不同人工湿地基质对甲苯的比较吸附研究

王玉洁1, 唐运平1,2*, 顾修君3, 刘红磊2, 石 岩2, 段云霞2

(1.天津工业大学环境与化学工程学院,天津 300387; 2.天津市环境保护科学研究院,天津 300191; 3.天津临港经济区管理委员 会,天津 300460)

摘 要:通过火山岩、天然沸石、碎石对甲苯的吸附实验,比较分析了三种人工湿地基质对甲苯的吸附机理和去除效果。结果表明: 基质粒径小于 200 目时,甲苯在三种基质上的吸附平衡时间均为 12 h,线性和 Freudlich 吸附方程均可用来描述甲苯在三种基质上 的等温吸附行为,吸附量从大到小为火山岩≈沸石>碎石,Dubinin-Radushkevich 方程拟合求出平均吸附自由能 E 均小于 8 kJ·mol⁻¹, 表明三种基质对甲苯的吸附作用均为物理吸附;基质粒径增大时,火山岩和天然沸石的吸附量变化不大,碎石的吸附量急剧下降。 小试系统模拟对甲苯的动态去除结果表明:水力停留时间为 2 d 时,经火山岩或天然沸石系统处理后,达到 GB 8978—1996《污水综 合排放标准》三级排放标准(≤0.5 mg·L⁻¹)的废水中甲苯浓度可降低并达到一级排放标准(≤0.1 mg·L⁻¹),而碎石系统对甲苯的去除 率较低,仅为 12%~16%。

关键词:甲苯;人工湿地;基质;吸附 中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)01-0170-06 doi:10.11654/jaes.2015.01.024

Adsorption of Toluene on Different Substrates for Constructed Wetland

WANG Yu-jie¹, TANG Yun-ping^{1,2*}, GU Xiu-jun³, LIU Hong-lei², SHI Yan², DUAN Yun-xia²

(1.School of Environmental and Chemical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2.Tianjin Academy of Environmental Science, Tianjin 300191, China; 3.Tianjin Harbor Economic Area, Tianjin 300460, China)

Abstract: Constructed wetlands are a low-cost and easy-operation technology for treating low concentration organic substance wastewater. The present study compared the adsorption and removal efficiency of toluene by volcanic, natural zeolite and gravel. The results showed that the equilibrium time of toluene adsorption on three substrates were 12 h. Both Freudlich and linear isotherms could be used to fit toluene adsorption. The adsorption capacities of three substrates for toluene were:natural zeolite \approx volcanic>gravel; E(mean free adsorption energy) of toluene for each substrate obtained by Dubinin-Radushkevich equation was less than 8 kJ·mol⁻¹, implying that the toluene adsorption was physical process. With the particle size of substrates increasing, the toluene adsorption by volcanic and natural zeolite systems than in gravel sharply decreased. The removal efficiency of toluene from water was obviously greater in volcanic and natural zeolite systems than in gravel system. When the Hydraulic Retention Time(HRT) was 2 d, the toluene concentration in the wastewater satisfying the third grade Integrated Wastewater Discharge Standard (GB 8978—1996)($\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) could meet the first grade standard ($\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) for the volcanic and natural zeolite systems, whereas the toluene removal rate in the gravel system was only 12%~16%.

 $Keywords: {\tt toluene; \ constructed \ wetland; \ substrate; \ adsorption}$

难降解有机物是一类对人和其他生物具有致癌、 致畸、致突变作用的含碳化合物,即使较低的浓度也 会对人体产生严重危害,并持久损害人体中枢神经系 统^[1-2]。难降解有机物废水的处理技术包括高级氧化法 (臭氧氧化、光分解、Fenton 氧化、电化学氧化等)、活 性炭吸附、膜分离技术、膜生物反应器等^[3-5],由于这些 方法具有价格昂贵、操作难度大的特点,难以得到推 广应用。人工湿地作为一种低投入成本、低能源消耗、 低运营和维护条件的污水处理技术,具有十分广阔的 应用前景^[6]。目前人工湿地主要用于生活污水^[7]的自然 净化及化工园区低浓度废水^[8]的深度处理等,去除目 标多为水中的氮、磷、COD^[9-10]等,因而如何利用人工 湿地深度处理低浓度工业废水中难降解有机物以满

