

巢湖沉积物磷的形态及其与间隙水磷的关系

汤宝靖^{1,2}, 陈雷¹, 姜霞², 金相灿²

(1.吉林建筑工程学院市政与环境工程学院, 吉林 长春 130021; 2.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:采用磷形态的连续提取法,研究了巢湖沉积物中磷的地球化学形态及间隙水中总溶解性磷(DTP)、可溶性磷酸盐(DIP)、可溶性有机磷(DOP)含量的垂向分布特征。结果表明,西湖区的沉积物总磷含量明显高于东湖区。表层沉积物中活性磷含量占总磷的44%~81%,金属氧化物结合态磷(NaOH-P)作为活性磷的主要存在形式,在西湖区含量比例达到47%~60%,对磷释放起重要贡献;磷形态剖面表明,西湖区的金属氧化物结合态磷、可还原态磷(BD-P)含量高于东湖区,金属氧化物结合态磷、可还原态磷、钙结合态磷(HCl-P)受人类活动影响较大,有机磷(Org-P)受外源磷污染影响很小;BD-P、NaOH-P随深度增加而减小,说明巢湖近期磷负荷有增加的趋势;DTP、DIP、DOP在水-沉积物界面的浓度梯度反映它们有自间隙水向上覆水扩散的趋势;巢湖间隙水不同形态磷与BD-P、NaOH-P显著相关($\alpha=0.01$)。这项研究可为巢湖内源污染和富营养化的控制与治理提供理论参考。

关键词:巢湖;沉积物;磷;形态分布;间隙水

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)09-1867-07

Phosphorus Speciations in Sediments and Their Relationships with Soluble Phosphorus Concentrations in Porewater in Lake Chaohu

TANG Bao-jing^{1,2}, CHEN Lei¹, JIANG Xia², JIN Xiang-can²

(1.School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021,China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The vertical distribution of phosphorus(P) speciations in the sediments and the porewater from Lake Chaohu were investigated using the sequential extraction methods. The concentrations of the total P(TP) in the surface sediment from western lake were obviously higher than eastern lake. The proportion of active P was accounted for 44%~81% of TP. NaOH-P acted as an active P speciation from the sediment in the western lake accounted for 47%~60% of TP, which plays an important role in phosphorus release. The concentrations of NaOH-P and BD-P from the surface sediment in their vertical distributions were much higher in western lake than in eastern lake. NaOH-P, BD-P and HCl-P were easily influenced by human activities, while Org-P was less influenced by extraneous sources. The concentrations of BD-P and NaOH-P decreased with the increase of sediment depth, which indicated an increasing trend for P burden in surface sediment in Chaohu Lake. The possibility of P released from sediment to overlying water could be proved by the concentration difference of DTP, DIP and DOP between the porewater and overlying water. Regression analyses showed that different P speciations in the interstitial water were significantly correlated with BD-P and NaOH-P in the sediment. This study results are important for the eutrophication control and ecological restoration in Lake Chaohu.

Keywords: Lake Chaohu; sediment; phosphorus; species distribution; porewater

巢湖位于安徽省中部,湖区面积 760 km²,平均水深约 2.7 m,为我国五大淡水湖之一。近年来,由于沿湖地区经济的不断发展和人口的增长,大量污染物排

入巢湖,使得沉积物中污染物不断积累,富营养化程度日趋严重,目前已成为长江下游地区典型的富营养湖泊。

磷是湖泊蓝藻水华暴发常见的限制性营养盐,研究湖泊磷的生物地球化学循环行为对揭示湖泊富营养化发生机制、治理蓝藻水华具有重要意义^[1]。沉积物是水体营养盐的归宿,同时也是水体的营养源,沉积物中能参与界面交换及可被生物利用的磷含量取决

收稿日期:2009-01-21

基金项目:国家水专项(2008ZX07101-010);国家自然科学基金(20507017)

