

长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征

王圣瑞¹, 金相灿^{1*}, 赵海超², 庞燕¹, 周小宁¹, 楚建周³

(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境研究中心, 北京 100012; 2. 内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010018; 3. 河北农业大学资源与环境学院, 保定 071001)

摘要:研究了长江中下游浅水湖泊 11 个沉积物对磷的吸附等温线及其吸附动力学, 并分析了沉积物理化特征对磷吸附特征的影响. 研究发现: ①沉积物对磷酸盐的吸附主要在前 10 h 内完成, 在 0.5 h 内吸附反应十分迅速, 并逐渐达到吸附平衡; ②沉积物本底吸附态磷与其有机质、CEC、总磷、无机磷、有机磷、Fe/Al-磷和总氮显著正相关; 对磷酸盐的最大吸附量与其 CEC 和无机磷、有机质和总磷呈显著负相关; 而总最大吸附磷量与其有机质、CEC、总磷、无机磷、有机磷、Fe/Al-磷和总氮含量呈显著正相关; ③就目前长江中下游浅水湖泊的水质而言, 其沉积物存在解析; 沉积物对磷酸盐的吸附-解吸平衡浓度与其有机质、CEC、总氮、总磷以及各形态磷含量均有显著的正相关关系. 本研究条件下, 即使是污染较为严重的湖泊, 其沉积物也具有向上覆水体释磷酸盐的趋势.

关键词:沉积物; 磷酸盐; 吸附速率; 吸附量; 沉积物组成; 长江中下游; 浅水湖泊

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)03-0038-06

Phosphate Adsorption Characteristics onto the Sediments from Shallow Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

WANG Sheng-rui¹, JIN Xiang-can¹, ZHAO Hai-chao², PANG Yan¹, ZHOU Xiao-ning¹, CHU Jian-zhou³

(1. Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environment Science, Beijing 100012, China; 2. College of Agronomy, Inner Mongolia Agriculture University, Huhhot 010018, China; 3. College of Resource and Environment, Hebei Agriculture University, Baoding 071001, China)

Abstract: Adsorption isotherms and kinetics of phosphate onto the 11 sediments taken from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River were determined in laboratory, and the effect of physical and chemical properties of the sediments on its phosphate adsorption characteristics was also analyzed. The results indicate that: ① The process of phosphate adsorption onto sediments mainly occurred within 0~10 h, the maximum adsorption rates occurred within 0~0.5 h, and then attends to a dynamic equilibrium; ② Between the NAP and its organic matter, CEC, total phosphorus, inorganic phosphorus, organic phosphorus, Fe/Al-phosphorus and total nitrogen have remarkable positive correlation; between the maximum adsorption of phosphate and its CEC, inorganic phosphorus, organic matter and total phosphorus have remarkable negative correlation; between the total maximum adsorption of phosphate and its organic matter, CEC, total phosphorus, inorganic phosphorus, organic phosphorus, Fe/Al-phosphorus and total nitrogen have remarkable positive correlation; ③ As regards water quality of the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River at present, its sediment exists desorption. Between the adsorption-desorption equilibrium concentrations of phosphate onto the sediments and its organic matter, CEC, total nitrogen, the total phosphorus and the content of every form phosphorous have a remarkable positive correlation. Even the sediment from heavily polluted lake also has the tendency to release phosphate into the overlying water in this study.

Key words: sediments; phosphate; adsorption rate; adsorption capacity; sediment composition, shallow lakes; middle and lower reaches of the Yangtze River

磷作为水生生物的主要营养元素, 同时也是引起湖泊富营养化的重要因素, 对于大多数外源磷基本得到控制的湖泊来说^[1], 沉积物作为磷元素累积和再生的重要场所, 在环境条件改变的情况下, 可通过各种复杂的过程释放到上覆水中^[2]. 其中沉积物对磷的吸附是影响沉积物-水界面磷交换非常重要的过程^[3,4]. 沉积物对磷的吸附与其组成之间存在一定的内在联系. 研究表明, 沉积物对磷的吸附受铁氧化物的影响显著^[5], 另有研究发现有机分子能够

