

巢湖城市内河沉积物不同形态磷空间分布特征

杨长明, 徐琛, 尹大强, 李建华

(同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对巢湖市城市内河的表层沉积物及柱状沉积物进行了采样, 并采用修正后的标准测试程序(SMT)测定了其中的总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)、铁/铝磷(Fe/Al-P)和钙磷(Ca-P), 分析了各形态磷之间以及与沉积物有机质之间的相关性. 结果表明, 表层沉积物TP的质量分数在 $832.09 \sim 2\,572.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 其中以Fe/Al-P为主, 占总磷的比例为42.0%~62.3%. 采样点各形态磷随深度的增加总体呈现先升高后下降的趋势, 但不同采样点出现峰值的深度有所不同, 这种空间分布特征能够较好反映周边环境现状和入河污染负荷的变化. 不同深度沉积物中各形态磷之间存在极显著的相关性(概率水平 $P < 0.01$), 各形态磷与有机质也存在极其显著的正相关.

关键词: 巢湖市; 城市内河; 磷形态; 空间分布; 环境表征
中图分类号: X 131

文献标识码: A

Phosphorus Forms and Vertical Distribution in Sediments of Urban Rivers in Chaohu City

YANG Changming, XU Chen, YIN Daqiang, LI Jianhua

(Key Laboratory of Yangtze Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Total phosphorus (TP), inorganic-phosphorus (IP), organic-phosphorus (OP), Fe/Al-bound phosphorus (Fe/Al-P) and Ca-bound phosphorus (Ca-P) in surface sediments and sediment cores of urban rivers in Chaohu City of Anhui Province were measured based on the modified standard measurement and test (SMT) procedure of phosphorus forms in the freshwater sediments. The correlations between phosphorus forms and organic matter content were also analyzed. The results show that the TP content in surface sediments varies from 832.09 to $2\,572.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Fe/Al-P is the major phosphorus species, and accounts for 42.0%~62.3% of TP. With the increase of depth, the trends of all phosphorus forms first increase and

then decrease, and different sampling sites have different peak depths, which can well indicate surrounding environment status and changes in pollution load into the river. For the sediments of different depths, there are significant ($P < 0.01$) positive correlations between all phosphorus forms, and the correlations between organic matter contents and different phosphorus forms are also significant.

Key words: Chaohu city; urban river; phosphorous forms; distribution characteristics; environmental implications

磷的地球化学循环过程一直是环境领域广泛关注的话题, 一方面磷是生物所必须的重要营养元素, 同时过量的磷可能导致地表水体富营养化^[1]. 沉积物是内陆水域磷循环的一个重要环节, 通过各种途径进入水体的磷, 在矿物表面吸附或与铝、铁和钙等元素结合从而进入沉积物中. 当外源得到控制的情况下, 沉积物会作为内源向上覆水体释放磷, 产生二次污染^[2]. 沉积物中的磷具有不同的形态, 不同形态的磷潜在释放能力和生物有效性不同^[3], 因此, 研究沉积物中磷的形态及其分布特征对水体内源控制具有重要意义. 磷在垂直沉积剖面的分布特征, 一方面反映了早期成岩作用的动力学过程^[4]; 另一方面, 也反映了外源输入负荷变化等人为影响的重要信息.

目前, 国内有关沉积物磷赋存形态的研究, 主要集中于浅水湖泊以及河口^[5-7], 而对于典型城市内河沉积物研究较少. 城市内河水系是城市水环境的一个重要组成部分, 在城市生态环境建设中具有重要意义. 与一般水体相比, 城市内河水系的水文及沉积过程都受到严重的人为干扰. 高强度的生活和工业活动必将导致城市内河承载过量的污染负荷, 最终威胁到城市居民健康和城市环境质量^[8]. 我国城

收稿日期: 2010-12-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07316-4)

第一作者: 杨长明(1973—), 男, 副教授, 理学博士, 主要研究方向为退化湿地生态系统过程与效应、污染水体生态修复理论与技术.

E-mail: cmyang@tongji.edu.cn

市河流的污染日趋严重,其水质普遍劣于国家《地面水环境质量标准》中的 V 类水质^[9],近几年,随着城市污水管网建设和污水纳管率不断提高,入河污染负荷有所削减.但是,我国目前城市水系水质并未得到根本改善,这可能与沉积物内源污染持续高强度释放有密切关联.

