

白马湖西北部湖区表层沉积物氮、磷形态 分布特征及污染评价

李 强¹, 韩成银², 戴小琳³, 华学坤², 王永年², 张 凯², 田兴军^{1*}

(1. 南京大学 生命科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省灌溉总渠管理处, 江苏 淮安 223200;
3. 江苏省水利厅工管处, 江苏 南京 210029)

摘要: 为了解退圩还湖后的白马湖典型湖区表层沉积物营养盐形态赋存特征及污染程度, 于 2019 年 1 月采集了白马湖西北部湖区 9 个样点的表层沉积物, 利用化学提取法和 SMT 法分别分析了表层沉积物中的氮、磷形态。结果表明: 表层沉积物总氮含量为 466.70 ~ 547.01 mg/kg, 以有机氮为主; 总磷含量为 325.59 ~ 841.24 mg/kg, 以无机磷为主。不同氮形态与总氮均不存在显著的相关性关系, 不同磷形态与总磷均存在显著的相关性关系。总体上各河流入湖口的无机氮、总磷和不同磷形态含量均高于湖区开阔水域, 各河流入湖口沉积物污染程度也高于开阔水域。其中, 水生植物种植区周围 (5 号取样点) 表层沉积物综合污染程度最轻, 浚河口 (9 号取样点) 表层沉积物综合污染程度最严重。因此, 白马湖的水污染问题主要由外源污染引起, 其治理与修复仍需加强控源截污工作, 同时, 合适的生态净化工程实施对缓解白马湖的水污染具有良好效果。

关键词: 沉积物; 氮磷形态; 污染评价; 白马湖

中图分类号: X52; X824

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2019)12-0011-07

Distribution characteristics and pollution evaluation of nitrogen and phosphorus forms in surface sediments in the northwest lake area of Baima Lake

LI Qiang¹, HAN Chengyin², DAI Xiaolin³, HUA Xuekun², WANG Yongnian²,
ZHANG Kai², TIAN Xingjun^{1*}

(1. School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu;

2. Main Irrigation Channel Management Division of Jiangsu Province, Huaian 223200, Jiangsu;

3. Project Management Office of Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu)

Abstract: In order to understand the nutrient salt occurrence characteristics and pollution degree of surface sediments in the typical lake area of Baima Lake after retuning polder land to lake, the surface sediments of 9 samples in the northwest lake area of Baima Lake were collected in January 2019, and the nitrogen and phosphorus forms in surface sediments were respectively analyzed by chemical extraction and SMT methods. The results showed that contents of total nitrogen ranged from 466.70 mg/kg to 547.01 mg/kg, and the main species was organic nitrogen. The contents of total phosphorus ranged from 325.59 mg/kg to 841.24 mg/kg, and the main species was inorganic phosphorus. The correlation analysis showed that no notable correlations between different nitrogen species and total nitrogen but

收稿日期: 2019-09-16

基金项目: 江苏省水利科技项目 (ZQ201817)

作者简介: 李强 (1995—), 男, 硕士研究生在读, 研究方向为湖泊生态修复。

通讯作者: 田兴军 (1961—), 男, 教授, 研究方向为生态功能与生态修复。

notable correlations between different phosphorus species and total phosphorus were displayed. In general, the contents of inorganic nitrogen, total phosphorus and various species of phosphorus in the inlets of the rivers were higher than those in the open waters, and the pollution levels of the surface sediments in the inlets of the rivers were higher than those in the open waters as well. Among them, the lowest integrated pollution level of the surface sediment was near the macrophyte planting area (5th sample site), but the most serious was the inlet of Xunhe River (9th sample site). Therefore, the water pollution in Baima Lake was mainly caused by exogenous pollution, and its source control and interception of pollutants entering the lakes should still need to be strengthened. Meanwhile, appropriate ecological lake cleaning projects would also have a good effect on alleviating the water pollution in Baima Lake.

