

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0199

赵兴敏, 赵兰坡, 李明堂, 等. 2014. 水体底泥及岸边土壤有机无机复合体对磷吸附特征对比[J]. 环境科学学报, 34(5): 1285-1291

Zhao X M, Zhao L P, Li M T, et al. 2014. Comparative study of adsorption characteristics of phosphorus by sediment in water and riparian soil and their organic mineral complex components [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(5): 1285-1291

水体底泥及岸边土壤有机无机复合体对磷吸附特征对比

赵兴敏¹, 赵兰坡^{1,*}, 李明堂¹, 郭欣欣², 任航¹

1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118

2. Universiti Tunku Abdul Rahman, Faculty of Engineering and Green Technology, Kampar 31900

收稿日期: 2013-08-23 修回日期: 2013-12-27 录用日期: 2013-12-27

摘要:以长春市新立城水库底泥及岸边土壤为研究对象,利用平衡吸附法研究底泥、土壤及二者有机无机复合体(砂粒、粉粒和粘粒)对磷的吸附热力学和动力学特征,并探讨底泥和土壤各级复合体对磷的吸附贡献,以期探明底泥和土壤对磷的富集规律。结果表明,底泥和土壤对磷的吸附热力学均符合 Langmuir 方程和 Freundlich 方程,且底泥对磷的理论最大吸附量约是土壤的 3 倍。底泥及土壤粘粒复合体对磷的吸附热力学符合 Langmuir 方程和 Freundlich 方程,粉粒及砂粒复合体对磷的吸附符合 Henry 方程。粘粒复合体对磷的吸附量均大于粉粒复合体,而粉粒复合体均大于砂粒复合体。底泥及土壤粘粒复合体对磷的吸附贡献约为 60%,粉粒复合体对磷的吸附贡献稍大于砂粒复合体的吸附贡献。底泥、土壤及二者有机无机复合体对磷的吸附动力学符合一级动力学方程、Elovich 方程和双常数方程,且均在 24 h 以内达到吸附平衡。研究结果表明,底泥与岸边土壤对磷的吸附具有相似的规律,且底泥及其复合体对磷的吸附能力均大于土壤,说明若磷素由于地表径流等因素由土壤进入到水体中,底泥对磷会有较强的吸附净化作用,即某种意义上底泥为河流磷素有效的“汇”。

关键词:底泥;土壤;有机物无机复合体;磷;吸附

文章编号: 0253-2468(2014)05-1285-07 中图分类号: X142 文献标识码: A

Comparative study of adsorption characteristics of phosphorus by sediment in water and riparian soil and their organic mineral complex components

ZHAO Xingmin¹, ZHAO Lanpo^{1,*}, LI Mingtang¹, GUO Xinxin², REN Hang¹

1. College of Resources and Environment Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118

2. Universiti Tunku Abdul Rahman, Faculty of Engineering and Green Technology, Kampar 31900

Received 23 August 2013; received in revised form 27 December 2013; accepted 27 December 2013

Abstract: The sediment from Xinlicheng Reservoir and the soil on the shore of the waters were selected to be research target. The adsorption thermodynamics and kinetics characteristics of phosphorus by sediment, soil and their organic mineral complex components were investigated by using equilibrium adsorption method. To identify the adsorption mechanism of phosphorus by sediment and soil. The contribution of each organic mineral complex component to phosphorus adsorption was also explored. The results indicated that phosphorus adsorption by the sediment and soil were well fitted with Langmuir and Freundlich model. The maximum adsorption capacity of sediment to phosphorus was about three times of soil. The adsorption thermodynamics of sediment and soil clay complex on phosphorus were well fitted by Langmuir equation and the Freundlich equation. The adsorption of phosphorus on silt and sand was fitted by Henry equation. The adsorption capacity of clay complex for phosphorus was greater than that of silt complex, and the adsorption capacity of silt complex for phosphorus was greater than that of sand complex. The adsorption contribution of phosphorus in soil and sediment clay complex was about 60%. The adsorption contribution of phosphorus in soil silt complex was slightly greater than that in sand complex. The adsorption dynamics of soil, sediment and their complexes were fitted by first-order kinetics equation, Elovich equation and double constant equation, and all adsorption equilibrium was reached within 24 h. The result showed that the adsorption rule of sediment for phosphorus was similar to that of the riparian soil. The phosphorus adsorption capacities on sediment and its complex were greater than that of soil. It can be concluded that sediment has great purification and adsorption effects on phosphorus from the soil into the water by surface runoff. Sediment can therefore be regarded as effective “sink” for phosphorus.

