

太湖沉积物理化性质及营养盐的时空变化*

赵兴青¹, 杨柳燕^{1**}, 于振洋¹, 樊启慧¹, 詹忠¹, 肖元庚¹, 尹大强¹, 秦伯强²

(1: 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210093)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 在不同季节, 采集太湖梅梁湾和贡湖湾沉积物柱状样, 研究沉积物 Eh、pH、总氮、总磷以及有机质四季垂向剖面分布变化特征。 研究表明, 在表层下(0-3 cm), Eh 随沉积物深度的增加迅速下降, 很快进入还原状态。 沉积物剖面上 pH 变化幅度不大, 在 6.4-7.8 之间, 冬季沉积物 pH 均有所降低。 太湖沉积物中含有丰富的营养盐, 总氮和总磷最高浓度分别为 2.68 和 0.864 mg/g, 其剖面分布特征表明, 沉积物表层总氮和总磷含量远高于底层, 其含量随深度增加而降低, 但四季变化趋势不明显。 沉积物中有机质含量在 10 cm 以上变化幅度较大, 随着沉积物深度的增加, 有机质含量明显减少, 季节变化幅度不大。 比较不同采样点发现, 位于梅梁湾生态系统试验区内的 S1 位点沉积物氮磷内源负荷最大。

关键词: 沉积物; 氧化还原电位; pH; 总磷; 总氮; 有机质; 太湖

Temporal and spatial distribution of physicochemical characteristics and nutrients in sediments of Lake Taihu

ZHAO Xingqing¹, YANG Liuyan¹, YU Zhenyang¹, FAN Qihui¹, ZHAN Zhong¹, XIAO Yuangeng¹, YIN Daqiang¹ & QIN Boqiang²

(1: State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: Three sites were selected for samples in Lake Taihu to observe temporal and spatial distribution of redox potential (Eh), pH, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and organic matter (OM) in sediments. Below the surface of sediments Eh declined rapidly with the increase of sediment depth and it was under anaerobic condition except the top layer of sediment. pH value changed slightly in the profile of sediments, which ranged from 6.4 to 7.8. With a comparison between four seasons, pH value was the lowest in winter. TN and TP concentrations in sediments of Lake Taihu were higher, and the maximum concentrations reached 2.68 mg/g and 0.864 mg/g, respectively. Their vertical profiles showed that TN and TP concentrations in surface sediments were much higher than in deeper layers and decreased steeply with the increase of the depth on the top 15 cm of sediment layers. OM concentrations declined rapidly at the top 15 cm of sediment layers, but there was little change in four seasons. The sediment loads of TN and TP were much higher at S1 than that at other sites.

Keywords: Sediment; Eh; pH; TP; TN; organic matter; Lake Taihu

太湖是位于中国东部仅次于鄱阳湖和洞庭湖的全国第三大淡水湖泊, 面积约 2338 km², 平均水深 1.9 m, 最大水深约 3.4 m。 由于其所处的长江三角洲是我国人口密集、经济发达的地区, 因此, 人类活动对太湖的干扰和影响较大, 水体富营养化状况十分严重, 夏秋两季, “水华” 频繁爆发。 太湖水体的污染源除了河流

* 国家重点基础研究发展(973)计划项目(2002CB412307)、国家重大水环境专项项目(2002AA601011)和国家自然科学基金项目(40371102)联合资助。 2006-11-28 收稿; 2007-02-26 收修改稿。 赵兴青, 女, 1974 年生, 博士研究生。

** 通讯作者; E-mail: yangly@nju.edu.cn.

和径流等外源输入外,还有湖泊底泥的营养物释放^[1,2].太湖底泥一般较薄,只有几十厘米,但对营养物的吸附能力较强,营养物在其中容易长期积累,并在合适的条件下释放到湖水中,引起水体富营养化^[3,4].湖泊沉积物是营养盐的重要蓄积库,同时也是湖泊水体营养盐的内源负荷.在外源减少或控制的情况下,沉积物内负荷将在一定时间内阻碍或延迟湖泊水质治理的效果^[5].

