

文章编号:1000-5641(2011)01-0126-09

以蜂巢石为基质的垂直流人工湿地对黑臭水体除磷中试研究

李真¹, 罗锦洪¹, 黄民生¹, 张勇², 何岩¹

(1. 华东师范大学 资源与环境科学学院, 上海 200062; 2. 安徽建筑工业学院, 合肥 230022)

摘要: 以水生植物-梭鱼草作为湿地植物, 新型填料蜂巢石作为湿地填料, 构建了同时具有美化景观与净化黑臭水体的垂直流人工湿地, 并将其成功应用于黑臭水体除磷的中试研究. 试验结果表明, 人工湿地的 TP 去除率为 58.13%~83.25%, 且 TP 去除率的变化趋势与气温变化趋势相一致. TP 的去除效果具有一定的时空变化规律, 在运行时间小于 2 个月时, 蜂巢石表层 20 cm 表现出较其它深度更强的除磷效果; 运行时间大于 2 个月时, 不同深度蜂巢石的除磷能力差异不大. 利用 SPSS V13.0 分析 5 个月中蜂巢石 20 cm 深度处三价铁与磷含量的相关性, 得到皮尔森相关系数 $r = -0.692$, $P = 0.018 < 0.05$, 表明三价铁含量与磷的含量呈现显著负相关性.

关键词: 蜂巢石; 垂直流人工湿地; 黑臭水体; 梭鱼草; 除磷

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2011.01.014

Pilot scale study on phosphorus removal from malodorous water body by pumice vertical flow constructed wetlands

LI Zhen¹, LUO Jin-hong¹, HUANG Min-sheng¹, ZHANG Yong², HE Yan¹

(1. School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Anhui Institute of Architecture & Industry, Hefei 230022, China)

Abstract: Aquatic plants (*Pontederia cordata*) and packing material (pumice) were chosen to construct vertical flow constructed wetlands (VFCW) which have functions of both landscaping and purification of malodorous water body. The pilot study on phosphorus removal from malodorous water body by pumice VFCW was conducted successfully. The concentration of total phosphorus (TP) in influent and effluent of VFCW were detected at different times. The results show that removal rate of TP ranged 58.13%~83.25% and the changing trend of TP removal rate is in accordance with that of temperature. The TP removal effect varies with time and space: In case of short experimental runs (less than 2 months), the surface (less than 20 cm thick) of pumice displays stronger removal effect of phosphorus than other depths; in case of more than 2 months, the removal effects of phosphorus have small variations in different depths. Study on

收稿日期:2010-08

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX07317-006, 2009ZX07317-009)

第一作者:李真,男,硕士研究生,研究方向为水环境治理与修复技术. E-mail:zhenflash@163.com.

通讯作者:黄民生,男,教授,博士生导师,研究方向为水环境治理与修复技术.

E-mail:ms Huang@des.ecnu.edu.cn.

the correlation between ferric iron and phosphorus in the depth of 20 cm by SPSS V13.0 shows Pearson correlation coefficient $r = -0.692$, $P = 0.018 < 0.05$, which indicates a negative correlation between the concentrations of ferric iron and the phosphorus.

Key words: pumice; vertical flow constructed wetland; malodorous water body; *Pontederia cordata*; phosphorus removal

0 引 言

城市河道黑臭现象已经成为当今城市环境改善面临的一大难题.城市河道黑臭的主要原因是过量纳污,导致水体供氧和耗氧失衡,使得污染物转化并产生氨氮、硫化氢和挥发性有机酸等一系列臭恶物质以及铁、锰硫化物等黑色物质^[1].针对这一问题国内外出现了各式各样的城市黑臭水体处理技术,概括起来主要是物理法、化学法和生物法.物理法和化学法中如截污、调水和清淤等,需要建筑大型的构筑物,费用高;化学法絮凝虽然效果明显,但化学污泥产量大,有一定的毒性,会造成二次污染.由于水体底泥营养物质的不断释放,地面各种干湿沉降的增加,物理法和化学法不能够从根本上解决河水黑臭的问题^[2].

