

巢湖周围池塘氮、磷和有机质研究

孙庆业, 马秀玲, 阳贵德, 陈政, 伍红琳, 宣淮翔

(安徽大学生命科学学院, 合肥 230039)

摘要: 巢湖周围池塘众多, 根据池塘位置和地表径流补给差异, 池塘可以分为村庄内池塘、毗邻村庄池塘和农田区域池塘(远离村庄的池塘)。本研究采集了巢湖周围136口池塘上覆水和沉积物样品, 调查巢湖周围池塘中氮、磷以及有机质污染现状。结果表明, 池塘上覆水中总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、溶解态磷和COD平均含量分别为2.53、0.65、0.18、0.02、0.97、0.38和51.58 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 池塘沉积物中总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、无机磷、有机磷和烧失量平均含量分别为1575.36、35.73、13.30、2.88、933.19、490.14、414.75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和5.44%; 90%以上的池塘总氮、总磷含量达到或超过富营养化水平。位于村庄内的池塘上覆水和沉积物中总氮和氨氮的含量显著高于位于农田区域的池塘。上覆水和沉积物中无机氮表现为: 氨氮 > 硝态氮 > 亚硝态氮。池塘上覆水和沉积物中有机质与总氮、总磷之间存在显著的正相关性。池塘中氮、磷和有机物质主要为陆源性输入, 池塘位置和径流补给方式明显影响其中的氮、磷和有机质含量。通过截留径流中的氮、磷和有机质, 池塘能够有效减少进入巢湖的营养盐含量。

关键词: 池塘; 氮; 磷; 有机质; 沉积物; 巢湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)07-1510-06

Studies on Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Ponds Around Chaohu Lake

SUN Qing-ye, MA Xiu-ling, YANG Gui-de, CHEN Zheng, WU Hong-lin, XUAN Huai-xiang

(School of Life Science, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: There are a lot of ponds around Chaohu Lake. According to location and runoff supply of ponds, the ponds are divided into three types: ponds inner veltage (PIV), ponds adjacent veltage (PAV) and ponds outer veltage (POV). The samples of water and sediment were collected from 136 ponds around Chaohu Lake and the contents of nitrogen, phosphorus and organic matter in water and sediments were analyzed in this study. The results showed that mean contents of total nitrogen (TN), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$, total phosphorus (TP), soluble $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ and COD were 2.53, 0.65, 0.18, 0.02, 0.97, 0.38 and 51.58 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in pond water, respectively; and mean contents of TN, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$, TP, inorganic phosphorus (IP), organic phosphorus (OP) and loss of ignition (LOI) in pond sediment were 1575.36, 35.73, 13.30, 2.88, 933.19, 490.14, 414.75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 5.44%, respectively. The ponds of more than 90% presented eutrophication in the contents of total nitrogen and phosphorus in water. The contents of TN and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ in water and sediment of PIV were significantly higher than that of POV. And the contents of inorganic nitrogen in pond water and sediment displayed a following order: $\text{NH}_4^+ \text{-N} > \text{NO}_3^- \text{-N} > \text{NO}_2^- \text{-N}$. Data analysis indicated that there was a significantly positive correlation between organic matter and total nitrogen and phosphorus in water and sediment. The nitrogen, phosphorus and organic matter in ponds mainly sourced farmlands and village land surface. The contents of nitrogen, phosphorus and organic matter in ponds were affected by location and runoff supply of ponds. By retaining nitrogen, phosphorus and organic matter in runoff, the ponds can effectively decrease nutrient content into Chaohu Lake.

Key words: pond; nitrogen; phosphorus; organic matter; sediment; Chaohu Lake

池塘是一种小型湿地, 人为开挖而成或由自然低洼地积水形成。池塘不仅具有蓄水灌溉和水产养殖功能, 同时还具有为农村居民提供生活用水的功能。按照地理位置和作用池塘可分为2种基本类型: 第1种类型是位于自然村内或村旁的池塘, 其主要作用是以提供村民生活用水为主, 兼顾灌溉和养殖; 第2种类型是位于农田区域的池塘, 其主要作用是提供农田灌溉, 兼顾水产养殖。径流及营养物质在池塘内的存储多数是暂时性的, 最终将汇入大型水体, 如河流、水库、湖泊等。从生态学意义上来说, 分散在

