

Pollution and Distribution Characteristics of Various Phosphorus in the Sediments of Tangxun Lake

Fangkai Ma¹, Zhaobo Gao^{1*}, Li Yuan², Qian Du¹, Rui Wang², Xiaoli Zhang²

¹Yangtze River Survey Planning and Design Research Co., Ltd., Wuhan Hubei

²Wuhan Zhi Hui Testing Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

Email: mafangkai@cjwsjy.com.cn, *gaozhaobo@cjwsjy.com.cn

Received: Oct. 15th, 2020; accepted: Nov. 20th, 2020; published: Dec. 22nd, 2020

Abstract

Water eutrophication is closely related to the phosphorus content, and the sediments are the main storage places of phosphorus as well as the endogenous phosphorus of lake. Study of the degree of phosphorus pollution in sediments and its existing form is of great significance to fundamentally solve the lake eutrophication problem. Taking Tangxun Lake as case study, 131 sediment sampling points are settled to investigate the phosphorus pollution, and some of the points are selected for the extraction and analysis experiment of graded phosphorus to study the forms of phosphorus and its distribution characteristics.

Keywords

Tangxun Lake, Sediment, Forms of Phosphorus, Pollution Degree

汤逊湖沉积物中磷的污染状况及分布特征探究

马方凯¹, 高兆波^{1*}, 袁莉², 杜倩¹, 王锐², 张小莉²

¹长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉

²武汉智慧国测检测科技有限公司, 湖北 武汉

Email: mafangkai@cjwsjy.com.cn, *gaozhaobo@cjwsjy.com.cn

收稿日期: 2020年10月15日; 录用日期: 2020年11月20日; 发布日期: 2020年12月22日

摘要

水体富营养化与水体中磷的含量有着密切联系, 湖泊沉积物是湖泊水体中磷的主要储存场所, 也是湖泊水体中

作者简介: 马方凯, 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为城市水生态环境。

*通讯作者。

文章引用: 马方凯, 高兆波, 袁莉, 杜倩, 王锐, 张小莉. 汤逊湖沉积物中磷的污染状况及分布特征探究[J]. 水资源研究, 2020, 9(6): 653-663. DOI: 10.12677/jwrr.2020.96071

内源性磷的主要来源。了解沉积物中磷的污染程度及其存在形态,对于从根本上解决湖泊富营养化问题有重大的意义。以武汉市汤逊湖为研究对象,在汤逊湖共布置131个沉积物采样点位,调查汤逊湖沉积物中磷的污染状况,并选择其中部分点位做分级磷的提取分析实验,调查沉积物中磷的存在形态及其分布特征。

关键词

汤逊湖, 沉积物, 磷形态, 污染程度

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着汤逊湖周边人口、经济及城市规模的日益发展,越来越多的生活污水和生产废水排入湖中,导致汤逊湖水质不断恶化。根据近20年的水质监测结果,2013年至今汤逊湖水质一直为V类,且各种污染物超标倍速呈现逐年上涨趋势,水体富营养化程度加剧,近两年均出现了较为严重的水华现象。通常认为,水体氮磷含量过高,尤其是磷含量过高是引起水体富营养化的主要原因[1][2]。

水体中的磷主要分为外源性磷和内源性磷。外源性磷主要来自于自然界的降水、其他地表水水体的汇入、人类生产生活产生的各种排污行为。内源性磷主要来自于水体自身,如底泥中磷的自然释放过程。外源性磷可以通过人为的管控从源头上进行有效控制,而内源性磷大量存在于沉积物中[3][4],很难通过人为管控明显降低。沉积物是上层水体营养物质的重要储蓄库,在一定的外界条件下沉积物中的磷将再次释放到上覆水中[5][6][7][8][9]。沉积物中磷的扩散量对上覆水体的营养盐变化有显著的影响,是造成湖泊富营养化的主要因子之一[10],其释放潜力、迁移能力和生态效应都主要取决于沉积物中磷的赋存形态[11][12][13][14][15]。

沉积物中磷的存在形态通常分为有机磷和无机磷两大类,有机磷分离、鉴定困难,所以通常将有机磷看作一个形态,不再细分[16]。国内外很多学者对于无机磷的分类不尽相同,李悦[17]等将无机磷进一步分为易交换态磷、铝结合磷、铁结合磷、闭蓄态磷、钙结合磷、原生碎屑磷,金相灿[18]等将无机磷分为可溶性磷、铁结合态磷、铝结合态磷、钙结合态磷、闭蓄态磷。本次研究将无机磷进一步分为弱吸附态磷、金属氧化物磷、磷石灰磷和残渣磷。沉积物中的弱吸附态磷又称为易交换态磷,是指附着在沉积物表层,主要是通过物理作用与沉积物相结合的磷,该部分磷极易释放进入上覆水体中,被生物利用[19]。金属氧化物磷主要是指磷酸盐与铁锰氧化物或者其氢氧化物所结合的磷,该形态磷的结合状态受氧化还原电位的影响,当周围环境的氧化还原电位发生变化时该形态磷有极大可能被释放出来[20][21]。金属氧化物磷及弱吸附态磷、有机磷合称为活性磷,沉积物中该部分磷易被生物利用[22]。

