

东湖沉积物中氮磷形态分布的研究

孟春红, 赵冰

(武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072)

摘要: 武汉东湖是具有代表性的城市浅水型湖泊. 在 2004 年采用现场调查、布点检测和实验室化学性质分析等方法, 对东湖西南部的子湖——庙湖的沉积物柱芯的氮和磷进行了形态分析, 对其垂直剖面分布和季节性变化进行了调查. 研究表明, 沉积物中氮的赋存特征和变化规律为: 总氮平均含量 $1.62 \sim 3.17 \text{ g/kg}$, 在垂直剖面上表现为随沉积深度的增加而降低的趋势; 其含量随季节变化有周期性的规律, 春季沉积物中总氮的含量是 1 a 中最少的, 夏季开始增加, 秋冬季总氮量达到最大. 因受沉积物总氮和埋藏环境的双重影响, 沉积物中铵态氮平均含量的季节性变化规律与总氮相似, 春季铵态氮的含量最少为 117.66 mg/kg , 夏秋季含量达到最大为 216.20 mg/kg , 冬季稍有减少. 沉积物中各形态磷的垂直赋存特征为: 在 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 沉积深度内, 总磷(TP)含量 $0.255 \sim 3.36 \text{ g/kg}$ 、不稳态磷(LP)含量 $0.192 \sim 11.00 \text{ mg/kg}$ 、铁结合磷(Fe-P)含量 $13.47 \sim 1379.94 \text{ mg/kg}$ 和铝结合磷(Al-P)含量 $7.77 \sim 317.64 \text{ mg/kg}$, 均有明显的“表层富积”现象, 其含量随深度的增加而迅速减少, 通常 $> 10 \text{ cm}$ 后这些磷形态的含量保持稳定. 结果表明, 造成湖泊水体富营养化的污染源有外源和内源, 当外源截污后, 内源沉积物中的营养盐仍可能使湖泊处于富营养化状态; 磷仍然是东湖最主要的限制性营养元素, 春季湖区沉积物中铁结合磷比例最大, 占沉积物 TP 的 44.30% , 说明庙湖水域污染程度严重.

关键词: 东湖; 沉积物; 营养盐; 垂向分布; 富营养化

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)07-1831-07

Vertical Distribution of Species of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments of Donghu Lake

MENG Chun-hong, ZHAO Bing

(College of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Donghu Lake is a typical urban shallow lake. Miaohu Lake was analyzed in Southwest of Donghu Lake. Characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment cores were analyzed and assessed with investigation and chemical analysis in laboratory in 2004. Vertical distributions and seasonal changes of nitrogen and phosphorus chemical species in the sediments of two sampling sites were examined and analyzed. The results showed that concentration of TN decreased with the increase of sediment depth and the concentration of the mean TN was $1.62\text{--}3.17 \text{ g/kg}$. The concentration of TN reached its minimum in spring, and began to increase in summer. The concentration of TN reached its maximum till autumn and winter. Dissolved ammoniac nitrogen (DAN) was controlled by both the content of TN and the sediment environment, so the vertical profiles and seasonal changes of DAN presented the same trend as those of TN. The lowest concentration of DAN was 117.66 mg/kg in spring, and the highest concentration of DAN was 216.20 mg/kg in summer and autumn. It was decreasing in winter. Vertical profiles of phosphorus species showed that total phosphorus (TN), labile phosphorus (LP), Al- and Fe- bound phosphorus (Al-P, Fe-P) were characterized by a similar distribution pattern and enrichment in the upper $0\text{--}10\text{cm}$ sediment layers. The concentration decreased steeply within 10cm sediment layers, then it became steady. The concentration of TP, LP, Fe-P and Al-P was $0.255\text{--}3.36 \text{ g/kg}$, $0.192\text{--}11.00 \text{ mg/kg}$, $13.47\text{--}1379.94 \text{ mg/kg}$ and $7.77\text{--}317.64 \text{ mg/kg}$, respectively. The results indicate that sources of pollution which cause water body in the lake eutrophication have the extraneous source and the internal one. After the extraneous sources are truncated, nutrient salt in sediments still possibly causes the lake to be at the eutrophication condition. Phosphorus is the most restricting nutritious element in Donghu Lake. The proportion of Fe-P is the biggest in spring and its proportion is 44.30% . These show that pollution is serious in Miaohu Lake.