本文通过对巢湖市主城区环城河柱状沉积物中不同形态磷含量测定和分析,比较和研究了不同河段沉积物磷形态变化和赋存特征,并对其环境意义进行了探讨,该研究为揭示城市内河水体污染特征提供一定的理论依据,也为今后城市水体内源污染控制和水环境修复提供技术支撑.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于安徽省巢湖市主城区环城河,长约 4.2 km,将其分为东、西两部分.东环城河位于老城区,周边人口密集,多年来,工业废水、城市生活污水直接入河,使内河水质日趋恶化,变成了巢湖市主城区的一条臭水河,水质多处于 V 类或劣 V 类.西环城河位于主城区外围,主要以农村和农业面源污染为主.近几年,随着巢湖城区市政管网建设,生活污水纳管率和处理率也逐步提高,入河污染负荷有所下降.但是,目前环城河水系仍未得到明显改善.

本次研究区域位置及采样点分布如图 1 所示.

1.2 现场采样与测定分析

1.2.1 样品采集与前处理

分别于2010年4月和10月,采用有机玻璃材

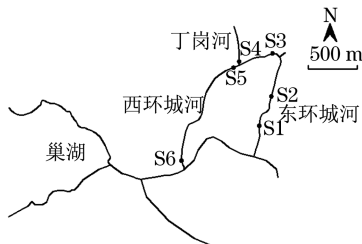


图 1 研究区域和采样点分布

Fig.1 The study area and sampling sites

料制作的柱状采样器在巢湖市环城河采集 6 个表层沉积物样品(0~10 cm)和 4 个柱状沉积物样品,其中柱状样位于 S1, S2, S5 和 S6 点.在采样现场采用薄板每隔 3 cm 切分沉积物柱,新鲜样品装入聚乙烯塑料袋封装,并放在冷藏箱内迅速带回实验室进行处理.样品冷冻干燥后研磨成粉末,并过 100 目筛,置于聚乙烯塑料袋中备用.所有采样点均采用 GPS 定位.

1.2.2 沉积物中磷的化学分级提取与分析

沉积物中各种形态磷采取欧洲标准测试委员会制定的 SMT 连续提取法测定^[3],并稍作修改,具体步骤如图 2 所示.该法具有操作简单、各形态磷的测定相对独立、准确性高等特点.该法将磷分为 5 种形态:①铁铝结合态磷(Fe/Al-P),包括 Fe, Mn, Al 氧化物及其氢氧化物包裹的磷,不稳定态磷也包括其中.该部分磷被认为可以被生物所利用,在一定条件下易释放到上覆水中.②钙结合态磷(Ca-P),包括与 Ca 结合的各种磷,该部分磷被认为是不可被生物所利用,它们在通常的弱碱性的水环境中活性是很低的.③无机磷(IP),主要包括 Fe/Al-P 和 Ca-P.④有机磷(OP),被认为部分可被生物利用,通过有机质

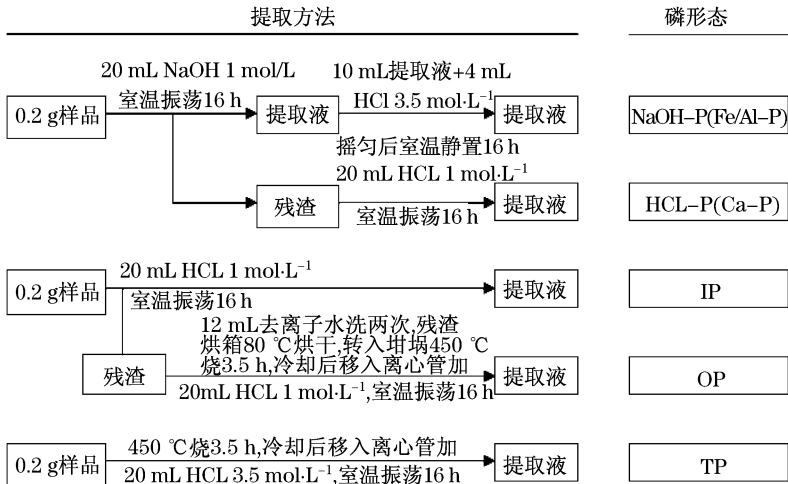


图 2 沉积物磷形态分级提取 SMT 法

Fig.2 SMT protocol for sequential extraction of phosphorus forms in sediment

的矿化释放到水中. 为保证数据质量, 对每个样品做 3 组平行测试. 用磷钼蓝法测定各提取液中磷酸盐的浓度, 测定仪器为 TU-1901 紫外可见分光光度计 (北京普析通用仪器有限责任公司).

