

达里诺尔湖磷赋存特征及底泥释放影响因素

杨旭, 李畅游, 李文宝, 赵胜男, 郝世祺

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特, 010018)

摘要: [目的] 揭示封闭性内陆湖磷组成特点及底泥释放影响因素, 为控制达里湖磷元素污染提供理论支持。[方法] 对达里诺尔湖水体总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、溶解性无机磷(DIP), 沉积物形态磷进行监测, 并利用因子分析的方法对影响沉积物底泥释放的因素分类讨论。[结果] 达里湖上覆水总磷(TP)均值 2.00 ± 0.02 mg/L, 间隙水 TP 均值 2.50 ± 0.02 mg/L, 沉积物 TP 在 206.09~940.49 mg/kg 之间。沉积物中无机磷(IP)占 TP 的 47.9%, 是沉积物主要的磷形态之一。钙磷(Ca-P)是 IP 中含量最多的形态磷 (217.76 ± 47.01 mg/kg), 其次为铁铝结合态磷(Fe/Al-P, 62.73 ± 28.34 mg/kg)和交换态磷(Ex-P, 36.50 ± 19.13 mg/kg), 有机磷(OP, 200.28 ± 135.13 mg/kg)含量占 TP 的 41.8%; 通过因子分析法将影响底泥释放的因素分为三类: 沉积物 TP, Ca-P, Fe/Al-P 和生物有效性磷含量归为沉积物磷因子; 水体 pH, DO, Eh 值以及间隙水磷含量归为界面影响因子; 湖水水深归为湖泊自身特征因子。[结论] 达里湖存在沉积物磷底泥释放的风险, 根据因子分析的结果可知, 影响沉积物底泥释放的因素分为沉积物磷、水—沉积物界面理化指标和湖水水深 3 大类。

关键词: 水资源保护; 湖泊磷赋存特征; 因子分析法; 达里诺尔湖

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)04-0092-06

中图分类号: X524

文献参数: 杨旭, 李畅游, 李文宝, 等. 达里诺尔湖磷赋存特征及底泥释放影响因素[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4):92-97. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.015. Yang Xu, Li Changyou, Li Wenbao, et al. Characteristics of phosphorus occurrence and influence factors of sediment release in Dali-Nor Lake[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4):92-97.

Characteristics of Phosphorus Occurrence and Influence Factors of Sediment Release in Dali-Nor Lake

YANG Xu, LI Changyou, LI Wenbao, ZHAO Shengnan, HAO Shiqi

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] In order to reveal the characteristics of phosphorus composition in closed inland lake, and the influencing factors of endogenous release. [Methods] The phosphorus content in different medium of Dali-Nor Lake was determined. Using factor analysis to classify the factors affecting sediment release. [Results] The average value of total phosphorus (TP) in the water on Dali-Nor Lake was 2.00 ± 0.02 mg/L, and the mean value of interstitial water TP was 2.50 ± 0.02 mg/L. The sediment TP is between 206.09 to 940.49 mg/kg. Inorganic phosphorus (IP) in sediments accounts for 47.9% of TP, which is one of the main forms of phosphorus in sediments. Followed by iron-aluminum bound phosphorus (Fe/Al-P, 62.73 ± 28.34 mg/kg) and exchangeable phosphorus (Ex-P, 36.50 ± 19.13 mg/kg) By using the factor analysis method to analyze the influence of 13 sediments release indicators, there are 4 main factors, the 13 indexes are divided into 3 categories: TP, Ca-P, Fe/Al-P and bioavailability of phosphorus content in sediments classified as phosphorus in sediments and interstitial water factor; phosphorus concentrations of pH, DO, Eh of the

收稿日期: 2018-03-05

修回日期: 2018-03-31

资助项目: 国家自然科学基金项目“冻融过程中湖泊污染物多介质迁移转化规律及机制研究”(51339002), “达里诺尔湖沉积物中正构烷烃类型演变及其对水环境变化的响应”(51469025), “冻融过程中污染物在湖泊冰水双介质体系迁移作用及机理研究”(51669022); 内蒙古自治区自然科学基金项目“现代沉积过程中内蒙古寒旱区达里诺尔湖氮、磷等营养元素季节迁移特征”(2016MS0552); 中国博士后科学基金(2014M562495XB)

第一作者: 杨旭(1993—), 女(汉族), 内蒙古赤峰市人, 硕士研究生, 农业水资源利用与保护专业。E-mail: xuyang9991@126.com。

通讯作者: 李畅游(1955—), 男(汉族), 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境科学与工程方面的研究。E-mail: nndlichangyou@163.com。

water as the interface influence factor; The third is water depth to lakes characteristic factor. [Conclusion] There is a risk of release of sediment phosphorus sediment in Dali-Nor Lake. According to the results of factor analysis, the factors affecting sediment release are divided into three categories: sediment phosphorus, water-sediment interface physical and chemical indicators and lake water depth.