Key words: Donghu Lake; sediments; nutrition; vertical distribution; eutrophication

东湖($30^{\circ}22'N$, $114^{\circ}23'E$)位于武汉市武昌区东北部, 是长江中游一个中型浅水湖泊, 水域面积在水位 20.5 m 时为 27.899 km^2 , 流域面积约 187 km^2 , 平均水深约 2.21 m , 最大水深 $4.75 \text{ m}^{[1]}$. 自 20 世纪 60 年代以来, 随着工农业的迅速发展和居民人口的大量增加, 东湖受到人类活动的干扰和影响越来越大, 水体富营养化严重. 从防止湖泊富营养化继续发展的角度来看, 外源性营养物质被控制之后, 沉积物中

的氮磷仍然可以通过间隙水与上覆水进行物理、化学和生物的交流作用. 沉积物中氮磷等的分布特征已被证实与湖泊内源负荷有直接关系^[2,3]. 因此, 研究沉积物中氮磷的含量, 对阐明水生态系统中氮磷

收稿日期: 2007-07-27; 修订日期: 2007-09-18

基金项目: 中国博士后科学基金项目(205-180387); 国家自然科学基金项目(50279049)

作者简介: 孟春红(1972 ~), 女, 博士后, 主要研究方向为水资源与环境, E-mail: mengch@126.com

的循环、转移和积累的过程,以及在防止富营养化、控制“内负荷”方面都具有十分重要的意义^[4~6].一般认为,营养盐的生物有效性与其形态密切相关,已有文献对沉积物中的氮、磷含量进行了研究,但大多是对营养盐总量的测定,对沉积物中营养盐的不同形态进行的研究较少,将不同形态营养盐的垂向分布与环境因子相结合进行综合研究更少.

Tang等^[7]在1999年对东湖营养盐的收支及底泥中氮、磷含量进行研究的结果,同80年代初张水元等^[8]的研究相比,显示东湖磷外源负荷为2.97 g/(m²·a),增加了1.13倍;东湖磷内源负荷1.72 g/(m²·a),比80年代初的磷内源负荷0.35 g/(m²·a),增加了4.91倍.在1997年10月~1998年9月期间,东湖每年约有79.5t的磷在湖内积累下来^[9],特别是水果湖、庙湖的西南湖区水域水体的污染尤为严重,水果湖经过挖泥船清除底质后,水质已达到Ⅴ级,庙湖就成了子湖污染最严重的代表性湖泊.根据王雨春等^[10]对高原深水湖泊红枫湖和高丽等^[11]对滇池总氮剖面分布研究结果表明,均出现了明显的表层富积现象.红枫湖总氮浓度 $\omega(\text{TN})$ 为3.6~4.0 g/kg,表层浓度 $\omega(\text{TN})$ 为4~10 g/kg;滇池表层总氮浓度 $\omega(\text{TN})$ 为4.33~8.67 g/kg,均高于庙湖的总氮浓度,表明庙湖的总氮在沉积物中的“表层富积”现象,没有像深水湖泊那么严重.这些可为全面认识、评估、预测、治理东湖沉积物氮的赋存特征和变化规律,以及磷诱发湖泊富营养化风险评估提供依据.

本研究以武汉东湖西南部的庙湖为对象,在湖区中选取泥层较厚的软泥区,取位置A和B2个点(其地理分布见图1)采集沉积物柱芯和界面上覆水样品.武汉东湖的底质主要为重粘土和腐质泥,平均厚度为0.5 m.特别是东湖的子湖——庙湖的水体污染最为严重,大量营养盐沉积于湖底的沉积物中.东湖近十几年来经过改造已截断20条污水管道的点源污染,约占70%的污水首先送往沙湖、二郎庙、龙王嘴等3座污水处理厂达标后再送回东湖,这样使东湖的子湖——郭郑湖、汤林湖、水果湖、鹰窝湖的水质分别达到Ⅳ级、Ⅴ级,只有庙湖水质仍然停留在劣Ⅴ类,因此,特选择庙湖水域为研究水体,其中A点处于庙湖与郭郑湖相接的桥洞附近,受水流、风流影响较大,沉积物的性质与其他采样点相差较大;B点附近有开垦的农田,受面源污染和人类活动干扰较大.取不同影响情况下的底质样品进行研究,以为为下一步的湖区治理提供科学依据.

