

巢湖沉积物-水界面磷酸盐释放通量研究

夏守先¹, 杨丽标², 张广萍¹, 王 煜¹, 高 亮¹, 晏维金², 李玉成^{3*}

(1.安徽省水文总局, 合肥 230022; 2.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3.安徽大学, 合肥 230039)

摘 要:采用现场采样与室内测试方法,对调水后巢湖沉积物-水界面磷酸盐释放通量进行了研究。结果表明,夏季巢湖表层水、底层水、间隙水磷酸盐浓度变化范围分别为 0.02~0.16、0.02~0.17、0.01~0.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值分别为 (0.03 ± 0.04) 、 (0.04 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 (0.03 ± 0.02) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。秋季 6 个取样点表层水、底层水磷酸盐含量的变化范围均为 0.03~0.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 (0.04 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 显著高于夏季对应样点浓度。而秋季间隙水磷酸盐浓度平均值为 (0.015 ± 0.003) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (变化范围 0.01~0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 与夏季对应样点相比差异不显著。夏季沉积物-水界面磷酸盐释放通量的变化范围为 -27.46~6.27 $\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 平均值为 -1.54 $\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。秋季磷酸盐释放通量变化范围为 -10.61~-3.77 $\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 均值为 -6.19 $\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 与夏季对应样点释放通量差异显著 ($\alpha=0.05$, $P=0.002$)。情景模拟表明,排除外源污染的影响,当引入长江水磷酸盐浓度介于 0.003~0.009 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,巢湖调水后替换水体可在 7.2 a 左右达二次富营养化。

关键词:巢湖;磷酸盐;沉积物-水界面;释放通量

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)02-0322-06

Benthic Flux of Phosphate Across Sediment-water Interface in Lake Chaohu

XIA Shou-xian¹, YANG Li-biao², Zhang Guang-ping¹, WANG Yu¹, GAO liang¹, YAN Wei-jin², LI Yu-cheng^{3*}

(1. Anhui Province Hydrological Bureau, Hefei 230022, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: This research was performed in Lake Chaohu, aimed to estimate the benthic flux of phosphate across sediment-water interface. Results showed that concentrations of phosphate in surface, overlying and sediment interstitial water varied from 0.02 to 0.16 (with mean value of 0.03 ± 0.04), 0.02 to 0.17 (with mean value of 0.04 ± 0.04), and 0.01 to 0.08 (with mean value of 0.03 ± 0.02) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively in the summer of 2008. While concentrations of phosphate in both surface and overlying water varied from 0.03 to 0.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, with average values of 0.04 ± 0.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in the autumn of 2008. Phosphate concentrations in surface and overlying water showed no significant differences between summer and autumn observations. However, mean phosphate concentrations in interstitial water was 0.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (0.01~0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) in autumn, significantly lower than those in summer. Benthic flux of phosphate ranged between -27.46 and 6.27 $\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ and averaged -1.54 $\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ in the summer, significantly different with that in the autumn (from -10.61 to -3.77 $\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, mean -6.19 $\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) ($\alpha=0.05$, $P=0.002$). In addition, we estimated that, excluding the influence of external pollution, Lake Chaohu would be eutrophic within 7.2 years after the project of water transportation from the Changjiang River to Lake Chaohu was carried out, when the concentration of phosphate in the transported water ranges between 0.003 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 0.009 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Keywords: Lake Chaohu; phosphate; sediment-water interface; benthic flux

巢湖位于安徽省中部,是中国第四大淡水湖。20 世纪 70 年代以来,随着巢湖周边地区工农业的发展,大量点源及非点源等外源污染物的输入使得巢湖水

质急剧下降,蓝藻频繁爆发^[1]。据估算,巢湖每年的总磷入湖量约为 1 880 t,其中约 68%来源于面源污染^[2]。虽然当地政府采取了一系列措施,如控制工厂及农村生活污水的输入、减少农田化肥用量以削减面源污染等,但巢湖富营养化仍然没有得到有效控制。2007 年安徽省政府实施了“引江济巢”工程,希望通过调水换水来改善巢湖水质。控制外源污染不能有效改善巢湖水质的另一原因可能是由于沉积物向水体