为了保护、治理太湖的水环境,不少单位对沉积物地球化学组成的垂向变化开展了大量的研究^[6],通过对此研究,可以深入理解沉积物理化性质对水体污染贡献的大小,并有可能提供污染变化的历史信息^[7,8].近年来,人们对太湖沉积物中重金属以及营养盐垂向分布研究均有报道^[9-14],但不同季节,由于受环境和生物因子的影响,沉积物释放氮、磷有所不同.沉积物营养盐和理化指标的季节性垂向分布特征研究还鲜见报道.

本研究在太湖营养水平不同的两个湖区梅梁湾、贡湖湾选取 3 个采样点,研究沉积物 Eh、pH、总氮、总磷以及有机质含量的剖面分布特征,从空间和时间变化来分析太湖沉积物中营养盐和理化性质的分布状况,这对了解太湖水体环境现状具有十分重要的意义.

1 材料和方法

1.1 样品采集

在太湖选取 3 个采样点分别在 2005 年 7、10 和 12 月下旬以及 2006 年 3 月下旬进行 4 次采样,采样点分别表示为 S1 (梅梁湾生态系统试验区內 31°30'306"N, 120°13'370"E), S2 (梅梁湾生态系统试验区外 31°30'181"N, 120°125'66"E), S3 (贡湖湾 31°23'767"N, 120°19'471"E) (图 1),并配以人工标记.沉积物样品柱用自制采泥器采取,长约 50 cm,样品在采集现场密封好带回实验室.分析采用上密下疏的原则,0-10 cm 按 1 cm 间隔取样,10-20 cm 按 2 cm 间隔取样,20-45 cm 按 5 cm 间隔取样,未扰动的样品柱先进行 Eh 和 pH 值测定,然后切分为不同厚度,分析其营养盐的含量.

1.2 分析测定方法

沉积物测试项目有 Eh、pH 值、总氮、总磷和有机质.新鲜沉积物的 Eh 和 pH 值采用铂电极一去极化法测定^[15,16].沉积物冷冻干燥后过 100 目筛,测定总氮和总磷以及有机质含量.

总氮、总磷分析采用过硫酸盐联合消解的方法^[17-19],其工作原理是,过硫酸盐在高温水溶液中,分解生成大量 H^+ 和 O_2 ,等摩尔过硫酸盐中消化液加有 NaOH 最初呈碱性,由于消化过程中生成大量 H^+ ,消化后的消化液就变成酸性,其消化液的 pH 由 12.5 下降到 2.0,同一种消化剂使总氮和总磷都得到了消化,其消化产物为硝酸盐和(正)磷酸盐.由于沉积物成份的复杂性导致消化液对光的吸收背景,与一般水样测定有所不同,试验证明必须扣除背景的干扰.通过对消解上清液在北京瑞利分析仪器公司 UV-1600 紫外可见分光光度计上进行 190-300 nm 波长扫描,确定最佳吸收峰和背景值,对总氮进行紫外测定.总磷采用酸溶钼锑抗比色法进行测定.有机质分析采用重铬酸钾氧化外加热法进行测定(GB9834-88).

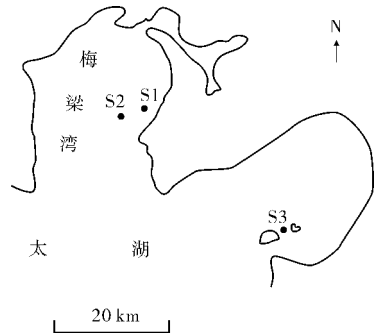


图 1 太湖沉积物样品采集点位置
Fig. 1 The sampling stations in Lake Taihu

2 结果与分析

2.1 采样点水质现状

太湖水体呈微酸性至弱碱性,春冬两季 pH 低于夏秋两季.3 个采样点水体 DO 值春冬大于夏秋两季,春季最高,夏季最低,太湖底部水体基本处于氧化状态.水体透明度很低,为 20-45 cm.3 个采样点底部水体的叶绿素含量均是夏 > 秋 > 春 > 冬,其中 S3 点最高,S2 点最低.水体悬浮物梅梁湾两点冬季最低,不同采样点相比,S1、S2 两点水质相近(表 1).以上数据表明,太湖梅梁湾、贡湖湾水体属于 V 类水体,呈富营养化状态.