Keywords: sediment; soil; organic mineral complex component; phosphorus; adsorption

基金项目: 国家科技支撑计划(No.2012BAD15B05);吉林省教育厅项目(2013 第 74 号)

Supported by the National Key Technology R&D Program(No.2012BAD15B05) and the Program of the Education Department of Jilin Province (2013 No.74)

作者简介: 赵兴敏(1980—),女, E-mail: zhaoxingmin0704@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: zhaolanpo12@163.com

Biography: ZHAO Xingmin(1980—), female, E-mail: zhaoxingmin0704@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: zhaolanpo12@163.com

1 引言 (Introduction)

目前,自然水体中的磷主要来自工业、生活及养殖业废水等点源污染源和农业土壤等面源污染源(Sutton *et al.*, 2011; Yakutina, 2011; Shafqat *et al.*, 2013).点源污染比较集中,其污染已经基本得到控制,但面源污染还没得到有效控制(夏运生等, 2010; Hahn *et al.*, 2012).且近年来,由于农业生产要求的不断提高和农业投入的相应增加,使得以氮、磷为代表的面源污染造成的环境问题日益突出,农田氮、磷素流失引起的地表水环境恶化日趋严重,由农田磷素造成的面源污染对当今世界水质恶化构成了很大的威胁.

河岸带是介于陆地与河流之间的过渡地带,是连接水生生态系统和陆地生态系统的重要枢纽(黄凯等, 2007; 李冬林等, 2008),被认为是去除进入水体(河流、湖泊)污染物的有效“汇”,在防治农业面源污染、保护和改善河流水质方面有着极其重要的作用.人类的农业活动是河流最主要的沉积物输入来源,农业活动削弱了地表的水土保持能力,在暴雨期间,大量的土壤、泥砂等物质通过地表径流输入河流,不仅使河床淤积,而且使河流的水质和生境恶化.土壤中无机胶体与有机胶体很少单独存在,它们常常通过各种力紧密结合,形成土壤有机无机复合体,土壤有机无机复合体是土壤区别于母质的基本特征之一(熊毅等, 1990).在土壤演变过程中,有机无机复合体不仅是土壤肥力的重要物质基础,也是污染物的过滤器,对于污染物质的迁移和积累具有重要作用.由于不同粒径的有机无机复合体中有机物和矿物质的结合方式不同,导致它们在对污染物的束缚能力及生物有效性等方面都存在差异.污染物在土壤微环境中的空间分异性,很大程度上受有机无机复合体分配的制约,进而影响其土-水和土-气界面的环境迁移性和生物有效性.底泥是形成沉积岩的物质,一般为母岩的风化产物、火山物质、有机物质等沉积岩的原始物质成分,目前,但也有部分来源于岸边被冲刷进入到水体中的土壤,因

此,底泥和岸边土壤在组分上具有一定的关联性.关于底泥和土壤有机无机复合体对磷的吸附研究并不多见.

磷从农田土壤进入河流、水库等水体是连续动态的变化过程,其在土-水界面和泥-水界面间的迁移转化是相互联系和影响的(Kim *et al.*, 2011),这一过程决定了农业面源对水体的污染贡献(Smith *et al.*, 2006; Lake *et al.*, 2007).因此,有必要研究河流底泥及岸边土壤对磷的吸附特征,进而了解通过面源途径由土壤进入到底泥中的磷的迁移转化及在不同粒级固相介质间的再分配.基于此,本研究选择长春市新立城水库中的底泥及岸边土壤为研究对象,通过室内模拟吸附试验研究磷在传输过程中,底泥、土壤及二者有机无机复合体(包括砂粒、粉粒、粘粒)对磷的吸附特性和能力,并分析不同粒级复合体对磷的吸附贡献,从而判断以上固相物质对该流域水体磷迁移所起的作用.这对于全面了解磷素从农田土壤进入水体的迁移转化机制,以及水体富营养化的防控具有重要的理论意义.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 供试底泥和土壤样品的采集及有机无机复合体的制备

