能力最强.从整体来看,寒旱区湖泊与东部平原湖区湖泊相比(表 5), R 显著较低, T_c 值较高,表明磷从固相到间隙水补充缓慢,DGT 再补给量较低,沉积物颗粒具有惰性,磷不容易通过扩散或吸附过程进入间隙水.这与寒旱区湖泊沉积物中磷主要以 Ca-P 和 Res-P 惰性形式存在有关,这两种形态的磷对磷的吸附能力较强,不易释放到水体中.此外,近代以来寒旱区部分湖泊水体咸化,pH 值较高,碱性环境也不利于 Ca-P 转化为可释放的形态,从而限制了内源磷向水体的释放和利用,因此寒旱区沉积物磷迁移能力较低.

表 5 其他湖泊沉积物中磷的迁移动力学参数
Table 5 Kinetic parameters of phosphorus migration in sediments of other lakes

湖泊	R	$K_d(\text{cm}^3/\text{g})$	$T_c(\text{s})$	$K_{-1}(\text{d}^{-1})$
5 湖均值	0.22±0.13	11.34±9.29	0.004~74170.00	0.000001~27.88
呼伦湖 ^[41]	0.186~0.734	179.98	54~11070	0.07~172.2
滇池 ^[40]	0.164~0.774	261.62	1.4~42660	0.02~179.3
南湖 ^[6]	0.188~0.751	357.94	38~20520	0.10~3.09
太湖 ^[41]	0.356	49.9	1.27	0.022
Wellington ^[42]	0.40~1.00		55~149400	0.60~1558
Victoria ^[42]	0~0.40		4128~183400	0.30~21

2.4 磷库容量和迁移动力学的驱动因子分析

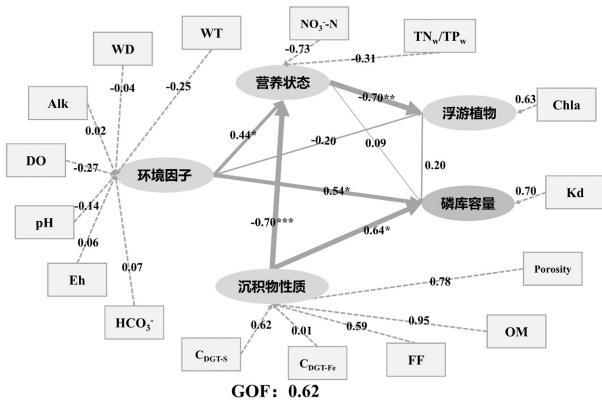


图 6 磷库容量的 PLS-PM 模拟结果

Fig.6 PLS-PM simulation results of phosphorus pool capacity

在与箭头相同方向上标记标准化路径系数,用箭头粗细代表标准化路径系数的相对大小;显著性水平用* $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$

本研究中基于 PLS-PM 揭示各个因素之间相互影响的程度大小,发现 5 湖磷库容量及动力学的

GOF 均为 0.62(图 6、图 7),表明磷库容量及动力学的模型质量很好,能够反应各个潜变量之间的影响大小.

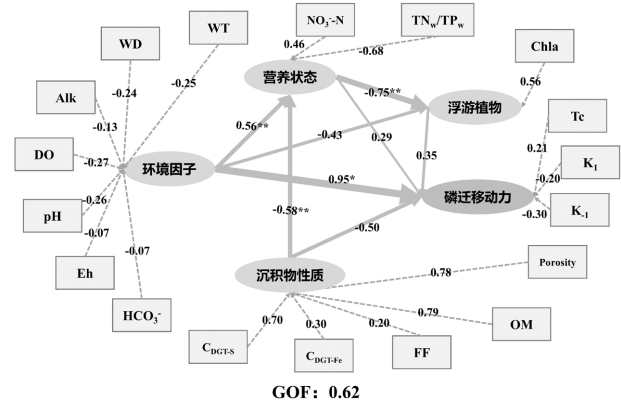


图 7 磷迁移动力的 PLS-PM 模拟结果

Fig.7 PLS-PM simulation results of phosphorus dynamics
在与箭头相同方向上标记标准化路径系数,用箭头粗细代表标准化路径系数的相对大小;显著性水平用* $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$

