

东平湖表层沉积物中磷的吸附容量及潜在释放风险分析

邢友华, 董洁, 李晓晨, 姜瑞雪

(山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要:利用沉积物磷吸附指数(*PSI*)和磷吸附饱和度(*DPS*)研究了东平湖表层沉积物的磷吸附容量,并讨论了沉积物中磷的潜在释放风险。结果表明,表层沉积物的磷吸附指数变化范围为 30.3~45.2[mg P·(100g)⁻¹]·(μmol·L⁻¹)⁻¹,表现出从湖心、湖东向湖北、湖南逐渐增大的扇形特征;而磷吸附饱和度变化范围为 6.5%~24.1%,与磷吸附指数变化趋势恰好相反。磷吸附指数与沉积物中草酸铵提取的铁(*Fe_{ox}*)含量呈极显著正相关,与草酸铵提取的铁铝总量呈显著正相关,磷吸附饱和度与沉积物中草酸铵提取的磷(*P_{ox}*)含量呈显著正相关。此外,磷释放风险指数(*ERI*)变化范围为 14.9%~67.5%,表明东平湖表层沉积物中磷释放诱发富营养化的风险处于高度风险范围。

关键词:东平湖;磷吸附指数;磷吸附饱和度;磷释放风险指数

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)04-0746-06

Phosphorus Sorption Capacity of the Surficial Sediment in the Dongping Lake and Risk Assessment of Potential Phosphorus Release

XING You-hua, DONG Jie, LI Xiao-chen, JIANG Rui-xue

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Phosphorus sorption capacity of the surface sediments are estimated by the phosphorus sorption index (*PSI*) and the degree of phosphorus saturation (*DPS*) of the sediments in the Dongping Lake, China. And the risk of potential phosphorus release was also investigated. The results showed that the phosphorus sorption index ranged from 30.3 to 45.2 (mg P·(100g)⁻¹)·(μmol·L⁻¹)⁻¹, increasing gradually from the mid-lake and the east to the north and the south of the lake. However, the variation tendency of the degree of phosphorus saturation (*DPS*) was exactly opposite, ranging from 6.9% to 24.7%. The phosphorus sorption index was very significantly and positively correlated to iron (*Fe_{ox}*) and summation of iron and aluminum extracted from sediment by ammonium oxalate. The degree of phosphorus saturation was significantly and positively correlated to phosphorus (*P_{ox}*) extracted from sediment by ammonium oxalate. And iron extracted from sediment by ammonium oxalate might be played a major role in adsorbing phosphorus. Additionally, the results showed that the phosphorus release risk index (*ERI*) ranged from 15.9% to 69.3%. The results of the phosphorus release risk index indicated that the Dongping Lake might be in high potential eutrophication risk due to the release of phosphorus from the surficial sediments.

Keywords: Dongping Lake; the phosphorus sorption index; the degree of phosphorus saturation; the phosphorus release risk index

东平湖是山东省第二大淡水湖泊,也是我国东部地区典型的浅水型湖泊,总面积达 627 km²,由老湖(一级湖)和新湖(二级湖)两部分组成,新湖面积 418

km²,老湖区常年积水,面积约 209 km²,湖盆平坦,平均水深为 2 m。目前东平湖水体的营养程度总体上属于中富营养化^[1],近年来,从大汶河以及东平湖周边乡镇向其不断排入污废水^[2],使东平湖富营养化程度有加强的趋势^[3]。外部输入湖泊中的磷以可溶性和不溶性的混合物进入水体,被动植物吸收利用或通过吸附、沉积作用转移到沉积物中,沉积物成为湖泊中重要的磷蓄积库,当沉积物-水界面的条件发生变化

收稿日期:2009-09-08

基金项目:国家“973”计划(2008CB418203-3);中国博士后科学基金(20080431214)

