

几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析

袁东海¹, 景丽洁², 高士祥¹, 尹大强^{1*}, 王连生^{1*}

(1. 南京大学环境学院污染控制与资源化国家重点实验室, 南京 210093; 2. 吉林化工学院环境科学系, 吉林 132022)

摘要:通过基质磷素等温吸附、净化磷素污染效果和基质磷素饱和吸附后磷素释放实验,研究了砂子、沸石、蛭石、黄褐土、下蜀黄土、粉煤灰和矿渣 7 种人工湿地基质净化磷素污染效果和影响因素,并评价了基质磷素饱和吸附后磷素释放可能造成的二次污染风险.结果表明: Freundlich 和 Langmuir 等温吸附曲线方程均能很好地描述上述基质磷素吸附过程,其磷素理论饱和吸附量依次为矿渣 > 粉煤灰 > 蛭石 > 表土 > 下蜀黄土 > 沸石 > 砂子. 磷素的净化能力依次为矿渣 > 粉煤灰 > 蛭石 > 表土 > 下蜀黄土 > 沸石 > 砂子. 模拟污水磷素净化实验也证实矿渣、粉煤灰、蛭石净化磷素污染效果较好,表土和下蜀黄土次之,沸石和砂子净化磷素污染效果较差. 矿渣和粉煤灰等钙素含量较高的碱性基质,影响磷素吸附净化效果的主要因素是基质的全钙含量,碱性条件下,基质全钙含量越高,其吸附的磷素越多,净化磷素污染的效果越好. 砂子、沸石、下蜀黄土、黄褐土和蛭石等活性胶体氧化铁铝含量较多的中性基质,影响其磷素吸附净化效果的主导因素是其胶体氧化铁的含量,胶体氧化铁能促进基质吸附磷素效应,提高磷素净化能力. 基质磷素饱和吸附后磷素释放实验也表明:除砂子基质磷素释放比例较高以外,其它基质磷素释放的比例很低,加强人工湿地基质的管理,上述人工湿地基质一般不会对水体环境造成二次污染.

关键词:人工湿地; 基质; 磷素; 净化

中图分类号: X53; X703; S153 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)01-0051-05

Analysis on the Removal Efficiency of Phosphorus in Some Substrates Used in Constructed Wetland Systems

YUAN Dong-hai¹, JING Li-jie², GAO Shi-xiang², YIN Da-qiang¹, WANG Lian-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Waste Control and Resources Reuses, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Department of the Environmental Science, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)

Abstract: Constructed wetlands are widely used to purify wastewater in some developing countries. As filter substrates in such wetland, these substrates play important role on removal of pollutants from wastewater. Selecting suitable substrates is one of the effective ways to improve the performance of constructed wetland on treating wastewater. In this study the phosphorus adsorption capacities of sand, zeolite, vermiculite, two clay soils, two industrial by-products named steel slag and fly ash are examined for their potential use as substrate in constructed wetland. Both Freundlich and Langmuir adsorption isotherms are very fit for describing the adsorption characteristics of these substrates. Two industrial by-products including steel slag and fly ash have higher phosphorus adsorption capacity, which had 50490 and 17934 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. Followed vermiculite, two clay soils named yellow cinnamon and xiaoshu loess with phosphorus adsorption capacity of 3473, 1893.7 and 1582 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. The zeolite and sand had the least phosphorus adsorption capacity with 813.7 and 302 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. The experiments on purifying phosphorus from synthesize domestic sewage using these substrates also demonstrate this conclusion. The ability of removal phosphorus of these substrates have closely relationship with their makeup and chemical properties such as pH, total calcium and reactive calcium, reactive Fe, Al including poorly coastal and amorphous Fe, Al oxide. The steel slag and fly ash with higher reactive Ca, such as calcium oxide, have better adsorption capacity of phosphorus than other substrates, and the substrates which contained more reactive Fe also have a better ability of adsorption phosphorus than others. To assess the environmental risk for using these substrates above, the phosphorus desorption characteristics of these substrates are also studied. The process of phosphorus desorption quickly reached equilibrium in no more than 4 hours in the experiments, the ratio of desorption and adsorption of phosphorus in substrates above is lower except sand. To take suitable measures to manage substrates above, the risk of pollution of phosphorus from these substrates will be controlled.

