小型浅水湖泊表层沉积物对磷的吸附特征及其影响因素

李松贵，向速林，张 旭，付成钢，吴 蓓
（华东交通大学 土木建筑学院，江西 南昌 330013）

摘 要：[目的] 分析城市小型浅水湖泊表层沉积物对磷的吸附特征及影响因素，为城市小型浅水湖泊富营养化控制和生态环境修复提供参考依据。[方法] 在室内模拟条件下，从表层沉积物对磷的吸附动力学与等温吸附两个角度分析了孔目湖表层沉积物对磷的吸附特征，同时运用磷吸附量计算公式探讨不同 pH 值下孔目湖表层沉积物对磷吸附行为的影响。[结果] 表层沉积物对磷的吸附动力学过程分为快吸附和慢吸附 2 个阶段，快吸附阶段主要发生在 0～1 h 内，而慢吸附阶段主要发生在 1～3 h；表层沉积物对磷的吸附等温线在高浓度下同时符合 Langmuir 模型、Freundlich 模型和 D-R 模型，而在低浓度下符合 Linear 模型；在酸性或中性环境条件下，表层沉积物对磷的吸附效果更好。[结论] 富营养化严重的小型浅水湖泊，表层沉积物有向上覆水释放磷的趋势，且上覆水和沉积物中磷酸盐含量的多少均会影响表层沉积物对磷的吸附特征和动态平衡状态的变化。

关键词：小型浅水湖泊；表层沉积物；磷；吸附
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)06-0061-06 **中图分类号**：X524

文献参数：李松贵，向速林，张旭，等. 小型浅水湖泊表层沉积物对磷的吸附特征及其影响因素[J]. 水土保持通报，2018，38(6)：61-66. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.010. Li Songgui, Xiang Sulin, Zhang Xu, et al. Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on surface sediments of small shallow lake[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 61-66.

Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Surface Sediments of Small Shallow Lake

LI Songgui, XIANG Sulin, ZHANG Xu, FU Chenggang, WU Bei
(*College of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi* 330013, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of this paper was to analyze the characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on surface sediment of small shallow lake, and provide decision basis for eutrophication control and ecological environment restoration of small shallow lake. [Methods] Adsorption characteristics of phosphorus on surface sediments samples taken from Kongmu Lake was determined by adsorption kinetics and isothermal adsorption, and the adsorption behavior of phosphorus at different pH values was determined by calculation formula of phosphorus adsorption capacity. [Results] Adsorption kinetics of phosphorus on the surface sediments was divided into two stage: the rapid adsorption stage occurred in 0～1 h, while the slow adsorption stage occurred in 1～3 h. Adsorption isotherm curves was fitted into Langmuir model, Freundlich model and D-R model under high concentration conditions, while fitted into Linear equation under low concentration conditions. Under acidic or neutral environmental conditions, surface sediments has better phosphorus adsorption effect. [Conclusion] The surface sediments from small, eutrophic shallow lake has the trend to release phosphorus into the overlying water. The amount of phosphate in overlying water and sediments will affect the adsorption characteristics and dynamic equilibrium of phosphorus in surface sediments.

Keywords: **small shallow lake; surface sediments; phosphorus; adsorption**

收稿日期：2018-04-07 **修回日期**：2018-06-11
资助项目：江西省教育厅科技项目“鄱阳湖沉积物磷的赋存形态及界面交换研究”(GJJ150540)
第一作者：李松贵(1991—)，男(汉族)，江西省上饶市人，硕士研究生，研究方向为水资源与环境研究。E-mail：120759839@qq.com。
通讯作者：向速林(1978—)，男(汉族)，江西省抚州市人，博士，副教授，主要从事水资源与环境方面的研究。E-mail：slxiang2001@163.com。

目前水体富营养化已经成为全世界都关注的环境难题。磷是水体富营养化的限制性营养元素之一[1],沉积物在水体生态环境系统中扮演着重要的角色,当水体环境污染严重时,水中污染物会通过沉淀或颗粒物表面与磷酸盐表面的相互作用力产生阴离子交换吸附或配位体交换吸附而停留在沉积物表面[2-3];当外界环境条件发生变化时,通过再悬浮、吸附、解吸、扩散及有机质降解等过程,表层沉积物中的营养物质会再次释放到上覆水中[4-5],导致二次污染。湖泊沉积物污染通常是人类活动、污水排入、工业废水、地表径流以及水生生物残骸经沉淀、吸附等多种途径沉积而导致的[6]。由于长期不断的累积效应,表层沉积物污染物含量比上覆水高,且表层沉积物与上覆水持续不断的进行物质和能量的交换,导致上覆水磷含量增加,从而造成水体富营养化的进程加快[7]。吸附/解吸平衡浓度(EPC_0)可以用来描述表层沉积物—上覆水界面间的磷的吸附特征[8],它可以间接表示水体表层沉积物是磷"源"还是磷"汇"[9-10]。而影响磷在表层沉积物上吸附的主要因素有沉积物组成粒径[11-12]、铁铝等金属氧化物含量[13]、有机质种类[11,14]等沉积物本身的特性和 pH[15]、氧化还原电位[16]、离子强度[11,17]、温度[18]等环境因素。因此,研究表层沉积物对磷的吸附特征及其影响因素,对深入了解表层沉积物—上覆水界面间的磷的生物地球化学循环机制以及水体富营养化的防治具有非常重要的意义。

