巢湖表层沉积物中磷赋存形态的时空变化

徐康¹,刘付程²,安宗胜¹,高毅¹,韩曦¹,孙庆业^{1*}

(1. 安徽大学资源与环境工程学院,合肥 230601; 2. 淮海工学院测绘工程学院,连云港 222005)

摘要:以巢湖表层沉积物为对象,采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 分离方法分析总磷(total phosphorus, TP)、有机 磷(organic phosphorus, OP)、无机磷(inorganic phosphorus, IP)、铁铝磷(NaOH-P)、钙磷(HCl-P)等磷形态的含量,利用 ArcGIS 9.2 和地统计学软件 GS + 5.3 进行空间数据和插值处理,探讨了巢湖表层沉积物中磷的形态分布特征及来源.结果表 明:①沉积物中 TN、TP 和有机质含量的季节变化较小,在空间上均表现出西半湖含量高于东半湖的分布特点; C/N 比率在 21.35~28.19之间(平均值为 24.94),表明巢湖的入湖污染物主要以面源污染为主.②巢湖表层沉积物中 TP 含量的变化范围为 528.90~1 385.71 mg·kg⁻¹, IP 为主要赋存形态(占 TP 的质量分数为 55.78% ~79.86%).③巢湖表层沉积物中,OP 含量为 169.05~841.24 mg·kg⁻¹,东、西半湖 OP 含量分别为 376.02 mg·kg⁻¹和 406.53 mg·kg⁻¹(占 TP 的质量分数为 47.49% 和 36.28%); NaOH-P 含量为 33.77~411.37 mg·kg⁻¹,东、西半湖含量分别为 108.37 mg·kg⁻¹和 276.30 mg·kg⁻¹(占 IP 的质量分数为 21.73% 和 33.12%); HCl-P 含量为 194.95~477.45 mg·kg⁻¹,东、西半湖 HCl-P 含量分别为 321.71 mg·kg⁻¹和 338.08 mg·kg⁻¹(占 IP 的质量分数为 64.50% 和 40.53%),是 IP 的主要组成部分.④冬春季节 OP 含量高于夏秋季节,而夏秋季节 HCl-P 和 NaOH-P 含量高于冬春季节.

关键词:巢湖;沉积物;磷;形态分布;标准测试程序 中图分类号:X131.2 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)11-3255-09

Spatial and Temporal Variations of Phosphorus Forms in Surface Sediments of Chaohu Lake

XU Kang¹, LIU Fu-cheng², AN Zong-sheng¹, GAO Yi¹, HAN Xi¹, SUN Qing-ye¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. School of Geodesy & Geomatics Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Total phosphorus(TP), inorganic-phosphorus(IP), organic-phosphorus(OP), Fe/Al-bound phosphorus(NaOH-P) and Cabound phosphorus(HCl-P) in surface sediments of Chaohu Lake were measured, using the standard measurement and test (SMT) procedure of phosphorus forms in freshwater sediments. ArcGIS 9.2 and goestatistics software GS + 5.3 were applied to process the spatial data and interpolation. Results showed that no significant seasonal variation of TN, TP and organic matter contents in sediments were presented, and the western lake had higher contents of TN, TP and organic matter than those in eastern lake; the C/N ratios varied from 21. 35 to 28. 19, with average value of 24. 94, which demonstrated the dominance of non-point source pollution. The TP contents in surface sediments ranged from 528. 90 to 1 385. 71 mg·kg⁻¹, and the main form of TP in sediments was IP(accounted for 55. 78% -79. 86% of TP). The OP in sediments ranged from 169. 05 mg·kg⁻¹ to 841. 24 mg·kg⁻¹, with eastern lake and western lake were 376. 02 mg·kg⁻¹ and 406. 53 mg·kg⁻¹, respectively (accounted for 47. 49% and 36. 28% of TP); the NaOH-P contents in sediments ranged from 33. 77 mg·kg⁻¹ to 411. 37 mg·kg⁻¹, with eastern lake and western lake of 376. 02 mg·kg⁻¹ and 406. 53 mg·kg⁻¹, respectively(accounted for 21. 73% and 33. 12% of the IP); the HCl-P contents ranged from 194. 95 mg·kg⁻¹ to 477. 45 mg·kg⁻¹, with eastern lake and western lake 321. 71 mg·kg⁻¹ and 338. 08 mg·kg⁻¹, respectively (accounted for 64. 50% and 40. 53% of the IP), which was the main species of IP. The OP contents was high in spring and winter compared with summer and autumn, while the contents of HCl-P and NaOH-P in summer and autumn were higher than those in spring and winter. **Key words**; Chaohu Lake; sediments; phosphorus; distribution form; standard measurement and test(SMT)