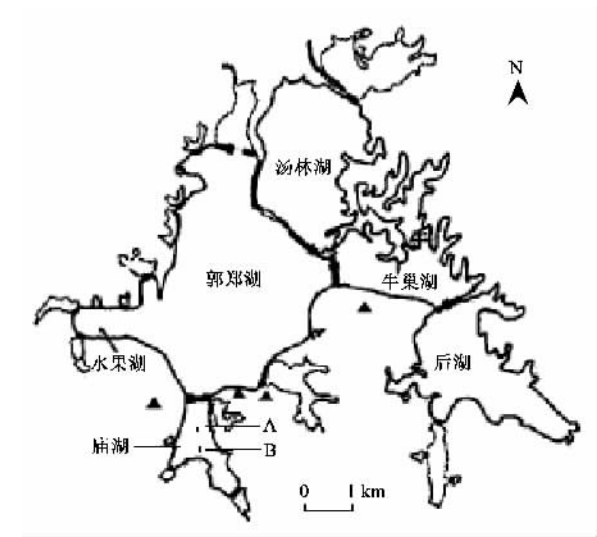


图1 东湖研究区域和采样点
Fig.1 Location of sample site in Donghu Lake

1 材料与方法

1.1 样品的采集和制备

分别于2004年的4、6、10和12月,在东湖西南部的庙湖湖区采集沉积物柱芯和上覆水样品,如图1中A和B所示.沉积物柱芯每个位置采30 cm,在现场按2 cm间隔分截,样品用聚乙烯袋分装密封,带回实验室分析.用虹吸法吸取采样装置内的上覆水,现场加H₂SO₄调节pH<2,带回实验室后冷藏保存;沉积物样品在室内自然风干,研磨后过100目筛.

1.2 研究方法

上覆水中各种水质指标的分析均按照国家水质分析标准进行^[12].沉积物中氮磷形态的测定,均根据文献[12]中的有关规定.总氮(TN)用半微量凯氏法进行测定;铵态氮的测定采用KCl浸提-蒸馏法;总磷(TP)用硫酸-高氯酸消解,钼锑抗比色法分析.每个样品均重复测定2次.沉积物中磷有不同的化学结合态,它决定了磷对环境和生物's潜在效应,以文献[12]中提出的形态分析提取步骤为基础,以不同的试剂和方法依次分离出磷的各种化学形态.

2 结果与讨论

2.1 沉积物中氮形态的分布特征

2.1.1 沉积物中总氮的分布特征

根据东湖沉积物柱状样品中总氮含量分析统计(见表1)和总氮垂直剖面分布特征(见图2)可知,东湖沉积物中总氮的平均含量为1.62~3.17 g/kg,各样点的总氮含量随沉积深度的增加而降低,中间有

表 1 沉积物总氮含量统计表/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 1 Concentration of TN in sediments of two sample sites/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

庙湖地点	采样时间 /年-月	最大值	最小值	平均值 (0~30 cm)	表层平均值 (0~10 cm)	底层平均值 (20~30 cm)	表、底层 差值
位置 A	2004-04	3.13	1.42	2.09	2.45	1.60	0.85
	2004-06	3.20	1.98	2.67	2.81	2.38	0.43
	2004-10	4.23	2.11	2.63	3.25	2.38	0.87
	2004-12	4.58	2.00	3.11	3.17	2.58	1.13
位置 B	2004-04	2.19	0.80	1.62	2.03	1.02	1.01
	2004-06	2.68	1.07	1.87	2.25	1.34	0.91
	2004-10	3.74	2.81	3.17	3.39	2.95	0.44
	2004-12	3.38	1.53	1.94	2.07	1.99	0.37

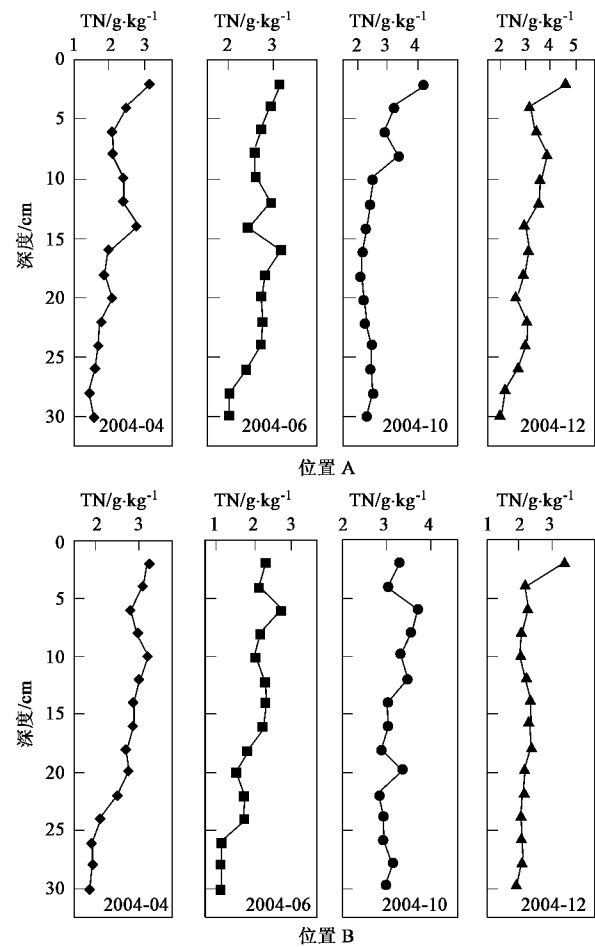


图 2 沉积物总氮含量剖面分布

Fig.2 Vertical section of TN in sediments of two sample sites

个别点出现起伏,但总体趋势是表层沉积物的总氮含量高于底层.这说明庙湖沉积物氮负荷在近年受人为影响有所加重.

