

3种人工湿地基质对磷的吸附特性

刘霄^{1,2} 黄岁樑^{1,2*} 刘学功³

(1. 南开大学环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300457; 2. 南开大学环境科学与工程学院天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室水环境数值模拟研究室, 天津 300071; 3. 天津市水利科学研究院, 天津 300061)

摘要 选用页岩、陶粒和砾石3种基质进行等温吸附和吸附动力学试验, 研究其对磷的吸附特性。结果表明, Freundlich 和 Langmuir 方程均能较好地拟合各基质对磷的吸附特征, 并且用 Freundlich 方程的拟合效果要好于 Langmuir 方程; 基质对磷的理论饱和吸附量大小依次为页岩 (527.992 mg/kg) > 陶粒 (328.165 mg/kg) > 砾石 (129.729 mg/kg); 页岩最大磷吸附量随粒径增加而减小; 各基质对磷的吸附过程分为快、中、慢3个阶段, 3种基质对磷的吸附速率依次为页岩 > 陶粒 > 砾石; 准二级动力学方程、双常数方程和 Elovich 方程均能较好地描述人工湿地基质对磷的吸附动力学特征, 但从相关系数来看, 准二级动力学方程的描述更为准确。

关键词 基质 磷 吸附等温线 吸附动力学

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)10-3367-06

Characteristics of phosphorous adsorption on three substrates used in constructed wetland

Liu Xiao^{1,2} Huang Sui-liang^{1,2} Liu Xue-gong³

(1. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300457, China; 2. Numerical Simulation Group for Water Environment, Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Tianjin Hydraulic Science Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract The phosphorous adsorption characteristics of three substrates (shale, haydite, gravel) in constructed wetland were studied by isotherm adsorption and adsorption kinetics experiment. The results showed that both Freundlich and Langmuir equations were well fitted for describing the adsorption characteristics of these substrates. To simulate the equilibrium phosphorous adsorption data, the Freundlich equation was better than the Langmuir equation. The maximum phosphorus adsorption capacity of shale increased as the grain size of the material decreased. The phosphorous theoretical saturated adsorption capacity of three substrates followed the order shale (527.992 mg/kg) > haydite (328.165 mg/kg) > gravel (129.729 mg/kg). The process of adsorption could be divided into fast, middle and slow stages. The rate of adsorption followed that shale > haydite > gravel. Pseudo second order kinetics, dual constant and Elovich equations could be suitable to describe adsorption characteristics of three substrates. In terms of correlation coefficient, Elovich equation was the best model.

Key words substrate; phosphorous; adsorption isotherm; adsorption kinetics

磷是水体富营养化的主要控制因子, 一般认为当水体中总磷浓度大于 0.02 mg/L 时, 对水体富营养化起明显的促进作用^[1]。有效去除水体中的磷污染物, 已成为防治水体富营养化的主要途径^[2]。

人工湿地除磷技术具有投资少、运行费用低、处理效果好、操作简单、环境友好等优点, 逐渐成为一种新兴的污水处理工艺^[3]。基质除磷被认为是人工湿地中磷去除的主要方式^[4]。基质比表面积、孔隙率、粒径级配等物理性质和 Ca、Fe、Mg、Al 含量等

化学性质影响湿地水流过程及实际水质净化效果。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51079068); 天津市科技支撑计划重点项目 (09ZCGYSF00400); 水利部公益性行业科研专项子课题 (200801135); 国家水体污染控制与治理重大专项 (2008ZX07314-005-001, 2009ZX07209-001)

收稿日期: 2011-08-16; **修订日期:** 2011-11-11

作者简介: 刘霄 (1980~), 女, 博士研究生, 主要从事水污染控制方面的研究。E-mail: kmliuxiao@163.com

* 通讯联系人, E-mail: slhuang@nankai.edu.cn

用于湿地除磷的基质很多,常见的有:砾石、页岩、陶粒、沸石、干渣等^[5-7]。湿地基质的选择大多依据基质的最大磷吸附量,一些学者采用 Freundlich 和 Langmuir 等经典等温吸附模型研究了不同基质吸附除磷的效果和机理^[8,9],认为充分利用当地资源,选择合适的人工湿地基质,是提高人工湿地净化能力的关键措施。目前关于人工湿地基质吸附动力学模型及其适用性的研究较少^[10]。