磷是湖泊生态系统中初级生产力的主要影响因 子之一,而过剩的磷又会导致湖泊的富营养化^[1,2], 因此人们对其在湖泊生态系统中的循环非常关注. 湖泊沉积物作为湖泊湿地生态系统生源要素的重要 源与汇^[3],在促进湖泊富营养化的进程中扮演着十 分重要的角色.已有的研究表明,环境中的磷进入沉 积物后并不只是简单地累积富集,而是随着氧化还 原等环境条件的改变,磷的各种形态也相应地发生 一系列转化^[4,5],通过研究湖泊沉积物中磷的形态 及分布特征,有助于阐明磷输送、积累和再生等过 程^[6-8],对湖泊内源治理及富营养化发生机制的研

- 基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07103-003)
- 作者简介:徐康(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境修 复技术,E-mail:kxu@ecologyen.org
 - * 通讯联系人, E-mail: sunqingye@ ahu.edu.cn

收稿日期:2010-12-07:修订日期:2011-04-11

究、治理蓝藻水华具有重要意义.

沉积物中不同形态磷的分级分离步骤源于土壤 学中相应的化学方法, Chang 等^[9]首次采用磷分级 提取法来区分磷的不同组分. 近几十年来, 该方法不 断被修正和改进^[10-14], 欧洲标准测试委员会框架下 发展的 SMT (standard measurement and test)分离方 法^[15]具有操作简单, 各形态磷的测定相对独立, 准 确性好的特点, 而且测定值之间可以相互检验, 为许 多学者所采用, 如金相灿^[16]、姚扬^[17]、王晓丽^[18] 等利用 SMT 法检测太湖及黄河中上游表层沉积物 磷的赋存形态变化.

巢湖是一个富营养化严重的浅水型湖泊,为我 国重点治理的"三湖"之一.已有的研究表明,西湖 区的 TP 含量明显高于东湖区^[19,20],外源磷的输入 是导致西湖区磷含量较高的主要原因之一^[21],IP 为 TP 的主要赋存形态.本研究采用欧洲标准测试委员 会框架下发展的 SMT 分离方法检测巢湖表层沉积 物中总磷、有机磷、无机磷、钙磷以及铁铝结合态 磷含量水平,利用 AreGIS 9.2 和地统计学软件 GS + 5.3 进行空间数据和插值处理,探讨了巢湖表层沉 积物中磷形态的时空变化特征及来源,以期为巢湖 沉积物中磷的生态风险评价和环境管理提供基础数 据和理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

巢湖位于安徽省中部,地理坐标为北纬 31°43′ ~31°25′,东经 117°17′~117°52′,湖区面积 760 km²,流域面积 13 486 km²,是我国著名的五大淡水 湖之一,也是巢湖市重要的饮用水源地^[22].流域属 副热带季风区气候,多年平均年降水量1 100 mm,季 节分布不均,局部地区5~9 月降水量可占全年降水 65%左右.巢湖流域地处江淮丘陵区,低山及丘陵岗 地分布面积较大,水土流失严重^[23],流域内由地貌 特征形成的 33 条河流呈放射状汇入巢湖.巢湖流域 是安徽省的重要产粮区,农业用地约占 60%^[24],农 业面源污染比较严重.巢湖的主要污染物为总磷和 总氮,巢湖流域由面源污染排放的总磷占排放总量 的 43.4%^[25].