Key words: sediment; nitrogen and phosphorus species; pollution assessment; Baima Lake

湖泊富营养化是我国重大的水环境问题之一,严重破坏了社会和经济的可持续发展。沉积物作为湖泊水环境的重要组成部分,既是湖泊流域营养物质(氮磷)的主要归宿地,也是湖泊营养物质的内源负荷来源地,对水体富营养化研究具有特殊意义^[1-2]。沉积物氮、磷赋存形态是影响湖泊沉积物-水界面营养物质交换的重要因素,决定着生物可利用的成分量,在湖泊生态系统的氮、磷元素生物地球化学循环中具有重要环境意义^[3]。

白马湖是江苏省十大淡水湖之一,淮安市第二水源地,国家南水北调工程东线通道,于 2013 年 12 月成功入围国家江河湖泊生态环境保护竞争立项重点支持湖泊。白马湖自 2010 年退圩还湖以来,湖泊水质得到了不少关注^[4-6],但对白马湖沉积物的研究较少,仅郝达平等^[7]对白马湖沉积物重金属污染状况进行了监测与评价,白马湖沉积物氮、磷赋存形态的研究尚未见报道。本文基于白马湖主要的生态恢复与净化区——西北部湖区表层沉积物中氮、磷的赋存形态及污染程度的分析,旨在揭示该区域沉积物污染现状,以期合理治理白马湖水污染问题提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

白马湖位于淮河流域下游的淮安市境东南边缘,湖区分跨淮安市淮安区、洪泽区、金湖县和扬州市宝应县,地理坐标为北纬 $33^{\circ} 09' \sim 33^{\circ} 19'$,东经 $119^{\circ} 02' \sim 119^{\circ} 12'$ 。白马湖目前面积约为 108 km^2 ,南北长约 18 km,东西平均长 6 km。白马湖近年来通过退圩还湖、退渔还湖、生态清淤、生态修复工程等措施进行生态建设,湖泊整体状态逐渐变好^[8]。白马湖西北部湖区位于退圩还湖及湖底清淤的主要区域,是主要的生态恢复与净化区,该湖区的主要入湖河流有花河、往良河、大荡河和浚

河等,毗邻淮安白马湖森林公园,有 2 块弃土区,1 座游船码头,并种植了约 20 万 m^2 的水生植物(调查取样点 5 附近)进行生态修复(图 1)。

1.2 样品采集及预处理

于 2019 年 1 月中旬在白马湖西北湖区进行取样,根据该湖区形状特征及主要入湖河流分布,共布置 9 个取样点,取样点 1、2、3、9 分别为入湖河流花河、往良河、大荡河和浚河的入湖口,取样点 4~8 为该湖区开阔水域东西方向设置样点,取样点 5 靠近水生植物种植区,取样点 8 为靠近浚河入湖口的开阔湖区,取样点位置见图 1。采集表层沉积物使用彼得森采样器,并在每个取样点处采集距表层约 0.5 m 处上覆水水样,将采集的沉积物样品和水样低温带回实验室。将沉积物自然风干后除去植物及动物残体等明显杂质,然后进行研磨,过 80 目筛后干燥封存用于后续分析。

1.3 样品分析方法

上覆水 pH、电导率(Cond)利用便携式多参数水质分析测量仪(SX-836,上海三信)现场测量,水体透明度(SD)利用塞氏盘现场测量,上覆水总氮(TN)、氨氮(NH_4^+)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)利用哈希水质检测仪测定。

沉积物总氮(TN)含量采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法^[9]测定,氨态氮(NH_4^+)和硝态氮(NO_3^-)含量通过氯化钾浸提后分别采用纳氏试剂法和双波长紫外分光光度法^[9]测定,鉴于亚硝酸氮含量很少可以忽略不计,无机氮(IN)含量估算为 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量之和,有机氮(ON)含量估算为 TN 含量与 IN 含量之差。沉积物不同磷形态含量采取用 SMT 法^[9]提取,包括总磷(TP)、铁/铝/锰结合态磷(NaOH-P)、钙结合态磷(Ca-P)、无机磷(IP)和有机磷(OP)。沉积物的 pH 和电导率(Cond)值按照水土比 5:1 振荡 30 min 后过滤,取上清液分别使用 pH 计(E-331C,上海康仪)和