本文参考天津部分基质种类和价格,选择该地区常见、经济上可行的人工湿地基质页岩、陶粒和砾石为研究对象,通过室内实验研究其理化性质、等温吸附特性及吸附动力学特性,为选择合适的人工湿地基质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料的来源与物理性质

人工湿地基质页岩、陶粒和砾石均取自于天津蓟县。页岩的主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MnO ;陶粒的主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO ;砾石的主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 。测定基质的 pH、干容重、孔隙率、水力渗透系数等部分物理性质,其中 pH 采用电位法(水土比为 2.5:1)测定,基质干容重和孔隙率采用标准土壤学方法测定^[11],水力渗透系数按照达西渗透原理测定^[12]。

1.2 实验方法

1.2.1 等温吸附实验

准确称取粒径为 0.5 ~ 1.0 mm 的页岩、陶粒和砾石各 1 g 于 100 mL 具塞离心管中,分别加入 50 mL 由 0.02 mol/L 的 KCl 溶液配制的磷质量浓度为 0、5、10、20、30、40 和 50 mg/L 的 KH_2PO_4 溶液。各离心管中加入 2 滴氯仿以防止微生物活动,置于水浴恒温振荡器中,以 200 r/min、温度 25℃ 振荡 24 h,振荡完毕后在 5 000 r/min 下离心 10 min,取上清液过 0.45 μm 微孔滤膜,用钼锑抗比色法测定滤液中磷的质量浓度。实验在相同条件下设置 3 个平行。吸附量的计算如下:

$$X = (C_0 - C)v/m \quad (1)$$

式中:为单位质量基质对磷的吸附量(mg/kg);为磷溶液的初始质量浓度(mg/L);为吸附后溶液磷的平衡浓度(mg/L);为溶液的体积(L); m 为基质的质量(kg)。

1.2.2 基质粒径对吸附除磷的影响

分别称取粒径 < 0.5 mm、0.5 ~ 1.0 mm 和 1.0

~ 2.0 mm 的页岩各 1 g,置于 100 mL 具塞离心管中,分别加入 50 mL 由 0.02 mol/L 的 KCl 溶液配制的磷质量浓度为 0、5、10、20、30、40 和 50 mg/L 的 KH_2PO_4 溶液。各离心管中加入 2 滴氯仿以防止微生物活动,置于水浴恒温振荡器中,以 200 r/min、(25 ± 1)℃ 振荡 24 h,振荡完毕后在 5 000 r/min 下离心 15 min,上清液经过滤充分稀释后用钼锑抗比色法测定磷含量。

1.2.3 吸附动力学实验

准确称取粒径为 0.5 ~ 1.0 mm 的页岩、陶粒和砾石各 1 g,置于 100 mL 具塞离心管中,分别加入 50 mL 由 0.02 mol/L 的 KCl 溶液配制的磷质量浓度为 10 mg/L 的 KH_2PO_4 溶液,置于温度 25℃,转速 200 r/min 的水浴恒温振荡器中连续振荡。每隔一定时间(0.5、1、2、4、8、12、24 和 48 h)取出离心管,在 5 000 r/min 下离心 10 min,上清液经过抽滤后用钼锑抗比色法测定其中磷的质量浓度,根据磷溶液浓度的变化,计算基质对磷的吸附量。

2 结果与分析

2.1 供试基质的物理性质

根据 pH、干容重、孔隙率和水力渗透系数的测定方法测定 3 种供试基质的物理性质,结果如表 1 所示。干容重可衡量基质的质地密实程度,干容重较大的基质质地比较密实,干容重较小的基质质地较疏松。孔隙率可以衡量基质的持水性,孔隙率越大,基质的持水性能越好。从表 1 可以看出,供试基质中陶粒的孔隙率最大,页岩次之,砾石最小。干容重以陶粒最小,页岩次之,砾石最大。