作者简介:汤宝靖(1984—),吉林磐石人,在读硕士,主要从事湖泊水环境方面的研究。E-mail: tangbaojing032@yahoo.com.cn

通讯作者:姜霞 E-mail: jiangxia@craes.org.cn

于沉积物中磷的形态,沉积磷在一定条件下可能是湖泊重要的营养物质来源^[2],因此对沉积物中磷的形态同间隙水磷的关系研究显得尤为重要。沉积物磷大体分为弱吸附态、可还原态、金属氧化物结合态、钙结合态以及有机态^[3]。弱吸附态磷很容易释放,可还原态磷和金属氧化物结合态磷在厌氧和碱性条件下可溶解、迁移。这几种类型的磷形态是内源负荷的重要来源。而钙结合态磷、有机磷由于其惰性和活性较低,很难被分解参与短时间的磷循环^[4]。目前关于巢湖磷形态的研究虽有报道^[5-9],但主要针对沉积物各磷形态的时空分布来开展,而对沉积物磷形态同间隙水磷营养盐关系的研究涉及较少,而且其他河流、湖泊涉及这方面的研究也主要集中在间隙水中可溶性磷酸盐与沉积物中主要营养盐的相关性研究^[10-12],所发现的相关关系也有所不同,还需要近一步的研究和探索。本文吸收国内外较为成熟的磷形态分析方法,研究了巢湖不同点位沉积物磷形态和间隙水不同形态磷含量的垂向分布特征,并分析它们之间的相互关系,探讨间隙水磷营养盐的来源,为客观评价沉积物不同形态磷的释磷潜力及其对湖泊富营养化的贡献提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2008 年 4 月对巢湖进行了系统的现场调查和样品采集,并在东、西湖区各选取 4 个点位作为沉积物柱状样的采集(图 1,黑色实心圆所在的采样点位于西湖区;黑色空心圆所在的采样点位于东湖区),采样点位用全球卫星定位系统(GPS)定位(表 1),沉积物柱状样用产自荷兰的 BEEKER 型沉积物原状采样器采取。为了便于了解巢湖的沉积污染状况,将沉积物柱状样现场分为 3 层(最表层厚 2 cm,其余各层厚 5 cm)。同一采样点取 8 个沉积物柱芯并将每层样品充

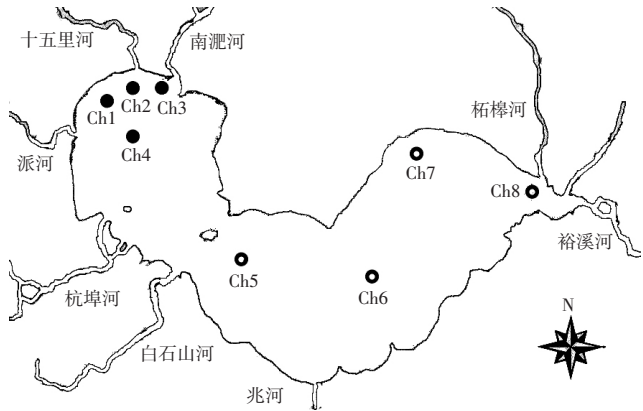


图 1 巢湖采样点分布图

Figure 1 Schematic illustration of sampling sites in Lake Chaohu

分混合,装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室后一部分沉积物离心($5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 20 min), $0.45\,\mu\text{m}$ 滤膜过滤后获得间隙水,另一部分冷冻干燥后用于磷形态分析。

1.2 分析测定方法

间隙水中总溶解性磷(DTP)和可溶性磷酸盐(DIP)过滤后钼锑抗比色法测定^[13],可溶性有机磷(DOP)定义为 DTP 与 DIP 的差值;沉积物冷冻干燥过 100 目筛,总磷和有机磷采用 SMT 法^[11-12]。沉积物中磷形态的分级检测采用连续浸提法^[3]。称取沉积物(冷冻干燥)1 g 于 100 mL 离心筒中加浸提剂 50 mL,振荡、离心、过滤,钼锑抗比色法测定浸提液中可溶性磷含量,提取流程如表 2 所示。实验数据用 SPSS 统计软件进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 巢湖沉积物总磷含量分布

巢湖沉积物总磷含量的变化趋势见图 2。巢湖调查区域表层沉积物总磷含量范围为 551.57~1 170.23

表 1 巢湖各采样点的经纬度

Table 1 The longitude and latitude of the sampling sites in Lake Chaohu

编号	隶属湖区	采样点	样点描述	经纬度
Ch1	西湖区	塘西	重污染藻型湖区	N31°42'15.25" E117°20'18.98"
Ch2		十五里河入湖区	受污染水体入湖口	N31°42'28.08" E117°21'44.96"
Ch3		南淝河入湖区	受污染水体入湖口	N31°41'29.09" E117°23'50.68"
Ch4		西半湖湖心	重污染藻型湖区	N31°39'33.35" E117°21'40.85"
Ch5	东湖区	湖心姥山东三公里	敞水区,风浪较大	N31°32'18.00" E117°28'56.45"
Ch6		湖心点	敞水区,水深,透明度较高	N31°31'29.76" E117°36'13.63"
Ch7		巢湖中埠乡	水深,透明度较高	N31°38'17.39" E117°39'34.22"
Ch8		巢湖造船厂	柘皋河污染水体入湖口	N31°36'34.88" E117°49'28.05"