观察图 2(位置 A)可以看到,在沉积物的剖面分布上有 1 个起伏明显的层,而且该层随季节变化出现上移的情况:4 月位于 12~22 cm,6 月位于 10~16

cm,10 月升至 10 cm 以上,12 月升至 5 cm 表层.然而,同期采样的位置 B 未观测到类似的情况.

夏季沉积物中 TN 含量较春季高,这与上覆水中夏季含量较低的情况对应,可以推测夏季沉积物为水体中氮元素的汇.秋季位置 B 总氮大幅度增加的原因可能是由于大量繁殖的水生生物死亡后的残体沉积于湖底所致.秋季位置 A 总氮减少的原因可能是死亡的生物矿化分解消耗大量的溶解氧,导致秋季的湖底溶解氧极少,沉积物处于还原环境,促进了厌氧反硝化作用的进行,最终导致氮元素以 N_2O 和 N_2 等气体形式散逸进入大气氮循环中,脱离了湖泊水系统^[13~16].

2.1.2 沉积物中铵态氮的分布特征

本实验中的铵态氮主要指可交换态 NH_4^+-N ,它能够直接被初级生产者吸收用于光合作用,并且通过分子扩散可以迅速在溶液介质中迁移,成为沉积物和上覆水体之间氮素交换的主要方式,因此该形态氮对湖泊环境具有重要的生态意义^[17,18].

由图 3 中沉积物铵态氮剖面分布和表 2 中铵态氮含量统计可见,沉积物 NH_4^+-N 剖面含量在 47.83~238.1 mg/kg 之间,占总氮含量的 2.25%~12.95%.春季沉积物中铵态氮的含量是一年中最低的,且上下层含量差较大;夏季沉积物中铵态氮含量明显增加^[19~21].

这种季节变化规律可能是因为春季上覆水中溶解氧含量较高,并能渗透到沉积物深层,沉积物中的氧化环境使各种好氧微生物的活动增加,沉积物中有机质可以被矿化、分解,沉积物开始蓄积铵态氮,尽管硝化作用可以使一部分铵态氮转化为硝态氮,但由于表层沉积物的总氮含量较高,因此上部沉积物仍能维持铵态氮较高含量,表现为上层铵态氮含量高于下层.到夏季受高温及微生物活动的影响,沉