1.2 样品采集和处理

利用 GPS 全球卫星定位系统,于 2008 年 2 月、 7 月、10 月和 12 月对巢湖 18 个点位利用面积为 1/16 m² 的改良彼得生采泥器采集表层 0~10 cm 沉 积物样品,每个样点样品由 4 个平行样混合而成.采





样点布置如图1所示.泥样采集后立即放入约4℃保 温箱中保存带回实验室.样品经真空冻干后,研磨、 过100目筛备用.

1.3 样品分析方法

磷形态分析方法采用在欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 分离方法^[15].该方法将磷分为 5 种形态,即 NaOH-P(Fe/Al 结合态磷)、HCl-P(Ca 结合态磷)、IP(无机磷)、OP(有机磷)和 TP(总磷). 其他理化指标的测定,均根据文献[26]中的有关规定,pH、电导率采用电极法测定($m_{ii R i i i}$ V_{x} = 1 g: 2.5 mL),总有机质含量采用灼烧法(550 ± 5)℃测定,总氮采用凯氏定氮法测定.

1.4 数据处理与制图表达

沉积物不同形态磷含量的描述性统计分析采用 SPSS 12.0 完成.空间数据处理和插值主要是在 AreGIS 9.2 和地统计学软件 GS + 5.3 下进行的.以 采样点经纬度坐标为基础,运用 AreGIS 9.2 进行投 影转换,生成以 m 为单位的平面 km 网坐标;在此 基础上以不同形态磷含量作为变量,运用 GS + 5.3 对其进行 Kriging 插值,插值结果再经 AreGIS 9.2 进 行制图表达.

2 结果与讨论

2.1 基本理化性质

表层沉积物的基本理化性质见表 1. 沉积物的 pH 在 5.95 ~ 7.61 之间,春、夏、秋 3 季的 pH 平均 值分别为 7.12、7.25、7.04,大于冬季的 pH 平均值 6.36. 电导率在 116 ~ 1 161 μS·cm⁻¹之间,西半湖 电导率大于东半湖;春、夏、秋 3 季的电导率平均 值为 315.22 ~ 430.48 μS·cm⁻¹,不到冬季电导率 881.14 μS·cm⁻¹的一半.总氮、总磷和有机质含量 分别为 567.00 ~ 1986.60 mg·kg⁻¹、528.90 ~ 1385.71 mg·kg⁻¹和2.12% ~ 8.72%,不同季节的总氮、总磷和有机质含量相差较小,但西半湖的含量均比东半湖高出40% ~ 50%.可能的原因是东、西半湖在污染物来源或数量上存在较大差别:一方面,西半湖接纳合肥市及周边城镇的工业、生活污水,大量营养物质进入湖泊;另一方面,杭埠河携带入湖的面源营养物质量远大于其他入湖河流^[22]; 再者,20世纪60年代建坝造闸后,巢湖成了半封闭性水域,水流减缓,因风向和较高的营养水平导致西半湖蓝藻频发,死亡藻类的长期累积也导致沉积物 中营养物质含量增高^[20].

沉积物中 C/N 比值对物质来源具有指示意义, 高的比值(如 > 20)常表示有机质来源于地表径流 携带的陆源植物残体^[27],巢湖表层沉积物中 C/N 比在 21.35~28.19 之间,平均值为 24.94,表明了巢 湖的有机质主要源自流域的地表径流所携带的有机 质.相关分析表明,沉积物中总氮、总磷、有机质含 量之间相关系数分别为 $R_{\text{TN-OM}} = 0.88$ 和 $R_{\text{TP-OM}} =$ 0.91,说明沉积物中总氮、总磷与有机质具有同源 性,这一结果也表明了目前巢湖水体污染主要来自 于流域内的农业及农村的面源污染.