Keywords: water resources protection; lake phosphorus occurrence characteristics; factor analysis; Dali-Nor Lake

2016 年中国环境状况公告显示^[1], 磷元素是中国湖泊主要污染指标之一。其积累会导致湖水出现富营养化现象, 并使水体环境、水质等逐渐恶化, 对生态系统和人类生活环境造成威胁^[2]。湖泊中磷元素的来源分为外源输入和底泥释放两种^[3]。随着近些年对湖泊治理力度逐渐加大, 外源营养盐输入得到一定控制后, 沉积物的底泥释放便成为缓解湖泊营养盐累积的重点^[4-5]。现阶段对磷元素释放问题也展开了系统的研究^[6], 针对不同形态磷对释放过程的贡献^[7]、间隙水在释放过程中起到的重要作用以及影响底泥释放的主要环境因素^[8-9]等都有一定的研究基础^[10-11]。本文结合了国内外学者的研究重点, 以达里诺尔湖为研究对象, 对湖泊不同介质(水、间隙水、沉积物)中磷的赋存特征展开研究。综合考虑了间隙水磷含量和沉积物形态磷对其底泥释放的影响, 揭示了封闭性内陆湖沉积物形态磷组成特点。以期为控制湖泊磷污染提供重要的理论依据和数据支持。

达里诺尔湖(以下简称“达里湖”)是典型的寒旱区封闭性内陆湖泊, 具有调节区域气候、提供丰富渔业和旅游资源等多种功能, 更是区域水循环中各个要素相互影响的重要节点^[12]。近年来因湖区气候干旱, 蒸发量大于降雨量, 湖面面积从 1999 年的 213.54 km² 到 2010 年的 188.48 km², 减少了 25.06 km²^[13], 湖泊的萎缩使得湖水营养盐浓度逐渐浓缩, 水质逐年恶化。针对这一问题, 本研究通过采集达里湖上覆水、间隙水、表层沉积物样品。在分析不同介质中总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、溶解性无机磷(DIP)含量的基础上, 利用因子分析方法, 对影响达里湖磷底泥释放的因素展开讨论。这将为控制达里湖磷元素污染提供重要的理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

达里湖(43°12′—43°24′ N, 116°24′—116°56′ E, 图 1)位于赤峰市克什克腾旗西部, 湖面面积 188.48 km², 湖面海拔 1 226 m, 湖盆西深东浅, 最大深度 13 m, 平均深度 6.44 m。区域年降雨量 350~400 mm, 年蒸发量 1 300 mm, 年平均气温 -2~2 °C, 冰封期

180 d, 冰层厚度在 1 m 左右。无霜期 60~80 d, 年日照时数 2 700~2 900 h, 日照百分率为 62%~65%。湖水来源以降雨、径流、地下水补给为主, 4 条补给河流分别为贡格尔河、沙里河、亮子河和浩来河, 河流补给量约 $5.60 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

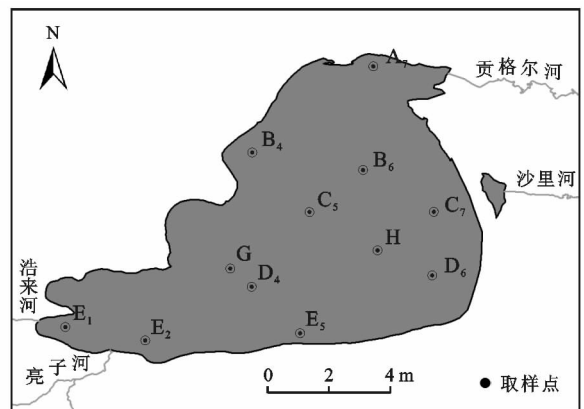


图 1 达里湖取样点分布

1.2 样品采集与处理

根据《湖泊生态系统观测方法》设置 12 个采样点(图 1), 采样时间: 2017 年 8 月。采样方法: 利用有机玻璃取水器采集湖面表层水, 共得到 12 个表层水样。由于 B₆, C₅, C₇, D₄, E₂, E₅ 样点水深大于湖泊平均水深(6.4 m), 且分布于湖区中心及主要河流进水口处。便对这 6 个样点分层采集水样(分层水深: 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 m), 用以分析磷元素在水体的垂向分布情况; 利用彼得森取泥器采集表层 5 cm 的沉积物样品, 将样品带回实验室经离心处理(4 000 r/min, 15 min, 4 °C), 得到上清液, 用 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜过滤上清液后获得沉积物间隙水样品, 离心后的表层沉积物样品装入塑封袋放入恒温箱内(4 °C), 带回实验室冷冻干燥、研磨、过筛备用。