选择长春新立城水库和河岸带土壤为研究对象,在新立城水库(125°22'05" E, 43°40'43" N)内布设5个采样点(水体中心1个,浅水区4个),采集0~10 cm底泥样品.与此对应在岸边20 m范围内,采用蛇形采样法,采集地表0~10 cm的土壤(土壤类型为黑土)样品5份,每个样品重约1 kg.将采集的样品带回实验室自然风干,去除动植物残留物及砂石后,采用四分法分别获取1 kg的土壤样品和底泥样品,磨碎过60目筛.采用超声分散法(熊毅, 1974)提取不同粒径有机无机复合体,包括砂粒(>20 μm)、粉粒(2~20 μm)、粘粒(<2 μm),提取出的复合体风干后用于吸附实验使用.供试底泥和土壤样品的主要理化性质见表1.

表1 样品的基本理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of samples

样品	pH	容重/ (g·cm ⁻³)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	全氮	全磷	速效氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)
土壤	6.81	1.18	20.17	14.54	0.12%	0.09%	103.30	22.40
底泥	6.47	1.79	13.65	16.29	0.13%	0.11%	198.40	70.10

2.2 底泥、土壤及其有机无机复合体对磷的吸附实验

2.2.1 吸附热力学 称取若干份过 60 目筛的风干底泥、土壤样品及二者的有机无机复合体样品各 2.500 g,置于 100 mL 玻璃三角瓶中,依次加入磷浓度为 0、3、5、10、15、25、40、60、80、100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液 50 mL,支持电解质为 KCl ($0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).室温下振荡 24 h,将悬浊液转移到离心管中,以 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速离心 10 min 后,小心倾倒获取上清液,用钼锑抗比色法测定上清液中的磷,即得到平衡后溶液中磷的浓度,差减法获得吸附量,每个处理设置 3 次重复.用 Langmuir 和 Freundlich 方程对数据进行拟合分析.

2.2.2 吸附动力学 选择磷的浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进行底泥、土壤及二者有机无机复合体对磷的吸附动力学实验,吸附时间分别为 0、0.25、0.5、1、2、5、10、24、32、48 h,其它操作同热力学吸附实验.用一级动力学方程、二级动力学方程、Elovich 方程对数据进行拟合分析.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 底泥、土壤及其有机无机复合体对磷吸附的热力学特征

用平衡法研究底泥、土壤体系的吸附现象时,常采用 Langmuir 方程和 Freundlich 方程来拟合其固体表面吸附量和平衡溶液浓度之间的关系.根据磷吸附实验数据绘制等温吸附曲线,结果见图 1,拟合参数见表 2.由图 1 可以看出,自然水体底泥和土壤对磷的吸附均符合 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线,两个等温吸附方程拟合程度均达极显著水平,可决系数在 0.901~0.984 之间.由表 2 中的数据可以看出,底泥对磷的最大吸附量 Γ_{max} ($1018 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 约为土壤对磷的最大吸附量的 3 倍 ($374 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).一些研究结果表明,底泥中氮、磷和有机质含量对其吸附磷具有重要影响 (Lopez *et al.*, 1996; 张新明等, 2001).通常情况下,随着底泥碎屑程度的增加,其有机质、氮、磷的含量也随之增加 (刘巧梅等, 2002),其对磷的吸附量、吸附效率也会增加 (金相灿等, 1990).本研究表 1 中的数据显示,底泥中有机质、氮、磷含量均高于岸边土壤,这是造