与铁铝等金属离子发生络合, 进而能够加强沉积物对磷的吸附^[6], 也有研究发现沉积物中有机碳和碳酸钙含量对磷的吸附也有重要影响. 长江中下游地区是目前我国浅水湖泊最集中的区域. 伴随着近 20 年来的经济发展, 湖泊水环境日趋恶化, 不少湖泊富

收稿日期: 2004-06-20; 修订日期: 2004-08-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412304)

作者简介: 王圣瑞(1972~), 男, 内蒙古人, 博士, 主要从事湖泊富营养化研究. E-mail: shengruiwang@sohu.com.

* 通讯联系人: E-mail: Jinxiang@public.bta.net.cn

营养化形势严峻,水质性缺水在很多地区已经严重制约了地方经济的可持续发展^[7],成为我国突出的湖泊富营养化灾变区域.近年来,虽然针对沉积物对磷的吸附,国内外已有一些研究^[8-10],但关于沉积物对磷的吸附特征以及与其组成之间关系的报道并不多见.基于此,本文研究了长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征,并分析了与其组成间关系.

1 材料与方法

1.1 样品采集

在长江中下游湖区利用柱装采样器采集表层10cm的沉积物样品,共11个.其中在太湖采集3个,编号为TG、TC和TW,在巢湖采集2个,品编号为CS和CH,在洪泽湖采集一个,编号为H,在玄武湖采集1个,编号为X,在月湖采集一个,编号为Y,在鄱阳湖采集3个,编号为B1、B2和B3.所采沉积物样品回实验室冷冻干燥后,分别测定有机质总量、阳离子代换量、总氮、总磷以及各形态磷含量,沉积物粒径组成以及化学组成.

1.2 实验方法

(1) 吸附动力学实验 在500 mL的三角瓶中,加250 mL 1.0 mg·L⁻¹的磷溶液,加2g沉积物干样,在25℃±1℃下,恒温振荡,每隔一定时间采取水样,每次取10 mL,5 000r/min离心10 min,过0.45 μm微孔滤膜,采用标准方法测定磷酸盐含量^[11].根据吸附前后的浓度差计算吸附量.以上实验在相同的条件下作3个平行,相对误差<5%.

(2) 吸附等温线实验 分别在一系列100 mL离心管中,加入0.5 g沉积物和50 mL不同浓度的磷酸二氢钾溶液,初始磷浓度分别为0 mg·L⁻¹,0.02 mg·L⁻¹,0.05 mg·L⁻¹,0.1 mg·L⁻¹,0.2 mg·L⁻¹,0.3 mg·L⁻¹,0.4 mg·L⁻¹和0.5 mg·L⁻¹的磷酸二氢钾溶液.离心管加塞后在25℃±1℃下,恒温振荡至吸附平衡,离心,采用标准方法^[11],取上清液测定磷酸盐浓度(平衡浓度).根据起始浓度与平衡浓度之差,扣除空白,计算沉积物吸附磷酸盐的量.以上实验在相同的条件下作3个平行,相对误差<5%.

1.3 分析方法

沉积物化学成分用电感耦合等离子体发射光谱仪(PE, USA, ICP/6500)测定.沉积物的粒径分析采用激光粒度分析仪(Malvern Co., UK).该仪器分析范围为0.02 μm~2 000 μm.激光的波长是750 nm,精度≤1%,平均测样时间5~7 min.把干样品放在烧杯中,加水20~50 mL,用手摇晃烧杯,使样品均匀散开,上机测试.沉积物有机质总量用经典的重铬酸钾法^[12],阳离子代换量用EDTA-铵盐快速法测定^[12],总氮采用硫酸铜消解法^[12],总磷及磷形态用SMT法测定^[13].实验所用器皿均用稀硝酸浸泡过夜,所用药品均为分析纯.

