

几种土壤改良材料磷 氨氮吸附和硝化作用特性的研究

阳 春¹, 郑向勇^{2,3}, 严 立², 王 崇³, 吴德意³, 孔海南³

(1.重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2.温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州 325027; 3.上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘 要:为了筛选用于太湖地区污水土地处理研究的土壤改良材料,通过磷、氨氮等温吸附实验及室外自然接种 2 个月后的硝化强度测定试验,研究了稻壳、炭化稻壳、蛭石、炉渣、木炭、粉煤灰、沙子、沸石及太湖地区典型土壤潮土的磷、氨氮吸附能力及硝化强度。结果表明,磷理论最大吸附量粉煤灰、炭化稻壳和炉渣大于潮土,依次为 34.364 3、1.366 7、0.386 0、0.376 2(mgP·g⁻¹);氨氮理论最大吸附量沸石、炭化稻壳、蛭石和木炭大于潮土,依次为 2.737 5、1.366 7、0.967 6、0.546 4、0.457 9(mgN·g⁻¹);硝化作用强度木炭、稻壳、炭化稻壳、沙子和沸石大于潮土,依次为 2.286 7、1.656 7、1.046 7、0.726 7、0.680 0、0.533 3(mgN·kg⁻¹·h⁻¹)。通过实验结果,可以选择吸附能力及硝化强度强于潮土的材料,作为开展后期研究的对象。

关键词:潮土;土壤改良材料;磷吸附能力;氨氮吸附能力;硝化强度

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)05-2013-05

Study on the Phosphorus Adsorption, Ammonia Adsorption and Nitrifying Characteristics of Several Soil Amendment Materials

YANG Chun¹, ZHENG Xiang-yong^{2,3}, YAN Li², WANG Chong³, WU De-yi³, KONG Hai-nan³

(1.Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2.School of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325027, China; 3.School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract:To select suitable soil amendment materials for the study of wastewater land treatment systems in Taihu Lake drainage basin of China, Fluvo-aquic soil, which is the typical soil in this area, together with 8 kinds of soil amendment materials, such as rice hull, carbonized rice hull, zeolite, furnace slag, charcoal, sand, roseite and fly ash, were studied on the characteristics of phosphorus adsorption, ammonia adsorption and nitrifying, through the methods of isothermal absorption experiments and nitrifying capacity test after two months of outdoor natural inoculating. Results showed that phosphorus adsorption capacities of fly ash, carbonized rice hull and furnace slag were larger than that of Fluvo-aquic soil, as the value was 34.364 3, 1.366 7, 0.386 0 and 0.376 2(mgP·g⁻¹)respectively; ammonia adsorption capacities of zeolite, roseite, carbonized rice hull or charcoal were larger than that of Fluvo-aquic soil, as the value was 2.737 5, 0.967 6, 1.366 7, 0.546 4 and 0.457 9 (mgN·g⁻¹)respectively; nitrifying capacities of charcoal, rice hull, carbonized rice hull, sand or zeolite were larger than that of Fluvo-aquic soil, as the value was 2.286 7, 1.656 7, 1.046 7, 0.726 7, 0.680 0, 0.533 3 (mgN·kg⁻¹·h⁻¹)respectively. According to the results, to improve the abilities of land wastewater treatment systems that applied in Taihu Lake drainage basin, soil amendment materials with the larger capacities of phosphorus adsorption, ammonia adsorption and nitrifying than that of Fluvo-aquic soil should be chosen for further studies in future.

Keywords:Fluvo-aquic soil; soil amendment materials; phosphorus adsorption capacity; ammonia adsorption capacity; nitrifying capacity

添加土壤改良剂用于促进污染土壤的修复,改善土壤微生物结构,改变土壤中氮磷吸附迁移行为,提

高人工湿地及渗滤沟等污水处理系统的去污性能等方面的研究已经有不少的报道^[1-6]。在本文中,由于需要在太湖地区建立污水土地处理示范工程,作者通过对几种改良材料和潮土(俗称夜潮土)的磷、氨氮吸附能力及硝化作用的性质进行测试,得出改良材料与潮土的定性比较分析结果,从而可以从多种种类的改良