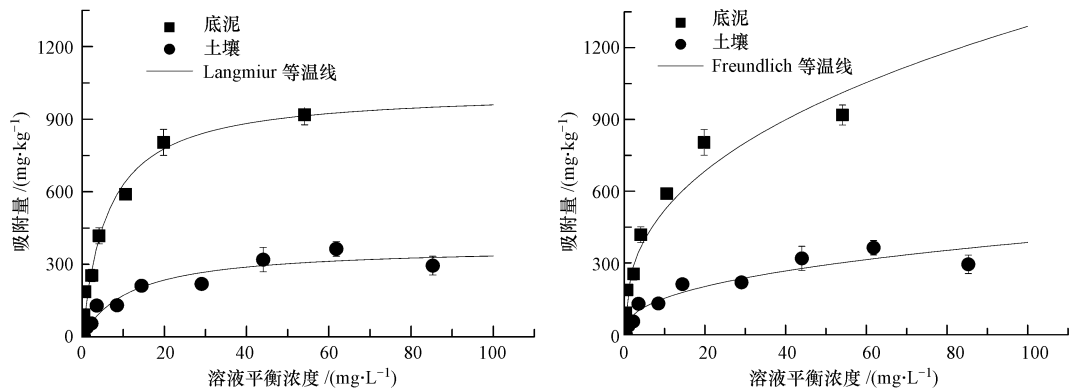


图 1 底泥和土壤对磷吸附的 Langmuir (a) 和 Freundlich (b) 等温线

Fig.1 Langmuir (a) and Freundlich (b) isotherm of adsorption of sediment and soil for phosphorus

表 2 底泥、土壤及其有机无机复合体吸附磷的热力学方程相关参数

Table 2 Relative parameters of thermodynamics equation for adsorption of phosphorus on sediment, soil and their complexes

吸附质	Langmuir 方程				Freundlich 方程			吸附质	Henry 线性方程		
	$\Gamma_{\text{max}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$K_L/$ ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)	$\Gamma_{\text{max}} \cdot K_L/$ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	R^2	$K_F/$ ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)	n	R^2		$K_V/$ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$m/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	R^2
土壤	374	0.085	0.032	0.935	60	2.48	0.901	土壤-砂粒	1.785	18.1	0.886
底泥	1018	0.162	0.165	0.984	210	2.54	0.942	底泥-砂粒	2.917	37.8	0.945
土壤-粘粒	363	0.291	0.106	0.876	104	3.20	0.840	土壤-粉粒	5.453	-15.8	0.903
底泥-粘粒	925	0.112	0.104	0.961	158	2.37	0.954	底泥-粉粒	4.632	44.5	0.908

注: Γ_{max} 为最大吸附量; K_L 为 Langmuir 吸附能常数; $\Gamma_{\text{max}} \cdot K_L$ 表示固液体系吸附溶质时的缓冲能力; K_F 为 Freundlich 平衡常数; n 为无量纲常数; K_V 为分配系数, 即表征固体颗粒对污染物吸附程度的量; m 为纵截距, 即添加磷浓度为 0 时土壤磷的解吸量.

成底泥对磷的吸附量大于土壤的直接原因.吸附能常数(K_L)是反映吸附能力的重要参数, K_L 值越大,表明固相物质对磷酸根离子的吸附速率相对越快.底泥和土壤对磷的吸附能常数分别为 $0.162 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.085 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$,说明同种条件下底泥对磷的吸附速率大于土壤. $\Gamma_{\max} \cdot K_L$ 表示固相体系吸附溶质时的缓冲能力(袁东海等,2005),从表2中的 $\Gamma_{\max} \cdot K_L$ 值可以看出,底泥固液体系对磷的缓冲能力最强.表明在自然水体系中,磷浓度变化较大时,底泥能维持较好的对磷的净化作用.但另外一方面,水体环境条件变化时,底泥也是水体磷污染的较大来源.对于底泥和土壤, Freundlich 吸附等温曲线方程的常数 n 变化不大, K_F 值变化较大,说明在一定浓度范围内,决定底泥和土壤对磷吸附能力的是 K_F 值的大小. K_F 值愈大,其吸附量愈大,即底泥对磷的吸附量大于土壤.