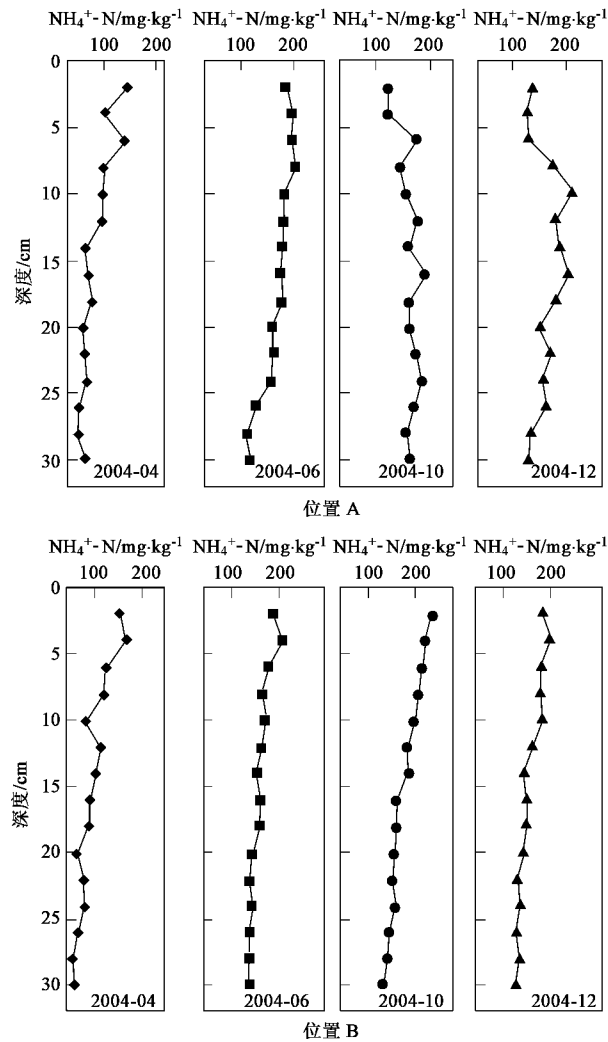


图3 沉积物铵态氮剖面分布

Fig.3 Vertical section of DAN in sediments of two sample sites

表2 沉积物铵态氮含量统计表/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Concentration of DAN in sediments of two sample sites/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
庙湖地点	采样时间/年-月	表层平均值(0~10 cm)	底层平均值(20~30 cm)	平均值(0~30 cm)	平均含量占总氮的质量分数/%
位置 A	2004-04	117.66	57.69	82.57	3.29
	2004-06	192.13	131.31	165.26	6.19
	2004-10	144.40	167.98	160.71	6.43
	2004-12	155.84	147.97	161.21	5.32
位置 B	2004-04	128.43	65.77	94.99	5.97
	2004-06	183.34	139.99	160.15	9.04
	2004-10	216.20	145.05	176.74	5.57
	2004-12	184.18	130.03	154.43	7.11

TP 含量随着沉积深度的增加而迅速下降,降幅达 53.44%~79.72%,表层含量明显高于下部,表现出明显的“表层富积”现象,此范围内 TP 的平均含量为 1.09~1.96 g/kg.达到一定沉积深度后 TP 含量相对稳定,垂直方向上的变化量在 0.119~0.538 g/kg,下部(20~30 cm)平均含量为 0.444~0.791 g/kg.

TP 的这种“表层富积”现象是一种普遍存在的

积物中有机氮矿化再生,使铵态氮达到较高的水平.秋季位置 A 由于大量死亡的生物矿化分解消耗了大量的溶解氧,沉积环境变为强烈的还原环境,由此促进了反硝化作用的进行,该反应主要集中在表层,导致表层氮元素通过反硝化作用转化为 N_2O 和 N_2 等气体形式脱离湖泊系统,因此上层铵态氮的含量低于春季含量,也低于同季下层的含量.位置 B 铵态氮的平均含量在秋季达到最大,但占总氮的比例与夏季相比却略有减少,这也证明了由于反硝化作用导致了铵态氮的损耗,只是由于该处总氮含量较高,因此导致铵态氮的绝对量有所增加;冬季铵态氮与秋季相比, A 位置基本持平, B 位置略有减小^[22~25].

2.1.3 各因子之间的相关性分析

沉积物 TN 含量与 DO 之间呈负相关,与沉积物 NH_4^+-N 含量呈正相关,这说明沉积物 TN 含量受埋藏环境和沉积物 NH_4^+-N 含量的双重作用.沉积物 NH_4^+-N 含量与电导呈负相关,这可能是由于湖泊中的阴离子可以与 NH_4^+ 形成离子对,部分中和 NH_4^+ 的极性,从而降低沉积物颗粒对铵根离子的吸附能力.

2.2 沉积物中磷形态的垂直分布特征

2.2.1 沉积物中总磷的垂直分布特征

图 4 是庙湖湖区四季沉积物样品中总磷(TP)含量的垂直剖面分布图.结果表明,沉积物中总磷的剖面含量在 0.255~3.36 g/kg,平均为 0.773~1.07 g/kg.TP 在垂直剖面上呈阶段性变化,在 0~10 cm

现象,部分学者根据沉积速率,认为这主要是因为近年来污染严重导致沉积物表层磷含量的剧增.考虑到东湖变化的历史,导致庙湖湖区总磷“表层富积”的最主要原因是近 40 a 来受到人类活动的影响,大量污染物受沉积作用累积于上层^[26~29].