表1 巢湖表层沉积物的理化性质1)

Table 1 Physicochemical property in surface sediments (Mean ± S. D.)						
季节	湖区	pH	电导率	总氮	总磷	有机质
			∕µS•cm ⁻¹	∕mg•kg ⁻¹	∕mg•kg ⁻¹	/%
春季	东半湖	7.19 ± 0.16	321.69 ± 59.24	956. 31 ± 199. 91	795.53 ±117.47	4.02 ± 1.26
	西半湖	7.06 ± 0.13	472.00 ± 102.90	1652.00 ± 149.48	1171.14 ± 91.33	6.09 ± 0.37
夏季	东半湖	7.17 ± 0.13	382.70 \pm 82.17	1032.88 ± 301.02	846.05 ± 98.34	4. 53 ± 1. 32
	西半湖	7.33 ± 0.18	478. 20 \pm 96. 92	1453.48 ±442.12	1067.41 ± 189.40	7.06 ± 2.17
秋季	东半湖	7.07 ± 0.25	233. 85 ± 58. 04	949.85 ± 276.59	753.62 ± 86.57	4.40 ± 1.16
	西半湖	7.00 ± 0.32	396. 60 ± 34. 36	1523. 20 ± 229. 70	1081.18 ± 97.06	5.92 ± 0.88
冬季	东半湖	6.31 ± 0.36	767.08 \pm 197.10	992.92 ± 203.08	771.70 ± 90.04	4.06 ± 0.88
	西半湖	6. 42 \pm 0. 24	995. 20 ± 141. 92	1416.80 ± 198.58	1162.74 ± 167.60	6.57 ± 0.55

1) 西半湖为7个采样点平均值, 东半湖为11个采样点平均值

2.2 沉积物中的 TP 含量分布

由图2可以看出,巢湖表层沉积物 TP 含量在各 个季节波动较小,春季(983.33 mg·kg⁻¹)含量最高, 夏季(956.73 mg·kg⁻¹)和秋季(917.40 mg·kg⁻¹)含 量依次降低,冬季(967.22 mg·kg⁻¹)含量略有上升. 沉积物中 TP 含量在空间上表现出东、西湖区含量 较高,而湖中部(8~11和17、18号点)含量较低的 分布特点,这与张敏^[21]和屠清瑛^[22]等的研究结果 相一致. 西半湖 TP 含量较高一方面与接纳合肥市 及周边城镇的工业废水、生活污水有关,另一方面 与杭埠河、丰乐河、南淝河等入湖河流带来的大量 非点源污染有关^[23,28,29]. 东半湖 TP 含量较高可能 有2个原因,一方面巢湖北部震旦系与寒武纪砂页 岩中含有磷矿床,不断地被各种形式开采^[22],导致 这一湖区沉积物中磷含量较高;另一方面,巢湖东 半湖靠近巢湖市,人口的递增和城市的发展导致污 染加重,排放大量的污染磷.

从图 2 可以看出,靠近 1、14 和 15 号点的双桥 河、杭埠河和南淝河入湖河口处 TP 含量相对于附 近区域较高.来自巢湖市的污水通过双桥河进入巢 湖,来自合肥市的污水经南淝河注入巢湖,而杭埠河 流域林木植被遭到破坏,水土流失十分严重^[30].3 条河流携带的大量磷在入湖河口处的堆积是导致河 流入湖口区域总磷含量较高的主要原因.

2.3 沉积物中 OP 的含量分布

在本研究中,不同季节 OP 含量依次表现为:春 季(569.44 mg·kg⁻¹) > 冬季(397.06 mg·kg⁻¹) > 夏季(344.53 mg·kg⁻¹) > 秋季(254.08 mg·kg⁻¹). 巢湖 20 世纪 70 年代以来日益加剧的富营养化刺激 了藻类生产力的提高,这段时间内藻类和细菌是湖 泊沉积物中有机质的主要来源[31].在夏秋季节容易 暴发蓝藻,水华优势蓝藻铜绿微囊藻能够显著增加 沉积物磷的释放量^[32];冬春季节由于蓝藻的死亡 分解,使得沉积物磷含量增加.东、西半湖的 OP 含 量分别为 376.02 mg·kg⁻¹和 406.53 mg·kg⁻¹,其所 占 TP 的质量分数分别为 47.49% 和 36.28%, 富营 养化严重的西半湖 OP 含量只是略高于富营养化相 对较轻的东半湖,甚至很多点还低于东半湖.原因可 能是 OP 在湖泊沉积物中活跃程度较低^[33],其主要 来源于沉积物中各种有机物,只有在有机物矿化以 后才能被释放出来,也相对较难被生物利用^[34],因 此东、西湖区 OP 含量相差不大.