Key words: constructed wetland; substrates; phosphorus; purification

人工湿地是一种高效低耗,具有广泛应用前景的污水处理系统,基质是人工湿地的重要组成部分,对于净化污水中的污染物,特别是磷素污染物有着重要的作用^[1-3].受条件限制,目前潜流型人工湿地大多使用当地的河砂和砾石作为基质材料,表面流型人工湿地多采用当地土壤作为基质材料.一些

收稿日期: 2004-02-20; 修订日期: 2004-05-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2002CB412307); 南京大学污染控制与资源化国家重点实验室开放基金(NJUESK03005).

作者简介: 袁东海(1964-),男,安徽桐城人,博士后,副教授,主要从事湿地生态、流域利用和管理,土壤侵蚀和保持等领域的研究和教学工作. E-mail: donghaiyuan@163.com

* 通信联系人

学者研究了砂子基质和土壤基质吸附净化磷素污染物的特征和机理,认为砂子和土壤基质净化磷素污染物的能力同其活性钙、胶体氧化铁和铝含量有关,一些砂子和土壤基质活性钙、胶体氧化铁和铝含量较低,磷素净化能力有限,添加化学絮凝剂和沉淀剂有助于增强水体中磷素等污染物的净化效果^[4-12]。还有一些学者研究了粘土矿物和其它天然矿物以及部分工业副产物净化磷素污染物的效果和机理,认为充分利用当地的自然资源,选择合适的人工湿地基质材料,是构建人工湿地,提高人工湿地净化能力的关键措施^[13-22]。本研究以我国常见的湿地基质河砂、黏重土壤黄褐土及其母质下蜀黄土、黏土矿物沸石和蛭石以及工业副产物粉煤灰和矿渣为研究对象,研究它们净化磷素污染的能力和效果,为选择合适的人工湿地基质提供理论依据和实践措施。

1 材料和方法

1.1 试验材料来源

人工湿地基质砂子取自于长江下游南京段六合区支流河床,沸石取自于安徽繁昌,蛭石取之于河北灵寿,粉煤灰取自于金陵电厂,黄褐土和下蜀黄土取自于南京市郊闲置土地,矿渣取自于南京梅山钢铁公司资源分公司,上述材料球磨后过 100 目筛子备用,其主要矿物成分经 X 射线衍射分析,砂子主要为石英,沸石主要为丝光沸石,黄褐土主要为伊利石、高岭石和石英,下蜀黄土主要为伊利石、高岭石和石英,蛭石主要为蛭石、长石,粉煤灰主要为石英、氧化钙和方解石,矿渣为主要菱铁矿、氧化钙、方解石和白云石。

1.2 人工湿地基质磷素吸附等温线实验

准确称取上述基质 1g 左右 3 份(平行试验)于 50 mL 塑料离心管中,加入由 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液配置的不同磷素浓度(以 P 计,下同)的 KH_2PO_4 标准溶液 25 mL 置于恒温摇床中,180 ~ 190 r/min, $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 摇 48 h 后离心,测其上清液磷素浓度,根据其浓度的变化,计算基质吸附磷素的数量,取平均值,绘制基质磷素吸附等温曲线。

1.3 人工湿地基质磷素饱和吸附后等温释放实验

取经磷素饱和吸附的上述基质 1g 左右 3 份(平行试验)于塑料离心管中,加入 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液 25 mL 置于恒温摇床中,180 ~ 190 r/min, $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 摇不同的时间后离心,测其上清液磷素浓度,计算其解吸的磷素数量,取平均值,绘制其磷素解吸曲线。