2.2.2 沉积物中各种磷形态的垂直分布特征

不稳态磷(LP),又被称为 NH_4Cl 提取磷.主要指

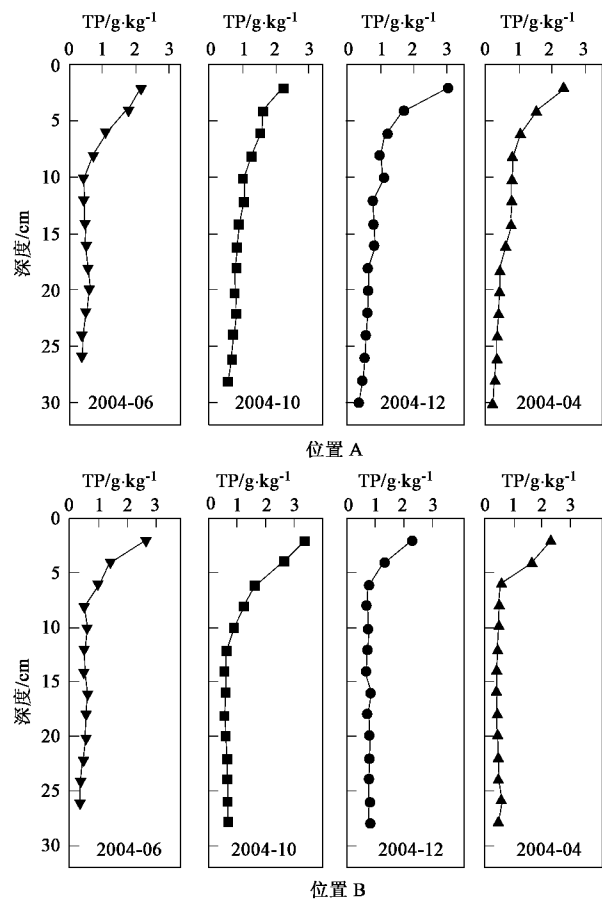


图 4 沉积物四季总磷含量剖面分布

Fig.4 Vertical section of TP in four seasons in sediments of two sample sites

被沉积物矿物颗粒表面吸附的磷酸盐. LP 的含量虽然很小,但沉积物产生磷释放时,首先释出这部分磷,并可方便地被水生生物吸收利用.

根据图 5 对 LP 的垂直剖面含量进行分析,在 0 ~ 30 cm 的范围内 LP 的含量在 0.19 ~ 11.0 mg/kg 之间,平均为 1.12 ~ 4.17 mg/kg. 与 TP 的变化趋势类似,LP 也有“表层富积”现象,0 ~ 10 cm 范围内 LP 含量随着沉积深度的增加迅速下降,降幅达 54.58% ~ 92.53%,下降曲线比较光滑.在沉积深度大于富积层之后,LP 含量相对稳定,但在此稳定阶段之初 LP 在某一沉积深度会出现峰值,夏季位置 A 在 12 cm 处出现的峰值为 3.54 mg/kg,高于稳定阶段的平均含量 1.84 mg/kg;春季在 14 cm 处出现的峰值为 2.81 mg/kg,高于稳定阶段的平均含量 1.36 mg/kg;秋季在 8 cm 处出现的峰值为 0.793 mg/kg,略低于稳定阶段的平均含量 0.901 mg/kg;冬季在 12 cm 处出现的峰值为 1.00 mg/kg,略低于稳定阶段的平均含量 1.39 mg/kg.夏季位置 B 增大的峰也出现在 12 cm

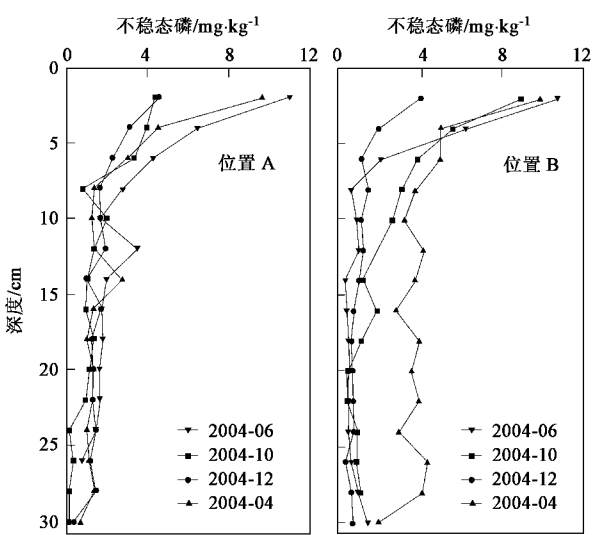


图 5 沉积物不稳态磷四季含量剖面分布

Fig.5 Vertical section of LP in four seasons in sediments of two sample sites

处,秋季减小的峰出现在 12 cm 处,冬季增大的峰在 8 cm 处,春季的垂向分布比较特殊,0 ~ 4 cm 是它的富积阶段,6 ~ 30 cm 的分布波动较大,但变化范围稳定在 2 ~ 4 mg/kg 之间.