当水体中磷的浓度在 $0.02\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上时,对水体的富营养化就有明显的促进作用^[3].而且黑臭河道水体中磷是最主要的污染物之一;在治理河道黑臭时,当黑臭消除后,往往会出现富营养化现象,而磷又是富营养化的重要营养因子,因此除磷对于治理和控制水体黑臭具有重要意义.垂直流人工湿地技术是一种高效生态水质净化技术,有独特的构筑结构和水流模式,占地面积相对较小,有较强的 N、P 去除能力,可以长期稳定运行;总之,具有工艺先进、技术可靠、高效节能、简便易行、投资省、运行费用低和改善生态环境等诸多优点^[4].利用人工湿地系统中的基质、水生植物和微生物的共同作用除磷,被认为是一种廉价而又十分有效的废水处理技术,得到不断发展和推广应用^[5,6].但目前人工湿地除磷技术主要应用于处理生活污水、农业点源和面源污染以及治理水体富营养化等方面^[7],利用人工湿地处理城市河道黑臭水体还少见报道.作为城市环境的一个重要组成部分,城市黑臭河道的治理不仅要考虑净化效果还需要考虑城市景观效应,在此背景下本文以上海市城区某黑臭河道为研究对象,选择水生植物梭鱼草和新型填料蜂巢石,构建同时具有景观及污水净化效应的垂直流人工湿地,并开展对黑臭河水除磷的中试研究,以期对黑臭水体的治理及富营养化等次生环境灾害控制提供一定的参考.

1 材料与 方法

1.1 人工湿地工艺设计

人工湿地结构主体采用透明 PVC 塑料板构建,其尺寸为 $180\text{ cm}(L) \times 100\text{ cm}(W) \times 130\text{ cm}(H)$ (见图 1).采用 PVC 塑料隔板将主体分为左、中、右 3 个槽体,分别为初次沉淀池、垂直流人工湿地及二次沉淀池.水体在装置中的运行途径为:由进水口进入,由于挡板的作用使得水体下行,经过流断面从槽体底部上行进入初次沉淀池,水体中的悬浮物经初次沉淀池的沉淀作用,而从顶端溢流进入垂直流人工湿地.在垂直流人工湿地中,水流下行经填料底部的过流断面进入二次沉淀池,由出水口排出.

于进水口设置一挡板,避免污水直接进入初次沉淀池造成对系统的冲击并延长水体在装

置中的停留时间. 为防湿地内河水短流, 进水口挡板、垂直流人工湿地的过流断面均设计为离槽底 10 cm 的位置. 由于进水中一般情况下含有较多的固体悬浮物(SS), 如果含有大量 SS 的污水直接进入人工湿地则易造成湿地内基质的堵塞, 影响湿地的正常运行, SS 的长期积累会缩短人工湿地的使用寿命. 为避免上述情况的发生, 特设计初次沉淀池以除去水体中的 SS 并起到对进水缓冲的作用. 二次沉淀池的目的在于对人工湿地的出水作进一步沉淀.

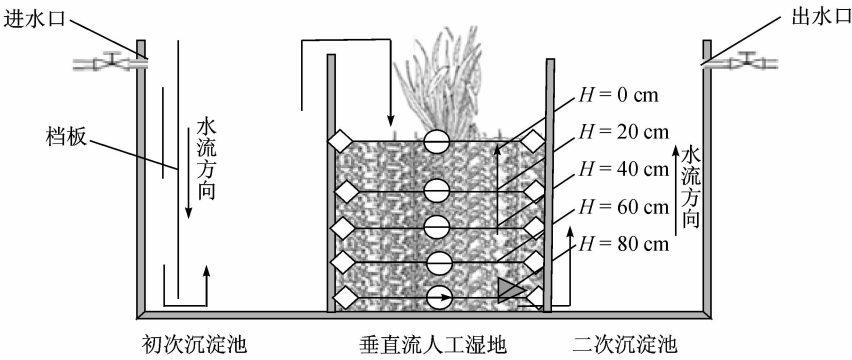


图 1 垂直流人工湿地工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vertical flow constructed wetlands