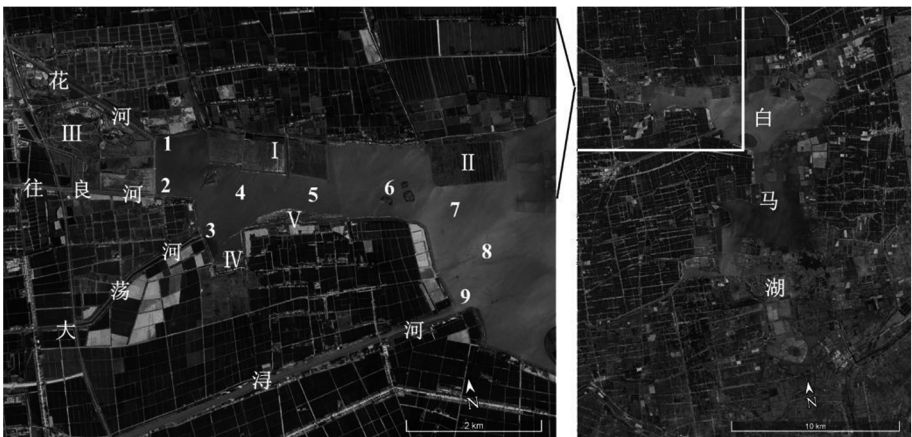


图 1 白马湖西北湖区取样分布图(I & II - 弃土区, III - 森林公园, IV - 游船码头, V - 水生植物种植区, 1 - 9 - 取样点)
底图来自 Google Earth Pro

笔式电导率计 (SX - 650, 上海三信) 测定。沉积物有机质 (OM) 含量采用烧失量法 (550℃, 5h) 测定。每个样品进行 3 次重复测定。

1.4 沉积物污染评价方法

沉积物污染状况评价采用综合污染指数法, 该方法曾应用于太湖湖滨带沉积物氮磷污染评价^[2], 通过计算 TN、TP 的单一因子污染指数, 再由单一因子污染指数计算综合污染指数, 沉积物综合污染分级见表 1^[2]。计算公式如下:

$$S_i = C_i \frac{C_{sTN}}{C_{sTP}} C_s \tag{1}$$

表 1 沉积物污染程度分级标准

S_{TN}	S_{TP}	FF	等级
$S_{TN} < 1.0$	$S_{TP} < 0.5$	$FF < 1.0$	清洁
$1.0 \leq S_{TN} \leq 1.5$	$0.5 \leq S_{TP} \leq 1.0$	$1.0 \leq FF \leq 1.5$	轻度污染
$1.5 < S_{TN} \leq 2.0$	$1.0 < S_{TP} \leq 1.5$	$1.5 < FF \leq 2.0$	中度污染
$S_{TN} > 2.0$	$S_{TP} > 1.5$	$FF > 2.0$	重度污染

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中, S_i 为 TN、TP 的单一因子污染指数; C_i 为 TN 和 TP 的实测值; C_s 为 TN 和 TP 标准值; 本文的 C_{sTN} 和 C_{sTP} 分别取加拿大安大略省环境和能源部 (1992) 制定的生态安全限度最低值 550 mg/kg 和 600 mg/kg^[10]; FF 为综合污染指数; F 为 S_{TN} 和 S_{TP} 的平均值; F_{max} 为 S_{TN} 和 S_{TP} 两者中的最大值。