1.4 人工湿地基质实际净化污水磷素污染物效果的实验

根据南京市排水监测站提供的南京市城镇生活污水磷素含量,用 KH_2PO_4 标准溶液配置的磷素浓度为 $5, 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 生活污水及磷素浓度为 $30, 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 超高浓度生活污水,其中取 100 mL 上述人工配置生活污水于 250 mL 离心管中,加入基质 5.00 g,180 ~ 190 r/min, $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 摇 2 h 后,再静置 10 h 后离心,测上清液磷素的浓度,计算其磷的去除率。

1.5 测定方法

磷素含量的测定用钼锑抗比色法^[23];基质矿物全量的测定用 X 射线荧光分析法(南京大学现代分析中心);游离氧化态 Fe、Al 含量用 DCB 法提取(连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠提取法),等离子发射光谱法测定(南京大学现代分析中心);胶体氧化态 Fe、Al 用草酸和草酸铵缓冲液提取,等离子发射光谱法测定(南京大学现代分析中心);pH 值测定用酸度计法(基质:水 = 1:1);比表面用 N_2 吸附法测定(南京大学地球科学系);羟基释放量用 NaF 浸提,酸碱滴定法测定;水溶性钙的测定用蒸馏水浸提(基质:水 = 1:5),原子吸收法测定。基质主要矿物含量和部分理化性质详见表 1 和表 2。

表 1 供试基质的主要矿物含量(以氧化物计)/%

氧化物	砂子	沸石	黄褐土	下蜀黄土	蛭石	粉煤灰	矿渣
SiO_2	92.37	74.82	68.39	70.70	40.85	50.67	9.41
Al_2O_3	3.14	10.76	13.19	12.90	13.31	29.51	0.92
CaO	0.16	1.22	0.94	0.87	2.59	6.55	42.35
Fe_2O_3	0.64	1.22	5.36	5.03	13.71	3.87	28.26
K_2O	2.07	4.41	2.25	2.27	3.18	0.70	0.091
Na_2O	0.26	1.84	1.18	1.22	0.40	0.51	0.15
MgO	0.12	0.15	1.50	1.08	14.56	0.61	7.21
MnO	0.011	0.086	0.10	0.11	0.11	0.014	2.28
P_2O_5	<0.001	<0.001	0.087	0.071	0.016	0.11	2.74

2 结果与分析

2.1 供试基质磷素吸附等温线的分析

对于恒温条件下固体表面发生的吸附现象,常用 Freundlich 和 Langmuir 方程来表示其表面的吸附量和介质中溶质平衡浓度之间的关系:

对于 Freundlich 方程,表达式如下: $G = kc^{1/n}$, 其中 G 为达到吸附平衡时固体表面的吸附量, c 为达到吸附平衡时介质中溶质的浓度, k 和 n 为常数。

表 2 供试基质部分理化性质

Table 2 Physico-chemical characteristics of substrates used in experiments

性质	砂子	沸石	黄褐土	下蜀黄土	蛭石	粉煤灰	矿渣
pH(1:1)	7.11	7.82	6.77	7.12	7.42	11.87	13.54
比表面/ $m^2 \cdot g^{-1}$	1.89	199.70	34.27	31.57	61.35	3.08	9.60
羟基释放量/ $cmol \cdot kg^{-1}$	0.50	3.35	2.17	3.27	9.85	68	131
游离氧化铁(Fe_2O_3)/ %	0.40	0.42	2.25	1.64	1.94	1.42	14.06
胶体氧化铁(Fe_2O_3)/ %	0.14	0.21	0.64	0.37	1.36	0.60	11.02
游离氧化铝(Al_2O_3)/ %	0.088	0.18	0.59	0.47	1.25	0.60	0.41
胶体氧化铝(Al_2O_3)/ %	0.033	0.11	0.27	0.19	0.78	0.49	0.12
水溶性钙(CaO)/ %	0.016	0.027	0.040	0.032	0.087	0.62	3.70

对于 Langmuir 方程,表达式为: $\frac{1}{G} = \frac{1}{G^0} + \left| \frac{A}{G^0} \right| \left| \frac{1}{c} \right|$, 其中 G 为吸附平衡时固体表面的吸附量, c 为吸附平衡时介质中溶质的浓度, G^0 为理论

饱和吸附量, A 为常数.

