

太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析

姜霞¹, 王秋娟^{1,2}, 王书航¹, 金相灿¹, 李永峰²

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要:通过 90 组吸附/解吸实验研究了太湖沉积物氮、磷的吸附/解吸等温线特征, 同时将平衡点浓度、本底吸附量、吸附效率与间隙水、沉积物中各形态氮、磷进行相关性分析, 以期对太湖沉积物的“源”、“汇”情况进行分析. 结果表明, 在供试的浓度范围内, 沉积物氮磷的吸附/解吸等温线呈显著线性关系, 全湖氮的平均吸附/解吸平衡点浓度为 1.10 mg/L; 磷的平均吸附/解吸平衡点浓度为 0.11 mg/L. 平均沉积物本底吸附态氮为 23.55 mg/kg、平均本底吸附态磷为 11.72 mg/kg, 在污染较严重的地区沉积物的本底吸附态氮磷值较大; 沉积物对氮的平均吸附效率为 23.14 L/kg, 对磷的平均吸附效率为 102.09 L/kg. 氮、磷吸附/解吸平衡点浓度均与间隙水、沉积物中氨氮和无机磷表现出明显的相关性. 通过吸附/解吸平衡点的分析发现: 从总体上看, 太湖沉积物是上覆水体营养盐的“源”.

关键词:太湖; 氮; 磷; 吸附/解吸; 吸附速率

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1285-07

Characteristic Analysis of the Adsorption/Desorption of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments of Taihu Lake

JIANG Xia¹, WANG Qiu-juan^{1,2}, WANG Shu-hang¹, JIN Xiang-can¹, LI Yong-feng²

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The adsorption isotherms curves of 90 samples were studied in Taihu Lake through the experiment of adsorption/desorption. And the relation between the equilibrium concentrations, NAP, adsorption efficiency and corresponding parameter in interstitial water and sediment has been analyzed, in order to analyze the “source” and “collection” of Taihu. The results showed that the isotherms curves of nitrogen and phosphorus in the sediment had significant correlations in the range of the concentrations of experiment. The average equilibrium concentrations of nitrogen and phosphorus are 1.10 mg/L and 0.11 mg/L respectively. The average of NAP of nitrogen and phosphorus are 23.55 mg/kg and 11.72 mg/kg respectively. The NAP of nitrogen and phosphorus are higher in the area of serious pollution. The average adsorption efficiency of nitrogen and phosphorus are 23.14 L/kg and 102.09 L/kg respectively. Significant correlations were found between the equilibrium concentrations of adsorption/desorption of nitrogen and phosphorus and corresponding parameter in interstitial water or sediment. Overall the sediment is the “source” of the nitrogen and phosphorus.

Key words: Taihu Lake; nitrogen; phosphorus; adsorption/desorption; adsorption efficiency

湖泊富营养化是我国湖泊、水库面临的重大环境问题. 上覆水体中的氮磷过量就会使湖泊中的藻类大量繁殖导致湖泊富营养化. 输入湖泊水体的营养性污染物一部分会经过物理、化学和生物过程累积在沉积物中成为湖泊氮、磷内负荷的源^[1-3]. 同时, 污染物在沉积物和间隙水之间进行着不间断的平衡交换, 当上覆水体中氮磷含量较低时, 沉积物中的营养物质又会通过吸附/解吸重新释放到水相中, 成为引起湖泊富营养化的内源^[4-8]. 研究表明: 沉积物中氮磷等营养物质释放对太湖的富营养化起到不可忽视的作用, 其中总磷 (TP) 污染负荷达到 48.36%, 总氮 (TN) 的污染负荷达到 26.59%^[9]. 因此沉积物中氮磷的吸附/解吸的研究对于湖泊富营养化的研究具有重要意义.

目前对沉积物吸附/解吸方面的研究主要集中

在吸附动力学、线性拟合、吸附等温线及其沉积物吸附/解吸的影响因素等方面^[10-14], 但对湖泊进行系统综合采样, 用于全面了解氮磷吸附/解吸平衡点并将其与上覆水中氮磷浓度相联系的研究还较少. 本研究通过对太湖的大量样品的吸附/解吸实验来确定太湖各湖区沉积物的“源”“汇”状况, 并对沉积物氮磷吸附/解吸平衡点浓度与其它相应指标进行相关性分析, 以期为我国湖泊沉积物环境质量基准以及底泥疏浚深度的确定提供数据支撑.