1.3 测试及分析方法

湖水理化指标采用梅特勒—托利多公司生产的多参数水质监测仪进行现场测定, 包括: pH 值、溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh); 上覆水及间隙水 TP, DIP 和 DTP 采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色分光光度法测定^[14]; 表层沉积物形态磷采用 SMT 法提取^[15]。

为保证实验测试的精度,以上实验每组取 3 个平行样本进行重复测定,所得实验结果相对偏差小于 5%,用 SPSS 19.0 对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同介质中磷元素分布特征

根据本次实验结果得到,达里湖湖水 pH 均值 9.48 ± 0.98 ,湖水呈碱性。Eh 均值 -126 ± 2.45 mv,属于弱还原状态。DO 均值 6.95 ± 0.85 mg/L,氧供应并不充分。研究湖泊磷元素在不同介质中的赋存特征,对全面了解湖泊水质环境有很大贡献^[14]。

2.1.1 湖泊水体磷元素赋存状态 达里湖上覆水 TN 含量均值 2.00 ± 0.02 mg/L, C₅ 样点含量最高,达到 2.67 mg/L, A₇ 样点含量最低,只有 1.73 mg/L,水平分布整体呈现出从湖中心到岸边含量逐渐递减的分布趋势。上覆水 DTP, DIP 含量均值分别为 1.72 ± 0.01 mg/L, 1.68 ± 0.01 mg/L。这两种磷在空间分布上较均匀,各样点含量无明显差异。与其他学者研究结果对比发现,同在蒙新高原湖区的乌梁素海 TP 含量为 0.1 mg/L、岱海 TP 含量为 0.30 mg/L、呼伦湖 TP 含量为 0.30 mg/L^[16]。相比之下,达里湖是它们的 6~20 倍!这是由于达里湖水质属于氯化物重碳酸钙镁型水,与其他 3 个湖泊相比湖水碱性程度最高。在这种碱性条件下,湖水中的 OH⁻ 可以将底泥 Fe/Al-P, Ca-P 中含有的磷酸根离子释放出来,减弱 Fe, Al 对磷的固定,增强磷酸盐的解吸过程,同时也会增大湖泊底部 TP 向上覆水释放的速率^[17],导致湖水磷含量增加;另外,达里湖湖水 DTP

占 TP 含量的 88%,磷主要以溶解态存在于湖水中,不易向湖底沉积;还有一个不可忽视的原因是,随着近年来达里湖附近人类活动加剧,大量未被利用的养分通过降雨径流、雨水冲刷汇入达里湖中,增加了湖水磷含量。

由 TP, DTP, DIP 含量随水深变化(图略)可知, TP, DTP, DIP 含量均在 1.5~3 m 处出现了小范围的波动,其他深度层磷含量分布均匀。这是由于达里湖湖水水温在 1.5 m 处存在类似温跃层的温度突变^[17],温度变化会影响湖水浮游植物的生长,磷元素作为浮游植物重要的的营养来源,其含量同样会随之变化。

2.1.2 湖泊间隙水磷元素赋存状态 达里湖间隙水 TP 含量均值 2.50 ± 0.02 mg/L,高于湖水 TP 含量。DTP, DIP 含量均值分别为 1.76 ± 0.02 mg/L, 1.72 ± 0.01 mg/L。除 D₄, E₅ 样点外,其余各样点间隙水 DTP, DIP 都高于上覆水。因 D₄, E₅ 两处湖水较深,湖岸多分布火山岩,且邻近浑善达克沙地,导致水体中悬浮颗粒物较多,悬浮颗粒逐渐沉积到底泥中,在生物扰动下携带底层磷元素再次释放,导致间隙水中 DIP 和 DTP 含量偏低^[18]。

2.1.3 湖泊沉积物总磷赋存状态 达里湖沉积物 TP 含量范围 206.39~940.49 mg/kg,均值 454.30 ± 207.13 mg/kg。由湖中心到岸边 TP 含量呈现逐渐递减的分布趋势,这与达里湖湖盆形状和湖水流向有关。根据 Koiv 等^[11]研究结果显示:大型湖泊(水域面积 > 25 km²)水力停留时间长,水深较大区域易于磷元素聚集沉积。达里湖面积约 190 km²,且湖泊中心水深最大超过 9 m(图 2)。



