

6种湿地填料对含铅废水中铅吸附作用的比较研究

陈 琴^{1,2}, 吴永贵¹, 许连煌^{2,3}, 熊宇霏¹, 张 枢¹, 吴 寅¹, 黄锦楼^{2*}

(1. 贵州大学应用生态研究所, 贵阳 550025; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 武夷学院环境与建筑工程系, 福建 武夷山 354300)

摘 要:为评价人工湿地常用填料对含铅废水中铅的吸附作用,并在此基础上为利用湿地处理特殊重金属废水筛选出更为适用的湿地填料,研究了沸石、砾石、磁铁矿石、陶粒、石英砂和膨胀珍珠岩六种湿地填料对废水中铅的吸附作用。结果表明:当废水中 Pb^{2+} 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,各填料对废水中 Pb^{2+} 的吸附能力依次为沸石>磁铁矿石>砾石>石英砂>膨胀珍珠岩>陶粒,其中经磁铁矿石和沸石吸附处理后出水中 Pb^{2+} 能够达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) ($\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。沸石、磁铁矿石和砾石对铅的等温吸附曲线表明,沸石对铅的吸附容量较砾石和磁铁矿石大。综合考虑吸附效果和经济性能,认为采用砾石作为人工湿地处理废水中 Pb^{2+} 的填料,同时在砾石中掺入一定量沸石可以提高湿地填料的吸附效果。

关键词:湿地填料;含铅废水;吸附作用

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)03-0641-05 doi:10.11654/jaes.2013.03.034

Evaluating the Lead Adsorption Performance of Six Wetlands Substrates in Wastewater Treatment

CHEN Qin^{1,2}, WU Yong-gui¹, XU Lian-huang^{2,3}, XIONG Yu-fei¹, ZHANG Shu¹, WU Yin¹, HUANG Jin-lou^{2*}

(1. Institute of Applied Ecology, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of System Ecology Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Wuyi University, Academy of Environment and Architecture, Wuyishan 354300, China)

Abstract: Constructed wetlands are widely used as sewage ecological treatment technology for the treatment of domestic sewage, industrial wastewater, mining and oil exploitation wastewater. In this research, we evaluate Pb^{2+} adsorption performance of wetlands substrates in wastewater containing lead and screened out suitable wetlands substrates to treat special heavy metal wastewater, adsorption of lead on the substrates of zeolite, gravel, magnetite, haydite, quartz sand and perlite were evaluated. The results showed that the zeolite, magnetic iron ore and gravel had good removal effects; the removal rate of zeolite and magnetic iron ore were up to 99% and the removal rate of gravel was above 92% at Pb^{2+} concentration of $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The Pb^{2+} adsorption abilities followed as: zeolite>magnetite>gravel>quartz sand>perlite>haydite. Pb^{2+} concentration in wastewater treated by magnetite and zeolite could meet the integrated wastewater discharge standard (GB 8978—1996) ($\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). Adsorption of Pb^{2+} on zeolite, magnetic iron ore and gravel followed well the Langmuir equation, while the Freundlich equation is more suitable for describing the Isothermal adsorption of magnetic iron ore. The adsorption capacity of zeolite to Pb^{2+} was higher than magnetic iron ore and gravel. On taking the adsorption effect and economic performance into consideration, gravel is the best wetlands substrates for the treatment of Pb^{2+} in wastewater, and the adsorption effect can be further improved by adding certain amount of zeolite.

Keywords: substrates of wetlands; wastewater containing lead; adsorption performance

随着工业技术的迅速发展,铅污染日益严重^[1]。含铅废水对环境的影响尤为严重,可渗透到土壤中,污染

河流、破坏土壤生态、影响作物生长和生物种群的繁衍^[2]。对含铅废水的处理方法主要有化学沉淀法、吸附法、离子交换法、膜处理法、反渗透等^[3],但是这些方法在使用过程中都存在一定的缺点^[4]。湿地作为一种污水生态处理工程技术,已被广泛应用于重金属废水的处理中^[5-10]。随着湿地研究的深入,国内学者也开始利用人工湿地对含铅废水进行探索性研究^[11-13]。人工湿地去除重金属的机理包括沉淀、过滤、吸附、植物吸收及微生物代谢等^[14],主要是依靠填料对重金属的吸附以