1.2 填料的选择

籍国东^[8]等人研究认为, 人工湿地对磷的去除主要是通过微生物的积累、植物的吸收和基质的物理化学作用等协同作用完成的, 其中最主要的是基质对磷的吸附和沉淀作用. 目前的研究^[9,10]表明富含钙、铁及铝的基质对污水中磷的净化能力较强, 而含硅量较高的基质则净化能力较差. 本文选择的填料蜂巢石外形如图 2 所示. 蜂巢石为火山熔岩的一种, 其主要成分为铁、铝、镁、钙的氧化物, 这些都是絮凝剂的有效成分. 且表面多孔、比表面积大、密度小($0.7\sim1.1\text{ g/cm}^3$, 与水的比重接近), 在污水中大部分处于悬浮状态, 能达到充分与水体混合及便于微生物立体生长的目的, 能避免其它刚性固体填料而造成的接触面间的死角, 增强了微生物的净化效果. 基于蜂巢石所具有的这一良好特性, 本研究选择蜂巢石作为垂直流人工湿地的填料, 对其去除黑臭水体中磷的效果进行探索. 对蜂巢石样品进行 X 射线荧光光谱分析, 结果见表 1.



图 2 蜂巢石

Fig. 2 Pumice

表 1 蜂巢石化学成分 XRF 分析结果

Tab. 1 Analysis of chemical composition of pumice powder samples by XRF							%
Sample	CaO	K ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	
GSD-9 标准值	5.35 ± 0.09	1.99 ± 0.06	64.89 ± 0.11	10.58 ± 0.10	2.39 ± 0.06	1.44 ± 0.04	
GSD-9 测试值	5.47	1.86	67.11	10.71	2.26	1.43	
蜂巢石	6.38	2.33	44.24	11.89	4.29	4.00	
Sample	Zn	Cu	Ni	Fe	Mn	Ti	
GSD-9 标准值	(7.80 ± 0.40) × 10 ⁻³	(3.20 ± 0.20) × 10 ⁻³	(3.20 ± 0.20) × 10 ⁻³	4.86 ± 0.07	(6.20 ± 0.20) × 10 ⁻²	0.55 ± 0.02	
GSD-9 测试值	8.36 × 10 ⁻³	3.28 × 10 ⁻³	4.07 × 10 ⁻³	4.74	6.03 × 10 ⁻²	0.53	
蜂巢石	1.07 × 10 ⁻²	2.57 × 10 ⁻³	6.22 × 10 ⁻³	12.25	0.12	1.46	

注:GSD-9 标准值指 GSD 标准物质推荐含量值,GSD-9 测试值指本次测定用以用该标准样品作为未测样品进行测试获得的值,和上面的标准值比较可以判定本次测试的准确性

1.3 水生植物的选择

利用高等水生植物对氮、磷等无机营养物的吸收来防治水体富营养化^[11-13],是当前环保领域的一个重要课题.成水平^[14-16]等人研究表明植物对污水净化的作用主要分为直接作用和间接作用:直接作用是指植物通过吸收、吸附和富集等作用直接去除污水中的污染物质,间接作用是指依靠植物根茎输送氧气,增强和维持基质的水力传输,影响水力停留时间以及根系表面附着大量微生物来去除水体中的污染物质.在以往的研究中对芦苇、香蒲、菹草和浮萍等水生植物报道较多^[12,17-19],这些研究主要侧重于植物的净化效果,较少顾及水生植物的景观功能,而另一些具有较高观赏价值的水生植物则相对研究较少.梭鱼草(*P. cordata*) (见图 3),雨久花科梭鱼草属植物,形态特征为:须根细而密,有地下根状茎,地上茎丛生,5℃以下地上部分枯萎,但可以依靠地下根茎越冬;入水深可至 30 cm,全年绿色期约 200 d,生长适应性强;蓝花串串,叶形雅致,是夏季优良的水生观赏花卉,适合池栽、盆栽、丛植和带植,也可作为河道水体治理的先锋植物^[20].这些特征表明梭鱼草不仅具有净化水体的功能,还兼具美化环境的作用,符合城市黑臭河道治理所需的兼具景观效应及净化功能的要求,可以作为构建人工湿地的水生植物.