底泥及土壤各复合体对磷的吸附热力学数据见图2,拟合参数见表2.由图可知,粘粒复合体对磷的吸附均很好地符合 Langmuir 和 Freundlich 方程,两个等温吸附方程的拟合程度均达极显著水平,可决系数在 $0.840 \sim 0.961$ 之间,而粉粒复合体和砂粒复合体对磷的吸附符合 Henry 线性方程.在实验浓

度范围内,粘粒复合体对磷的吸附量均大于粉粒复合体和砂粒复合体的吸附量.由表2可以看出,底泥粘粒复合体的最大吸附量($925 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)是土壤粘粒复合体最大吸附量($363 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的2.5倍,底泥粘粒复合体对磷的吸附缓冲能力 $\Gamma_{\max} \cdot K_L$ ($0.104 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$)与土壤粘粒复合体相当 ($0.106 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$). Henry 线性方程拟合参数中的 K_L 代表固相物质对磷的吸附程度,由图可知,底泥、土壤粉粒复合体对磷的吸附量均大于砂粒复合体,且土壤粉粒复合体对磷的吸附量大于底泥粉粒复合体,而土壤砂粒复合体对磷的吸附量小于底泥砂粒复合体对磷的吸附量.这是由于不同粒径的颗粒具有不同的比表面积和质量,对磷在固液界面上交换的影响存在差异(金相灿等,1990).一般来讲,吸附颗粒中粘粒含量高,表面积大,则表面能强,对磷的吸附量就越大(周孝德等,1998).底泥、土壤粉粒和砂粒复合体的吸附等温线是穿过浓度坐标而不通过原点的交叉式曲线,即吸附等温方程的截距 $m \neq 0$,这是由于天然固相介质中往往吸附一定量的磷,而这部分已经结合在固相介质上的磷与吸附实验中吸附的磷在固液分配性质和结合力上可能不同造成的(Jin *et al.*, 2013;潘纲,2003).

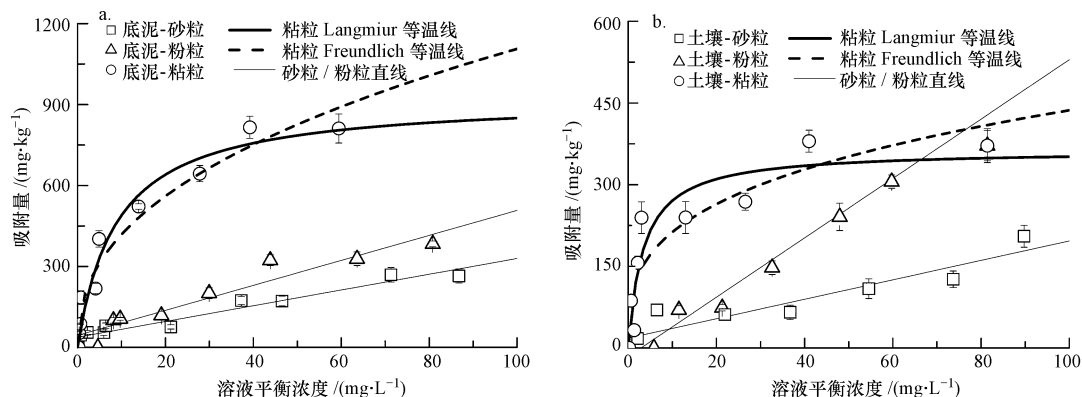


图2 底泥和土壤有机无机复合体对磷吸附的热力学等温线

Fig.2 Langmuir and Freundlich isotherm of adsorption of sediment and soil complexes for phosphorus

3.2 底泥、土壤及其有机无机复合体对磷吸附的动力学特征

利用一级动力学方程、Elovich 方程和双常数方程(Khaled *et al.*, 2009)拟合水体底泥、岸边土壤及二者有机无机复合体对磷的吸附动力学数据,结果见图3,拟合参数见表3.由表3中的可决系数可知,底泥、土壤及其二者的有机无机复合体对磷的吸附动力学数据均符合一级动力学方程.Elovich 方程和

双常数方程.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.在吸附的初始阶段,吸附速率很快,这是因为磷主要吸附在固相物质的外表面.当外表面达到吸附饱和时,磷进入到粒子间,主要由颗粒的内表面进行吸附(Jellali *et al.*, 2011).底泥、土壤及其粘粒复合体对磷的吸附基本在24 h达到平衡,而底泥、土壤粉粒和砂粒复合体对磷的吸附基本在10 h达到平衡,这一结果与其它

地区沉积物吸附磷的结果一致(刘敏等, 2002).