收稿日期:2007-10-26

基金项目:国家十五“863”重大科技专项(2002AA601012-06)

作者简介:阳 春(1975—),男,四川简阳人,博士,讲师,研究方向为水污染控制, E-mail: sunnyspring_yang@hotmail.com

通讯作者:郑向勇 E-mail: oakinyard@163.com

材料中筛选出几种氨氮、磷吸附能力及硝化作用强度较大的改良材料,为后期实验研究及实践应用研究方面提供一定的参考价值。如:研究利用筛选材料改良的污水土地处理实验装置的污水处理性能;研究添加筛选改良材料的实际污水土地处理示范工程的运行性能等,这样就避免了直接应用现有的大量各种改良材料与工程所在土壤混合后进行研究的繁琐劳动,以节省人力物力。

1 材料与方法

1.1 供试样品

本试验选用太湖地区的潮土作为比较对象,改良材料选用廉价易得的稻壳、炭化稻壳、蛭石、炉渣、木炭、粉煤灰、沙子和沸石。

试验用的潮土取自江苏省宜兴市大浦镇水产村的菜园;炉渣取自大浦镇的窑炉,粉碎过 2 mm 筛子;粉煤灰取自大浦镇水泥厂;稻壳取自上海市闵行区农村;沙子取自上海交大建筑工地,过 2 mm 筛子风干;蛭石邮购自河北易县,粉碎过 2 mm 筛子;木炭购自上海市闵行菜市场,粉碎过 2 mm 筛子;沸石邮购自浙江缙云,粉碎过 2 mm 筛子;炭化稻壳用上述稻壳闷烧,表现呈黑色带有少许黄色。

1.2 试验方法

1.2.1 潮土及改良材料的磷吸附能力研究

取各种改良材料及潮土各 1 g 分别加入到 250 mL 的具塞锥形瓶中,各瓶中均分别加入利用磷酸二氢钾配制的磷浓度分别为 3、7、12、24、40 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的吸附液 50 mL,在 25 °C 恒温条件下振荡 24 h,取样分析平衡液的磷浓度,做出 Langmuir 吸附等温线,并计算潮土及各种改良材料的磷吸附容量,以此来判断添加何种材料有利于提高实验土样的磷吸附能力。重复上述试验 2 次,最终结果取 3 次试验的平均值。

1.2.2 潮土及改良材料的氨氮吸附能力研究

取各种改良材料及潮土各 1 g 分别加入到 250 mL 的具塞锥形瓶中,各瓶中均分别加入利用氯化氨配制的氨氮浓度分别为 5、10、15、30、50、70 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的吸附液 50 mL,在 25 °C 恒温条件下振荡 24 h,取样分析平衡液的氨氮浓度,做 Langmuir 吸附等温线,并计算潮土及各种改良材料的氨氮吸附容量,以此来判断添加何种材料有利于提高实验土样的氨氮吸附能力。重复上述试验 2 次,最终结果取 3 次试验的平均值。

1.2.3 潮土及改良材料的硝化强度改良研究

取 100 g 各种改良材料及潮土各自分别用纱布包裹,共做 3 组重复样,平摊后埋入室外绿化草皮地下约 20 cm 处,经过自然接种驯化 2 个月后取出,均称取 15 g 各种材料及潮土,分别放入 250 mL 的锥形瓶中,各加入用磷酸氢二钾、硫酸氨等按比例配制的液体培养基 100 mL,用脱脂棉花塞住,于 25 °C 恒温条件下振荡 24 h,取样分析溶液硝态氮浓度,测定各改良材料及土样培养液的硝态氮浓度,并根据硝态氮浓度计算相应的硝化强度。最终材料的硝化强度采用 3 组测试结果的平均值进行表示^[8]。

1.3 分析项目与计算方法

本试验测定的水质指标磷浓度、氨氮浓度分别采用国家标准的钼锑抗分光光度法和纳氏试剂比色法^[7],硝化强度采用悬浮液培养法进行测定和计算^[8]。

磷吸附容量和氨氮吸附容量的 Langmuir 拟合采用如下公式:

$$C/X = C/X_m + 1/(K \times X_m)$$

式中: C 为平衡时吸附液中的磷或氨氮浓度, X 为根据相应吸附质浓度变化计算而得的单位质量吸附剂所吸附的吸附质的量, K 为常数, X_m 为理论最大吸附量,通过 C/X 和 C 作图,其中斜率的倒数即为 X_m 。