欧美等国在大数据背景值及生态基准基础上,建立了区域沉积物环境质量标准或风险评价体系,国内对长江中下游多个大型浅水湖泊(太湖、巢湖、鄱阳湖、洞庭湖等)的沉积物磷形态及其分布特征也进行了研究。本文研究湖泊沉积物中磷的各种赋存形态及其含量对研究沉积物中磷的扩散行为、了解沉积物的理化特性、追溯水体的污染历史以及对改善水体富营养化现状制定科学的治理方案有重要的作用。

2. 研究方法

2.1. 研究区域

汤逊湖位于武汉市东南部,横跨江夏、洪山和东湖新技术开发区三个区,湖泊水域面积47.62 km²,是亚洲

最大城市内湖，湖泊容积约 10,360.7 万 m³，常水位 18.62 m，平均水深 2~3 m。

根据武汉市地表水环境功能区划，汤逊湖水质目标为地表水环境质量 III 类。近 20 年水质监测结果显示，汤逊湖水质持续恶化，2013~2017 年水质一直为 V 类，超标污染物主要为总磷、总氮、化学需氧量、氨氮等，各种污染物超标倍数呈现上涨趋势。2018 年水质为劣 V 类，且富营养化程度加剧，近两年均出现了较为严重的水华。根据 2019 年汤逊湖流域各类污染源的调查分析结果，汤逊湖内源污染 TP 年释放通量分别为 81.47 t/a，在汤逊湖流域 TP 入湖污染总量中的占比高达 38.97%，因此，为了改善汤逊湖水质，内源污染的治理迫在眉睫。

2.2. 采样点位的设置及样品采集

本次调查采样在夏季和冬季各开展了一期，共设置沉积物中磷污染调查样点 131 个(A 类点位)，并选取其中的 6 个样点(B 类点位)开展沉积物中磷存在形态分析。冬季调查于 2018 年 11 月开展，共设调查样点 68 个；夏季调查于 2019 年 7~8 月开展，共设调查样点 63 个。调查样点布设的原则是：1) 按 1000 × 1000 m 间距布置(冬季开展第一次调查时按 1000 × 1000 m 间距布置，夏季开展的补充调查在第一次调查样点的基础上插空布置)，湖心区域根据其扰动和污染程度较轻的特点适当加大间距。2) 湖汊、狭长带状区域布点上兼顾近岸区域和湖中间区域布置，末梢区域尽量不遗漏。3) 沿线排口适当加密布置。具体采样点位见图 1。调查时采用柱状重力采泥器采集未经扰动的沉积物柱状样品，采样深度直至沉积物最底层。采集的柱状样品用聚乙烯膜包裹密封当天送回实验室进行分层处理。每个点位柱状样的分层个数依据各点位的沉积物深度确定，其中 A 类点位 0~20 cm，每 5 cm 分层；20~40 cm，每 10 cm 分层；40 cm 以上，每 20 cm 分层，B 类点位每 10 cm 分层。分层的样品除去植物等残体后混合均匀，将样品烘干后用研磨仪研磨，并经过 100 目的铁筛筛分，将制备好的样品放在聚乙烯塑料袋中备用。

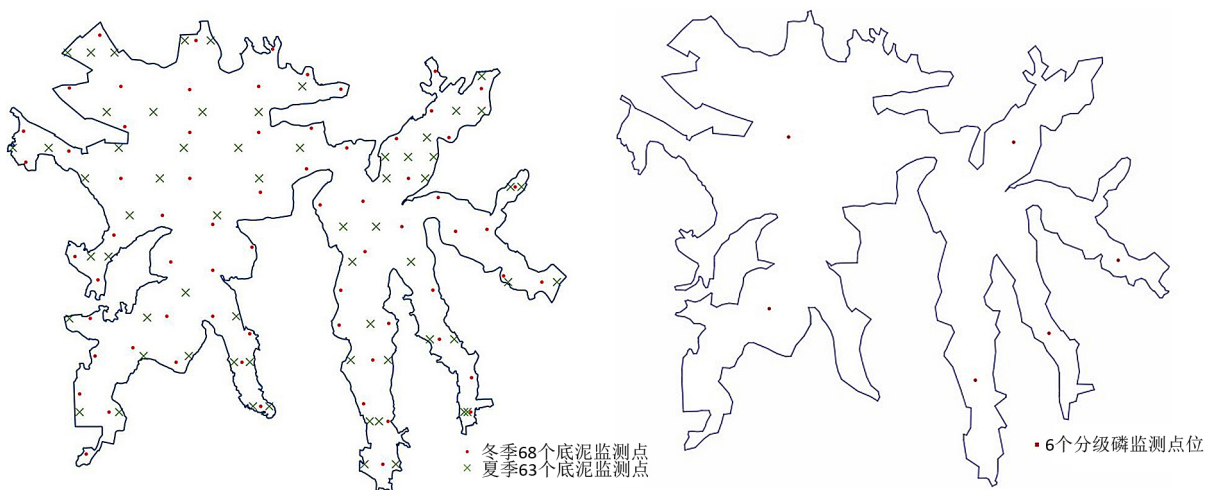


Figure 1. Distribution of sediment survey samples in Tangxun Lake (left: A-type, right: B-type)

图 1. 汤逊湖底泥调查样点分布图(左: A 类, 右: B 类)

