

陕西红碱淖湖泊表层底泥磷形态研究

刘晓清¹, 刘昱含¹, 刘钊², 于学峰^{3*}

1. 陕西环保产业集团有限责任公司, 西安 710075

2. 西安工程大学 环境与化学工程学院, 西安 710600

3. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061

摘要: 磷是一种重要的生命必需元素, 其与氮都是引起水体富营养化的重要元素。红碱淖是中国最大的沙漠淡水湖, 在区域生态系统中的功能十分显著。采用连续提取法对陕西红碱淖湖泊表层沉积物磷形态进行分析, 得到弱吸附态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)、铁锰螯合态磷 (BD-P)、铁铝氧化态磷 (NaOH-P)、钙磷 (HCl-P)、惰性磷 (Res-P) 五种磷形态。结果表明: 总体上, 红碱淖表层底泥磷向水体释放的风险较低, 但在湖泊水体 pH 值上升背景下, 一些碱溶解磷 (如 NaOH-P) 向湖泊水体释放的风险可能增加。五种形态磷在全湖的空间分布表明: $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与 BD-P 呈现大致相似的特征, NaOH-P 主要在湖泊南岸附近富集, HCl-P 和 Res-P 呈大致相反的变化趋势, 总磷 (TP) 在全湖近平均分布。与国内典型湖泊沉积物的对比显示: 红碱淖表层底泥无论是总磷还是活泼磷均处于较低水平, 也说明该湖泊表层底泥磷向水体释放的风险相对较低。

关键词: 红碱淖; 表层底泥; 磷形态; 释放风险

A study of phosphorus species in the surface sediment of Lake Hongjiannao, Shaanxi Province, Northwest China

LIU Xiaoqing¹, LIU Yuhua¹, LIU Zhao², YU Xuefeng^{3*}

1. Shaanxi Environmental Protection Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China

2. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China

3. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Abstract: Background, aim, and scope Phosphorus is an important essential element for life. Together with nitrogen, it is also an important element that cause water eutrophication. In the lake environment, the risk of phosphorus release from the sediment to the water is closely related to the occurrence form of phosphorus in the sediment. The more the active form of phosphorus, the easier the phosphorus releases to the water environment. In addition, phosphorus also has a great influence on the form and abundance of nitrogen in the environment. As the largest desert freshwater lake in China, Lake Hongjiannao is an important habitat for *Larus relictus*. Therefore, the study of phosphorus form in lake sediment is of great importance to evaluate the eutrophication risk of lake water.

Materials and methods In order to characterize various phosphorus species in the sediment, a total of 12 samples

收稿日期: 2023-09-04; 录用日期: 2023-10-27; 网络出版: 2023-11-15

Received Date: 2023-09-04; **Accepted Date:** 2023-10-27; **Online first:** 2023-11-15

基金项目: 水质较好湖泊生态安全调查与评估专项

Foundation Item: Survey and Assessment of Lake Ecological Security in China

通信作者: 于学峰, E-mail: xfyu@loess.llqg.ac.cn

Corresponding Author: YU Xuefeng, E-mail: xfyu@loess.llqg.ac.cn

引用格式: 刘晓清, 刘昱含, 刘钊, 等. 2024. 陕西红碱淖湖泊表层底泥磷形态研究 [J]. 地球环境学报, 15(1): 164–172.

Citation: Liu X Q, Liu Y H, Liu Z, et al. 2024. A study of phosphorus species in the surface sediment of Lake Hongjiannao, Shaanxi Province, Northwest China [J]. *Journal of Earth Environment*, 15(1): 164–172.

from Lake Hongjiannao and 5 samples from rivers entering the lake were collected and treated using a sequential extraction method improved by Hupfer et al. (1995). The content of phosphorus in the extracted solution was determined by the Mo-Sb anti-spectrophotometry method. **Results** The mean of five phosphorus species in the surface sediment samples of Lake Hongjiannao are: $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ $3.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, BD-P $35.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NaOH-P $42.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, HCl-P $144.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and Res-P $227.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. In the sediment of Lake Hongjiannao, phosphorus is mainly present in the form of non-reactive HCl-P and Res-P , while the contents of soluble reactive $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and BD-P are low. Except for NaOH-P and HCl-P , the variation of other phosphorus species at different sampling sites was not significant. **Discussion** The spatial analysis shows that the distribution of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and BD-P has roughly similar characteristics, and there is a high value in the centers of eastern and western semi-lakes respectively. NaOH-P is mainly enriched near the south bank of the lake. Interestingly, the distribution of HCl-P and Res-P showed roughly opposite trends. TP is almost evenly distributed in the whole lake. Based on comparison with other lakes in China, TP content in the surface sediment of Lake Hongjiannao is lower than that of other lakes, except for the Chaohu Lake and Poyang Lake in the Yangtze River Basin. According to comparison of the contents of soluble reactive phosphorus with other lakes, the contents of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$, BD-P and NaOH-P in Lake Hongjiannao are also at a lower level. **Conclusions** The risk of phosphorus release from the surface sediment to the water in the Lake Hongjiannao is generally low, but the risk of the release of some alkaline dissolved phosphorus is likely to increase under the trend of alkaline enhancement. The relationship between the spatial distribution of different phosphorus species and lake hydrodynamics, grain size of sediment and so on remains to be further studied. **Recommendations and perspectives** The results in this study are valuable for evaluating the potential risk of phosphorus release of surface sediment to the lake water and the eutrophication of lakes in the climatic sensitive zone.