表 2 沉积物中无机磷形态分级连续浸提方法

Table 2 The sequential extractions of inorganic phosphorus forms in sediments

磷形态	提取方法(浸提剂、温度、振荡)
弱吸附态磷(NH ₄ Cl-P)	1 mol·L ⁻¹ NH ₄ Cl(25 °C, 0.5 h)
可还原态磷(BD-P)	0.11 mol·L ⁻¹ NaHCO ₃ -Na ₂ S ₂ O ₄ (40 °C, 1 h)
金属氧化物结合态磷(NaOH-P)	1 mol·L ⁻¹ NaOH(25 °C, 16 h)
钙结合态磷(HCl-P)	0.5 mol·L ⁻¹ HCl(25 °C, 16 h)

mg·kg⁻¹, 最大值出现在巢湖西湖区的 4 号采样点。采样点 4 位于西湖区湖心, 其位置很容易汇集派河、十五里河和南淝河的人湖污染物, 且该采样点总磷含量随深度急剧下降, 说明该区域近期受外来污染负荷影响较大。整个剖面显示, 西湖区的总磷含量明显高于东湖区。西湖区的入湖河流占流域径流量的 64.9%, 河流及其支流流经地区人口密度较大, 土地利用类型多样, 化肥农药使用量大, 人类经济活动强度大, 流域非点源污染严重, 且大量城市污水通过南淝河排入巢湖, 造成西湖区总磷含量较高^[5]。另外, 沉积物的粒径分布与矿物组成的不同而引起的沉积物磷吸附能力的差异对东、西湖区沉积物磷含量的空间异质性也有一定影响^[6]。沉积物总磷在垂向上, 有随深度增加而减小的趋势, 可推断巢湖近些年的水质污染较大, 其中采样点 1、2 和 8 总磷含量在底层会有所增加, 这与点 1、点 2 较高的历史有机磷和点 8 钙结合态磷的大量堆积有关。

2.2 巢湖沉积物磷形态分布

表层沉积物中形态磷的含量分布研究表明(图 3), 巢湖表层沉积物中活性磷(弱吸附态磷、可还原态磷、金属氧化物结合态磷三者之和)含量很高, 占总磷的 44%~81%。沉积物活性磷的含量能真正反映沉积物的污染情况及其内源释放潜力的大小^[16]。可见, 巢湖表层沉积物中磷的生物可利用性很高, 有较大的释

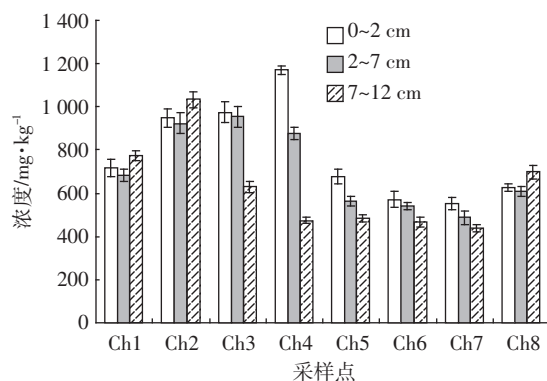


图 2 沉积物总磷含量剖面图

Figure 2 Total P concentrations in sediment profiles

放潜能。巢湖西湖区沉积物 NaOH-P 含量及其所占比例较高(图 3 和图 4), 各形态磷含量顺序为 NaOH-P> Org-P, BD-P> HCl-P> NH₄Cl-P。东湖区沉积物有机磷所占比例较大, 表现为 Org-P>NaOH-P> BD-P, HCl-P> NH₄Cl-P。东、西湖区沉积物形态磷含量的这种差异决定, 在外源控制和减少的情况下, 西湖区将产生更大程度的内源污染。

作为巢湖沉积物活性磷主要存在形式的金属氧化物结合态磷(NaOH-P), 主要指与 Fe 和 Al 结合, 并能与 OH⁻、有机配体等相交换的磷^[17], 在富营养化严重的西湖区含量比例达到 47%~60%, 明显高于东湖区, 对磷释放起重要贡献。西湖区受到点源污染和面源污染的程度要高于东湖区, 外源磷的大量输入是导致西湖区沉积物 NaOH-P 的含量和所占比例增大的主要原因, 也是导致西湖区水体高营养的主要原因^[6]。NaOH-P 在垂向分布上表现出下降的趋势, 这一方面可以表明近期人类的不合理开发活动对湖泊干扰的加剧促进了沉积物大量累积磷, 另一方面也是由于随沉积物深度的增加, 沉积物中的非晶矿物逐步有序化, 铁的氧化物和氢氧化物的结合能力逐渐降低^[18]。藻类水华暴发时会使湖水 pH 值升高, 从而能够导致该形态磷向水体的释放, 进一步为藻类的增殖提供营养来源, 促进或维持水华暴发。