作者简介:邢友华(1985—),男,山东莱芜人,在读硕士,主要从事湖泊富营养化方面的研究。E-mail:okxingyuhua@163.com

通讯作者:董洁 E-mail:shandongdj@yahoo.com.cn

时,沉积物中的磷又可作为内源污染释放到上覆水体中^[4-6]。Bache 和 Williams 提出了磷吸附指数(*PSI*)和磷吸附饱和度(*DPS*)来表征土壤磷吸附容量^[7-8];黄清辉等^[9]则以这两个指标为基础的磷释放风险指数(*ERI*)评估了太湖表层沉积物磷的富营养化风险,较好地反映了太湖的富营养化状况。东平湖作为南水北调东线工程的最后一级调储湖,其水质的好坏直接关系到调水水质的安全问题。目前有关东平湖的营养盐的研究主要集中于富营养化状况^[1,3]以及沉积物中重金属组分关系^[10-11]等方面,对于表层沉积物中磷的吸附、释放等仍缺乏研究。因此,本文采用磷吸附指数和磷吸附饱和度探讨了该湖表层沉积物中磷的吸附容量及潜在释放能力,并用磷释放风险指数预测了该湖表层沉积物磷释放诱发富营养化的风险。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

2008 年 11 月在东平湖老湖区实施现场观测和采样,8 个取样点地理位置如表 1、图 1 所示。在每个

表 1 取样点地理位置

Table 1 Geographic position of sampling sites

编号	地点	编号	地点
1#	湖东	5#	湖西南
2#	湖心	6#	湖北
3#	湖东南	7#	腊山码头与湖心岛间中点处
4#	湖南	8#	腊山码头附近

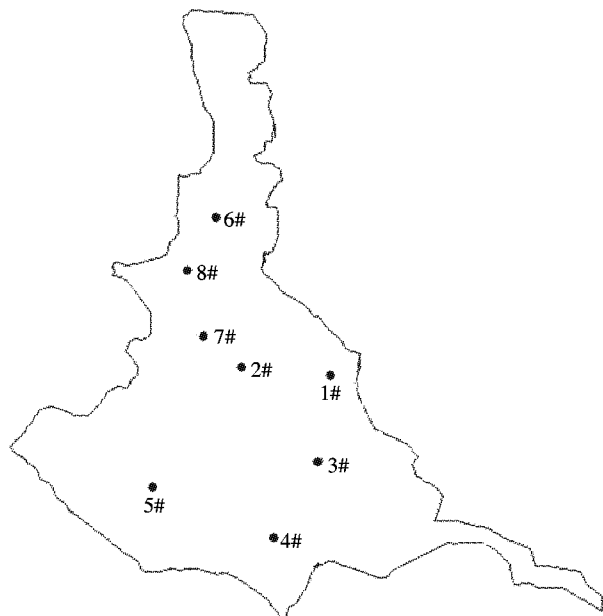


图 1 采样点地理位置示意图

Figure 1 Sketch map of sampling sites

采样位置用彼得森采样器采集 10 cm 的表层沉积物,每个位置均取 3 个平行样品,并混合均匀。样品采集后当天冷藏保存带回实验室,待沉积物冷冻干燥后,去除样品中贝壳、杂草、沙粒等杂物经研磨、过筛(100 目)后,保存于密封袋中,置于冰箱内待用。

1.2 试验方法

1.2.1 磷吸附指数的测定^[9]

每个沉积物样品分别称取 5 份 1.000 g 干样(过 100 目)于 50 mL 聚乙烯离心管中,其中 2 个离心管中加入 20 mL 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液,作为两个空白平行,其余 3 个离心管中分别加入 20 mL 75 mg·L⁻¹ KH₂PO₄ 溶液(配制在 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 中),作为 3 个试验平行。分别加入 2 滴氯仿以抑制微生物活动,20 ℃ 下往复振荡 24 h,然后以 3 000 r·min⁻¹ 离心 20 min,再用 0.45 μm 孔径滤膜过滤。滤液中磷的浓度以钼锑抗比色法测定,由反应磷初始浓度与反应后滤液中磷的浓度的差值可计算出 1.000 g 沉积物吸附磷的量,以 100 g 沉积物吸附磷的量记为 *X*,磷吸附指数 $PSI=X/lgC$,这里 *C* 为滤液中溶解磷浓度,μmol·L⁻¹; *X* 单位为 mg P·(100g)⁻¹,*PSI* 以 [mg P·(100g)⁻¹]·(μmol·L⁻¹)⁻¹ 为单位。