图 3 梭鱼草

Fig. 3 *Pontederia cordata*

1.4 试验植物、填料及水质指标检测方法

梭鱼草(*Pontederia cordata*):购于上海市泽龙生物工程有限公司.蜂巢石(Pumice):购于河南省巩义市华龙滤料厂.水样水质理化指标(pH, COD_{Cr}, BOD₅, NH₄⁺-N, TP)的测定按照标准方法^[21]进行.

1.5 进水水质

垂直流人工湿地进水水质状况如表 2 所示.

表 2 垂直流人工湿地进水水质状况

Tab. 2 Water quality of influent in vertical flow constructed wetlands						
测试指标	pH	COD _{Cr} /(mg · L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg · L ⁻¹)	TP/(mg · L ⁻¹)	NH ₃ -N/(mg · L ⁻¹)	
参数范围	7.8~8.2	80~120	13~15	1.2~1.9	10~20	

2 结 果

2.1 垂直流人工湿地的除磷效果

试验自 2009 年 06 月 10 日至 2009 年 11 月 10 日,每隔 15 d 对人工湿地进、出水水体 TP 浓度进行测定.图 4 为不同采样时间里人工湿地进、出水水体中 TP 浓度及 TP 去除率的变化情况. TP 去除率呈现出先增加后下降最后趋于稳定的规律. 2009 年 07 月 10 日之前 TP 去除率呈现直线上升的趋势,于 07 月 10 日达到最大值,此时 TP 去除率为最高达 83.25%,之后逐渐下降,这一趋势一直延续至 10 月 10 日,此时 TP 去除率已下降至 58.13%,但此后去除率一直维持在 58.13%直至试验结束. 这一变化规律表明本试验设计的人工湿地对 TP 去除率为 58.13%~83.25%. 试验中 TP 的去除分为两个阶段,第一阶段主要有蜂巢石吸附、沉淀和植物吸收. 第二阶段蜂巢石吸附饱和,主要有化学沉淀、微生物和植物作用. 本试验第一阶段为 6 月 10 日至 8 月 10 日,TP 的平均去除率为 74.62%. 第二阶段为 8 月 10 日至实验结束,蜂巢石吸附饱和后,TP 去除率持续降低,随着时间的延长,生物膜逐渐建立,微生物降解作用增强,TP 的去除率保持相对稳定.

进出水口 TP 变化柱状图显示出:08 月 10 日之前的人工湿地进水 TP 浓度明显高于之后的浓度. 其主要原因为这一段时间气温较高,相应的黑臭水体温度出现高值,而在温度较高的情况下,底泥中的磷经悬浮作用进入上覆水体,使得进水口 TP 浓度较其它时间有所增加^[22].

