

# 生态砾石床 + 植物碎石床用于城市黑臭水体治理

李 婧, 张国宇, 孙 娜, 王文冬, 任 丹  
(北京金泽环境能源技术研究有限公司, 北京 100101)

**摘 要:** 采用生态砾石床 + 植物碎石床组合工艺处理某城市黑臭水体, 运行结果显示, 该组合工艺对黑臭水体有明显的去污效果。当原水  $\text{COD} \leq 60 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 3.0 \text{ mg/L}$  时, 该组合工艺对 COD、氨氮的平均去除率分别可达 47% 和 50%, 其中生态砾石床对 COD 和氨氮的平均去除率分别为 32% 和 29%, 植物碎石床对 COD 和氨氮的平均去除率分别为 23% 和 28.7%。该组合工艺能够保证最终出水水质稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类水体限值, 使水体景观得以良好恢复, 且运行费仅为  $0.006 \text{ 元/m}^3$ 。

**关键词:** 黑臭水体; 生态砾石床; 植物碎石床; 氨氮

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)06-0102-06

## Application of Ecological Gravel Bed and Plant Gravel Bed Combined Process in Urban Black Odor Water Body Treatment

LI Jing, ZHANG Guo-yu, SUN Na, WANG Wen-dong, REN Dan  
(Beijing Jinze Environment and Energy Technology Research Co. Ltd., Beijing 100101, China)

**Abstract:** A combined process of ecological gravel bed and plant gravel bed was used to treat urban black odor water body. The operation showed a remarkable result. When the COD and ammonia nitrogen of raw water was no more than  $60 \text{ mg/L}$  and  $3 \text{ mg/L}$  respectively, the average removal rates of COD and ammonia nitrogen were 47% and 50% respectively, among which the average removal rates of COD and ammonia nitrogen by ecological gravel bed was 32% and 29% respectively; while those by plant gravel bed was 23% and 28.7% respectively. The combined process could ensure the final effluent met level V of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002) and the operation cost was only  $0.006 \text{ yuan/m}^3$ , so that the water landscape could recover.

**Key words:** black odor water body; ecological gravel bed; plant gravel bed; ammonia nitrogen

长期以来,我国的水污染控制重心一直放在点源污染控制上,对面源污染的治理重视程度不够,河道受面源污染的程度越来越严重,导致水体出现发黑、发臭现象。黑臭水体的治理方法一般分为四类:物理法、化学法、生物法、自然法。生物法由于治理后不产生二次污染,对水生态不会产生不利影响,故在实践中得到广泛应用。生物法一般包括三种:投菌、生物膜和曝气充氧。投菌法一般适用于水流状

态不好的水体,药剂费用较高;曝气充氧在实际运行管理中比较麻烦;工程中广泛采用生物膜法,生态砾石床接触氧化法是生物膜法的一种,日本、韩国都有使用该法处理河道、湖泊的工程实例,如日本江户川支流坂川的古崎净化厂就是利用直径为  $15 \sim 25 \text{ cm}$  的卵石对污水进行净化。生态砾石床接触氧化法能耗低、生态系统恢复效果好,特别适用于河湖水的治理<sup>[1-2]</sup>。

黑臭水体受污染情况比较复杂,采取单一方法往往不能达到理想的治理效果,通常会采用组合工艺来实现对水体的治理。自然净化法由于强调人与自然的和谐统一,因而成为当前国内外水体生态修复研究的重点,人工湿地技术是自然净化法的一种<sup>[3]</sup>。人工湿地种类较多,目前应用较多的有两种:一种以土壤为基质,占地较大,一般处理 $1\text{ m}^3$ 的污水需要 $10\text{ m}^2$ 以上的土地,适用于土地资源较丰富的地方;另外一种是以植物碎石床为主的综合生态处理工艺,它与普通人工湿地的区别在于填料不同,该工艺设计(特别是布水)科学、合理,通过在不同部位栽种不同的优良水生或湿生高等维管束植物,大幅提高水力负荷,减少占地面积。1990年,华南环境科学研究所深圳建造了我国首例植物碎石床项目,这是目前世界上处理能力和水力负荷最大的系统之一<sup>[4]</sup>。