收稿日期:2014-07-25

基金项目:国家自然科学基金(NSFC51178311);天津市科技计划项目 (13ZCZDSF00700)

作者简介:王玉洁(1990—),女,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方 向为生态修复技术。E-mail:yujie_wang1990@163.com

^{*}通信作者: 唐运平 E-mail: 13652097098@163.com

足日趋严格的污水排放标准,达到从源头上减少污染物的排放和资源重复利用的目的,具有十分重要的现实意义,但这方面的研究和实例尚不多见^[11-12]。

人工湿地由基质、植物、微生物三部分组成,净化 污水的机制包括基质对有机物的吸附与截留,植物直 接吸收和代谢有机物,微生物对有机物进行降解等方 面。难降解有机物本身具有不易被植物及微生物吸收 和代谢的特点,基质吸附往往是其在湿地中最主要的 去除途径^[13],因此研究人工湿地基质对水中难降解有 机物的吸附机理与效果,对于工业园区内或涉化工污 水的人工湿地的运行管理具有极其重要的作用。甲苯 是一种常见的难降解有机物,广泛存在于工业园区废 水之中,已被列入我国优先控制污染物名单。但当前 国内外对甲苯吸附机制的研究多集中于不同吸附材 料或改性吸附材料对甲苯气体分子的吸附^[14],对水中 甲苯吸附机制方面的报道仍显欠缺。

本文选择碎石、天然沸石、火山岩这三种常用的 人工湿地基质为研究对象,通过基质对甲苯的吸附动 力学、等温吸附、不同粒径基质的静态吸附以及动态 吸附实验,分析比较不同基质对甲苯的吸附机理与效 果,以期为人工湿地深度处理含甲苯废水的基质筛选 提供参考,并作为下一步混合基质吸附的基础研究。

1 材料与方法

1.1 材料与性质

试验所用天然沸石和火山岩均来自市场采购,碎石取自某建筑工地。三种基质粒径范围为1~2 cm,用超纯水洗净后由球磨机研磨,过筛备用。各基质物理性质见表1。

	表 1 基质的物理性质
Table 1	Physical properties of substrate

基 质	密度/g·cm ⁻³	比表面积/m²・g ⁻¹	孔隙率/%
火山岩	1.82	4.72	66.0
天然沸石	2.07	3.02	52.5
碎石	2.56	2.34	38.0

1.2 吸附实验

1.2.1 吸附动力学实验

为更好地区分三种基质的吸附差异,所配溶液初始浓度不宜过低,经预实验后,选择甲苯溶液初始浓度约为 3.89 mg·L⁻¹。取 150 mL 甲苯溶液于 250 mL 具塞锥形瓶中,加入 5 g 基质(≤200 目),混匀后盖紧瓶塞,用封口膜密封后放入摇床内避光振荡,摇床温度为(20±0.5)℃,转速为 200 r·min⁻¹。分别经 15、30 min

和 1、2、5、8、12、24、36、48、72 h 取出锥形瓶,将瓶中 混合液由 0.45 μm 有机膜过滤后,置于顶空瓶中,由 气相色谱仪测定出甲苯浓度。

1.2.2 吸附等温实验

取 150 mL 一定浓度的甲苯溶液于 250 mL 具塞 锥形瓶中,再加入 1g 基质(≤ 200 目),混匀后盖紧瓶 塞,并用封口膜密封后放入摇床内避光振荡 24 h,摇 床温度为(20±0.5)℃,转速为 200 r·min⁻¹。振荡结束 后,将瓶中混合液由 0.45 µm 有机膜过滤后,置于顶 空瓶中,用气相色谱仪测定甲苯浓度。本文着眼于低 浓度废水的深度处理,因此将 GB 8978—1996《污 水综合排放标准》(以下简称《标准》)一级(0.1 mg·L⁻¹) 和三级(0.5 mg·L⁻¹)排放标准的浓度包含在所配甲 苯溶液初始浓度范围中,具体浓度梯度为 0.07~7 mg·L⁻¹。