1.5 数据处理

所有测定数据采用 Excel 2016 进行数据整理, 采用 SPSS16.0 进行统计分析和相关性分析, 采用

Origin 8.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 上覆水和沉积物理化性质特征

由表 2 可知, 白马湖西北湖区水深介于 1.8 ~ 3.2 m 间, 透明度介于 56 ~ 90 cm 间。上覆水 pH 介于 8.02 ~ 8.27 间, 电导率介于 623 ~ 683 μ S/cm 间。上覆水 TN 介于 1.5 ~ 5.2 mg/L 间, TP 介于 0.011 ~ 0.095 mg/L 间, NH_4+ 介于 0.14 ~ 1.23 mg/L 间, COD 介于 6 ~ 17 mg/L 间。根据我国《地表水环境

质量标准》(GB3838—2002), 上覆水 TN、TP 和 NH_4+ 均有不同程度污染, 其中 4 和 5 号取样点的水质较好, 各条河流入湖口取样点水质较差。TN 在花河及浚河入湖口含量高于 V 类水标准 ($TN > 2.0$ mg/L), TP 和 NH_4+ 在浚河入湖口均介于 IV 类水标准间 ($0.05 < TP \leq 0.1$ mg/L, $1.0 < NH_4+ \leq 1.5$ mg/L)。一般来说, 水体中的 N、P 浓度可以反映水质污染状况, 水体中 N、P 浓度会受到人类生产活动、河流外源输入及沉积物内源释放的共同影响。由于该湖区近年内已经退圩还湖、底泥清淤及水生植物种植, 由此说明该湖区水体污染主要由河

表 2 白马湖西北湖区上覆水理化性质

取样点	TN (mg/L)	TP (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	COD (mg/L)	Cond (μS/cm)	SD (cm)	pH	水深 (m)
1	3.6	0.011	0.29	17	673	69	8.18	2.2
2	1.8	0.022	0.29	13	683	81	8.13	2.4
3	2.0	0.028	0.20	11	657	72	8.21	2.8
4	1.7	0.017	0.14	12	657	90	8.21	2.5
5	1.5	0.016	0.16	6	645	83	8.27	1.8
6	2.0	0.061	0.75	10	640	73	8.26	3.0
7	2.1	0.053	0.72	14	625	70	8.02	2.5
8	1.8	0.038	0.57	13	623	56	8.11	3.2
9	5.2	0.095	1.23	13	635	64	8.02	2.4

表 3 白马湖西北湖区表层沉积物理化性质

理化性质	取样点								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	7.94	8.07	8.10	8.17	8.10	8.23	8.15	8.14	8.07
Cond (μS/cm)	833	479	436	481	840	434	493	465	843
OM (g/kg)	36.70	39.22	57.14	41.24	60.61	55.56	47.62	67.96	85.11

流外源输入引起。另外,该湖区表层沉积物的 pH 介于 7.94 ~ 8.23 间,电导率介于 436 ~ 843 μS/cm 间,有机质 OM 介于 36.70 ~ 85.11 g/kg 间 (表 3)。

2.2 沉积物不同氮、磷形态含量

白马湖西北湖区各取样点表层沉积物 TN 含量在 466.70 ~ 547.01 mg/kg 之间,平均含量是 526.23 mg/kg,其中 ON 是 TN 的主要成分,含量在 409.06 ~ 487.18 mg/kg 间,TN 与 ON 的变异程度较弱,变异系数分别为 4.68% 和 6.41%。IN 占 TN 的比例较小,含量在 42.46 ~ 112.35 mg/kg,平均含量是 65.53 mg/kg,IN 中 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量分别在 25.09 ~ 76.33 mg/kg 和 14.09 ~ 40.62 mg/kg 间,平均含量分别是 39.43 mg/kg 和 26.10 mg/kg, NH₄⁺ 含量约为 NO₃⁻ 含量的 1.5 倍,IN 及其成分的变异程度较强,变异系数在 31.80% ~ 50.27% 间 (表 4)。

白马湖西北湖区各取样点表层沉积物 TP 含量在 325.59 ~ 841.24 mg/kg 间,平均含量是 505.86 mg/kg,其中 IP 是 TP 的主要成分,含量在 250.97 ~ 667.68 mg/kg 间,平均含量是 379.91 mg/kg。IP 中 NaOH-P 和 Ca-P 的含量分