农村区域的池塘扮演着“源”与“汇”的双重角色, 既是来自村庄、农田等各类污染物质的暂时性“汇”, 也是流域内大型水体污染物质的“源”。

目前, 国内外关于湿地的研究主要集中于海洋、湖泊、河流等大型水体^[1~5], 对小而分散的池塘湿地则较少关注^[6~8]。研究表明, 承接了大量污染物的池

收稿日期: 2009-07-21; 修订日期: 2010-01-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07103); 安徽生态省建设办公室科技攻关项目

作者简介: 孙庆业(1964~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为恢复生态学, E-mail: sunqingye@ahu.edu.cn

塘上覆水中往往含有很高浓度的总磷和溶解态磷,沉积物中也积累了很高的营养盐类^[9].不同水源补给方式的池塘氮磷含量存在一定差异,农业区域的池塘一般具有较高的氮、磷含量^[10];农业区域的池塘水体中硝酸盐和磷酸盐含量比天然森林区域的池塘要高出 1 个数量级^[11].随地表径流进入水塘、并被池塘所截留的大量氮磷营养盐和有机物,不仅引起池塘的富营养化^[11,12],而且还会导致池塘沉积物中氮磷和有机质的大量积累^[13].

巢湖是一个大型浅水性湖泊,也是中国污染较为严重的湖泊之一,流域内池塘星罗棋布,这些池塘承接了农田径流和自然村落地表径流,成为农田和村庄内各类非点源污染的暂时性“汇”,在雨量充沛的夏季,池塘水溢出,最终流入巢湖,成为巢湖污染物质之“源”.尽管目前多数研究者认为巢湖中大部分氮、磷和有机质来自于面源^[3,14,15],但仍缺乏详实的数据支持.基于巢湖周围池塘与巢湖水体之间的内在关系,本试验在巢湖周围选择 136 口池塘开展研究工作.本研究的目的在于:①了解巢湖流域农村池塘污染现状;②分析不同地表径流补给状态下的池塘水质和沉积物营养物质含量的差异及其原因;③分析池塘沉积物与水中营养成分之间的关系.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

巢湖(31°25′~31°43′N,117°16′~117°50′E)是我国五大淡水湖之一,面积 756 km²,流域面积 13 486 km².流域内主要地形包括低山、丘陵、岗地和平原,流域内年平均降雨量 995.7 mm,年平均温度 16.1℃,无霜期 263 d.巢湖流域农田面积 501 686 hm²,主要农作物包括水稻、油菜、小麦和棉花等.本次调查为环巢湖的义城、丙子铺、三河、严店、环城、中垾、黄麓、六家畈、长临、槐林、盛桥、沐集、白山等 14 个乡镇.

1.2 样本采集与预处理

2008 年 8 月 1 日~10 日,在环巢湖 14 个乡镇随机选取 136 口、面积均大于 700 m² 的池塘.利用 GPS 定位每口池塘,记录各池塘的水源补给方式、主要用途、水生植被状况,现场测定池塘上覆水的 pH、电导率、温度等.按照池塘位置和水源补给方式将池塘分为 3 类:①村庄内池塘(ponds inner village, PIV)——位于村庄内、完全依赖村内地表径流补水;②毗邻村庄池塘(ponds adjacent village, PAV)——位于村旁、同时接受村内地表和农田径流

补水;③农田区域池塘(或称远离村庄的池塘,ponds outer village, POV)——位于村外、完全依赖农田径流或农田退水补水.每池塘采集 1 份总体积为 500 mL 的混合水样(混合水样由 3 个不同位置采集的亚样本混合而成,采集深度为水面下 20~50 cm),同时用 PVC 管采集 1 份沉积物混合样本(样本由 3 个不同位置采集的亚样本混合而成,采集深度为沉积物表层 0~10 cm),野外水样(现场用稀释 1 倍的硫酸固定)和沉积物样保存于放有冰块的保温箱内,于 6 h 内运回实验室.水样在实验室内于 4℃ 冰箱内保存,24 h 内完成全部理化分析;沉积物样品带回室内放入 -40℃ 冰箱冷冻保存,然后用冷冻干燥机冻干,经研磨、过 200 目筛后,用密封带密封、-40℃ 冷冻保存.