收稿日期:2012-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目(71033005);贵州省重大科技专项(黔科合重大专项[2012]6009-7号);贵州大学211重点学科建设项目(211KST200902);贵阳市重大科技专项项目(2010筑科农5-11)

作者简介:陈 琴(1987—),女,硕士,主要研究方向为生态修复技术。
E-mail: cqin_626@126.com

* 通信作者:黄锦楼 E-mail: jluang@rcees.ac.cn

及填料与重金属发生一系列化学反应^[15],可见填料在人工湿地处理废水过程中发挥着重要作用。因此,筛选处理重金属废水的湿地填料非常重要,合适的填料可以有效提高湿地对重金属的去除率,同时延长湿地使用寿命。本研究以我国常见的黏土矿物和工业副产物沸石、砾石、磁铁矿石、陶粒、石英砂和膨胀珍珠岩为研究对象,研究各填料对水中 Pb²⁺的去除能力与效果,为选择合适的人工湿地填料,提高人工湿地对特殊重金属废水的处理能力提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

1.1.1 填料

沸石、石英砂、磁铁矿石和砾石取自河南省巩义市万福源市政工程净水材料有限公司,陶粒、膨胀珍珠岩取自北京蓬朗园艺。填料先用自来水洗净,然后用去离子水浸泡 24 h,最后置于恒温干燥箱(北京雅士林试验设备,DHG-9140A)(60±2)℃烘干备用。供试填料部分理化性质详见表 1。

1.1.2 实验用水

称取(0.160 0±0.000 5)g Pb(NO₃)₂(分析纯),分别用自来水和去离子水配制 1 L 溶液,经测定,用去离子水配制的溶液 Pb²⁺浓度为 97.687 9 mg·L⁻¹,用自来水配制的溶液 Pb²⁺浓度为 76.365 7 mg·L⁻¹,这可能和自来水中的 OH⁻、Cl⁻等与 Pb²⁺生成 Pb(OH)₂、PbCl₂乳状沉淀有关。因此,本实验采用去离子水配制 Pb(NO₃)₂溶液作为模拟实验废水(pH 值为 5.86~5.97,Pb²⁺浓度为 181.11~203.83 mg·L⁻¹)。

1.2 实验装置

实验装置由内径 110 mm、高 350 mm 的硬质 PVC 管制成,填充前,沿内壁放置一根内径 25 mm、高 380 mm 的 PVC 管,并在管底套一层孔径约为 1 mm 的纱网,以防底部堵塞。实验装置见图 1。

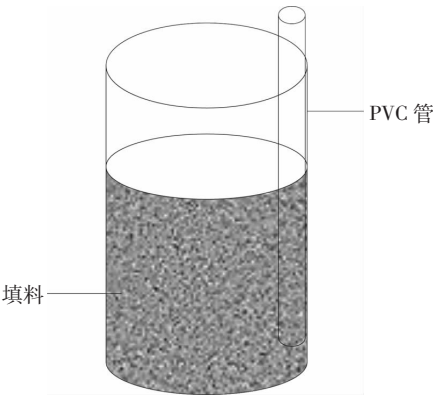


图 1 不同填料对含铅废水中铅吸附作用的实验装置
Figure 1 Experiment device of lead adsorption in the presence of different substrates

1.3 实验方法及指标测定

进水 Pb²⁺浓度约为 200 mg·L⁻¹,上午 10:00 一次性进水,水力停留时间为 2 d,在第 3 d 上午 10:00 采集水样,一部分用于现场测定 pH 值,另一部分盛于聚乙烯瓶,加入 1%~2% HNO₃ 2 mL,密封带回实验室,4℃保存,待分析 Pb²⁺浓度。取样后将水排尽,待进行下一次实验。

填料 pH 值测定方法为:球磨后过 200 目筛,称取一定量于离心管中,按土水比 1:5 混合,置于恒温振荡器(太仓市实验设备厂,THZ-C-1)中 20℃恒温振荡 5 min,取出后静置 30 min,用 pH 计(梅特勒-托利多,DELTA 320)测定上清液 pH 值;水体 pH 值测定采用电极法(梅特勒-托利多,DELTA 320);Pb²⁺浓度的测定采用全谱直读等离子体发射光谱仪(PerkinElmer,Prodigy)。