Key words: Lake Hongjiannao; surface sediment; phosphorus species; release risk

磷是一种重要的生命必需元素, 其与氮都是引起水体富营养化的重要元素(李如忠等, 2019; 李静等, 2021)。在水环境中, 磷元素在不同界面间的相互转化对水体中磷丰度产生重要影响(何佳等, 2015)。在截污控源取得重要进展的地区, 水体内源磷释放是形成水体富营养化的另一个可能因素。磷在自然沉积物中的赋存形态主要有弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)、铁锰螯合态磷(BD-P)、铁铝氧化态磷(NaOH-P)、钙磷(HCl-P)、惰性磷(Res-P)等(Hupfer et al., 1995)。一般条件下, 上述五种形态磷的活泼性依次降低, 向水环境释放的潜力依次降低。在湖泊环境中, 底泥中的磷向水体释放风险与其赋存形态有较大关系, 越是活泼形态的磷越容易向水环境释放(Boström, 1984)。此外, 磷对环境中氮的形态和丰度也有较大影响(Zhang et al., 2022)。

对湖泊沉积物开展磷形态的研究和报道主要集中在磷形态测试方法(Hupfer et al., 1995; 王书航等, 2015; 方庆军等, 2023)、不同形态磷的

环境释放机制(Boström, 1984; 高丽等, 2004; Zhang et al., 2022)、不同形态磷的生态效应(许海等, 2019)等方面。尽管分类和分析测试方法不同(Hupfer et al., 1995; Yang et al., 2020), 但分析湖泊表层底泥磷形态已经成为湖泊富营养化风险评价的重要手段(Kaiserli et al., 2002; 金相灿等, 2008; 宋学峰等, 2016; 宋琳等, 2022; 张志斌等, 2022)。陕西红碱淖是我国最大的沙漠淡水湖, 其水体环境质量对区域水环境具有重要意义。该湖泊表层底泥磷释放风险评估尚为空白, 有必要开展以磷形态分析为主要内容的磷元素释放风险评估。本文以陕西红碱淖为研究对象, 通过连续提取法研究红碱淖湖泊表层底泥磷形态特征, 用以评价该湖泊表层底泥磷元素向湖泊水体的释放风险, 为区域水体环境保护提供基础性资料。

1 样品采集与实验方法

1.1 红碱淖湖泊区域概况

红碱淖($39^{\circ}03'—39^{\circ}07'\text{N}$ 、 $109^{\circ}49'—109^{\circ}55'\text{E}$)

位于陕西省与内蒙古自治区交界处，是一个高原内陆湖，也是中国最大的沙漠淡水湖。与毛乌素沙漠相邻，素有“大漠明珠”之称，主要由扎萨克河、松道沟河、麟盖兔河、七卜素河、木独石犁河等河流汇集而成，流域面积约 1500 km²。

红碱淖成湖时间较短（唐克旺等，2003；汪勇等，2004），但在区域生态系统中的功能却十分显著，具有生物多样性保育功能、防风固沙功能和水源涵养功能等。此外，红碱淖还是世界濒危物种、国家一级保护动物——遗鸥的繁殖栖息地。由于人类活动的影响和自然环境的变化，湖域面积自 20 世纪 90 年代以来呈逐年缩减的趋势，且面临一系列生态环境问题（李登科等，2010；娄广艳等，2012；刘晓清和王亚萍，2014；于学峰等，2016）。湖水 pH 值呈上升趋势，水体 pH 值为 9.3，已超出了淡水鱼类生存极限（臧维玲等，

1989）。

1.2 样品采集

为开展表层沉积物磷形态空间特征分析，在红碱淖布设了 12 个采样点（图 1）。采样点布设尽量考虑平面展布的均匀性，同时又兼顾湖岸、湖心、入湖河口等不同沉积单元的代表性。为对比湖泊沉积物与河流沉积的磷形态特征，在目前尚有季节性流水的七卜素河入湖口附近和七卜素河环湖路桥下分别采集河道沙堆积样品，在没有流水的松道沟上游、下游和麟盖兔河环湖路桥下也分别采集河道沉积物样品。使用 Van Veen 采泥器采集湖泊和入湖河流底泥，抓取湖泊（河流）10 cm×20 cm 的表层沉积物样品，采样深度为 10 cm。共获得 12 个湖泊沉积物样品和 5 个人湖河流沉积物样品。样品用密封袋包装后运回实验室开展测试分析。