1.3 上覆水理化性质分析

上覆水的 pH (pH_w) 和电导率 (EC_w, μS·cm⁻¹) 用水质分析仪 (Multi340i/Set) 现场测定;COD (mg·L⁻¹) 用重铬酸钾法测定^[16];总氮 (TN_w, mg·L⁻¹) 用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定^[16];总磷 (TP_p, mg·L⁻¹) 用酸性过硫酸钾-钼蓝比色法测定^[16].经 0.45 μm 玻璃纤维微孔滤膜过滤后的水样,分别用苯酚-次氯酸钠比色法、紫外分光光度法、α-萘胺比色法和钼蓝比色法测定氨氮 (NH₄⁺-N_w, mg·L⁻¹)、硝态氮 (NO₃⁻-N_w, mg·L⁻¹)、亚硝态氮 (NO₂⁻-N_w, mg·L⁻¹) 和水溶性正磷酸盐 (PO₄³⁻-P_w, mg·L⁻¹)^[17].

1.4 沉积物理化性质分析

沉积物中有机质含量用烧失量 (LOI) 表示,即样品先经 105℃ ± 2℃ 烘干至恒重,后在马弗炉中 550℃ ± 5℃ 灼烧 6 h,烧失量按下式计算:

$$\text{LOI}(\%) = (m_b - m_a) \times 100 / m_b$$

式中, m_b :灼烧前的烘干重, m_a :灼烧后重量.

沉积物样品中总氮 (TN_s, mg·kg⁻¹) 用开氏定氮法测定;沉积物样品用 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液振动提取(沉积物:提取液 = 1.0g:10 mL, 25℃、30 min、200 r·min⁻¹)、过滤后,过滤液中的氨氮 (NH₄⁺-N_s, mg·kg⁻¹)、硝态氮 (NO₃⁻-N_s, mg·kg⁻¹) 和亚硝态氮 (NO₂⁻-N_s, mg·kg⁻¹) 分别用苯酚-次氯酸钠比色法、紫外分光光度法和 α-萘胺比色法测定^[17,18];沉积物中有机氮按照下式计算:

$$\text{有机氮}(\text{ON}_s, \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = (\text{TN}_s) - (\text{NH}_4^+ - \text{N}_s).$$

沉积物中总磷 (TP_s, mg·kg⁻¹)、无机磷 (IP_s, mg·kg⁻¹) 和有机磷 (OP_s, mg·kg⁻¹) 按 SMT 方法

测定^[5]; 沉积物 pH (pH_s) 和电导率 (EC_s , $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) 分别用酸度计和电导率仪测定 (沉积物: 去离子水 = 1.0 g : 2.5 mL)。

1.5 数据分析

数据用 SPSS 10.0 软件进行分析, 其中 One-way ANOVA (Duncan's multiple range test) 被用于 3 种类型池塘各理化性质的平均数比较 ($p < 0.05$), Pearson 相关系数用于表示双变量相关性。

2 结果与分析

2.1 池塘上覆水中的氮、磷

所调查的 136 口池塘上覆水中不同形态氮、磷含量差异很大。池塘上覆水中总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮的平均含量分别为 2.53、0.65、0.18 和 0.02 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。3 种形态的无机氮中, 氨氮占总氮的比例平均为 18.2% (0.5% ~ 81.7%)、硝态氮为 8.4% (0.8% ~ 41.5%)、亚硝态氮仅为 0.7% (未检出 ~ 8.1%)。池塘上覆水中无机氮表现为: 氨氮 > 硝态氮 > 亚硝态氮。

不同水源补给方式的池塘中, 主要承接村庄地表径流的村庄内池塘 (PIV) 总氮、氨氮的含量最高, 同时承接村庄和农田径流的 PAV 总氮、氨氮的含量次之, 完全承接农田径流、位于田野之中的池塘 (POV) 总氮和氨氮的含量最低。统计检验表明: PIV、PAV 和 POV 中总氮和氨氮含量存在显著差异,