## 1 项目概况

本工程待处理河道水为某市区最大的景观水体,近几年由于受到沿途工业企业排放废水的污染,污染物含量严重超出了河流的水环境容量,河道生态环境被破坏。虽然该市加大了对河道水的治理力度,但仍属于劣V类水体,无法满足流域水环境目标考核及功能水体水质要求。

在此背景下,市政府委托有关部门编制了《流域水环境综合整治行动计划》,到2016年该河道干流水质需稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V类标准,即 $\text{COD} \leq 40\text{ mg/L}$ 、 $\text{氨氮} \leq 2\text{ mg/L}$ 。

采用旁流式湿地系统对目标水体进行治理,根据建设方提供的资料,该河道枯水期水量为 $12.61 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,平水期为 $15.21 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,丰水期为 $21.26 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。设计规模取枯水期流量,并以平水期流量进行校核,达标排水自流入河道。

## 2 设计进、出水水质及工艺流程

### 2.1 设计进、出水水质

综合考虑该河道现状水质和各排污单位正在实施的污染物削减工程,设计进水水质: $\text{COD} \leq 60\text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 3.0\text{ mg/L}$ 。该河道出境断面应达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类标准,即 $\text{COD} \leq 40\text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 2.0\text{ mg/L}$ 。

### 2.2 处理工艺的确定

该黑臭水体不含重金属等有毒有害物质,需削

减的主要污染物为 $\text{COD}$ 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 。由于该河道水量较大、河道较长,若对河道采取大范围的整体治理,则施工难度和工程投资会大幅增加,且后续管理也比较麻烦。针对该河道水溶解氧含量较高及河道两侧有大量滩地可以利用的有利条件,决定采用生物膜技术和人工湿地技术联合处理。

生物膜技术以天然材料(如卵石、砾石)或人工材料(如塑料、纤维等)为载体,利用在其表面形成的生物膜对污染水体进行净化。分为接触氧化法(砾石接触氧化法和人工材料接触氧化法)、薄层流法、伏流净化法和生物活性炭法。

生态砾石床属于砾石接触氧化法,是由北京金泽环境能源技术研究股份有限公司开发的、具有自主知识产权的处理河道水的新型技术(专利号:ZL 201610127213. X),其在水体中放置一定量的砾石作填料,使水流断面上的微生物附着在填料表面,通过填料上附着的生物膜分解有机物,去除 $\text{COD}$ 、 $\text{氨氮}$ 。根据需要,前半段可设鼓风机曝气,后半段在去除有机物的同时沉淀去除悬浮物,达到水质净化的目的。

该技术的主要特点在于填料的特殊性,部分生态砾石床填料及其在工程中的应用的实景照片如图1所示。



图1 生态砾石床填料及其在工程中的应用

Fig. 1 Ecological gravel bed packing and application in project

该技术的优点主要体现在以下几个方面:①填料表面容易挂膜,且生物膜生长到适当厚度后会自然脱落;②可人为控制砾石填料直径和孔隙率,不易形成堵塞;③砾石之间的空隙可使部分活性污泥停留在其内部,形成厌氧环境,消解污泥,减少污泥产量;④砾石球密度较大,一般不随水漂流,坚固性强,经久耐用,长时间不需要更换填料;⑤抗冲击负荷能力强,即使进水不稳定也能保证出水水质;⑥运行管理简单。

该工艺为人工生态系统,具有造价低、运行费用低、水力负荷高的特点。按照设施与河道的相对位置,可分为在线式和旁路式。在线式是直接设置砾

石于河道内的河床上,旁路式则设置于河道边的滩地,多用于橡胶坝提升重力引水。

由于该河道为受污染程度较轻的黑臭水体,且生态砾石床接触氧化法对该类水体具有较好的处理效果,故采用生态砾石床接触氧化法,但是该工艺需要间歇曝气或连续曝气,而本项目进水 COD 和氨氮浓度均较高且处理水量很大,单独采用此工艺能耗非常高。经测定,该河道溶解氧为 7.0 ~ 8.4 mg/L (均值为 7.94 mg/L),可以达到微生物对氧的需求,为节约能耗,直接利用水体中的溶解氧,先采用生态砾石床降解一部分污染物,再采用人工湿地作为后处理工艺进一步降解污染物以保证出水水质达标。