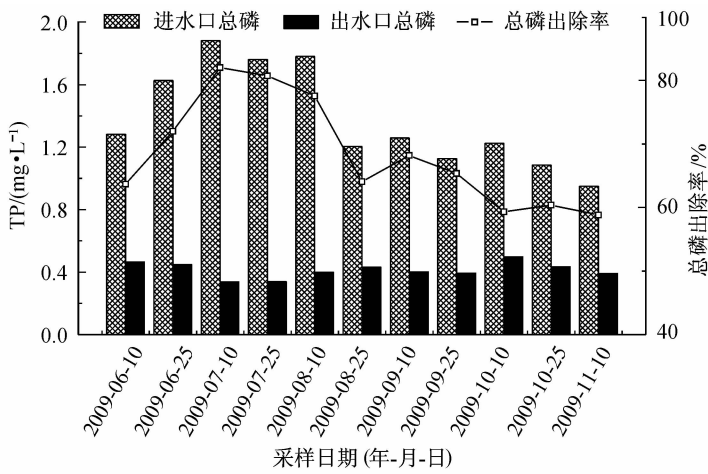


图 4 垂直流人工湿地进出水 TP 浓度及其去除率

Fig. 4 Concentrations of TP in influent and effluent of VFCW and its TP removal rates

2.2 蜂巢石各层的除磷效果

在本试验进行的时间段里,每隔 15 d 对填料表层 0,20,40,60 和 80 cm 处水体中的 TP 进行测定,试验结果如图 5 所示. 在试验的前 2 个月内,蜂巢石上 20 cm 表现出较其它深度更为明显的除磷能力,这一结果与李晓东^[23]等人对高炉矿渣除磷的研究结果相同,即表层填料的除磷能力优于其它填料层. 但在运行 2 个月之后,不同深度蜂巢石的除磷能力差异减小. 这可能是在运行的前 2 个月里蜂巢石主要依靠物理吸附作用除磷,因表层的蜂巢石彼此之间接触比较疏松,与水体接触的面积大,磷吸附位点数量也较其它深度多,所以表现出了比其它深度更强的除磷能力. 另外,与铁的含量也具有相关性. 而在运行一段时间之后,蜂

巢石对磷的吸附达到饱和,此时蜂巢石主要依靠化学沉淀作用、生物膜作用除磷,这两种作用不同于蜂巢石初期的物理吸附作用,而各层之间的除磷效果差异较小.

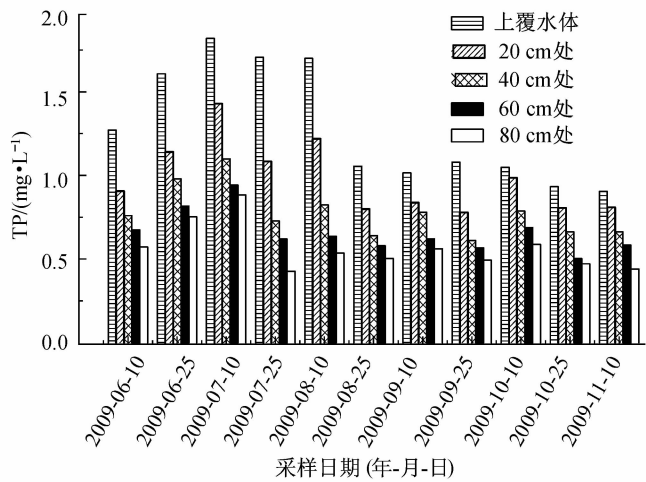


图 5 蜂巢石不同深度水体中的 TP 浓度
Fig. 5 Concentrations of TP in the different depth of pumice