2 结果分析

2.1 沉积物吸附磷动力学

图1显示了沉积物对溶液中磷吸附的动力学过程.由图1可见,长江中下游浅水湖泊表层沉积物对磷的吸附具有相似的变化趋势,基本上是在前10 h内,沉积物对磷的吸附具有较大吸附速度,而在10 h之后沉积物对磷的吸附基本达到平衡,这与Lopez等和刘敏等的研究结果一致^[4].根据沉积物对磷吸附的动力学实验结果,可以得出本研究条件下,11个沉积物对磷吸附的最大吸附量,即达到吸附平衡时的吸附量,结果见表1.

本研究条件下11个沉积物对磷的最大吸附量

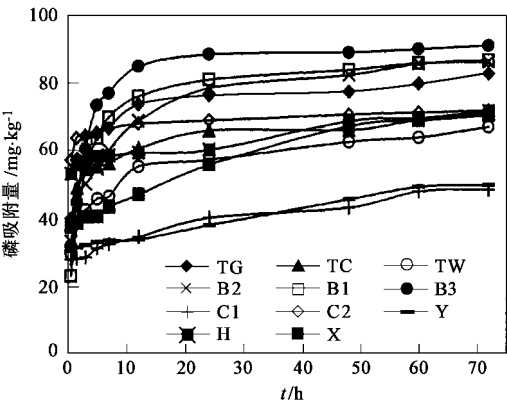


图1 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷酸盐吸附动力学曲线
Fig.1 The phosphate adsorption kinetic curve on the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

表1 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的最大吸附量

参数	TG	TC	B1	B2	B3	C1	C2	Y	H	X	TW
$Q_{\max}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	82.43	70.40	85.94	86.43	90.78	48.09	71.41	49.49	71.24	69.96	66.59

受沉积物理化参数的影响,其中与有机质、CEC、总磷和无机磷含量呈显著的负相关关系.相对而言,与

CEC和无机磷的相关关系最为密切,而与有机质和总磷含量的相关关系其次,结果见表2.可能的原因

是随着沉积物有机质、CEC、总磷和无机磷的增加,沉积物对磷的吸附效率降低,而促进了其对磷的释放^[14]。其中无机磷的相关关系较为密切,可能的原因是无机磷是沉积物磷组成中非常活跃的部分,非常容易释放而进入水体,而沉积物对磷的吸附又存在饱和现象,本身磷含量高的沉积物对外来磷的吸附量较低;而与 CEC 的相关关系最为密切的原因,由于没有相关的报道,是一种单纯的数学关系,还是另有原因,需要进一步研究来证实。因此,在本研究条件下,长江中下游湖泊表层沉积物对磷的最大吸附量很可能主要受其 CEC 和无机磷含量控制,同时有机质和总磷含量也显著影响沉积物对磷的最大吸附量。沉积物对磷的吸附是十分复杂的动力学过程,通常包括快吸附和慢吸附 2 个过程。本实验结果表明(图 2),快吸附主要发生在前 10h,而在 10h 之后,进入了慢吸附过程,并逐渐进入吸附平衡。为了反映沉积物对磷的吸附,引入吸附速度的概念^[4],即单位时间内,单位质量沉积物吸附磷的量。表 3 列出了

表 3 不同取样时间段内长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附速度 / $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$

Table 3 The adsorption rates of phosphate on sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River at different sampling intervals/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$

采样点	取样时间段/h									
	0 ~ 0.5	0.5 ~ 1.5	1.5 ~ 3	3 ~ 5	5 ~ 7	7 ~ 2	12 ~ 24	24 ~ 48	48 ~ 60	60 ~ 72
TG	80.18	17.28	4.57	0.44	0.63	1.41	0.23	0.04	0.20	0.01
TC	77.18	10.50	3.52	0.41	0.50	0.83	0.44	0.00	0.25	0.03
BI	59.17	12.46	2.94	2.20	2.69	1.72	0.82	0.16	0.28	0.03
B2	66.44	15.66	10.71	4.33	3.06	1.24	0.41	0.12	0.17	0.02
B3	46.17	12.74	10.39	6.44	1.77	1.60	0.29	0.02	0.09	0.01
CI	64.05	0.11	0.33	0.47	1.47	0.41	0.47	0.12	0.39	0.03
C2	116.06	6.50	0.33	0.25	0.88	0.27	0.07	0.07	0.05	0.02
Y	114.18	0.94	0.46	0.44	0.28	0.04	0.06	0.45	0.30	0.04
H	61.17	2.50	0.74	0.81	0.02	0.15	0.07	0.35	0.08	0.02
X	106.18	1.42	1.00	0.04	1.46	0.69	0.72	0.47	0.14	0.02
TW	75.18	11.00	1.33	1.59	0.36	1.72	0.17	0.21	0.10	0.01