但硝态氮和亚硝态氮含量并无显著差异 (表 1)。

池塘上覆水中总磷和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均含量分别为 0.97 和 0.38 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解态无机磷 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 占池塘总磷的平均比例为 27.64% (1.67% ~ 96.24%)。尽管统计检验表明 PIV、PAV 和 POV 上覆水中总磷和溶解态无机磷无显著差异, 但主要承接村庄地表径流的村庄内池塘 (PIV) 总磷、溶解态无机磷 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 的含量远高于承接村庄和农田径流的村旁池塘 (PAV) 和完全承接农田径流、位于田野之中的池塘 (POV) 总磷、溶解态无机磷 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 的含量 (表 1)。

136 口池塘上覆水平均 pH 为 7.17 (6.39 ~ 8.46), 其中 pH > 7.5 的池塘 20 口 (占 14.71%), pH < 6.5 的池塘仅 4 口 (占 2.94%), pH 6.5 ~ 7.5 的池塘计 112 口 (占 82.35%), 表明大部分池塘上覆水的 pH 为中性。虽然统计检验表明 PIV、PAV 和 POV 上覆水 pH 无显著差异 (表 1), 但主要承接村庄地表径流的村庄内池塘 (PIV) pH 平均值高于承接村庄和农田径流的村旁池塘 (PAV) 和完全承接农田径流、位于田野之中的池塘 (POV)。136 口池塘的平均 COD 为 51.59 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但不同池塘 COD 差异很大, 最低仅为 4.68 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而最高则达到 221.79 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相差 47.39 倍。尽管统计检验表明 3 类池塘上覆水中 COD 并无显著差异 (表 1), 但位于村庄内的池塘 (PIV) COD 高于 PAV 和 POV。与

表 1 池塘上覆水和沉积物理化性质统计分析 (Mean $\pm$ S. E.)

Table 1 Statistical analysis of physico-chemical properties of pond water and sediment

检测物	参数	总平均	村庄内池塘	毗邻村庄池塘	农田区域池塘	F 值	显著性
沉积物	TN_s	1 575.36 $\pm$ 78.396	1 856.82 $\pm$ 180.00	1 536.85 $\pm$ 149.07	1 400.83 $\pm$ 85.53	3.411	0.036
	$\text{NH}_4^+\text{-N}_s$	35.73 $\pm$ 2.500	44.01 $\pm$ 4.55	40.32 $\pm$ 5.73	28.22 $\pm$ 3.30	4.492	0.013
	$\text{NO}_3^-\text{-N}_s$	13.30 $\pm$ 1.971	17.95 $\pm$ 4.17	14.44 $\pm$ 4.05	9.68 $\pm$ 2.46	1.759	0.176
	$\text{NO}_2^-\text{-N}_s$	2.88 $\pm$ 0.216	2.88 $\pm$ 0.34	2.82 $\pm$ 0.41	2.91 $\pm$ 0.36	0.012	0.988
	IP_s	490.14 $\pm$ 31.751	547.71 $\pm$ 50.18	550.19 $\pm$ 55.69	426.23 $\pm$ 51.56	1.879	0.157
	OP_s	414.75 $\pm$ 11.223	440.47 $\pm$ 16.94	400.31 $\pm$ 23.00	403.34 $\pm$ 18.05	1.266	0.285
	TP_s	933.19 $\pm$ 33.299	1 016.96 $\pm$ 53.27	1 000.28 $\pm$ 62.16	848.62 $\pm$ 52.30	3.058	0.050
	LOI	5.44 $\pm$ 0.181	5.99 $\pm$ 0.40	5.25 $\pm$ 0.34	5.14 $\pm$ 0.22	2.271	0.107
	pH_s	6.80 $\pm$ 0.012	6.75 $\pm$ 0.02	6.75 $\pm$ 0.03	6.85 $\pm$ 0.01	9.439	0.000
	EC_s	313.73 $\pm$ 16.797	424.20 $\pm$ 35.17	338.04 $\pm$ 34.71	228.85 $\pm$ 15.29	16.332	0.000
上覆水	TN_w	2.53 $\pm$ 0.180	3.36 $\pm$ 0.47	2.30 $\pm$ 0.22	2.06 $\pm$ 0.16	5.587	0.005
	$\text{NH}_4^+\text{-N}_w$	0.65 $\pm$ 0.125	1.13 $\pm$ 0.35	0.46 $\pm$ 0.11	0.40 $\pm$ 0.09	3.705	0.027
	$\text{NO}_3^-\text{-N}_w$	0.18 $\pm$ 0.017	0.21 $\pm$ 0.03	0.13 $\pm$ 0.02	0.19 $\pm$ 0.03	1.570	0.212
	$\text{NO}_2^-\text{-N}_w$	0.02 $\pm$ 0.003	0.02 $\pm$ 0.01	0.02 $\pm$ 0.01	0.02 $\pm$ 0.01	0.341	0.712
	TP_w	0.97 $\pm$ 0.374	2.00 $\pm$ 1.13	0.51 $\pm$ 0.10	0.47 $\pm$ 0.15	1.807	0.168
	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}_w$	0.38 $\pm$ 0.151	0.77 $\pm$ 0.42	0.17 $\pm$ 0.03	0.20 $\pm$ 0.13	1.656	0.195
	pH_w	7.17 $\pm$ 0.034	7.26 $\pm$ 0.05	7.07 $\pm$ 0.06	7.15 $\pm$ 0.06	2.048	0.133
	EC_w	360.12 $\pm$ 15.352	449.73 $\pm$ 35.55	363.26 $\pm$ 31.15	298.15 $\pm$ 12.51	10.771	0.000
	COD	51.59 $\pm$ 3.172	58.75 $\pm$ 5.90	43.04 $\pm$ 4.21	50.28 $\pm$ 4.95	1.600	0.206