2.3 铁对磷的去除作用

含有三价铁离子的填料的除磷效果好于含 Al^{3+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} 等离子体的填料^[24],铁的氧化物是蜂巢石主要成分之一,对湿地中的磷具有去除作用. 厌氧条件通常与湿地中磷的释放有关,而好氧条件则与湿地中磷的吸收有关. 厌氧条件下填料与湿地水体中的 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,使铁磷化合物的溶解度增加,从而导致磷的释放;好氧条件下 Fe^{2+} 则被氧化成 Fe^{3+} , Fe^{3+} 一方面与磷酸根形成难溶性铁盐,另一方面生成的铁盐通过溶解和吸水发生强烈水解,同时发生聚合反应,生成具有较长线形结构的羟基络合物. 这些含铁的羟基络合物通过电中和、吸附架桥及絮体的卷扫作用使胶体凝聚,最后通过分离沉淀将磷去除^[25]. 已有研究表明,多种植物的根系都具有形成铁胶膜的能力^[26],湿地植物根表面铁氧化物胶膜是两性胶体,对土壤中的磷酸根离子也有强烈的吸附作用,可以减少土壤中的磷^[27]. 本实验中,由图 5 和 6 可知,蜂巢石 20 cm 深度的铁含量远高于其他深度,并且高于进水中的铁含量. 这是由于蜂巢石成分中铁的释放以及蜂巢石对颗粒态铁的吸附所造成的. 20 cm 深度的磷具有最大去除率,应用 SPSS 软件分析该层 5 个月中铁含量与磷去除之间的相关性,得到皮尔森相关系数 $r = -0.692$, $P = 0.018 < 0.050$,表明三价铁含量与磷的含量呈现显著负相关性,这说明铁含量越高磷去除效果越明显,三价铁对磷去除具有明显地促进作用.

3 讨 论

虽然近年关于人工湿地处理富营养化水体的研究报道较多,但是利用人工湿地处理黑臭水体的研究却相对较少. 本试验在课题组前期利用梭鱼草,成功构建了生物净化槽处理黑臭水体的基础上,选用梭鱼草与蜂巢石组合构建人工湿地,初步探索了人工湿地对黑臭水体磷去除的效果. 与前期利用梭鱼草构建的生物净化槽相比,人工湿地在除磷方面有较大的提高,TP 去除率为 58.13%~83.25%,而前者仅为 26.70%^[28]. 而已有的研究结果表明填料

的除磷作用主要包括化学沉淀、物理吸附和生物作用等几个方面,化学沉淀受溶度积控制,可分为钙、镁或铁、铝控制的两种转化系统.物理吸附由填料的表面性质决定,受填料的表面积和活性基团控制,一般认为磷酸根离子主要通过配位体交换而被吸附停留在填料表面^[25].本试验选用的填料蜂巢石比表面积大,密度小,在污水中大部分处于悬浮状态,能达到充分与水体混合及便于微生物立体生长的目的、并且富含钙、铁、镁、铝及其氧化物,这样的特性有利用蜂巢石对磷的化学沉淀、物理吸附和生物除磷作用的充分发挥,这也正是本试验除磷效果有所提高的重要原因.同时,人工湿地 TP 去除率变化趋势与气温的变化趋势是一致的,这一现象与维维国^[27]等人的研究结果一致,其原因可能为当季节温度升高时,植物根系活动活跃,附近微生物代谢功能加强,而根系和微生物组成的复杂介质环境整体上又使得填料吸附拦截作用增强,从而提高除磷效率.

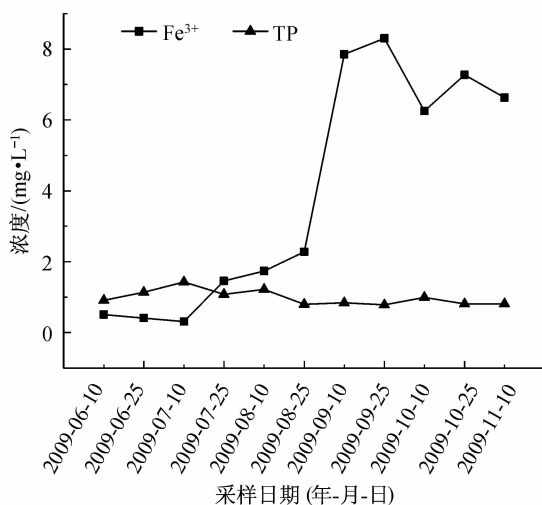


图 6 蜂巢石 20 cm 深度处中 Fe^{3+} 和 TP 浓度

Fig. 6 Concentrations of Fe^{3+} and TP in the depth of 20 cm in pumice

4 结 论

(1) 本研究构建的垂直流人工湿地对城市黑臭水体具有较好的除磷效果,通过人工湿地净化之后出水 TP 去除率为 58.13%~83.25%.