2.2 沉积物对磷的吸附/解吸平衡浓度

改变溶液的磷浓度,湖泊表层沉积物对磷的等温吸附曲线结果见图 2。11 个沉积物无一例外地存在解吸。在初始磷浓度较低的情况下,存在解吸现象,随着磷浓度的增加逐渐进入吸附区。沉积物吸附实验中测得的磷吸附量实际上仅是表观吸附量,应包括原先结合在沉积物上的可以解吸的磷和真正在吸附实验中被吸附的磷^[15]。本研究条件下,沉积物对磷的吸附存在解吸。当沉积物对磷的解吸量等于吸附实验中被吸附的磷量时,沉积物对磷的表观吸附量为 0,此时溶液的磷浓度为吸附-解吸平衡浓度^[16]。并根据吸附等温线方程计算沉积物对磷的吸附-解吸平衡浓度,结果见表 4。11 个沉积物对磷的吸

不同取样时间段,不同沉积物吸附磷的速率。其中 0 ~ 0.5 h 之内的吸附速率均最大,达到 $46.17 \sim 116.06 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$,是以后各时间段的 10 倍到百倍,反映沉积物对磷的吸附主要发生在 0 ~ 0.5 h 之内。

表 2 长江中下游浅水湖泊沉积物最大吸附量与其物理化学参数相关关系

Table 2 Coefficients of correlation between the adsorption capacity and chemical physical parameters of the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

沉积物物理化学参数	方程 ($n = 11$)	R^2
有机质含量	$y = - 0.18 x + 15.41$	0.6226 *
CEC	$y = - 0.48 x + 48.92$	0.8682 **
总磷含量	$y = - 26.45 x + 2505.10$	0.6751 *
无机磷含量	$y = - 19.53 x + 1820.00$	0.7358 **
有机磷含量	$y = - 6.23 x + 601.26$	0.5445
Fe/Al-磷	$y = - 8.16 x + 792.58$	0.4791
Ca-磷	$y = - 0.06 x + 85.41$	0.5746
总氮含量	$y = - 88.95 x + 7851.10$	0.5717

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$, 以下相同

附-解吸平衡浓度最小值为 $0.012 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最大值达到 $0.416 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而实际我国长江中下游浅水湖泊上覆水中的磷浓度还没有达到 $0.416 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[17]。所以我国长江中下游浅水湖泊沉积物在与其上覆水体的磷交换过程中存在解吸现象,即使是严重污染的湖泊,沉积物也有向上覆水释放磷的趋势。

吸附-解吸平衡浓度与沉积物有机质、CEC、总氮、总磷以及各形态磷含量间的关系回归分析结果见表 5。沉积物对磷的吸附-解吸平衡浓度与沉积物的有机质、CEC、总氮、总磷以及各形态磷含量均有显著的正相关关系,均达到了显著水平。吸附-解吸平衡浓度与总磷和无机磷含量的相关性最高,其次为与铁、铝磷和有机磷含量,与钙磷含量的相关性较差。