1.2.3 粒径对吸附量的影响实验

实验条件与吸附动力学实验相同,基质粒径分别为10、60、100、200目,摇床内振荡时间为24h。 1.2.4 动态吸附实验

为更好地切合实际湿地系统深度处理含甲苯废水的运行情况,构建三个小试系统模拟甲苯动态去除效果,如图1所示。填料箱由玻璃制成,长×宽×高=50 cm×20 cm×20 cm,表层由黑色薄膜封好。填料分别为火山岩、天然沸石及碎石(粒径约为1~2 cm),填料高度为17 cm,采用前端进水、可调水位软管出水方式。人工配水以《标准》三级排放标准中甲苯浓度(0.5 mg·L⁻¹)为进水浓度,水力停留时间(HRT)分别为0.5、1、2 d,测定出水浓度并计算甲苯的去除率。

1.3 数据计算

吸附量的计算方法如下:

$$q_{i} = \frac{(c_{0} - c_{i}) \times V}{m}$$

式中: q_t 为 t 时刻基质的吸附量, mg·g⁻¹; c_0 、 c_t 分别为 甲苯溶液初始浓度、t 时刻过滤液中的甲苯浓度, mg·



图 1 动态吸附系统示意图

Figure 1 Sketch diagram of dynamic adsorption system

L⁻¹; V 为溶液的体积, L; m 为基质的使用量, g。 本文所用的吸附等温方程包括: 线性吸附方程 q_e=k_d·c_e

Freudlich 方程
$$\ln q_e = \left(\frac{1}{n}\right) (\ln c_e) + \ln k_f$$

Langmuir \mathcal{F} $\mathbb{E}\left(\frac{1}{q_{e}}\right) = \left(\frac{1}{k_{1}q_{m}}\right) \left(\frac{1}{c_{e}}\right) + \frac{1}{q_{m}}$

Dubinin-Radushkevich(D-R)方程 $lnq_e=lnq_m-\beta\varepsilon^2$ 式中: c_e 为吸附平衡时过滤液的甲苯浓度, $mg\cdot L^{-1}$; q_e 为 基质的甲苯平衡吸附量, $mg\cdot g^{-1}$; q_m 为单位吸附剂表面 盖满单分子层时的吸附量,即饱和吸附量, $mg\cdot g^{-1}$;n 为 Freundlich 常数,1/n 决定了等温线的形状; ε 为 D-R 方程中的 polanyi 势能, $kJ,\varepsilon=RTln(1+1/c_e)$;R 为理想 气体常数, 8.314×10^{-3} kJ·mol⁻¹·K⁻¹;T 为绝对温度,K; β —常数, $mol^2\cdot kJ^{-2}$; k_d,k_f,k_1 分别为各方程的吸附系 数。

1.4 气相色谱检测方法

按照 GB/T 5750.8—2006 中 18.4 的方法进行检 测^[15]。色谱条件如下:气化室温度为 150 ℃,色谱柱初 始温度为 50 ℃,采用程序升温,以 10 ℃·min⁻¹ 的速率 升温至 160 ℃,检测器温度为 170 ℃,空气流量为 300 mL·min⁻¹,氢气流量为 15 mL·min⁻¹,载气(高纯氮)流 量为 1 mL·min⁻¹,分流比设定为 10:1。

1.5 数据处理与分析

采用 Origin 9 作图分析基质对水中甲苯的处理 效果;方差分析采用 SPSS 17.0 软件计算;多重比较采 用 Duncan 新复极差试验法(DMRT法, P=0.05)。

2 结果与讨论

2.1 基质对甲苯的吸附动力学

三种基质对甲苯的吸附动力学曲线如图 2 所示。 三种基质对甲苯的吸附量都在 $t \leq 15$ min 时已达到最 大值,此时火山岩、天然沸石及碎石对甲苯的吸附量 分别为 0.034 8、0.032 7、0.034 5 mg·g⁻¹; 之后 5~8 h内 出现持续下降,火山岩和天然沸石在 8 h 时吸附量最 小,分别为 0.027 0、0.026 8 mg·g⁻¹,碎石在 5 h 时吸附 量最小,为 0.019 8 mg·g⁻¹;此后三种基质的吸附量出 现小幅上升,12 h 时各基质对甲苯的吸附量与 12 h 后各点的吸附量无显著性差异(P > 0.05),即到 12 h 时吸附达到平衡,火山岩、天然沸石、碎石对甲苯的平 衡吸附量(实验值)分别为 0.029 1、0.025 1、0.021 0 mg· g⁻¹。 $t \leq 15$ min 时即达到吸附量最大值的原因是:本实 验所采用的基质粒径很小(≤ 200 目),而粒径大小对