寒旱区 5 湖的 4 个潜在变量对磷库容量的直接效应系数为环境因子(0.54, $P<0.05$)、浮游植物(0.20)、营养状态(0.09)、沉积物性质(0.64, $P<0.05$),对磷动力学的直接效应系数为环境因子(0.95, $P<0.05$)、浮游植物(0.35)、营养状态(0.29)、沉积物性质(-0.50).5 湖磷库容量主要受环境因子、营养状态等的影响,而磷迁移动力学过程主要受环境因子的影响,与湖泊营养状态与浮游植物影响较小,可能的原因是寒旱区湖泊近年来水位下降、湖面萎缩,水体咸化,pH 值较高等环境变化有关.在沉积物性质指标中,Porosity、 C_{DGT-S} 、OM 等路径系数较高,表明 5 湖沉积物的粒径结构、有机质组成、还原性物质的含量均会直接影响界面磷迁移^[43-44].5 湖的沉积物性质与营养状态的路径系数在磷库容量模型中为 -0.70($P<0.001$),而在磷动力学模型中的路径系数为 -0.58($P<0.05$),可能的原因是沉积物可以长期吸附大量的磷,从而对湖泊营养状态及磷库容量影响较大.磷的迁移动力,受限于湖泊中沉积物的化学性质,寒旱区的湖泊存在地质风化过程、岩石和土壤中的磷输入,汇合累积到湖泊沉积物中.随着全球气候变化影响,蒸发作用强烈,5 湖咸化,而沉积物中磷又以 Ca-P 和 Res-P 为主,而 Ca-P 和 Res-P 对磷的结合程度较强,磷不容易释放,且 DIFS 模型中 T_c 值较高,磷迁移动力较小.在磷库容量及动力学模型中营养

状态均会直接显著影响浮游植物(路径系数为均 $>0.7, P<0.01$),这是由于水体中氮和磷会推动浮游植物的生长和繁殖^[45].5 湖的营养状态与磷库容量的路径系数为 0.09,而与磷迁移动力的路径系数为 0.29,可能的原因是寒旱区气候干旱,蒸发作用强烈,湖泊水体离子浓度增加,结合 5 湖 FF 值很高,表明沉积物中的内源磷释放是重要污染来源,加剧湖泊富营养化.且在磷限制性湖泊中,磷库容量较大时,沉积物中的磷会以稳定的形式存在,而迁移到水体中的速率相对较慢.这种湖泊稳定化过程与磷库容量有较大影响,但迁移动力对短期内的磷补给影响较小.

3 结论

3.1 5 湖水体的 TN_w 、 TP_w 含量及 TN_w/TP_w 均值分别为 (3.40 ± 1.87) mg/L、 (0.81 ± 1.31) mg/L、 (26.13 ± 22.75) ,从整体来看,5 湖是磷限制性湖泊.5 湖所有采样点表层沉积物整体综合污染程度为重度污染.5 湖沉积物 TP_s 平均含量为 (763.48 ± 563.70) mg/kg,其中各形态磷空间分布差异性较小,与寒旱区存在更为显著的自然过程如地质风化过程、岩石和土壤中的磷释放等来源的磷输入,不断汇积到湖泊沉积物中等地质背景有关.各赋存形态磷的含量的相对比例大小顺序依次为: $Ca-P>Res-P>BD-P>Org-P>Ex-P$.沉积物磷赋存形态中 $Ca-P(51.09\%\pm 0.07)$,可能与湖泊流域的岩石风化和土壤侵蚀导致的磷输入有关.

3.2 5 湖沉积物 BAP、 C_{DGT-P} 、 K_d 均值分别为 (193.54 ± 55.94) mg/L、 (0.19 ± 0.14) mg/L、 (11.34 ± 9.29) cm^3/g ,5 湖磷库容量显著低于东部平原湖区的湖泊.可能的原因是沉积物对磷的吸附能力较弱,导致寒旱区 5 湖沉积物中活性磷库容量较低.DIFS 模型中 K_d 结果与利用 C_{DGT-P} 、 $Ex-P$ 及 BAP 传统磷库容量评估结果一致,更加证明了 DIFS 模型的可靠性.DIFS 模型进一步分析,磷释放速率 T_c 范围为 0.004~74170.00s,高于东部平原湖区湖泊,可能是寒旱区部分湖泊水体咸化,pH 值较高,碱性环境也不利于 $Ca-P$ 转化为可释放的形态,导致寒旱区 5 湖沉积物中活性磷库容量较低,导致寒旱区湖泊磷迁移能力较弱.