1.2.2 磷吸附饱和度的测定^[9]

每个沉积物样品分别称取 3 份 2.500 g 干样(过 100 目)于 100 mL 聚乙烯瓶中,作为 3 个试验平行。分别加入 50 mL 草酸铵提取剂(pH=3)并盖好瓶盖,在暗室内以 180 r·min⁻¹ 振荡 2 h(20 ℃)。振荡结束后,4 000 r·min⁻¹ 离心 5 min,用 0.45 μm 孔径滤膜过滤提取液,用 100 mL 的聚乙烯瓶收集。移取 10 mL 滤液于 50 mL 离心管中,加入 40 mL 0.01 mol·L⁻¹ 盐酸溶液,混合均匀。然后转移到聚乙烯瓶中,滴加高氯酸、盐酸和双氧水高温烘干。烘干后,用 2% 硝酸润洗聚乙烯瓶,定容至 25 mL。分别采用钼锑抗比色法测定滤液中磷的浓度,邻苯二酚紫外分光光度法测铝的含量,菲罗啉分光光度法测铁的含量。沉积物的 *DPS* 可估算为草酸铵提取的磷量(*P*_{ox}, mmol·kg⁻¹)与提取的铝(*Al*_{ox}, mmol·kg⁻¹)和铁(*Fe*_{ox}, mmol·kg⁻¹)总量一半的摩尔百分比值,即 $DPS(\%)=100P_{ox} \cdot [0.5(Al_{ox} + Fe_{ox})]^{-1}$ 。

1.2.3 沉积物其他指标的测定

pH 值采用 pH 计法^[12](水土比为 5:1),电导率(EC)采用电导率仪测定^[12],沉积物样品中的有机质含量采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法测定^[12],沉积物样品中的总磷的含量采用硫酸-高氯酸消煮法测定^[12],

沉积物样品中阳离子交换容量(CEC)采用氯化钡-硫酸快速测定法测定^[13],沉积物样品中总氮采用开氏消煮法测定^[12]。

1.3 磷释放风险评估方法

本文采用黄清辉等^[9]提出的以沉积物磷吸附指数(*PSI*)和磷吸附饱和度(*DPS*)这两个指标构成的磷释放风险指数(*ERI*)来评估东平湖表层沉积物中磷的释放风险,进而探究东平湖富营养化风险。

$$ERI = \frac{DPS}{PSI} \times 100$$

式中:*ERI*为磷释放风险指数,%;*DPS*为磷吸附饱和度,%;*PSI*为磷吸附指数, $[\text{mg P} \cdot (100 \text{ g})^{-1}] \cdot (\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{-1}$ 。

1.4 质量控制与数据处理

沉积物中磷的吸附指数和磷吸附饱和度的测定均进行 2 次重复试验。沉积物理化指标的测定中,每个样品设置 3 个平行样,取平均值作为结果。试验所用玻璃及聚乙烯器皿均以 0.3% HCl 充分浸泡 24 h 以上后,用超纯水充分清洗 3 遍。所有试验试剂均为分析纯,试验用水为超纯水($>18 \text{ M}\Omega$)。试验数据处理均采用 Excel 2003 和 SPSS11.5 for Windows 统计分析软件。