弱吸附态磷(NH₄Cl-P)是一种立即可利用态磷, 是沉积物中最具活性、变化范围较大的一类磷形态^[19], NH₄Cl-P 的含量极低, 巢湖这部分磷含量仅占总磷的 0.03%~0.37%, 是所有磷分级成分中含量最低的。

有机磷(Org-P)是湖泊沉积物中磷活跃程度较低的部分, 是部分活性的磷形态^[20]。Org-P 主要是沉积物中各种动植物残体、腐殖质类有机物中含有的磷^[16],

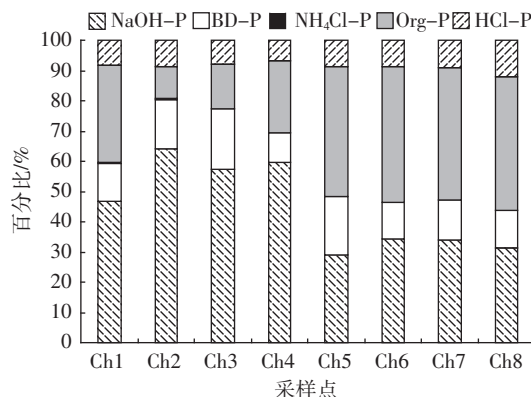


图 3 表层沉积物中各形态磷的含量分布

Figure 3 Content distribution of phosphorus forms in surface sediments

在巢湖并未发现受污染严重区域的 Org-P 含量高于相对污染较轻的区域,东湖区 Org-P 的含量已占到总磷的 43%~45%, 因此外源磷的输入对这部分磷的影响不大。但由于沉积物中也含有较高的有机磷,这种潜在的磷内负荷也是不容小视的。采样点 1 和 2 的

Org-P 含量在底层有所增加,这可能与该区域历史上受到较大的有机污染有关。其他点位的 Org-P 含量都是随深度的增加而降低,可见这些区域的有机物和磷负荷有增加的趋势。