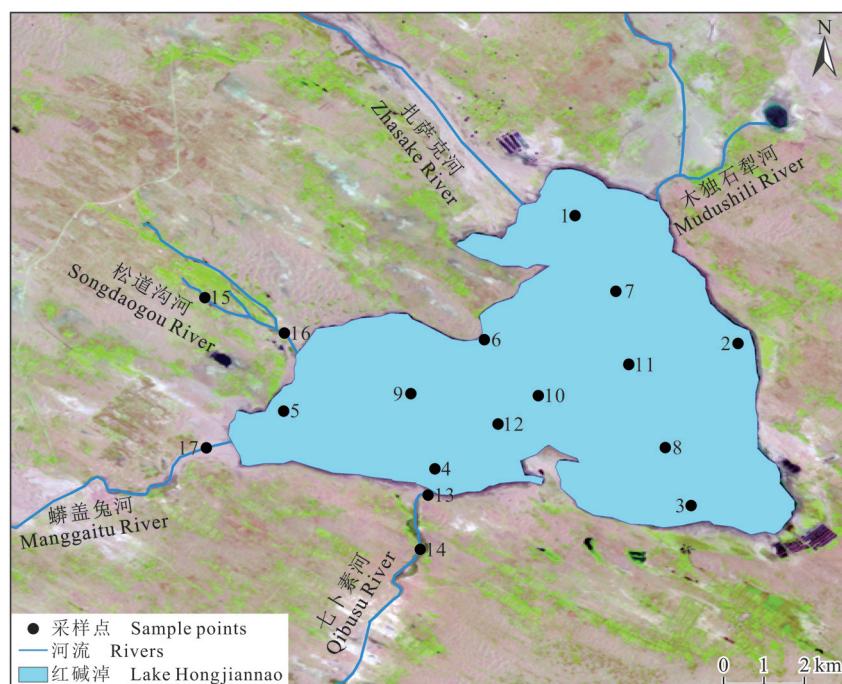


图 1 红碱淖湖泊和入湖河流底泥采样点分布
Fig. 1 The sampling sites in the lake and rivers in the area of Lake Hongjiannao

1.3 不同形态磷元素的分步连续提取与测试

采用 Hupfer et al. (1995) 改进的分步连续提取法提取沉积物中不同形态的磷。按照表 1 所列的实验条件进行分步连续提取。利用钼锑抗分光光度法测定提取液中的磷含量（程段莹等，2018；方庆军等，2023）。

2 结果与分析

表 2 为使用连续提取法对红碱淖湖泊底泥进行磷形态分析测试的结果。 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 BD-P 、 NaOH-P 、 HCl-P 、 Res-P 的均值分别为： $3.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $35.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $42.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $144.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $227.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见红碱淖湖泊底泥磷形态以

较为稳定的 HCl-P 和更稳定的 Res-P 为主, 较为不稳定的 NH₄Cl-P 和 BD-P 含量较低。这种特征表明红碱淖底泥磷向水体释放的风险较低。以上五种形态磷在不同采样点的变异系数分别为:

0.4409、0.6530、0.9609、0.8468、0.6267, 说明除了 NaOH-P 和 HCl-P 在不同采样点数据变异较大外, 其他形态的磷在不同采样点数据变异不大。

表 1 连续提取法提取沉积物中不同形态的磷

Tab. 1 Sequential P-extraction method and the expected phosphorus species in sediments

试剂及浓度 Reagent	提取时间 Time/h	温度 Temperature / °C	提取物类型 Expected P species	活泼性 Reactivity
NH ₄ Cl (1 mol·L ⁻¹)	0.5	25	弱吸附态磷 P in the interstitial water loosely adsorbed to surface	SR
Na ₂ S ₂ O ₄ /NaHCO ₃ (0.11 mol·L ⁻¹)	1.0	40	铁锰化合物吸附的磷 Redox-sensitive P mainly bound to Fe-hydroxides and Mn-compounds	SR
			部分有机磷 Organic P	NR
			铝铁氧化物吸附的磷 P bound to metal oxides mainly of Al and Fe	SR
NaOH (1 mol·L ⁻¹)	16.0	25	碱溶性无机磷 Inorganic P soluble in bases	SR
			微生物体内的磷、碎屑物中的有机磷和腐殖质吸附的磷 P in microorganisms, organic P in detritus, P bound in humic compounds	NR
			钙磷、磷灰石 P bound to carbonates and apatite-P	SR
HCl (0.5 mol·L ⁻¹)	16.0	25	少量可水解的有机磷 Traces of hydrolysed organic P	SR
			有机磷 Organic P	NR
NaOH (0.5 mol·L ⁻¹)	2.0	85	铁锰化合物吸附的磷 Redox-sensitive P mainly bound to Fe-hydroxides and Mn-compounds	NR

SR 指可溶解的活泼磷, NR 指不活泼的磷。

SR refers to soluble reactive and NR refers to non-reactive.

表 2 红碱淖底泥不同形态磷丰度

Tab. 2 Concentrations of phosphorus species in the surface sediment of Lake Hongjiannao