1.2.3 沉积物有机质总量的测定

采用烧失法测定样品中的有机质, 用烧失量 (LOI, 以干重质量分数计) 来估算. 方法如下: ① 30 mL 瓷坩埚置于 450 ℃ 马弗炉中, 3.0 h 后取出放在干燥器中冷却至室温, 称量坩埚的质量 A , 精确到 ± 0.01 mg. ② 称量干燥样品与坩埚的总质量 B ; ③ 含有干燥样品的坩埚置于 450 ℃ 马弗炉中 3.5 h. ④ 灼烧后样品置于干燥器中冷却至室温, 称量样品 + 坩埚的质量 C . 有机质总量 = $(B - C)/(B - A)$.

1.3 数据统计与分析

试验数据采用 SPSS 11.5 统计软件和 Excel 2007 进行处理. 所有试验数据通过 ANOVA 变异分析程序进行统计分析. 采用邓肯新复检验法 (Duncan's new multiple range test) 对不同采样点磷形态分布差异进行统计估计, 在 $P < 0.05$ 的概率水平视为显著.

2 结果与讨论

2.1 采样点水质现状分析

自 2009 年巢湖水专项正式启动以来, 对巢湖环城河水系水质进行了长期监测和分析. 根据 2009—2010 年巢湖环城河水系各采样点水质监测数据分析表明 (表 1), 巢湖环城水系总体质量较差, 其中总氮和总磷指标超标严重, 达不到景观水质标准. 从不同采样点来看, 环城河不同河段水质存在显著差异 ($P < 0.05$), 总体来说, 东环城河水质明显劣于西环城河, 东环城河水体中总氮 (TN) 和总磷 (TP) 较西环城河平均分别高出 63.8% 和 48.2%. 造成这种水质差异的主要原因是东、西段环城河入河和内源污染负荷不同所致. S1 和 S2 采样点位于老城区, 内源与外源负荷皆较大, 从而造成水质总体较差; S6 点位于巢湖与环城河水闸附近, 受调水稀释, 水质总体质量较好.

表 1 研究区域不同采样点主要水质指标
Tab.1 General characteristics of surface waterquality at different sample sites

采样点	pH	ρ (溶解氧)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (化学需氧量)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (氨氮)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (总氮)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (总磷)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
S1	7.43	4.56	35.7	0.712	4.89	0.652
S2	7.35	3.23	47.2	0.893	4.23	0.437
S3	7.52	3.79	33.7	0.683	3.67	0.498
S4	7.87	5.23	22.8	0.432	2.29	0.372
S5	7.49	5.78	30.5	0.612	3.49	0.443
S6	7.62	6.35	18.9	0.289	2.03	0.256

2.2 表层沉积物中磷的形态

不同采样点表层沉积物中磷形态的分布特征见表 2 和图 3. 结果表明, 在所有样品中总磷 (TP) 的质量分数范围是 $832.09 \sim 2\,572.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $1\,854.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Fe/Al-P 的质量分数范围是 $377.56 \sim 1\,240.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $896.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ca-P 的质量分数范围是 $282.53 \sim 1\,171.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $680.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, OP 的质量分数范围是 $162.20 \sim 691.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $374.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, IP 的质量分数范围是 $722.65 \sim 2\,173.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $1\,570.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 通过比较可发现, 6 个采样点不同形态磷的分布特征存在显著差异. 东环城河各采样点 (S1, S2 和 S3) 总磷和各形态磷质量分数均普遍高于

西环城河, 这与水质变化趋势基本吻合.