收稿日期: 2010-05-27; 修订日期: 2010-10-09

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07101-010); 国家自然科学基金项目 (21077097)

作者简介: 姜霞 (1974~), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为湖泊水环境, E-mail: jiangxia@craes.org.cn

1 材料与方 法

1.1 研究区域

太湖位于长江三角洲南缘, $30^{\circ}55'42'' \sim 31^{\circ}33'50''N$ 、 $119^{\circ}53'45'' \sim 120^{\circ}36'15''E$ 之间, 全湖水面面积 $2\,338\text{ km}^2$, 是我国第三大淡水湖, 属典型的大型浅水湖泊。

1.2 样品的采集和预处理

用柱状采样器 (BEEKER, Eijkelkamp, NL, $\phi = 12\text{ cm}$) 于 2009 年 10 月分别在太湖采集上覆水和表层 10 cm 的沉积物样品, 共 90 个, 样品用冷冻保温箱运回实验室。所有采样点点位采用 GPS 进行定位, 具体位置见图 1。水样采集后 24 h 内测定氨氮 (NH_4^+-N) 和溶解性无机磷 (DIP)。取 250 g 新鲜沉积物样品于 $10\,000\text{ r/min}$ 离心 10 min 获得间隙水, 过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 混合纤维滤膜, 滤液 4°C 冷藏保存, 待测。另取 10 g 新鲜沉积物样品测定含水率。沉积物经冷冻干燥、研磨、过 100 目筛后保存于封口袋中备用。

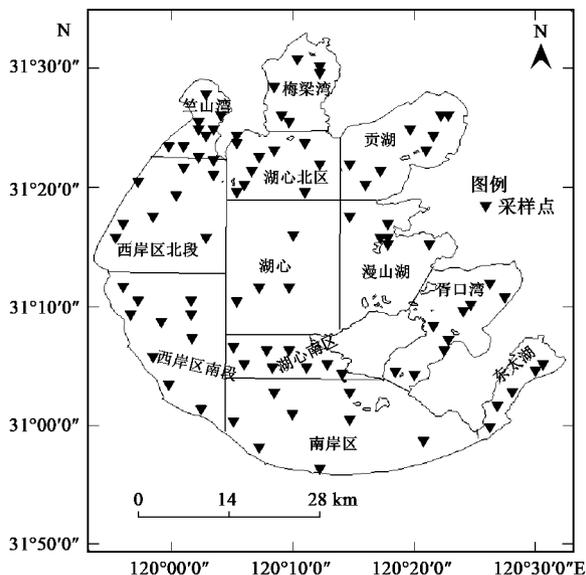


图 1 太湖采样点示意

Fig. 1 Map of Taihu Lake showing the sampling stations

1.3 测定方法

1.3.1 氮的吸附热力学实验

用氯化铵分别配置氮的浓度梯度: 0.00 、 0.15 、 0.20 、 1.00 、 1.50 、 2.00 、 4.00 、 8.00 mg/L 。按水土质量比 $100:1$ 加入沉积物 and 不同浓度的含氮溶液。 25°C 下振荡 2 h , 离心 ($5\,000\text{ r/min}$, 5 min), 取上清液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 混合纤维滤膜后测定上覆水中

NH_4^+-N 浓度。

1.3.2 磷的吸附热力学实验

用磷酸二氢钾配制磷的浓度梯度: 0.000 、 0.010 、 0.020 、 0.025 、 0.050 、 0.100 、 0.200 、 0.400 、 0.800 mg/L 。按水土质量比 $100:1$ 加入沉积物 and 不同浓度的含磷溶液。于 25°C 下振荡 48 h , 离心 ($5\,000\text{ r/min}$, 5 min), 取上清液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 混合纤维滤膜后测定上覆水中溶解性无机磷 (DIP) 浓度。

1.4 分析方法

单位质量沉积物的吸附量 $Q(\text{g/kg})$ 根据下式计算:

$$Q = (c_0 - c_e) \times V/W$$

式中, V 为加入样品中的溶液体积 (L); W 为沉积物干样的重量 (g); c_0 为原溶液中氮磷浓度 (mg/L); c_e 为实验结束后溶液中氮磷浓度 (mg/L)。利用回归法即可计算出吸附/解吸平衡浓度 [沉积物对氮或磷的吸附量为 $0(\text{g/kg})$ 时, 溶液中 NH_4^+-N 或 DIP 的浓度, 分别用 EC_0 和 EPC_0 表示]。

当溶液浓度较低时^[15]:

$$Q = m \times c_e - \text{NAP}$$

式中, Q 为吸附量 (mg/kg); c_e 为平衡质量浓度 (mg/L), NAP 为沉积物本底吸附态氮磷 (mg/kg), m 为斜率 (L/kg), 可用来衡量沉积物对氮磷的吸附效率。

上覆水和间隙水中 NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法, DIP 采用磷钼蓝比色法测定^[16], 所有样品分析均做 3 次重复, 实验结果均以 3 次样品的平均值表示 (3 次分析结果的误差范围 $<5\%$), 实验数据采用 Excel 2007、SPSS 16.0 以及 ArcGIS 软件进行统计检验、多元回归和插图制作。