表 1 3 个采样点全年水质的基本理化性质*
Tab. 1 General characteristics of water at three sampling sites

参数	S1				S2				S3			
	7月	10月	12月	3月	7月	10月	12月	3月	7月	10月	12月	3月
DO (mg/L)	8.09	9.02	8.54	10.6	7.53	8.82	10.04	12.9	6.86	7.23	7.7	10.4
pH	8.87	8.52	6.76	7.01	8.79	8.1	6.78	7.16	8.42	8.09	7.22	7.36
悬浮物(mg/L)	25	30	14	54	54	38	18	40	31	44	62	62
叶绿素(mg/L)	0.118	0.042	0.006	0.032	0.108	0.022	0.005	0.018	0.139	0.076	0.029	0.034
透明度(cm)	40	50	25	20	40	45	30	20	40	40	30	25

* 无锡市环境监测中心站监测报表.

2.2 沉积物 Eh 和 pH 剖面分布

沉积物的氧化还原电位 (Eh) 高低能表示其氧化还原强度的状态,它对化合物和矿物的形成或分解发挥重要作用. 在湖泊沉积物中影响氧化还原的因素主要有湖水中溶解氧对沉积物的复氧作用、pH 值、有机质含量及其分解过程中微生物的耗氧量^[20]. 沉积物氧化还原电位的垂直变化过程(图 2)说明,3 个采样点之间水-土界面 Eh 值差异较大,在 -150 mV 至 200 mV 之间波动,水-土界面处于轻度氧化状态. 在表层下(0-3 cm), Eh 随沉积深度的增加迅速下降. 沉积物中的有机质主要来源是城市污水中的悬浮颗粒以及自源或外源的死亡藻类碎屑,极易分解,需要大量的氧,而沉积物供氧不足,沉积物很快进入还原状态. 随沉积深度的增加还原性逐渐增强,到 15 cm 附近 Eh 值基本稳定,之后随深度的进一步增加,S1、S2 位点 Eh 有缓慢升高,S3 位点 Eh 基本稳定. Eh 的垂向上高下低(S3 位点)形状,呈现“S”型(S1、S2 位点)分布曲线的原因在于表层在水土界面复氧而氧化,由于表层有机质含量高,因此电位急剧下降,在 7-8 cm 处出现最低电位值,达到 -250 mV (S1、S2),此为易还原态磷(Fe-P)的溶解释放提供了条件,之后电位升高,主要是有机质减少和微生物活动减弱的缘故. 太湖三个采样点沉积物垂向剖面 Eh 值在夏(7月)秋(10月)两季偏低,而春(3月)冬(12月)两季有所升高,这与其为浅水湖泊,且春冬季风浪较大,蓝藻消亡,水体透明度增强,溶解氧增多,微生物活动减弱有关. S3 位点 Eh 值明显高于 S1、S2 位点,这与此处属于草型湖泊,水质较好,污染较轻,远离湖岸有关.