1.4 填料等温吸附曲线

先将磁铁矿石、沸石和砾石捣碎球磨过 100 目筛,用分析天平(梅特勒-托利多,AL104)准确称取(0.250 0±0.000 5)g 于 50 mL 离心管中,分别加入初始浓度为 0、50、100、150、200、250 mg·L⁻¹ 的 Pb²⁺溶液

表 1 不同填料部分理化性质

Table 1 Some physic-chemical properties of different substrates

理化性质	沸石	磁铁矿石	砾石	珍珠岩	陶粒	石英砂
密度/g·cm ⁻³	1.80	4.67	2.66	0.10~0.14	1.40~1.65(表观)	2.20~2.30
容重/g·cm ⁻³	0.95	2.40	1.85	0.11~0.15	—	1.75
比重	1.60	4.58	—	—	—	2.66
磨损率/%	—	0.15	—	—	—	0.38
孔隙率/%	30~50	47	—	—	—	43~47
比表面积	—	—	—	—	≥4×10 ⁴	—
硬度(莫氏)	4~5	8	—	—	—	7.50

注:“—”指无数据。

25 mL,每个浓度设3个平行,置于恒温振荡器中振荡30 min ($180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 后用高速冷冻离心机(Beckman Coulter, Allegra TM X-22R Centrifuge)离心,过滤后测定 Pb^{2+} 浓度。根据吸附前后溶液中 Pb^{2+} 浓度变化,计算填料对 Pb^{2+} 的吸附量。

1.5 数据处理

采用 SPSS13.0 对 Pb^{2+} 在填料上的吸附等温线进行非线性回归分析,采用 Origin8.5 分析填料对废水中 Pb^{2+} 的处理效果。

2 结果与讨论

2.1 不同湿地填料对含铅废水处理前后 pH 值的影响

进出水 pH 值的改变是影响重金属废水中重金属形态和溶解度的一个重要因素。实验结果表明,在模拟含铅废水中加入沸石、砾石、磁铁矿石、陶粒、石英砂和膨胀珍珠岩后,不同填料对各模拟试验填料出水 pH 值的影响差别较大(表 2)。各填料 pH 值大小依次为磁铁矿石 (9.71)>膨胀珍珠岩 (8.93)>沸石 (8.74)>砾石 (8.41)>陶粒 (7.52)>石英砂 (7.41)。进水 pH 值为 5.86~5.97,经填料吸附后,出水 pH 值有一定差异,其中沸石和磁铁矿石吸附后出水 pH 值变化较大,出水 pH 值均在 8 左右,而其余填料出水 pH 值与

进水变化较小。pH 值与系统对重金属的处理率密切相关。当 pH 值较低时,其中存在大量 H^+ 会与 Pb^{2+} 产生竞争吸附^[16],这也解释了天然沸石和磁铁矿石对 Pb^{2+} 的处理效果优于其他填料的原因。

2.2 不同填料对含铅废水中 Pb^{2+} 的吸附作用

不同填料因自身理化特性的差异,对含铅废水中 Pb^{2+} 的吸附作用和污染物去除率具有较大的差异,6种湿地填料对 Pb^{2+} 的累积吸附量结果(表 3)表明,不同湿地填料的累积吸附量与去除率并不成正比关系,经 8 次进出水后,膨胀珍珠岩和陶粒的累积吸附量分别达到 $3.97\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.79\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,但它们对 Pb^{2+} 的去除率均不高(图 2),这与膨胀珍珠岩和陶粒的密度较小有关(表 1)。当计算同等质量填料对 Pb^{2+} 的吸附量时,膨胀珍珠岩和陶粒的吸附量大于其他填料。

图 2 为 6 种填料对废水中 Pb^{2+} 的去除率。沸石和磁铁矿石对 Pb^{2+} 的去除率均保持在 99% 左右,砾石对 Pb^{2+} 的去除率均保持在 92% 以上,去除效果较好且比较稳定。但是,随着系统的运行,石英砂、陶粒和珍珠岩对 Pb^{2+} 的去除率均呈下降趋势,到第 8 次出水时,石英砂、陶粒和珍珠岩对 Pb^{2+} 的去除率仅分别达到 12.23%、3.37% 和 5.54%。进出水的监测结果显示,当进水 Pb^{2+} 浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右时,各填料对 Pb^{2+} 吸附能力为沸石>磁铁矿石>砾石>石英砂>陶粒>膨胀珍珠岩,其中磁铁矿石和沸石的出水 Pb^{2+} 浓度能够达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) ($\leq 1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