2 结果与分析

2.1 沉积物中氨氮的吸附/解吸

沉积物中的有机氮可通过矿化作用分解为 NH_4^+-N , 再通过交换作用进入水体即沉积物作为上覆水氮的“源”; 上覆水中的 NH_4^+-N 也可反向进入沉积物, 在沉积物中积累, 即沉积物作为上覆水氮的“汇”。在这种交换过程中氮主要以 NH_4^+-N 的形式存在^[17]。

各个湖区表层沉积物对氮的吸附量与初始溶液浓度 (c_0) 进行线性回归, 见图 2。 c_0 与实验所得到的吸附量呈很好的线性关系, 与 Rysgaard、翟丽华等^[18,19] 的研究结果一致。在水体的初始氮浓度较低时, 沉积物无一例外地表现出解吸氮; 随着溶液浓度的增加, 沉积物逐渐对上覆水中 NH_4^+-N 进行吸

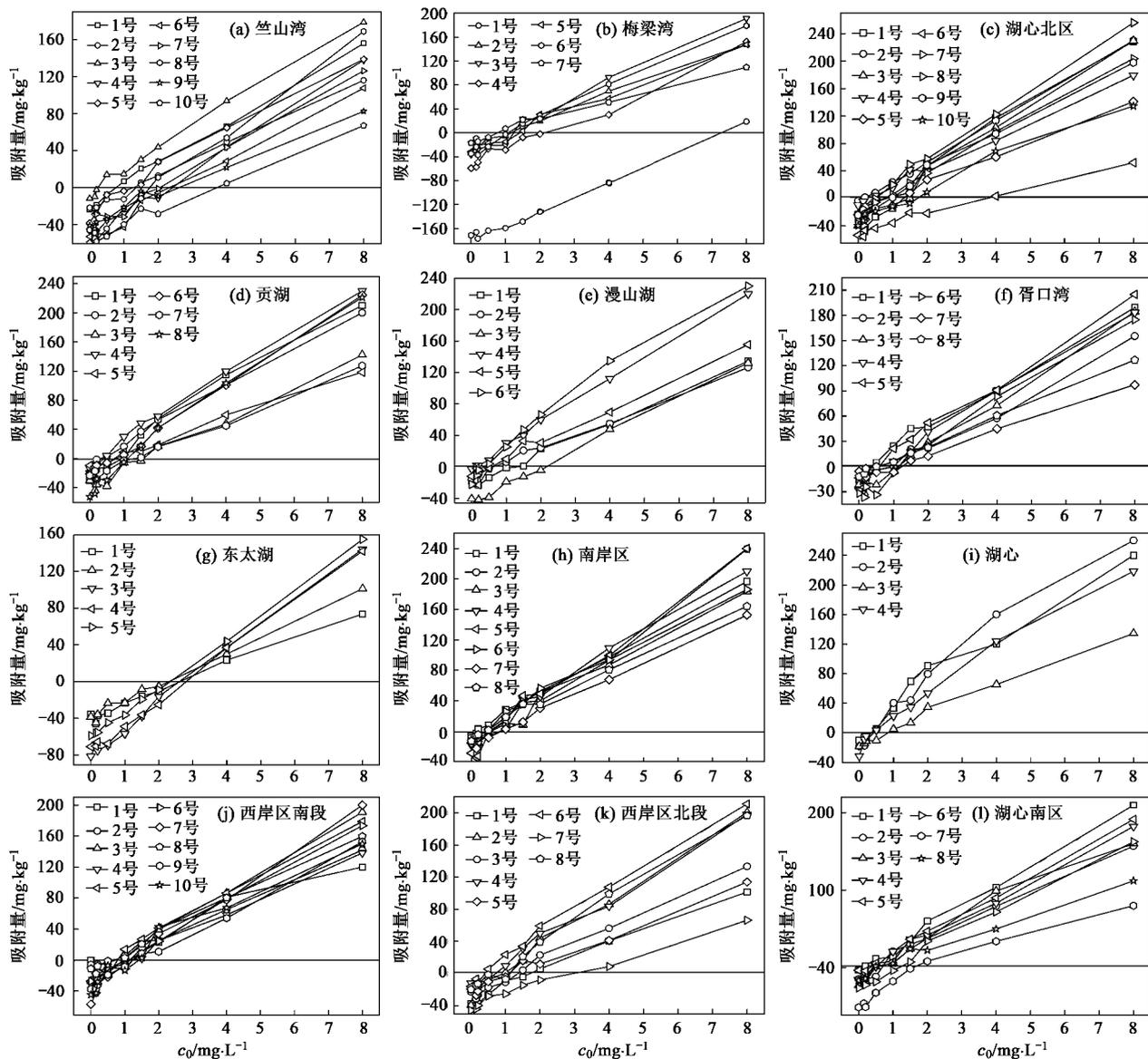


图2 太湖表层沉积物对氮的等温吸附曲线

Fig. 2 Adsorption isotherms curves of the surface sediments nitrogen in Taihu Lake

附.从图2可以看出各个湖区的沉积物对 NH_4^+-N 都有较强的吸附能力.

