

骆马湖东部沉积物中氮磷含量和碱性磷酸酶活性季节变化

徐德兰¹, 万 蕾¹, 高明侠¹, 宋新恒², 董 潇², 韩宝平^{1*}

(1.徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州 221008; 2.中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘 要:骆马湖是江苏省四大淡水湖泊之一,是南水北调东线工程重要蓄水库。2008年6月、10月及2009年4月对骆马湖东侧10个采样点的沉积物分层采样进行了分析,结果表明,骆马湖沉积物中,不同深度总氮含量变幅在0.13~2.91 mg·g⁻¹,平均(0.86±0.50) mg·g⁻¹,季节变化不显著;总磷含量变幅为0.03~0.41 mg·g⁻¹,平均(0.19±0.10)mg·g⁻¹,春季>夏季>秋季,季节变化显著;碱性磷酸酶活性最高为592.39 mg·kg⁻¹·h⁻¹,最低为44.59 mg·kg⁻¹·h⁻¹,平均(233.83±132.70)mg·kg⁻¹·h⁻¹,春季>夏季>秋季,季节变化显著,与总磷含量呈正相关。研究结果可初步揭示骆马湖沉积物中氮、磷和碱性磷酸酶的分布状况、变化规律,为骆马湖的治理与管理提供科学依据,为南水北调过水湖泊的水质安全问题提供参考。

关键词:骆马湖;沉积物;氮磷;碱性磷酸酶;季节变化

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)07-1387-06

Seasonal Variations of Nitrogen and Phosphorus Content and Alkaline Phosphatase Activity in Sediment in Eastern Shore of Luoma Lake, China

XU De-lan¹, WAN Lei¹, GAO Ming-xia¹, SONG Xin-heng², DONG Xiao², HAN Bao-ping^{1*}

(1. Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Luoma Lake is one of the four largest freshwater lakes in Jiangsu Province, China, and an important reservoir for the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project. The stratification sediment samplings at 10 monitoring points off eastern shore of Luoma Lake were taken and analysed in June and October, 2008, and April 2009. The seasonal variations in nitrogen and phosphorus content and activity of alkaline phosphatase was examined, and the relevance between phosphorus and alkaline phosphatase activity was analysed. Total nitrogen content in lake sediment at different depth varied from 0.13 mg·g⁻¹ to 2.91 mg·g⁻¹, averaged (0.86±0.50) mg·g⁻¹; No significant seasonal variations in total nitrogen content was detected. Total phosphorus content at different depth varied from 0.03 mg·g⁻¹ to 0.41 mg·g⁻¹, averaged (0.19±0.10)mg·g⁻¹, with the seasonal ranking of spring>summer>autumn ($P<0.05$). The alkaline phosphatase activity varied between 592.39 mg·kg⁻¹·h⁻¹ and 44.59 mg·kg⁻¹·h⁻¹, averaged (233.83 ±132.70)mg·kg⁻¹·h⁻¹, with the ranking of spring > summer > autumn ($P<0.05$). Total phosphorus content was positively related to alkaline phosphatase activity. Findings reveal the spatial and temporal distribution of nitrogen, phosphorus and alkaline phosphatase activity in sediment in the Luoma Lake, and provide baseline data for scientific decision make for the management of the lake.

Keywords: Luoma Lake; sediment; TN and TP; alkaline phosphatase; seasonal variation

收稿日期:2011-12-03

基金项目:江苏省住房和城乡建设厅科技计划项目(200906170001);住房和城乡建设部科技资助项目(2010-S1-13)