基质的水力渗透系数的大小是影响湿地过流能力的重要参数,水力渗透系数过小,将导致湿地中基质对水流的阻力和水头损失增大,容易引起湿地堵塞问题。从表 1 的测定结果来看,供试基质的渗透系数从大到小排序为:砾石 > 陶粒 > 页岩。基质渗透系数是影响人工湿地系统中水流特性的一个重要参数,渗透系数越大,表明该基质对水流的阻力越小。

表 1 供试基质的物理性质
Table 1 Physical characteristics of substrates used in the experiment

基质	pH	干容重 (g/cm^3)	孔隙率 (%)	水力渗透系数 $K(\text{cm}/\text{s})$
页岩	8.12	1.32	50.3	10
陶粒	7.65	1.16	54.0	42
砾石	7.89	1.48	48.2	48

2.2 供试基质对磷的等温吸附特性

根据页岩、陶粒和砾石对溶液中磷的等温吸附实验结果(表 2),分别绘制其吸附等温线(图 1)。从图 1 可以看出,基质类型影响基质对磷的吸附效果,不同基质对磷的吸附效果表现为:页岩 > 陶粒 > 砾石。基质对磷的等温吸附过程可以分为两个阶段:初始阶段,随着溶液浓度的增加,基质对磷的吸附量迅速增大,吸附等温线比较陡;当溶液浓度增大到一定程度后,吸附作用逐渐减弱,进一步增加溶液浓度,磷吸附量增长缓慢,吸附作用趋于平衡。

表 2 供试基质平衡吸附浓度

Table 2 Equilibrium adsorption concentration of substrates used in the experiment (mg/L)

初始磷溶液 浓度	平衡吸附浓度		
	页岩	陶粒	砾石
5	2.404	3.358	4.208
10	5.730	7.086	8.632
20	13.472	16.036	18.166
30	22.364	25.252	27.862
40	31.742	34.962	37.854
50	41.038	44.556	47.832

表 3 3 种基质对磷的吸附等温模型及其相关参数

Table 3 Phosphorous adsorption isotherm models and related parameters of three substrates

基质	Linear 线性模型			Freundlich 模型			Langmuir 模型			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>R</i> ²	<i>k</i>	<i>X_m</i>	<i>k · X_m</i>	<i>R</i> ²
页岩	7.677	169.376	0.879	95.583	2.304	0.978	0.123	527.992	64.832	0.998
陶粒	4.207	105.876	0.876	53.893	2.247	0.958	0.102	328.165	33.453	0.998
砾石	1.437	52.428	0.765	25.204	2.145	0.916	0.125	129.729	16.174	0.994

根据 Langmuir 模型可知,3 种基质对磷的理论饱和吸附量大小依次为页岩(527.992 mg/kg) > 陶粒(328.165 mg/kg) > 砾石(129.729 mg/kg),页岩对磷的吸附能力最强,其次为陶粒,砾石对磷的吸附能力最差。

在 Langmuir 方程中,*k* 为吸附结合能,*k* 值越大,基质与磷之间的结合就越稳定。从表 3 可以看出 3 种基质与磷之间的结合能的大小顺序为砾石 > 页岩 > 陶粒。*k · X_m* 为最大缓冲容量,反映固液体系吸附溶质时的缓冲能力^[13]。3 种基质相比较,页岩的缓冲容量最大,陶粒次之,砾石的缓冲容量最小(约为页岩的 1/4)。由此可见,页岩固液体系的缓