孔目湖位于江西省南昌市华东交通大学南区,湖呈爪形,其水面总面积约 0.27 km^2,平均水深约 1.2 m,最深处达 2 m,是集蓄水、养殖、景观等多功能的小型浅水湖泊。由于大量的生活污水未经处理直接排放,上游水葫芦漂流加入,鱼等动物残骸及雨水径流等经过物化和生化作用后致使相当的磷元素进入孔目湖,水体的富营养化程度加剧。虽然通过控源截污、清淤疏浚、生态修复等工程进行综合治理,但水质没有得到有效改善,湖内每年均发生"水华"和鱼类大量死亡现象,严重影响湖周居民的生活环境并加剧水环境的污染。为此,本文以孔目湖这一天然城市小型浅水内湖为研究对象,通过室内模拟的方法研究孔目湖表层沉积物对磷的吸附行为,及其不同 pH 值条件下对表层沉积物吸附磷的影响,利用吸附模型的参数值初步判断表层沉积物对上覆水中磷酸盐的净化能力及吸附特征,以期为城市小型浅水湖泊富营养化控制和生态环境修复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2017 年 9 月 19 日,为了研究不同采样点沉积物对上覆水水体中磷酸盐的吸附特征变化规律,利用自制的柱状采样器采集厚度约为 10—15 cm 的具有代表性的 3 个沉积物柱状样品,现场装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,带回实验室放在冰箱冷冻干燥后,过 100 目筛后备用。各样点的地理位置详见表 1。

表 1 采样点具体特征

采样点	采样点特征
L_4	孔目湖主体部分东南部,人们观赏、湖中鱼类等活动的主要场所,污染源多
L_5	孔目湖主要排放口下游,上游漂浮大量的水葫芦,水流流速较快,污染源多
L_6	孔目湖偏东部,水体较浅,污染源较少

1.2 实验方法

1.2.1 *吸附动力学试验* 在一系列 50 ml 的离心管中,分别加入 0.2 g 沉积物样品和 30 ml 浓度为 2 mg/L 的含磷溶液(磷酸二氢钾溶液),滴加 2 滴 0.1%的氯仿。

调节 pH=7.0 后于(25±1)℃恒温震荡,转速 150 rpm/min,分别在 5,10,15,20,25,30 min 及 1,1.5,2,3,9,15,20,24 h 时取出,在 5 000 rpm/min 条件下离心 10 min 后提取上清液,上清液用 0.45 μm 滤膜抽滤,采用钼锑抗分光光度法测定溶液中磷的含量。根据吸附反应前后溶液中磷含量的浓度差,减去空白值,计算磷的吸附量。

1.2.2 *吸附等温实验* 称取 0.2 g 沉积物样品置于一系列 50 ml 的离心管中,分别加入初始浓度不同含磷溶液 20 ml(磷酸二氢钾溶液),低磷浓度分别:0,0.02,0.05,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 mg/L,高磷浓度分别为:0,0.5,1,2,5,8,10,15,20 mg/L,滴加 2 滴 0.1%的氯仿。于(25±1)℃恒温震荡 24 h,转速 150 rpm/min。磷的吸附量测定同上。

1.2.3 *pH 值对表层沉积物磷吸附的影响* 在一系列 50 ml 离心管中加入 0.2 g 沉积物样品和 25 ml 不同浓度的含磷溶液(磷酸二氢钾溶液),滴加 2 滴 0.1%的氯仿。初始磷质量浓度分别为 0,0.1,0.2,0.3,1,2,5,8 和 10 mg/L。分别在 pH=2,pH=7,pH=10 条件下振荡 24 h,转速为 150 rpm/min。磷的吸附量测定同上。