图 2 达里湖湖盆、湖水流向及表层沉积物 TP 分布

湖心区沉积物受风浪及外源输入的水动力影响小,有利于磷元素的累积;从湖流特征的角度来看,在夏季风向及入湖河流水动力推动等作用下,达里湖水体呈现出自岸边向湖心流动的特征(图 2)^[19]。湖流携带颗粒物及营养元素在湖盆中心逐渐堆积,也是造

成湖中心沉积物 TP 含量高的主要原因之一;随着近几年达里湖旅游经济的发展,北部和南部湖区已被开发成旅游区,旅游旺季时两岸人流量增多,湖水及沉积物受到人类活动影响的程度较大。东南湖区临近达里湖周围最大的居民生活区(达日罕乌拉苏木)。

近岸湖区因受到外界环境的影响导致沉积环境相对活跃, 营养盐不易累积, 所以沉积物磷含量相对湖中心较低。

2.2 表层沉积物形态磷分布特征

沉积物磷包括无机磷和有机磷两大部分。无机磷以核酸、植素和磷脂为主。无机磷又可分为与 Ca, Fe, Al 等结合的磷酸盐。不同形态磷在释放特性、生物有效性及对湖泊富营养化的影响等方面都存在较大差异^[20]。本文以 SMT 法提取出的 5 种形态磷为研究对象, 对达里湖沉积物形态磷赋存特征展开讨论, 达里湖表层沉积物形态磷水平分布情况如图 3 所示。表层沉积物 IP 均值 217.76 ± 95.70 mg/kg, 占沉积物 TP 含量的 47.9%, 是沉积物的主要磷形态之一。含量范围在 129.46~432.18 mg/kg 之间, 水平分布呈现湖中心含量高, 湖岸区含量低的特点, 同 TP 的分布特征相似。

IP 中形态磷含量由高到底依次为 Ca-P, Fe/Al-P 和 Ex-P。其中 Ca-P 均值 217.76 ± 47.01 mg/kg, 占 IP 含量的 41.0%。在湖中心的 C₅ 样点含量最高, 南岸亮子河入湖口的 E₂ 样点含量最低, 含量范围在 44.07~221.15 mg/kg。Ca-P 属于沉积物中的惰性磷组分, 是一种难溶于水的化合物。其组成主要包括自生成因或生物成因的自生磷灰石, 以及与自生碳酸

钙共沉淀或外源输入的各种难溶性磷酸钙矿物。这些矿物在沉积物中稳定性很高, 较难与活性磷成分进行形态转化, 不易在沉积剖面中进行上下层间的迁移。达里湖东北方向有古生代变质碎屑岩及灰岩出露, 并有中生代火山角砾岩覆盖^[12], 这些碎屑随径流入湖中, 在沉积物中形成积累, 是达里湖沉积物 Ca-P 的主要来源。另外, 作为典型的寒旱区内陆封闭性湖泊, 达里湖湖水碳酸钙饱和度及 pH 值较高, 在这种微碱性的环境条件下更利于 Ca-P 累积(图 4)。

其次 Fe/Al-P 均值 62.73 ± 28.34 mg/kg, 占 IP 含量 28.8%。在临近达里湖周围最大居民生活区(达日罕乌拉苏木)的东南湖区及南北岸旅游湖区含量相对较高, 含量范围在 32.02~111.58 mg/kg 之间。这种湖岸边高于湖中心的分布趋势与 TP, IP, Ca-P 的分布情况正相反, 这与 Fe/Al-P 自身性质较活跃且易受人为因素影响有密切的关系(图 3)^[21]。Fe/Al-P 是通过物理和化学作用吸附在 Fe, Al 氧化物和氢氧化物胶体表面上的磷, 深受沉积物粒度、pH, Eh 等环境因子的影响。大多数研究认为, 其迁移转化过程是沉积物向上覆水体释放磷的主要机制之一, 被认为是沉积物中主要的活性磷组分^[22]。因其自身性质活跃, 所以在受人为活动影响较大的近岸处含量较高。