(2) 运行时间小于 2 个月时,蜂巢石的表层表现出较其它深度更强的除磷效果;而运行时间大于 2 个月时,不同深度蜂巢石的除磷能力差异较小.

(3) 蜂巢石表层三价铁的含量高于其他深度,三价铁含量与磷的含量呈现显著负相关,对磷去除具有明显地促进作用.

[参 考 文 献]

- [1] 钱嫦萍,王东启,陈振楼,等.生物修复技术在黑臭河道治理中的应用[J].水处理技术,2009,35(4):13-16.
QIAN C P, WANG D Q, CHEN Z L, et al. Progress of bioremediation for controlling blackening and stink of rivers [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(4): 13-16.
- [2] 郝桂玉,黄民生,徐亚同.生物修复原理及其在黑臭水体治理中的应用[J].净水技术,2004,23(2):39-42.
HAO G Y, HUANG M S, XU Y T. Theory of bioremediation and its application of treatment on malodorous

- black river [J]. *Water Purification Technology*, 2004, 23(2): 39-42.
- [3] 杨维荣. 环境化学[M]. 北京:人民教育出版社, 1980.
YANG W R. *Environmental Chemistry*[M]. Beijing: People's Education Press, 1980.
- [4] 白玉华, 章小军, 雷志洪, 等. 垂直流人工湿地净化机理及工程实践[J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34(7): 762-764.
BAI Y H, ZHANG X J, LEI Z H, et al. Mechanisms and applied engineering of vertical flow constructed wetland in wastewater treatment [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34(7): 762-764.
- [5] 贺锋. 复合构建湿地运行初期理化性质及氮的变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(3): 279-283.
HE F. Phys-chemical character and nitrogen changes in integrated constructed wetland at the initial stage of operation [J]. *Resources and Environment in the Yangtza Basin*, 2002, 11(3): 279-283.
- [6] 白晓慧, 王宝贞, 余敏, 等. 人工湿地污水处理技术及其发展应用[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999, 32(6): 88-92.
BAI X H, WANG B Z, YU M, et al. Development of constructed wetland wastewater treatment technology and its application in China [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1999, 32(6): 88-92.
- [7] 李晓东, 孙铁珩, 李海波, 等. 人工湿地除磷研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1226-1232.
LI X D, SUN T H, LI H B, et al. Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1226-1232.
- [8] 籍国东, 倪晋仁. 人工湿地废水生态处理系统的作用机制[J]. *环境污染治理技术和设备*, 2004, 5(6): 71-75.
JI G D, NI J R. Mechanisms of constructed wetland wastewater ecological treatment systems [J]. *Techniques and Equipment for Environment Pollution Control*, 2004, 5(6): 71-75.
- [9] DRIZO A, FROST C A, GRACE J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems [J]. *Water Resource*, 1996, 33(17): 3595-3602.
- [10] YUAN G, LAKULICH L M. Phosphate adsorption in relationship to extractable iron and aluminum in spodosols [J]. *Soil Science*, 1994, 58: 343-346.
- [11] 唐述虞, 史建文, 陈建国, 等. 凤眼莲生态工程在炼油废水深度处理中的应用研究[J]. *环境科学学报*, 1994, 15(1): 98-104.
TANG S Y, SHI J W, CHEN J G, et al. Application of eichhornia crassipes on treatment of oil-refinery wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1994, 15(1): 98-104.
- [12] 娄敏, 廖柏寒, 刘红玉, 等. 3种水生漂浮植物处理富营养化水体的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 194-195.
LOU M, LIAO B H, LIU H Y, et al. Study of three aquatic floating plants to treat the water eutrophication [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 194-195.
- [13] NYAKANGO J B, VAN BRUGGEN J J A. Combination of a well functioning constructed wetland with a pleasing landscape design in Nairobi, Kenya [J]. *Water Science Technology*, 1999, 40(3): 249-256.
- [14] 成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(2): 179~184.
CHENG S P, WU Z B, KUANG Q J. Macrophytes in artificial wetland [J]. *Journal of Lake Science*, 2002, 14(2): 179-184.
- [15] VYMAZAL J. The use of subsurface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic [J]. *Ecological Engineering*, 2002, 18(5): 633-646.
- [16] WOOD A. Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding [J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32(3): 21-29.
- [17] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(2): 38-39.
ZHONG Y X, HU H Y, QIAN Y. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(2): 38-39.