2.3 不同湿地填料对铅的等温吸附曲线比较

沸石、磁铁矿石和砾石对含铅废水的吸附效果均较好(图 2 和表 3),随着运行时间延长,均保持在 92% 以上且比较稳定,难以筛选出较适宜处理含铅废水的湿地填料。因此,需要通过填料的吸附容量大小进行筛选。

恒温条件下常用 Langmuir 和 Freundlich 方程来

表 2 不同湿地填料的 pH 值及其对模拟含铅废水进出水 pH 值的影响

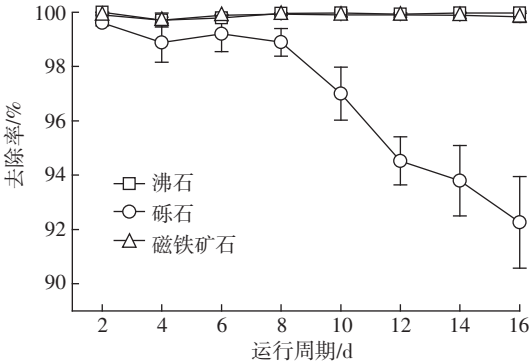
Table 2 pH of different wetland substrates and its effect on pH of simulated wastewater containing lead at inlet and outlet

填料名称	填料 pH 值	进水 pH 值	出水 pH 值
沸石	8.74	5.86~5.97	7.98~8.11
磁铁矿石	9.71	5.86~5.97	7.89~8.01
砾石	8.41	5.86~5.97	5.97~6.03
陶粒	7.52	5.86~5.97	5.48~5.63
膨胀珍珠岩	8.93	5.86~5.97	5.53~5.64
石英砂	7.41	5.86~5.97	5.45~5.50

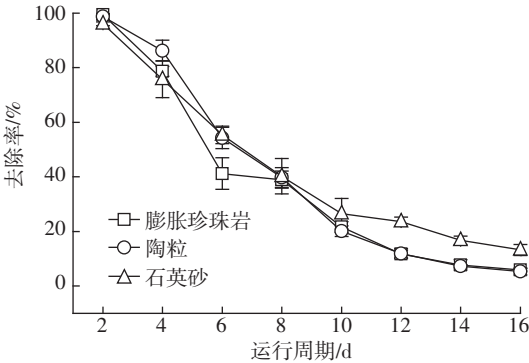
表 3 不同湿地填料对模拟含铅废水中 Pb^{2+} 的累积吸附量比较($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 3 Comparison of different wetland substrates on the cumulative adsorption of Pb^{2+} from simulated wastewater containing lead($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

填料名称	运行周期/d								累积吸附量
	2	4	6	8	10	12	14	16	
沸石	0.082	0.089	0.092	0.090	0.092	0.089	0.092	0.089	0.72
砾石	0.075	0.081	0.084	0.082	0.082	0.077	0.079	0.076	0.64
磁铁矿石	0.073	0.079	0.082	0.080	0.080	0.079	0.081	0.079	0.63
珍珠岩	1.200	1.040	0.600	0.540	0.270	0.150	0.100	0.072	3.97
陶粒	0.240	0.220	0.140	0.085	0.042	0.026	0.015	0.009	0.79
石英砂	0.083	0.071	0.054	0.042	0.029	0.021	0.014	0.011	0.33



(a)沸石、磁铁矿石和砾石对 Pb²⁺的吸附效果



(b)膨胀珍珠岩、陶粒和石英砂对 Pb²⁺的吸附效果

图 2 不同湿地填料对模拟含铅废水中 Pb²⁺的吸附效果

Figure 2 Pb²⁺ adsorption effects of simulated wastewater containing lead in the presence of different substrates

表示其表面的吸附量与介质中溶质平衡浓度之间的关系^[17]。将沸石、磁铁矿石和砾石对 Pb²⁺的吸附等温线进行非线性回归分析,并计算回归方程的相关系数,应用吸附模型对试验数据的模拟结果见表 4。