别在 62.41 ~ 361.73 mg/kg 和 107.88 ~ 303.24 mg/kg 间,平均含量分别是 182.72 mg/kg 和 168.81 mg/kg。另外,OP 占 TP 的比例相对较小,含量在 69.73 ~ 281.02 mg/kg 间,平均含量是 113.56 mg/kg。该湖区不同形态磷含量的变异程度较强,变异系数在 32.83 ~ 59.42% 间 (表 5)。

2.3 沉积物不同氮、磷形态分布特征

白马湖西北湖区表层沉积物 TN 和 ON 含量的最大值与最低值均分别出现在 1 号取样点和 5 号取样点,TN 和 ON 含量在各号取样点含量变化不大。NH₄⁺ 含量的最大值和最小值分别出现在 3 号取样点和 7 号取样点,NO₃⁻ 和 IN 含量的最大值和最小值均分别出现在 9 号取样点与 6 号取样点。IN 含量在各取样点含量变化较大,总体上各河流入湖口的 IN 含量高于湖区开阔水域 (图 2)。

白马湖西北湖区表层沉积物 TP、IP 和 Ca-P 含量的最大值与最低值均分别出现在 9 号取样点和 4 号取样点,NaOH-P 含量的最大值与最低值分别出现在 9 号取样点和 5 号取样点,OP 含量的最大值与最低值分别出现在 2 号取样点和 4 号取样点。

表 4 白马湖西北湖区表层沉积物中不同氮形态的含量

指标	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	IN	ON	TN
最大值 (mg/kg)	76.33	40.62	112.35	487.18	547.01
最小值 (mg/kg)	25.09	14.09	42.46	409.06	466.70
平均值 (mg/kg)	39.43	26.10	65.53	460.69	526.23
标准偏差 (mg/kg)	19.82	8.30	24.41	29.51	24.63
变异系数 (%)	50.27	31.80	37.25	6.41	4.68

表 5 白马湖西北湖区表层沉积物中不同磷形态的含量

指标	NaOH-P	Ca-P	IP	OP	TP
最大值 (mg/kg)	361.73	303.24	667.68	281.02	841.24
最小值 (mg/kg)	62.41	107.88	250.97	69.73	325.59
平均值 (mg/kg)	182.72	168.81	379.91	113.56	505.86
标准偏差 (mg/kg)	108.70	55.42	148.05	67.32	182.81
变异系数 (%)	59.49	32.83	38.97	59.28	36.14

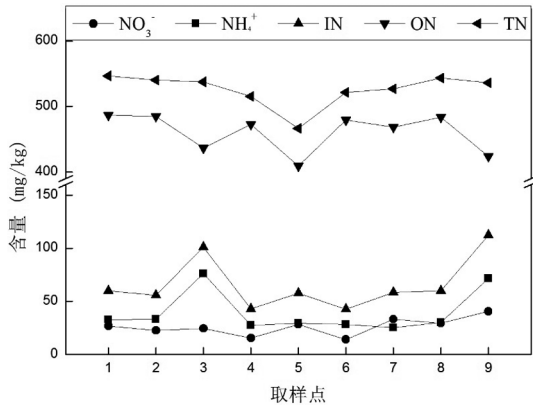


图 2 白马湖西北湖区表层沉积物中不同氮形态的空间变化
该湖区不同磷形态含量变化较大,但总体上各河流
入湖口的不同磷形态含量高于湖区开阔水域处(图 3)。

2.4 沉积物不同氮、磷形态的相关性分析

白马湖西北湖区表层沉积物不同氮、磷形态的相关性分析结果见表 6。可以看出,TN 含量与不同氮形态含量间相关性均未达到显著水平 ($p > 0.05$),TP 含量与不同磷形态含量间相关性均达到显著水平 ($p < 0.05$)。沉积物 IN 含量与 NH_4^+ 含量的相关性很高 ($R = 0.951, p < 0.01$),与 NO_3^- 含量的相关性也较高 ($R = 0.672, p < 0.05$)。沉积物 IP 含量与 NaOH-P 含量的相关性很高 ($R = 0.977, p < 0.01$),与 Ca-P 含量的相关性也较高