作者简介:徐德兰(1975—),男,安徽宿州人,博士,副教授,主要从事沉积物地球化学性质与植物修复方面的研究。E-mail:xdlxw@126.com

* 通讯作者:韩宝平 E-mail:bphan@xzit.edu.cn

沉积物是湖泊物理和化学诸多过程的综合结果,是氮、磷等生源要素的重要储藏库。碱性磷酸酶是一种专一性的磷酸酯水解酶,可以催化所有的磷酸酯的水解反应和磷酸基团的转移反应,因此,该酶在水生生态系统的磷循环,尤其是以微生物为主体的沉积物生态系统中应具有重要的功能^[1]和关键作用。目前,国外学者对湖泊沉积物氮、磷的形态、分布、季节变化等均有相关报道^[2-4],我国学者对太湖、东湖、滇池等湖泊沉积物中氮磷形态和含量及碱性磷酸酶已做过一些研究,如金相灿等^[5]研究了太湖东北部沉积物可溶性氮磷的季节性变化,周易勇等^[6-7]研究了武汉东湖和严西湖沉积物中碱性磷酸酶的动力学参数,孟春红等^[8]研究了东湖沉积物中氮磷形态分布,陈永川等^[9-10]分别研究了滇池沉积物中氮、磷的时空变化特征。但是,对骆马湖这个典型的浅水湖泊沉积物中氮磷含量及碱性磷酸酶的性质,却少见报道。

本文研究了骆马湖沉积物中氮磷含量和碱性磷酸酶活性在不同深度的分布变化,分析了其季节变化特征,及酶活性与磷含量的相关性。研究底泥中氮磷含量和碱性磷酸酶活性的季节变化规律,对于控制内源污染,防治水体富营养化具有重要的意义。研究结果可初步揭示骆马湖沉积物中氮、磷和碱性磷酸酶的分布状况、变化规律,为骆马湖的治理与管理提供科学依据,为南水北调过水湖泊的水质安全问题提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

骆马湖(N:34°00′~34°11′,E:118°06′~118°18′)是江苏省四大淡水湖泊之一,位于江苏省北部,京杭大运河中段,上接山东省南四湖,下接江苏省洪泽湖,水域面积达 35 100 hm²(丰水面积 78 500 hm²,枯水面积 20 100 hm²),湖底高程 18~21 m,当蓄水位 23.0 m 时(古黄河基地),平均水深 3.32 m,最深等深线东南部水深 5.5 m,年水位涨幅在 1.90~5.73 m,年换水次数在 10 次左右,是典型过水性湖泊。

本研究采样点位于骆马湖东侧区域,距离骆马湖湖滨浴场 4~6 km。共设 10 个采样点,布设情况如图 1 所示。3 次采样时间分别为:2008 年 6 月 29 日(夏季)、2008 年 10 月 24 日(秋季)、2009 年 4 月 18 日(春季)。冬季由于风浪较大,没有采样。

对骆马湖沉积物的研究,采用柱状采样器(直径为 8 cm)采集沉积物,自上而下(厚度分别为 3、3、5

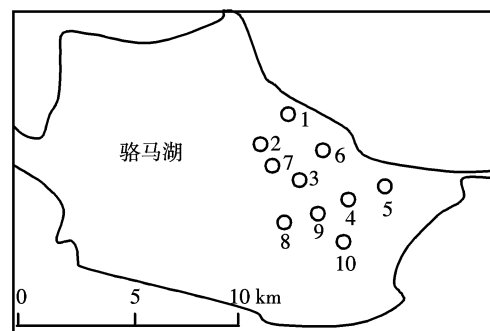


图 1 骆马湖取样点位图

Figure 1 Sampling Sits of Luoma Lake

cm) 分层,将采集的沉积物放入塑料袋中带到实验室,在 40 ℃烘箱中烘干、研磨、过 100 目筛后放入塑料袋中待用。采样同时测定各采样点水体表层的 pH 值(PHS-3C 型便携 pH 计)、水温(温度计)、透明度(塞氏盘)、氧化还原电位(HANNAHI8242 氧化还原电位仪)、溶解氧(YSI DO200 型溶解氧测量仪)等数据。

1.2 分析方法

沉积物需在 40 ℃烘箱中烘干,经碾钵碾磨,将磨细沉积物过 100 目筛待用,沉积物中总氮、总磷的测定分别为微量凯氏定氮法和 H₂SO₄-HClO₄ 消解钼锑抗比色法。

碱性磷酸酶的测定参考文献[11],以 PNPP 为底物,和 Tris 反应,NaOH 中止反应,420 nm 测定吸光度,碱性磷酸酶活性以每克沉积物干样生成的对硝基酚(P-NP)的量表示,单位 mg·kg⁻¹·h⁻¹。