图 2 表层沉积物中总磷的季节性变化 Fig. 2 Seasonal variations of total phosphorus in surface sediments

图 3 表明,无论是东半湖还是西半湖,4 个季节 基本上表现为从湖滨自湖心 OP 含量呈增加趋势. 沉积物中 OP 含量的这种变化可能与有机质的分解 有关^[34],在风浪较大、溶氧量较高的浅水区域有机 质分解速率较高,导致 OP 降低;而在水深较深、下 层缺氧的湖心区域,有机质分解速率较低,导致 OP 含量相对较高.

2.4 沉积物中 IP 的含量分布

IP 主要指沉积过程中吸附在沉积物上的溶解 态磷酸盐与水体中部分金属离子结合后以不同形态 存在的磷,OP 也可在微生物作用下分解成 IP^[20].在 SMT 方法中,IP 为 NaOH-P 与 HCI-P 之和.从图 4 中可以看出,IP 在春、夏、秋 3 季含量接近,为 675.59~698.55 mg·kg⁻¹,冬季则下降为 597.94 mg·kg⁻¹.与西半湖相比,东半湖不同季节 IP 含量变 化较小.在西半湖,春季时 IP 含量最高达 905.21 mg·kg⁻¹,冬季时 IP 含量最低至 765.39 mg·kg⁻¹; 在东半湖,夏、秋季节 IP 含量较高,为 548.51 mg·kg⁻¹和 533.64 mg·kg⁻¹,春、冬季节 IP 含量较 低,为482.35 mg·kg⁻¹和430.49 mg·kg⁻¹.全湖沉积物中,IP占TP的质量分数为55.78%~79.86%,表明巢湖沉积物中的磷以IP为主,这与潘成荣^[20]和马雪艳^[35]等的研究结果相一致.

比较图 3 和图 4 可以看出,巢湖表层沉积物中 IP 和 OP 的含量变化基本上呈相反的变化趋势.在 西半湖的南淝河、十五里河入湖河口附近,OP 的含 量相对低于湖心区域,而 IP 含量则高于湖心区域, 杭埠河入湖河口区域在秋冬季节也表现出类似的 现象.

2.5 沉积物中 NaOH-P 的含量分布

SMT 法分离出的 NaOH-P 即 Fe/Al 结合态磷, 指的是与 Fe、Al 等金属氧化物结合,并能与 OH⁻、 有机配体所交换的 P,可以被碱溶解^[36,37],当沉积 物中的氧化还原环境发生改变时, NaOH-P 可以转 化成可溶解性磷,通过间隙水进入上覆水体,对湖泊 水质产生重要影响^[38].数据分析表明,巢湖东半湖 NaOH-P 含量的均值为 108.37 mg·kg⁻¹,西半湖 NaOH-P 含量的均值为 276.30 mg·kg⁻¹,分别占 IP



图3 表层沉积物中有机磷的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of organic phosphorus in surface sediments



图 4 表层沉积物中无机磷的季节变化 Fig. 4 Seasonal variations of inorganic phosphorus in surface sediments



0

6.0

12.0 km



图5 表层沉积物中铁铝磷的季节性变化

0

6.0

12.0 km

Fig. 5 Seasonal variations of NaOH-phosphorus in surface sediments



图6 表层沉积物中钙磷的季节变化 Fig. 6 Seasonal variations of HCl-phosphorus in surface sediments

的 21.73% 和 33.12%,表明巢湖西半湖磷污染的状况要比东半湖严重;在 4 个季节中,秋季 NaOH-P 含量(232.81 mg·kg⁻¹) > 夏季(210.37 mg·kg⁻¹) > 冬季(186.11 mg·kg⁻¹) > 春季(140.04 mg·kg⁻¹).随着沉积物中 TP 含量的增加,NaOH-P 含量总体上也在增加,其所占 TP 质量分数为 4.77%~34.84%.