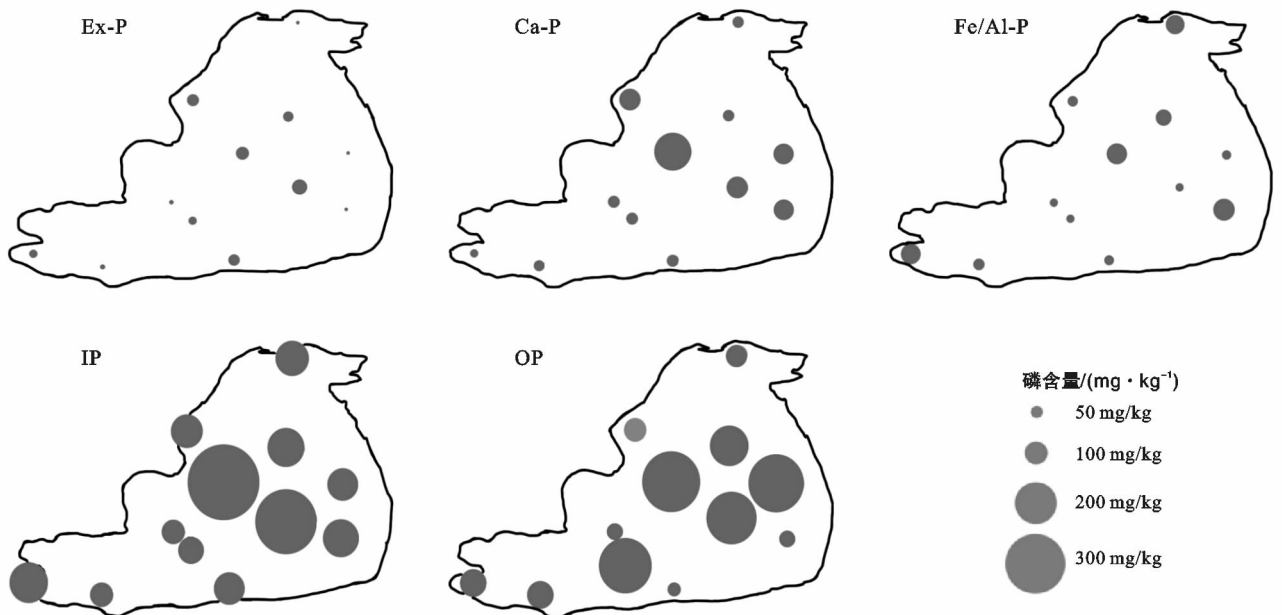


图3 达里湖表层沉积物形态磷分布

IP 中含量最低的形态磷是 Ex-P, 均值 36.50 ± 19.13 mg/kg, 占沉积物 IP 平均含量的 16.8%。H 样点和 B₄ 样点含量较高。含量范围在 12.26~68.84 mg/kg 之间。Ex-P 主要来源于水生、沉降颗

粒的吸附以及生物碎屑的再生^[23], 是一种含量不高但易被生物利用的无机磷^[6]。由于其自身性质较活跃, 温度、pH 值、水动力及生物扰动等作用都会导致其向上覆水体扩散。

达里湖 OP 含量均值 200.28 ± 135.13 mg/kg, 占沉积物 TP 含量 41.8%。水平分布上呈现出湖中心含量高, 岸边含量低的分布特征, 含量范围在 $69.35 \sim 352.18$ mg/kg 之间。OP 包括由陆源性排放物质组成的难降解性有机磷部分, 以及死亡水生生物尸体组成的可降解性有机磷部分。作为湖泊沉积物中重要的磷组分, OP 是不容忽视的潜在生物有效磷源。其在沉积物中的含量是由多种因素控制的, 如输入量、沉积特性、早期成岩作用及生物作用等, 且部分可被生物所利用^[24]。

对于达里湖沉积物各形态磷进行相关性分析表明, TP 含量与无机磷中的 Ca-P 相关性最高 ($R = 0.813$), 其次为 Ex-P ($R = 0.775$), 与有机磷相关系数仅为 0.488。这说明达里湖沉积物磷含量主要受无机磷的影响, 因 Ca-P 含量较高、Ex-P 较活跃, 使得这两种形态磷对 TP 含量影响最显著。不同形态的磷元素, 其迁移转化过程往往受到不同因素的影响。沉积物中的 Ex-P, Fe/Al-P 易释放且易被藻类及其他生物利用, 被称为生物有效性磷^[25]。生物有效性磷对磷元素底泥释放过程贡献显著。达里湖表层沉积物生物有效性磷 (Ex-P 与 Fe/Al-P 之和) 占 TP 含量 16.2%。相关研究显示, 以大型水生植物过量生长的草型富营养化湖泊乌梁素海沉积物生物有效性磷占总提取磷的 5%^[26]; 南四湖微山湖区沉积物生物有效性磷含量占 TP 的 2.84%^[27]; 长江中下游众多有富营养化趋势的湖泊沉积物 Ex-P, Al-P, Fe-P 含量也都不足 TP 的 10%^[28]。达里湖较高的生物有效性磷含量使得沉积物磷较活跃, 也是其湖水磷含量富集的主要原因。