可还原态磷(BD-P)对氧化还原电位极为敏感,

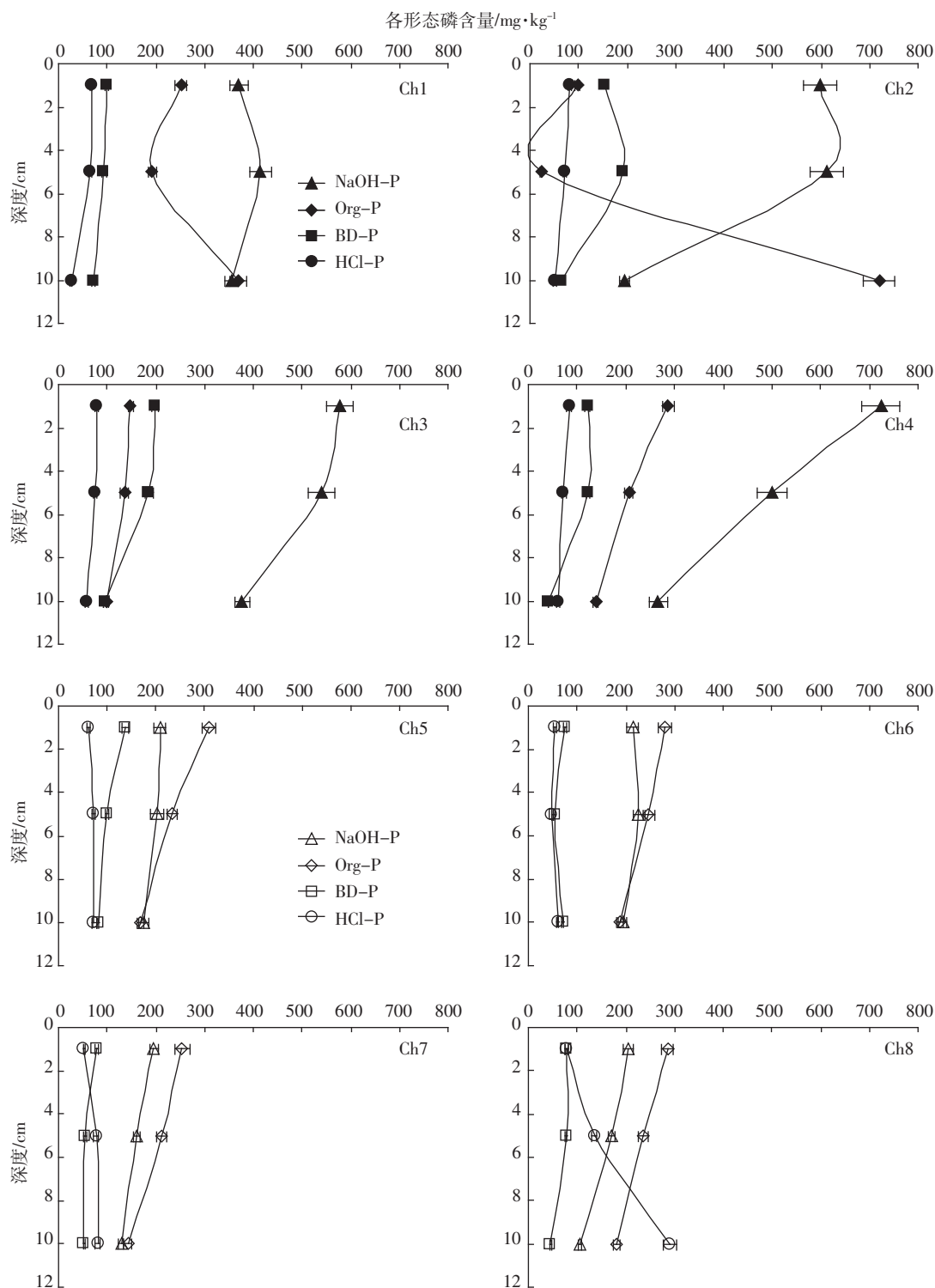


图 4 巢湖沉积物剖面 BD-P、NaOH-P、HCl-P 及 Org-P 含量

Figure 4 BD-P, NaOH-P, HCl-P and Org-P concentration in sediment profiles of eight locations

它随着氧化还原电位的变化而变化,当 Eh 降低时, Fe^{3+} 被还原并被溶解,磷被释放出来,进入间隙水^[17]。西湖区沉积物各层的 BD-P 含量普遍要高于东湖区,这与西湖区的重污染有关。BD-P 在垂向上总体表现为随深度增加呈减小趋势,说明巢湖磷负荷和水体污染状况有随时间增加的趋势。可还原态磷在厌氧条件下可释放到上覆水体,当水华大面积暴发以及死亡藻类的有机分解,水中溶解氧大量消耗,水-沉积物界面呈现厌氧状态,这部分磷可溶解释放到水体^[21]。

钙结合态磷(HCl-P)是沉积物 P 组分中惰性较显著的部分,很难被溶解,对间隙水及上覆水 P 含量影响较小^[22],巢湖 HCl-P 含量较低,只占总磷的 7%~12%。采样点 5、6 和 7 在表层 0~2 cm 的 HCl-P 含量略低于其他采样点,采样点 5、6 和 7 远离河口区,入湖污染物对它们影响较小,说明外源污染负荷对钙结合态磷也有一定影响。在垂直剖面上,西湖区钙结合态磷表现为,随深度增加而减小,这与西湖区外源磷的不断输入有关。在东湖区随深度的增加有增大趋势,尤其东湖区的 8 号点随深度增加很明显,这是因为东湖区柘皋一带有丰富磷矿,磷矿石含钙量较高,

并在沉积物中以钙磷化合物形式进行堆积,东湖区的 HCl-P 表现出沉积埋藏的特性^[23]。HCl-P 在低 pH 值下活性较强,在巢湖湖水微碱性环境下,这部分磷比较稳定。

2.3 间隙水中不同形态磷含量的分布特征

图 5 为巢湖不同区域总溶解性磷(DTP)、可溶性磷酸盐(DIP)、可溶性有机磷(DOP)含量的垂直分布。总体而言,大多数采样点从上覆水不同形态磷至下层间隙水不同形态磷的含量,呈先升高后降低的趋势,磷营养盐在浓度上的这种差异表明了沉积物有向上覆水释放的趋势。西湖区间隙水 DTP、DIP、DOP 含量普遍高于东湖区,这与西湖区污染较重、水华程度较大是分不开的,另外西湖区沉积物较高的磷内负荷也是重要原因。西湖区的采样点 2 和 3 在 5 cm 和 1 cm 处, DTP 含量达到了 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DIP、DOP 含量也已达到了 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,很明显的高于其他采样点 DTP、DIP、DOP 的含量,这与点 2 和 3 位于重污染河流入湖口,长期有大量工业废水和生活污水排入有关。