硝化强度的计算方法如下:

$$I = \Delta W / (t \times M)$$

式中: I 为硝化强度, ΔW 为在振荡培养期间培养液中硝化菌氧化氨氮生成的 NO_3^- 量, t 为振荡培养时间, M 为加入的土壤及各种改良材料的质量。

2 结果与讨论

2.1 潮土及改良材料的磷吸附能力研究

各改良材料及潮土的磷吸附特性利用 Langmuir 吸附模型拟合,试验数据结果利用 SPSS 12.0 统计分析,Langmuir 拟合方程,相关系数及磷理论最大吸附量的分析结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,各种材料的磷理论最大吸附量大小次序为:粉煤灰>炭化稻壳>炉渣>潮土>沙子>蛭石>沸石>木炭>稻壳;其相应值为 34.364 3、1.366 7、0.386 0、0.376 2、0.125 0、0.093 8、0.081 3、-0.018 0、-0.199 0($\text{mgP}\cdot\text{g}^{-1}$)。在试验结果中,木炭和稻壳出现吸附量为负值现象,其原因可能在于所用的稻壳和木炭比较干燥,容易吸取吸附溶液中的水分,导致对吸附液中磷浓度的变化造成影响,因此对这两种材料进行 Langmuir 吸附模型拟合求最大吸附量时,等温线时会出现吸附容量为负值的情况。由吸附等温线的相

关系数及其显著性检验结果可以看出,除了木炭、稻壳吸附量为负,拟合结果有待考证之外,炉渣回归方程的相关系数达到显著性水平,其余材料及潮土的回归方程相关系数均达到极显著水平,说明除木炭、稻壳外,利用 Langmuir 吸附模型拟合来判断各种材料的磷吸附能力,结果较为可靠。至于木炭、稻壳虽然拟合效果不好,但是可以从吸附等温线对磷吸附规律同样可以得出与上述吸附量大小次序相同的定性规律。

表 1 改良材料及潮土的磷 Langmuir 等温吸附方程式及其回归参数

Table 1 The phosphorus Langmuir isothermal adsorption equations and their regression coefficients of amendment materials and Fluvo-aquic soil

试样	Langmuir方程	相关系数 R	最大吸磷量 X_m /mgP·g ⁻¹
潮土	$C/X=2.658\ 1C+2.623\ 8$	0.996 3**	0.376 2
沙子	$C/X=8.031\ 8C+164.220\ 0$	0.994 2**	0.125 0
木炭	$C/X=-55.449C+3772.300\ 0$	0.545 8	-0.018 0
炭化稻壳	$C/X=0.731\ 7C+1.570\ 3$	0.997 3**	1.366 7
炉渣	$C/X=2.590\ 5C+33.203\ 0$	0.874 8*	0.386 0
稻壳	$C/X=-5.025\ 8C+15.145\ 0$	0.931 5**	-0.199 0
蛭石	$C/X=10.657\ 0C+70.095\ 0$	0.977 1**	0.093 8
沸石	$C/X=12.294\ 0C+102.380\ 0$	0.996 0**	0.081 3
粉煤灰	$C/X=0.029\ 1C+0.121\ 6$	0.987 5**	34.364 3

注:* 显著水平;** 极显著水平。

粉煤灰对磷的吸附量远远大于其他材料的原因在于粉煤灰中含有的氧化钙等碱性物质,且粉煤灰中含有活性氧化铝、活性氧化硅等比表面积较大的物质^[9],因而对磷的物化吸附、化学反应去除能力较强。稻壳经过炭化后,会暴露出大量比表面积较大的氧化硅^[9],因而其对磷的吸附能力也较强。炉渣中则含有能够吸附磷的氧化钙、氧化铁、氧化铝等能够吸附磷的物质^[11],潮土、沙子、蛭石、沸石中也含有不同数量及类型的吸磷物质。