通过吸附等温方程求得氨氮的平衡浓度(EC_0),本实验中得到的各湖区最大、最小和平均 EC_0 见表1.太湖沉积物 EC_0 变化较大,最小是 0.04 mg/L ,出现在西岸区北段;最大值 7.34 mg/L ,出现在东太湖,这主要是因为沉积物TN与 EC_0 显著相关.当湖泊上覆水氮浓度 $>0.20 \text{ mg/L}$ 时,被认为是富营养化水体,除了贡湖和西岸区北段2个采样点外,其他采样点的氨氮 EC_0 浓度均大于 0.20 mg/L ,因此富营养化水体中,沉积物在与上覆水进行氮交换时仍然存在氮的释放,这与范成新等^[20]对夏季太湖沉积物释放的模拟实验结果一致.从平均值来看,

全太湖的氨氮 EC_0 远大于上覆水中氨氮的浓度,因此本实验表明,太湖沉积物在与上覆水体进行氮交换过程中,会在很长一段时间内处于“源”的角色.就各个湖区而言,受外源污染比较严重的水域,如东太湖、竺山湾、梅梁湾、西岸区南段等,由于这些湖区不断接受外界输入的有机污染颗粒物,它们在没有分解的条件下沉积在湖底,从而使这些湖区表层沉积物的氮含量较其他湖区高,导致这些湖区的氨氮 EC_0 较其他湖区高.

2.2 磷在水-沉积物系统中的吸附/解吸平衡点

在湖泊中,磷被认为是对于水体浮游藻类自然生长起限制性作用的因子之一^[21].在外源输入得到有效控制情况下,控制湖泊沉积物中磷的释放所造成

表1 太湖沉积物氨氮吸附/解吸平衡点浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Equilibrium concentrations of adsorption/desorption

of $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

湖区	最小	最大	平均	水体氨氮
竺山湾	0.56	3.67	1.79	1.20
梅梁湾	0.70	2.14	1.21	0.30
湖心北区	0.20	3.81	1.14	0.56
贡湖	0.31	1.68	0.88	0.19
漫山湖	0.05	2.08	0.77	0.09
胥口湾	0.33	1.24	0.77	0.12
东太湖	0.89	7.37	3.02	0.02
南岸区	0.07	0.82	0.59	0.07
西岸区南	0.34	1.49	1.01	0.11
西岸区北	0.04	1.97	0.87	0.13
湖心	0.28	0.75	0.46	0.33
湖心南区	0.16	1.63	0.75	0.13
全太湖	0.04	7.37	1.10	0.27

的“二次污染”是控制湖泊富营养化的有效手段。DIP 能够很快地被植物和其它水生植物吸收,因此了解 DIP 的吸附/解吸情况具有十分重要的意义^[22]。

改变溶液中磷的浓度,对各个湖区表层沉积物对磷的吸附量和初始溶液浓度进行线性回归,结果见图 3。与氨氮相似,在初始磷浓度较低时,沉积物表现出解吸磷;随着溶液浓度的增加,沉积物逐渐吸附上覆水体的磷。初始浓度(c_0)与吸附量线性关系很好。从图 3 可以看出各个湖区的沉积物对 DIP 都有较大的吸附能力。

通过吸附等温方程求得磷的 EPC_0 ,表 2 列出了本实验中得到的各湖区沉积物的最大、最小和平均 EPC_0 。如表 2 所示,各湖区 EPC_0 差别较大,最大值