1.3 数据分析方法

采用 SPSS13.0 软件对数据进行相关性分析和单因素方差分析及显著性检验,其中显著性差异 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 采样点上覆水基本理化指标

采样期间各点的透明度、氧化还原电位、水温、pH 值、DO 等指标的变化见表 1。可以看出,骆马湖上覆水 6 月底水温在 25 ℃左右,10 月下旬 19 ℃左右,4 月中旬 16 ℃左右。春、夏季的透明度高于秋季,除 6 月底的 5 点和 8 点以外,春、夏季的透明度均在 1 m 以上,而 10 月下旬的透明度均在 1 m 以下。氧化还原电位变幅在 87.7~196.4 mV 之间,平均 150.4 mV。pH 值在 7.5~9.13 之间变化,溶解氧含量较高,在 5.13~9.32 mg·L⁻¹ 之间变化。

表 1 采样点上覆水的基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of overlying water in Luoma Lake

时间	点位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
夏季 (2008 年 6 月 29 日)	透明度/cm	141	243	239	281	85	176	135	96	106	143
	氧化还原电位/mV	124.8	134.1	136.5	142.7	150.8	139.5	87.7	105.2	102.6	153.5
	水温/℃	26.2	26.3	26.1	27.0	26.2	24.4	25.0	25.7	25.9	25.6
	pH 值	8.57	8.71	8.89	9.13	8.05	7.50	8.21	7.98	8.39	8.56
	透明度/cm	93	83	88	94	83	63	73	87	81	84
秋季 (2008 年 10 月 24 日)	氧化还原电位/mV	149.3	163.5	155.7	160.7	143.7	159.5	176.8	165.9	159.1	169.3
	水温/℃	19.3	19.5	19.7	19.7	19.4	18.9	19.4	19.3	18.9	19.5
	pH 值	8.24	8.22	8.32	8.25	8.23	8.24	8.21	8.18	8.32	8.21
	DO/mg·L ⁻¹	9.08	8.68	9.32	7.13	5.13	8.72	8.59	8.42	7.84	7.52
	透明度/cm	160	160	157	149	153	147	158	144	164	151
春季 (2009 年 4 月 18 日)	氧化还原电位/mV	196.4	184.1	167.4	137.5	144.3	160.7	167.1	150.2	183.3	140.7
	水温/℃	16.2	16.2	16.1	16.4	16.4	16.1	16.0	16.1	16.2	16.3
	pH 值	8.43	8.46	8.48	8.46	8.39	8.31	8.41	8.41	8.38	8.14
	DO/mg·L ⁻¹	8.21	8.44	8.66	8.78	8.29	8.85	7.43	7.65	7.35	7.13

2.2 沉积物中氮元素含量季节变化特征

骆马湖沉积物中各点位的总氮含量变化见图 2。可以看出,骆马湖各个季节不同采样点不同深度的沉积物中,总氮含量最高为 2.91 mg·g⁻¹,最低为 0.127 mg·g⁻¹,平均(0.86±0.50)mg·g⁻¹。不同季节沉积物中总氮含量不同,春季含量最高,秋季次之,夏季含量最

低。在夏季,表层总氮含量最高,次表层次之,略高于第三层,沉积物总氮含量最低值出现在 1 号点的第三层,最高值出现在 10 号点的表层;在秋季,垂向变化不明显,次表层略高于表层,高于第 3 层,最低值出现在 3 号点的表层和 5 号点的第三层,均为 0.48 mg·g⁻¹,最高值为 8 号点的表层;在春季,表层>第三层>次表