2 结果及讨论

2.1 东平湖表层沉积物的理化特征

研究东平湖表层沉积物的主要理化特性是探讨表层沉积物磷吸附容量及沉积物中磷的潜在释放的基础。主要理化特征测定结果见表 2。由表 2 可知,东平湖沉积物中的 pH 变化范围为 7.5~8.1,属于中性偏碱。EC 变化范围为 $256.3 \sim 615.0 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,平均值为 $394.3 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,最大值是最小值的两倍多,由表 2 知,不同采样点之间差异较大,最大值出现于湖南处,这可能与靠近安山码头,接受外界污水的汇入有关。沉积物中有机质变化范围为 2.5%~3.7%,平均值为 3.1%。CEC 变化范围为 $54.0 \sim 100.4 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $88.6 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,除湖东处外,其余各处均较大,这与沉积物的粒径组成、有机质含量和湖泊的污染程度密切相关。沉积物中总磷(TP)含量范围在 $704.6 \sim 989.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均含量为 $851.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总氮(TN)的变化范围为 $570.7 \sim 1330.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $765.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。除湖东、湖东南、湖南 3 处外,其余各处没有显著差异(表 2),湖东南比其余湖区明显较大,这与该区域是大汶河在东平湖的入湖处,接受外源氮的总量多有关。

表 2 东平湖表层沉积物理化特性

Table 2 The physicochemical parameters of surficial sediment in Dongping Lake

样品	pH	电导率/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	有机质/ %	CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	总磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	总氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
湖东	7.9c	256.3a	3.3c	54.0a	704.6a	896.6b
湖心	7.6b	434.0e	3.4c	79.2b	852.0cd	570.7a
湖东南	7.6b	452.3e	3.5c	86.9b	859.4de	1330.5c
湖南	7.5a	615.0f	3.7d	98.9c	861.6de	890.2b
湖西南	8.1e	333.3bc	2.6a	100.4c	989.3f	593.0a
湖北	7.9c	316.3b	2.9b	95.2c	833.2b	615.7a
腊山码头与湖心岛间中点处	7.9c	391.3d	2.6a	97.7c	841.2bc	571.1a
腊山码头附近	7.9d	356.0c	2.5a	96.4c	869.1e	657.2a

注:表中数据为平均值,各数值后的字母代表 Duncan 比较的结果,同一列不同取样点间字母相同表示无显著性差异,不同字母表示有显著性差异($P < 0.05$)。下同。

2.2 沉积物中草酸铵提取的铁、铝、磷的分布特征

沉积物中无定形态存在的铁、铝水合氧化物的含量影响着沉积物对磷的吸附容量^[14]。如表 3 所示,东平湖表层沉积物中草酸铵提取的铁(活性铁)含量变化范围为 $52.4 \sim 133.4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $90.1 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,在腊山码头与湖心岛间中点处最大,湖南、腊山码头两处 Fe_{ox} 含量也较大,活性铁的含量在一定程度上与人类干扰相关^[15]。草酸铵提取的铝(活性铝)含量范围为 $41.5 \sim 63.9 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $48.8 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,它与提取出的铁含量相比基本保持恒定,各取样点没有显著差异(表 3),最大值出现于湖东南处。草酸铵提取的磷含量变化范围为 $4.3 \sim 14.8 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $8.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,最大值出现于湖东南处。沉积物中草酸铵提取的磷占总磷含量的 15.9%~53.2%,均值为 29.4%。湖东南处沉积物中草酸铵提取的铝、磷的含量均为各处中的最大值,这与该区域是建国后村庄淹没区,同时又是大汶河在东平湖的入湖处,相比其余长久淹没区接受外源污染重有关。

有研究表明,太湖表层沉积物中活性铁为 $164 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,活性铝为 $46.6 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,草酸铵提取的磷为 $12.9 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[9];巢湖表层沉积物中活性铁为 $139.3 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,活性铝为 $37.2 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,草酸铵提取的磷为 $12.1 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16]。除活性铝的含量外,太湖和巢湖表层沉积物中草酸铵提取的铁、磷的含量均比东平湖要大,而太湖、巢湖的营养状况比东平湖要严重^[1,3,17-18],由此表明湖泊富营养状况与表层沉积物中