1.3　计算公式及数据处理

1.3.1　磷吸附量计算公式

磷吸附量(Q)计算公式:

$$Q=(C_o-C_e)\times V/W \quad (1)$$

式中:Q——吸附量(mg/kg);C_e——平衡液中吸附剂浓度(mg/L);C_0——初始吸附剂浓度(mg/L);V——加入样品中的溶液体积(L);W——沉积物干重(kg)。

1.3.2　吸附动力学方程　准一级反应动力学模型、准二级反应动力学模型、Weber-Morris(W-M)模型:

方程分别为:

$$\ln(Q_e-Q_t)=\ln Q_e-k_1 t \quad (2)$$

$$t/Q_t=1/k_2Q_e^2+t/Q_e \quad (3)$$

$$Q_t=\mathrm{Kid}t^{0.5}+c \quad (4)$$

式中:Q_e——平衡吸附量(mg/kg);Q_t——时间 t 时的吸附量(mg/kg);t——时间(h);k_1,k_2——吸附速率常数;Kid——粒子内扩散速率常数;c——常数。

1.3.3　等温吸附方程

Linear 方程为:

$$Q=mC_0-\mathrm{NAP} \quad (5)$$

式中:Q——吸附量(mg/kg);C_0——初始磷浓度(mg/L);NAP——沉积物本底吸附态磷浓度(mg/L);m——斜率;

Langmuir 模型、Freundlich 模型方程分别为:

$$C/Q=C/Q_m+1/(K_L\cdot Q_m) \quad (6)$$

$$Q=K_F f\cdot C^{1/n} \quad (7)$$

式中:Q——吸附量(mg/kg);C——吸附平衡时的磷浓度(mg/L);Q_m——最大吸附量(mg/kg);K_L,K_F——吸附平衡常数。

Dubinin-Radushkevich(D-R)模型方程为:

$$\ln Q_e=\ln Q_m-\beta\varepsilon^2 \quad (8)$$

式中:Q_e——平衡吸附量(mg/kg);Q_m——最大吸附量(mg/kg);β——吸附平衡常数。ε——博兰尼势,$\varepsilon=R\mathrm{T}\ln(1+1/C_e)$;$R$——理想气体常数〔8.314 J/(mol·K)〕;T——热力学温度(K)。

2　结果与分析

2.1　表层沉积物磷的吸附动力学

孔目湖表层沉积物对磷的吸附动力学曲线如图 1 所示。沉积物对磷的吸附动力学过程均可分为快吸附和慢吸附阶段两个阶段[19],从图 1 可以看出,该湖泊 3 个采样点表层沉积物对磷的快吸附阶段基本都发生在 0～1 h 内,随着时间的增加,表层沉积物对磷的吸附速率逐渐减小,1 h 之后为慢吸附阶段。3 个采样点表层沉积物在 0～0.25 h 和 0.25～0.5 h 内吸附速率的范围分别为 100.6～1 101.7 mg/(kg·h)和 138.49～835.51 mg/(kg·h),而在 0～0.50 h 内吸附速率的范围为 205.94～680.83 mg/(kg·h),且 L_6 在 0～0.50 h 内表层沉积物对磷的吸附量达到最大吸附量的 80%左右(表 2),其对磷的吸附强度明显高于 L_4,L_5 采样点表层沉积物,这可能与湖泊沉积物组成粒径有关,颗粒物越细,其吸附能力和再悬浮能力都较强,在沉积、释放过程中起着主要作用[20]。该湖泊 3 个采样点在 0.50 h 表层沉积物中磷的最大吸附速率从大到小排序为:L_6〔446.36 mg/(kg·h)〕>L_5〔301.12 mg/(kg·h)〕>L_4〔220.37 mg/(kg·h)〕,其主要原因是 L_4,L_5 在生活污水排放口下游,而 L_6 距离排放口较远,所受干扰也较小,沉积物沉积时间较长,沉积物粒径较细,吸附速率也较快。同时,也表明沉积物吸附磷发生的主要阶段不能只凭吸附速率来确定,还应根据各时间段吸附量所占吸附平衡总量的百分比综合判断[21]。综上分析可得,该湖泊表层沉积物对磷的快吸附过程发生在 0～1 h 内,1～3 h 内为磷的慢吸附阶段,3 h 后吸附量很小,0～3 h 内表层沉积物对磷的吸附量达到最大吸附量的 95%左右,表明该湖泊表层沉积物对磷的吸附主要是在 3 h 内完成,之后处于动态吸附平衡状态。