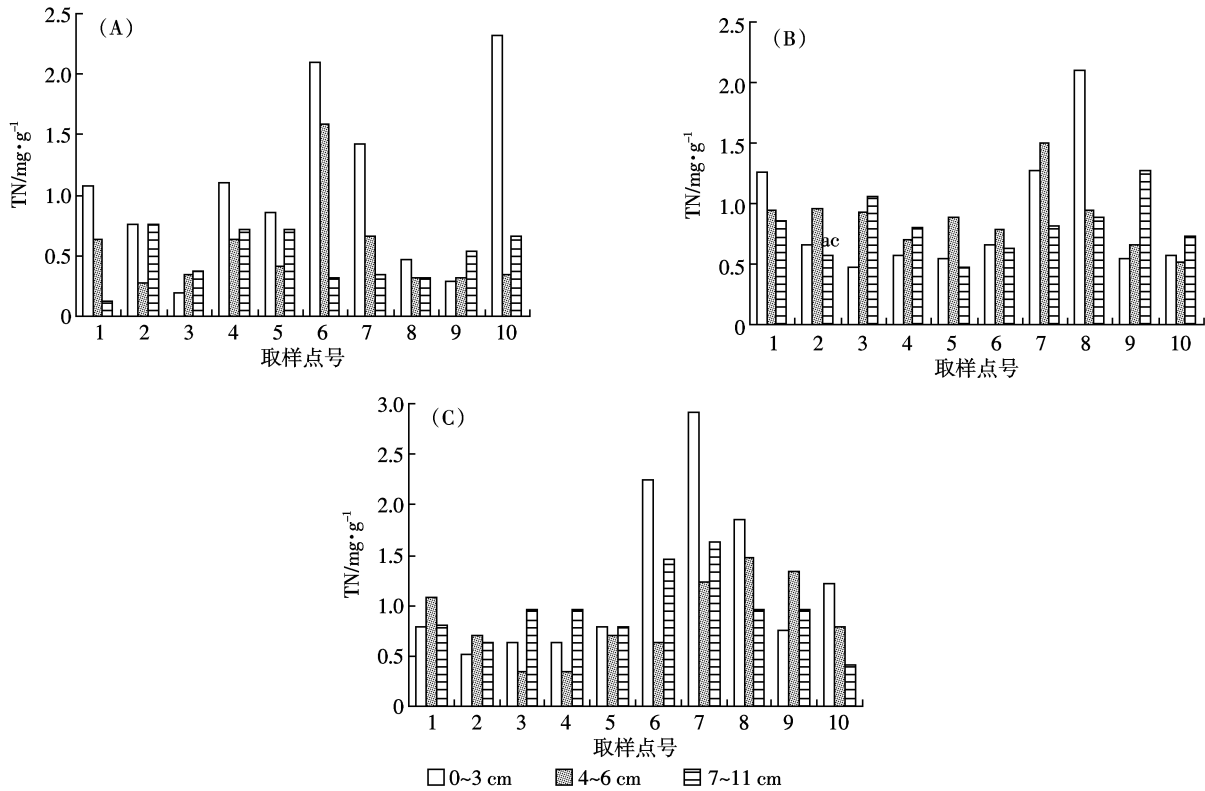


图 2 骆马湖夏季(A)、秋季(B)和春季(C)沉积物中 TN 含量垂向变化
Figure 2 TN content in different depths in Luoma Lake sediment of summer(A), autumnn(B) and spring(C)

层,最低值出现在 3 号和 4 号点的次表层,均为 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最高值出现在 7 号点的表层。

经方差分析可知,夏、秋、春季沉积物的氮含量变化差异不显著($P \approx 0.05$)。10 个采样点位季节平均,表层总氮含量最高,次表层次之,略高于第三层。据美国 EPA^[12]中沉积物 TN 污染的评价标准($<1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,为清洁; $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时为轻污染; $>2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时为重污染),骆马湖大部分点位为清洁和轻污染状态。在太湖东北部,不同采样点不同季节沉积物的总氮含量年均值在 $1.31 \sim 2.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间变化^[5],滇池沉积物(0~20 cm)总氮平均含量为 $4.91 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[9],可见,骆马湖东侧沉积物中氮元素含量与太湖相当,低于滇池。