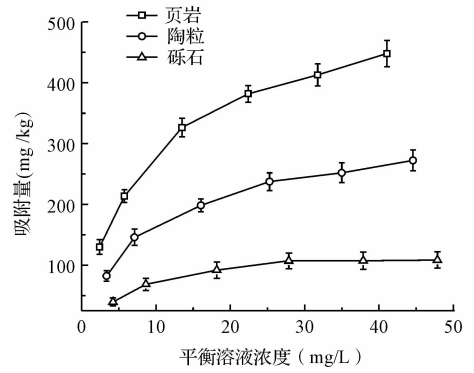


图 1 不同基质对磷的等温吸附曲线

Fig. 1 Phosphorous isotherm adsorption curves of different substrates

采用 Linear 线性、Freundlich 和 Langmuir 模型来拟合图 1 中 3 种基质吸附磷的过程。从 3 种基质等温吸附曲线拟合的相关系数来看(表 3),Linear 线性模型拟合结果相对较差,不适合模拟上述 3 种基质的等温磷吸附曲线。Freundlich 方程与 Langmuir 方程均能很好地描述页岩、陶粒和砾石对磷的等温吸附特征,相关系数均大于 0.9,这与袁东海等^[9]、赵桂瑜^[13]的研究结果相一致。并且用 Freundlich 方程的拟合效果要好于 Langmuir 方程,这说明了各基质对磷的吸附介于单层或多层吸附之间,且吸附表面存在着一定的不均匀性^[14]。

冲能力最强,即在磷溶液浓度变化较大的情况下,其体系仍能维持较好的除磷效果,从这一点来看,页岩是较好的净化磷的人工湿地基质。

在 Freundlich 方程中,*K* 值反映了基质吸附磷能力的大小,*K* 值越大,吸附量也越大,对磷的吸附能力越强^[15]。3 种基质 *K* 值大小依次为:页岩 > 陶粒 > 砾石,说明页岩对磷的吸附能力最强,其次为陶粒,砾石对磷的吸附能力最弱。这与 Langmuir 吸附等温模型的结论一致。

2.3 基质粒径对吸附除磷的影响

基质粒径对页岩吸附除磷的影响情况如图 2 所示。随着溶液浓度的增加,不同粒径的页岩对磷的

吸附量均逐渐增加;页岩粒径越小,吸附磷的能力越强。溶液浓度为 50 mg/L 时,当页岩粒径从 1.0 ~ 2.0 mm 降低至 0.5 ~ 1.0 mm 和 <0.5 mm 时,其磷吸附量从 213.7 mg/kg 增加至 448.1 mg/kg 和 647.3 mg/kg。Seo 等^[16]研究不同粒径牡蛎壳基质的磷吸附性能时,也发现基质粒径增加会导致基质最大磷吸附量减小。

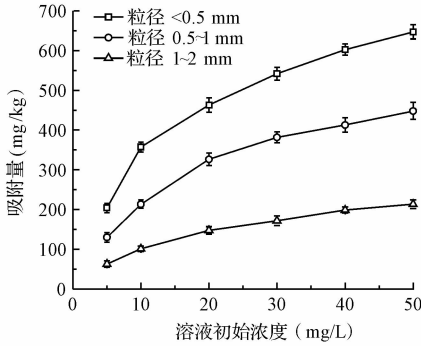


图2 不同粒径页岩对磷的等温吸附曲线
Fig. 2 Isotherm adsorption curves of phosphorous by shale with different grain sizes

2.4 3种基质对磷的吸附动力学特性

3种基质对磷的吸附量随时间的动态变化过程如表4和图3所示。不同基质磷吸附动力学曲线相似,即随反应时间延长,磷吸附量增加,在12 h左右接近或达到吸附平衡。

吸附动力学曲线斜率的大小反映了磷吸附速率的大小^[17],从整个吸附过程来看,3种基质对磷的吸附速率大小依次为页岩>陶粒>砾石。根据吸附速率的变化,将3种基质对磷的吸附过程分为快、中、慢3个阶段,表明各基质固相表面存在着高、中、低能量的吸附位点^[17]。在吸附反应的初始阶段(0~2 h),吸附曲线表现为陡峭上升,各基质对磷的吸附速率较大,吸附量上升很快;吸附反应中期(2~12 h),吸附速率有所降低,吸附量上升幅度较小,这可能是由于基质对磷的吸附位点已部分达到饱和;吸附阶段后期(12~48 h),基质对磷的吸附速率和吸附量都很小,接近或达到吸附平衡。