铝结合态磷 (Al-P), 又被称为 NH_4F 提取磷. Al-P 的含量分布受很多因素影响,如沉积物粒度、沉积物粘度、形成时间和沉积物成因等.对 Al-P 的垂直剖面进行分析可知,在 0 ~ 30 cm 的范围内 Al-P 的含量在 7.77 ~ 317.64 mg/kg 之间,平均为 32.3 ~ 72.2 mg/kg. Al-P 也有“表层富积”现象,富积层在 6 ~ 12 cm 的沉积物表层,在此范围内 Al-P 含量随沉积深度的增加迅速下降,降幅达 47.28% ~ 92.33%.在沉积深度大于富积层之后,Al-P 含量相对稳定,平均含量在 16.51 ~ 39.47 mg/kg.其中位置 A 秋季的富积现象不明显,春季在 12 ~ 16 cm 范围内有 1 个含量升高的峰,位置 B 秋季在 6 cm 处有 1 个含量增大的峰.

2.2.3 沉积物磷形态平均含量的季节变化规律
由表 3 可以看出沉积物的 TP 和各种磷形态含量有季节性变化规律:秋季沉积物 TP 达到最大,沉积物中的 Fe-P 也达到最大,而 OrgP (有机磷) 和 OcP (闭蓄态磷) 达到最小,对应此时水体 TP 含量最小,说明秋季沉积物是磷的汇,沉积物中磷的主要赋存形态是 Fe-P;冬、春季沉积物 TP 持续降低,释放活力较大的组分如 Fe-P、Al-P 等含量也降低或变化不大,而 OrgP 在冬季达到最大,对应冬季水体 TP 含量增加,说明此时存在沉积物向上覆水的磷释放,且释

放源很可能是 OrgP, 因为秋冬季死亡的水生生物沉积于湖底, 主要是以有机磷形式存在的; 春季沉积物释放了磷, 但水体 TP 没有对应增加, 这可能是由于水生生物开始生长, 进入水体的磷作为营养组成进入生物体内所致^[30].

A、B 两位置各磷形态的均值含量在四季的变化规律相似, 夏季 Fe-P > (OrgP, OcP) > (Al-P, Ca-P) > LP, 秋季 Fe-P > Ca-P > (OrgP, OcP) > Al-P > LP, 冬季 Fe-P > OrgP > (OcP, Ca-P) > Al-P > LP. 这种组分含量的季节性变化反映了沉积物中各种磷形态除与外界存在交换之外, 其各组分之间也可能存在动态的相互转化.

表 3 沉积物各种磷形态的四季平均值/mg·kg⁻¹

Table 3 Mean concentration of phosphorus in four seasons in two sample sites/mg·kg ⁻¹				
庙湖地点	项目	2004-06	2004-10	2004-12
位置 A	TP	773.1	1 045.3	952.9
	LP	3.17	1.50	1.78
	Al-P	70.58	54.85	32.32
	Fe-P	400.64	518.67	331.39
	Ca-P	58.18	136.55	147.65
	OcP	124.73	89.70	159.98
	OrgP	168.07	97.43	279.80
位置 B	TP	773.6	1 070.2	891.0
	LP	1.81	2.35	1.12
	Al-P	44.27	55.21	49.09
	Fe-P	287.67	570.46	371.69
	Ca-P	57.66	127.48	101.14
	OcP	126.74	94.48	158.55
	OrgP	129.74	89.53	223.46

3 结论

(1) 沉积物总氮含量在垂直剖面上表现为随沉积深度的增加而降低的趋势; 其含量随季节变化有周期性的变动: 春季沉积物中总氮的含量是 1 a 中最少的, 夏季沉积物中总氮开始增加, 秋冬季沉积物中总氮的含量达到最大.

(2) 沉积物铵态氮受沉积物总氮和埋藏环境的双重作用, 其季节性变化规律与总氮相似: 沉积物中春季铵态氮的含量最少, 夏秋季含量达到最大, 冬季稍有减少.

(3) 柱状沉积物中各形态磷的含量在垂直方向上有一定规律. TP、LP、Fe-P、Al-P 在 0 ~ 10 cm 有明显的表层富积现象, 其含量随沉积深度的增加而显著减少, 通常 > 10 cm 后各种磷形态的含量趋于稳定. Ca-P(钙结合态磷)、OrgP 和 OcP 随沉积深度的变化规律复杂.

(4) 湖区沉积物各种磷形态的年平均比例为 Fe-P > OrgP > OcP > Ca-P > Al-P > LP.

(5) 沉积物各种磷形态的平均含量有季节性变化规律: 秋季沉积物 TP 和 Fe-P 达到最大, 而 OrgP 和 OcP 达到最小, 对应此时水体 TP 含量最小, 说明秋季沉积物是磷的汇. 冬、春季沉积物 TP、Fe-P 和 Al-P 等含量持续降低, 而 OrgP 含量在冬季达到最大, 对应冬季水体 TP 含量增加, 表明沉积物 OrgP 可能是磷的源.