由图 3 可看出, Fe/Al-P 为沉积物中磷的主要形态, 占总磷的比例为 42.0%~62.3%. 有研究表明, 沉积物中 Fe/Al-P 占总磷的比例与水质污染程度相一致, 富营养化越严重的区域 Fe/Al-P 占总磷比例越高^[3]. Fe/Al-P 和 OP 被认为是易于释放的磷形态^[3], 样品中潜在释放磷 (Fe/Al-P 和 OP) 占总磷的比例为 63.6%~88.2%, 说明巢湖城市内河沉积物中磷对水体有较高的污染风险. 东环城河 3 个采样点 TP 和易释放形态磷 (Fe/Al-P 和 OP) 较西环城河平均分别增加了 121.8% 和 78.0%, 表明环城水系不同河段所承受污染负荷存在显著差异. 除 S3 点的 Ca-P 略高于 Fe/Al-P 外, 其他采样点的 Ca-P 都低于 Fe/Al-P. 潜在释放磷 (Fe/Al-P 和 OP) 占总磷

的比例 S5 点最高,为 88.2%.所有样品中 OP 占 TP 比例最大,S4 点最小,OP 的变化幅度较 Fe/Al-P 和 Ca-P 为小.

表 2 沉积物样品中各形态磷的质量分数
Tab.2 Concentrations of phosphorus forms in surface sediment samples (0~10 cm)

采样点	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\rho(\text{Fe/Al-P})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	占 TP 比例/%	$\rho(\text{Ca-P})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	占 TP 比例/%	$\rho(\text{OP})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	占 TP 比例/%	$\rho(\text{IP})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	占 TP 比例/%
S1	2 572.41	1 155.34	44.9	875.49	34.0	480.95	18.7	2 033.04	79.0
S2	2 476.49	1 240.87	50.1	880.91	35.6	443.29	17.9	2 099.08	84.8
S3	2 414.82	1 014.25	42.0	1 171.54	48.5	233.47	9.7	2 173.50	90.0
S4	1 068.47	665.33	62.3	282.53	26.4	172.31	16.1	945.33	88.5
S5	1 763.91	925.52	52.5	530.34	30.1	403.51	22.9	1 450.68	82.2
S6	832.09	377.56	45.4	342.49	41.2	162.20	19.5	722.65	86.8

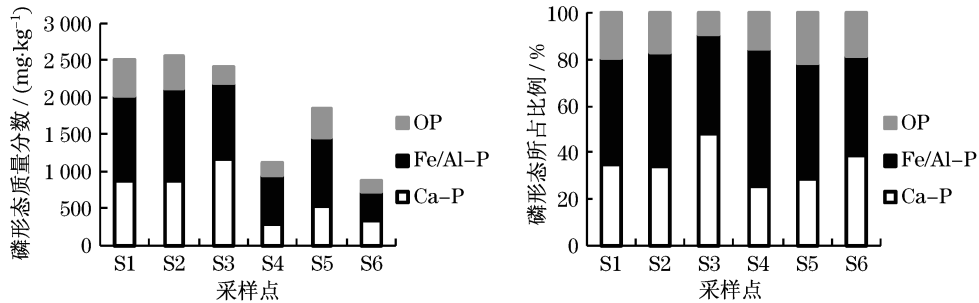


图 3 表层沉积物样品中各形态磷的分布
Fig.3 Distribution of phosphorus forms in surface sediment samples

东环城河位于巢湖市老城区,居民区人口密度大,餐饮业和洗浴业发达,大量的生活污水长期未经处理直接通过排污口排入环城河内,大量营养盐逐年沉积在河道底泥中.而西环城河过去为郊区农村,周边开发较晚,主要污染源是农业面源及农村生活污水,其入河污染负荷明显小于东环城河.S6 点位于由巢湖向西环城河调水的进水口,总体水质较好,使得该采样点沉积物中 P 的含量较低.

2.3 沉积物中各种磷形态的垂直分布特征

对采集的 4 个柱状沉积物样品进行分析,得到

沉积物样品中不同磷形态质量分数的垂直分布特征(图 4).由图 4 可以看出,不同位点的柱状沉积物的总磷质量分数的垂直分布特征有明显的差别.