收稿日期:2010-06-10

基金项目:国家自然科学基金(40972092,40073030);自然科学技术水专项(2008ZX07103-005-01)资助

作者简介:夏守先(1963—),男,安徽定远人,高级工程师,主要从事水环境监测评价与管理工作。

* 通讯作者:李玉成 E-mail:Liych1988@yahoo.com.cn

释放了大量营养盐^[3]。湖泊沉积物是富含氮、磷等生源要素的蓄积库,沉积物-水界面的营养盐交换往往可加速湖泊水体的营养化进程^[4]。本试验于 2008 年 6 月和 9 月在巢湖布点取样,研究了沉积物-水界面磷酸盐的释放通量,并估算了沉积物对湖泊富营养化的贡献。

1 材料与方法

1.1 采样方法

于 2008 年在巢湖设置 12 个采样点(东半湖 7 个,西半湖 5 个)对夏、秋两季沉积物-水界面磷酸盐释放通量进行了估算(图 1)。每个采样点位置用手持式 GPS 定位仪进行精确定位(表 1)。其中,秋季对 6 个样点(S5,S7-S11)磷酸盐释放通量进行了分析。每个样点表层水(20 cm)、底层水(沉积物上方 10 cm)用 Niskin 采样器采集;表层沉积物(5 cm)样品用 Piston 底泥采样器采集^[5-6]。同时,每个采样点沉积物厚度用自制工具(直径 8 cm、长度 1 m 钢管焊接 4 m 长手柄)测定。沉积物样品运回实验室后在 4 500 r·min⁻¹ 速率下离心,得到沉积物间隙水。每个样点底泥与水样重复 3 次取样。

1.2 测试方法

水样中磷酸盐浓度用注射式流动分析仪进行分析。沉积物中全氮含量用元素分析仪测定;全磷含量测定采用 Hayakawa 所用方法^[7]。沉积物在 105 ℃下烘干至恒重,鲜样与干样的差值为沉积物含水率。

1.3 磷酸盐释放通量计算方法

沉积物-水界面磷酸盐释放通量的计算公式为^[8]:
$$F=-D_s\Phi(\partial C/\partial x)_{x=0}$$

式中: F 为磷酸盐释放通量,mmol·m⁻¹·d⁻¹; D_s 为实测磷酸盐扩散系数,cm·s⁻¹,计算方法见 Krom 和 Berner^[9]; Φ 为沉积物孔隙度,%,由公式 $\Phi=W/[(100-W)\varphi+W]$ 估算获得(式中 W 为底泥的含水量,%; φ 为底泥容重,g·cm⁻³); $(\partial C/\partial x)_{x=0}$ 为单位距离磷酸盐的浓度梯度变化。 F 值为正值表明磷酸盐由沉积物向上覆水释放,反之则表明上覆水磷酸盐被沉积物吸附。