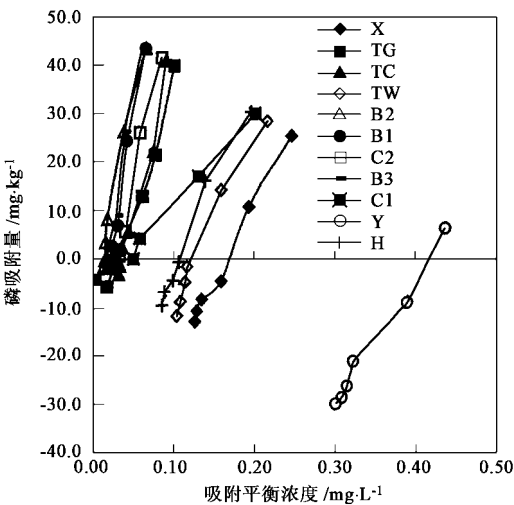


图 2 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷等温吸附曲线
Fig.2 The adsorption isotherms of phosphate on the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

表 4 长江中下游浅水湖泊沉积物吸附磷的等温线方程及吸附-解吸平衡浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 The phosphate adsorption linear equations and its adsorption-desorption equilibrium concentrations on sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

采样点	吸附等温线方程	吸附解吸平衡浓度	R^2
TG	$y = 523.56x - 16.16$	0.031	0.9782**
TC	$y = 689.08x - 24.76$	0.038	0.9738**
BI	$y = 861.34x - 10.71$	0.012	0.9707**
B2	$y = 1031.4x - 22.81$	0.022	0.9865**
B3	$y = 1032.9x - 18.03$	0.017	0.9794**
C1	$y = 182.59x - 6.98$	0.022	0.9910**
C2	$y = 712.12x - 19.18$	0.027	0.9663**
Y	$y = 258.62x - 107.66$	0.416	0.9855**
H	$y = 367.74x - 39.63$	0.083	0.9751**
X	$y = 317.31x - 52.35$	0.122	0.9885**
TW	$y = 350.04x - 45.13$	0.129	0.9685**

表 6 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的线性等温吸附曲线方程参数

Table 6 The parameters of the phosphate adsorption isotherms by linear equation on the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

参数	TG	TC	BI	B2	B3	C1	C2	Y	H	X	TW
$m / \text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$	523.56	655.00	861.34	1031.40	1032.90	782.59	712.12	258.62	480.00	428.00	350.04
$\text{NAP} / \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16.16	24.76	10.71	22.81	18.03	16.98	19.19	107.66	39.62	52.35	45.13
R^2	0.9782	0.9738	0.9707	0.9865	0.9794	0.991	0.9663	0.9855	0.9751	0.9885	0.9685

趋势为,污染程度越高,其本底吸附态磷的含量也越高。

沉积物对磷的吸附由 2 部分组成;①沉积物本身吸附的磷,即本底吸附态磷.在低浓度条件下,可由线性吸附等温线求得(如前文所述);②沉积物从溶液中吸附的磷,即通常情况下所讲的沉积物吸附磷量.为了从整体上理解沉积物对磷的吸附,本研究

表 5 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附/解吸平衡浓度与其物理化学参数相关关系

Table 5 Coefficients of correlation between the phosphate adsorption-desorption equilibrium concentrations and the chemical and physical parameters of the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

沉积物物理化学参数	方程($n = 11$)	R^2
有机质	$y = 24.71x + 0.55$	0.9345**
CEC	$y = 54.81x + 9.62$	0.8115**
总磷	$y = 3457.30x + 306.91$	0.8914**
无机磷	$y = 2475.20x + 203.85$	0.9016**
有机磷	$y = 866.54x + 79.01$	0.8437**
Fe/Al-磷	$y = 1215.70x + 101.90$	0.8217**
Ca-磷	$y = 1250.30x + 105.25$	0.7715**
总氮	$y = 12107.00x + 420.00$	0.8188**

2.3 沉积物吸附磷等温线

所研究的 11 个沉积物在本研究条件下对磷的吸附符合线性方程:

$Q = m \times c - \text{NAP}^{[18]}$,其中 $c(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 为吸附平衡浓度, $\text{NAP}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ 为沉积物本底吸附态磷, $m(\text{L}\cdot\text{kg}^{-1})$ 为斜率,可用来衡量沉积物对磷的吸附效率^[4].浅水湖泊表层沉积物对磷吸附等温线线性方程特征参数结果见表 6.