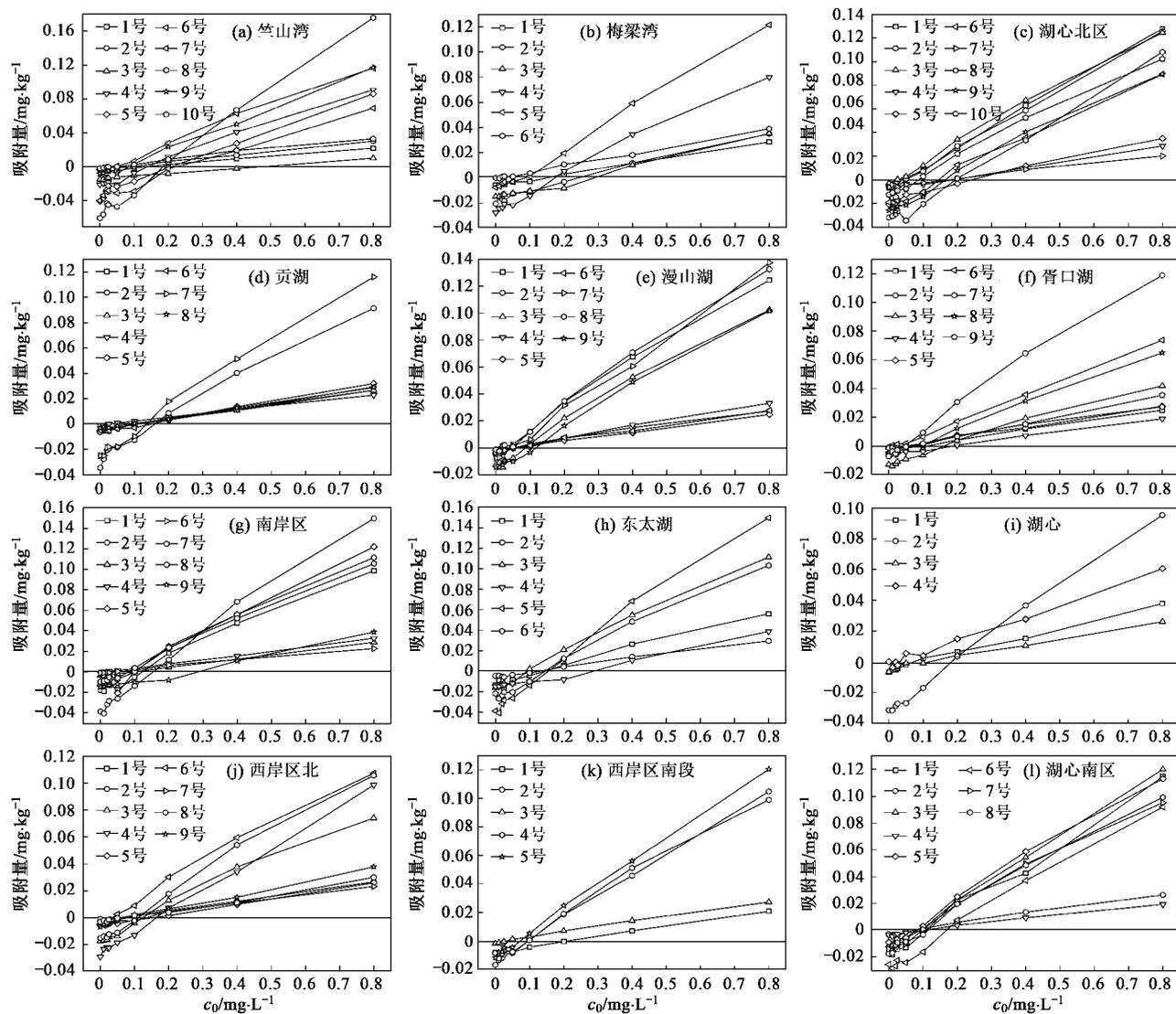


图3 太湖表层沉积物对磷的等温吸附曲线

Fig. 3 Adsorption isotherms curves of phosphate on the surface sediments from Taihu Lake

为 0.47 mg/L, 出现在竺山湾; 最小值为 0.01 mg/L, 出现在湖心北区. 从表 2 可以看出, 上覆水中 DIP 的平均浓度远小于 EPC_0 , 从全湖水平来看可以初步推断出各个湖区的沉积物都向上覆水体释放磷, 沉积物是湖泊上覆水体中磷的“源”, 与庞燕等^[23]的研究结果相同. 与氮相同, 受外源污染比较严重的水域, 如东太湖, 竺山湾、梅梁湾、西岸区南端等, 它们的 EPC_0 较高.

表 2 太湖 DIP 吸附/解吸平衡点浓度/ $mg \cdot L^{-1}$

Table 2 Equilibrium concentrations of adsorption/desorption of DIP/ $mg \cdot L^{-1}$

湖区	最小	最大	平均	水体 DIP
竺山湾	0.03	0.47	0.191	0.057
梅梁湾	0.06	0.34	0.187	0.035
湖心北区	0.01	0.26	0.126	0.012
贡湖	0.04	0.17	0.115	0.005
漫山湖	0.02	0.08	0.053	0.007
胥口湾	0.01	0.19	0.066	0.013
东太湖	0.1	0.27	0.163	0.010
南岸区	0.02	0.24	0.103	0.012
西岸区南	0.04	0.14	0.088	0.014
西岸区北	0.03	0.18	0.103	0.013
湖心	0.02	0.11	0.058	0.010
湖心南区	0.06	0.22	0.104	0.011
全太湖	0.01	0.47	0.114	0.019

3 讨论

当氨氮的 EC_0 和沉积物可交换态 NH_4^+-N ($R^2 = 0.68, p < 0.01$)、间隙水中 NH_4^+-N ($R^2 = 0.74, p < 0.01$) 均达到显著相关 ($p < 0.01$), 相关结果见图 4 (a) 和 4 (b), 沉积物中的有机氮会通过矿化作用分解成 NH_4^+-N , 通过间隙水扩散到上覆水体, 间隙水与上覆水中氮浓度的差使沉积物中的氮可向上覆水体扩散, 故间隙水、沉积物中 NH_4^+-N 与 EC_0 相关性显著.