由于粉煤灰的优良吸磷能力,有不少学者将直接粉煤灰作为人工湿地等污水处理系统的填料^[12,13]以提高人工湿地系统的去污性能。与此类似,建设土地处理系统也可以考虑添加粉煤灰、炭化稻壳、炉渣等磷吸附能力大于处理场地土壤磷吸附能力(本文中为潮土)的改良材料,以提高系统的去污性能。有关添加改良材料后的实际作用及相应的成本问题等方面的研究还需要进一步研究。

2.2 氨氮吸附能力改良

各改良材料及潮土的氨氮的 Langmuir 拟合方程,相关系数及氨氮理论最大吸附量的分析结果如表

2 所示。由表 2 可以看出,各种材料的氨氮吸附能力大小次序为:沸石>炭化稻壳>蛭石>木炭>潮土>粉煤灰>沙子>稻壳>炉渣;其对应的值为 2.737 5、1.476 2、0.967 6、0.546 4、0.457 9、0.390 0、0.293 7、0.158 9、0.068 1(mgN·g⁻¹)。由吸附等温线的相关系数及其显著性检验结果可以看出,除了沙子、炭化稻壳、稻壳、粉煤灰回归方程相关系数显著性水平较差外,其余材料及潮土的回归方程相关系数均达到极显著水平,说明利用 Langmuir 吸附模型拟合来判断除沙子、炭化稻壳、稻壳、粉煤灰外其余材料的氨氮吸附能力,结果较为可靠。至于拟合效果不好的材料,可以从吸附等温线对氨氮吸附规律同样可以得出与上述吸附量大小次序相同的定性规律。

表 2 改良材料及潮土的氨氮 Langmuir 等温吸附方程式及其回归参数

Table 2 The ammonia Langmuir isothermal adsorption equations and their regression coefficients of amendment materials and Fluvo-aquic soil

试样	Langmuir方程	相关系数 R	最大吸磷量 X_m /mgP·g ⁻¹
潮土	$C/X=2.183\ 8C+15.913\ 0$	0.950 2**	0.457 9
沙子	$C/X=3.405\ 0C+442.850\ 0$	0.705 5	0.293 7
木炭	$C/X=1.830\ 2C+16.872\ 0$	0.997 8**	0.546 4
炭化稻壳	$C/X=0.677\ 4C+27.637\ 0$	0.660 1	1.476 2
炉渣	$C/X=14.670\ 5C+286.030\ 0$	0.990 6**	0.068 1
稻壳	$C/X=6.294\ 0C-336.830\ 0$	0.339 7	0.158 9
蛭石	$C/X=1.033\ 5C+6.506\ 0$	0.983 1**	0.967 6
沸石	$C/X=0.365\ 3C+2.304\ 4$	0.983 1**	2.737 5
粉煤灰	$C/X=2.563\ 9C+15.763\ 0$	0.647 3	0.390 0

注:* 显著水平;** 极显著水平。

各种材料对氨氮的去除能力大小可能与材料的表面结构、材料的电负性大小、材料的比表面积、材料的成分等因素有关,如天然沸石中,其表面结构能够对氨氮离子进行物化吸附,其内部的空穴中的阳离子与氨氮能够进行交换,这两种作用构成了沸石的氨氮吸附能力^[14];蛭石在去除氨氮时,也存在着离子交换的过程^[15]。

如同各种材料及土壤对磷吸附特性结果中所做的分析,要提高土地处理系统的氨氮吸附能力时,可以考虑往潮土中添加沸石、炭化稻壳、蛭石和木炭,如关文玲等^[3]的研究表明,在土壤中添加沸石能够抑制氨氮的流失。从污水处理的角度来说,这就意味添加沸石能够提高系统的吸附去除氨氮的能力,但添加土壤改良材料的实际土地污水处理系统的性能研究还

有待于进行。

2.3 硝化强度改良

各改良材料及潮土的平均硝化强度结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,各种材料的硝化强度平均值大小次序为:木炭>稻壳>炭化稻壳>沙子>沸石>潮土>蛭石>炉渣>粉煤灰;其对应的值为 2.286 7、1.656 7、1.046 7、0.726 7、0.680 0、0.533 3、0.150 0、0.063 3、0.010 0($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)。