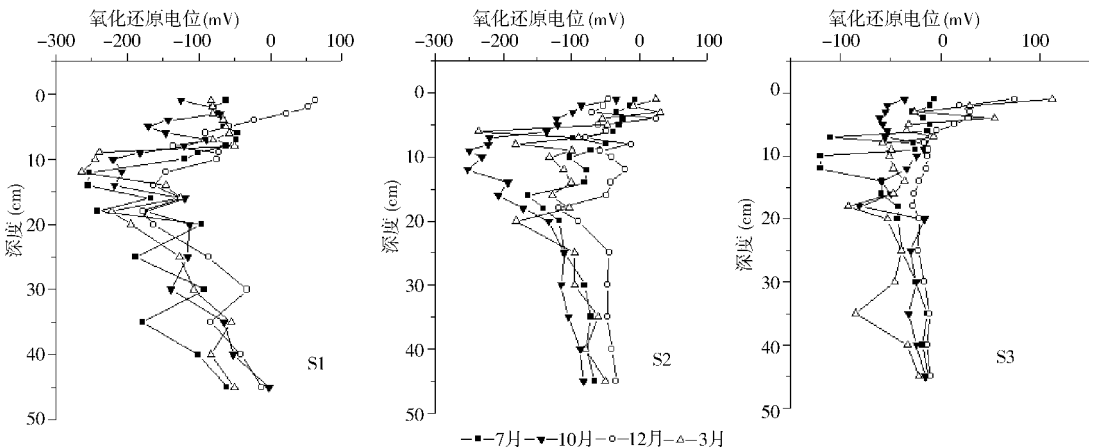


图 2 太湖沉积物柱样中 Eh 垂向变化

Fig. 2 Vertical characteristics of Eh in sediments cores of Lake Taihu

沉积物剖面的低氧化还原状态分布的不同,反映了不同沉积深度存在着有机质的多少以及微生物活动强弱的差异. 沉积物氧化还原电位对磷酸盐的形态和释放存在较大的影响,还原条件对磷营养盐的释放具

有促进作用,是影响内源释放控制的重要因数.

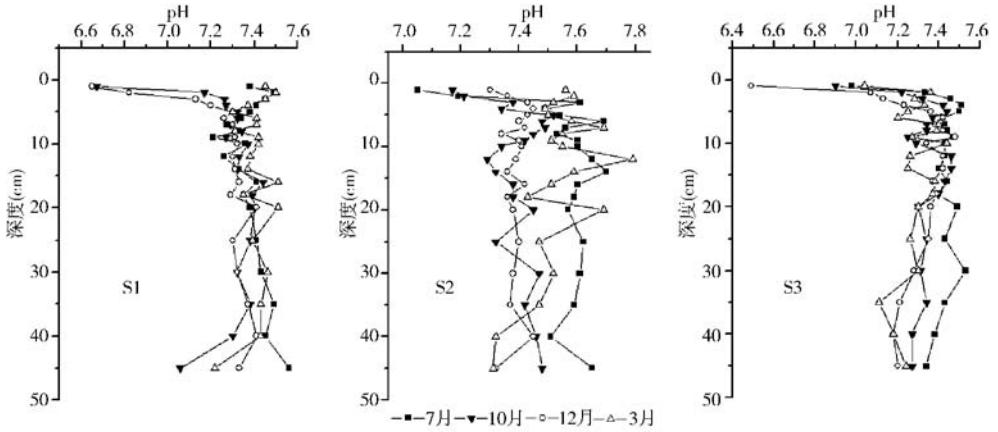


图3 太湖沉积物柱样中 pH 垂向变化

Fig. 3 Vertical characteristics of pH in sediments of Lake Taihu

pH 值影响化合物和矿物的形成与分解,对元素的迁移或富集有一定的影响. 因此,pH 值是湖泊环境的一个重要指标. 沉积物 pH 在整个剖面变化不大,在 6.4–7.8 变动,呈中性稍偏酸性. 与上覆水相比,各点沉积物 pH 均有所降低. 在表层 0–3 cm,pH 值随沉积深度迅速升高(从 6.4 升至 7.3),之后,随深度的进一步增加,pH 基本稳定(图 3). pH 的上下高式分布,主要因为表层有机质含量高,分解所产生的二氧化碳及有机酸等使其 pH 值下降,随着深度增加有机质含量减少,矿化作用也减弱,因而 pH 值稍有回升^[16]. S1、S3 采样点的四季 pH 的波动范围较小,S2 点随季节不同,pH 剖面有明显差别.

2.3 沉积物总氮和总磷剖面分布特征

沉积物中总氮含量是反映营养状况和污染程度的双重指标. S1、S2 采样点沉积物中总氮剖面分布特征相似,表层总氮含量较高,在 1.4–2.8 mg/g 之间,在表层以下,随深度的增加总氮含量迅速下降(图 4). 对比不同采样点发现,S1 在整个剖面总氮均高于 S2 位点,两者同时明显高于 S3 点. S1 点剖面自上而下总氮一直呈降低趋势,且各点四季总氮含量比较接近. 就 S2 而言,沉积物在 0–15 cm 之间总氮含量随深度增加而降低,在此深度以下总氮含量变化较小. S1、S2 点总氮含量冬季稍高于其他三季,可能原因是冬季进入枯水期,温度低,藻类以及水生植被消亡,有机质矿化作用减弱,水体透明度增加使得湖泊氧气以及电子受体增多,从而抑制营养盐释放到水体而总氮升高. S3 点随沉积物深度增加总氮基本稳定,但随季节变化趋势明显,夏季最高,春季最低. 各个采样点总氮在剖面自上而下逐渐减少,说明太湖沉积物氮负荷逐年加重,反映湖泊初级生产力的大幅提高,则加速了湖泊的富营养化.