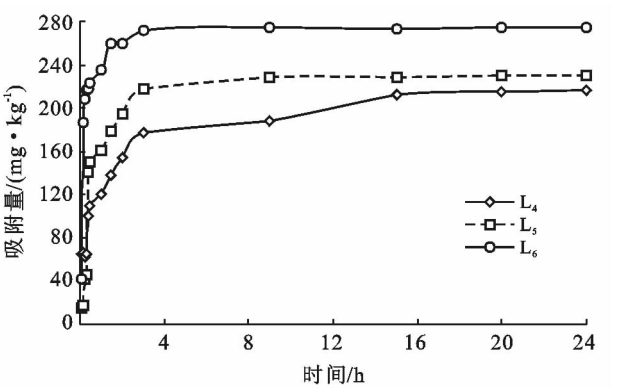


图 1　表层沉积物对磷的吸附动力学曲线

表 2　不同采样点各时间段吸附量所占吸附平衡总量的比例　%

样品	各时间段吸附量所占吸附平衡总量的比例													
	0.08 h	0.17 h	0.25 h	0.33 h	0.42 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	3 h	9 h	15 h	20 h	24 h
L_4	30.12	30.90	28.56	30.25	46.35	51.02	55.95	64.13	71.27	82.18	87.24	98.52	99.40	100.0
L_5	6.72	7.45	18.33	19.92	61.22	65.62	70.26	77.96	84.68	94.94	99.74	99.87	99.97	100.0
L_6	15.33	68.28	76.15	79.12	79.42	81.37	85.86	94.76	94.86	99.15	99.87	99.67	99.88	100.0

为进一步描述表层沉积物对磷的吸附特征，目前对沉积物吸附磷的速率研究主要选择经验性的吸附动力学方程对数据进行拟合，依据较高的相关系数和较低的标准误差选择最优方程，根据拟合得到的参数来进行定量研究[22-23]。常用的吸附模型有：准一级反应动力学模型、准二级反应动力学模型、抛物线扩散模型、Boyd 模型、Weber-Morris 模型及 Elovich 模型等。表层沉积物对磷的吸附动力学模型拟合参数如表 3 所示。由表 3 可知，准二级动力学模型拟合的相关系数 R^2 明显高于准一级动力学模型拟合的相关系数，且由准二级动力学模型拟合得出的 q_2 与实验所测的平衡吸附量 q 较为接近，表明孔目湖表层沉积物吸附磷的过程更符合准二级动力学过程，这与安文超等[24]的研究发现一致。但江敏等[25]认为滴水湖沉积物对水种磷的吸附动力学过程符合抛物线方程，吕昌伟等[26]则发现 Elovich 方程能较好地描述乌梁素海和岱海表层湖泊沉积物对磷酸盐的吸附动力学过程，这可能与不同区域、环境下的沉积物粒度、组分等理化组成以及吸附位点等有关[27]。其中，3 个采样点表层沉积物拟合得出的 q_2 从大到小排序为：$L_6>L_5>L_4$，这可能与各采样点沉积物本身的特性有关[20,24]，L_6 位于孔目湖东部，表层沉积物颗粒粒度组成较细，比表面积大，对磷的吸附能力强，L_4 位于孔目湖生活污水排放口下游的偏西南方向，L_5 正位于该排放口下游区域，表层沉积物颗粒粒度主要以砂粒为主，吸磷能力弱。通常，溶质分子的转移分为颗粒内部、外部扩散或两者共同控制的[28~29]。由表 2 可知，Weber-Morris 模型也能得到较好的拟合，从拟合结果可以看出，表层沉积物对磷的吸附起始阶段是外部转移控制吸附速率，其次才是内部的扩散过程，说明表层沉积物对磷的吸附过程时由颗粒内部和外部扩散共同控制的。

表 3 表层沉积物对磷的吸附动力学模型拟合参数

样品	Pseudo-one-order kinetic 模型			Pseudo-two-order kinetic 模型			Weber-Morris 模型		
	k_1	q_1	R^2	k_2	q_2	R^2	Kid	C	R^2
L_4	0.236	130.89	0.969	0.01	222.22	0.999	0.240	−0.047	0.964
L_5	0.405	118.77	0.957	0.01	238.10	0.996	0.418	0.122	0.939
L_6	0.288	69.79	0.944	0.03	277.78	0.998	0.300	0.746	0.915