沉积物的 EPC_0 与间隙水 DIP ($R^2 = 0.65, p < 0.01$) 显著相关, 相关结果见图 4 (c). 根据太湖的野外调查, 沉积物间隙水中的氮、磷浓度较上覆水高数十倍^[24], 从而形成了从沉积物向上覆水的浓度梯度, 促使营养盐能够向上覆水体释放; 同时 DIP 是沉积物中较为活跃的组成部分, 很容易通过间隙水进入上覆水体, 这就解释了 EPC_0 与间隙水中 DIP 显著相关的原因, 说明沉积物中的营养盐是通过间隙水进入到上覆水体, 成为上覆水体磷的营养源的一个过程.

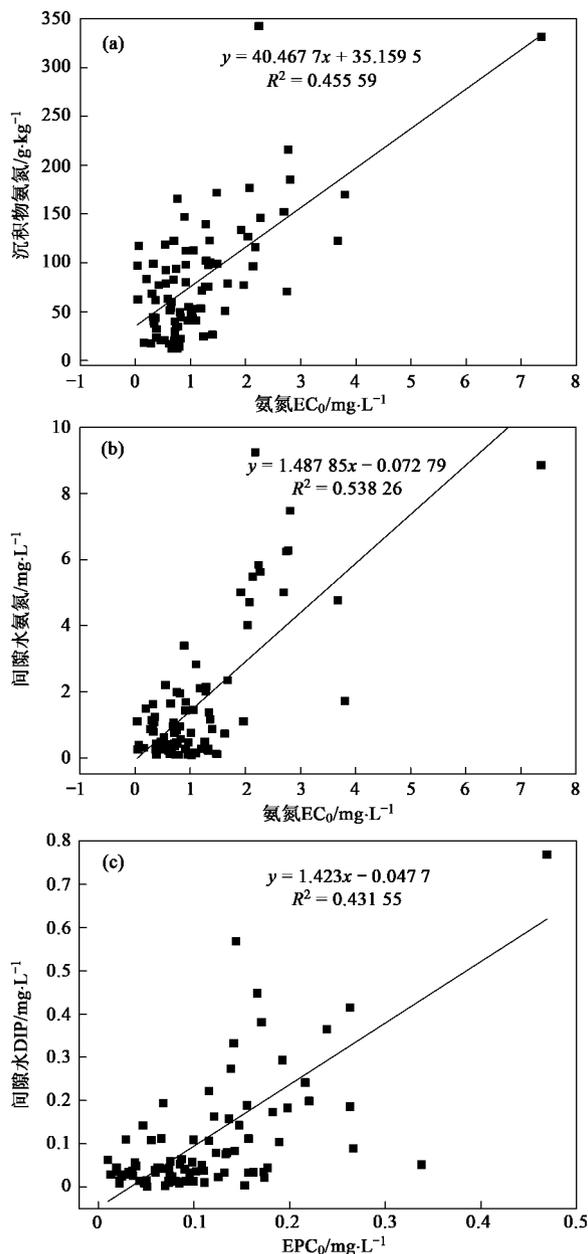


图 4 EC_0 与其他相关指标的相关性

Fig. 4 Correlation between EPC_0 and other corresponding parameters

从总体上看, 太湖沉积物是上覆水体氮磷营养盐的“源”, 也就是说沉积物自身存在的吸附态氮磷是上覆水体营养盐的一个重要来源. 通过对各个湖区的平均吸附量与吸附/解吸平衡浓度进行线性拟合, 求出其本底吸附态氮磷和吸附效率, 对其进行分析, 结果见表 3、4. 其中胥口湾的本底吸附氮量最小, 为 7.17 mg/kg, 东太湖最大, 为 58.51 mg/kg, 全湖平均本底吸附氮量为 23.55 mg/kg; 胥口湾对磷的本底吸附量最小为 4.99 mg/kg, 而东太湖最大, 为 18.70 mg/kg, 全湖平均本底吸附磷量为 11.72

mg/kg,并且几乎所有受外源污染较严重的湖区如:竺山湾、梅梁湾、东太湖等均表现出较高的本底吸附态氮磷量,可能是由于这些外源污染物在进入水体后不及降解而直接累积到沉积物中,从而使沉积

物保持较高的本底吸附态氮磷,从而使其成为上覆水体氮磷的“源”.相反,如湖心和湖心南区等远离外源性污染物输入的清洁湖区,其本底吸附态氮磷值较小.