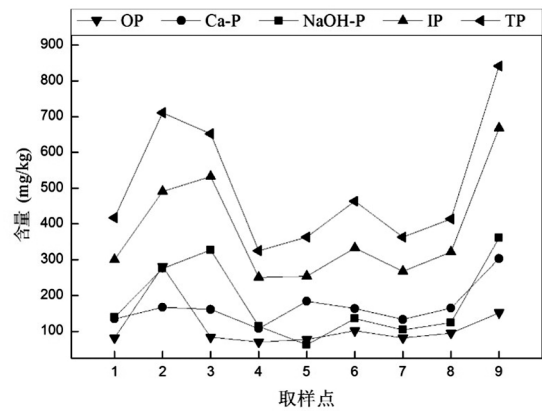


图 3 白马湖西北湖区表层沉积物中不同磷形态的空间变化
($R = 0.769, p < 0.05$)。另外, NH_4^+ 含量与 NaOH-P、IP 和 TP 含量的相关性均达到显著水平 ($p < 0.05$),IN 含量与 NaOH-P、Ca-P、IP 和 TP 含量的相关性也均达到显著水平 ($p < 0.05$)。

2.5 沉积物污染综合评价

通过单一因子污染指数法以及综合污染指数法对白马湖西北湖区表层沉积物进行评价,其结果见表 7。其中 S_{TN} 均小于 1,表明 TN 呈清洁状态; S_{TP} 在 0.54 ~ 1.40 间,表明 TP 处于轻度污染到中度污染间;FF 在 0.84 ~ 1.30 间,表明该湖区部分表层沉积物处于轻度污染。从分布特征来看,5 号取样点表层沉积物综合清洁状况最好,2 号、3 号及 9 号

表 6 白马湖西北湖区表层沉积物中不同氮、磷形态的相关关系矩阵

	NH ₄₊	NO ₃₋	IN	ON	TN	NaOH-P	Ca-P	IP	OP	TP
NH ₄₊	1	0.408	0.951 * *	-0.544	0.291	0.874 * *	0.624	0.862 * *	0.093	0.777 *
NO ₃₋	0.408	1	0.672 *	-0.458	0.117	0.319	0.661	0.424	0.050	0.384
IN	0.951 * *	0.672 *	1	-0.597	0.276	0.818 * *	0.731 *	0.844 * *	0.093	0.761 *
ON	-0.544	-0.458	-0.597	1	0.606	-0.251	-0.591	-0.340	0.184	-0.280
TN	0.291	0.117	0.276	0.606	1	0.510	0.016	0.430	0.313	0.418
NaOH-P	0.874 * *	0.319	0.818 * *	-0.251	0.510	1	0.620	0.977 * *	0.532	0.957 * *
Ca-P	0.624	0.661	0.731 *	-0.591	0.016	0.620	1	0.769 *	0.321	0.754 *
IP	0.862 * *	0.424	0.844 * *	-0.340	0.430	0.977 * *	0.769 *	1	0.542	0.985 * *
OP	0.093	0.050	0.093	0.184	0.313	0.532	0.321	0.542	1	0.668 *
TP	0.777 *	0.384	0.761 *	-0.280	0.418	0.957 * *	0.754 *	0.985 * *	0.668 *	1