注：k_1，k_2 为吸附速率常数；q_1，q_2 为平衡吸附量；Kid 为粒子内扩散速率常数；c 为常数；R 为相关系数。

2.2 表层沉积物低浓度磷的吸附等温

在实验设定的低磷浓度范围（0～0.5 mg/L），表层沉积物对磷的等温吸附曲线如图 2 所示，表层沉积物磷等温吸附线性方程拟合参数详见表 4。

其吸附特征符合 Linear 方程：

$$Q=m\cdot C_0-\mathrm{NAP} \quad (5)$$

式中：Q——表层沉积物对磷的吸附量（mg/kg）；C_0——溶液初始磷浓度（mg/L）；NAP——表层沉积物本底吸附态磷浓度（mg/kg）；m——斜率（L/kg）。

从图 2 可以看出，在初始磷浓度较低的条件下，3 个采样点均存在解吸行为，随着磷浓度的增加逐渐进入吸附阶段，表层沉积物对磷的吸附量随着磷浓度的增加而增大。根据公式可以得出，$EPC_0=NAP/m$，其中 EPC_0 是指表层沉积物对磷的表观吸附量为零时平衡溶液中磷的质量浓度[30]，它可以间接表示水体不同环境下的表层沉积物是磷“源”还是磷“汇”。由表 3 可知，3 个采样点表层沉积物 NAP 值分别为：30.01，27.08 和 21.39 mg/kg，其 EPC_0 分别为 0.18，0.16 和 0.13 mg/L，从大到小排序为：$L_4>L_5>L_6$，其上覆水可溶性磷酸盐浓度（SRP）均低于 3 个采样点吸附/解吸平衡质量浓度（EPC_0），具有吸附上覆水体磷酸盐的潜力，具体表现为磷“汇”，但表层沉积物本身的特性（组成成分等）和环境因素（pH 值、温度等）的改变都会影响到沉积物—上覆水间体系吸附能力[12,15,18]，因此，表层沉积物磷的“汇”与“源”要根据不同区域的水文、环境等不同条件综合判断。

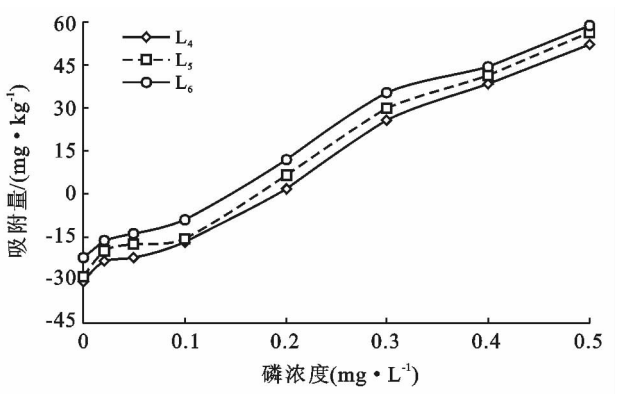


图 2 表层沉积物对磷的吸附等温曲线（低浓度）

表 4 表层沉积物磷等温吸附线性方程拟合参数

样品	Linear model			
	m	NAP	EPC_0	R^2
L_4	169.17	30.01	0.18	0.991
L_5	171.38	27.08	0.16	0.987
L_6	166.26	21.39	0.13	0.988

注：m 为斜率；NAP 为沉积物本底吸附态磷浓度；EPC_0 为吸附/解吸平衡质量浓度。

2.3　表层沉积物高浓度磷的吸附等温

在实验设定的高磷浓度范围(0.5～20 mg/L)内,表层沉积物对磷的等温吸附曲线如图 3 所示,表层沉积物磷等温吸附线性方程拟合参数详见表 5。从图 3 可以看出,各采样点表层沉积物在初始磷浓度高的条件下,等温吸附过程均符合 Langmuir 模型、Freundlich 模型及 D-R 模型。由表 5 可以得出,各采样点用 Langmuir 模型拟合的 R^2 均低于 Freundlich 模型,说明 Langmuir 模型劣于 Freundlich 模型。利用 Langmuir 模型可以得出各采样点表层沉积物对磷的最大吸附容量(Q_{max})分别为 555.56,588.24 和 625.00 mg/kg,从大到小排序为:$L_6>L_5>L_4$,而 3 个采样点吸附常数(K_L)则相反:L_4(0.889)$>L_5$(0.706)$>L_6$(0.125),其相对应的最大缓冲容量(MBC)也类似:L_4(493.89 mg/kg)$>L_5$(415.30 mg/kg)$>L_6$(78.13 mg/kg),MBC 是 Q_{max} 和 K_L 的乘积,它反映的是磷吸附强度和吸附容量的综合指标,表明 L_6 采样点的吸附强度和吸附容量均大于 L_4 和 L_5 采样点,但对于其缓冲容量来说,L_4 和 L_5 采样点则大于 L_6 采样点。通常,对于恒定的环境条件下,吸附质在吸附剂上的吸附速率与吸附质浓度和吸附剂的有效吸附点位有关[31],初始磷浓度增加,沉积物—上覆水间的浓度梯度增大,增强了水固相之间的传质过程,造成表层沉积物磷吸附量的暂时增加,但随着反应时间的增加,吸附点位减少,且表层沉积物因带负电荷与上覆水磷酸根产生静电排斥力,从而导致表层沉积物磷吸附速率的下降[32]。而 D-R 等温吸附模型则可以用来区分是物理吸附和化学吸附,由表 5 可知,3 个采样点表面沉积物吸附磷的拟合参数 β 值均为 2.00×10^{-7} mol^2/J^2,吸附能量 E 值为 1.581 kJ/mol,说明该湖泊表层沉积物吸附磷是物理过程。