样品编号 Sample ID	样品质量 Sample weight/g	NH ₄ Cl-P /(mg·kg ⁻¹)	BD-P /(mg·kg ⁻¹)	NaOH-P /(mg·kg ⁻¹)	HCl-P /(mg·kg ⁻¹)	Res-P /(mg·kg ⁻¹)	TP /(mg·kg ⁻¹)
1	0.4998	3.38	43.99	31.30	281.97	181.87	542.52
2	0.5006	5.91	42.23	27.59	10.13	345.99	431.86
3	0.5004	4.79	34.08	37.18	362.18	43.65	481.88
4	0.5008	1.69	18.57	16.88	120.16	157.59	314.90
5	0.5004	1.97	18.59	9.58	58.58	517.36	606.08
6	0.5004	2.82	22.53	23.09	22.53	232.07	303.04
7	0.5007	7.60	79.09	94.57	34.06	382.23	597.55
8	0.5004	4.51	63.65	74.07	235.16	129.83	507.22
9	0.5000	5.07	74.13	153.90	182.36	100.06	515.52
10	0.5000	3.10	56.65	97.24	252.26	60.32	469.58
11	0.5001	3.66	65.38	72.42	316.18	203.18	660.83
12	0.5006	2.82	18.86	18.30	328.82	60.81	429.60
13	0.5009	1.41	8.44	43.89	111.98	74.28	239.99
14	0.5005	2.25	14.64	5.91	43.64	400.40	466.86
15	0.4996	3.67	23.13	5.92	20.59	405.92	459.24

(待续 To be continued)

(续表 2 Continued Tab. 2)

样品编号 Sample ID	样品质量 Sample weight/g	NH ₄ Cl-P /(mg·kg ⁻¹)	BD-P /(mg·kg ⁻¹)	NaOH-P /(mg·kg ⁻¹)	HCl-P /(mg·kg ⁻¹)	Res-P /(mg·kg ⁻¹)	TP /(mg·kg ⁻¹)
16	0.4995	3.10	12.41	6.49	57.27	356.35	435.63
17	0.5007	2.53	9.29	5.35	17.73	222.36	257.26
均值 Mean value	—	3.55	35.63	42.57	144.45	227.90	454.09
标准差 Standard deviation	—	1.56	23.27	40.90	122.32	142.81	116.38
变异系数 Coefficient of variation	—	0.4409	0.6530	0.9609	0.8468	0.6267	0.2563

样品编号 1—12 号与湖泊采样点位一致, 13—17 号分别代表七卜素河口、七卜素河环湖路桥下、松道沟上游、松道沟下游和麟盖兔河环湖路桥下采样点。

Sample No. 1—12 is consistent with the sampling points in the lake, and No. 13—17 represents the sampling points of Qibusu Estuary, Qibusu Bridge, upper reaches of Songdaogou River, lower reaches of Songdaogou River and under the bridge of Manggaitu River, respectively.

图 2 展示了五种形态磷和总磷在不同采样点的测试结果。直观地, Res-P 和 HCl-P 含量在采样点中较高, 而 NH₄Cl-P 相对较低。变异系数较大的磷如 HCl-P、NaOH-P 表现出较大幅度的变化。TP 在不同采样点的变化较为恒定, 不同形态磷的丰度表现为对 TP 贡献最显著的若干组分之间此消彼长的变化, 如 Res-P、HCl-P 和 NaOH-P 表现出两两之间或一对二之间的此消彼长关系。

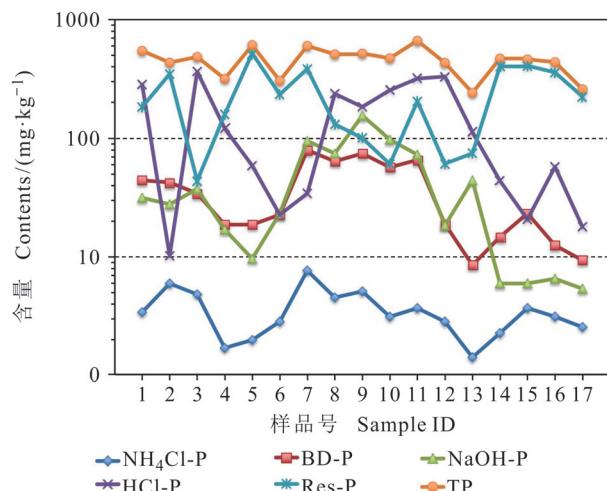


图 2 红碱淖及入湖河流底泥不同形态磷含量

Fig. 2 Concentrations of phosphorus species in the surface sediment of Lake Hongjiannao and rivers

图 3 是红碱淖湖泊底泥不同采样部位五种形态磷配分模式。不同形态磷配分模式总体上呈现由活泼磷到稳定磷递增的趋势, 其主要差别体现在 HCl-P 和 Res-P 的变化方面: 有 HCl-P 凸起—Res-P 凹下型和 HCl-P 凹下—Res-P 凸起型两个类型。近岸和河流样品多属于 HCl-P 凹下—Res-P 凸起型,