注：* 表示显著相关性水平 $p < 0.05$ ；* * 表示极显著相关性水平 $p < 0.01$ ， $n=9$ 。

表 7 白马湖西北湖区表层沉积物污染评价

取样点	S_{TN}	TN 等级	S_{TP}	TP 等级	FF	综合等级
1	0.99	清洁	0.70	轻度污染	0.92	清洁
2	0.98	清洁	1.19	中度污染	1.14	轻度污染
3	0.98	清洁	1.09	中度污染	1.06	轻度污染
4	0.94	清洁	0.54	轻度污染	0.84	清洁
5	0.85	清洁	0.61	轻度污染	0.79	清洁
6	0.95	清洁	0.77	轻度污染	0.91	清洁
7	0.96	清洁	0.61	轻度污染	0.87	清洁
8	0.99	清洁	0.69	轻度污染	0.92	清洁
9	0.97	清洁	1.40	中度污染	1.30	轻度污染
平均	0.96	清洁	0.84	轻度污染	0.93	清洁

取样点表层沉积物综合污染状况为轻度污染,且受污染程度高于其他区域,表明该湖区河流入湖口表层沉积物存在被污染的风险,尤其是浔河口(9号取样点)。

3 讨论

沉积物不同氮、磷形态在湖泊富营养化中所起作用各异且来源也有差异。NH₄₊和NO₃₋为沉积物

氮中活跃的部分,容易在沉积物-水界面发生转化和迁移,其来源既可能源于外源输入,也可能源于沉积物本身有机氮的矿化作用^[3]。磷作为控制湖泊富营养化主要限制性营养元素,其迁移释放和生物活性与不同磷形态息息相关^[11]。NaOH-P是生物可利用磷,来源于人类产生的生活污水和工业废水;Ca-P是生物不可利用磷,来源于碎屑岩或自生;OP是部分生物可利用磷,来源于农业面源污

染^[12]。白马湖西北湖区不同氮、磷形态含量总体上表现为河流入湖口含量高于开阔湖区的含量, 尤其是 NH_4^+ 和 NaOH-P , 两者的变异程度非常明显 (表 4 和表 5), 从相关性分析来看, NH_4^+ 和 NaOH-P 的相关性非常显著 ($R=0.874, p<0.01$, 表 6), 说明两者间同源性较高。从而表明外源污染是白马湖表层沉积物氮、磷赋存特征分异的重要原因, 氮、磷赋存特征也能较好地反映白马湖表层沉积物营养元素污染的来源。

白马湖西北湖区沉积物中的 TN、TP 含量远低于洪泽湖^[1]和太湖^[2]等湖泊, 也低于白马湖未退圩还湖的沉积物 TN (900 mg/kg)、TP (1100 mg/kg)^[4]。这是由于白马湖近几年已经完成了退圩还湖一期和二期工程, 且对湖内大多数污染沉积物进行了清淤和疏浚, 白马湖西北湖区就位于主要的清淤区, 同时在该湖区南岸 (5 号取样点附近) 自 2014 年开始开展了大规模的水生植物种植生态修复工程, 因此该湖区表层沉积物 TN、TP 含量较低。但从该湖区上覆水水质来看, 湖水 TN、TP 含量依旧高于 IV 类水标准。因此, 该湖区营养盐外源负荷较高, 沉积物表现为氮、磷的汇。研究表明, 湖泊 TN、TP 等污染物主要由周边污染源汇入及河流输入^[13]。9 号取样点位于白马湖浚河入湖口, 为白马湖生态监测的重要断面, 常年受农业、农村、工业与集镇生活污染的影响^[5], 其水体与表层沉积物的 TP 含量均高于其他取样点, 沉积物 TP 污染指数最高, 为中度污染, 综合污染指数也均高于其他取样点, 为轻度污染。同时沉积物 TP 与 NaOH-P 的相关性极显著 ($R=0.957, p<0.01$, 表 6)。因此可推断该湖区在退圩还湖后沉积物营养盐负荷主要来自外源河流输入, 沉积物可通过吸附和沉积等作用固定营养盐。也同时表明, 白马湖输入的污染物经过湖体自净, 特别是水生植物的种植使沉积物的污染物得到一定程度的净化, 形成了入湖河口污染较重, 而在净化区周围, 特别在水生植物种植区周围 (5 号取样点, 表 7) 的沉积物污染程度减弱的现象, 说明生态净化工程效果显著。