磷是湖泊沉积物的另一个主要营养元素,也是反映湖泊污染程度的重要指标. 与总氮相比,沉积物总磷剖面分布特征较为复杂,3 个采样点剖面中总磷含量在 0.1–0.9 mg/g 之间(图 5). 不同采样点间比较发现,S1 和 S2 总磷含量较高,且相差不大,S3 在整个剖面中总磷含量明显低于其他两采样点. 3 个采样点总磷含量在表层 0–5 cm 之间随深度增加总磷含量急剧下降,在 5–10 cm 之间随深度增加总磷含量急剧增加,在 10–15 cm 之间总磷含量又减少,在 15–20 cm 之间总磷含量再次升高,呈之字形降低趋势,在 20 cm 以下 S1 点变化趋势稍缓,随深度增加总磷含量先增加后下降,35 cm 深度以下基本稳定;S2 采样点总磷含量继续降低,在 40–45 cm 再次升高;S3 采样点在 20 cm 深度以下一直呈波状的缓慢降低趋势.

三位点沉积物剖面中四季总磷含量变化趋势不太明显. 沉积物总磷的空间差异,与其所处的地理位置有关. S1、S2 位于梅梁湾,相对靠岸,陆源输入使得沉积物中营养盐含量偏高造成沉积物中总磷含量较高. S3 位于贡湖湾,远离湖岸. 由此可见,工业废水、农业生产和生活污水的排入是造成沉积物营养盐含量偏高的一个重要因素.