可能受沉积物物源、分选效应等因素影响。

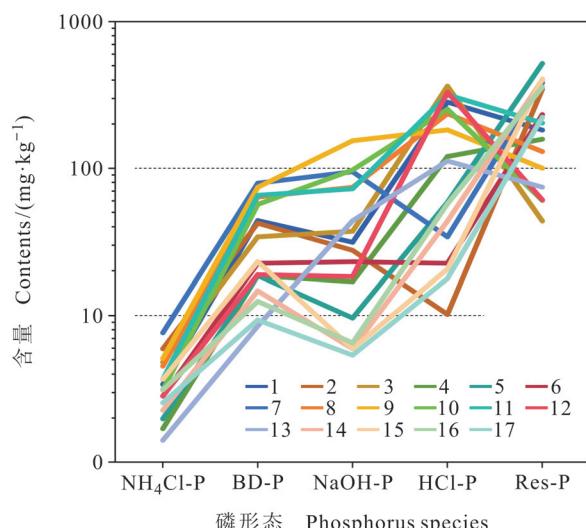


图 3 红碱淖不同采样点磷形态配分模式

Fig. 3 Phosphorus species pattern in the surface sediment of Lake Hongjiannao

3 讨论

3.1 三种性质磷组分的比例关系

在碱性条件下, 一些碱溶性的磷, 如 NaOH-P, 更易向水体释放 (Chang and Jackson, 1957; 高丽等, 2004)。考虑到红碱淖湖泊水体 pH 值已达 9 以上 (刘晓清和王亚萍, 2014), 将 NH₄Cl-P、BD-P、NaOH-P 三种形态的磷定义为在该湖泊较为活泼的磷 (SR), 将 HCl-P 定义为在一定条件下可以向活泼磷转化的不活泼磷 (SR-NR), 而将 Res-P 定义为非常不活泼的磷 (NR)。将不同采样点的 SR、SR-NR 和 NR 三种性质的磷组分投影到三角坐标系中 (图 4), 可以发现: SR 总体上

处于较低水平, 所有样品 SR 均未超过 25%; 17 个样品中 NR 从 10% 到 85%, 呈现较大变率, 有 8 个样品 NR 高于 75%。SR-NR 也呈现较大变率, 从 5% 到 78%, 有 8 个样品 SR-NR 不高于 25%。这 8 个样品 NR 和 SR-NR 呈近似此消彼长关系, 且多为近岸和入湖河流样品。

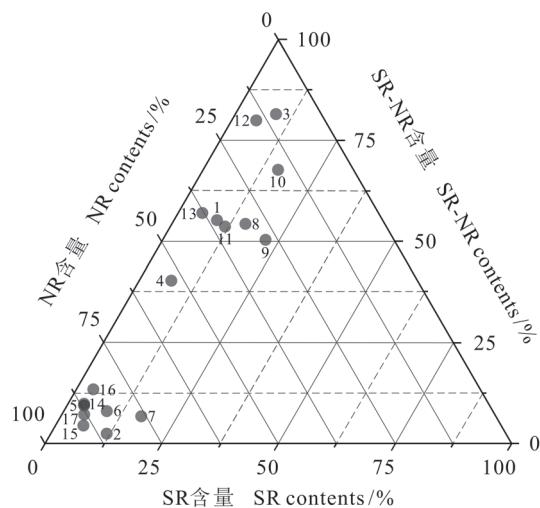


图 4 三角坐标系中的 SR、SR-NR 和 NR 三种性质的磷组分

Fig. 4 The phosphorus components of SR, SR-NR and NR in the triangular coordinate system

河流及近岸采样点的磷形态以高钙磷 - 高惰性磷为主, 说明入湖沉积物的磷主要以较为稳定的惰性磷 (NR) 为主, 可能暗示周边入湖径流的磷污染程度较低。湖心样品则偏向过渡类型 (SR-NR), 这与湖泊表层沉积物粒度分布特征类似 (刘晓清等, 2013), 可能指示湖泊水文动力过程对沉积物具有一定分选作用, 也可能与沉积物粒度效应有关。

3.2 五种形态磷及总磷的空间分布

为进一步揭示五种形态磷和总磷在红碱淖的空间分布情况, 利用 Golden Soft Surfer 软件, 通过克里金 (Kriging) 方法进行空间插值, 分别获得了 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、BD-P、 NaOH-P 、 HCl-P 、Res-P 和 TP 在全湖的空间分布特征图 (图 5)。 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、BD-P 的空间分布具有大致相似的特征, 在东半湖区和西半湖区分别存在一个高值中心, 且两种磷在东西湖区高值中心的位置大致相当, 在东半湖区偏北, 在西半湖区位于近湖心位置。 NaOH-P 主要在湖泊南岸附近富集。 HCl-P 和 Res-P 的空间分布呈大致相反的变化趋势: HCl-P 大致在两个半湖的湖心富集且强富集中心位于西半湖区的湖心, 而 Res-P 则呈现沿着湖岸富集的特征。TP 除在东半湖区湖心有一个富集中心外, 在全湖呈近乎均匀分布。