根据等温吸附实验结果,绘制等温吸附曲线,其吸附等温线符合 Freundlich 吸附等温线和 Langmuir 吸附等温线,均达极显著水平,其吸附等温线方程见表 3.

表 3 供试基质磷素吸附等温曲线方程及其相关参数

Table 3 The Freundlich and Langmuir adsorption isotherms of phosphorus in substrates in experiments

基质	Freundlich 吸附方程			Langmuir 吸附方程		
	k	n	$r (n=10)$	A	$G^0 / mg \cdot kg^{-1}$	$r (n=10)$
砂子	20.8	2.01	0.985**	43.8	302.1	0.994**
沸石	44.2	1.80	0.984**	43.6	813.7	0.996**
黄褐土	103.6	1.86	0.990**	50.6	1893.5	0.953**
下蜀黄土	92.64	1.88	0.985**	45.6	1582	0.973**
蛭石	406.9	1.61	0.987**	8.40	3473	0.905**
粉煤灰	1.07×10^4	13.19	0.901**	10.7	17934	0.998**
矿渣	3.75×10^4	21.32	0.851**	1.42	50490	0.998**

* 显著水平; ** 极显著水平

虽然 Freundlich 方程和 Langmuir 方程都适合描述本研究中供试基质的磷素吸附等温曲线,但从相关系数大小来看, Freundlich 方程似乎更适合描述黄褐土、下蜀黄土和蛭石的磷素吸附等温曲线,而 Langmuir 方程似乎更适合描述砂子、沸石、粉煤灰和矿渣的磷素吸附等温曲线.这是因为在本研究中,砂子、沸石、粉煤灰和矿渣的磷素吸附量增加到一定程度时,即便溶液中磷素浓度增加,其磷素吸附量变化不大,而黄褐土、下蜀黄土和蛭石的磷素吸附量仍有不同程度地增加趋势,产生这种现象的原因,还需进一步研究.一般情况下 Langmuir 方程可以描述固体表面吸附介质中溶质的全部过程,从 Langmuir 等温吸附方程可以看出,供试基质磷素理论饱和吸附量依次为矿渣 > 粉煤灰 > 蛭石 > 黄褐土 > 下蜀黄土 > 沸石 > 砂子.矿渣、粉煤灰净化磷素的能力较强,其次为蛭石、黄褐土、下蜀黄土,沸石和砂子净化磷素的能力较弱.在构建人工湿地时可以优先考虑净化磷素能力较强的基质,或者在普通基质中参加这

些基质.

2.2 供试基质磷素净化性能影响因素的分析

不少研究表明人工湿地基质净化磷素的能力受自身组成和理化性质影响较大^[3-9,19-22].本研究粉煤灰和矿渣基质,由于其是原煤燃烧和炼钢过程的副产物,在高温条件下,其本身所含的钙素和填料中所含的钙素,极易在高温条件下形成氧化钙,并导致基质的 pH 值升高,这种条件下氧化钙极易和磷素形成磷酸钙盐沉淀,钙和氧化钙含量是粉煤灰和矿渣吸附磷素的主要影响因素.砂子、沸石、蛭石、黄褐土和下蜀黄土 5 种理化性质基本相近的基质简单相关分析表明:磷素理论饱和吸附量同基质的羟基释放量、全钙、水溶性钙、游离氧化铁、胶体氧化铁、游离氧化铝和胶体氧化铝的含量呈显著和极显著的正相关关系,其相关系数分别为 0.897*、0.893*、0.971**、0.791、0.976**、0.995** 和 0.970** ($n=5$),同 pH 值和比表面没有相关性不显著,一是表明 pH 值在中性范围里对基质磷素吸附作用不明