2.3 沉积物中磷元素含量季节变化特征

骆马湖沉积物中各点位的总磷含量变化见图 3。可以看出,骆马湖各个季节不同采样点不同深度的沉积物中,总磷含量最高为 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最低为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,平均 $(0.19 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。与总氮不同,沉积物中总磷变化为春季>夏季>秋季,各个季节均为表层>次表层>第三层。夏季,最低值出现在 6 号点的次表层,最高值出现在 2 号点的表层;秋季,最低值为 2 号点的第三层和 9 号点的次表层,最高值为 1 号点的表层;春季,最低值为 6 号点的第三层,最高值为 10 号点的表层。经方差分析,夏、秋、春季 3 层沉积物的磷含量变化差异显著($P < 0.05$),可能与植物生长和微生物活动的季节周期变化有关。表层总磷含量变幅在 $0.05 \sim 0.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,最低值和最高值分别为秋季的 2 号点和春季的 10 号点位;次表层在 $0.03 \sim 0.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,最低值和最高值分别为秋季的 2 号点和春季的 8 号点;第三层在 $0.03 \sim 0.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,最低值和最高值分别为秋季的 2 号点和春季的 2 号点。

在太湖东北部,不同采样点不同季节沉积物的总磷含量年均值在 $0.37 \sim 0.79 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间变化^[5],滇池沉积物(0~20 cm)总磷平均含量为 $2.17 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[10],骆马湖东侧沉积物中磷元素含量低于太湖和滇池。

2.4 沉积物中碱性磷酸酶活性季节变化特征

骆马湖沉积物中各点位的碱性磷酸酶活性变化见图 4。可以看出,骆马湖各个季节不同采样点不同深度的沉积物中,碱性磷酸酶活性最高为 $592.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,最低为 $44.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,平均 $(233.83 \pm 132.70) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与总磷变化相同,碱性磷酸酶活性变化为春季>夏季>秋季,除春季次表层稍高以外,各个季节基本均为表层>次表层>第三层。夏季,碱性磷酸酶活性变幅为 $126.14 \sim 236.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,最小

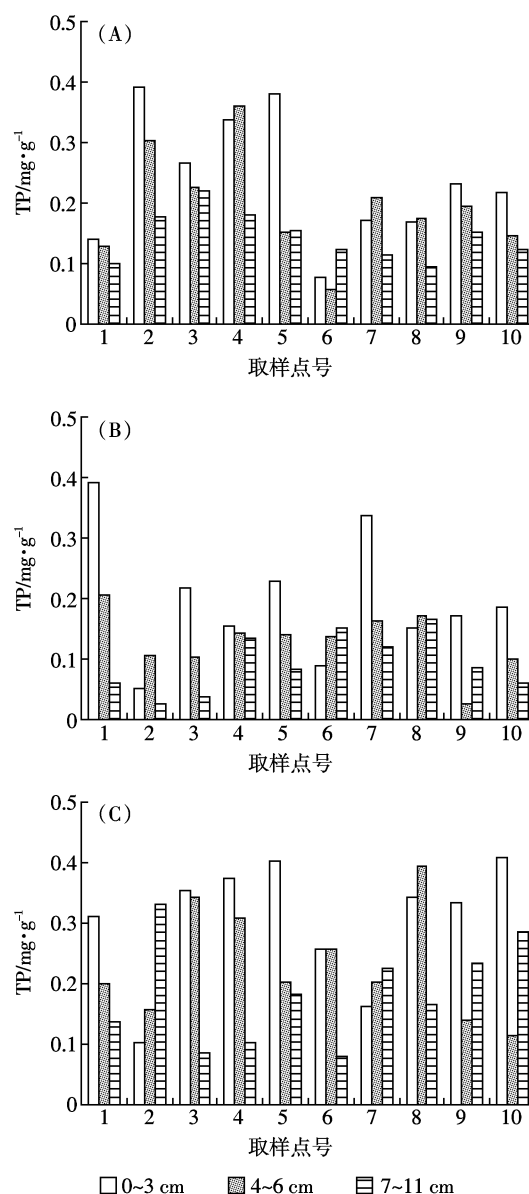


图 3 骆马湖夏季(A)、秋季(B)和春季(C)沉积物中 TP 含量垂向变化

Figure 3 TP content in different depths in Luoma Lake sediment of summer(A), autumn(B) and spring(C)