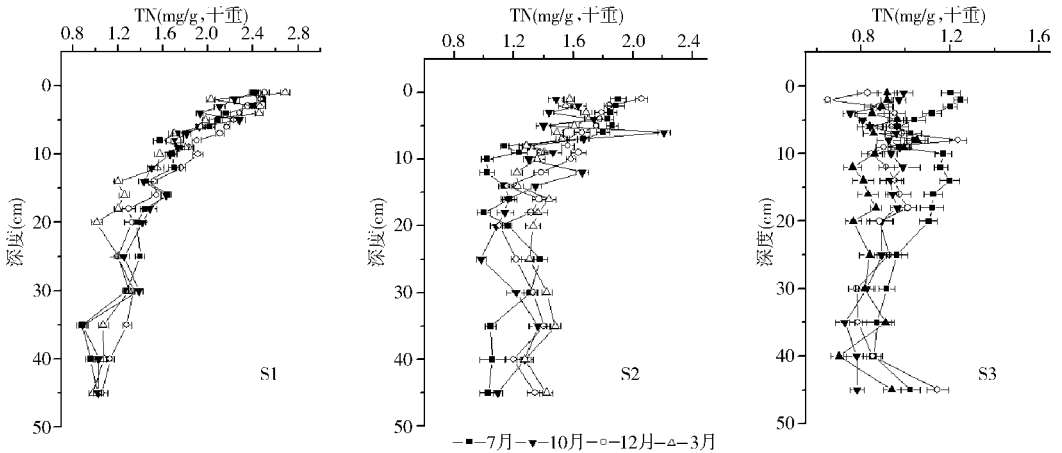


图 4 太湖沉积物柱样中 TN 含量垂向变化

Fig. 4 Vertical characteristics of total nitrogen in sediments of Lake Taihu

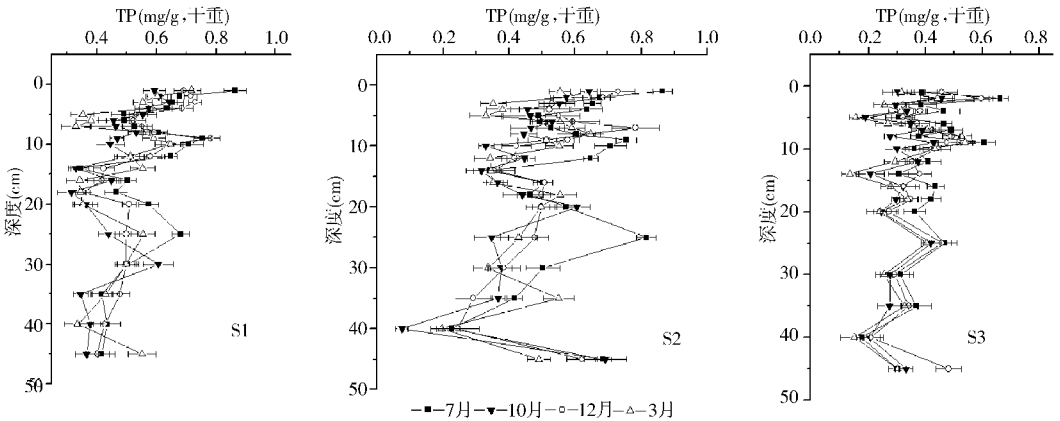


图 5 太湖沉积物柱样中 TP 含量垂向变化

Fig. 5 Vertical characteristics of total phosphorus in sediments of Lake Taihu

2.4 沉积物有机质的剖面分布特征

沉积物中有机质含量高低也是内源污染的一个重要指标。底泥中的有机质的生物降解将消耗水体中大量的溶解氧,造成水体缺氧,同时有机质的生物降解又释放出大量的氮、磷营养盐使水体持续在较高的营养盐水平。在光合作用中,碳、氮和磷是藻类生长的决定因素之一,因此,在污染湖泊的治理和修复中,有效降低底泥中的有机质含量与减少和控制氮、磷营养盐的浓度具有同等重要的地位。

沉积物中有机质的来源主要有水体自养生物的合成和陆源的输入,是生物活动的能量基础。沉积物中有机质含量在不同位点有差异(图6)。S1位点沉积物中有机质含量最高,其次为S2位点,S3位点最低。从样品分析看,在沉积物10cm以上有机质含量变化较大,随着沉积物深度的增加,有机质含量明显减少,其原因是表层含有大量浮游藻类残体,动物粪便以及外源有机质的输入,10cm以下含量变化减缓。相对于S3点,S1、S2点有机质含量高,微生物数量也多,由于生物的分解作用使得沉积物缺氧,导致氧化还原电位更低,这与前面氧化还原电位的测定结果相一致。

太湖三个采集位点沉积物中有机质含量的垂向分布在四季各不相同,其中S1位点沉积物中有机质含

量在四季中波动范围较小。S1 位点沉积物中的有机质含量随深度增加一直呈降低趋势,但季节性差异不十分明显。而 S2 位点表层 15 cm 以上有机质含量呈降低趋势,在 15 - 35 cm 深度内又逐渐升高,在 35 - 40 cm 又减低,然后基本稳定;S3 位点沉积物在表层 10 cm 范围内呈降低趋势,然后呈波状的缓慢升高,S3 位点的四季变化幅度较大(图 6)。