表 3 东平湖表层沉积物磷吸附指数和磷吸附饱和度

Table 3 The phosphorus sorption index (*PSI*) and the degree of phosphorus saturation (*DPS*) of the surficial sediments in the Dongping Lake

样品	$P_{ox}/$ $mmol \cdot kg^{-1}$	$Fe_{ox}/$ $mmol \cdot kg^{-1}$	$Al_{ox}/$ $mmol \cdot kg^{-1}$	$PSI/[mg P \cdot$ $(100 g)^{-1}] \cdot$ $(\mu mol \cdot L^{-1})^{-1}$	$DPS/$ %
湖东	7.1ab	53.6a	43.9a	34.4	14.6
湖心	11.3cd	52.4a	41.5a	35.7	24.1
湖东南	14.8d	86.5b	63.9a	37.5	19.8
湖南	9.9bc	129.7cd	59.2a	44.4	10.6
湖西南	5.5ab	70.6ab	45.4a	30.3	9.5
湖北	4.3a	81.8b	42.8a	38.1	6.9
腊山码头与湖心岛间中点处	6.0ab	133.4d	50.6a	43.7	6.5
腊山码头附近	5.5ab	112.6c	43.3a	45.2	7.1

草酸铵可提取的铁、磷含量有同步的变化关系。

2.3 表层沉积物的 *PSI* 的特征分析

东平湖表层沉积物的磷吸附指数变化范围为 30.3~45.2 $[mg P \cdot (100 g)^{-1}] \cdot (\mu mol \cdot L^{-1})^{-1}$, 平均值为 38.7 $[mg P \cdot (100 g)^{-1}] \cdot (\mu mol \cdot L^{-1})^{-1}$ 。*PSI* 整体表现出从湖心、湖东向湖北、湖南逐渐增大的扇形特征。其中, 最大值出现于腊山码头附近, 而离腊山码头较近的腊山码头与湖心岛间中点处和离安山码头较近的湖南处两处表层沉积物的 *PSI* 值也普遍高于其他处, 这说明人为活动对表层沉积物 *PSI* 有较大的影响。根据 *PSI* 的定义可知, *PSI* 值低的土壤对磷具有较弱的缓冲能力, 磷释放进入水体的风险较高^[9], 由此表明东平湖湖心、湖东区域可能具有较高的磷释放风险。

利用 SPSS 11.5 软件对试验数据进行相关性分析, 如表 4 所示, 东平湖表层沉积物的 *PSI* 与活性铁含量呈极显著正相关, 与铁铝总量呈显著正相关, 当无定形的铁、铝氧化物含量增大时, 磷的可吸附位增多, 沉积物对磷具有更强的缓冲能力, 这表明活性铁和铝是东平湖表层沉积物中对磷持留的主要因素, 而东平湖表层沉积物中活性铁的量大约是活性铝的两倍, 这表明东平湖表层沉积物中活性铁可能对磷起主要的持留作用。

2.4 表层沉积物的 *DPS* 的特征分析

东平湖表层沉积物的磷吸附饱和度变化范围为 6.5%~24.1%, 平均值为 12.4%。*DPS* 整体表现出从湖心、湖东向湖北、湖南逐渐减小的扇形特征, 与 *PSI* 变化趋势恰好相反。*DPS* 最大值出现于湖心处, 这与沉积物中对磷吸附起主要承担作用的铁和铝无定形态

表 4 表层沉积物的各理化参数之间的相关性

Table 4 The correlation among the physicochemical parameters of surficial sediments

	OM	CEC	TP	P_{ox}	Fe_{ox}	Al_{ox}	<i>PSI</i>	<i>DPS</i>
CEC	-0.388							
TP	-0.386	0.794*						
P_{ox}	0.731*	-0.210	-0.048					
Fe_{ox}	-0.150	0.660	0.181	-0.126				
Al_{ox}	0.523	0.231	0.103	0.673	0.468			
<i>PSI</i>	-0.011	0.393	-0.141	-0.040	0.863**	0.288		
<i>DPS</i>	0.620	-0.532	-0.171	0.819*	-0.606	0.150	-0.405	
$Fe_{ox}+Al_{ox}$	-0.011	0.628	0.182	0.044	0.979**	0.638	0.819*	-0.494