2.3. 分析测定方法

本实验沉积物的测定项目包括总磷、有机磷、弱吸附磷、金属氧化磷、磷石灰磷和残渣磷。总磷的测定采用氢氧化钠熔融后钼锑抗分光光度法，有机磷、弱吸附磷、金属氧化磷、磷石灰磷和残渣磷的连续提取方法是将 Hietjies-Lijklema 法[23]和 Ruttenberg 法[24] [25]相结合并在其基础上稍作更改，本次提取时将 KCl 替代 NH₄Cl 作为弱吸附磷的提取剂。监测提取液所用的仪器为 TU-1801 紫外可见分光光度计。具体分析步骤见图 2。

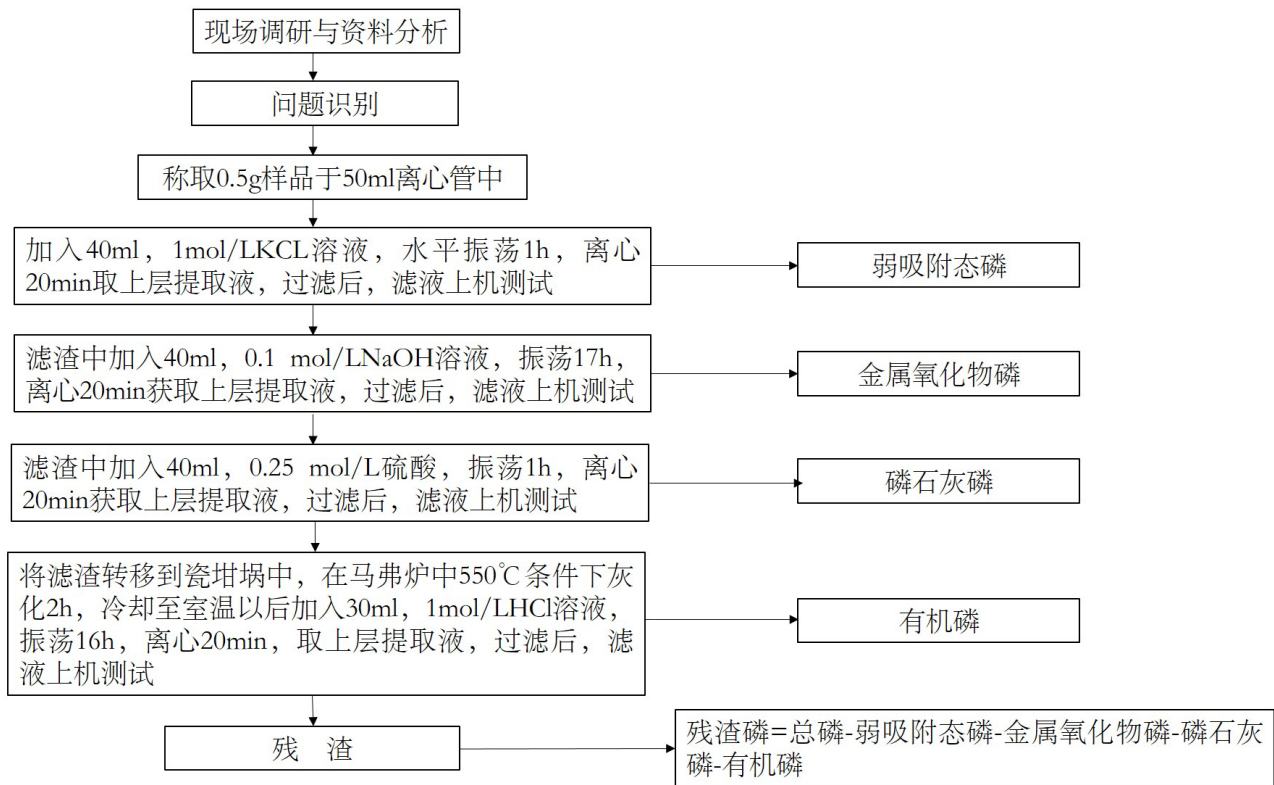


Figure 2. Graded extraction method of various phosphorus forms in sediments

图 2. 沉积物中各种磷形态分级提取方法

3. 结果与分析

3.1. 沉积物淤积深度

通过对 131 个监测点位柱状泥样的观测得到不同监测样点处底泥淤积深度，并应用 arcgis 软件通过反距离权重法对样点底泥淤积深度进行插值计算，得到汤逊湖底泥淤积深度空间连续分布图，见图 3。从中可知，汤逊湖底泥淤积深度的范围为 18~150 cm，整个湖区底泥平均淤积深度为 92 cm，且中心湖区底泥淤积深度明显高于周边区域。