2.4 沉积物磷形态与间隙水中不同形态磷的相关分析

将巢湖沉积物各点各层样品磷形态含量同沉积

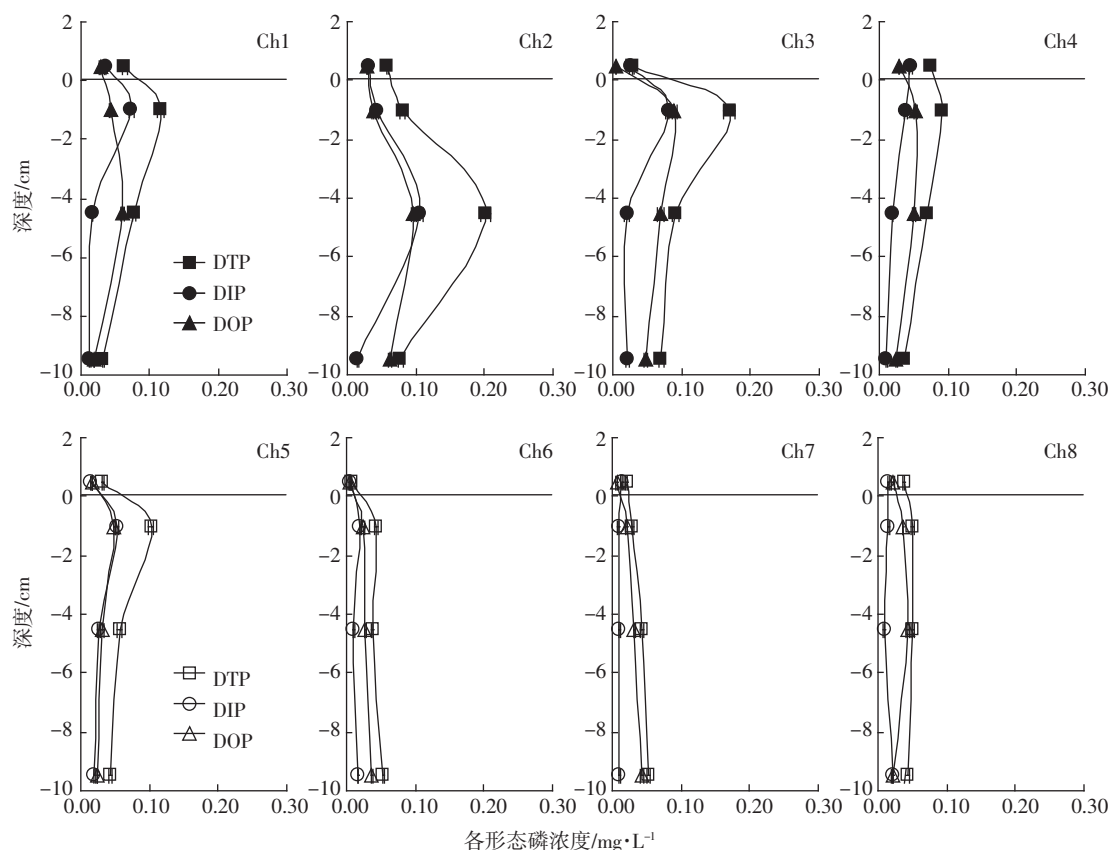


图5 巢湖间隙水 DTP、DIP、DOP 垂直变化

Figure 5 Vertical changes of DTP、DIP and DOP in the interstitial water of Lake Chaohu

物间隙水 DTP、DIP、DOP 浓度进行相关性分析可知(表 3), 巢湖沉积物磷形态 BD-P、NaOH-P 与 TP 有显著的相关性 ($\alpha=0.01$), $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与 TP 显著正相关 ($\alpha=0.05$), 而 Org-P、HCl-P 与 TP 未见相关性, 因而巢湖沉积物中活性磷是 TP 的主要控制因素。间隙水中不同形态磷之间都有显著的相关性 ($\alpha=0.01$), 说明 DIP 和 DOP 的变化均能影响到 DTP 的变化, 这与胡俊等^[24]在滇池发现的间隙水不同形态磷的相关性特点较为一致。沉积物间隙水 DTP、DIP、DOP 浓度与 BD-P、NaOH-P 含量都有显著的相关性 ($\alpha=0.01$), 从图 4、图 5 中可以看出, 西半湖各点位 BD-P、NaOH-P 含量高于东半湖, 间隙水 DTP、DIP、DOP 也表现出西半湖高于东半湖的分布特点。BD-P、NaOH-P 表现出随深度减小的趋势, 间隙水磷也会相应产生这种变化趋势, 这也进一步验证了间隙水磷同 BD-P、NaOH-P 之间显著的相关关系。可见随着 BD-P、NaOH-P 的增加, 间隙水中不同形态磷含量也将增加, 间隙水是沉积物向上覆水过渡的介质, 是湖泊水体磷丰度的反映^[25], 因此 BD-P、NaOH-P 含量可以作为湖泊水体不同形态磷含量的指示。间隙水 DTP、DOP 与 TP 显著相关 ($\alpha=0.01$), DIP 与 TP 显著正相关 ($\alpha=0.05$), 表明间隙水中磷营养盐将随着沉积物磷含量的增加而增加, 这可解释西湖区沉积物总磷含量高于东湖区时, 间隙水磷含量也会高于东湖区的原因。HCl-P、Org-P 与间隙水各形态磷无相关性, 这也可由 HCl-P、Org-P 与间隙水磷的分布无关联性看出来, 这更显示它们惰性的特点。