显,二是表明基质吸附磷素的机制主要为化学机制,基质比表面对其磷素吸附作用影响程度较小.需要指出的是基质磷素吸附能力是综合因素作用的结果,为了分析其主导影响因素,本研究运用逐步回归数学分析方法,对影响砂子、沸石、蛭石、黄褐土和下蜀黄土5种基质磷素吸附能力的上述9种因素进行了筛选和分析,结果表明影响上述5种基质磷素吸附能力的主要因素是其胶体氧化铁的含量,其回归方程式为: $Y = 310.4 + 2394.3 X$, 式中 X 为胶体氧化铁的含量(%), Y 为磷素吸附量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 偏相关系数 r 为 0.976, F 值和 t 值分别为 60.57 和 7.78, F 检验和 t 检验均达极显著水平($F_{0.05} = 0.004$; $t_{0.05} = 0.004$). 这是因为胶体氧化铁含有较多的正电荷,易和负电荷的磷酸根离子结合形成磷酸铁盐沉淀,增强基质对磷素的吸附能力.由此可见,砂子、沸石、蛭石、黄褐土和下蜀黄土5种活性氧化铁铝含量较为丰富,pH值中性附近的基质,影响其磷素吸附能力的主导因素为胶体氧化铁的含量,而粉煤灰和矿渣全钙含量丰富,pH值碱性基质,影响其磷素吸附能力的主导因素为其全钙含量,选择含钙丰富或者含铁丰富的基质是提高人工湿地磷素净化能力的重要手段.

2.3 供试基质实际净化磷素效果的分析

从试验结果可以看出(表4),粉煤灰、矿渣在设定的磷素浓度 0~50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围里,均能很好地去除生活污水中的磷素污染,其去除率达到 99% 以上,蛭石在设定的磷素浓度 0~30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围里,黄褐土、下蜀黄土和沸石在设定的磷素浓度 0~10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围里,其磷素去除率也达到 99% 以上,这是因为基质对磷素的吸附主要为化学吸附,在磷素

表5 磷饱和和基质磷素的解吸量及解吸比例

Table 5 The ratio of desorption and maximum adsorption of phosphorus in substrates saturated with phosphorus

矿物类型	砂子	沸石	黄褐土	下蜀黄土	蛭石	粉煤灰	矿渣
理论最大吸附量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	302	813.7	1893.5	1582	3473	17934	50490
最大解吸量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	28.5	23.6	89.0	83.5	75.0	24.4	175.8
解吸百分比/%	9.43	2.90	4.84	5.28	2.16	0.14	0.35

从表5可以看出,矿渣解吸量最大,其次为黄褐土、下蜀黄土、蛭石,砂子和沸石解吸量较少.从解吸百分比来看,砂子吸附的磷素解吸率最大,其次是下蜀黄土、黄褐土,再次为沸石和蛭石,解吸率最低的是粉煤灰和矿渣.综合砂子饱和吸附量和最大解吸量来看,尽管其解吸率较大,但是因为其饱和吸附量较低,最大解吸量也较低,又因其吸附的磷素解吸可以在很短的时间达到平衡,可以在其达到饱和之后,

浓度较低,基质中钙或者铁铝等活性物质含量较高的情况下,受溶度积常数的控制,这种吸附比较彻底,平衡液中磷素浓度很低.随着磷素浓度的增加,当磷素浓度为 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,蛭石也能很好的去除生活污水中的磷素污染,其去除率达到 98% 以上,黄褐土和下蜀黄土在磷素浓度为 30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,也有着较好的磷素去除效果,其去除率也达 90% 以上,当磷素浓度达到 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其磷素的去除率显著下降,黄褐土和下蜀黄土磷素去除率降到 80% 以下,考虑到生活污水磷素的浓度大多数不会超过 30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右(据南京市排水监测站),黄褐土、下蜀黄土也能做人工湿地的基质;砂子和沸石去磷效果较差,在选择它们做人工湿地基质时,要考虑到加强这类基质强化净化磷素污染的手段,如:一是增加湿地植物的生物量,增强植物去磷的能力,二是在不影响植物生长和不造成二次污染的前提下添加人工或天然的化学絮凝剂或沉淀剂.