表 3 太湖各湖区氮磷吸附等温方程¹⁾

Table 3 Adsorption isotherms linear equations of phosphate and nitrogen

湖区	氮的吸附等温方程	R^2	磷的吸附等温方程	R^2
竺山湾	$y = 2.96x - 38.02$	0.997 4	$y = 118.49x - 18.65$	0.996 7
梅梁湾	$y = 23.93x - 28.83$	0.996 2	$y = 87.32x - 12.67$	0.998 1
湖心北区	$y = 26.56x - 26.00$	0.997 4	$y = 126.2x - 14.52$	0.998 0
贡湖	$y = 26.07x - 21.74$	0.996 8	$y = 71.35x - 9.43$	0.997 4
漫山湖	$y = 23.10x - 17.15$	0.994 5	$y = 108.13x - 5.94$	0.997 4
胥口湾	$y = 9.37x - 7.17$	0.996 8	$y = 67.569x - 4.993$	0.996 6
东太湖	$y = 22.36x - 58.51$	0.999 5	$y = 128.07x - 18.70$	0.997 3
南岸区	$y = 25.61x - 13.18$	0.996 3	$y = 116.37x - 12.65$	0.996 3
西岸区南段	$y = 624.74x - 25.85$	0.996 0	$y = 106.40x - 9.49$	0.998 1
西岸区北段	$y = 24.2x - 21.34$	0.997 1	$y = 86.96x - 9.47$	0.993 9
湖心	$y = 23.70x - 7.85$	0.987 4	$y = 82.97x - 10.91$	0.998 9
湖心南区	$y = 23.12x - 16.93$	0.988 7	$y = 125.20x - 13.28$	0.995 7
全太湖	$y = 23.14x - 23.55$	0.996 3	$y = 102.09x - 11.72$	0.997 8

1) y 为平均吸附量, g/kg; x 为初始溶液浓度, mg/L

表 4 沉积物本底吸附态磷、吸附效率与其他指标的相关关系¹⁾

Table 4 Correlation between NAP, efficiency of adsorption and other parameters

	氮 EPC_0	磷 EPC_0	氮 NAP	磷 NAP	氮吸附效率	磷吸附效率	TN	$NH_4^+ - N$	TP
氮 EC_0	1	0.35	0.90 **	0.62 *	-0.27	0.36	0.96 **	0.98 **	0.69 **
磷 EPC_0		1	0.35	0.61 *	-0.25	0.24	0.15	0.28	0.37
氮 NAP			1	0.59 *	0.11	0.23	0.84 **	0.92 **	0.72 **
磷 NAP				1	-0.08	0.61 *	0.48	0.58 *	0.53
氮吸附效率					1	-0.40	-0.23	-0.13	-0.24
磷吸附效率						1	0.26	0.38	0.50
TN							1	0.95 **	0.61 *
$NH_4^+ - N$								1	0.66 *
TP									1

1) * 表示显著相关($p < 0.05$); ** 表示极显著相关($p < 0.01$)

为了深入探讨沉积物氮、磷的吸附/解吸特征,对其 EC_0 、本底吸附量、吸附效率、沉积物 TN、TP 和氨氮进行了相关性分析,结果见表 4. 从表 4 中可以看出,表征氮吸附能力的氮吸附效率与其他指标都没有相关性,说明沉积物对上覆水体中氮的吸附效率不受沉积物中营养盐含量的影响. 沉积物中氮的 NAP 与各个指标相关性显著,即污染程度越高,本底吸附态氮的含量也越高;而磷的 NAP 没有明显的相关性,这与 Lijklema^[25]的研究结果不一致,可能磷的本底吸附态磷除受沉积物中 TN、TP 影响外还受有机质、CEC、粒度等物理因素的影响. 氮磷的吸附/解吸平衡浓度与各自的 NAP 显著相关,可见沉积物自身的内源性氮磷是决定氮磷吸附/解吸平衡浓度的一个重要因素.

水体的富营养化水平很大程度上是由于底泥向水体释放营养元素氮、磷所致^[26]. 研究发现,磷在沉积物上的吸附等温线是穿过浓度坐标而不是通过原点的“交叉式”的^[27],由此可以看出沉积物既可从上覆水中吸附磷也可向上覆水释磷. 这种“源”、“汇”的角色可通过磷的 EPC_0 来判别. 在对磷的 EPC_0 与上覆水中 DIP 的对比中发现,整个太湖在 10 月总体上处于“源”的角色. 氮也具有同样的特性,总体上太湖沉积物氮也向上覆水体释放. 这与金相灿等研究的梅梁湾地区沉积物在秋季以释放为主相同^[28].