农业环境科学学报 第34卷第1期

吸附剂的比表面积和吸附质的扩散速率都有影响,粒 径越小吸附剂的比表面积越大,吸附质的扩散速率也 越大,对吸附越有利¹¹⁶;之后 8 h 吸附量下降可能是由 于实验初期吸附不稳定,发生了脱附。虽然三种基质 的吸附量都在前8 h 内出现波动,但波动幅度不同,碎 石的波动幅度最大,可能是由于碎石的的吸附性能最 差,对甲苯的吸附力较弱,更易脱附。



Figure 2 Kinetic curves of toluene adsorption by substrates

2.2 基质对甲苯的吸附等温曲线

由图 3(a)可以发现,随着甲苯溶液初始浓度的 增加,过滤液平衡浓度 c。逐渐增加,三种基质对甲苯 的吸附量也随之增加,但增加的幅度有所不同。在较 低的平衡浓度下(<0.3 mg·L⁻¹)三者的吸附量几乎相 等,随着初始浓度的增加,碎石的吸附量明显低于沸 石、火山岩的吸附量。

用线性吸附方程、Freudlich 方程、Langmuir 方程、 D-R 方程对实验数据进行拟合,结果见图 3 和表 2。 由表中的吸附方程拟合相关系数(r)可知,四种方程 对三种填料吸附拟合均取得较好的效果(r>0.9),且 线性吸附拟合效果最好(r>0.99)。

根据 Langmuir 吸附方程,得到三种基质的理论 饱和吸附量的大小依次为火山岩(0.058 mg·g⁻¹)>沸 石(0.038 mg·g⁻¹)>碎石(0.014 mg·g⁻¹),远小于实验的 平衡吸附量,可见在该吸附剂浓度范围内,Langmuir 吸附方程并不适宜用来描述甲苯在三种基质的吸附 特性。赵芳等^[17]曾指出,Langmuir 方程仅适用于给定 吸附剂浓度的体系。

从表 2 的 Freundlich 吸附方程中三种基质的吸 附常数 k_f来看,三种基质对甲苯吸附量大小顺序为 火山岩 ~ 沸石>碎石。这与三者的结构和性质有关:火 山岩和沸石均有着空旷的骨架结构,具有孔隙多、比 表面积大的特点,这决定了两者对吸附质分子产生相 对较强的范德华力^[18]。对于非极性分子来说,范德华 力是主要的吸附力^[19],甲苯极性很弱,所以同样适用, 其在三种基质上的吸附属于物理吸附。与沸石和火山 岩相比,碎石的结构致密,不含微孔,比表面积小,因 此对甲苯的吸附性能较差。

为验证上面的吸附机理,采用了 D-R 方程对数 据进行拟合。根据 D-R 方程可以求出平均吸附自由 能 *E*=(2β)^{-0.5},它是用来区分物理吸附和化学吸附的 重要指标:*E*<8 kJ·mol⁻¹ 为物理吸附;8 kJ·mol⁻¹<*E*<16 kJ·mol⁻¹ 为离子交换化学吸附; E>20 kJ·mol⁻¹ 为化 学吸附^[20-21]。由表 2 可见,火山岩、天然沸石、碎石的 E 值分别为 3.333、3.410、2.429 kJ·mol⁻¹,均小于 8 kJ·mol⁻¹,所以甲苯在三种基质上的吸附以物理吸附 为主。

2.3 粒径对甲苯吸附的影响

甲苯在不同粒径的基质上吸附量如图 4 所示。三 种基质对甲苯的吸附量都随粒径减小(目数增加)而 增加,但火山岩和天然沸石吸附量增加的幅度不如碎 石明显,且在本实验所取粒径范围内,吸附量大小的