注: * 显著水平 0.05; ** 显著水平 0.01; 样本数 $N=24$ 。

存在的氧化物^[14]含量比其余各处低有关, 湖心处活性铁的含量为 52.4 $mmol \cdot kg^{-1}$, 活性铝的含量为 41.5 $mmol \cdot kg^{-1}$, 是所有沉积物样品中含量最低的。*DPS* 值的大小在很大程度上决定了沉积物中的磷向水体的释磷量, 可以作为衡量沉积物含磷水平和评估沉积物对磷吸附容量的可靠指标^[20-21]。湖心、湖东区域沉积物的 *DPS* 越高, 其固磷能力较强的吸附位多已被占据, 故磷越容易从沉积物表面迁移到水体, 即磷释放到上覆水体中的风险也越大。当磷成为富营养化发生限制因素时, 随上覆水体中的供磷量增加, 富营养化的程度将加重。

如表 4 所示, *DPS* 与沉积物中草酸铵提取的磷 (P_{ox}) 含量呈显著正相关, 表明沉积物中易解吸的磷是沉积物-水界面间磷迁移的主要成分, 同时也说明, 只有 *DPS* 达到一定值时, 沉积物是磷的“源”的作用才更加突出。

有研究表明, 太湖表层沉积物 *PSI* 为 13.2~101.7 $[mg P \cdot (100 g)^{-1}] \cdot (\mu mol \cdot L^{-1})^{-1}$, *DPS* 变化范围为 5.6%~31.2%^[9], 巢湖表层沉积物 *PSI* 变化范围为 28.9~68.2 $[mg P \cdot (100 g)^{-1}] \cdot (\mu mol \cdot L^{-1})^{-1}$, *DPS* 变化范围为 10.6%~16%^[16], 可以看出不同湖泊表层沉积物磷吸附容量和磷释放潜力差别较大。此外, 和东平湖相同, 太湖表层沉积物中 *PSI* 和 *DPS* 两者也表现出相反的变化趋势^[9]。

2.5 磷释放风险评估

结合东平湖富营养状况^[1,3]以及黄清辉等^[9]对太湖表层沉积物磷释放诱发富营养化风险的评价体系, 将东平湖表层沉积物磷释放诱发富营养化风险评价等级分成高度风险 ($ERI>25$)、较高风险 ($20<ERI<25$)、中度风险 ($10<ERI<20$) 和较低风险 ($ERI<10$) 4 个等级。由表 5 可知, 东平湖湖东、湖心、湖西南以及湖东

南都属于高度风险区,而湖北、腊山码头附近富营养化风险相对较轻,磷释放风险指数(*ERI*)平均值为33.3%,整体来看,东平湖表层沉积物磷释放诱发富营养化的风险处于高度风险范围。

表 5 东平湖富营养化风险评价
Table 5 Eutrophication risk assessment of Dongping Lake

样品	地点	<i>PSI</i> [mg P·(100 g) ⁻¹ · (μmol·L ⁻¹) ⁻¹]	<i>DPS</i> / %	<i>ERI</i> / %	风险评价
1#	湖东	34.4	14.6	42.4	高度风险
2#	湖心	35.7	24.1	67.5	高度风险
3#	湖东南	37.5	19.8	52.8	高度风险
4#	湖南	44.4	10.6	23.7	较高风险
5#	湖西南	30.3	9.5	31.3	高度风险
6#	湖北	38.1	6.9	18.1	中度风险
7#	腊山码头与湖心岛间中点处	43.7	6.5	14.9	中度风险
8#	腊山码头附近	45.2	7.1	15.8	中度风险