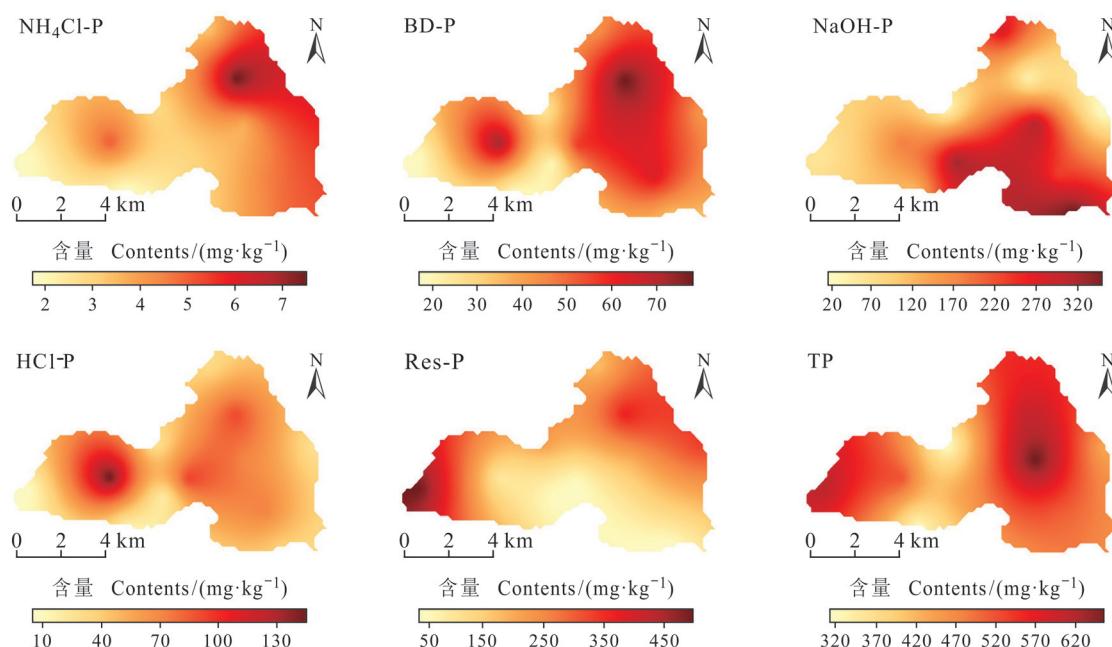


图 5 红碱淖不同形态磷的空间分布特征

Fig. 5 Spatial distributions of phosphorus species in the surface sediment of Lake Hongjianao

3.3 红碱淖磷形态与其他湖泊的比较

运用算术平均法计算红碱淖 12 个采样点表层底泥磷形态均值。表 3 为红碱淖与国内其他湖泊的比较, 如龙虎泡库区(宋学峰等, 2006), 升钟湖(宋琳等, 2022), 澜沧江中游水库(孙猛等, 2023), 太湖、洪泽湖、巢湖、玄武湖、洞庭湖(金相灿等, 2008), 以及南四湖消落带(张志斌

等, 2022)。尽管提取和测试方法存在差异, 不同湖泊磷形态对比较为困难。但从 TP 水平来看, 红碱淖湖泊表层底泥相较其他地区湖泊底泥 TP 含量处于较低水平, 除高于长江流域巢湖和鄱阳湖外, 均低于其他湖泊底泥 TP 水平。从较容易向水体释放的 NH_4Cl -P、BD-P、 NaOH -P 来看, 红碱淖相较其他地区湖泊含量也处于较低水平。

表 3 红碱淖湖泊底泥磷形态与其他湖泊的比较

Tab. 3 The comparison of phosphorus species in the surface sediments of Lake Hongjiannao with other lakes

湖泊 Lakes	提取方法 Methods	NH_4Cl -P /(mg·kg ⁻¹)	BD-P /(mg·kg ⁻¹)	NaOH -P /(mg·kg ⁻¹)	HCl-P /(mg·kg ⁻¹)	Res-P /(mg·kg ⁻¹)	TP /(mg·kg ⁻¹)	资料来源 References
红碱淖 Lake Hongjiannao	连续提取 Continuous extraction	3.94	44.81	54.68	183.70	201.25	488.38	本研究 This study
龙虎泡库区 Longhupao Reservoir	连续提取 Continuous extraction	46	82	7	495	172	802	宋学峰等, 2016 (Song X F et al., 2016)
升钟湖 Lake Shengzhong	连续提取 Continuous extraction	29.84	97.69	167.24	108.10	326.66	729.54	宋琳等, 2022 (Song L et al., 2022)
澜沧江 中下游水库 Reservoirs in middle and lower reaches of Lancang River	连续提取 * Continuous extraction	3.29	—	74.97	81.22—291.83	—	266.67—842.87	孙猛等, 2023 (Sun M et al., 2023)
太湖 Taihu Lake	SMT	—	—	34.41—338.12	110.99—333.48	—	306.8—809.2	金相灿等, 2008 (Jin X C et al., 2008)
洪泽湖 Hongze Lake	SMT	—	—	121.52—148.46	283.05—298.10	—	631.7—654.6	金相灿等, 2008 (Jin X C et al., 2008)
巢湖 Chaohu Lake	SMT	—	—	37.24—150.73	57.31—150.20	—	217.8—232.5	金相灿等, 2008 (Jin X C et al., 2008)
鄱阳湖 Poyang Lake	SMT	—	—	108.89—255.11	66.04—127.99	—	291.2—486.1	金相灿等, 2008 (Jin X C et al., 2008)
玄武湖 Xuanwu Lake	SMT	—	—	294.44—304.06	435.90—485.50	—	1035.6—1062.4	金相灿等, 2008 (Jin X C et al., 2008)
洞庭湖 Dongting Lake	SMT	—	—	173.99—425.64	201.89—315.16	—	739.8—947.6	金相灿等, 2008 (Jin X C et al., 2008)
南四湖消落带 Water-level-fluctuating zone in Lake Nansi	SMT	—	—	50.42	460.09	—	745.37	张志斌等, 2022 (Zhang Z B et al., 2022)

* 分步提取方法与本研究相同, 但测试过程有差异, 孙猛等(2023)在对提取物进行测量时又区分了有机磷和无机磷, 本表仅列出其无机磷测试结果。

* The extraction method is the same as in this study, Sun M et al. (2023) distinguished organophosphorus and inorganic phosphorus when measuring extracts. The inorganic phosphorus is listed in this table.