3 结论

巢湖西湖区沉积物总磷含量较高, 特别是沉积物活性磷含量很高, 在一定环境条件下这部分磷将释放

到上覆水体, 其中金属氧化物结合态磷含量较高, 对磷释放起重要贡献。沉积物剖面显示, 巢湖磷负荷受人类活动影响较大, 特别是沉积物 NaOH-P、BD-P 含量随深度增加而减小说明巢湖磷负荷和水体污染有加重趋势。西湖区间隙水各层不同形态磷含量普遍高于东湖区, 水-沉积物界面磷营养盐浓度梯度给沉积物向水体扩散提供了条件。沉积物 BD-P、NaOH-P、TP 与间隙水中不同形态磷都有很好的相关关系, 沉积物 BD-P、NaOH-P 的变化可影响间隙水中磷营养盐的含量。因此, 在外源得到控制或逐步削减的情况下, 有效控制和减少沉积物中的内源磷负荷将成为防治巢湖富营养化的重要手段。

参考文献:

- [1] 范成新, 王春霞. 长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 71-74.
FAN Cheng-xin, WANG Chun-xia. Environmental geochemistry and eutrophication in the middle and lower reaches of the Yangtze River lakes[M]. Beijing: Science Press, 2006: 71-74.
- [2] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments[J]. *Limnol & Oceanogr*, 1992, 37(7): 1460-1482.
- [3] Hupfer H, Gachter R, Giovanoli R. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis[J]. *Aquatic Sciences*, 1995, 57(4): 305-324.
- [4] 张 路, 范成新, 池俏俏, 等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究[J]. 地球化学, 2004, 33(4): 423-432.
ZHANG Lu, FAN Cheng-xin, CHI Qiao-qiao, et al. Phosphorus species distribution of sediments in Lake Taihu and its main inflow rivers[J]. *Geochimica*, 2004, 33(4): 423-432.
- [5] 王绪伟, 王心源, 封 毅, 等. 巢湖沉积物总磷含量及无机磷形态的研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 56-59.
WANG Xu-wei, WANG Xin-yuan, FENG Yi, et al. Study on content of total phosphorus and forms of inorganic phosphorus in sediments of

表 3 巢湖间隙水中不同形态磷浓度同沉积物各形态含量的对应关系

Table 3 Relationships of the different forms of P concentrations in interstitial waters with phosphorus contents of different phosphorus species in sediments of Lake Chaohu

因子	TP	Org-P	$\text{NH}_4\text{Cl-P}$	BD-P	NaOH-P	HCl-P	DTP	DIP	DOP
TP	1.000								
Org-P	0.212	1.000							
$\text{NH}_4\text{Cl-P}$	0.417*	-0.082	1.000						
BD-P	0.666**	-0.342	0.370	1.000					
NaOH-P	0.793**	-0.303	0.398	0.785**	1.000				
HCl-P	0.017	-0.183	0.093	-0.150	-0.204	1.000			
DTP	0.608**	-0.224	0.352	0.825**	0.660**	-0.082	1.000		
DIP	0.488*	-0.268	0.384	0.738**	0.571**	-0.033	0.941**	1.000	
DOP	0.625**	-0.162	0.208	0.792**	0.641**	-0.129	0.899**	0.713**	1.000