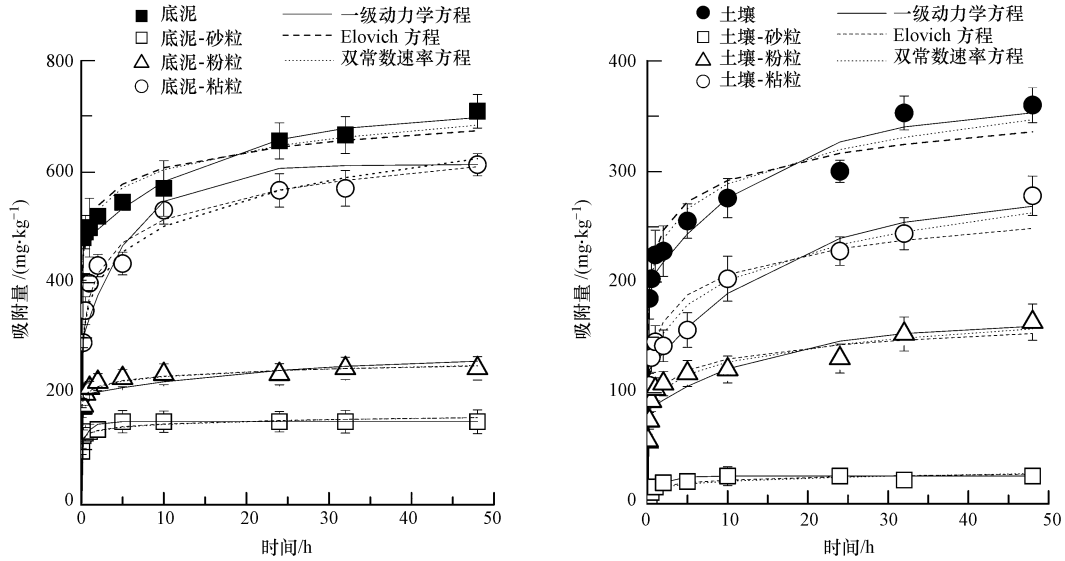


图 3 底泥和土壤有机无机复合体对磷吸附的动力学曲线

Fig.3 Adsorption dynamics of phosphorus on sediment, soil and their complexes

表 3 底泥和土壤有机无机复合体对磷吸附的动力学拟合参数

Table 3 The fitted parameters of adsorption dynamics of phosphorus on sediment, soil and their complexes

吸附质	一级动力学方程 ($\ln(1-q_t/Q_e) = -k_1 t$)			Elovich 方程 $q_t = a_1 + b_1 \ln t$			双常数方程 $q_t = k_2 t^m$		
	$Q_e /$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$k_1 /$ h^{-1}	R^2	a_1	b_1	R^2	k_2	m	R^2
土壤	0.573	0.942	0.954	145.9	26.6	0.914	137.1	0.166	0.964
土壤-砂粒	0.864	0.514	0.939	13.5	3.4	0.908	13.2	0.186	0.814
土壤-粉粒	0.488	0.938	0.824	97.0	14.7	0.951	94.1	0.134	0.945
土壤-粘粒	0.450	0.936	0.951	227.9	27.9	0.908	220.9	0.117	0.948
底泥	0.342	0.937	0.927	509.9	42.6	0.935	503.1	0.797	0.953
底泥-砂粒	0.314	0.319	0.871	129.1	7.2	0.834	128.7	0.516	0.803
底泥-粉粒	0.264	0.960	0.662	205.4	11.6	0.950	204.6	0.053	0.936
底泥-粘粒	0.528	0.854	0.864	375.0	60.7	0.977	364.8	0.139	0.951