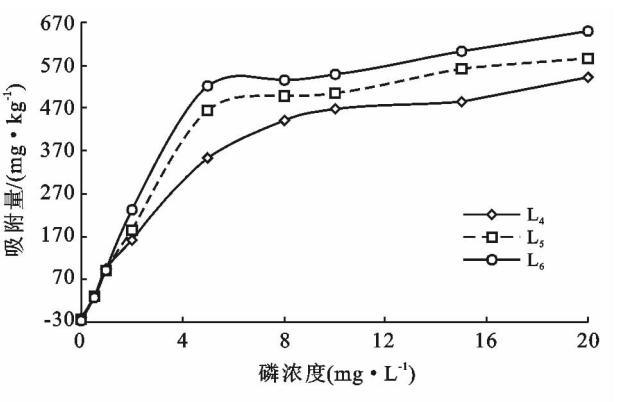


图 3　表层沉积物对磷的吸附等温曲线(高浓度)

表 5　表层沉积物磷等温吸附过程模型拟合参数

样品	Langmuir 模型			Freundlich 模型			D-R 模型		
	K_L	q_m	R^2	K_F	n	R^2	β	q_m	R^2
L_4	0.889	555.56	0.905	1.631	2.012	0.953	2.0E−07	1.81	0.943
L_5	0.706	588.24	0.889	1.615	1.895	0.935	2.0E−07	1.84	0.976
L_6	0.125	625.00	0.914	1.621	1.673	0.968	2.0E−07	1.87	0.905

注:K_L,K_F 为吸附平衡常数;q_m 为最大吸附量;n 为指数;β 为吸附平衡常数。

2.4　不同 pH 值下表层沉积物对磷吸附行为的影响

从图 4 可以看出,3 个采样点表层沉积物随着上覆水磷浓度的增加情况下在 pH 值为 2 的条件下对磷的吸附量远大于 pH 值为 11 条件下的磷吸附量,不同浓度所呈现的不同程度的磷吸附量,说明在酸性范围内,表层沉积物对磷的吸收强度很大;在碱性范围内,表层沉积物对磷的吸收作用开始减缓,pH 值为 11 的条件下,磷吸附量剧减。可能的原因是,一方面酸性条件下有利于活性铁铝的释放[7,33],活性铁铝释放后会与磷酸根结合生成 $AlPO_4$ 和 $FePO_4$ 沉淀,有利于沉积物对磷的吸附[34];另一方面 pH 值的变化使得表层沉积物表面吸附位点的数量和磷酸根的形态发生了变化,pH 值升高,上覆水中 HPO_4^{2-} 含量增加,但表层沉积物胶体颗粒的表面负电量也有所增加,由于其电负性大于上覆水中 $H_2PO_4^-$ 与胶体颗粒表面羟基(OH^-)的亲和力,从而导致胶体颗粒表面与 HPO_4^{2-} 排斥力增强,磷的吸附量呈现减缓趋势[7,35]。由此可见,在酸性或中性环境条件下,该湖泊表层沉积物对磷的吸附效果更好。