作为大汶河向东平湖入湖处的湖东、湖东南区域,外源磷负荷较大,在黄河未滞洪的条件下,大汶河客水是东平湖的主要水源,而大汶河排入东平湖的污水量巨大,对东平湖的水质影响很大。以2000年为例,大汶河排入东平湖的污水量达近4亿t^[22],大汶河流入东平湖后,湖东、湖东南区域水质首先变差,当污水向周围扩展时,湖东、湖东南区域营养盐已经通过吸附、沉积作用转移到沉积物中,使该区域沉积物中持留磷的含量增大,即内源磷负荷增大。可以预见,当风浪扰动、湖底的氧化还原等条件适宜时,东平湖湖东、湖东南区域磷释放量将增大,当以磷为富营养化发生限制因素时,富营养化的程度必将加重,因此,东平湖湖东、湖东南区域相比其他区域发生富营养化的风险更高。

黄清辉等^[9,16]对太湖和巢湖表层沉积物磷释放诱发富营养化风险研究发现,太湖紧邻城区和工业区的梅梁湾北部至五里湖一带、竺山湖北部湖区属于高度风险区,其余区域风险相对较低,巢湖处于较高风险至高度风险状态,并发现对太湖和巢湖富营养化风险的预测和实际的富营养化发生情况基本相符。此外,东平湖和太湖表层沉积物磷释放诱发富营养化的高度风险区都是受人为因素影响较大的区域,这些区域内源磷负荷较大,*DPS*大多在15%以上,磷易释放到上覆水体中。

3 结论

本研究表明,东平湖表层沉积物的磷吸附指数

(*PSI*)表现出从湖心、湖东向湖北、湖南逐渐增大的扇形特征,而磷吸附饱和度(*DPS*)表现出从湖心、湖东向湖北、湖南逐渐减小的扇形特征,与*PSI*变化趋势恰好相反。表层沉积物的*PSI*与沉积物中活性铁(*Fe_{ox}*)含量呈极显著正相关,与铁铝总量呈显著正相关,*DPS*与沉积物中草酸铵提取的磷(*P_{ox}*)含量呈显著正相关。东平湖表层沉积物中活性铁、活性铝的含量直接影响着沉积物的磷吸附容量,其中,表层沉积物中活性铁可能对磷起主要的持留作用。

利用磷释放风险指数(*ERI*)对东平湖表层沉积物中的磷的潜在释放风险进行评估,结果表明:东平湖表层沉积物中磷释放诱发富营养化的风险处于高度风险范围,其中,受人为因素影响较大的湖东、湖东南区域相比其他区域发生富营养化的风险更高。

参考文献:

[1] 庞清江, 李白英. 东平湖水体富营养化评价[J]. 水资源保护, 2003, 5: 42-44.
PANG Qing-Jiang, LI Bai-ying. Evaluation of water eutrophication of Dongping Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2003, 5: 42-44.
[2] 姜东生, 刘存功, 刘桂珍, 等. 东平湖及周围水环境分析[J]. 海洋湖沼通报, 2002, 4: 12-15.
JIANG Dong-sheng, LIU Cun-gong, LIU Gui-zhen, et al. Analysis of the water environment in Dong-ping Lake and its vicinity[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2002, 4: 12-15.
[3] 许光辉, 曹颖, 李艳琴, 等. 东平湖富营养化状况调查及变化趋势分析[J]. 现代商贸工业, 2009, 14: 78-79.
XU Guang-hui, CAO Ying, LI Yan-qin, et al. An investigation and trend analysis of the eutrophic state of Dongping Lake[J]. *Modern Business Trade Industry*, 2009, 14: 78-79.
[4] Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. Phosphorus binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of the baltic district(Germany)[J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37(3): 51-58.
[5] 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, 27(1): 279-285.
JIN Xiang-can, PANG Yan, WANG Sheng-rui, 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, 27(1): 279-285.
[6] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 等. 乌梁素海沉积物中磷的形态分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 878-885.
LV Chang-wei, HE Jiang, SUN Hui-min, et al. Phosphorus speciation and distribution character in sediment of Wuliangsuhai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 878-885.
[7] Chen C R, Sinaj S, Condrón L M, et al. Characterization of phosphorus availability in selected New Zealand grassland soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroeco Systems*, 2003, 65: 89-100.