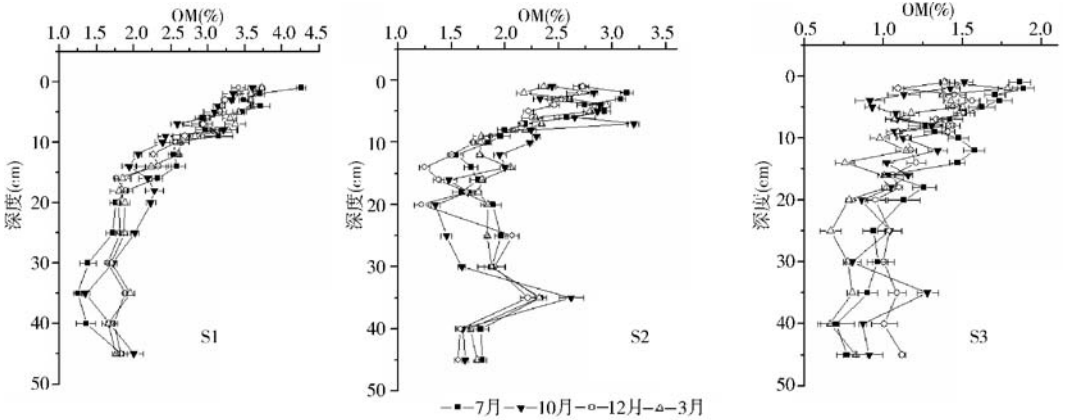


图 6 太湖沉积物柱样中有机质含量垂向变化

Fig. 6 Vertical characteristics of organic matter in sediments of Lake Taihu

3 结论

位于梅梁湾生态系统试验区内的 S1 位点沉积物中氧化还原电位较低,总磷、总氮以及有机质含量均高于生态系统试验区外的 S2 位点。

夏秋两季沉积物中氧化还原电位低于春冬两季,而营养盐含量变化相反,表明温度升高,微生物活动增强,有机质分解作用加快,氧气消耗加大,导致氧化还原电位降低,有利于沉积物中氮、磷营养盐释放,水体富营养化加剧。

在不同采样点,沉积物总氮、总磷含量剖面有很大的差异,这是污染源以及污染程度时间差异的结果,总的趋势是剖面自上至下总氮和总磷含量逐渐降低,表层 0 - 15 cm 含量最高,变化幅度最大,表明沉积物的营养盐负荷在逐年加重。

沉积物中有机质含量 10 cm 以上较高,变化幅度较大,随着沉积物的深度的增加,有机物含量明显减少,季节性变化较小。

4 参考文献

- [1] Zhang Yongchun, Sun Qinfong, Li Weixin *et al.* Pollution sources and ecological control approaches to eutrophication of Taihu Lake. 湖泊科学, 1998, **10**(增刊): 101 - 110.
- [2] 李荣刚, 夏源陵, 吴安之等. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量. 湖泊科学, 2000, **12**(2): 147 - 153.
- [3] 袁旭音, 陈 骏, 陶于祥等. 太湖北部底泥中氮、磷的空间变化和环意义. 地球化学, 2002, **31**(4): 321 - 328.
- [4] 袁旭音, 许乃政, 陶于祥等. 太湖底泥的空间分布和富营养化特征. 资源调查与环境, 2003, **24**(1): 20 - 28.
- [5] Bostrom B, Ahlgren I, Bell R. Internal nutrient loading in a eutrophic lake, reflected in seasonal variations of some sediment parameters. *Vreh Int Ver Limnol*, 1985, **22**: 3335 - 3339.
- [6] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] 范成新, 杨龙元, 张 路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析. 湖泊科学, 2000,

- 12(4):359-366.
- [8] 高丽, 杨浩, 周健民等. 滇池水体和沉积物中营养盐的分布特征. 环境科学研究, 2004, 17(4):1-4.
- [9] 陆敏, 张卫国, 师育新等. 太湖北部沉积物金属和营养元素的垂向变化及其影响因素. 湖泊科学, 2003, 15(3):213-220.
- [10] 黄顺生, 华明, 廖启林等. 太湖北部沉积物微量元素垂直分布特征及指示意义. 海洋地质动态, 2005, 21(8):1-5.
- [11] 王金权, 刘金陵. 太湖沉积物中氨基酸及其有机质的垂直分布与古生态意义. 微体古生物学报, 1994, 11(2):249-257.
- [12] 王强, 耿金菊, 金红梅等. 太湖沉积物中微生物和磷化氢的时空分布及关系. 中国环境科学, 2006, 26(3):350-354.
- [13] 宋进喜, 李金成, 王晓蓉等. 太湖梅梁湾沉积物中酸挥发性硫化物垂直变化特征研究. 环境科学学报, 2004, 24(2):271-274.
- [14] 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. 中国环境科学, 2004, 24(2):147-150.
- [15] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京:中国环境科学出版社, 1990:102-122.
- [16] 许国镇. 电化学分析实验. 北京:地质出版社, 1991:1-13.
- [17] 于天仁, 王振权主编. 土壤分析化学. 北京:科学出版社, 1988.
- [18] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 北京:科学出版社, 1983.
- [19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- [20] 孙顺才, 黄漪平. 太湖. 北京:海洋出版社, 1993:199-230.