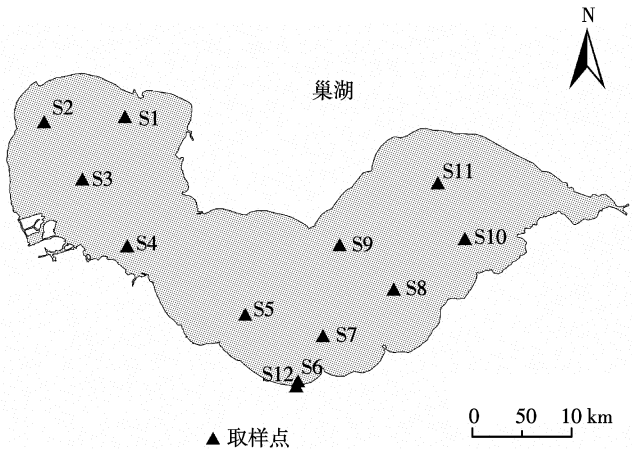


图 1 取样点示意图
Figure 1 Map of sampling locations

表 1 采样点位置及采样时间
Table 1 Position of sampling sites and sampling time

巢湖		采样点	经纬度	取样时间	
				夏季	秋季
西半湖	S1	南淝河口	31°40′23.9″N, 117°23′46″E	2008.6.20	—
	S2	派河口湖区	31°40′6.33″N, 117°19′22.02″E	2008.6.20	—
	S3	巢湖西半湖湖心	31°36′59.73″N, 117°21′26.44″E	2008.6.20	—
	S4	杭埠河口湖区	31°33′21.58″N, 117°23′53.13″E	2008.6.20	—
	S5	陡岗村对应湖区	31°29′37.42″N, 117°30′18.73″E	2008.6.20	2008.9.27
东半湖	S6	兆河口	31°26′0.09″N, 117°33′11.28″E	2008.6.20	—
	S7	兆河口湖区	31°28′28.2″N, 117°34′32.42″E	2008.6.20	2008.9.27
	S8	前湾村对应湖区	31°31′0.33″N, 117°38′23.24″E	2008.6.20	2008.9.27
	S9	上杨村对应湖区	31°33′24.65″N, 117°35′26.74″E	2008.6.20	2008.9.27
	S10	散兵对应湖区	31°33′45.21″N, 117°42′15.88″E	2008.6.20	2008.9.27
	S11	邬梁村对应湖区	31°36′47.05″N, 117°40′47.61″E	2008.6.20	2008.9.27
	S12	兆河	31°25′44.45″N, 117°33′4.84″E	2008.6.20	—

注:“—”表示样品未采集。

2 结果与讨论

2.1 巢湖现状湖区沉积物氮、磷总储量估算

结果表明,西半湖沉积物平均厚度为 (40 ± 21) cm(表2),变化范围为10~60 cm;表层沉积物氮、磷平均含量为 (0.73 ± 0.15) g·kg⁻¹和 (0.55 ± 0.12) g·kg⁻¹。东半湖沉积物平均深度为 (30 ± 23) cm,变化范围为7~60 cm;表层沉积物氮、磷平均含量为 (0.41 ± 0.21) g·kg⁻¹和 (0.25 ± 0.18) g·kg⁻¹。综合12个采样点数据,巢湖整个湖区沉积物的平均深度为 (34 ± 22) cm,表层沉积物全氮、全磷含量变化范围分别为0.22~0.92、0.11~0.66 g·kg⁻¹,平均值分别为 (0.54 ± 0.24) 、 (0.37 ± 0.21) g·kg⁻¹,且西半湖沉积物氮、磷含量显著高于东半湖($P<0.05$)。西半湖从派河口-杭埠河口-陡岗村对应湖区氮、磷含量明显高于其他湖区。估算结果还表明,现状条件下巢湖沉积物氮总储量为 $0.5\times 10^5\sim 2.0\times 10^5$ t,而磷的总储量约为 $0.2\times 10^5\sim 1.4\times 10^5$ t;其氮、磷储量分别相当于安徽省1987年化肥氮肥用量的1/15~1/4,磷肥用量的1/14~1/2^[10]。