注: * 显著性水平 $\alpha=0.05$; ** 显著性水平 $\alpha=0.01$, $n=24$ 。

- Chaohu Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 56–59.
- [6] 张敏, 谢平, 徐军, 等. 大型浅水湖泊-巢湖内源磷负荷的时空变化特征及形成机制[J]. *中国科学(D辑), 地球科学*, 2005, 35(增刊II): 63–72.
- ZHANG Min, XIE Ping, XU Jun, et al. Characteristic of time-space change and mechanism on endogene phosphorus load of the large-scale shallow water lake-lake Chaohu[J]. *Science In China Ser. D Earth Sciences*, 2005, 35(suppl II): 63–72.
- [7] 潘成荣, 汪家权, 郑志侠, 等. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(1): 43–47.
- PAN Cheng-rong, WANG Jia-quan, ZHENG Zhi-xia, et al. Forms of phosphorus and nitrogen existing in sediments in Chaohu Lake[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1): 43–47.
- [8] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(6): 22–26.
- WANG Yong-hua, QIAN Shao-meng, XU Nan-ni, et al. Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the east area of Chaohu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(6): 22–26.
- [9] 薛滨, 姚书春, 王苏民, 等. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(1): 122–127.
- XUE Bin, YAO Shu-chun, WANG Su-min, et al. Enrichment of nutrients and analysis of its reason in sediments of different kinds of lakes at middle and lower Yangtze River basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(1): 122–127.
- [10] 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[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(4): 359–366.
- FAN Cheng-xin, YANG Long-yuan, ZHANG Lu. The vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in Taihu Lake and their interrelations[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(4): 359–366.
- [11] 罗玉兰, 徐颖, 曹忠. 秦淮河底泥及间隙水氮磷垂直分布及相关性分析[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1245–1249.
- LUO Yu-lan, XU Ying, CAO Zhong. Vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and pore water in Qinhuai River and their relations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1245–1249.
- [12] 赵颖, 王国秀, 章北平. 典型城内过富营养化湖泊沉积物和间隙水中各形态磷的相关性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(4): 490–494.
- ZHAO Ying, WANG Guo-xiu, ZHANG Bei-ping. Relationship among different forms of phosphorus in sediments and interstitial water in typically inner-city hyper-eutrophic lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(4): 490–494.
- [13] 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: 182–188.
- JIN Xiang-can, TU Qing-ying. Lake eutrophication investigation criterion[M]. the second edition. Beijing: Chinese Environmental Science Publishing Company, 1990: 182–188.
- [14] Ruban V. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments; a synthesis of recent works[J]. *Frsenius J Anal Chem*, 2001, 370: 224–228.
- [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]. *J Environ Monitor*, 1999, 1(4): 403–407.
- [16] 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.
- LU Chang-wei, HE Jiang, SUN Hui-min, et al. Phosphorus speciation and distribution character in sediment of Wuliangsu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 878–885.
- [17] Zhou A M, Wang D S, Tang H X. Phosphorus fractionation and bio-availability in Taihu Lake (China) sediments[J]. *Journal of Environmental Science*, 2005, 17(3): 384–388.
- [18] 王雨春, 万国江, 王仕禄, 等. 红枫湖、百花湖沉积物中磷的存在形态研究[J]. *矿物学报*, 2000, 20(3): 273–278.
- WANG Yu-chun, WAN Guo-jiang, WANG Shi-lu, et al. Forms of phosphorus in sediments of Lake Baihua and Lake Hongfeng, Guizhou[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2000, 20(3): 273–278.
- [19] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece[J]. *Chemo-sphere*, 2002, 46: 1147–1155.
- [20] 王圣瑞, 赵海超, 周小宁, 等. 五里湖与贡湖不同粒径沉积物中有机质、总氮和磷形态分布研究[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(增刊): 11–14.
- WANG Sheng-rui, ZHAO Hai-chao, ZHOU Xiao-ning, et al. Study on organic matter, total nitrogen and phosphorus from distribution of different particle size fractions in the sediments from Wuli Lake and Gonghu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(suppl): 11–14.
- [21] 高丽, 杨浩, 周健民, 等. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(5): 777–781.
- GAO Li, YANG Hao, ZHOU Jian-min, et al. Sediment burden and release potential of phosphorus to water in Dianchi Lake, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5): 777–781.
- [22] 郭建宁, 卢少勇, 金相灿, 等. 滇池福保湾沉积物不同形态磷的垂向分布[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(2): 78–83.
- GUO Jian-ning, LU Shao-yong, JIN Xiang-can, et al. Vertical distribution of various forms of phosphorus in the sediments of fubao gulf, Dianchi Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(2): 78–83.
- [23] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Wat Res*, 2000, 34(7): 2034–2042.
- [24] 胡俊, 刘永定, 刘剑彤. 滇池沉积物间隙水中氮、磷形态及相关性的研究[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(10): 1391–1396.
- HU Jun, LIU Yong-ding, LIU Jian-tong, et al. Studying on the form and the relativity of nitrogen and phosphorus in the pore water of sediment in Dianchi Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(10): 1391–1396.
- [25] 扈传昱, 潘建明, 刘小涯. 珠江口沉积物中磷的赋存形态[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(4): 21–25.
- HU Chuan-yi, PAN Jian-ming, LIU Xiao-ya. Species of phosphorus in sediments from Peal River Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(4): 21–25.