参考文献:

[1] 刘建康. 东湖生态学研究(一)[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 379-387.

[2] Garber K J, Hartman R T. Internal Phosphorus loading to shallow Edinbro Lake in northwestern Pennsylvania [J]. *Hydrobiologia*, 1985, **122**(1): 45-52.

[3] Lambertus I. Phosphorus accumulation in sediments and internal loading[J]. *Hydrobiol Bull*, 1986, **20**(1): 213-214.

[4] 黄清辉, 王东红, 王春霞, 等. 太湖梅梁湾和五里湖沉积物磷形态的垂向变化[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(2): 147-150.

[5] Jiang X, Jin X C, Yao Y, *et al.* Effects of oxygen on the release and distribution of phosphorus in the sediments under the light condition [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **141**: 482-487.

[6] 吴丰昌, 万国江. 泸沽湖沉积物-水界面扩散作用对上覆水体基本化学组成的影响[J]. *环境科学*, 1996, **17**(1): 10-12.

[7] Tang H, Xie P. Nitrogen and phosphorus of Lake Donghu[J]. *Acta Hydrobiol Sinica*, 1999, **23**(Suppl): 1-7.

[8] 张水元, 刘衢霞, 黄耀桐. 武汉东湖营养物质的主要来源[J]. *海洋与湖泊*, 1984, **15**(3): 203-213.

[9] 甘义群, 郭永龙. 武汉东湖富营养化现状分析及治理对策[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 278.

[10] 王雨春, 万国江. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、无机交换性氮和固定氮的赋存特征[J]. *湖泊科学*, 2002, **14**(4): 301-309.

[11] 高丽, 杨浩, 周健民. 滇池水体和沉积物中营养盐的分布特征[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(4): 1-4.

[12] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[13] 彭晓彤, 周怀阳. 海岸带沉积物中脱氮作用的研究进展[J]. *海洋科学*, 2002, **26**(5): 31-34.

[14] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. *环境科学*, 2000, **21**(2): 98-100.

[15] Wauer G, Gonsiorczyk T, Kretschmer K, *et al.* Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release[J]. *Water Research*, 2005, **39**(3): 494-500.

[16] Niu X J, Geng J J, Wang X R, *et al.* Temporal and spatial distributions of phosphine in Taihu Lake China [J]. *Sci Total Environ*, 2004, **323**: 169-178.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 1999.

[18] 古宾河. 美国 Apopka 湖的富营养化及其生态恢[J]. *湖泊科*

- 学, 2005, **17**(1): 1-8.
- [19] McDowell R W, Ssharpley A N. Phosphorus Solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration[J]. *Geoderma*, 2003, **112**: 143-154.
- [20] 周易勇, 李建秋, 陈旭东, 等. 东湖溶解态磷酶的活性、动力学特征及其空间分布[J]. *环境科学*, 1997, **18**(5): 37-41.
- [21] 施为光. 成都市径流污染的概念性模型[J]. *四川环境*, 1994, **13**(2): 65-70.
- [22] Xu F L, Tao S, Dawson R W, *et al*. The distributions and effects of nutrients in the sediments of a shallow eutrophic Chinese lake[J]. *Hydrobiologia*, 2003, **429**: 85-93.
- [23] 黎秉铭, 万国江, 江成忠, 等. 滇池、洱海水及沉积物中重金属元素的行为[J]. *环境科学*, 1995, **16**(2): 50-53.
- [24] 于常荣, 梁东梅, 曹喆, 等. 松花江鱼类汞污染现状研究[J]. *环境科学*, 1994, **15**(4): 35-38.
- [25] 国家环境保护总局. 2003 年中国环境状况公报[J]. *环境保护*, 2004, (7): 3-17.
- [26] 龚胜生. 江汉-洞庭湖平原湿地的历史变迁与可持续利用[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, **11**(6): 569-574.
- [27] 袁旭音, 陈骏, 陶于祥, 等. 太湖北部底泥中氮、磷的空间变化和环境意义[J]. *地球化学*, 2002, **31**(4): 321-328.
- [28] Collie J S, Richardson K, Steele J H. Regime Shifts can ecological theory illuminate the mechanisms [J]. *Progress in Oceanography*, 2004, **60**(2-4): 281-320.
- [29] Babel S, Fukushi K, Sitanrassamee B. Effect of acid speciation on solid waste liquefaction in anaerobic acid digester[J]. *Water Res*, 2004, **38**: 2417-2423.
- [30] Wauer G, Gonsiorczyk T, Kretschmer K, *et al*. Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release[J]. *Water Research*, 2005, **39**(3): 494-500.