- [18] 李睿华, 管运涛, 何苗, 等. 河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水中试研究[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 493-497.
- LI R H, GUAN Y T, HE M, et al. Pilot-scale study on riparian phragmites communis, *Zizania latifolia* and *Typha angustifolia* L. zones treating polluted river water[J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 493-497.
- [19] 周守标, 王春景, 杨海军, 等. 菰和菖蒲在污水中的生长特性及其净化效果比较[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(4): 454-457.
- ZHOU S B, WANG C J, YANG H J, et al. Growth of *Zizania latifolia* and *Acorus calamus* in sewage and their effect on sewage purification [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2007, 13(4): 454-457.
- [20] 卢晓明. 植物净化槽处理城市黑臭河水的效果、机理及工程示范[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- LU X M. Effect and mechanism of botanic purifying-tank during treatment for heavily polluted river water and engineering demonstration [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [21] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Ministry of Environmental Protection the People's Republic of China, *Determination Methods for Examination of Water and Wastewater* Editorial Committee. Determination Methods for Examination of Water and Wastewater [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [22] 肖文胜, 杨开, 郭建林, 等. 环境因子对湖泊底泥释磷的影响研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(3): 51-53.
- XIAO W S, YANG K, GUO J L, et al. Study on effect of environmental factors on phosphorus release from sediments in lake [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(3): 51-53.
- [23] 李晓东, 师晓春, 晁雷, 等. 高炉矿渣基质人工湿地除磷特性研究[J]. 气象与环境学报, 2009, 25(1): 45-49.
- LI X D, SHI X C, CHAO L, et al. Phosphorus removal efficiency of blast-furnace slag substrate in constructed wetland [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2009, 25(1): 45-49.
- [24] 张晟. 复合垂直流人工湿地系统除磷研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007.
- ZHANG S. Studies on phosphorus removal in integrated vertical flow constructed wetland [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, China Academy of Sciences, 2007.
- [25] 徐丰果, 罗建中, 凌定勋. 废水化学除磷的现状与进展[J]. 工业水处理, 2003, 23(5): 18-20.
- XU F G, LUO J Z, LING D X. Present and prospects of the removal of phosphorus from wastewater chemically [J]. Industrial Water Treatment, 2003, 23(5): 18-20.
- [26] 刘文菊, 朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 359-362.
- LIU W J, ZHU Y G. Iron and Mn plaques on the surface of roots [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(2): 359-362.
- [27] 雒维国, 王世和, 钱卫一, 等. 潜流型人工湿地除磷效果研究[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(4): 21-25.
- LUO W G, WANG S H, QIAN W Y, et al. Study on the phosphorus removal effect of subsurface constructed wetland [J]. Safety and Environmental Engineering, 2004, 11(4): 21-25.
- [28] 高尚, 黄民生, 吴林林, 等. 生物净化槽对黑臭河水净化的中试研究[J]. 中国环境科学, 2008, 28(5): 433-437.
- GAO S, HUANG M S, WU L L, et al. The control test-study of biological purification tank on malodorous river water purification [J]. China Environmental Science, 2008, 28(5): 433-437.