图 3 基质对甲苯的等温吸附拟合曲线

Figure 3 Fitting curves for isothermal adsorption of toluene by substrates

表 2 基质对甲苯的吸附等温方程参数

1	Table 2	Parameters	for to	luene	isothermal	ads	orption	by su	bstrates

甘氏		Langmuir 吸附方和	程	Freudlich 吸附方程				
	$k_{ m l}/{ m L} \cdot { m mg}^{-1}$	$q_{ m m}/{ m mg} \cdot { m g}^{-1}$	r	$k_{\mathbf{f}'}(\mathbf{mg} \cdot \mathbf{g})^{-1}(\mathbf{L} \cdot \mathbf{mg})^n$	1/n	r		
火山岩	0.392	0.058	0.971	0.100	0.946	0.993		
天然沸石	0.183	0.038	0.956	0.100	0.931	0.993		
碎石	9.087	0.014	0.858	0.049	0.938	0.978		
	线性吸附	线性吸附方程		D-R 方程				
	$k_{ m d}/{ m mL}\cdot{ m g}^{-1}$	r	$q_{ m n}/{ m mg} \cdot { m g}^{-1}$	$\beta/\text{mol}^2 \cdot \text{kJ}^{-2}$	$E/\mathrm{kJ}\cdot\mathrm{mol}^{-1}$	r		
火山岩	0.009	0.995	0.121	0.045	3.333	0.966		
天然沸石	0.003	0.998	0.107	0.043	3.410	0.958		
碎石	0.002	0.997	0.059	0.041	3.492	0.892		

顺序均为火山岩>天然沸石>碎石。当基质粒径较大 时,碎石对甲苯的吸附量远小于火山岩和天然沸石的 吸附量,如当基质粒径为10目时,各基质对甲苯的吸 附量从大到小依次为火山岩(0.0261mg·g-1)>天然沸 石(0.0228 mg·g⁻¹)≫碎石(0.0059 mg·g⁻¹)。随着粒径的 减小,碎石与火山岩及天然沸石对甲苯的吸附量差距 逐渐减小,当粒径为200目时,火山岩、天然沸石、碎 石的吸附量分别为 0.029 1、0.025 1、0.021 0 mg·g⁻¹。 这是由于随粒径的减小,基质的比表面积增大,为甲 苯提供了较多的孔隙和接触位点,且甲苯属于小分 子,基质对其的吸附主要发生在微孔区²²¹,而火山岩 和天然沸石的结构上有很多微孔(火山岩微孔孔径> 天然沸石微孔孔径≈2µm^[23]),即使在没有磨细的情 况下,仍有大量微孔提供吸附位点,有较强的吸附能 力,所以二者对甲苯的吸附量随粒径的减小增幅不 大。相比之下,粒径对碎石的吸附量影响较大是由于 其表面密实,比表面积受粒径影响更大,吸附量也随 之受到较大影响。



Figure 4 Effects of substrate particle size on adsorption capacity

2.4 甲苯动态吸附实验

甲苯在填料床上的动态吸附效果如表 3 所示。在 三种 HRT 下,火山岩和天然沸石系统的甲苯去除率 都明显高于碎石系统的去除率,可见粒径较大时,碎 石对甲苯的吸附效果很差;HRT 的延长有利于甲苯 的去除,但碎石系统的去除率增幅不大;当进水浓度 为 0.5 mg·L⁻¹、HRT 为 2 d 时,火山岩、天然沸石、碎石 系统对甲苯的去除率分别为 41%、42%、16%,即火山 岩或天然沸石系统可对甲苯浓度达到 GB 8978— 1996《污水综合排放标准》三级排放标准(<0.5 mg· L⁻¹)的出水进行深度处理,并使其达到一级排放标准 (<0.1 mg·L⁻¹),即可不经污水处理厂处理直接排入 GB 3097—1997《海水水质标准》的二类水域,以用于

农业环境科学学报 第 34 卷第 1 期

表 3 三种基质系统的甲苯去除率(%)

Table 3 Removal rates of toluene in three systems

中国	水	、力停留时间(HR	Т)
	0.5 d	1 d	2 d
火山岩	32	35	41
天然沸石	31	39	42
碎石	12	15	16

注:每个 HRT 下系统运行 5 个周期,表中甲苯去除率为 5 个周期 的平均值。

农业灌溉、水产养殖及人类食用相关的行业,达到节 能减排的目的。

以上结果都和静态吸附的结果一致,可见若湿地 只以碎石为基质难以达到理想的去除效果。但考虑到 经济性(碎石价廉易得),建议可以碎石为主,混合火 山岩或天然沸石提高去除效果,因而混合填料的吸附 效果可作为下一步研究的重点。