值和最大值分别为 1 号点的第三层和 9 号点的表层;秋季,变幅为 $44.59 \sim 233.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,最小值和最大值分别为 6 号点的次表层和 8 号点的次表层;春季,碱性磷酸酶活性变幅为 $231.51 \sim 592.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,最小值和最大值分别为 2 号点的第三层和 8 号点的次表层。同样经方差分析,夏、秋、春季 3 层沉积物碱性磷酸酶的活性差异显著($P < 0.05$)。表层碱性磷酸酶活性变幅在 $59.40 \sim 410.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,最低值和最高值分别为秋季的 7 号点和春季的 10 号点;次表层在 $44.59 \sim 592.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,最低值和最高值

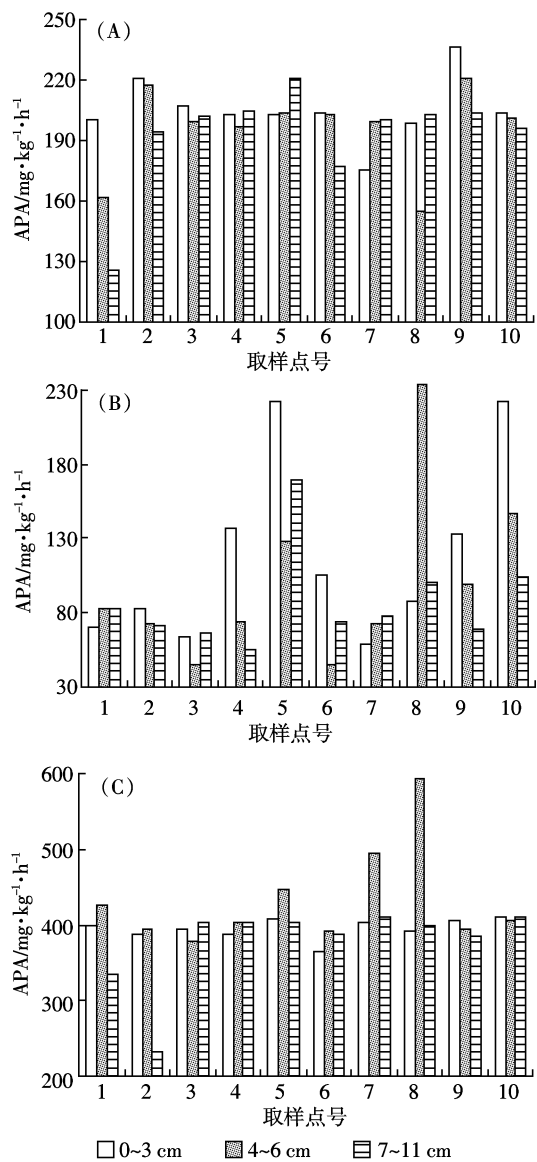


图 4 骆马湖夏季(A)、秋季(B)和春季(C)沉积物中碱性磷酸酶活性垂向变化

Figure 4 APA in different depths in Luoma Lake sediment of summer(A), autumn(B) and spring(C)

分别为秋季的 6 号点和春季的 8 号点；第三层在 55.31~411.30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,最低值和最高值分别为秋季的 4 号点和春季的 10 号点。