3　结 论

(1) 孔目湖表层沉积物对磷的动力学吸附符合 Lagergren 准二级吸附动力学方程,表层沉积物对磷的吸附主要发生在 0～3 h 内。

(2) 孔目湖各采样点表层沉积物对磷的吸附/解吸平衡质量浓度均小于上覆水中磷酸盐的含量,表现为磷“汇”。

(3) 在酸性或中性条件下,表层沉积物对磷的吸附作用明显;而在碱性条件下,表层沉积物对磷的吸附作用不明显,且 pH 值越大,吸附量越小。

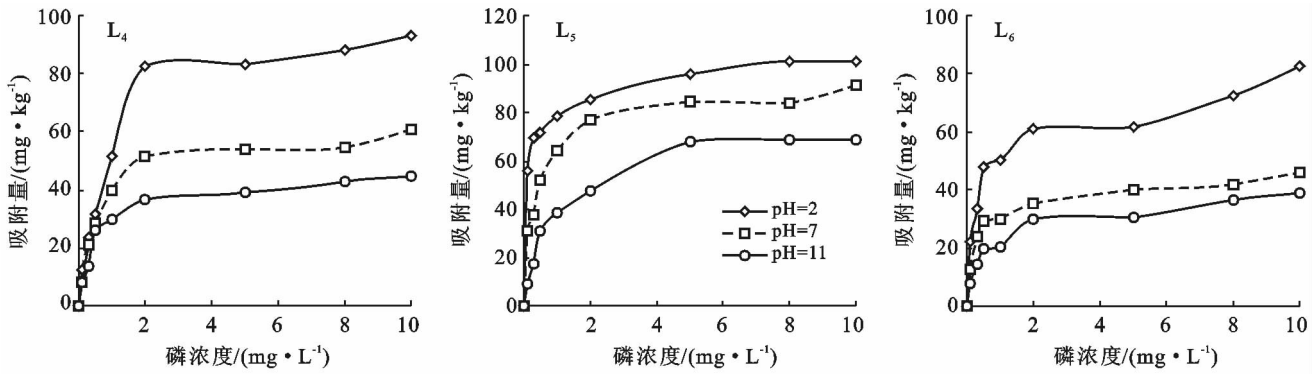


图 4 不同 pH 值下表层沉积物对磷吸附行为的影响

[参 考 文 献]

[1] Lewis W M, Wurtsbaugh W A, Paerl H W. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters[J]. Environmental Science & Technology, 2011,45(24):10300-10305.

[2] Del N M, Galindo C, Barillon R, et al. Surface reactivity of alpha-Al_2O_3 and mechanisms of phosphate sorption: In situ ATR-FTIR spectroscopy and zeta potential studies[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2010, 342(2):437-444.

[3] 近藤精一,石川达雄,安部郁夫.吸附科学[M].北京:化学工业出版社,2006.

[4] 龚莹,王宁,李玉成,等.巢湖水体-沉积物磷形态与有效性[J].生态与农村环境学报,2015(3):359-365.

[5] Wang Lingqing, Liang Tao, Zhong Buqing, et al. Study on nitrogen dynamics at the sediment-water interface of Dongting Lake, China [J]. Aquatic Geochemistry, 2014, 20(5):501-517.

[6] Hooda P S, Rendell A R, Edwards A C, et al. Relating soil phosphorus indices to potential phosphorus release to water[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(4):1161-1171.

[7] Zhou Aimin, Tang Hongxiao, Wang Dongsheng. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition[J]. Water Research, 2005, 39(7):1245-1254.

[8] Kerr J G, Burford M, Olley J, et al. Phosphorus sorption in soils and sediments: Implications for phosphate supply to a subtropical river in southeast Queensland, Australia[J]. Biogeochemistry, 2011,2(1/3):73-85.

[9] 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.

[10] Noahr L, Emilyh S. Benthic sediment influence on dissolved phosphorus concentrations in a headwater stream[J]. Biogeochemistry, 2007, 84(3):297-309.

[11] Wang Shengrui, Jin Xiangcan, Bu Qingyun, et al. Effects of particle size, organic matter and ionic strength on the phosphate sorption in different trophic lake sediments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006,28(2/3):95-105.

[12] Wang Xiaoyun, Zhang Liping, Zhang Hesi, et al. Phosphorus adsorption characteristics at the sediment-water interface and relationship with sediment properties in FUSHI reservoir, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012,67(1):15-22.

[13] Jalali M, Matin N H. Sorption of phosphorus in calcareous paddy soils of Iran: Effects of soil/solution ratio and pH[J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(5):2047-2059.

[14] Gerke J. Humic (organic matter)-Al(Fe)-phosphate complexes: An underestimated phosphate form in soils and source of plant-available phosphate[J]. Soil Science, 2010, 175(9):417-425.

[15] Wang Shengrui, Jin Xiangcan, Pang Yan, et al. The study of the effect of pH on phosphate sorption by different trophic lake sediments[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2005,285(2):448-457.

[16] Pant H K, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions[J]. Journal of Environmental Quality, 2001,30(4):1474-1480.

[17] Sø H U, Postma D, Jakobsen R, et al. Sorption of phosphate onto calcite; results from batch experiments and surface complexation modeling[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2011,75(10):2911-2923.