其中 S2 和 S5 点相似,都是表层较低,亚表层最高,之后随深度的增加逐渐降低.S2 点在 5~10 cm 范围内随深度增加总磷质量分数迅速下降,大于 10 cm 后递减幅度减弱.S5 点在 10~35 cm 内的递减速度基本保持一致,35 cm 之后总磷质量分数基本不变.S1 和 S6 点相似,都是表层变化不大,在中间某一层突然增加产生峰值,之后再迅速下降.S1 和 S6 点

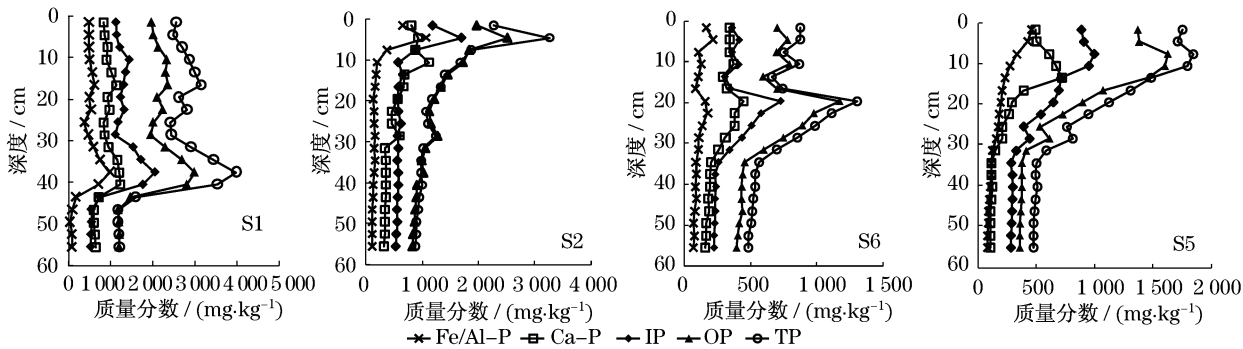


图 4 沉积物样品中各形态磷垂直分布特征
Fig.4 Depth distribution of phosphorus forms in sediment cores

的区别在于出现峰值的深度不同. S1 点的峰值出现在约 38 cm 处,之后便迅速下降,5 cm 内降幅达到 70.21%. S6 点的峰值出现在约 20 cm 处,之后下降的速度较 S1 点缓慢,在 20~35 cm 内的递减速度基本保持一致. 这两种分布特征在他人的研究^[10-13]中都出现过.

上述各采样点不同磷形态垂直分布特征的差异性,主要与采样点所处有的河段的污染负荷和沉积历史有关. S1 点位于一个小公园旁,该点特殊的垂直分布特点可能与早期有大量磷输入,而公园建成后磷输入急剧减少有关. S2 点距离曾经的一个排污口较近,该排污口在几年前已关闭,这种污染负荷的变化在沉积物磷的垂直变化中显现出来. S5 点磷的垂直变化体现出了 S5 点沉积物中磷污染的富集过程,可能与该点农业面源污染的持续输入有关. S6 点位于从巢湖调水的调水口,该点的垂直分布特征可能与政府实施的调水工程有关. 巢湖水质优于环城河,巢湖水的频繁调入降低了 S6 点水体中的磷,因此该点沉积物对磷的吸附呈现出减少的趋势.

同一采样点中各形态磷的垂直分布特征大体相同(图 4),其中 Fe/Al-P 与 TP 的变化趋势非常相似,说明 Fe/Al-P 与 TP 有很好的相关性. 在 Fe/Al-P, Ca-P, OP 这 3 种主要磷形态中 Fe/Al-P 占 TP 的比例最大. 随深度的增加, Ca-P, OP 比 Fe/Al-P 与 TP 的变化幅度小,这是因为 Ca-P, OP 比 Fe/Al-P 稳定.