- [8] McDowell R W, Sharpley A N. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration[J]. *Geoderma*, 2003, 112: 143-154.
- [9] 黄清辉, 王子健, 王东红, 等. 太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2): 97-104.
HUANG Qing-hui, WANG Zi-jian, WANG Dong-hong, et al. Phosphorus sorption capacity of the surface sediment in the lake Taihu and risk assessment of phosphorus release[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(2): 97-104.
- [10] 冯素萍, 温超, 沈永. 东平湖不同粒径底泥沉积物中汞的形态分布[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(6): 22-25.
FENG Su-ping, WEN Chao, SHEN Yong. Morphology distribution of mercury in sediments of different sizes in the Dongping Lake[J]. *Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2008, 20(6): 22-25.
- [11] 蔡金娟, 史衍玺. 不同腐殖酸组分对湖泊沉积物中重金属释放的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 108-110.
CAI Jin-juan, SHI Yan-xi. Release of heavy metals on sediments and influence factors of humic acids[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 108-110.
- [12] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 42-121.
LIN Da-yi. Pedology experimental methods [M]. Beijing: China Forestry Press, 2004: 42-121.
- [13] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 22-26.
Soil Science Society of China. Method of soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 22-26.
- [14] Lopez P, Lluch X, Morgu J A. Adsorption of phosphorus on sediments of the balearic islands related to their composition[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 42: 185-196.
- [15] Ruban V, Brigault S, Demare D, et al. An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, 1(4): 403-407.
- [16] 黄清辉. 浅水湖泊内源磷释放及其生物有效性[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
HUANG Qing-hui. Release and bioavailability of internal phosphorus in shallow lakes[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [17] 袁旭音, 许乃政, 陶于祥. 太湖底泥的空间分布和富营养化特征[J]. 资源调查与环境, 2003, 24(1): 20-28.
YUAN Xu-yin, XU Nai-zheng, TAO Yu-xiang. Spatial distribution and eutrophic characteristics of bottom sediments in Taihu Lake[J]. *Resources Survey and Environment*, 2003, 24(1): 20-28.
- [18] 殷福才, 张之源. 巢湖富营养化研究进展 [J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 377-384.
YIN Fu-cai, ZHANG Zhi-yuan. Survey of Chaohu Lake eutrophication research[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(4): 377-384.
- [19] 张静. 鄱阳湖南矶山湿地土壤对磷的吸附与释放特性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2006.
ZHANG Jing. Study on Phosphorus adsorption and release of wetland soils in the Nanjishan Nature Reserve of Poyang Lake[D]. Nanchang: Nanchang University, 2006.
- [20] Nair V D, Graez D A. Phosphorus saturation in spodosols impacted by manure[J]. *J Environ Qual*, 2002, 31(4): 1279-1285.
- [21] 邵兴华, 章永松, 林咸永, 等. 三种铁氧化物的磷吸附解吸特性以及与磷吸附饱和度的关系[J]. 植物营养与肥科学报, 2006, 12(2): 208-212.
SHAO Xing-hua, ZHANG Yong-song, LIN Xian-yong, et al. Phosphorus adsorption and desorption properties of three synthetic iron oxides and their relation to phosphorus adsorption saturation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(2): 208-212.
- [22] 陈诗越, 董杰, 张重阳. 东平湖生态环境现状及流域可持续发展对策研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(5): 1436-1437.
CHEN Shi-yue, DONG Jie, ZHANG Chong-yang. Counter measure study on eco-environment status of Dongping Lake and sustainable development of its catchment[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2007, 35(5): 1436-1437.