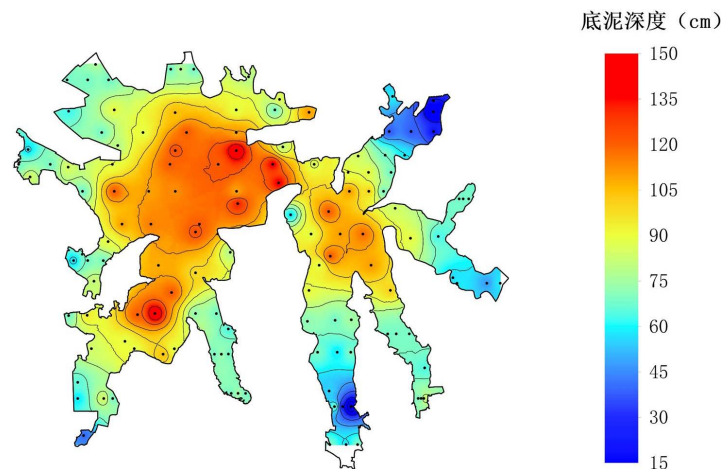


Figure 3. Depth distribution of bottom mud in Tangxun Lake

图 3. 汤逊湖底泥深度分布图

3.2. 沉积物中总磷的分布特征及污染状况

冬季调查监测结果显示, 冬季汤逊湖表层底泥中总磷的含量范围为 144.9~3004.3 mg/kg, 平均含量为 968.7 mg/kg, 且总磷含量分布存在着明显的区域特点, 其中汤逊湖中部和东北部的含量明显较高。汤逊湖冬季底泥中总磷含量的平面分布见图 4。通过计算汤逊湖冬季底泥各深度处总磷的平均含量可知, 随着深度的增加底泥中的总磷含量逐渐降低, 且含量的变化幅度随着深度的增加越来越小, 当底泥深度大于 40 cm 时, 变化趋势明显减缓。总磷含量随底泥深度变化趋势见图 5。

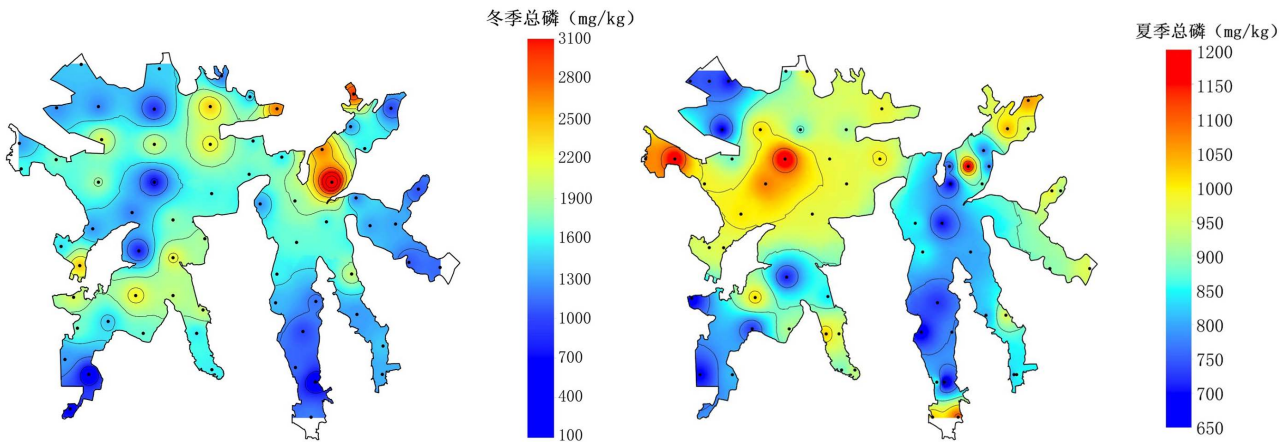


Figure 4. Plane distribution map of total phosphorus content in sediment of Tangxun Lake (left: winter, right: summer)
图 4. 汤逊湖底泥总磷含量平面分布图(左: 冬季, 右: 夏季)

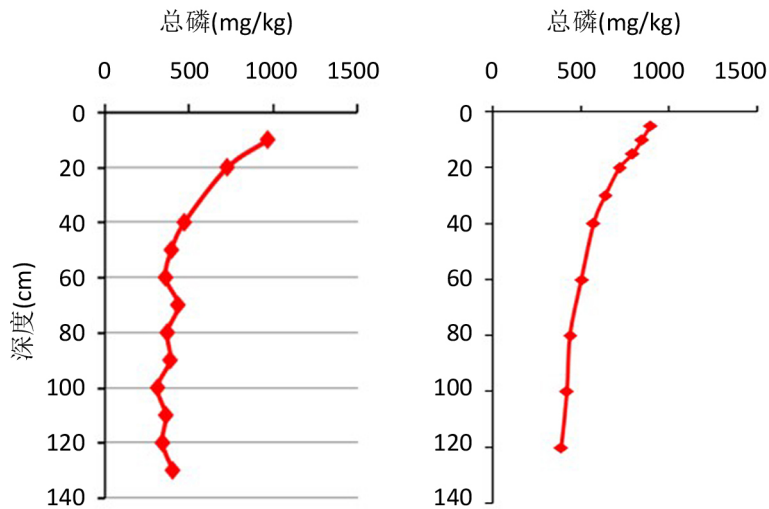


Figure 5. Plane distribution map of total phosphorus content in sediment of Tangxun Lake (left: winter, right: summer)
图 5. 汤逊湖底泥总磷含量平面分布图(左: 冬季, 右: 夏季)