2.4 沉积物有机质与各形态磷的关系

有机质 LOI 是沉积物理化性质中的重要指标,对沉积物磷的释放和吸附具有很大的影响^[14]. 表 3 为不同采样点表层沉积物各形态磷之间及其与有机质之间的相关分析. 从表 3 可明显看出,研究区域表层沉积物中不同形态磷之间均存在不同程度的相关性,其中以 TP 与 Fe/Al-P 的相关性最好,达到极显著水平($P<0.01$),其次是 Ca-P,达到显著水平,而 TP 与 OP 的相关性较差,未达到显著水平. 以上相关分析表明,巢湖环城河沉积物中 TP 的贡献主要来自 Fe/Al-P,具有很高的潜在释放风险. Fe/Al-P, Ca-P 和 OP 等 3 种主要磷形态之间没有显著相关性,可能是由于这 3 种形态磷的来源不同所致. 有机质的含量与 OP 显著相关,与其他形态磷无显著相关性.

以 S1 点为例,分析了柱状沉积物中不同深度各形态磷之间以及与有机质之间的相关性(表 4). 从表 4 可以明显看出,不同深度的沉积物中各形态磷之间都具有极其显著的正相关性,说明随深度的增加各

形态磷的变化趋势非常相似,这一特征在之前的垂直分布中也可以明显看出. 不同深度的沉积物的有机质与各形态磷之间也具有极其显著的相关性.

表 3 不同位点表层沉积物样品中各形态磷之间
以及与有机质之间的相关性

Tab.3 Correlation coefficients between phosphorus
forms and LOI in surface sediment samples

	LOI	TP	Fe/Al-P	Ca-P	OP	IP
LOI	1.000	0.431	0.598	0.077	0.868 ¹⁾	0.345
TP		1.000	0.957 ²⁾	0.910 ¹⁾	0.660	0.990 ²⁾
Fe/Al-P			1.000	0.777	0.711	0.937 ²⁾
Ca-P				1.000	0.357	0.948 ²⁾
OP					1.000	0.606
IP						1.000

1)在 0.05 水平上显著相关; 2)在 0.01 水平上显著相关;样本数 $n=6$.

表 4 S1 点柱状沉积物中不同深度各形态磷之间
以及与有机质之间的相关性

Tab.4 Correlation coefficients between phosphorus
forms and LOI in sediment core of S1

	LOI	TP	Fe/Al-P	Ca-P	OP	IP
LOI	1.000	0.972 ²⁾	0.964 ²⁾	0.936 ²⁾	0.979 ²⁾	0.966 ²⁾
TP		1.000	0.984 ²⁾	0.969 ²⁾	0.989 ²⁾	0.996 ²⁾
Fe/Al-P			1.000	0.943 ²⁾	0.980 ²⁾	0.992 ²⁾
Ca-P				1.000	0.953 ²⁾	0.969 ²⁾
OP					1.000	0.982 ²⁾
IP						1.000

1)表示在 0.05 水平上显著相关; 2)表示在 0.01 水平上显著相关;样本数 $n=19$.

有机质中的腐殖质可以形成胶膜粘覆在粘土矿物、铁、铝氧化物以及碳酸钙等无机物内外表面形成无机有机复合体,提供了重要的无机磷吸附位点,对于水-沉积物界面磷迁移转化过程产生重要影响^[15]. 本研究显示,在同一采样点不同深度沉积物中不同形态磷含量与有机质呈现极显著的相关,一方面表明,同一地点河道底泥沉积过程中,有机质与磷具有一致的来源;另外也说明,沉积物有机无机复合胶体对磷具有捕获作用. 但是,不同采样点表层沉积物各形态磷与有机质含量却没有表现出预期的相关性,这还有待于进一步研究.

3 结论

(1) 巢湖市城市内河表层沉积物 TP 的质量分

数范围是 $83.2.09 \sim 2572.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中以 Fe/Al-P 为主,占总磷的比例为 $42.0\% \sim 62.3\%$. 3 种主要磷形态的质量分数的大小依次为 Fe/Al-P > Ca-P > OP. 在水平分布上,东环城河沉积物不同形态磷的质量分数均明显高于西环城河. 潜在释放磷(Fe/Al-P 和 OP)占总磷的比例以 S5 点最高,占 88.2% .

(2) 总体来说,不同形态磷的质量分数随沉积物深度的增加呈现出先增加后减少的变化趋势;不同采样点柱状沉积物磷形态的垂直分布特征有明显的差别,磷峰值出现的位置也有所不同,可以很好表征区域外源污染负荷变化规律. 同一采样点中不同形态磷的垂直分布特征大体相同,其中 Fe/Al-P 与 TP 的垂直变化趋势非常相似.