[18] Penn C J, Zhang H L. Isothermal titration calorimetry as an indicator of phosphorus sorption behavior[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,74(2):502-511.

[19] Lopez P, Lluch X, Vidal M, et al. Adsorption of phosphorus on sediments of the Balearic Islands(Spain) related to their composition[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 1996,42(2):185-196.

(下转第 73 页)

[2] 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
[3] 解明曙. 树木根系固坡土力学机制研究闭[J]. 水土保持学报,1990,4(3):7-11.
[4] Turmanina V. On the strength of tree roots[J]. Bulletin of Moscow of Society. Naturalists, Biol. Secramine, 1965,70(5):36-45.
[5] 陈昌富,刘怀星,李亚平,等. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(10):2041-2045.
[6] 刘小光. 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
[7] 朱清科,陈丽华,张东升,等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(4):64-67.
[8] 张东升. 长江上游暗计叶林林木根系抗拉力学特性研究[D]. 北京:北京林业大学,2002.
[9] 周朔. 林木根系拉伸力学特性研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
[10] 李为萍,史海滨,梁建财,等. 基于三轴试验的根土复合体抗剪性能试验研究[J]. 灌溉排水学报,2013,32(2):128-130.
[11] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰,等. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(5):67-72.
[12] 刘亚斌,胡夏嵩,余冬梅,等. 西宁盆地黄土区 2 种灌木植物根—土界面微观结构特征及摩擦特性试验[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(5):1270-1280.
[13] 赵晓黎. 植物根系拉拔模型试验研究[D]. 四川 成都:西南交通大学,2015.
[14] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Science, 1981,132(6):427-435.
[15] Norris J N. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut slope in Southern England[J]. Plant and Soil, 2005,278(1/2):43-53.
[16] 刘亚斌,余冬梅,付江涛,等. 黄土区灌木柠条锦鸡儿根—土间摩擦力学机制试验研究[J]. 农业工程学报,2017,33(10):198-205.

(上接第 66 页)

[20] 高丽,侯金枝,宋鹏鹏. 天鹅湖沉积物对磷的吸附动力学及等温吸附特征[J]. 土壤, 2013,45(1):67-72.
[21] Ho Y S, Mckay G. Pseudo-second order model for sorption processes[J]. Process Biochemistry, 1999,34(5):451-465.
[22] 何宗健,刘文斌,王圣瑞,等. 洱海表层沉积物吸附磷特征[J]. 环境科学研究, 2011,24(11):1242-1248.
[23] 陈春瑜,徐晓梅,邓伟明,等. 滇池表层沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学学报, 2014,34(12):3065-3075.
[24] 安文超,李小明. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. 环境科学, 2008,29(5):1295-1302.
[25] 江敏,刘金金,胡文婷,等. 滴水湖沉积物对磷的吸附特性初探[J]. 环境科学与技术, 2012,35(5):18-23.
[26] 吕昌伟,孟婷婷,张细燕,等. 磷在不同类型湖泊沉积物上的吸附特征及形态再分布研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(2):402-409.
[27] 王爱萍,杨守业,周琪. 长江口崇明东滩湿地沉积物对磷的吸附特征[J]. 生态学杂志,2006,25(8):926-930.
[28] Tang Hu, Zhou Weijie, Zhang Lina. Adsorption isotherms and kinetics studies of malachite green on chitin hydrogels[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 209/210(1):218-225.
[29] Dawood S, Sen T K. Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by raw pine and acid-treated pine cone powder as adsorbent: Equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design[J]. Water Research, 2012,46(13):1933-1946.
[30] Lucci G M, Mcdowell R W, Condron L M. Evaluation of base solutions to determine equilibrium phosphorus concentrations(EPC_0) in stream sediments[J]. International Agrophysics, 2010,24(2):157-163.
[31] Liu Yu, Shen Liang. From Langmuir kinetics to first and second-order rate equations for adsorption[J]. Langmuir, 2008, 24(20):11625-11630.
[32] 黄利东,柴如山,宗晓波,等. 不同初始磷浓度下湖泊沉积物对磷吸附的动力学特征[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2012,38(1):81-90.
[33] 王振华,王圣瑞,刘元英,等. Fe 和 Al 对湖泊沉积物中磷赋存形态的影响[J]. 环境科学研究,2012,25(5):556-562.
[34] 揣小明,杨柳燕,程书波,等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. 环境科学,2014,35(3):951-957.
[35] Karthikeyan K G, Tshabalala M A, Wang D, et al. Solution chemistry effects on orthophosphate adsorption by cationized solid wood residues[J]. Environmental Science & Technology, 2004,38(3):904-911.