沉积物的本底吸附态磷与沉积物本身的物理化学参数有关^[19].本研究中长江中下游湖泊表层沉积物的本底吸附态磷与其有机质、CEC、总磷、无机磷、有机磷、Fe/Al-磷和总氮的相关关系均达到极显著水平,相关分析结果见表 7.其中与有机质、无机磷和总磷的相关关系最为密切,与 CEC、有机磷、Fe/Al-磷和总氮的相关关系其次.而沉积物的有机质、CEC、总磷、无机磷、有机磷、Fe/Al-磷和总氮等指标均为指示其污染程度的指标.所以研究浅水湖泊表层沉积物的本底吸附态磷与其污染程度有关,总的

引入了沉积物总吸附磷量的概念.即沉积物总吸附磷量($TQ = Q + \text{NAP}$)为沉积物本底吸附态磷量(NAP)和沉积物从溶液中吸附磷量(Q)的和.与之相关的,沉积物总最大吸附磷量(TQ_{max})即为其本底吸附态磷量(NAP)和沉积物对磷的最大吸附量(Q_{max})的和.本研究中 11 个沉积物对磷的最大吸附量、本底吸附态磷量和总最大吸附磷量结果见表 8.

通过分析可知,在本研究条件下沉积物的本底吸附态磷与其总最大吸附磷量有显著的正相关关系,而与最大吸附磷量有显著的负相关关系,结果见图 3、4,但最大吸附磷量和总最大吸附磷量之间却没有相关关系.所以,为全面了解沉积物对磷的吸附,不仅需要分析其对磷的最大吸附量,同时也要分析其本底吸附态磷和总最大吸附磷量.

表 2 可见,沉积物对磷的最大吸附量受沉积物理化参数的影响,与其有机质、CEC、总磷和无机磷含量呈显著负相关关系.而在引入沉积物对磷的总最大吸附量后,通过分析发现其也受沉积物理化化学参数的影响.沉积物的有机质、CEC、总磷、无机

表 7 长江中下游浅水湖泊沉积物本底吸附态磷与其物理化学参数相关关系

Table 7 Coefficients of correlation between the NAP and the chemical-physical parameters of the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

沉积物物理化学参数	方程($n = 11$)	R^2
有机质	$y = 9.03x + 10.36$	0.9578 **
CEC	$y = 3.80x - 19.98$	0.8931 **
总磷	$y = 0.06x - 3.34$	0.9437 **
无机磷	$y = 0.09x - 2.36$	0.9544 **
有机磷	$y = 0.23x - 0.41$	0.8538 **
Fe/ Al-磷	$y = 0.16x + 1.53$	0.8202 **
总氮	$y = 0.02x + 10.58$	0.8568 **

表 8 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的最大吸附量、本底吸附态量和总最大吸附量结果

Table 8 The results of Q_{max} , NAP and $Q_{max} + NAP$ of phosphate on the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

项目	TG	TC	BI	B2	B3	CI	C2	Y	H	X	TW
Q_{max}	73.80	69.40	85.94	86.43	90.78	78.09	76.50	49.49	68.96	61.10	53.40
NAP	16.16	24.76	10.71	22.81	18.03	16.98	19.19	107.66	39.62	52.35	45.13
T Q_{max}	89.96	94.16	96.65	109.24	108.81	95.07	95.69	157.15	108.58	113.45	98.53

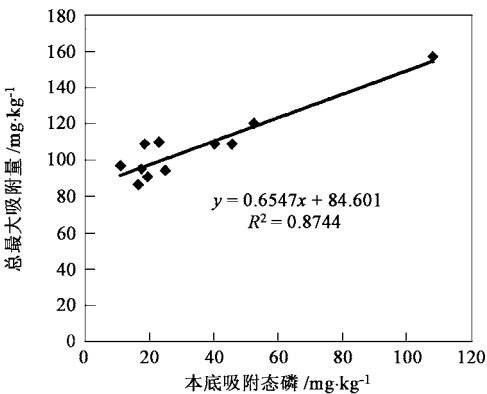


图 3 长江中下游浅水湖泊沉积物本底吸附态磷与总最大吸附态磷关系

Fig.3 The relationship between the NAP and the $Q_{max} + NAP$ of phosphate on the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