3 讨论

为了探讨沉积物中氮磷含量及碱性磷酸酶活性的分布规律及其影响因素,将各个季节各采样点对应的水体 DO、pH 值和氧化还原电位与表层沉积物的 TN、TP 含量和碱性磷酸酶活性进行了皮尔逊相关分析,相关系数见表 2。可以看出,除 pH 值与沉积物 TP 含量相关性较大以外,其他相关性较小,这主要是因为骆马湖是典型的过水型湖泊,上覆水的 DO、pH 值和氧化还原电位等与沉积物中氮磷含量相关性小。TP 与碱性磷酸酶活性呈显著正相关($P=0.05$),进一步分析沉积物中碱性磷酸酶活性与总磷含量的关系,如表 3 所示。可以看出,沉积物碱性磷酸酶活性与 TP 含量均呈正相关,且在春夏季表现出明显的正相关性。张宇等^[6]对长江中下游的一些湖泊的研究也发现沉积物碱性磷酸酶活性与总磷含量高度一致,两者极显著正相关。总磷含量的多少与沉积物营养水平有关,也与沉积物中生物数量有关,而沉积物中碱性磷酸酶活力既然主要来自微生物的贡献,则必然与二者密切相关^[1]。骆马湖沉积物中碱性磷酸酶活性各个季节基本均为表层>次表层>第三层,说明沉积物表层是由磷酸酶介导的磷循环最活跃区域,与已有的报道一致^[13-14]。沉积物的表层由于氧气供给充足,营养物质丰富,加上水位周期变化可能出现的干湿交替,这一层非常有利于微生物生长;而随着深度增加,各种营养物质含量不断减少,含氧量也逐渐减小,使得各种生物降解活动减少,碱性磷酸酶的活性也逐渐降低。

从表 3 还可以看出,春夏季碱性磷酸酶活性与总磷的相关性明显高于秋季,碱性磷酸酶活性季节变化

表 2 上覆水基本理化指标与表层沉积物中氮磷含量及碱性磷酸酶活性的相关系数
Table 2 Correlation Coefficients between basic water quality index and nitrogen and phosphorus content and alkaline phosphatase activity in first layer sediment($n=30$)

	TN/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	APA/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH 值	氧化还原电位/mV
TN/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	1	-0.082	0.131	0.035	-0.177	0.092
TP/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	-0.082	1	0.382*	0.024	0.324	0.016
APA/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	0.131	0.382*	1	-0.214	0.178	0.175
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.035	0.024	-0.214	1	0.203	0.141
pH 值	-0.177	0.324	0.178	0.203	1	0.039
氧化还原电位/mV	0.092	0.016	0.175	0.141	0.039	1

注:* 在 0.05 水平显著相关。

表 3 骆马湖各层沉积物碱性磷酸酶活性与 TP 含量的
相关系数 $R(n=10)$

Table 3 Correlation coefficients between APA and total phosphorus concentrations in different layers of sediment in Luoma Lake($n=10$)

相关系数 R	夏季	秋季	春季
表层	0.33	0.18	0.32
次表层	0.25	0.14	0.44
第三层	0.42	0.032	0.48
3 层平均	0.57	0.025	0.58

也较明显,分析原因可能是由于大型水生植物的干扰作用。已有研究表明:五里湖表层沉积物 APA 活性表现出明显的季节变化趋势,2004 年 4、6、9 月该湖沉积物 APA 活性逐渐升高^[5]。证明大型水生植物对沉积物碱性磷酸酶活性的影响不容忽视。

4 结论

(1)骆马湖沉积物中,总氮含量变幅在 $0.13\sim 2.91\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,春季含量最高,秋季次之,夏季含量最低;全年来看,表层最高,次表层次之,略高于第三层;大部分点位为清洁和轻污染状态;3 层沉积物氮含量的平均值季节变化差异不显著。

(2)骆马湖沉积物中,总磷含量最高为 $0.41\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,最低为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;总磷变化为春季>夏季>秋季,各个季节均为表层>次表层>第三层;3 层沉积物磷含量的平均值季节变化差异显著。

(3)不同深度的沉积物中,碱性磷酸酶活性最高为 $592.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,最低为 $44.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,碱性磷酸酶活性变化为春季>夏季>秋季,除春季次表层稍高以外,各个季节基本均为表层>次表层>第三层。3 层沉积物磷含量的平均值季节变化差异显著。

(4)沉积物碱性磷酸酶活性和总磷的含量变化一致,与总磷含量均呈正相关,且在春夏季表现出明显的正相关性。

参考文献:

- [1] 章婷曦,王晓蓉,金相灿.太湖沉积物中碱性磷酸酶活力(APA)和磷形态的垂向特征及相关性[J].农业环境科学学报,2007,26(1):36-40.
ZHANG Ting-xi, WANG Xiao-rong, JIN Xiang-can. Vertical variation of alkaline phosphatase activity and phosphorus forms in the Taihu Lake sediment and the relationship between them[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 36-40.
- [2] Jarvie H P, Whitton B A, Neal C. Nitrogen and phosphorus in east coast British rivers: Speciation, sources and biological significance[J]. *The*