Langmuir 模型: $\frac{1}{G} = \frac{1}{G_0} + \left(\frac{a}{G_0}\right) \left(\frac{1}{c}\right)$

Freundlich 模型: $G = K_f c^{1/n}$

式中: 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 、 K_f 、 n 均为常数。

表 4 列出了 Pb²⁺在沸石和磁铁矿石上吸附模型的拟合参数,由决定系数(R^2)可知,Langmuir 和 Freundlich 模型均能较好地描述沸石、磁铁矿石和砾石对 Pb²⁺的吸附。但从 R^2 的大小来看,Langmuir 方程更适合描述沸石和砾石对 Pb²⁺吸附等温曲线,Freundlich 方程更适合描述磁铁矿石对 Pb²⁺吸附等温曲线,这可能是因为磁铁矿石对 Pb²⁺吸附量增加到一定程度时,即使溶液中 Pb²⁺浓度继续增加,其对 Pb²⁺吸附量也变化不大,而沸石和砾石的 Pb²⁺吸附量仍有一

定增加趋势。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,供试填料 Pb²⁺理论饱和吸附量为沸石>磁铁矿石>砾石。在构建人工湿地时可以优先考虑净化 Pb²⁺能力较强的填料如沸石,但从经济性能上考虑,由于砾石易得并且价廉,可采用砾石作为人工湿地处理含铅废水的填料,或在砾石填料中掺入一定量沸石。

3 结论

(1)沸石、磁铁矿石和砾石对 Pb²⁺的吸附效果较好,去除率均达到 92%以上,且去除效果较稳定。等温吸附实验表明,沸石、磁铁矿石、砾石的最大吸附容量依次减小。

(2)在相同试验条件下,进水浓度为 200 mg·L⁻¹左右时,各填料对 Pb²⁺的处理大小为沸石>磁铁矿石>砾石>石英砂>陶粒>膨胀珍珠岩,其中磁铁矿石和沸石的出水能够达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)(≤1.0 mg·L⁻¹)。

(3)综合考虑去除率和经济性能等指标,在构建人工湿地处理废水中 Pb²⁺时宜优先考虑采用砾石,同时掺入一定量沸石。

(4)本研究比较了几种常用湿地填料对铅的吸附作用,但吸附饱和的填料如果处理不当会对环境造成二次污染,如何对基质进行再利用还有待进一步研究。

致谢:本工作得到了胡春明老师的指导与帮助,同时得到了林芳芳、徐华清、王少雄、李铮、王中航、赵波、石禹及课题组其他成员的帮助,在此一并感谢。

表 4 沸石、磁铁矿石和砾石 Pb²⁺吸附等温曲线方程及其相关参数

Table 4 Pb²⁺ adsorption isotherm curve equation and the related parameters of zeolite, magnetic iron ore and gravel

Pb(II)	Langmuir model			Freundlich model		
	G_0	a	R^2	K_f	n	R^2
沸石	16.31	0.17	0.98**	9.40	6.46	0.87**
磁铁矿石	9.79	0.085	0.90**	6.34	9.14	0.96**
砾石	5.62	29.27	0.90**	1.11	3.48	0.75*

注: * 表示显著水平; ** 表示极显著水平。

参考文献:

- [1] 雒和敏, 曹国璞. 活性炭对含铅废水吸附特性研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(2): 373-376.
- LUO He-min, CAO Guo-pu. Study on adsorption characteristics of activated carbon to leaded wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(2): 373-376.
- [2] 李忠国, 李金惠, 段华波. 钡盐共沉淀法处理酸性含铅废水[J]. 环境工程学报, 2007, 1(11): 51-54.
- LI Zhong-guo, LI Jin-hui, DUAN Hua-bo. Treatment of acidic lead-containing wastewater by depositing together with barium salt[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(11): 51-54.
- [3] Kobya M, Demiras E, Senturk E, et al. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(13): 1518-1521.
- [4] 赵庆良, 夏小青, 王广智, 等. 沸石及其改性材料硅碳素处理含铅废水[J]. 环境科学研究, 2011, 24(9): 1023-1028.
- ZHAO Qing-liang, XIA Xiao-qing, WANG Guang-zhi, et al. Lead-laden wastewater treatment with zeolite and a modified material ANJ. SIC[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(9): 1023-1028.
- [5] 黄 正, Sakadevan K, Bavor J. Cd^{2+} , Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对人工湿地反硝化作用的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(4): 110-112.
- HUANG Zheng, Sakadevan K, Bavor J. Cd^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} influence on denitrification in constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(4): 110-112.
- [6] 李志刚, 李素丽, 梅利民, 等. 美人蕉 (*Canna indica* Linn.) 和芦苇 (*Phragmites australis* L.) 人工湿地对含铬生活污水的净化效果及植物的生理生态变化[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 358-365.
- LI Zhi-gang, LI Su-li, MEI Li-min, et al. Chromium purification effects on domestic wastewater and physiological changes of *Canna indica* Linn. and *Phragmites australis* L. in constructed wetlands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 358-365.
- [7] Yeh T Y, Chou C C, Pan C T. Heavy metal removal within pilot-scale constructed wetlands receiving river water contaminated by confined swine operations[J]. *Desalination*, 2009, 249(1): 368-373.
- [8] 李志刚, 黄海莲, 李素丽, 等. 铬对人工湿地净化生活污水的影响及铬积累规律[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1362-1368.
- LI Zhi-gang, HUANG Hai-lian, LI Su-li, et al. Effects of chromium on purification of domestic wastewater and its accumulation in constructed wetlands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1362-1368.
- [9] 靳振江, 刘 杰, 肖 瑜, 等. 处理重金属废水人工湿地中微生物群落结构和酶活性变化[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1202-1209.
- JIN Zhen-jiang, LIU Jie, XIAO Yu, et al. Spatial difference of microbial community structure and enzyme activity in constructed wetlands receiving wastewater containing heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 1202-1209.
- [10] Park N, Kim J H, Cho J. Organic matter, anion, and metal wastewater treatment in Damyang surface-flow constructed wetlands in Korea[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32(1): 68-71.
- [11] 叶志鸿, 陈桂珠, 蓝崇钰, 等. 宽叶香蒲净化塘系统净化铅锌废水效应的研究[J]. 应用生态学报, 1992, 3(2): 190-194.
- YE Zhi-hong, CHEN Gui-zhu, LAN Chong-yu, et al. Effect of treating Pb/Zn mine wastewater with typha latifolia purification pond system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, 3(2): 190-194.
- [12] 招文锐, 杨 兵, 朱新民, 等. 人工湿地处理凡口铅锌矿金属废水的稳定性分析[J]. 生态科学, 2001, 20(4): 16-19.
- ZHAO Wen-rui, YANG Bing, ZHU Xin-min, et al. The stability of constructed wetland in treating heavy metal wastewater released from a Pb/Zn mine at Fankou of Guangdong Province[J]. *Ecologic Science*, 2001, 20(4): 16-19.
- [13] 曹优明, 朱启红, 戴 涛, 等. 金边麦冬人工湿地对含铅废水的处理研究[J]. 工业水处理, 2012, 32(2): 41-43.
- CAO You-ming, ZHU Qi-hong, DAI Tao, et al. Study on the effect of phnom penh ophiopogon artificial wetlands on the treatment of lead-bearing wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, 32(2): 41-43.
- [14] 籍国东, 孙铁珩, 李 顺. 人工湿地及其在工业废水中的应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 224-228.
- JI Guo-dong, SUN Tie-heng, LI Shun. Constructed wetland and its application for industrial wastewater treatment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 224-228.
- [15] 朱铁群, 解 蒙, 袁 航. 人工湿地基质及其去除机理[J]. 节水灌溉, 2008(10): 37-40.
- ZHU Tie-qun, XIE Meng, YUAN Hang. Substrates in constructed wetlands and its decontamination mechanism[J]. *Water Saving Irrigation*, 2008(10): 37-40.
- [16] 李国新, 薛培英, 李庆召, 等. pH 对穗花狐尾藻吸附重金属镉的影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(11): 1329-1333.
- LI Guo-xin, XUE Pei-ying, LI Qing-zhao, et al. Effect of pH on cadmium bio-sorption by *Myriophyllum spicatum*[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(11): 1329-1333.
- [17] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 51-55.
- YUAN Dong-hai, JING Li-jie, GAO Shi-xiang, et al. Analysis on the removal efficiency of phosphorus in some substrates used in constructed wetland systems[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 51-55.