2.3 磷元素底泥释放因子分析

达里湖作为典型的封闭性内陆湖, 要从根本上缓解其富营养化进程加剧的问题, 需要在减少外源污染的同时, 控制内源污染的量。本文根据达里湖水文条件及磷在上覆水、间隙水、沉积物中的赋存特征。选取水深、上覆水 pH 值、上覆水 Eh 值、上覆水 DO 值、间隙水 TP、间隙水 DIP、沉积物 TP、沉积物 Ex-P、沉积物 Fe/Al-P、沉积物 Ca-P、沉积物 IP、沉积物 OP、沉积物生物有效性磷等 13 个指标^[5], 利用因子分析方法, 寻找不同指标之间的共性因子。对底泥释放影响因素进行分类讨论。根据因子解释原始变量方差的情况, 以初始解为依据, 提取 4 个特征值大于 1 因子, 共解释 13 个原始标量总方差的 84.3%。本文针对这 4 个因子对达里湖磷底泥释放影响因素进行分类探讨。

由表 1 可以看出: ①方差解释率为 38.6% 的第 1 因子与湖泊表层沉积物 TP, IP, OP, Ca-P, Ex-P 及

生物有效磷含量的相关性最高, 且为正相关; ②方差解释率为 18.9% 的第 2 因子与间隙水 DIP、上覆水 pH 值、上覆水 DO 和上覆水 Eh 的相关性最高, 且为正相关; ③方差解释率为 14.4% 的第 3 因子与表层沉积物 Fe/Al-P 相关性最高, 且为呈正相关; ④方差解释率为 12.3% 的第 4 因子与湖泊水深相关性较高, 两者呈现负相关。根据因子分析的结果可知, 第 1, 第 3 因子将沉积物 TP 和形态磷划分为一类影响底泥释放的因素。作为湖泊磷元素重要累积库, 沉积物中不同形态磷元素决定了其迁移能力和生态效应。活跃的形态磷通过扰动、物质扩散、吸附—脱附过程向上释放^[27], 导致湖水磷元素含量增加。达里湖沉积物 TP 和活跃的生物有效性磷均在湖中心累积量最高, 从而推断湖中心因磷元素累积而促发的底泥释放现象可能最为明显。第 2 因子将间隙水磷含量和湖水理化指标划分为一类影响因素。湖泊在未受扰动的情况下, 沉积物中磷元素主要通过水—沉积物界面磷的浓度梯度向上覆水迁移。因物质浓度梯度引起的扩散, 是沉积物—水界面营养盐释放主要方式之一^[28], 因此间隙水磷含量对此释放过程起着决定性作用。达里湖间隙水磷含量是原位上覆水磷含量的 1.2~1.9 倍, 浓度梯度的存在证实了达里湖存在磷元素底泥释放的风险; 湖水理化指标通过控制沉积物—水界面的物化状态对释放过程造成影响^[21]。达里湖 DO 含量 $6.5 \sim 7.1$ mg/L, Eh 均值 -126 ± 2.45 mv, 属于弱还原状态, 湖水的还原环境有利于磷元素的溶解与释放^[26]。第 4 因子将湖水水深单独划分为一类影响底泥释放的因素。湖泊受风浪扰动而造成底泥的再悬浮现象, 是沉积物营养盐释放的另一种方式^[28]。一般来说, 风浪作用对沉积物的扰动随水深增大而逐渐削弱, 湖水较浅处, 沉积物受风浪及其他外界扰动作用明显。达里湖西深东浅, 湖中心水深超过 9 m, 该处沉积物磷释放作用理论上比北部水深浅的地方弱。但从实验结果来看, 达里湖上覆水 TP 含量最高的样点却分布在湖中心。这说明湖中心深水环境虽然会对底泥释放起到一定的抑制作用, 但由于湖中心沉积物磷含量丰富, 释放作用比深水环境的抑制作用明显, 导致湖中心上覆水 TP 含量相对较高。总体来看, 达里湖沉积物磷元素底泥释放过程受到多个指标的影响, 通过因子分析的方法将这些指标分为 3 个主要的类别, 它们分别是沉积物磷含量影响因素、间隙水磷含量及湖水理化指标影响因素、湖水水深影响因素。不同因素对底泥释放的影响机制不同, 在以后的研究中应增加对不同类别影响因素的系统研究, 为有效控制磷元素底泥释放提供理论基础。

表 1 沉积物底泥释放的因子分析(旋转后的因子荷载矩阵)