pH 和 COD 不同,3 类池塘上覆水的电导率(EC_w)存在显著差异,表现为 $PIV > PAV > POV$ (表 1).

上述结果表明,与毗邻村庄(PAV)和农田区域池塘(POV)相比,位于村庄内池塘(PIV)的上覆水具有较高的溶解盐、含有更高含量的氮、磷和有机质.

2.2 池塘沉积物中的氮、磷

所调查池塘沉积物总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮的平均含量分别为 1 575.36、35.73、13.29 和 2.88 $mg \cdot kg^{-1}$. 沉积物中氨氮、硝态氮和亚硝态氮占总氮的比例平均为 2.5% (0.3% ~ 17.5%)、0.9% (0.01% ~ 11.6%) 和 0.3% (0.01% ~ 1.9%),无机氮占总氮比例平均为 3.7%,表明池塘沉积物中的氮素也主要以有机氮为主. 池塘沉积物中无机氮含量表现为:氨氮 > 硝态氮 > 亚硝态氮. 3 种类型池塘沉积物中,总氮、氨氮、硝态氮平均含量表现为 $PIV > PAV > POV$,且总氮、氨氮含量存在显著差异(表 1).

池塘沉积物中总磷、无机磷和有机磷平均含量分别为 933.19、490.14 和 443.05 $mg \cdot kg^{-1}$. 沉积物中无机磷和有机磷占总磷的比例分别为 49.59% (13.40% ~ 90.41%) 和 50.41% (9.86% ~ 86.60%),不同池塘沉积物中无机磷和有机磷含量存在很大差异. 尽管统计检验表明不同水源补给方式的池塘中,沉积物中总磷、无机磷和有机磷含量无显著差异,但总磷、无机磷和有机磷含量表现为 $PIV > PAV > POV$.

池塘沉积物平均烧失量为 5.44% (1.21% ~

14.26%),最高与最低相差 11.79 倍. 虽然统计检验表明烧失量无显著差异,但承接村内地表径流进行水分补给的池塘(PIV)沉积物的烧失量仍高于毗邻村庄(PAV)和农田区域的池塘(POV). 与烧失量不同,3 种水源补给方式的池塘沉积物中 pH(pH_s)和电导率(EC_s)存在显著差异,POV 的池塘沉积物 pH 显著高于 PIV 和 PAV,而电导率则表现为 $PIV [(424.20 \pm 35.17) \mu S \cdot cm^{-1}] > PAV [(338.04 \pm 34.71) \mu S \cdot cm^{-1}] > POV [(228.85 \pm 15.29) \mu S \cdot cm^{-1}]$. 上述结果表明,与位于村旁(PAV)和远离村庄的池塘(POV)相比,位于村庄内的池塘(PIV)的沉积物具有较低的 pH 和较高的溶解盐,含有更多的氮、磷和有机质.