对汤逊湖底泥夏季调查结果显示, 夏季汤逊湖表层底泥中总磷的含量范围为 276~1444 mg/kg, 平均含量为 911.2 mg/kg。汤逊湖夏季底泥中总磷含量的平面分布见图 4。通过计算汤逊湖夏季底泥各深度处总磷的平均含量可知, 随着深度的增加底泥中的总磷含量逐渐降低, 且含量的变化幅度随着深度的增加越来越小, 当底泥深度大于 60 cm 时, 变化趋势明显减缓。夏季总磷含量随底泥深度变化趋势见图 5。

从上述监测结果中可以看出, 汤逊湖夏季表层底泥磷平均含量均低于冬季, 可能是由于夏季底泥中磷元素

向上覆水体中释放作用加强。夏季温度较高，湖泊中的微生物活性增强、溶解氧降低等原因导致沉积物中大量的有机磷向无机磷形态转化，并加快无机磷转化为无机磷酸盐，从而使沉积物中的磷逐渐向水体中释放[26] [27] [28] [29] [30]。该结果从一定程度上反映了夏季许多湖泊营养化程度加剧的原因。

根据 US EPA 制定的底泥污染程度分区，汤逊湖表层底泥的总磷含量处于轻度污染水平，随着底泥深度的增加，生态风险逐渐减小，当底泥的深度超过 30~40 cm 时污染等级为健康，汤逊湖底泥总磷生态风险系数随泥深变化趋势见图 6。总体来讲，总磷的污染表现为表层富集，随着底泥深度的增加污染程度降低。这与沉积物的历史密切相关，随着近年来汤逊湖周边人类生产、生活等活动的增加，新沉积下来的沉积物受污染程度较高，而且该部分沉积物中营养盐的含量并未达到相对平衡，因此存在着营养盐释放的风险。

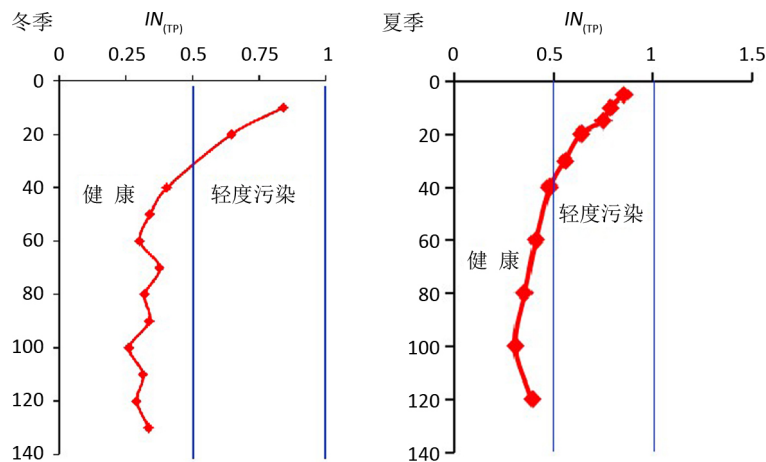


Figure 6. Trend map of ecological risk coefficient of total phosphorus in bottom mud of Tangxun Lake with mud depth

图 6. 汤逊湖底泥总磷生态风险系数随泥深变化趋势图

3.3. 沉积物磷赋存形态及分布特征

对 6 个点位沉积物柱状样进行分级磷提取，各点位磷形态含量见表 1。各监测点位处表层各种磷含量所占比例见图 7。

Table 1. The content of various phosphorus forms at each monitoring point

表 1. 各监测点位各种磷形态的含量

监测点位	底泥深度	弱吸附态磷	金属氧化物磷	磷灰石磷	有机磷	残渣磷	总磷
B1	0~10 cm	35	602	259	260	52	1208
	10~20 cm	39	411	160	230	71	911
	20~30 cm	29	245	105	200	74	653
	30~40 cm	26	162	128	157	49	522
	40~50 cm	29	178	135	143	36	521
	50~60 cm	22	167	109	134	41	473
	60~70 cm	21	153	101	125	14	414
	70~80 cm	24	111	108	101	43	387
	80~90 cm	17	123	111	70	12	333
B2	0~10 cm	41	543	191	217	153	1145
	10~20 cm	25	350	190	248	174	987

Continued

	20~30 cm	45	499	186	178	138	1046
	30~40 cm	34	365	163	139	138	839
	40~50 cm	25	221	147	138	107	638
	50~60 cm	26	172	67	177	92	534
	60~70 cm	23	190	88	134	98	533
	70~80 cm	13	232	122	126	28	521
	80~90 cm	18	110	106	75	127	436
	90~100 cm	23	217	136	188	38	602
	100~110 cm	4	220	108	137	25	494
B3	0~10 cm	61	283	164	118	37	663
	10~20 cm	46	246	142	108	13	555
	20~30 cm	78	122	93	97	30	420
	30~40 cm	58	89	65	97	39	348
	40~50 cm	54	80	46	84	33	297
	50~60 cm	67	96	47	79	9	298
	60~70 cm	53	65	46	79	24	267
B4	0~10 cm	61	283	164	118	37	663
	10~20 cm	46	246	142	108	13	555
	20~30 cm	78	122	93	97	30	420
	30~40 cm	58	89	65	97	39	348
	40~50 cm	54	80	46	84	33	297
	50~60 cm	67	96	47	79	9	298
	60~70 cm	53	65	46	79	24	267
B5	0~10 cm	87	444	247	128	36	942
	10~20 cm	54	332	150	80	60	676
	20~30 cm	43	272	131	70	50	566
	30~40 cm	42	248	104	57	58	509
	40~50 cm	32	244	80	45	44	445
	50~60 cm	14	243	101	55	37	450
	60~70 cm	32	198	88	49	28	395
B6	0~10 cm	133	329	241	125	89	917
	10~20 cm	73	268	205	107	80	733
	20~30 cm	46	305	122	66	47	586
	30~40 cm	42	221	151	80	60	554
	40~50 cm	54	205	116	63	43	481
	50~60 cm	39	295	73	41	20	468
	60~70 cm	42	247	108	59	40	496
	70~80 cm	57	290	50	30	10	437