2.2 磷酸盐浓度变化

夏季巢湖表层水、底层水、间隙水磷酸盐浓度变化范围分别为0.02~0.16、0.02~0.17、0.01~0.08 mg·L⁻¹

(图2),均值分别为 (0.03 ± 0.04) 、 (0.04 ± 0.04) mg·L⁻¹和 (0.03 ± 0.02) mg·L⁻¹。秋季6个采样点(S5、S7-S11)表层水、底层水磷酸盐的变化范围均为0.03~0.06 mg·L⁻¹,均值为 (0.04 ± 0.04) mg·L⁻¹,显著高于夏季6个对应采样点磷酸盐浓度 $[P<0.05]$,夏季6个对应采样点表层水与底层水磷酸盐浓度均值均为 (0.02 ± 0.01) mg·L⁻¹。而秋季间隙水磷酸盐浓度的变化范围为0.01~0.02 mg·L⁻¹,均值为 (0.015 ± 0.003) mg·L⁻¹,低于夏季的 $(0.01\sim 0.05)$ mg·L⁻¹,均值 (0.02 ± 0.01) mg·L⁻¹,但对应的6个样点磷酸盐浓度差异不显著($P=0.17$)。秋季表层水与底层水磷酸盐浓度高于夏季,可能是由于秋季大量藻类残体的腐解所致^[11];而两个季节底泥间隙水磷酸盐浓度差异不显著,说明在本研究进行阶段,巢湖水体磷酸盐尚未与底泥充分进行交换。取样点S1(南淝河口)表层水和上覆水磷酸盐浓度显著高于其他采样点,这是由于南淝河污染严重,导致巢湖临近南淝河口处水体磷酸盐含量较高。

2.3 沉积物-水界面磷酸盐释放通量

夏季PO₄³⁻释放通量的变化范围为-27.46~6.27 μg P·m⁻²·d⁻¹(图3),平均值为-1.54 μg P·m⁻²·d⁻¹,其中通量的最大值和最小值分别出现在杭埠河口与南淝河口两个采样点。派河口湖区、杭埠河口、前湾村湖区和

表2 巢湖沉积物氮、磷总储量估算
Table 2 Total amounts of N and P in sediment of Lake Chaohu

巢湖	采样点		沉积物			
			厚度/cm	含水率/%	TN/g·kg ⁻¹	TP/g·kg ⁻¹
西半湖	S1	南淝河口	60	48	0.54	0.37
	S2	派河口湖区	30	48	0.63	0.49
	S3	巢湖西半湖湖心	40	55	0.73	0.61
	S4	杭埠河口湖区	60	39	0.92	0.66
	S5	陡岗村对应湖区	10	70	0.81	0.63
		均值	40±21	52±12	0.73±0.15	0.55±0.12
东半湖	S6	兆河口	10	29	0.86	0.64
	S7	兆河口湖区	7	57	0.22	0.14
	S8	前湾村对应湖区	50	47	0.39	0.11
	S9	上杨村对应湖区	50	37	0.31	0.13
	S10	散兵对应湖区	60	25	0.35	0.20
	S11	邬梁村对应湖区	6	55	0.39	0.27
	S12	兆河	25	53	0.37	0.24
		均值	30±23	43±12	0.41±0.21	0.25±0.18
	12 样点均值		34±22	47±13	0.54±0.24	0.37±0.21
沉积物总氮量/t			$0.5\times 10^5\sim 2.0\times 10^5$			
沉积物总磷量/t			$0.2\times 10^5\sim 1.4\times 10^5$			

注:氮磷总储量估算公式为沉积物氮(磷)总储量= $H(34\text{ cm})\times A(750\text{ km}^2)\times C(\text{N、P 含量})\times (1-47\%)\times D(\text{沉积物密度},0.7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3})$;均值±SD。