3 讨论

3.1 池塘上覆水和沉积物氮、磷和有机质的相互关系

所调查池塘的上覆水中,总磷浓度为 0.02 ~ 49.76 $mg \cdot L^{-1}$ 、总氮浓度 0.29 ~ 19.34 $mg \cdot L^{-1}$,按蔡煜东等^[19]关于湖泊富营养化评价标准,所调查池塘绝大多数已处于富营养化或极富营养化水平. 表 2 表明,上覆水中总氮与氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、溶解态磷以及电导率、COD 之间存在极显著正相关,总磷与溶解态磷、电导率以及 COD 之间也存在极显著正相关. 回归分析表明,上覆水中氨氮和总氮之间的关系为 $NH_4^+ - N_w = 0.615 0 TN_w - 0.910 0$ ($r^2 = 0.783 3$),溶解态磷与总磷的关系为 $PO_4^{3-} - P_w = 0.389 2 TP_w - 0.000 3$ ($r^2 = 0.931 4$).

表 2 池塘上覆水理化性质相关性分析¹⁾

	TN_w	$NH_4^+ - N_w$	$NO_3^- - N_w$	$NO_2^- - N_w$	TP_w	$PO_4^{3-} - P_w$	EC_w	COD
$NH_4^+ - N_w$	0.885 **							
$NO_3^- - N_w$	0.280 **	0.139						
$NO_2^- - N_w$	0.288 **	0.197 *	0.711 **					
TP_w	0.746 **	0.796 **	0.005	0.023				
$PO_4^{3-} - P_w$	0.706 **	0.770 **	-0.008	0.065	0.965 **			
EC_w	0.708 **	0.641 **	0.196 *	0.182 *	0.625 **	0.581 **		
COD	0.576 **	0.473 **	0.079	0.020	0.458 **	0.406 **	0.357 **	
pH_w	0.005	0.001	0.187 *	0.090	-0.045	-0.035	0.289 **	-0.009

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关;下同

数据分析表明(表 3),池塘沉积物中总氮与氨氮、硝态氮、总磷、无机磷、有机磷、烧失量和电导率呈极显著正相关,总磷与无机磷、有机磷、烧失量、电导率呈极显著正相关,这种相关性在湖泊沉积物中也广泛存在^[4,5]. 该结果一方面表明沉积物中总氮、氨氮、总磷、无机磷和烧失量具有一致性的变化规

律,另一方面意味着池塘沉积物中氮、磷和有机质具有同一性的来源——陆源性^[4],都是随地表径流进入池塘. 从表 3 还可以看出,沉积物的 pH 与总氮、氨氮、硝态氮、总磷、无机磷、烧失量以及电导率等呈极显著负相关,可能与沉积物中大量有机物质的存在导致氧化还原电位和 pH 降低、继而引起矿物质

的溶解性增加或被吸附的离子释放有关. 回归分析表明, 池塘沉积物中总氮与烧失量关系为 $TN_s = 0.037 \text{ LOI} - 441.47$ ($r^2 = 0.735$), 沉积物中无机磷

与总磷的线性关系为 $IP_s = 0.886 \text{ TP}_s - 336.8$ ($r^2 = 0.863$), 但总磷与烧失量以及无机氮(氨氮、硝态氮和亚硝态氮)与总氮则缺乏显著的线性关系.