磷、有机磷、Fe/ Al-磷和总氮含量与其对磷的总最大吸附量呈显著的正相关关系,见表 9.而沉积物的有机质、CEC、总磷、无机磷、有机磷、Fe/ Al-磷和总氮均作为指示其污染程度的指标.所以长江中下游浅水湖泊沉积物不仅其本底吸附态磷与其污染程度有关,而总最大吸附磷量也与其污染程度有关,总趋势为,污染程度越高,其总最大吸附磷量也越高.

长江中下游湖泊表层沉积物对磷的吸附效率为 258.62 ~ 1032.90 L/kg(表 6).研究发现本区域内的 11 个沉积物对磷的吸附效率与其最大吸附量(平衡

吸附量)有显著的正相关关系,其结果见图 5 所示.因此,本研究区域内沉积物对磷的吸附效率取决于该沉积物对磷的最大吸附量.而沉积物对磷的最大吸附量与其有机质、CEC、总磷和无机磷等含量呈显著的负相关关系,但沉积物对磷的吸附效率与其有机质、CEC、总磷和无机磷等含量却没有相关关系,这一结果与 Lopze 等的研究结果不同^[4],产生这一结果可能是研究区域本身的地区特点所决定,还需要进一步的工作来证实.

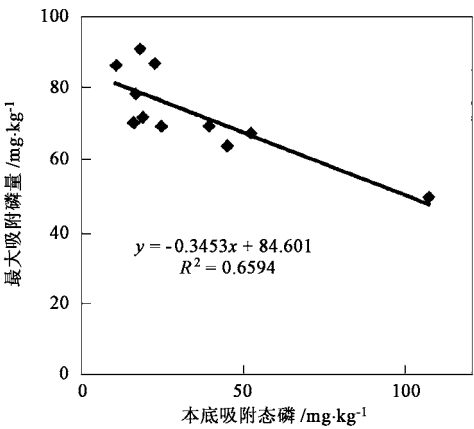


图 4 长江中下游浅水湖泊表层沉积物本底吸附态磷与最大吸附磷关系

Fig.4 The relationship between the NAP and the Q_{max} of phosphate on the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

表9 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的总最大吸附量与其物理化学参数相关关系

Table 9 Coefficients of correlation between the $NAP + Q_{max}$ and the chemical-physical parameters of the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

沉积物物理化学参数	方程($n = 11$)	R^2
有机质	$y = 0.15x - 12.79$	0.8011 [*]
CEC	$y = 2.29x + 74.34$	0.6621 [*]
总磷	$y = 19.99x - 1525.60$	0.7408 [*]
无机磷	$y = 14.01x - 1075.70$	0.7175 [*]
有机磷	$y = 5.18x - 398.31$	0.7227 [*]
Fe/ Al-磷	$y = 7.28x - 568.89$	0.7320 [*]
总氮	$y = 71.24x - 6127.50$	0.7045 [*]

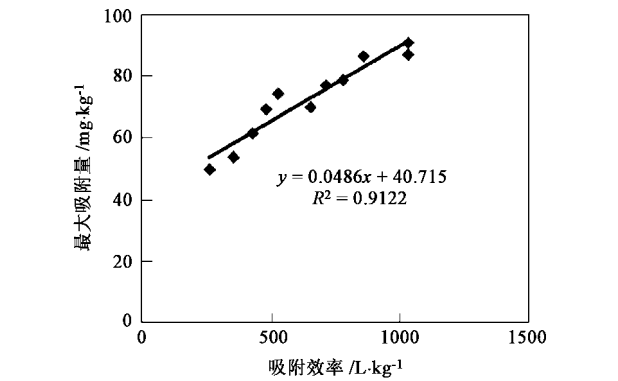


图5 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附效率与其最大吸附量关系

Fig.5 The relationship between the adsorption rates and the Q_{max} of phosphate on the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

3 结论

(1) 长江中下游浅水湖泊表层沉积物对磷的吸附动力学实验结果揭示,沉积物对磷的吸附主要在前10h内完成,并逐渐达到吸附平衡.不同取样时间段沉积物对磷的吸附速率结果显示,沉积物对磷的吸附主要发生在0.5h内.