表4 几种人工湿地基质实际净化磷素污染的效果/%

Table 4 The performance of phosphorus removal from synthesize wastewater in some substrates/%

初始浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	砂子	沸石	黄褐土	下蜀黄土	蛭石	粉煤灰	矿渣
5	95.8	>99.0	>99.0	>99.0	>99.0	>99.0	>99.0
10	68.6	>99.0	>99.0	>99.0	>99.0	>99.0	>99.0
30	28.3	76.4	97.7	90.8	>99	>99.0	>99.0
50	17.1	52.2	78.4	73.1	98.6	>99.0	>99.0

2.4 供试基质磷素饱和和吸附后磷素释放特征及磷素二次污染的安全评价

基质磷素饱和后磷素释放试验表明,其磷素解吸在 2h 到 4h 左右即可达到平衡,其最大吸附量详见表5.

立即用含磷量很低或者不含磷的水进行解吸,收集其解析液进行处理,或者加强植被系统的管理,通过增加植被系统磷素净化能力而延迟其达到饱和时间,一般不会造成磷素二次污染问题.同样,沸石一般情况下如处理得当,也不会造成吸附的磷素二次污染.对于黄褐土、下蜀黄土这类磷素吸附量比较大的人工湿地基质,因其通透性较差原因,比较适合做表面流人工湿地基质,在处理生活污水磷素污染时,

表层土壤易达到磷素吸附饱和,在加强表层土壤磷素含量水平监测,辅以土层耕翻交换和植被管理手段,短期内整个土壤基质不会达到磷素吸附饱和状态,一般也不会造成磷素二次污染问题.对于蛭石、粉煤灰和矿渣这类磷素吸附能力很强的基质,可以作为基质吸附磷素能力的强化剂,按比例掺在砂子和土壤这类基质中或者作为磷素吸附层置于砂子和土壤基质中间,可以提高砂子或者本地土壤基质的磷素净化能力,一般也不会存在磷素二次污染问题.

3 结语

目前潜流型人工湿地常用的基质普遍为河砂和砾石,净化效果差,即使是以当地土壤作为表面流人工湿地基质,其表层土壤也往往易被污染物吸附饱和.有人建议添加化学絮凝剂和沉淀剂,但有可能造成这些化学添加剂二次环境污染.开发当地吸附能力较强的人工湿地基质或者利用吸附能力较强的无污染的工业副产物作为人工湿地基质或者添加剂,是解决人工湿地基质净化能力低下的首选措施.从本研究的结论来看:砂子作为人工湿地的基质往往显得净化能力不足,但其通透性好,不易堵塞,如果添加吸附磷素能力较强的基质,或者加强人工湿地植被系统的管理,砂子基质仍是潜流型人工湿地首选基质.沸石吸附氮素的效果很好,其通透性也很好,由于沸石的类型较多,对磷素吸附能力差异较大,可以选择吸附磷素能力较强的沸石,作为人工湿地的基质,既可以达到去氮,又可以去磷的目的;蛭石磷素吸附能力较强,酸碱度适中,可以作为磷素吸附剂掺加到砂子、沸石或者土壤基质中,提高其磷素等污染物的净化能力,黄褐土和下蜀黄土因其通透性较差,一般适合做表面流人工湿地基质,尽管其磷素吸附量比较大,但是磷素的吸附过程多发生在表层,表层土壤也易达到饱和,可在土体内掺加吸附磷素能力较强的基质或者吸附剂和沉淀剂或者定期翻耕交换土层;粉煤灰和矿渣吸附磷素能力很强,但其碱性较大,不适合直接作为人工湿地的基质,否则会导致植被死亡,可以在适合植物生长的酸碱度范围里,按一定比例掺加到砂子或者土壤基质里,也可以作为远离植物根系的湿地基质吸附层,既可以避免其对植物的毒害作用,又可以发挥其吸附作用,可以使工业的副产物达到物尽其用的目的.