表3 池塘沉积物理化性质相关性分析

Table 3 Correlations among physical and chemical properties of pond sediment

	TN_s	$NH_4^+ - N_s$	$NO_3^- - N_s$	IP_s	OP_s	TP_s	LOI	pH_s
$NH_4^+ - N_s$	0.520 **							
$NO_3^- - N_s$	0.232 **	0.220 *						
IP_s	0.291 **	0.493 **	0.173 *					
OP_s	0.221 **	0.077	-0.119	-0.096				
TP_s	0.381 **	0.520 **	0.104	0.929 **	0.247 **			
LOI	0.857 **	0.424 **	0.118	0.165	0.241 **	0.268 **		
pH_s	-0.460 **	-0.306 **	-0.430 **	-0.246 **	-0.039	-0.273 **	-0.408 **	
EC _s	0.663 **	0.498 **	0.290 **	0.290 **	0.156	0.377 **	0.567 **	-0.763 **

相关分析还表明, 池塘沉积物中的总磷、无机磷与上覆水中的总磷、 $PO_4^{3-} - P$ 以及沉积物中总氮、氨氮与上覆水中总氮、氨氮含量之间亦呈极显著正相关(表4). 这与张敏等^[1]研究巢湖所得结果相一致. 与湖泊相比, 池塘是一种很小的水体, 风浪较小, 除在风力较大或大量径流进入池塘或强烈人为干扰等情况外, 沉积物在池塘上覆水中大量悬浮是很少发生的. 因此, 对池塘而言, 营养盐可能主要通过浓度梯度扩散从池塘沉积物进入上覆水, 其释放强度受控于沉积物-水界面的温度, 氧化还原环境及营养盐浓度差等^[2].

表4 上覆水和沉积物氮磷相关性分析

Table 4 Correlations of nitrogen / phosphorus between water and sediment

	TN_s	$NH_4^+ - N_s$		TP_s	IP_s
TN_w	0.288 **	0.421 **	TP_w	0.352 **	0.312 **
$NH_4^+ - N_w$	0.246 **	0.403 **	$PO_4^{3-} - P_w$	0.482 **	0.456 **

3.2 池塘中氮、磷、有机质的来源

与巢湖相比, 所调查池塘上覆水和沉积物中的总氮、总磷和有机质平均含量远高于巢湖上覆水和沉积物^[4]. 这一方面表明这些池塘已受到氮、磷、有机质的严重污染, 另一方面也表明了这些池塘在拦截入湖氮、磷、有机质, 减少入湖氮、磷和有机质方面所起的作用.

沉积物中的 C/N 可揭示水体沉积物的有机质来源, 低等水生植物因含有较多的蛋白质, 其 C/N 值一般小于 7, 陆生维管植物的 C/N 值通常大于 20^[20,21]. 随地表径流进入水体的陆源植物碎屑增多会导致沉积物有机质 C/N 值增大^[4,21]. 所调查的 136 口池塘中, 仅 2 口池塘 C/N 小于 20, 其余的 134 口池塘 C/N 皆大于 20, 这表明池塘中有机质主要为陆源性的. 相关分析也表明(表3), 池塘沉积物中

氮、磷与有机物质具有同源性, 因此可以推断池塘中有机物质及氮、磷等主要来自于陆源^[4]. 尹澄清等^[6]的研究表明, 单个池塘对地表径流中总磷和溶解态磷的截留率达到 34.1% 和 15.8%, 池塘中较高的氮、磷、有机质含量与其对地表径流中氮、磷、有机质的有效截留有直接关系^[6,8,22,23].

3 种类型的池塘中, 主要通过村庄地表径流进行水源补给的池塘(PIV)上覆水和沉积物中的总氮、氨氮、硝态氮、总磷、溶解态磷或无机磷、COD 或烧失量均表现为最高(表1). 尽管统计检验表明三者沉积物的 C/N 无显著差异, 但 PIV 沉积物的 C/N 低于 PAV 和 POV, PIV、PAV 和 POV 沉积物的平均 C/N 分别为 38.64 ± 2.32 、 40.58 ± 3.87 和 42.91 ± 2.56 . 村庄地表不仅散布大量的维管植物碎屑, 同时具有大量散养禽畜的粪便、生活垃圾和生活污水等, 这些散布于村庄地表的富含氮、磷和有机质的维管植物碎屑、禽畜粪便生活垃圾和生活污水随村庄地表径流进入村内池塘^[24,25], 从而导致 PIV 池塘氮、磷和有机质含量高于村旁池塘(PAV)和村外池塘(POV). 研究表明^[6], 土地利用类型对地表径流中营养物质的含量造成一定影响, 来自村庄的地表径流营养物质含量高于农田.