- Science of the Total Environment*, 1998, 210/211: 79-109.
- [3] Denis L, Grenz C. Spatial variability in oxygen and nutrient fluxes at the sediment-water interface on the continental shelf in the Gulf of Lions (NW Mediterranean)[J]. *Oceanologica Acta*, 2003, 26: 373-389.
- [4] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Wat Res*, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [5] 金相灿,姜霞,徐玉慧,等.太湖东北部沉积物可溶性氮、磷的季节性变化[J].中国环境科学,2006,26(4):409-413.
JIN Xiang-can, JIANG Xia, XU Yu-hui, et al. Seasonal variation of dissolved nitrogen and phosphorus in sediments in northeast part of Lake Taihu[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(4): 409-413.
- [6] 周易勇,李建秋,张敏,等.浅水湖泊中沉积物碱性磷酸酶动力学参数的分布[J].湖泊科学,2001,13(3):261-266.
ZHOU Yi-yong, LI Jian-qiu, ZHANG Min, et al. Distribution of kinetic parameters of alkaline phosphatase in sediments of shallow lakes[J]. *Journal of Lake Science*, 2001, 13(3): 261-266.
- [7] Yiyong Zhou, Jianqiu Li. Temporal and spatial variations in kinetics of alkaline phosphatase in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake (Lake Donghu)[J]. *Wat Res*, 2002, 36: 2084-2090.
- [8] 孟春红,赵冰.东湖沉积物中氮磷形态分布的研究[J].环境科学,2008,29(7):1831-1837.
MENG Chun-hong, ZHAO Bing. Vertical distribution of species of nitrogen and phosphorus in the sediments of Donghu Lake[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(7): 1831-1837.
- [9] 陈永川,汤利,张德刚,等.滇池沉积物总氮的时空变化特征研究[J].土壤,2007,39(6):879-883.
CHEN Yong-chuan, TANG Li, ZHANG De-gang, et al. Spatial and temporal dynamic variation of nitrogen in sediment of Dianchi Lake[J]. *Soils*, 2007, 39(6): 879-883.
- [10] 陈永川,汤利,张德刚,等.滇池沉积物总磷的时空分布特征研究[J].农业环境科学学报,2007,26(1):51-57.
CHEN Yong-chuan, TANG Li, ZHANG De-gang, et al. The spatially and temporally dynamic variation of total phosphorus in sediment of Dianchi Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 51-57.
- [11] Hadas O, Pinkas R. Arylsulfatase and alkaline phosphatase activity in sediments of lake kinneret, Israel[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1997, 99: 671-679.
- [12] A Guidance Manual to support the assessment of Contaminated Sediments in Freshwater ecosystems[S]. US EPA, 2002.
- [13] Newmzn S, Reddy K R. Sediment resuspension effects in alkaline phosphates activity[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 245: 74-86.
- [14] Sinke A J C, Cornelese A A, Cappenberg T E. Phosphates activity in sediment of the Loosdrecht lakes[J]. *Verh International Verein Limnol-*
ogy, 1991, 24: 719-721.
- [15] 夏卓英,陈芳,宋春雷,等.长江中下游部分湖泊沉积物碱性磷酸酶分布及其作用研究[J].水生生物学报,2007,31(1):9-17.
XIA Zhuo-ying, CHEN Fang, SONG Chun-lei, et al. A study on distribution and roles of alkaline phosphatase in sediments of some lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(1): 9-17.
- [16] 张宇,乌恩,李重祥,等.长江中下游湖泊沉积物酶活性及其与富营养化的关系[J].应用与环境生物学报,2011,17(2):196-201.
ZHANG Yu, WU En, LI Chong-xiang, et al. Enzyme activity in sediments and its relation with eutrophication in the lakes along the Yangtze River[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2011, 17(2): 196-201.