分析指标	成分			
	1	2	3	4
水深	-0.126	-0.136	0.270	-0.638*
上覆水 pH	0.169	0.630*	0.099	0.461
上覆水 Eh	0.255	0.610*	-0.438	0.026
上覆水 DO	-0.053	0.627*	-0.154	-0.191
间隙水 TP	0.046	0.431	-0.041	-0.165
间隙水 DIP	0.253	0.828*	-0.118	0.156
沉积物 TP	0.961*	0.223	-0.065	0.003
沉积物 IP	0.913*	-0.350	0.059	0.093
沉积物 OP	0.838*	0.356	-0.273	-0.041
沉积物 Fe/Al-P	0.199	-0.209	0.829*	0.009
沉积物 Ca-P	0.865*	-0.068	0.273	0.248
沉积物 Ex-P	0.775*	0.207	-0.422	-0.032
沉积物生物有效性磷	0.887*	-0.075	0.410	0.164

注:带*数据为因子荷载大的变量。

3 结论

(1) 达里湖上覆水 TP 含量均值 2.00 ± 0.02 mg/L, 水平上呈现出从湖中心向岸边含量逐渐减少的分布趋势; DTP, DIP 含量均值分别为 1.72 ± 0.01 mg/L, 1.68 ± 0.01 mg/L, 空间分布均匀。垂向上, TP, DIP 和 DTP 由于受湖水温度变化的影响, 均在 $1.5 \sim 3$ m 处出现波动; 间隙水 TP, DTP, DIP 含量均值分别为 2.50 ± 0.02 mg/L, 1.76 ± 0.02 mg/L, 1.72 ± 0.01 mg/L, 各样点间隙水 TP 均高于原位上覆水; 沉积物 TP 均值 454.30 ± 207.13 mg/kg, 在湖区中心处含量最高。

(2) 沉积物 IP 含量占 TP 的 47.9%, 是沉积物主要的磷形态。Ca-P 是 IP 中含量最多的形态磷, 其次为铁铝结合态磷(Fe/Al-P)和交换态磷(Ex-P)。有机磷(OP)含量占 TP 的 41.8%。活跃的生物有效性磷占 TP 含量 16.2%, 这说明达里湖沉积物磷状态较活跃, 易向上覆水释放。

(3) 共得到 4 个荷载值较大的因子, 按性质将影响底泥释放的 13 个指标分为 3 类: 沉积物 TP, Ca-P, Fe/Al-P 和生物有效性磷含量归为沉积物磷因子; 水体 pH, DO, Eh 值以及间隙水磷含量归为界面影响因子; 湖水水深归为湖泊自身特征因子。不同因素对底泥释放的影响机制不同, 在以后的研究中应增加对不同类别影响因素的系统研究, 为有效控制磷元素底泥释放提供理论基础。

[参 考 文 献]

[1] 国家环境保护总局. 2016 年中国环境状况公报[J]. 环境保护, 2016(7):17-25.

- [2] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, et al. Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: Spatio-temporal variation in phosphorus pools and release[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 584(1):37-48.
- [3] Komatsu E, Fukushima T, Shiraiishi H. Modeling of P-dynamics and algal growth in a stratified reservoir-mechanisms of P-cycle in water and interaction between overlying water and sediment[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 197(3):331-349.
- [4] 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):224-228.
- [5] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, et al. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface[J]. *Hydrobiologia*, 1988, 170(1):229-244.
- [6] Grandel S, Rickert D, Schlüter M, et al. Pore-water distribution and quantification of diffusive benthic fluxes of silicic acid, nitrate and phosphate in surface sediments of the deep Arabian Sea[J]. *Deep Sea Research (Part II): Topical Studies in Oceanography*, 2000, 47(14):2707-2734.
- [7] Sondergaard M, Phillips G, Hellsten S, et al. Maximum growing depth of submerged macrophytes in European lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2013, 704(1):165-177.
- [8] 史静, 俎晓静, 张乃明, 等. 滇池草海沉积物磷形态、空间分布特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(10):1808-1813.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 向速林, 陶术平, 吴代赦. 鄱阳湖沉积物和水界面磷的交换通量[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(2):326-333.
- [12] 李文宝, 李畅游, 刘晓旭, 等. 达里诺尔湖水体稳定氢、氧同位素组成变化对结冰过程的响应[J]. *中国地质大学学报: 地球科学*, 2015, 40(12):2081-2090.
- [13] 赵胜男, 史小红, 崔英, 等. 内蒙古达里诺尔湖湖泊水体与入湖河水水化学特征及控制因素[J]. *环境化学*, 2016, 35(9):1865-1875.
- [14] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [15] Ruban V. 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.