(2) 等温吸附实验结果发现,长江中下游浅水湖泊表层沉积物的本底吸附态磷与其有机质、CEC、总磷、无机磷、有机磷、Fe/ Al-磷和总氮有显著的正相关关系;对磷的最大吸附量与其 CEC 和无机磷、有机质和总磷呈负相关关系;而总最大吸附量与其有机质、CEC、总磷、无机磷、有机磷、Fe/ Al-磷和总氮含量呈显著的正相关关系.总的趋势为污染程度越高,沉积物的本底吸附态磷和总最大吸附磷量也越高,而最大吸附磷量越低.

(3) 就目前我国长江中下游浅水湖泊的水质而言,其沉积物存在解吸.沉积物对磷的吸附-解吸平衡浓度与沉积物有机质、CEC、总氮、总磷以及各形

态磷含量均有显著的正相关关系.在本研究条件下,即使是污染较为严重的湖泊,也具有向上覆水体释磷的趋势.

参考文献:

[1] 徐轶群,熊慧欣,赵秀兰.底泥磷的吸附与释放研究进展[J].重庆环境科学,2003,15(11):147~149.

[2] 刘巧梅,刘敏,许世远,侯立军,等.上海滨岸潮滩不同粒径沉积物中无机形态磷的分布特征[J].海洋环境科学,2002,21(3):29~33.

[3] Lopez P, X Lluch, M Vidal, J A Morgu. Adsorption of Phosphorus on Sediments of the Balearic Islands (Spain) Related to Their Composition[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1996, 42: 185~196.

[4] 刘敏,侯立军,许世远,等.长江河口潮滩表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J].地理学报,2002,57(4):397~406.

[5] Jugsujinda A, Krairapanona A, Patrick JR W H. Influence of extractable iron, aluminum, and manganese of P sorption in flooded acid sulfate soils[J]. Biol. Fertil. Soil., 1995, 20: 118~124.

[6] Jones R I, Shaw P J, Haan H DE. Effects of dissolved humic substances on the speciation of iron and phosphate at different pH and ionic strength[J]. Environ. Sci. Technol., 1993, 27: 1052~1059.

[7] 秦伯强.长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J].湖泊科学,2002,4(3):193~202.

[8] 李文朝.浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用[J].湖泊科学,1997,9(2):97~104.

[9] Slomp C P, Malschaert J F P, Van Raaphorst W. The role of adsorption in sediment water exchange of phosphate on North sea continental margin sediments[J]. Limnol. Oceanogr., 1998, 43(5):832~846.

[10] 王庭健.城市富营养化湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J].环境科学研究,1994,7(4):12~20.

[11] AWWA, APHA, WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 18th Ed. Washington DC: American Public Health Association, 1998. 234~245.

[12] 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,1978.134~158.

[13] V Ruban. Quevauviller harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments- A synthesis of recent works[J]. Fresenius J Anal Chem, 2001, 370: 224~228.

[14] 张新明,李华兴,刘远金.磷酸盐在土壤中吸附与解吸研究进展[J].土壤与环境,2001,10(1):77~80.

[15] 潘纲.亚稳平衡态吸附(MEA)理论——传统吸附热力学面临的挑战与发展[J].环境科学学报,2003,23(2):156~173.

[16] 林荣根,关景阳.黄河口沉积物对磷酸盐的吸附与释放[J].海洋学报,1994,16(4):82~90.

[17] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛,等.中国湖泊富营养化[M].北京:中国环境科学出版社,1990.121~133.

[18] Stumm W, Morgan J. Aquatic Chemistry[M]. New York: J. Wiley and Sons, 1981. 102~123.

[19] Lijklema L. Interaction of ortophosphate with iron III and aluminium hydroxides[J]. Environmental Science and Technology, 1980, 14: 537~541.