(3) 表层沉积物中 TP 的质量分数与 Fe/Al-P 的相关性最好,其次是 Ca-P,TP 与 OP 的相关性较差. Fe/Al-P, Ca-P, OP 等 3 种主要磷形态之间无显著相关性. 不同深度的沉积物中各形态磷之间都具有极其显著的相关性,各形态磷与有机质也存在极其显著的正相关关系. 说明不同采样点其沉积物磷的来源有所不同. 同一采样点,有机质与磷具有较好的同源性.

参考文献:

- [1] Alexander R B, Smith R A. Trends in the nutrient enrichment of US rivers during the late 20th century and their relation to changes in probable stream trophic conditions[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1): 639.
- [2] 王世亮, 王志刚, 王萍, 等. 大辽河水系沉积物剖面磷的形态和分布特征[J]. *环境科学*, 2009, 30(12): 3494.
WANG Shiliang, WANG Zhigang, WANG Ping, et al. Chemical forms and distribution of phosphorus in the sediment profiles of the daliaohe river systems[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(12): 3494.
- [3] Medeiros J J G, Cid B P, Gomez E F. Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2005, 381: 873.
- [4] Castelltort S, Van den Driessche J. How plausible are high-frequency sediment supply-driven cycles in the stratigraphic record? [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 157(1-2): 3.
- [5] 侯立军, 刘敏, 许世远, 等. 长江口岸带柱状沉积物中磷的存在形态及其环境意义[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(2): 7.
HOU Lijun, LIU Min, XU Shiyuan, et al. Species of phosphorus in core sediments from the Changjiang Estuary and its environmental significance[J]. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(2): 7.
- [6] 岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中磷的分布特征及其环境意义[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(1): 21.
YUE Weizhong, HUANG Xiaoping. Distribution characteristics of phosphorus in core sediments from Zhujiang River Estuary and its environmental significance [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(1): 21.
- [7] 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.
ZHANG Lu, FAN Chengxin, CHI Qiaqiao, et al. Phosphorus species distribution of sediments in lake Taihu and its main inflow rivers[J]. *Geochimica*, 2004, 33(4): 423.
- [8] Kevin G T, Philip N O. Sediments in urban river basins: a review of sediment-contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities[J]. *J Soils Sediments*, 2009, 9: 281.
- [9] 吕永鹏, 徐启新, 杨凯, 等. 城市河流生态修复的环境价值及实现机制[J]. *水利学报*, 2010, 41(3): 275.
LV Yongpeng, XU Qixin, YANG Kai, et al. Environmental value of urban river eco-restoration and its realization mechanism [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(3): 275.
- [10] Lukkari K, Leivuori M, Hartikainen H. Vertical distribution and chemical character of sediment phosphorus in two shallow estuaries in the baltic sea[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 90: 171.
- [11] Triplett L D, Engstrom D R, Edlund M B. A whole-basin stratigraphic record of sediment and phosphorus loading to the St. Croix River, USA[J]. *J Paleolimnol*, 2009, 41: 659.
- [12] 林悦娟, 吴峰, 邓南圣, 等. 武汉东湖上覆水和沉积物中磷形态的垂直分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6): 1152.
LIN Yuejuan, WU Feng, DENG Nansheng, et al. Phosphorus fractions and vertical profiles in sediment core and overlying water of Donghu Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1152.
- [13] 俞林伟, 谭镇, 钟萍, 等. 广州流花湖底泥磷的垂直变化特征[J]. *生态环境*, 2007, 16(5): 1358.
YU Linwei, TAN Zheng, ZHONG Ping, et al. Vertical distribution of phosphorus in the sediments of Liuhuahu lake, Guangzhou, southern China [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5): 1358.
- [14] 朱广伟, 陈英旭. 沉积物中有机质的环境行为研究进展[J]. *湖泊科学*, 2001, 13(3): 272.
ZHU Guangwei, CHEN Yingxu. A review of geochemical behaviors and environmental effects of organic matter in sediments[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13(3): 272.
- [15] Pant H K, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(4): 1474.