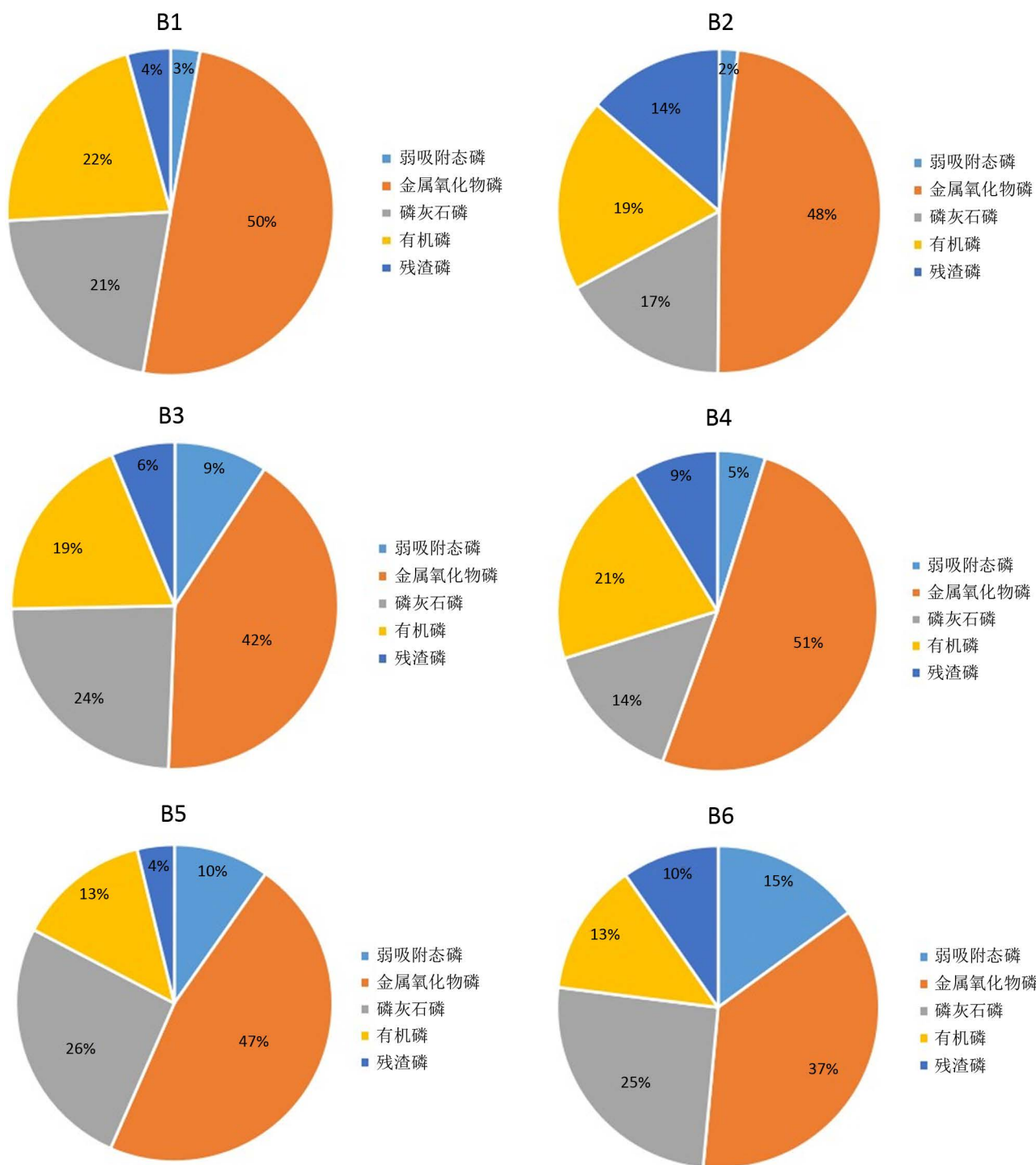


Figure 7. Proportion of various phosphorus contents in surface sediments

图 7. 表层沉积物中各种磷含量所占比例图

监测结果表明, 汤逊湖底泥中弱吸附态磷含量在 4~133 mg/kg 之间, 金属氧化物磷含量在 49~602 mg/kg 之间, 磷石灰磷含量在 46~259 mg/kg 之间, 有机磷含量在 30~260 mg/kg 之间, 残渣磷含量在 9~174 mg/kg 之间, 且随着底泥深度的增加, 各形态磷的含量均有逐渐降低的趋势。其中表层底泥中弱吸附态磷、金属氧化物磷、磷石灰磷、有机磷、残渣磷含量所占总磷含量比例分别为: 2%~15%、37%~51%、14%~26%、13%~22%、4%~14%。