4 结论

(1) 巢湖周围池塘上覆水和沉积物中含有大量的氮、磷营养盐和有机质, 绝大多数池塘处于富营养化或极度富营养化状态. 位于村庄内的池塘氮、磷和有机质的含量高于毗邻村庄和远离村庄的池塘.

(2) 池塘中氮、磷和有机质主要为陆源性来源, 这些陆源性营养物质随地表径流进入池塘, 并在池塘内暂时性存储下来. 因此, 广泛分布于巢湖周围的

农村池塘在拦截氮、磷和有机物质,减少氮、磷营养盐和有机质对巢湖水质的影响方面具有重要意义。

(3)暂时储存于池塘(尤其是沉积物)中的氮、磷和有机质如不进行清理、利用,最终还将进入巢湖。因此,无论从流域管理、巢湖保护,还是从农业水利建设和农民生活环境改善的角度,对流域内池塘及时进行清淤、整理已显得十分迫切。

参考文献:

- [1] 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,(增刊II):63-72.
- [2] 秦伯强,朱广伟,张路,等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例[J]. 中国科学(D辑)地球科学,2005,(增刊II):33-44.
- [3] 李如忠,洪天求. 巢湖流域农业非点源污染控制对策研究[J]. 合肥工业大学学报(社会科学版),2006,20(1):105-110.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 尹澄清,单保庆. 多水塘系统:控制面源磷污染的可持续方法[J]. AMBIO,2001,30(6):369-375.
- [7] 毛战坡,彭文启,尹澄清,等. 非点源污染物在多水塘系统中的流失特征研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(3):530-535.
- [8] 徐红灯,席北斗,翟丽华. 沟渠沉积物对农田排水中氮氮的截留效应研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(5):1924-1928.
- [9] Nhan D K, Milstein A, Verdegem M C J, et al. Food inputs, water quality and nutrient accumulation in integrated pond systems: A multivariate approach [J]. Aquaculture, 2006, 26(1):160-173.
- [10] Hamer A J, Makings J A, Lane S J, et al. Amphibian decline and fertilizers used on agricultural land in south-eastern Australia [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 102(3):299-305.
- [11] Peltzer P M, Lajmanovich R C, Sánchez-Hernandez J C, et al. Effects of agricultural pond eutrophication on survival and health status of *Scinax nasicus* tadpoles [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, 70(1):185-197.
- [12] Mitsch W J, Gosselink J G. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting [J]. Ecological Economics, 2000, 35(1):25-33.
- [13] Avnimelech Y, Ritvo G. Shrimp and fish pond soils: processes and management [J]. Aquaculture, 2003, 220(1-4):549-567.
- [14] 王绪伟,王心源,史杜芳. 巢湖污染现状与水质恢复措施[J]. 环境保护科学,2007,33(4):13-15.
- [15] 管佳佳,洪天求,贾志海,等. 巢湖Ⅰ 河水质评价及主成分分析[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2008,16(3):89-93.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] 《环境污染物分析方法》科研协作组. 环境污染物分析方法——无机物分析[M]. (第二版). 北京:科学出版社,1987,355-390.
- [18] 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. 81-89.
- [19] 蔡煜东,汪列,姚林声. 水质富营养化程度的人工神经网络决策模型[J]. 中国环境科学,1995,15(2):123-127.
- [20] 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.
- [21] 陈敬安,万国江. 云南程海现代沉积物环境记录研究[J]. 矿物学报,2000,20(2):112-116.
- [22] 毛战坡,尹澄清,王雨春,等. 污染物在农田溪流生态系统中的动态变化[J]. 生态学报,2003,23(12):2614-2623.
- [23] 毛战坡,单保庆,尹澄清,等. 磷在农田溪流中的动态变化[J]. 环境科学,2003,24(6):1-8.
- [24] 孙振中,陈家长. 上海地区内陆淡水渔业生产对环境的影响[J]. 水产科技情报,2006,33(4):165-168.
- [25] 张震,司友斌,谷勋刚,等. 巢湖流域规模化养殖场畜禽粪便污染负荷研究——以居巢区为例[J]. 安徽农业科学,2009,37(15):7159-7161.