从图 5 可以看出,在西半湖从十五里河和南淝 河入湖河口向西南方向 4 个季节基本上呈现出逐渐 降低趋势,靠近十五里河和南淝河的 14 号点 NaOH-P 最高. NaOH-P 被认为是可为生物所利用的磷,与 人类活动有关,主要来源于生活污水和工业废 水^[15].西半湖(尤其是靠近十五里河和南淝河入湖 区域)较高的 NaOH-P 含量揭示了来自合肥市的生 活污水和工业废水等外源磷向巢湖的输入.与西半 湖相比,东半湖不同季节的 NaOH-P 含量在空间上 发生的变化相对较小,这也说明巢湖东半湖受生活 污水和工业废水等影响相对较小.

2.6 沉积物中 HCl-P 的含量分布

HCl-P 是生物不可利用的磷,不易被释放进入 上覆水^[39],来源于碎屑岩或本地自生^[15].在巢湖水 体中,西半湖表层沉积物中 HCl-P 含量(338.08 mg·kg⁻¹)略高于东半湖(321.71 mg·kg⁻¹); HCl-P 的季节变化表现为:夏季(412.51 mg·kg⁻¹)> 秋季 (361.64 mg·kg⁻¹)> 冬季(286.67 mg·kg⁻¹)> 恭 季(258.74 mg·kg⁻¹).东、西半湖 HCl-P 占 IP 质量 分数的 64.50%和 40.53%,表明 HCl-P 是巢湖表层 沉积物中 IP 的主要组成部分.

研究表明,HCl-P 在低 pH 值下活性较强^[40],在 本研究中,春、夏、秋 3 季沉积物处于中性 pH 条件 下(表1),使得上覆水和沉积物表层中的 Ca²⁺容易 与 CO₃²⁻ 形成 CaCO₃ 沉淀,从而促进其与 PO₄³⁻ 的 共沉降作用^[41],导致表层沉积物中 HCl-P 含量较冬 季时高,而冬季表层沉积物微酸性的 pH 导致的 HCl-P 低于其他季节(图 6).

一般认为,沉积物中 NaOH-P 的含量要高于 HCl-P^[42],但在本研究中,不论在时间上还是空间分 布上,除秋季 14、16 点与冬季 16 点外,其它所有采 样点沉积物 HCl-P 的含量都比 NaOH-P 的含量高. 在西半湖 NaOH-P 与 HCl-P 的含量分别为 276.30 mg·kg⁻¹和 338.08 mg·kg⁻¹,东半湖分别为 108.37 mg·kg⁻¹和 321.71 mg·kg⁻¹.本研究中巢湖表层沉 积物中 HCl-P 含量水平较 NaOH-P 含量高的多,其 原因可能与巢湖流域富含磷矿的地层有关.在巢湖 北岸的肥东县和巢湖市交界处桥头集一西山驿一 带,广泛分布着一套古老的含磷变质岩系,主要矿石 类型为磷灰岩^[43],该区域高强度的矿产资源开发、 植被破坏,导致严重的水土流失.富含矿物态磷的土 壤颗粒经降雨冲刷至湖体,不仅导致表层沉积物中 HCl-P 增加,而且造成巢湖水体磷负荷量的升高.

2.7 各种形态磷的比例及其相关性

各个季节不同形态磷占 TP 的质量分数见图 7. 图 7 表明,巢湖表层沉积物中的 TP 总体上以 IP 为 主,IP 和 OP 分别占磷总量的 55.57% ~ 79.86% 与 21.47% ~ 66.62%;在无机磷中,HCl-P 高于 NaOH-P.不同季节 OP、HCl-P 和 NaOH-P 表现出一定差 异,冬、春季节 OP 含量高于夏、秋季节;与 OP 季 节变化相反,表层沉积物种 HCl-P 和 NaOH-P 在夏 秋季节所占的比例上升,而在冬春季节下降.

在沉积物中 HCl-P 活性较低,而 NaOH-P 的活 性较高^[44],根据 Rydin^[36]的研究,湖泊沉积物中大 约 50%~60%的 OP 可被降解或水解为生物可利用 磷形态,是湖泊系统中重要的"磷蓄积库".若以 NaOH-P 和 60%的 OP 之和估算为生物可利用磷,则 在本研究中,巢湖沉积物中生物可利用磷的含量为 140.23~722.11 mg·kg⁻¹,平均为 385.71 mg·kg⁻¹,



Fig. 7 Proportion of various forms of phosphorus in the surface sediments

占 TP 含量的 43.07%.可见巢湖沉积物中生物可利 用磷的含量以及在 TP 中所占的比例均较大,说明 沉积物中磷的潜在可利用性较大,对于上覆水潜在 释放风险较大.较高的总磷及生物可利用磷的含量, 再加上强烈的水动力作用及环境因子频繁变化,将 会促使沉积物中磷作为内源向上覆水体释放.