主要磷形态含量排序为：金属氧化物磷>磷石灰磷>有机磷>残渣磷>弱吸附态磷。无机磷的含量在 80%以上为表层沉积物中磷的主要存在形态，而无机磷的主要形态是金属氧化物磷，其含量占总磷含量比例超过 40%，其中含量最低的为弱吸附态磷，其含量占总磷含量比例小于 10%。

本次检测结果表明汤逊湖表层底泥中活性磷的含量较高，底泥中大多为不稳定结合态磷，释放潜力较大，当周围环境发生变化时沉积物中的磷极易向上覆水体中扩散，造成内源性污染。

4. 结论

1) 冬季汤逊湖表层沉积物中总磷平均含量为 968.7 mg/kg，夏季汤逊湖表层沉积物中总磷平均含量为 911.2 mg/kg。随着沉积物深度的增加，总磷的含量逐渐降低。

2) 汤逊湖表层沉积物的总磷含量处于轻度污染水平，随着深度的增加，生态风险逐渐减小，当沉积物的深度超过 30~40 cm 时污染等级为健康。主要表现为污染物表面富集现象，污染物有向水体中扩散的可能。

3) 汤逊湖沉积物中弱吸附态磷含量在 4~133 mg/kg 之间，金属氧化物磷含量在 49~602 mg/kg 之间，磷石灰磷含量在 46~259 mg/kg 之间，有机磷含量在 30~260 mg/kg 之间，残渣磷含量在 9~174 mg/kg 之间，且随着底泥深度的增加，各形态磷的含量均有逐渐降低的趋势。

4) 汤逊湖表层沉积物中弱吸附态磷、金属氧化物磷以及有机磷含量较高。此类形态磷均为活性磷，表明汤逊湖表层沉积物中大多为不稳定结合态磷，释放潜力较大，当周围环境发生变化时沉积物中的磷极易向上覆水体中扩散，造成内源性污染。

参考文献

- [1] SCHINDLER, D. W., CARPENTER, S. R., CHAPRA, S. C., et al. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17): 8923-8929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>
- [2] DING, S., CHEN, M., GONG, M., et al. Internal phosphorus loading from sediments causes seasonal nitrogen limitation for harmful algal blooms. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 872-884. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.348>
- [3] PAYTAN, A., ROBERTS, K., WATSON, S., et al. Internal loading of phosphate in Lake Erie Central Basin. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1356-1365. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.133>
- [4] 孙清清, 陈敬安, 王敬富, 等. 阿哈水库沉积物一水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(7): 2810-2818.
SUN Qingqing, CHEN Jingan, WANG Jingfu, et al. High-resolution distribution characteristics of phosphorous, iron and sulfur across the sediment-water interface of Aha Reservoir. *Environmental Science*, 2017, 38(7): 2810-2818. (in Chinese)
- [5] CARPENTER, S. R., CARACO, N. F., CORRELL, D. L., et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological applications*, 1998, 8(3): 559-568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)
- [6] 文威, 孙学明, 孙淑娟, 等. 海河底泥氮磷营养物静态释放模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 295-300.
WEN Wei, SUN Xueming, SUN Shujuan, et al. Release of phosphorus and nitrogen from Haihe River Sediments. *Journal of AgroEnvironment Science*, 2008, 27(1): 295-300. (in Chinese)
- [7] TESTA, J. M., BRADY, D. C., DI, T. D. M., et al. Sediment flux modeling simulating nitrogen, phosphorus, and silica cycles. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2013, 131: 245-263. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.014>
- [8] MATINEX-SOLO, M. C., MARTINEX, G. Organic carbon, phosphorus and nitrogen in surface sediments of the marine-coastal region north and south of the Paria Peninsula, Venezuela. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(2): 429-439. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1319-y>
- [9] WU, D., HUA, Z. L. The effect of vegetation on sediment resuspension and phosphorus release under hydrodynamic disturbance in shallow lakes. *Ecological Engineering*, 2014, 69: 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.059>
- [10] 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌. 宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征[J/OL]. *环境科学*, 2020, 41(12): 1-14.
CUI Huifang, CHEN Shuyun, YANG Chunhui, TANG Wangying, YIN Peng and YIN Hongbin. The endogenous pollution and release characteristics of the bottom sediment of Hengshan Reservoir in Yixing City. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 1-14. (in Chinese)
- [11] RUTTENBERG, K. C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments.