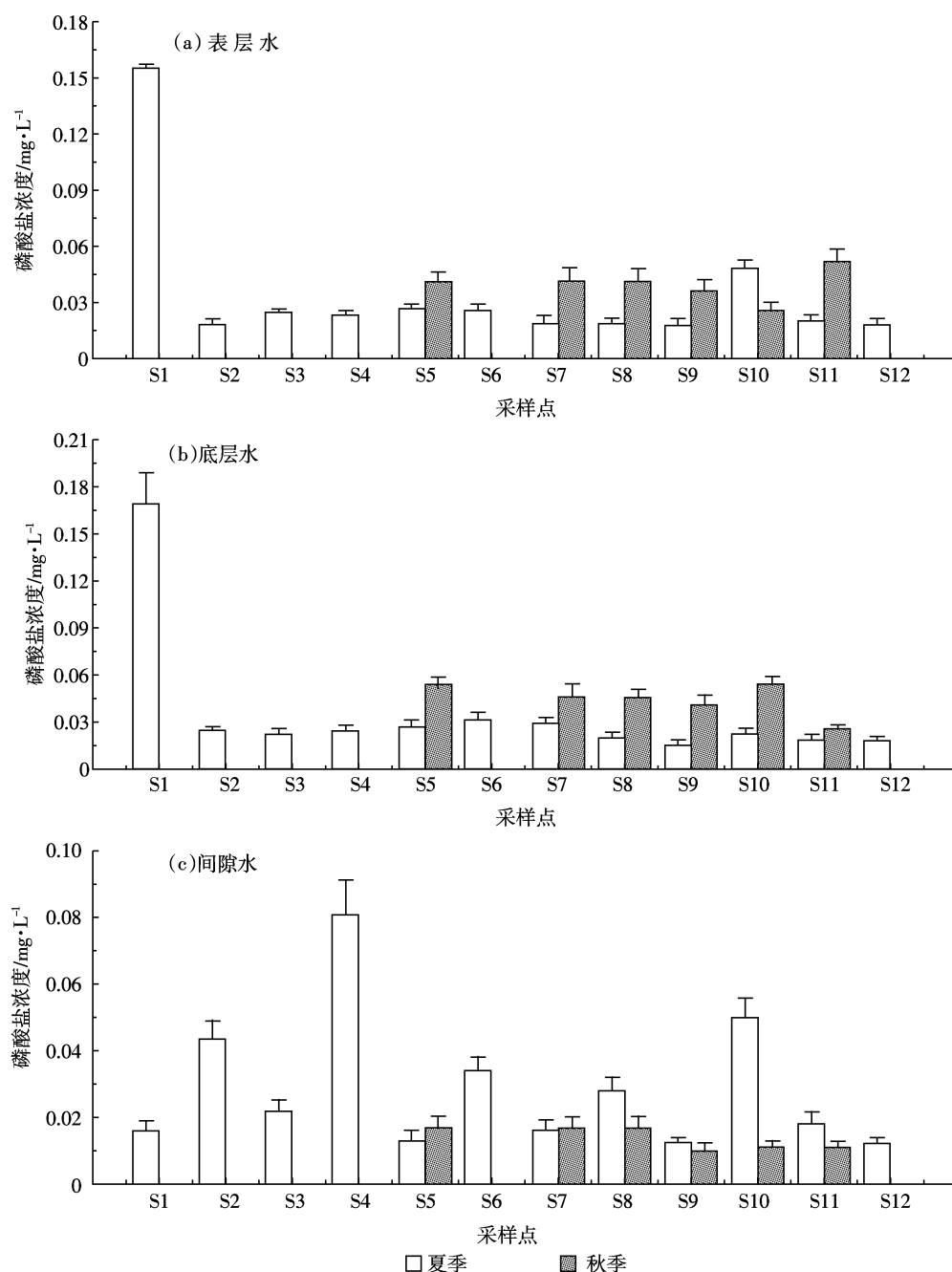


图2 巢湖不同水层磷酸盐浓度

Figure 2 Concentration of phosphate in water profiles

散兵湖区4个点 PO_4^{3-} 由底泥向底层水释放,西半湖湖心样点间隙水与上覆水 PO_4^{3-} 处于平衡状态,其他样点 PO_4^{3-} 由底层水向沉积物累积;但整个湖区 PO_4^{3-} 由底层水向沉积物进行累积。秋季6个取样点间隙水磷酸盐浓度较夏季稍有降低,而底层水磷酸盐浓度显著高于夏季;6个采样点沉积物-水界面磷酸盐释放通量均为负值,其变化范围为 $-10.61 \sim -3.77 \mu\text{gP} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,平均值为 $-6.19 \mu\text{gP} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,表明磷酸盐由水体向底泥