5 结论

(1) 忠县向斜局部构造可以划分为 3 个区段, 分别为北部忠县向斜与万县向斜复合区段、中部忠县向斜主体区段和南部忠县向斜与 SN 向构造复合区段。

(2) 忠县向斜影响区内滑坡主要分布于南部和北部区段, 主体区段滑坡规模较小, 即清溪场—丰都段库岸(I)和石宝寨—新田镇段(III)库岸滑坡规模大, 丰都—石宝寨段(II)库岸崩滑体规模小, 整体呈“两头大, 中间小”、“两头密, 中间疏”的规律。

(3) 研究区所划分的每个区段内滑坡空间演化特征均具有各自的特点, 与忠县向斜影响区整体趋势和局部构造特征改变一致, 相互对应。

[参 考 文 献]

[1] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡库区的新构造应力场及其对库岸滑坡滑动优势方向的影响[J]. 地理研究, 1997, 16(4): 15-21.

[2] 代贞伟, 魏云杰, 侯时平. 三峡库区杨家水井滑坡变形失稳机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 527-534.

[3] 邓清禄, 王学平. 长江三峡库区滑坡与构造活动的关系[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 136-141.

[4] 王孔伟, 张帆, 林东成, 等. 三峡地区新构造活动与滑坡分布关系[J]. 世界地质, 2007, 26(10): 26-32.

[5] 王孔伟, 赵小明, 张帆. 三峡库区谢家包背斜与滑坡分布

关系[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 255-267.

[6] 黄润秋, 张伟锋, 裴向军. 大光包滑坡工程地质研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 557-585.

[7] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544.

[8] 梁学战, 唐红梅. 三峡库区及邻近地区滑坡发育宏观地质背景分析[J]. 重庆交通大学学报. 2009, 28(1): 100-104.

[9] 卢书强, 易庆林, 易武, 等. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1123-1130.

[10] 王思敬. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 115-117.

[11] 王焱, 李述靖, 王学佑. 长江三峡库区崩滑地质灾害的形成与分布规律研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(2): 24-29.

[12] 肖尚德, 李智民, 刘云彪, 等. 湖北省清江流域滑坡分布规律与减灾对策研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 514-521.

[13] 肖诗荣, 刘德富, 胡志宇, 等. 世界三大典型水库型顺层岩质滑坡工程地质比较研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 52-59.

[14] 张帆, 王孔伟, 罗先启, 等. 长江三峡库区构造特征与滑坡分部关系[J]. 地质学报, 2007, 81(1): 38-45.

[15] 王孔伟, 常德龙, 李春波, 等. 再论“滑坡群”: 以三峡库区为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2017, 47(5): 1-12.

(上接第 97 页)

[16] Yu Qing, Wang Hongzhu, Li Yan, et al. Effects of high nitrogen concentrations on the growth of submerged macrophytes at moderate phosphorus concentrations[J]. Water Research, 2015, 83: 385-395.

[17] 郭霞. 内蒙古高原典型湖泊磷的地球化学特征[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.

[18] 郑西来, 张俊杰, 陈蕾. 再悬浮条件 C 内源磷迁移—转化机制研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 287-295.

[19] 刘志娇. 达里诺尔湖水动力条件试验及氢氧稳定同位素研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.

[20] 王志齐, 李宝, 梁仁君, 等. 南四湖沉积物磷形态及其与间隙水磷的相关性分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 139-146.

[21] 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.

[22] 何江, 孙英, 吕昌伟, 等. 岱海表层沉积物中内源磷的释

放[J]. 生态学报, 2010, 20(2): 389-398.

[23] Chuai Xiaoming, Ding Wei, Chen Xiaofeng, et al. Phosphorus release from cyanobacterial blooms in Meiliang Bay of Lake Taihu, China[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(6): 842-849.

[24] 高春梅, 朱珠, 王功芹, 等. 海州湾海洋牧场海域表层沉积物磷形态与环境意义[J]. 中国环境科学, 2015, 235(11): 3437-3444.

[25] Liu Sumei, Zhang Jing, Li Daoji. Phosphorus cycling in sediments of the Bohaiand Yellow seas[J]. Estuarine, Coast and Shelf Science, 2004, 59(2): 209-218.

[26] 张路, 范成新, 朱广伟, 等. 长江中下游湖泊沉积物生物可利用磷分布特征[J]. 湖泊科学, 2006, 18(1): 36-42.

[27] 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 349-352.

[28] 张志斌, 张学杨, 张波, 等. 南四湖微山湖区沉积物磷形态分布特征[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1345-1350.