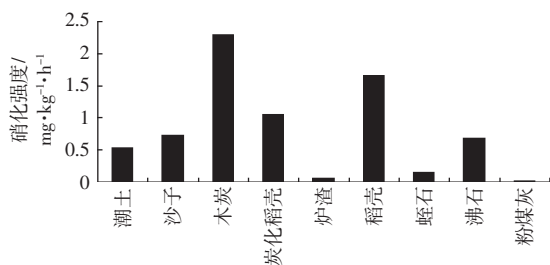


图 1 改良材料及潮土的硝化强度

Figure 1 Nitrifying capacities of amendment materials and Fluvo-aque soil

由于直接利用微生物手段考察土壤中硝化菌的性质比较繁琐困难,而利用测定同一管理方式下不同性质的改良材料和潮土的硝化强度,可以从侧面来体现各种改良材料及土壤适合硝化菌生长程度的情况。对污水处理系统来说,仅仅提高其氨氮吸附能力是不够的,还需要污水处理系统能够适合硝化菌的生长,以提高系统的硝化能力,并在一定程度上能够还原系统的氨氮吸附能力。

硝化强度的影响因素比较复杂,各种材料的粒径大小,比表面积大小,材料的化学组成,材料上所适合生长的其他微生物与硝化菌的竞争、捕食、共生作用等因素^[16,17],对硝化菌的生长可能都有影响,进而影响各种材料及土壤的硝化强度。本实验通过对各种材料的平行试验进行相似处理,可以半定量得看出各材料之间相对硝化强度的大小,对土地处理系统如何添加材料有利于硝化菌生长,提高系统硝化能力,具有一定的参考价值。

3 结论与建议

(1)改良材料及潮土的 Langmuir 拟合磷理论最大吸附量从大到小依次为:粉煤灰>炭化稻壳>炉渣>潮土>沙子>蛭石>沸石>木炭>稻壳,其对应的值为 34.364 3、1.366 7、0.386 0、0.376 2、0.125 0、0.093 8、0.081 3、-0.018 0、-0.199 0($\text{mgP} \cdot \text{g}^{-1}$)。

(2)改良材料及潮土的 Langmuir 拟合氮理论最大吸附量从大到小依次为:沸石>炭化稻壳>蛭石>木炭>潮土>粉煤灰>沙子>稻壳>炉渣,其对应的值为 2.737 5、1.476 2、0.967 6、0.546 4、0.457 9、0.390 0、0.293 7、0.158 9、0.068 1($\text{mgN} \cdot \text{g}^{-1}$)。

(3)改良材料及潮土的硝化强度从大到小依次为:木炭>稻壳>炭化稻壳>沙子>沸石>潮土>蛭石>炉渣>粉煤灰,其对应的值为 2.286 7、1.656 7、1.046 7、0.726 7、0.680 0、0.533 3、0.150 0、0.063 3、0.010 0($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)。

(4)在污水土地处理系统的中,要使通过添加土壤改良剂提高系统的磷吸附能力、氨氮吸附能力及硝化强度,可以考虑添加吸附能力及硝化作用相应值大于土壤(本文中为潮土)相应值的改良材料,有关土地处理系统添加改良材料之后的影响及系统通入生活污水之后的实际运行情况,改良材料于土壤之间的组合复配优化,添加材料的成本问题等方面的研究,还有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 史 莉, 张笑一, 朱淮武. 地沟式污水生态处理系统中土壤及填料吸附机理的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1196-1199.
SHI Li, ZHANG Xiao-yi, ZHU Huai-wu. Mechanism of removal of phosphorus in an under-ground-ditch-pattern sewage zoology treatment system[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2004, 23(6): 1196-1199.
- [2] 谭洪新, 周 琪. 湿地填料的磷吸附特性及潜流人工湿地除磷效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 353-356.
TAN Hong-xin, ZHOU Qi. Characterization of adsorption on phosphorus in stuffings and its removal in substratum in wetland[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(2): 353-356.
- [3] 关文玲, 王旭东, 王 虎, 等. 不同复合材料对氮肥在土壤中氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 140-143.
Guan Wen-ling, WANG Xu-dong, WANG Hu, et al. Effects of different complex materials on ammonia volatilization of nitrogen fertilizer in soil[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2004, 23(1): 140-143.
- [4] 郝秀珍, 周东美. 沸石在土壤改良中的应用研究进展[J]. 土壤, 2003, 2: 103-106.
HAO Xu-zhen, ZHOU Dong-mei. Zeolite application as soil amendment[J]. *Soils*, 2003, 2: 103-106.
- [5] 黄明勇, 王怀锋, 路福平, 等. 海湾泥碱渣和粉煤灰作为园林种植基质的氮素生理类群及生化作用研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1522-1526.
HUANG Ming-yong, WANG Huai-feng, LU Fu-ping, et al. Nitrogen physiological communities and biochemical activities of planting mixture mixed with brackish dredged sediment, caustic sludge and coal ash[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2007, 26(4): 1522-1526.