太湖沉积物对氮的平均吸附效率为 23.14 L/kg,湖心对氮的吸附效率最大为 27.70 L/kg,胥口湾区的吸附效率最低为 9.37 L/kg,说明太湖各个湖区对氮的吸附能力差别不大. 对于磷来说,太湖沉积

物的平均吸附效率为 102.09 L/kg,东太湖的吸附效率最大为 128.11 L/kg,胥口湾最小为 67.57 L/kg,可以看出各湖区对磷的吸附能力差别很大。

4 结论

(1)在低浓度梯度区间内,沉积物氮磷的吸附/解吸等温线呈很好的线性关系.全湖氨氮的 EC_0 平均为 1.10 mg/L;磷的平均 EPC_0 为 0.12 mg/L.总体上看,太湖沉积物是上覆水体营养盐的“源”。

(2)氮吸附/解吸平衡点浓度与本底吸附态氮、间隙水氨氮、总氮、沉积物中 TN 和氨氮呈极显著相关,表明氮的 EC_0 受间隙水和沉积物中氮的影响较大;磷吸附/解吸平衡点浓度与间隙水 DIP、TP 和沉积物中 TP 呈极显著相关表明磷的 EPC_0 受间隙水和沉积物中 TP 的影响较大。

(3)太湖沉积物本底吸附态氮平均为 23.55 mg/kg、本底吸附态磷为 11.53 mg/kg;对氮的平均吸附效率为 23.14 L/kg,对磷的平均吸附效率为 100.26 L/kg。

参考文献:

- [1] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1990.10-15.
- [2] 王超,邹丽敏,王沛芳,等.典型城市浅水湖泊沉积物磷形态的分布及与富营养化的关系[J].环境科学,2008,29(5):1303-1307.
- [3] 张运林,秦伯强.太湖水体富营养化的演变及研究进展[J].上海环境科学,2001,20(6):263-304.
- [4] 王雨春,万国江,黄荣贵,等.湖泊现代化沉积物中磷的地球化学作用及环境效应[J].重庆环境科学,2000,22(4):39-42.
- [5] 李宝,丁士明,范成新,等.滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J].环境科学,2008,29(1):114-120.
- [6] 黄清辉,王子健,王东红,等.太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估[J].湖泊科学,2004,16(2):97-103.
- [7] 李江,金相灿,姜霞,等.太湖不同营养水平湖区沉积物理化性质和磷的垂向变化[J].环境科学研究,2007,20(4):64-69.
- [8] Raaphorst W V, Malshaert J F P. Ammonium adsorption in superficial north sea sediments[J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(11): 1415-1435.
- [9] 成芳,凌去非,徐海军.太湖水质现状与主要污染物分析[J].上海海洋大学学报,2010,19(1):105-110.
- [10] 李兵,袁旭音,邓旭.不同 pH 条件下太湖入湖河道沉积物磷的释放[J].生态与农村环境学报,2008,24(4):57-62.
- [11] 张路,范成新,王建军.长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系[J].湖泊科学,2008,20(3):263-270.
- [12] 蒋增杰,王光花,方建光,等.桑沟湾养殖水域表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J].环境科学,2008,29(12):3405-3409.
- [13] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. Chemosphere, 2003, 50(1): 53-61.
- [14] 王书航,姜霞,钟立香,等.巢湖沉积物不同形态氮季节性赋存特征[J].环境科学,2010,31(4):946-953.
- [15] Stumm W, Morgan J. Aquatic Chemistry [M]. New York: Wiley and Sons, 1981. 102-123.
- [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,2002.242-284.
- [17] 杨龙元,蔡启铭,秦伯强,等.太湖梅梁湾沉积物-水界面氮迁移特征初步研究[J].湖泊科学,1998,10(4):41-47.
- [18] Rysgaard S, Thastum P, Dalsgaard T, et al. Effects of salinity on NH_4^+ adsorption capacity, nitrification, and denitrification in Danish estuary sediments[J]. Estuaries, 1999, 22: 21-30.
- [19] 翟丽华,刘鸿亮,席北斗.农业源头沟渠沉积物氮磷吸附特性研究[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1359-1363.
- [20] 范成新,张路,秦伯强.太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及定量化——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):10-20.
- [21] 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.
- [22] 金相灿.沉积物污染化学[M].北京:中国环境科学出版社,1992.
- [23] 庞燕,金相灿,王圣瑞.长江中下游浅水湖沉积物对磷的吸附特征[J].环境科学研究,2004,14(增刊):18-23.
- [24] 秦伯强,胡维平,高光.太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J].科学通报,2003,48(17):1822-1831.
- [25] Lijklema L. Interaction of orthophosphate with iron III and aluminium hydroxides [J]. Environmental Science and Technology, 1980, 14: 537-541.
- [26] 徐洪斌,吕锡武,俞燕.玄武湖底泥营养物释放的模拟试验研究[J].环境化学,2003,23(2):152-156.
- [27] Barrow N J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil[J]. European Journal of Soil Science, 1983, 34(4): 733-750.
- [28] 金相灿,姜霞,王琦,等.太湖梅梁湾沉积物中磷吸附/解吸平衡特征的季节性变化[J].环境科学学报,2008,28(1):24-30.