3.3 基于 PLS-PM 模型分析表明,寒旱区湖泊磷库容量的主要因素是湖泊沉积物性质 $(0.64, P<0.05)$.影响磷迁移动力学的主要因素 $(0.95, P<0.05)$ 是 5 湖水

体的环境因子,与湖泊营养状态与浮游植物影响较小,寒旱区湖泊水位下降、湖面萎缩,水体咸化,pH 值较高等环境因子有关.

参考文献:

- [1] Bastami K D, Neyestani M R, Raeisi H, et al. Bioavailability and geochemical speciation of phosphorus in surface sediments of the Southern Caspian Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018,126:51-57.
- [2] Wang C H, Jiang H L. Chemicals used for in situ immobilization to reduce the internal phosphorus loading from lake sediments for eutrophication control [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2016,46(10):947-997.
- [3] Zhou Y W, Wang H X, Zhang Y L, et al. Availability and diffusion kinetic process of phosphorus in the water-sediment interface assessed by the high-resolution DGT technique [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021,21(10):3274-3288.
- [4] Liu H, Chi L, Shen J, et al. Principles, applications, and limitations of diffusive gradients in thin films induced fluxed in soils and sediments [J]. *Chemosphere*, 2024,350:141061.
- [5] Zheng Y, Sun Y, Zhang Z H, et al. Evaluation of the distribution and mobility of labile phosphorus in sediment profiles of Lake Nansi, the largest eutrophic freshwater lake in northern China [J]. *Chemosphere*, 2023,315.
- [6] Wu Z H, Jiang X, Wang S H, et al. Mobilization and geochemistry of nutrients in sediment evaluated by diffusive gradients in thin films: Significance for lake management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,292.
- [7] Li Y, Hu L, Zhao Y T, et al. Meltwater-driven water-level fluctuations of bosten lake in arid china over the past 2000 years [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021,48,2020GL090988.
- [8] Ren X H, Yu R H, Liu X Y, et al. Spatial changes and driving factors of lake water quality in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2023,15(2):164-179.
- [9] 郭子扬,李畅游,史小红,等.寒旱区呼伦湖水体叶绿素 a 含量的时空分布特征及其影响因素分析 [J]. *生态环境学报*, 2019,28(7):1434-1442.
GUO Z Y, LI C Y, SHI X H, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of chlorophyll a content and its influencing factor analysis in hulun lake of cold and dry areas [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019,28(7):1434-1442.
- [10] 梁丽娥,王磊,张正洪.夏季红碱淖水化学特征及影响因素分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2021,33(5):64-67.
Liang L E, Wang L, Zhang Z H. Hydrochemical characteristics and influencing factors of Hongjiannao lake in summer [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2021,33(5):64-67.
- [11] 刘莹慧,卢俊平,赵胜男,等.基于长时间序列乌梁素海水环境变化趋势及生态补水等关键驱动因子分析(2011-2020 年) [J]. *湖泊科学*, 2023,35(6):1939-1948.
Liu Y H, Lu J P, Zhao S N, et al. Water environment change trend and ecological water replenishment of Lake Wuliangshuai and other key driving factors analysis based on long time series (2011-2020) [J].