4 结论

通过对陕西红碱淖12个湖泊表层沉积物和5个入湖河流沉积物五种形态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 BD-P 、 NaOH-P 、 HCl-P 、 Res-P)的分析测试和空间分析,对陕西红碱淖表层沉积物磷向水体释放风险进行了评价。

在空间分布特征上, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与 BD-P 表现出大致相似的特征, NaOH-P 主要在湖泊南岸附近富集, HCl-P 和 Res-P 呈大致相反的变化趋势, TP在全湖呈近乎均匀分布。河流及近岸采样点的磷形态以高钙磷-高惰性磷为主, 湖心样品则以过渡类型(SR-NR)为主。

与国内其他湖泊相比, 较容易向水体释放的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 BD-P 、 NaOH-P 在红碱淖表层底泥中的含量较低, TP含量也处于相对较低水平, 所以红碱淖表层底泥磷向水体释放的风险较低。值得注意的是, 在湖泊水体pH值增加趋势下, 一些碱性溶解磷向湖泊水体释放的风险将可能增强。

不同磷组分空间分布特征与湖泊水文动力学、沉积物粒度的关系等仍有待进一步研究。

参考文献

- 程段莹, 梁美娜, 王敦球, 等. 2018. 睦洞湖沉积物中不同形态磷的分布特征 [J]. 湿地科学, 16(6): 783–792. [Cheng D Y, Liang M N, Wang D Q, et al. 2018. Distribution characteristics of different forms of phosphorus in the sediments of Mudong Lake [J]. *Wetland Science*, 16(6): 783–792.]
- 方庆军, 唐亚东, 王小明, 等. 2023. 湖泊沉积物磷形态分级提取及分析方法研究进展 [J]. 净水技术, 42(8): 29–37. [Fang Q J, Tang Y D, Wang X M, et al. 2023. Research progress on sequential extraction procedure and analysis methods for phosphorus species in lake sediments [J]. *Water Purification Technology*, 42(8): 29–37.]
- 高丽, 杨浩, 周健民. 2004. 湖泊沉积物中磷释放的研究进展 [J]. 土壤, 36(1): 12–15, 36. [Gao L, Yang H, Zhou J M. 2004. Research progress on phosphorus release from lake sediments [J]. *Soils*, 36(1): 12–15, 36.]
- 何佳, 陈春瑜, 邓伟明, 等. 2015. 滇池水-沉积物界面磷形态分布及潜在释放特征 [J]. 湖泊科学, 27(5): 799–810. [He J, Chen C Y, Deng W M, et al. 2015. Distribution and release characteristics of phosphorus in water-sediment interface of Lake Dianchi [J]. *Journal of Lake Sciences*, 27(5): 799–810.]
- 金相灿, 庞燕, 王圣瑞, 等. 2008. 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, 27(1): 279–285. [Jin X C, Pang Y, Wang S R, et al. 2008. 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*, 27(1): 279–285.]
- 李登科, 何慧娟, 刘安麟. 2010. 人类活动和气候变化对红碱淖植被覆盖变化的影响 [J]. 中国沙漠, 30(4): 831–836. [Li D K, He H J, Liu A L. 2010. Impact of human activities and climate change on vegetation around Hongjian Nur Lake in northwestern China [J]. *Journal of Desert Research*, 30(4): 831–836.]
- 李静, 赵婧娴, 廉鑫, 等. 2021. 基于CiteSpace的磷形态研究进展及前沿分析 [J]. 环境生态学, 3(6): 85–90, 94. [Li J, Zhao J X, Lian X, et al. 2021. Research progress and frontier of phosphorus speciation based on CiteSpace [J]. *Environmental Ecology*, 3(6): 85–90, 94.]
- 李如忠, 鲍琴, 戴源. 2019. 巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源碳的响应及释放风险 [J]. 环境科学, 40(5): 2178–2185. [Li R Z, Bao Q, Dai Y. 2019. Effects of exogenous carbon addition on equilibrium phosphate concentration and risk of phosphorus release from sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin [J]. *Environmental Science*, 40(5): 2178–2185.]
- 刘晓清, 王亚萍. 2014. 陕西红碱淖湖泊水体富营养化评价 [J]. 人民黄河, 36(12): 76–78. [Liu X Q, Wang Y P. 2014. Evaluation of the eutrophication in Hongjiannao Lake [J]. *Yellow River*, 36(12): 76–78.]
- 刘晓清, 王亚萍, 张振文, 等. 2013. 陕西红碱淖湖底表层沉积物粒度特征 [J]. 地球环境学报, 4(4): 1371–1378. [Liu X Q, Wang Y P, Zhang Z W, et al. 2013. Grain size characteristics of the surface deposit in Hongjiannao Lake in northern Shaanxi Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 4(4): 1371–1378.]
- 娄广艳, 王文君, 葛雷, 等. 2012. 红碱淖流域水生态现状及保护对策 [J]. 水生态学杂志, 33(2): 147–152. [Lou G Y, Wang W J, Ge L, et al. 2012. Water ecology status and protection measures for Hongjiannao Basin [J]. *Journal of Hydroecology*, 33(2): 147–152.]
- 宋琳, 陈超, 冯晓玉, 等. 2022. 升钟湖夏季水和沉积物中磷形态分布特征 [J]. 长江科学院院报, 39(10): 45–53.