累积。秋季与夏季对应样点磷酸盐释放通量差异显著($\alpha=0.05, P=0.002$),表明巢湖沉积物-水界面磷酸盐的释放通量存在显著的季节性变化。

2.4 调水后巢湖再次富营养化的情景模拟

本研究采用情景模拟的方式估算了巢湖实施调水工程后,受沉积物-水界面磷酸盐释放的影响,巢湖替换水体达二次富营养化所用的时间。本次调查研究中,水体溶解性磷酸盐占总磷的57%(表层水、底层水

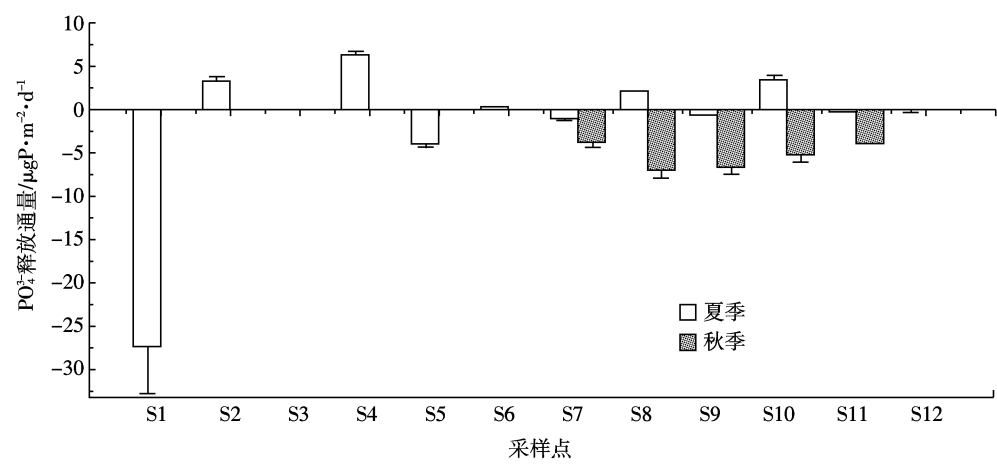


图3 沉积物-水界面磷酸盐释放通量

Figure 3 Benthic flux of phosphate across sediment-water interface

溶解性磷酸盐与各自总磷含量的整体平均比例),因此,当水体溶解性磷酸盐的浓度为 $0.011\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,总磷浓度达到 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水体发生富营养化。此估算假定:巢湖水体在较短时间内被引入的长江水所替换;排除外源污染物输入对水体富营养化的影响。巢湖二次富营养化用时(T)的估算公式为

$$T=(V\times C)/(A\times F)$$

式中: V 为巢湖正常库容, $17.17\times 10^9\text{ m}^3$; C 为水体中溶解性磷酸盐浓度, $0.011\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; A 为巢湖湖区面积, 750 km^2 ; F 为磷酸盐释放通量, $\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

估算结果表明,巢湖现状条件下沉积物间隙水磷酸盐的平均浓度(C_s)为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,当引入长江水磷酸盐浓度(C_w)变化为 $0.003\sim 0.009\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,沉积物-水界面磷酸盐释放通量的变化范围为 $6\sim 8\text{ }\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (表3)。巢湖调水后在沉积物向水体释放磷酸盐的影响下,可在 $7.2\sim 7.8\text{ a}$ 内达二次富营养化。这表明,沉积物可能是加速湖泊富营养化的重要内源因素。

表3 巢湖调水后水体发生二次富营养化的情景模拟

Table 3 Assessment of the reoccurrence time of eutrophication in Lake Chaohu

$C_s/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$C_w/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$F/\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	T/a
$\text{PO}_4^{3-} 0.03$	0.009	0.006	7.8
	0.006	0.007	7.4
	0.003	0.008	7.2

3 结论

(1)夏季巢湖表层水、底层水及沉积物间隙水磷酸盐浓度变化范围为: $0.02\sim 0.16$ 、 $0.02\sim 0.17$ 、 $0.01\sim 0.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;均值分别为 (0.03 ± 0.04) 、 $(0.04\pm 0.04)\text{ mg}\cdot$