注: Q_e 为平衡时的最大吸附量; k_1 为一级动力学方程速率常数; a_1 和 k_2 均为常数; b_1 和 m 均为速率系数或表现扩散系数。

3.3 底泥及土壤各级有机无机复合体对磷的吸附贡献

底泥及土壤各级复合体对磷的吸附贡献见图 4. 由图可知,底泥粘粒复合体和土壤粘粒复合体对磷的吸附贡献较大(60%左右).对于底泥粉粒复合体,在吸附液初始磷浓度为 3~100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,粉粒复合体对磷的吸附贡献大于砂粒复合体,且二者间的差异基本稳定在 5%~10%.对于土壤各级复合体而言,在吸附液初始磷浓度小于 25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,粉粒复合体和砂粒复合体对磷的吸附贡献基本相当,吸附液初始磷浓度大于 25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,粉粒复合体的吸

附贡献逐渐增加,砂粒复合体的吸附贡献基本维持不变,当初始磷浓度为 80、100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,粘粒复合体和粉粒复合体的吸附贡献相等.有研究表明,颗粒对磷的吸附除了与有机质、氮和磷的含量有关外,还与 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等金属氧化物的含量有正相关关系,与 SiO_2 的含量具有负相关关系(刘敏等, 2002; Slomp *et al.*, 1998).而从化学组成上看, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等金属氧化物优先分布在粘粒复合体中,而 SiO_2 则主要分布在砂粒复合体中.因此,粘粒复合体由于具有较大的比表面积和较高的金属氧化物等活性基团,使得其对磷的吸附贡献最大.

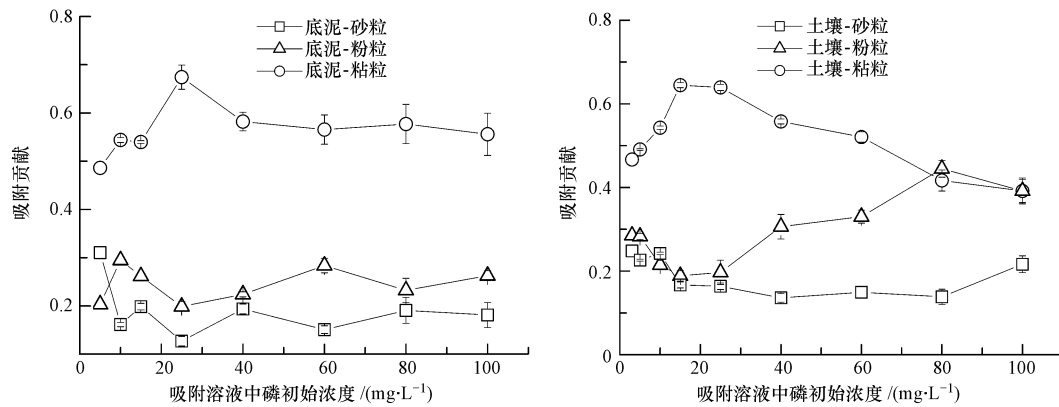


图4 底泥和土壤有机无机复合体对磷的吸附贡献

Fig.4 Adsorption contribution of sediment, soil and their complexes for phosphorus

4 结论 (Conclusions)

1) 对于长春新立城水库底泥及岸边土壤及二者有机无机复合体对磷的吸附特征研究表明, 自然水体底泥对磷的吸附大于岸边土壤对磷的吸附, 且二者对磷的吸附热力学均符合 Langmuir 方程和 Freundlich 方程。当磷浓度变化较大时, 底泥能维持较好的对磷的净化作用。底泥和土壤对磷的吸附能常数分别为 $0.162 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.085 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$, 说明同种条件下底泥对磷的吸附速率大于土壤。

2) 在实验浓度范围内, 对于底泥及岸边土壤各级复合体, 粘粒复合体对磷的吸附量最大, 对磷的吸附贡献最大, 且吸附符合 Langmuir 方程和 Freundlich 方程; 其次为粉粒复合体, 砂粒复合体对磷的吸附量最小, 且二者对磷的吸附均符合 Henry 方程。

3) 自然水体底泥、岸边土壤及二者有机无机复合体对磷的吸附动力学均符合一级动力学方程、Elovich 方程和双常数方程, 且底泥、土壤及二者粘粒复合体对磷的吸附基本在 24 h 达到平衡, 而底泥、土壤的粉粒和砂粒复合体对磷的吸附基本在 10 h 达到平衡。

责任作者简介: 赵兰坡 (1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业资源与环境的研究工作。科研成果先后获省部级科技进步一等、二等、三等奖, 近期发表论文近 100 余篇。E-mail: zhaolanpo12@163.com.