参考文献:

[1] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing country; a review[J]. E-

cological Engineering, 2001, 16: 545 ~ 560.

- [2] Gopal B. Natural and constructed wetlands for waste water treatment: potential and problems[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(3): 27 ~ 35.
- [3] Drizo A, Frost CA, Grace J, et al. Physico chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1999, 33(17): 3595 ~ 3602.
- [4] Arias C A, Bubba M D, Brix H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds[J]. Water research, 2001, 35(5): 1159 ~ 1168.
- [5] Bubba M D, Arias C A, Brix H. Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds as measured by the Langmuir isotherm[J]. Water Research, 2003, 3390 ~ 3340.
- [6] Yuan G, Lakulich L M. Phosphate adsorption in relationship to extractable iron and aluminum in spodosols[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 343 ~ 346.
- [7] 陈博谦, 王星, 尹澄清. 湿地土壤因素对污水处理作用的模拟研究[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(1): 19 ~ 21.
- [8] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤磷的形态和吸附-解吸特征[J]. 土壤通报, 2003, 34(1): 40 ~ 43.
- [9] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 67 ~ 71.
- [10] Bastin O, Janssens F, Dufey J, et al. Phosphorus removal by synthetic iron oxide-gypsum compound[J]. Ecological Engineering, 1999, 12: 339 ~ 351.
- [11] Chueng K C, Venkitachalam T H. Improving phosphate removal of sand infiltration system using alkaline fly ash[J]. Chemosphere, 21: 243 ~ 249.
- [12] Ann Y, Reddy K R, Delfino J J. Influence of chemical amendments on phosphorus immobilization in soil from a constructed wetland[J]. Ecological Engineering, 2000, 14: 157 ~ 167.
- [13] 薛玉, 张旭, 等. 复合沸石吸氮系统控制暴雨径流污染[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 46(6): 854 ~ 857.
- [14] 徐丽花, 周琪. 不同填料人工湿地处理系统的净化能力研究[J]. 上海环境科学, 2002, 21(10): 603 ~ 605.
- [15] Johansson L, Gustafsson J P. Phosphate removal using blast furnace slags and opoka mechanisms[J]. Water Research, 1999, 34(1): 259 ~ 265.
- [16] 邓雁希, 许虹, 黄玲. 蛭石去除废水中磷酸盐的研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2003, 37(6): 42 ~ 44.
- [17] 尹连庆, 张建平, 董树军, 等. 粉煤灰基质人工湿地系统净化污水的研究[J]. 华北电力大学学报, 1999, 26(4): 76 ~ 79.
- [18] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明, 刘迎湖. 煤渣-草炭基质垂直流人工湿地系统对城市污水的净化效果[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 597 ~ 600.
- [19] 阎存仙, 周红. 粉煤灰处理含磷废水的研究[J]. 上海环境科学, 2000, 19(1): 33 ~ 36.
- [20] Sakadevan K, et al. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1998, 32(2): 393 ~ 399.
- [21] Zhu T, Janssen P D, Mæhlum T, et al. Phosphorus sorption and chemical characteristics of light weight aggregates-potential filter media in treatment wetlands[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 103 ~ 108.
- [22] Gray C A, Schwab A P. Phosphorus-fixing ability of high pH, high calcium coal combustion waste materials[J]. Water Air Soil Pollution, 1993, 69: 309 ~ 320.
- [23] 鲁如坤, 等. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.