在人工湿地实际运行的过程中,通过基质吸附不 仅可使出水中甲苯浓度降低,同时也通过这种有机物 被固定的方式,提高微生物与污染物的接触时间,更 有利于微生物对甲苯的降解。但随着湿地的长期运 行,基质可能出现吸附能力下降的情况,建议此时更 换表层填料或停床轮休^[24]以维持湿地的稳定运行。

3 结论

(1)火山岩、天然沸石、碎石三种基质的等温吸附 结果表明,线性吸附方程拟合效果最好,根据 Freudlich吸附拟合,得出三种基质对甲苯的吸附量大 小排序为火山岩 ≈ 天然沸石>碎石, D-R 方程的 E 值 表明甲苯在三种基质上的吸附为物理吸附。

(2)甲苯在三种基质(≤200 目)上的吸附平衡时间约为 12 h,火山岩、天然沸石、碎石对甲苯的平衡吸附量(实验值)分别为 0.029 1、0.025 1、0.021 mg·g⁻¹。

(3) 三种基质对甲苯的吸附量都随粒径减小而 增加,火山岩和天然沸石吸附量增加的幅度不如碎石 明显,当基质粒径较大时,碎石对甲苯的吸附量很小, 远小于火山岩和天然沸石的吸附量。

(4)动态吸附实验表明,延长水力停留时间可提 高甲苯去除率,HRT=2 d 时,经火山岩或天然沸石系 统处理后,达到 GB 8978—1996《污水综合排放标准》 三级排放标准(≤0.5 mg·L⁻¹)的废水中甲苯浓度可降 低并达到一级排放标准(≤0.1 mg·L⁻¹),而碎石系统 对甲苯的去除效果很差,考虑到经济性,可以碎石为 主,以火山岩或沸石为辅作为湿地的基质,对混合填 料的吸附效果可作为下一步研究的重点。

参考文献:

 Lopez E, Schuhmacher M, Domingo J L. Human health risks of petroleum-contaminated ground water[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2008, 5(3):278–288.

[2] 殷甫祥, 张胜田, 赵 欣, 等. 气相抽提法(SVE)去除土壤中挥发性 有机污染物的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1495-1501.

YIN Fu-xiang, ZHANG Sheng-tian, ZHAO Xin, et al. Soil vapor extraction(SVE) to remove volatile organic compounds in soil[J]. *Journal* of Agro-Environment Science, 2010, 29(8):1495-1501.

- [3] Klamerth N, Rizzo L, Malato S, et al. Degradation of fifteen emerging contaminants at μg·L⁻¹ initial concentrations by mild solar photo–Fenton in MWTP effluents[J]. Water Research, 2010, 44(2):545–554.
- [4] Trinh T, van den Akker B, Stuetz R M, et al. Removal of trace organic chemical contaminants by a membrane bioreactor[J]. Water Science Technology, 2012, 66(9):1856–1863.
- [5] Rossner A, Snyder S A, Knappe D R U. Removal of emerging contaminants of concern by alternative adsorbents[J]. *Water Research*, 2009, 43(15):3787–3796.
- [6]张 清.人工湿地的构建与应用[J].湿地科学,2011,9(3):373-379.
 ZHANG Qing. Construction and application of constructed wetlands[J]. Wetland Science, 2011,9(3):373-379.
- [7]梁 康, 王启朔, 王飞华, 等. 人工湿地处理生活污水的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):422-428.
 LIANG Kang, WANG Qi-shuo, WANG Fei-hua, et al. Research progresses in domestic wastewater treatment by constructed wetlands [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):422-428.
- [8] 李在田. 芦苇人工湿地造纸废水资源化利用[J]. 水处理技术, 2006, 32(2):76-77.

LI Zai-tian. Resource utilization of artificial reed swamp for papermaking wastewater treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(2):76-77.

[9] 李胜男, 崔丽娟, 宋洪涛, 等. 不同湿地植物土壤氮、磷去除能力比较[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11): 1870–1874.
 LI Sheng-nan, CUI Li-juan, SONG Hong-tao, et al. Comparison on pu-

rification capacity of soil nitrogen and phosphorus in different wetland plants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(11):1870–1874.