- [6] 王凯荣, 张玉烛, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 476–481.
- WANG Kai-rong, ZHANG Yu-zhu, HU Rong-gui. Effects of different types of soil amelioration materials on reducing concentrations of Pb and Cd in brown rice in heavy metal polluted paddy soils[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2007, 26(2): 476–481.
- [7] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M] (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 223–279.
- China Environmental Protection Agency. Monitoring and determination methods for water and wastewater(4th ed.)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 223–279. (in Chinese).
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 南京: 中国农业科技出版社, 1999.
- LU Ru-kun. Soil Agrochemistry Analysis Method[M]. Nanjing: Chinese Agriculture Publishing Company, 1999. (in Chinese).
- [9] A Ugurlu, B Salman. Phosphorus removal by fly ash[J]. *Environment International*, 1998, 24(8): 911–918.
- [10] 董 梅. 国外稻壳综合利用的进展[J]. 粮食流通技术, 2004, 3: 32–35.
- DONG Mei. Research advance in integrated utilization of rice hull in abroad[J]. *Grain Distribution Technology*, 2004, 3: 32–35.
- [11] 邓雁希, 许 虹, 黄 玲, 等. 炉渣处理含磷废水的实验研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3): 290–292.
- DENG Yan-xi, XU Hong, HUANG Ling, et al. The removal of phosphorus from wastewater with the help of slag[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2003, 22(3): 290–292.
- [12] 张翔凌, 张 晟, 贺 锋, 等. 不同填料在高负荷垂直流人工湿地系统中净化能力的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (5): 1905–1910.
- ZHANG Xiang-ling, ZHANG Sheng, HE Feng, et al. Effect of different filter media on the treatment performances of vertical flow constructed wetlands at high hydraulic loading[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2007, 26(5): 1905–1910.
- [13] 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 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 894–898.
- CUI Li-hua, ZHU Xi-zhen, LUO Shi-ming, et al. The characteristic of phosphorous adsorption on different substrates used in constructed wetland[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2007, 26(3): 894–898.
- [14] 王 浩, 陈吕军, 温东辉. 天然沸石对溶液中氨氮吸附特性的研究[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 219–223.
- WANG Hao, CHEN Lu-jun, WEN Dong-hui. Characteristics of ammonium adsorption by natural zeolite in solution[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 219–223.
- [15] 聂发辉. 系统评价天然蛭石吸附氨氮的效果[J]. 四川环境, 2004, 23(4): 15–19.
- NIE Fa-hui. A Systematic study on the effect of crude vermiculite on the adsorption of $\text{NH}_3\text{-N}$ [J]. *Sichuan Environment*, 2004, 23(4): 15–19.
- [16] 王家德, 孙玉琦, 马建锋. 多孔碳表面自养硝化生物膜的培养及其性能研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(6): 19–23.
- WANG Jia-de, SUN Yu-qi, MA Jian-feng. Study on performance of autotrophic nitrite nitro bacteria cultivated on carbon foam surface[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(6): 19–23.
- [17] 唐云平, 米瑞兰, 赵景林. 影响土地处理系统土壤硝化作用条件的探讨[J]. 农业环境科学学报, 1992, 11(5): 199–201.
- TANG Yun-ping, MI Rui-lan, ZHAO Jing-lin. Study on some factors affecting nitrification in soil of land-treatment system[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 1992, 11(5): 199–201.