- [Song L, Chen C, Feng X Y, et al. 2022. Distribution characteristics of phosphorus forms in water and sediment of Shengzhong Lake in summer [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 39(10): 45–53.]
- 宋学峰,季远玲,许成君,等. 2016. 龙虎泡库区柱状沉积物中磷形态分级研究 [J]. *中国给水排水*, 32(21): 111–113.
- [Song X F, Ji Y L, Xu C J, et al. 2016. Study on phosphorus forms in sediment column in Longhupao Reservoir [J]. *China Water & Wastewater*, 32(21): 111–113.]
- 孙猛,包宇飞,王雨春,等. 2023. 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*, 43(7): 3634–3643. [Sun M, Bao Y F, Wang Y C, et al. 2023. Characteristics of phosphorus fractions distribution and release risk of sediment in the cascade reservoirs in the middle and lower reaches of Lancang River [J]. *China Environmental Science*, 43(7): 3634–3643.]
- 唐克旺,王浩,刘畅. 2003. 陕北红碱淖湖泊变化和生态需水初步研究 [J]. *自然资源学报*, 18(3): 304–309. [Tang K W, Wang H, Liu C. 2003. Preliminary study of Hongjiannao Lake's variation and ecological water demand [J]. *Journal of Natural Resources*, 18(3): 304–309.]
- 王书航,张博,姜霞,等. 2015. 采用连续分级提取法研究沉积物中磷的化学形态 [J]. *环境科学研究*, 28(9): 1382–1388. [Wang S H, Zhang B, Jiang X, et al. 2015. Analysis of phosphorus fractions in sediments by sequential extraction [J]. *Research of Environmental Sciences*, 28(9): 1382–1388.]
- 汪勇,羊向东,沈吉,等. 2004. 陕西红碱淖近百年来环境变化的湖泊沉积记录 [J]. *湖泊科学*, 16(2): 105–112. [Wang Y, Yang X D, Shen J, et al. 2004. A 0.1 ka-year record of environmental evolution in Hongjiannao Lake, Shaanxi Province [J]. *Journal of Lake Science*, 16(2): 105–112.]
- 许海,陈丹,陈洁,等. 2019. 氮磷形态与浓度对铜绿微囊藻和斜生栅藻生长的影响 [J]. *中国环境科学*, 39(6): 2560–2567. [Xu H, Chen D, Chen J, et al. 2019. Effects of nitrogen and phosphorus forms and concentrations on the growth of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* [J]. *China Environmental Science*, 39(6): 2560–2567.]
- 于学峰,刘晓清,王亚萍. 2016. 红碱淖湖泊表层沉积物重金属生态风险评价 [J]. *地球环境学报*, 7(2): 173–182. [Yu X F, Liu X Q, Wang Y P. 2016. Ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediment of Hongjiannao Lake, Shaanxi Province, China [J]. *Journal of Earth Environment*, 7(2): 173–182.]
- 臧维玲,王武,叶林,等. 1989. 盐度对淡水鱼类的毒性效应 [J]. *海洋与湖沼*, 20(5): 445–452. [Zang W L, Wang W, Ye L, et al. 1989. Toxic effects of salinity (S‰) on some freshwater fishes [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 20(5): 445–452.]
- 张志斌,徐国栋,张晓蕊,等. 2022. 南四湖消落带底泥磷形态分布特征、影响因素及释放风险 [J]. *湖泊科学*, 34(6): 1912–1922. [Zhang Z B, Xu G D, Zhang X R, et al. 2022. Distribution characteristics, influencing factors and releasing risk evaluation of phosphorus in the sediment of water-level-fluctuating zone in Lake Nansi [J]. *Journal of Lake Sciences*, 34(6): 1912–1922.]
- Boström B. 1984. Potential mobility of phosphorus in different types of lake sediment [J]. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 69(4): 457–474.
- Chang S C, Jackson M L. 1957. Fractionation of soil phosphorus [J]. *Soil Science*, 84(2): 133–144.
- Hupfer M, Gächter R, Giovanoli R. 1995. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis [J]. *Aquatic Sciences*, 57(4): 305–324.
- Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. 2002. Phosphorus fractionation in lake sediments—lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. *Chemosphere*, 46(8): 1147–1155.
- Yang P, Yang C H, Yin H B. 2020. Dynamics of phosphorus composition in suspended particulate matter from a turbid eutrophic shallow lake (Lake Chaohu, China): implications for phosphorus cycling and management [J]. *The Science of the Total Environment*, 741: 140203. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140203.
- Zhang Y, Zhang X J, Zhou C, et al. 2022. Organic and inorganic nitrogen forms as affected by phosphorus additions in a maize-mustard cropping system [J]. *Clean: Soil, Air, Water*, 50(7). DOI: 10.1002/clen.202100240.