相关分析表明, 巢湖表层沉积物中 TP 与 NaOH-P 呈极显著正相关(r=0.927, P < 0.01); TP 与 OP(r=0.438, P < 0.05)以及 TP 与 HCl-P 也呈显 著正相关(r=0.521, P < 0.05),表明巢湖表层沉积 物中 TP 含量的增加与 NaOH-P、OP 和 HCl-P 的增 加密切相关.金相灿等^[45]在对长江中下游湖泊和 Ruban 等^[44]对 Bort-les-Orgues Reservoir 的研究中也 发现,沉积物中 TP 含量的增加主要来自 NaOH-P, 其次是 OP,而 HCl-P 的贡献只占很小一部分.

3 结论

(1) 巢湖表层沉积物中 TN、TP 和有机质含量 的季节变化较小,但在空间上均表现出西半湖高于 东半湖;表层沉积物中高的 C/N 比率表明巢湖的 有机质主要源自流域的地表径流所携带的有机质; 西半湖较高的 NaOH-P 含量表明该湖区沉积物还受 到生活污水和工业废水等外源磷输入的强烈影响.

(2) 表层沉积物中具有较高含量的 OP,但 IP 为表层沉积物中磷的主要赋存形态;在无机磷中, HCl-P 含量高于 NaOH-P, HCl-P 是巢湖表层沉积物 中 IP 的主要组成部分;较高的 HCl-P 含量与巢湖 流域特殊的富磷地层及流域内的水土流失有关.

(3) 沉积物中 TP、OP、IP、HCI-P和 NaOH-P 含量在空间上均表现为西半湖 > 东半湖,其中在十 五里河口和南淝河口区域 TP、IP、HCI-P和 NaOH-P均表现出较高的含量,而 OP则表现为从湖滨到湖 心 OP含量呈增加趋势;不同形态的磷在季节变化 上表现为,冬春季节 OP含量高于夏秋季节,而夏秋 季节 HCI-P和 NaOH-P含量高于冬春季节.

参考文献:

- Brigault S, Ruban V. External phosphorus load estimates and P-budget for the hydroelectric reservoir of Bort-Les-orgues, France
 [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2000, 119(1-4): 91-103.
- Pan G, Krom M D, Herut B. Adsorption-desorption of phorsphate on airborne dust and riverborne particulates in East Mediterranean Seawater [J]. Environmental Science & Technology, 2002,36(16): 3519-3524.
- [3] 黄清辉,王东红,马梅,等. 沉积物和土壤中磷的生物有效性

评估新方法[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 206-208.

- [4] Cha H J, Lee C B, Kim B S, et al. Early diagenetic redistribution and burial of phosphorus in the sediments of the southwestern East Sea(Japan Sea)[J]. Marine Geology, 2005, 216(3): 127-143.
- [5] 戴纪翠,宋金明,李学刚,等. 胶州湾沉积物中的磷及其环境指示意义[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1953-1962.
- [6] Zhou A M, Tong H X, Wang D S. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition[J]. Water Research, 2005,39(7): 1245-1254.
- Mcdowell R, Sharpley A, Withers P. Indicator to predict the movement of phosphorus from soil to subsurface flow [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36 (7): 1505-1509.
- [8] 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.
- [9] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus [J]. Soil Science, 1957,84(2): 133-144.
- [10] Williams J D H, Jaquet J M, Thomas R L. Forms of phosphorus in the surficial sediments of Lake Erie [J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1976, 33(3): 413-429.
- [11] Hieltjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments[J]. Journal of Environmental Quality, 1980,9: 405-407.
- Psenner K, Puckso R. Phosphorus fraction:advantages and limits of the method for the study of sediment P origins and interactions
 [J]. Archiv fur Hydrobiologie, Beihefte, 1988, 30: 43-59.
- [13] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. Limnology and Oceanography, 1992, 37(7): 1460-1482.
- [14] 付永清,周易勇. 沉积物磷形态的分组分离及其生态学意义[J]. 湖泊科学, 1999,11(4): 376-381.
- [15] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments-A synthesis of recent works [J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 2001, 370: 224-228.
- [16] 金相灿,王圣瑞,庞燕.太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J].中国环境科学,2004,24(6):707-711.
- [17] 姚扬,金相灿,姜霞,等.光照对湖泊沉积物磷释放及磷形态 变化的影响研究[J].环境科学研究,2004,17(增刊):30-33.
- [18] 王晓丽,包华影.黄河上中游表层沉积物磷的赋存形态特征 [J].生态环境学报,2010,19(6):1358-1362.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 屠清瑛,顾丁锡,尹澄清,等. 巢湖富营养化研究[M]. 合肥:

中国科学技术大学出版社, 1990.

- [23] 周慧平,高超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别[J].环境科学,2008,29(10):2696-2702.
- [24] 阎伍玖,王心源. 巢湖流域非点源污染初步研究[J]. 地理科学, 1998,18(3): 263-267.
- [25] 巢湖流域水污染防治"十五"计划编写组. 巢湖流域水污染防治"十五"计划[R]. 2002.
- [26] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上 海科学技术出版社,1978.
- [27] 孙惠民,何江,吕昌伟,等. 乌梁素海沉积物中有机质和全氮 含量分布特征[J]. 应用生态学报, 2006,17(4):620-624.
- [28] 王洪道. 中国的湖泊[M]. 北京:商务印书馆, 1995.
- [29] 阎伍玖. 巢湖流域不同土地利用类型地表径流污染特征研究
 [J]. 长江流域资源与环境, 1998,7(3): 274-277.
- [30] 张关琴,陈静. 巢湖主要入湖河道磷的污染现状[J]. 广东微 量元素科学, 2003,10(4):41-44.
- [31] 姚书春,李世杰. 巢湖富营养化过程的沉积记录[J]. 沉积学报, 2004,22(2): 343-347.
- [32] 刘冬梅,姜霞,金相灿,等.太湖藻对水-沉积物界面磷交换过 程的影响[J].环境科学研究,2006,19(4):8-13.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 马雪艳,陈文花,张江山. 福州二水源——山仔水库底泥磷的 赋存形态[J]. 中南民族大学学报, 2004,23(4): 14-17.

- [36] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment[J]. Water Research, 2000,34(7): 2037-2042.
- [37] Zhou A M, Wang D S, Tang H X. Phosphorus fractionation and bioavailability in Taihu Lake (China) sediments [J]. Journal of Environmental Science, 2005, 17(3): 384-388.
- [38] 田忠志,邢友华,姜瑞雪,等. 东平湖表层沉积物中磷的形态分布 特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010,19(6): 719-723.
- [39] Golterman H L. Reflection on fraction and bioavailability of sediment bound phosphate[J]. Archiv fur Hydrobiologie, 1988, 30: 1-4.
- [40] 汤宝靖,陈雷,姜霞,等. 巢湖沉积物磷的形态及其与间隙水 磷的关系[J]. 农业环境科学学报, 2009,28(9):1867-1873.
- [41] 朱广伟,秦伯强,高光,等.长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J].环境科学学报,2004,24
 (3):381-388.
- [42] 刘震,金相灿,卢少勇,等. 滇池湖滨带沉积物磷的空间分布[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(8): 1-5.
- [43] 王绪伟,王心源,封毅,等. 巢湖沉积物总磷分布及其地质成因[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2007, 30(4): 496-499.
- [44] Ruban V, Brigault S, Demare D. et al. An investigation of the origin and mobility of phosphorus in fresh water sediments from Bort-les-Orgues Reservoir, France[J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, 1(4): 403-407.
- [45] 金相灿,庞燕,王圣瑞,等.长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究[J].农业环境科学学报,2008,27(1): 279-285.