- Journal of Lake Sciences, 2023,35(6):1939-1948.
- [12] 芦津,杨瑾晟,罗菊花,等.环境因子及生态补水对乌梁素海“黄苔”年际暴发面积的影响(1986~2021年)[J].湖泊科学,2023,35(6):1881-1890.
- Lu J, Yang J S, Luo J H, et al. Impacts of environmental factors and ecological hydration on the interannual changes of metaphytic blooms area in Lake Ulansuhai (1986~2021) [J]. Journal of Lake Sciences, 2023,35(6):1881-1890.
- [13] 杨文焕,张晓学,姚植,等.岱海沉积物营养盐时空分布特征及污染评价[J].环境科学与技术,2022,45(9):153-159.
- Yang W H, Zhang X H, Yao Z, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and pollution assessment of nutrients in sediments of Daihai Lake [J]. Environmental Science and Technology, 2022,45(9):153-159.
- [14] Wu Z H, Jiang X, Chen J Y, et al. Diffusive gradients in thin films for transfer of phosphorus, nitrate and ammonium in lake sediments [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2023,247.
- [15] Zhang H, Davison W. Performance characteristics of diffusion gradients in thin films for the in situ measurement of trace metals in aqueous solution [J]. Analytical Chemistry, 1995,67(19):3391-3400.
- [16] Han C, Ding S M, Yao L, et al. Dynamics of phosphorus-iron-sulfur at the sediment-water interface influenced by algae blooms decomposition [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015,300:329-337.
- [17] 魏复盛.水和废水监测分析方法(第四版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002:254-670.
- Wei F S. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater (fourth edition) [M]. Beijing: Chinese environmental science press, 2002:254-670.
- [18] 霍姮翠,张饮江,彭自然.3种方法检测水体底泥有机质含量的比较[J].安全与环境学报,2010,10(5):102-106.
- Huo H C, Zhang Y J, Peng Z R. Comparison of three methods measuring the sediment organic matter of water body [J]. Journal of Safety and Environment, 2010,10(5):102-106.
- [19] 钱君龙,府灵敏.用过硫酸盐氧化法同时测定水中的总氮和总磷[J].环境科学,1987,28(1):88-94.
- Qian J L, Fu L M. Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water by persulphate oxidation method [J]. Environmental Science, 1987,28(1):88-94.
- [20] Jensen H S, Thamdrup B. Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction [J]. Hydrobiologia, 1993,253(1-3):47-59.
- [21] 陆帅帅,周念清,蔡奕,等.洞庭湖湿地潜流带地下水中氮磷迁移转化过程及驱动机制分析[J].水资源保护,2024,40(5):122-130.
- Lu S S, Zhou N Q, Cai Y, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus migration and transformation and driving mechanism in hyporheic zone groundwater of Dongting Lake wetland [J]. Water Resources Protection, 2024,40(5):122-130.
- [22] Wetzels M, Odekerken-Schröder G, Van Oppen C. Using PLS path modeling for assessing hierarchical construct models: Guidelines and empirical illustration [J]. Mis Quarterly, 2009,33(1):177-195.
- [23] 杨富亿,文波龙,李晓宇,等.达里诺尔湿地水环境和鱼类多样性调查 III.达里湖水体中的氮和磷含量及分布[J].湿地科学,2021,19(1):47-58.
- Yang F Y, Wen B L, Li X Y, et al. Investigation of water environment and fish diversity in Dalinor wetlands III. Contents and distribution of nitrogen and phosphorus in the waters in Dali Lake [J]. Wetland Science, 2021,19(1):47-58.
- [24] 王世欢,史小红,赵胜男,等.寒旱区高盐湖泊溶解性有机质的光学特征及来源解析[J].环境科学,2024,45(11):6574-6582.
- Wang S H, Shi X H, Zhao S N, et al. Optical characteristics and source analysis of dissolved organic matter in hypersaline lakes in cold and arid regions [J]. Environmental Science, 2024,45(11):6574-6582.
- [25] 李哲,郭劲松,方芳,等.三峡水库小江回水区不同TN/TP水平下氮素形态分布和循环特点[J].湖泊科学,2009,21(4):509-517.
- Li Z, Guo J S, Fang F, et al. Potential impact of TN/TP ratio on the cycling of nitrogen in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2009,21(4):509-517.
- [26] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? [J]. Limnology and Oceanography, 2000,45(6):1213-1223.
- [27] 赛·巴雅尔图,黄瑾,谢贵娟,等.新疆博斯腾湖浮游细菌丰度对富营养化及咸化的响应[J].湖泊科学,2011,23(6):934-941.
- Sai B, Huang J, Xie G J, et al. Response of planktonic bacterial abundance to eutrophication and salinization in Lake Bosten, Xinjiang [J]. Journal of Lake Sciences, 2011,23(6):934-941.
- [28] Wu R, Zhang S, Liu Y, et al. Spatiotemporal variation in water quality and identification and quantification of areas sensitive to water quality in Hulun lake, China [J]. Ecol Indic, 2023,149.
- [29] 梁丽娥,李畅游,张正洪.呼伦湖沉积物柱芯营养物质垂直分布及生态风险评价[J].水电能源科学,2019,37(11):50-53.
- Liang L E, Li C Y, Zhang Z H. Vertical distribution and ecological risk assessment of nutrients in sediments of Hulun lake [J]. Water Resources and Power, 2019,37(11):50-53.
- [30] Yan X, Xia Y Q, Ti C P, et al. Thirty years of experience in water pollution control in Taihu Lake: A review [J]. Sci Total Environ, 2024,914.
- [31] 陈珏,支鸣强,朱德龙,等.太湖沉积物营养物及重金属污染分布特征及风险评估[J].中国环境科学,2024,44(3):1457-1465.
- Chen J, Zhi M Q, Zhu D L, et al. Distribution characteristics and risk assessment of nutrient and heavy metal pollution in sediment in Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1457-1465.
- [32] 杨永杰,朱超,陈奕涵,等.巢湖水体中氮、磷和叶绿素a的时空分布及其与环境因子的相关性[J].广东化工,2024,51(2):87-89.
- Yang Y J, Zhu C, Chen Y H, et al. Temporal-spatial distribution characteristics of nitrogen, phosphorus and chlorophyll a in Chaohu lake and their correlation with environmental factors [J]. Guangdong Chemical Industry, 2024,51(2):87-89.
- [33] 王艳平,徐伟伟,韩超,等.巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J].环境科学,2021,42(2):699-711.
- Wang Y P, Xu W W, Han C, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus in lake Chaohu sediments and pollution evaluation [J]. Environmental Science, 2021,42(2):699-711.
- [34] 王业迪,贾璐杰,陆瑶,等.鄱阳湖2010~2019年氮磷收支及其富营养化影响[J].环境科学学报,2024,44(6):151-160.
- Wang Y D, Jia J J, Lu Y, et al. Nitrogen and phosphorus budget and