表5列出了不同基质在3个反应阶段对磷的平均吸附速率。可以看出,3种基质对磷的吸附速率差异显著,特别是在0~2 h内,页岩对磷的吸附速率最快(52.18 mg/(kg·h)),其次为陶粒(36.80 mg/(kg·h)),砾石对磷的吸附速率最慢(17.98 mg/(kg·h))。

表4 不同作用时间下供试基质对磷的吸附量

作用时间 (h)	吸附量 (mg/kg)		
	页岩	陶粒	砾石
0.5	43.6	36.7	18.3
1	78.3	58.4	29.5
2	107.3	77.3	37.8
4	138.8	98.4	48.2
8	174.1	114.5	59.6
12	202.3	130.4	62.7
24	213.5	145.7	68.4
48	220.7	153.9	74.3

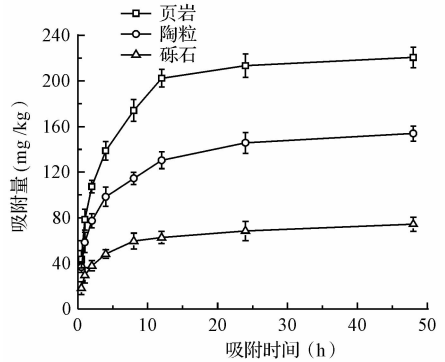


图3 不同基质对磷的吸附动力学曲线
Fig. 3 Kinetic phosphorous adsorption curves of different substrates

表5 基质对磷的平均吸附速率

基质	吸附速率 (mg/(kg·h))		
	0~2 h	2~12 h	12~48 h
页岩	52.18	9.22	0.48
陶粒	36.80	5.00	0.61
砾石	17.98	2.43	0.31

2.5 供试基质对磷的吸附动力学模型分析

与吸附等温模型相比,吸附动力学模型能够在一定程度上反映基质的吸附除磷机理。采用一级动力学方程、准二级动力学方程、双常数方程和 Elovich 方程对磷的吸附动力学过程进行拟合,结果如表6所示。从相关系数来看,准二级动力学、双常数方程和 Elovich 方程均能较好地描述人工湿地基质对磷的吸附动力学特征,相关系数均达到0.9以上;一级动力学方程的拟合效果较差。总体而言,准二级动力学模型对3种基质吸附动力学过程的描述最为

准确,相关系数均大于 0.99。准二级动力学模型能够更好地反映 3 种基质的吸附动力学过程,说明该模型包含了吸附作用的所有过程,如基质颗粒外部的液膜扩散、吸附过程和颗粒内部的扩散过程等^[13]。

表 6 3 种基质的吸附动力学方程及其相关参数

Table 6 Kinetic phosphorous adsorption models and related parameters of three substrates

基质	一级动力学方程			准二级动力学方程			双常数方程			Elovich 方程		
	a	k_1	R^2	k_2	X_e	R^2	a	k	R^2	a	k	R^2
页岩	2.049	0.008	0.619	0.001926	232.5581	0.999	4.310	0.345	0.900	79.95	41.45	0.970
陶粒	2.135	0.005	0.673	0.002669	161.2903	0.996	4.034	0.304	0.930	58.75	26.56	0.990
砾石	2.223	0.002	0.630	0.006057	76.9231	0.998	3.341	0.294	0.918	29.51	12.51	0.984

3 讨论与结论

湿地基质的去污效果通常决定实际基质的选择,但基质的物理性质对去污效果影响较大,不能忽略,也应该作为湿地基质筛选的依据^[18]。综合考虑干容重和孔隙率,可以发现页岩和陶粒是轻质多孔、持水性较好的基质,适合作为人工湿地去除污染物的主要基质,砾石适合作为起支撑作用的底料;从基质渗透系数来看,砾石和陶粒最适宜作为人工湿地基质,而页岩次之。