参考文献 (References):

Hahn C, Prasuhn V, Stamm C, *et al.* 2012. Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall

intensities [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 153: 65-74

黄凯, 郭怀成, 刘永, 等. 2007. 河岸带生态系统退化机制及其恢复研究进展[J]. *应用生态学报*, 18(6): 1373-1382

Jellali S, Wahab M A, Hassine R B, *et al.* 2011. Adsorption characteristics of phosphorus from aqueous solutions onto phosphate mine wastes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 169 (1/3): 157-165

金相灿, 屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 211-235

Jin X D, He Y L, Kirumba G, *et al.* 2013. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics of the sediment in the Yangtze River estuary reservoir [J]. *Ecological Engineering*, 55: 62-66

Khaled A, Nemr A E, El-Sikaily A, *et al.* 2009. Removal of Direct N Blue-106 from artificial textile dye effluent using activated carbon from orange peel: Adsorption isotherm and kinetic studies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1/3): 100-110

Kim M K, Kwon S K, Jung G B, *et al.* 2011. Phosphorus losses from agricultural soils to surface waters in a small agricultural watershed [J]. *Biosystems Engineering*, 109(1): 10-14

Lake B A, Coolidge K M, Norton S A, *et al.* 2007. Factors contributing to the internal loading of phosphorus from anoxic sediments in six Maine, USA, lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 373(2/3): 534-541

李冬林, 金雅琴, 张纪林, 等. 2008. 秦淮河河岸带典型区域土壤重金属污染分析与评价[J]. *浙江林学院学报*, 25(2): 228-234

刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 2002. 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*, 57(4): 397-406

刘巧梅, 刘敏, 许世远, 等. 2002. 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*, 21(3): 29-33

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

潘纲. 2003. 亚稳平衡态吸附(MEA)理论-传统吸附热力学理论面临

- 的挑战与发展[J].环境科学学报, 23(2): 156-173
- Shafqat M N, Pierzynski G M. 2013. The effect of various sources and dose of phosphorus on residual soil test phosphorus in different soils [J]. CATENA, 105: 21-28
- Slomp C P, Malschaert J F P, van Raaphorst W. 1998. The role of adsorption in sediment-water exchange of phosphate in North sea continental margin sediments [J]. Limnol Oceanogr, 43(5): 832-846
- Smith D R, Warnemuende E A, Haggard B E, *et al.* 2006. Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance[J]. Ecological Engineering, 27(1): 71-78
- Sutton M, Oenema O, Erisman J W, *et al.* 2011. Too much of a good thing[J]. Nature, 472(7342): 159-161
- 夏运生, 李阳红, 史静, 等. 2010. 滇池宝象河流域土壤磷的累积及吸附特征研究[J]. 土壤学报, 47(2): 325-333
- 熊毅. 1974. III. 有机化合物与粘粒的相互作用[J]. 土壤农化, (5): 1-14
- 熊毅, 陈家坊. 1990. 土壤胶体(第三册). 土壤胶体的性质[M]. 北京: 科学出版社. 487-513
- Yakutina O P. 2011. Phosphorus content in sediment and eroded soils in the southeastern part of West Siberia[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 140(1/2): 57-61
- 袁东海, 张孟群, 高士祥, 等. 2005. 几种粘土矿物和粘粒土壤吸附净化磷素的性能和机理[J]. 环境化学, 24(1): 7-11
- 张新明, 李华兴, 刘远金. 2001. 磷酸盐在土壤中吸附与解吸研究进展[J]. 土壤与环境, 10(1): 77-80
- 周孝德, 韩世平, 陈惠君. 1998. 环境因素对滇池底泥磷吸附的影响[J]. 水利学报, (增刊): 12-17