L^{-1} 和 $(0.03\pm 0.02)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。秋季表层水 $0.03\sim 0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值 $(0.04\pm 0.04)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及底层水 $0.03\sim 0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值 $(0.04\pm 0.04)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸盐浓度显著高于夏季对应样点浓度,但间隙水磷酸盐浓度 $0.01\sim 0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值 $(0.015\pm 0.003)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与夏季对应样点相比无显著变化。

(2)夏季沉积物-水界面磷酸盐释放通量变化范围为 $-27.46\sim 6.27\text{ }\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,平均值为 $-1.54\text{ }\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。秋季磷酸盐释放通量变化范围为 $-10.61\sim -3.77\text{ }\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,均值为 $-6.19\text{ }\mu\text{gP}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,与夏季对应采样点释放通量相比差异显著。

(3)情景模拟分析表明,当引入长江水磷酸盐浓度介于 $0.003\sim 0.009\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间时,在沉积物-水界面磷酸盐释放通量的影响下,巢湖替换水体可在 7.2 a 内达二次富营养化。

参考文献:

- [1] 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.
YAN Wu -jiu, WANG Xin -yuan. Preliminary study on non -point sources pollution in the Chaohu Lake drainage basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(3):263-267.
- [2] 殷福才,张之源.巢湖富营养化研究进展[J].湖泊科学,2003,15(4):377-384.
YIN Fu -cai, ZHANG Zhi -yuan. Survey of Chaohu Lake eutrophication research [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(4):377-384.
- [3] 范成新,张路,秦伯强,等.太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化: I. 铵态氮释放速率的空间差异及源-汇通量[J].湖泊科学,2004,16(1):11-20.
FAN Cheng -xin, ZHANG Lu, QIN Bo -qiang, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-wa-

- ter interface of Lake Taihu: I. Special variation of the ammonium release rates and its source and sink fluxes[J]. *Journal of Lake Science*, 2004, 16(1): 11–20.
- [4] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕, 等. 湖泊沉积物对磷酸盐的负吸附研究[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 493–496.
- JIN Xiang-can, WANG Sheng-rui, PANG Yan, et al. Negative sorption of phosphate on lake sediment[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 493–496.
- [5] Chambers J W, Cameron N G. A rod-less piston corer for lake sediments; an improved, rope-operated percussion corer[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2004, 25(1): 117–122.
- [6] 冯金良, 朱立平, 李玉香. 藏南沉错湖泊三角洲的沉积相及沉积环境[J]. 地理研究, 2004, 23(5): 649–656.
- FENG Jin-liang, ZHU Li-ping, LI Yu-xiang. Sedimentary environments and facies about Chen Co lacustrine delta, South Tibetan Plateau [J]. *Geographical Research*, 2004, 23(5): 649–656.
- [7] Hayakawa Y, Kobayashi M, Izawa M, et al. Sedimentation flux from mariculture of oyster (*Crassostrea gigas*) in Ofunato estuary, Japan[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2001, 58: 435–444.
- [8] Pratihary A K, Naqvi S W A, Naik H, et al. Benthic fluxes in a tropical estuary and their role in the ecosystem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 85, 387–398.
- [9] Krom M D, Berner R A. Adsorption of phosphate in anoxic marine sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25: 797–806.
- [10] 安徽省农业厅. 安徽省志·农业志 [M]. 北京: 方志出版社, 1998: 298–299.
- Department of Agriculture of Anhui Province. Records of the Anhui Province agriculture[M]. Beijing: Fangzhi Press, 1998: 298–299.
- [11] 谢平. 浅水湖泊内源磷负荷季节变化的生物驱动机制[J]. 中国科学D辑, 2005, 35(增刊II): 11–23.
- XIE Ping. Biological driving mechanism for the seasonal variations of internal phosphorus loads in shallow lakes[J]. *Science in China Series D*, 2005, 35(Suppl II): 11–23.