Freundlich 和 Langmuir 模型均能较好地拟合各基质对磷的吸附特征,各基质对磷的理论饱和吸附量大小依次为页岩 (527.992 mg/kg) > 陶粒 (328.165 mg/kg) > 砾石 (129.729 mg/kg),页岩对磷的吸附能力最强,其次为陶粒,砾石对磷的吸附能力最差。页岩是粘土岩的一种,其成分复杂,除粘土矿物(如高岭石、蒙脱石等)外,还含有许多碎屑矿物(如石英、长石、云母等)和自生矿物(如铁、铝、锰的氧化物与氢氧化物等)。基质中游离氧化铁、铝和胶体氧化铁、铝含量越高,其固定形成的磷酸铁盐和磷酸铝盐的数量越多,基质净化磷能力越强^[4],这可能是页岩吸附效果好的原因之一。陶粒为粘土经高温烧结而成,含有交换性钙和水溶性钙、胶体氧化铁及氧化铝较高,因而具有较好的吸附效果。砾石主要成分是 SiO₂,其活性氧化物的含量比较低,砾石对磷的吸附主要是物理吸附^[13],对磷的吸附效果较差。

当页岩粒径从 1.0 ~ 2.0 mm 降低至 0.5 ~ 1.0 mm 和 <0.5 mm 时,其最大磷吸附量从 213.7 mg/kg 增加至 448.1 mg/kg 和 647.3 mg/kg。基质粒径的减小,有利于提高基质本身的比表面积和磷的扩散速率,引起单位质量基质表面磷吸附点位增加可能是基质最大磷吸附量提高的重要原因。

各基质对磷的吸附过程分为快、中、慢 3 个阶段,3 种基质对磷的吸附速率依次为页岩 > 陶粒 > 砾石。

准二级动力学方程、双常数方程和 Elovich 方程均能较好地描述人工湿地基质对磷的吸附动力学特征,但从相关系数来看,准二级动力学方程的描述更为准确。

参考文献

- [1] 张志勇,冯明雷,杨林章,等. 人工模拟污水净化系统去除生活污水氮、磷效果的比较研究. 土壤学报, 2008, 45(3):466-475
Zhang Zhiyong, Feng Minglei, Yang Linzhang, et al. Comparative study on efficiency of simulated constructed wetlands removing nitrogen and phosphorous from domestic sewage. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3):466-475 (in Chinese)
- [2] 赵桂瑜,周琪,秦琴. 干渣吸附处理含磷污水的研究. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):925-928
Zhao Guiyu, Zhou Qi, Qin Qin. Phosphorus removal from wastewater by adsorption on blast furnace slag. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(3):925-928 (in Chinese)
- [3] 金晓丹,王敦球,张华,等. 鸡蛋壳对磷的吸附特性研究. 水处理技术, 2010, 36(4):56-59
Jin Xiaodan, Wang Dunqiu, Zhang Hua, et al. Study on phosphate adsorption characteristics of eggshell. Technology of Water Treatment, 2010, 36(4):56-59 (in Chinese)
- [4] 袁东海,景丽洁,张孟群,等. 几种人工湿地基质净化磷素的机理. 中国环境科学, 2004, 24(5):614-617
Yuan Donghai, Jing Lijie, Zhang Mengqun, et al. Mechanism of phosphorus purification in some kinds of substrates constructed wetland systems. China Environmental Science, 2004, 24(5):614-617 (in Chinese)
- [5] 赵桂瑜,秦琴,周琪,等. 几种人工湿地基质对磷素的吸