- Limnology and Oceanography, 1992, 37(7): 1460-1482. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.7.1460>
- [12] 陈豁然, 杨梦兵, 王中伟, 况武. 底泥磷形态及分布特征对水体富营养化的影响[J]. 污染防治技术, 2009, 22(5): 81-83. CHEN Huoran, YANG Mengbing, WANG Zhongwei and KUANG Wu. The effects of species and distribution characteristics of phosphorus in sediment to eutrophication. Pollution Control Technology, 2009, 22(5): 81-83. (in Chinese)
- [13] TANG, X., WU, M., DAI, X., et al. Phosphorus storage dynamics and adsorption characteristics for sediment from a drinking water source reservoir and its relation with sediment compositions. Ecological Engineering, 2014, 64(3): 276-284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.01.005>
- [14] 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): 50-61. JIANG Xue, WEN Shuailong, YAO Shuchun, et al. Environmental significance of phosphorus existing forms in the sediments of Yunqiao Reservoir in Tianjin. Journal of Lake Science, 2018, 30(3): 50-61. (in Chinese)
- [15] 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. JIN Xiaodan, WU Hao, CHEN Zhiming, et al. Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China. Environmental Science, 2015, 36(2): 448-456. (in Chinese)
- [16] 许春雪, 袁建, 王亚平, 王苏明, 代阿芳. 沉积物中磷的赋存形态及磷形态顺序提取分析方法[J]. 岩矿测试, 2011, 30(6): 785-794. XU Chunxue, YUAN Jian, WANG Yanping, WANG Supeng and DAI Afang. Speciation and release mechanism of phosphorus in sediments and analysis methods for sequential extraction. Rock and Mineral Analysis, 2011, 30(6): 785-794. (in Chinese)
- [17] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(1): 15-20. LI Yue, WU Danian and XUE Yongxian. A development sequential extraction method for different forms of phosphorus in the sediments and its environmental geochemical significance. Marine Environmental Science, 1998, 17(1): 15-20. (in Chinese)
- [18] 金相灿, 庞燕, 王圣瑞. 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 Xiangcan, PANG Yan and WANG Shengrui. Phosphorus forms and its distribution character in sediments of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Journal of AgroEnvironment Science, 2008, 27(1): 279-285. (in Chinese)
- [19] RYDIN, E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. Water Research, 2000, 34(7): 2037-2042. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00375-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00375-9)
- [20] SCHULZ, S., CONRAD, R. Influence of temperature on pathways to methane production in the permanently cold profundal sediment of Lake Constance. FEMS Microbiology Ecology, 1996, 20(1): 1-14. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1996.tb00299.x>
- [21] 闫兴成, 王明玥, 许晓光, 等. 富营养化湖泊沉积物有机质矿化过程中碳、氮、磷的迁移特征[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 306-313. YAN Xingcheng, WANG Mingyue, XU Xiaoguang, et al. Migration of carbon, nitrogen and phosphorus during organic matter mineralization in eutrophic lake sediments. Journal of Lake Science, 2018, 30(2): 306-313. (in Chinese)
- [22] 张奇, 喻庆国, 王胜龙, 等. 滇西北剑湖沉积物磷形态、空间分布及释放贡献[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10): 3792-3803. ZHANG Qi, YU Qingguo, WANG Shenglong, et al. Phosphorus fractions, spatial distribution and release contributions in sediments of Jianhu Lake, Northwestern Yunnan Plateau, China. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(10): 3792-3803. (in Chinese)
- [23] HIJLTJES, A. H., LIJKLEMA, L. Fractionation of inorganic phosphorus in calcareous sediments. Journal of Environmental Quality, 1980, 8: 130-132.
- [24] GOLTERMAN, H. L. Sediments, modifying and equilibrating factors in the chemistry of freshwater. Verhandlungendes Internationalen Verein Limnologie, 1984, 22: 23-59. <https://doi.org/10.1080/03680770.1983.11897265>
- [25] GOLTERMAN, H. L. Differential extraction of sediment phosphates with NTA solution. Hydrobiology, 1982, 91-92(1): 683-687. <https://doi.org/10.1007/BF02391983>
- [26] 张义, 刘子森, 张垚磊, 等. 环境因子对杭州西湖沉积物各形态磷释放的影响[J]. 水生生物学报, 2017, 41(6): 1354-1361. ZHANG Yi, LIU Zisen, ZHANG Yaolei, et al. Effects of varying environmental conditions on release of sediment phosphorus in West Lake, Hangzhou, China. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(6): 1354-1361. (in Chinese)
- [27] 周启星, 俞洁, 陈剑, 等. 某城市湖泊中磷的循环特征及富营养化发生潜势[J]. 环境科学, 2004, 25(5): 138-142. ZHOU Qixing, YU Jie, CHEN Jian, et al. Cycling characteristics of phosphorus in an urban lake and its eutrophication potentiality. Environmental Science, 2004, 25(5): 138-142. (in Chinese)
- [28] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2003, 33(8): 760-780. FANG Chengxin, ZHANG Lu, QIN Boqiang, et al. Estimation of dynamic release of phosphorus from suspended particles in Lake Taihu under wind and waves. Scientia Sinica D Earth Science, 2003, 33(8): 760-780. (in Chinese)
- [29] 王晓蓉, 华兆哲, 徐菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996, 15(1): 15-19.

WANG Xiaorong, HUA Zhaozhe, XU Ling, et al. Influence of environmental condition changes on phosphorus release from sediment in Lake Taihu. *Environmental Chemistry*, 1996, 15(1): 15-19. (in Chinese)

- [30] 袁轶君, 刘娜娜, 陈传红, 黄德娟, 徐将, 毕永红. 环境因子对鄱阳湖沉积物中内源磷释放的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(5): 227-235.

YUAN Zhijun, LIU Nana, CHEN Chuanhong, HUANG Dejuan, XU Jiang and BI Yonghong. Effects of environmental factors on the release of endogenous phosphorus in Poyang Lake sediments. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(5): 227-235. (in Chinese)