鉴于白马湖退圩还湖后的水污染问题主要是由于外源污染物引起, 治理与修复白马湖水污染问题的的工作应更加注意流域上的控源截污。控源截污被认为对中国湖泊污染治理与生态修复具有普遍意义^[14], 因此, 坚持加强白马湖流域上的控源截污, 对白马湖生态系统的持续恢复具有重要作用。同时, 种植水生植物也对削弱白马湖湖底沉积物富

营养化具有良好作用, 因此, 合适的生态净化工程实施对缓解白马湖的水体污染具有良好效果。

4 结论

由于退圩还湖、底泥清淤及生态工程净化, 白马湖西北湖区表层沉积物 TN、TP 含量总体不高, TN 以 ON 为主, TP 以 IP 为主, 沉积物整体呈清洁状态, 表现为氮、磷的汇, 生态工程作用效果显著。具体表现如下:

(1) 白马湖西北湖区表层沉积物 TN 含量为 466.70 ~ 547.01 mg/kg, 平均含量是 526.23 mg/kg。TN 与不同氮形态之间不存在显著的相关性, 总体呈清洁状态。

(2) 白马湖西北湖区表层沉积物 TP 含量为 325.59 ~ 841.24 mg/kg, 平均含量是 505.86 mg/kg。TP 与不同磷形态之间均存在显著的相关性, 总体呈轻度污染状态。

(3) 白马湖西北湖区表层沉积物 TN 含量变异程度小, TP 含量变异程度大。5 号取样点表层沉积物综合污染程度最低, 9 号取样点表层沉积物综合污染程度最严重。总体上各河流入湖口的 IN 和 TP 及不同磷形态含量均高于湖区开阔水域, 各河流入湖口沉积物污染程度也高于开阔水域。

白马湖退圩还湖后的水环境问题主要由外源污染引起, 控源截污仍是今后白马湖治理与修复的主要工作方向。同时, 合适的生态净化工程实施对缓解白马湖的水体污染具有良好效果。

参考文献:

- [1] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价 [J]. 环境科学, 2010, 31 (04): 961-968.
- [2] 王佩, 卢少勇, 王殿武, 等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价 [J]. 中国环境科学, 2012, 32 (04): 703-709.
- [3] 李辉, 潘学军, 史丽琼, 等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30 (01): 281-292.
- [4] 杨万红, 周霞, 车金铃. 淮安市白马湖退圩 (围) 还湖对水质影响浅析 [J]. 江苏水利, 2014 (08): 34-36.
- [5] 仪慧民, 胡小贞, 代丹, 等. 白马湖西岸入湖河流污染特征解析 [J]. 环境工程技术学报, 2017, 7 (06): 666-675.
- [6] 代丹, 李小菠, 胡小贞, 等. 白马湖水污染特征及其

(下转第 22 页)

(上接第 17 页)

- 成因分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27 (06):1287-1297.
- [7] 郝达平, 刘雪梅. 白马湖底泥重金属污染特征分析 [J]. 安徽农业科学, 2014, 42(11):3340-3342.
- [8] 吴苏舒, 高士佩, 胡晓东, 等. 基于熵权模糊综合评价法的白马湖生态系统健康评价 [J]. 江苏水利, 2018(07):17-23.
- [9] 王圣瑞. 湖泊沉积物-水界面过程:基本理论与常用测定方法 [M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [10] Mudroch A, Azcue J. Manual of aquatic sediment sampling [M]. Boca Raton: Lewis Publications, 1995.
- [11] 蔡龙炎, 李颖, 郑子航. 我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究 [J]. 地球与环境, 2010, 38 (02):235-241.
- [12] Ruban V, Lopez-Sanchez J, 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(2-3): 224-228.
- [13] 陈凌霄, 秦雪, 金赞芳. 湖泊污染物入湖通量的研究进展 [J]. 环境科技, 2014, 27(02):61-64.
- [14] 秦伯强, 张运林, 高光, 等. 湖泊生态恢复的关键因子分析 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(07):918-924.