- 附作用研究. 环境科学与技术, **2006**, 29(6):84-87
Zhao Guiyu, Qin Qin, Zhou Qi, et al. Phosphorus adsorption by some substrates in constructed wetland system. Environmental Science and Technology, **2006**, 29(6):84-87 (in Chinese)
- [6] 王全金, 李丽, 李忠卫. 四种植物潜流人工湿地脱氮除磷的研究. 环境污染与防治, **2008**, 30(2):33-36
Wang Quanjin, Li Li, Li Zhongwei. Removal of nitrogen and phosphorus by four plants of subsurface constructed wetlands. Environmental Pollution & Control, **2008**, 30(2):33-36 (in Chinese)
- [7] 汤显强, 李金中, 刘学功, 等. 人工湿地填料磷去除效果的影响因素分析. 农业环境科学学报, **2008**, 27(2):748-752
Tang Xianqiang, Li Jinzhong, Liu Xuegong, et al. Influencing factors of phosphorus removal performance of constructed wetlands substrates. Journal of Agro-Environment Science, **2008**, 27(2):748-752 (in Chinese)
- [8] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明, 等. 几种人工湿地基质磷的吸附特性研究. 农业环境科学学报, **2007**, 26(3):894-898
Cui Lihua, Zhu Xizhen, Luo Shiming, et al. The characteristic of phosphorous adsorption on different substrates used in constructed wetland. Journal of Agro-Environment Science, **2007**, 26(3):894-898 (in Chinese)
- [9] 袁东海, 张孟群, 高士祥, 等. 几种粘土矿物和粘粒土壤吸附净化磷素的性能和机理. 环境化学, **2005**, 24(1):7-11
Yuan Donghai, Zhang Mengqun, Gao Shixiang, et al. The abilities and mechanisms of adsorption phosphorous in some clay minerals and soils. Environmental Chemistry, **2005**, 24(1):7-11 (in Chinese)
- [10] 刘波, 陈玉成, 王莉玮, 等. 4种人工湿地填料对磷的吸附特性分析. 环境工程学报, **2010**, 4(1):44-48
Liu Bo, Chen Yucheng, Wang Liwei, et al. Phosphorous adsorption characteristics of four substrates in constructed wetland. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2010**, 4(1):44-48 (in Chinese)
- [11] Prochaska C. A., Zouboulis A. I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. Ecological Engineering, **2006**, 26(3):293-303
- [12] Drizo A., Frost C. A., Grace J., et al. Physical-chemical screening of phosphate removing substrates for using in constructed wetland systems. Water Research, **1999**, 33(17):3595-3602
- [13] 赵桂瑜. 人工湿地除磷基质筛选及其吸附机理研究. 上海: 同济大学博士学位论文, **2007**
Zhao Guiyu. Screening and adsorption mechanisms on substrates for phosphorus removal in constructed wetlands. Shanghai: Doctoral Dissertation of Tongji University, **2007** (in Chinese)
- [14] 胡绳, 刘云, 董元华, 等. 改性长石对磷的吸附热力学和动力学研究. 环境工程学报, **2009**, 3(11):2100-2104
Hu Sheng, Liu Yun, Dong Yuanhua, et al. Thermodynamic and kinetic of phosphorus adsorption onto calcined feldspar. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2009**, 3(11):2100-2104 (in Chinese)
- [15] 袁东海, 高士祥, 景丽洁, 等. 几种粘土矿物和粘土对溶液中磷的吸附效果. 农村生态环境, **2004**, 20(4):1-5
Yuan Donghai, Gao Shixiang, Jing Lijie, et al. Phosphorus adsorption of some clay minerals and soils. Rural Eco-Environment, **2004**, 20(4):1-5 (in Chinese)
- [16] Seo D. C., Cho J. S., Lee H. J., et al. Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland. Water Research, **2005**, 39(11):2445-2457
- [17] 王振华, 朱波, 何敏, 等. 紫色土泥沙沉积物对磷的吸附-解吸动力学特征. 农业环境科学学报, **2011**, 30(1):154-160
Wang Zhenhua, Zhu Bo, He Min, et al. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption kinetics of sediments from purple soils. Journal of Agro-Environment Science, **2011**, 30(1):154-160 (in Chinese)
- [18] Drizo A. Phosphate and ammonium removal from wastewater, using constructed wetland systems. Ph. D. thesis. Edinburgh, UK: The University of Edinburgh, **1998**