- [10] 戴媛媛,杨新萍,周立祥. 芦苇根际微环境对潜流人工湿地氮与 COD 去除性能的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(12):3387-3392. DAI Yuan-yuan, YANG Xin-ping, ZHOU Li-xiang. Effect of reed rhizosphere on nitrogen and COD removal efficiency in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12):3387-3392.
- [11] Zhou Y Q, Tigane T, Li X Z, et al. Hexachlorobenzene dechlorination in constructed wetland mesocosms[J]. Water Research, 2013, 47(1): 102–110.
- [12] Dordio A V, Carvalho A J P. Organic xenobiotics removal in constructed wetlands, with emphasis on the importance of the support matrix[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 252–253:272–292.
- [13] 敬丹丹,万金泉,马邕文,等.人工湿地净化工业区含菲污染降雨 径流的效果研究[J].环境科学,2013,34(8):3095-3101.
 JING Dan-dan, WAN Jin-quan, Ma Yong-wen, et al. Effect of constructed wetland on the purification of industrial zone rainfall runoff

contaminated with phenanthrene[J]. *Environmental Science*, 2013, 34 (8):3095-3101.

[14] 党小庆, 刘 晓, 黄家玉, 等. 吸附联合低温等离子体法去除甲苯废
 〔[J]. 环境工程学报, 2012, 6(9): 3223-3228.
 DANG Xiao-qing, LIU Xiao, HUANG Jia-yu, et al. Toluene removal

using adsorption combined with non-thermal plasma[J]. *Journal of En*vironmental Engineering, 2012, 6(9):3223–3228.

[15] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5750. 8—2006 生活饮用水标准检验方法 有机物指标[S]. 北京:中国标准出版社, 2006. Ministry of Health of PRC. GB/T 5750. 8—2006 Standard examination methods for drinking water: Organic paramenters[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.

[16]赵桂瑜,周 琪. 沸石吸附去除污水中磷的研究[J]. 水处理技术, 2007, 33(2): 34-37.

ZHAO Gui-yu, ZHOU Qi. Adsorption of phosphrous from wastewater onto zeolite[J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(2):34–37.

[17]赵 芳,吴晓芙,张艳丽,等.固液相离子吸附体系中的吸附剂浓度 效应与 Langmuir 方程的适用性[J].环境化学,2007,26(3):335-338.

ZHAO Fang, WU Xiao-fu, ZHANG Yan-li, et al. Adsorbent effect and applicability of Langmuir equation for describing ion adsorption adsorption in liquid/solid systems[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 26 (3):335–338.

- [18] 陈辉霞, 刘 翔. 斜发沸石吸附 NH₄-N 的活化与再生方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4):733-738.
 CHEN Hui-xia, LIU Xiang. NH₄-N adsorption and regeneration of activated clinoptilolite[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4):733-738.
- [19] 近藤精一,石川达雄,安部郁夫,等.吸附科学[M].李国希(译).二版.北京:化学工业出版社,2005.
 Kondou S, Ishikawa H, Abe I, et al. Adsorption technology[M]. LI Guo-xi(Translator). 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press of China, 2005.
- [20] Samatya S, Kabay N, Yüksel Ü, et al. Removal of nitrate from aqueous solution by nitrate selective ion exchange resins[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2006, 66(11):1206–1214.
- [21] Sheha R R, Metwally E. Equilibrium isotherm modeling of cesium adsorption onto magnetic material[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143:354–361.
- [22] 张婧怡, 石宝友, 解建坤, 等. 活性炭物化性质对吸附天然水体总有 机污染物的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(2):494-500. ZHANG Jing-yi, SHI Bao-you, XIE Jian-kun, et al. Effect of physicchemical characteristics of activated carbon on the adsorption of organic pollutants in natural water[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 494-500.
- [23] 王 振,刘超翔,董 健,等.不同人工湿地除磷填料的筛选及其除磷能力[J].中国环境科学,2013,33(2):227-233.
 WANG Zhen, LIU Chao-xiang, DONG Jian, et al. Screening of phosphate-removing filter media for use in constructed wetlands and their phosphorus removal capacities[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(2):227-233.
- [24] 朱 洁, 陈洪斌. 人工湿地堵塞问题的探讨[J]. 中国给水排水, 2009, 25(6): 24-33.

ZHU Jie, CHEN Hong-bin. Discussion on constructed wetlands clogging[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(6):24-33.