- eutrophication impacts in Poyang Lake from 2010 to 2019 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024,44(6):151-160.
- [35] 梁 旭,刘华民,纪美辰,等.北方半干旱区土地利用/覆被变化对湖泊水质的影响:以岱海流域为例(2000~2018 年) [J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3):727-738.
- Liang X, Liu H M, Ji M C, et al. Effects of land use/cover change on lake water quality in the semi-arid region of northern China: A case study in Lake Daihai Basin (2000~2018) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021,33(3):727-736.
- [36] Pu J, Ni Z K, Wang S R. Characteristics of bioavailable phosphorus in sediment and potential environmental risks in Poyang Lake: The largest freshwater lake in China [J]. *Ecol Indic*, 2020,115.
- [37] 金相灿,庞 燕,王圣瑞,等.长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2008,(1):279-285.
- Jin X C, Pang Y, Wang S R, et al. Phosphorus forms and its distribution character in sediment of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Agro- Environment Science*, 2008,(1):279-285.
- [38] 张 沐,李发建,圣伟佳,等.巢湖西半湖底泥磷分布及释放特征 [J]. *环境科学学报*, 2023,43(9):164-175.
- Zhang M, Li F J, Sheng W J, et al. Distribution and release of phosphorus in the sediment of Western Lake Chaohu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023,43(9):164-175.
- [39] 王丛丹,汪金成,杨 宇,等.平水期洞庭湖不同形态磷赋存特征 [J]. *水文*, 2019,39(6):74-79.
- Wang C D, Wang J C, Yang Y, et al. Occurrence characteristics of various form phosphorus in Dongting Lake during normal-flow period [J]. *Journal of China Hydrology*, 2019,39(6):74-79.
- [40] Wu Z H, Wang S R, Ji N N. Phosphorus (P) release risk in lake sediment evaluated by DIFS model and sediment properties: A new sediment P release risk index (SPRRI) [J]. *Environmental Pollution*, 2019,255.
- [41] Chen M S, Cui J Z, Lin J, et al. Successful control of internal phosphorus loading after sediment dredging for 6years: A field assessment using high-resolution sampling techniques [J]. *Sci Total Environ*, 2018,616:927-936.
- [42] Monbet P, Mckelvie I D, Worsfold P J. Combined gel probes for the in situ determination of dissolved reactive phosphorus in porewaters and characterization of sediment reactivity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008,42(14):5112-5117.
- [43] 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, Jiao L X, et al. Vertical variation of phosphorus forms in lake Dianchi and contribution to release [J]. *Environmental Science*, 2016,37(9):3384-3393.
- [44] 郝文超,王从锋,杨正健,等.氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 [J]. *环境科学*, 2019,40(2):640-648.
- Hao W C, Wang C F, Yang Z J, et al. Speciation and transformation of phosphorus in sediments during the redox cycle [J]. *Environmental Science*, 2019,40(2):640-648.
- [45] Asmala E, Haraguchi L, Jakobsen H H, et al. Nutrient availability as major driver of phytoplankton-derived dissolved organic matter transformation in coastal environment [J]. *Biogeochemistry*, 2018, 137(1/2):93-104.
- 致谢:** 本实验的现场采样及分析工作由韩超老师课题组成员协助完成,在此表示感谢。
- 作者简介:** 王少林(1999-),男,山西吕梁人,曲阜师范大学硕士研究生,研究方向为环境化学模型.13293667596@163.com.