人工湿地一般分为两类:表面流人工湿地和潜流人工湿地,潜流人工湿地又分为垂直潜流人工湿地、水平潜流人工湿地和复合潜流人工湿地。

表面流人工湿地的  $BOD_5$  负荷及水力负荷较低,占地面积较大且受温差变化影响大,因此不考虑表面流人工湿地。垂直潜流人工湿地和水平潜流人工湿地相比,水头损失较大,本项目从坝上直接重力引水,没有足够多的水头,所以考虑采用水平潜流人工湿地。植物碎石床水平潜流湿地工艺由于投资省、运行费用极低,且无需耗能,在实际工程中得到了越来越广泛的应用。综上所述,本项目采用“生态砾石床接触氧化法+植物碎石床水平潜流湿地”组合工艺对河道水进行联合治理<sup>[5-6]</sup>。

### 2.3 工艺流程

工艺流程如图 2 所示。

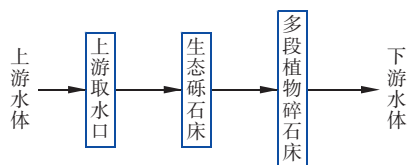


图2 工艺流程

Fig. 2 Flow chart of treatment process

本项目因势利导,首先利用河道内原有橡胶坝上游河道作为天然的沉淀池,上游受污染水体中悬浮固体颗粒依靠自由沉淀、絮凝沉淀作用进行部分去除;为进一步避免沉淀物和漂浮物进入生态砾石床+植物碎石床生态系统,将取水口设置于河道中间,并于取水口前设置粗格栅进行物理筛分预处理,然后顺次经过取水口、进水渠、配水渠后,进入生态砾石床及植物碎石床系统,经过滤、吸附、沉淀、离子

交换、植物吸收和微生物分解来实现对污水的高效净化,且具有处理效果好、氮磷去除能力强,运行维护管理方便、工程基建和运转费用低以及对负荷变化适应能力强等显著特点,还能与沿岸生态景观相结合,形成良好的湿地景观。

取水口具体构造如图 3 所示。

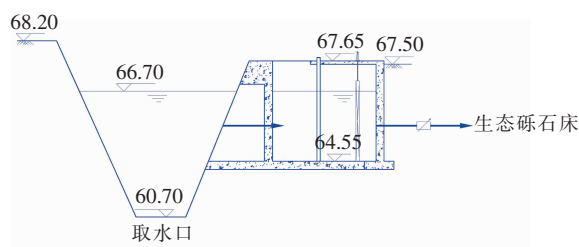


图3 取水口构造

Fig. 3 Water intake construction

## 3 生态砾石床、植物碎石床设计

### 3.1 生态砾石床

在生态砾石床处理单元前,设置取水闸门来保证总进水量,并设超声波明渠流量计进行计量,之后河水流入砾石床总进水渠,总进水渠出水缓慢流入砾石床主体单元进行净化。为防止砾石床发生堵塞时清池淘洗以及不影响处理单元运行,采用分格并联运行设计,共设 28 格,左岸右岸各 14 格,均分于河道两侧,总有效面积为 7 200 m<sup>2</sup>。在每格进口处设配水闸门,通过配水闸门来调节进入每格的水量。每格进水均设配水渠,采用穿孔花墙布水。每格出水均设收水渠,采用穿孔花墙收水,所有收水渠出水汇入总出水渠后流入后续碎石床。

生态砾石床具体构造如图 4 所示。

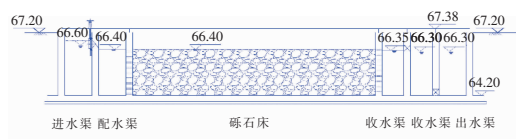


图4 生态砾石床构造

Fig. 4 Ecological gravel bed construction

池体设计有效水深为 2 m,超高为 0.8 m,底部铺设曝气管,兼起供氧和气洗作用。池内装填砾石填料,为微生物提供生长环境,砾石粒径为 100 mm,装填高度为 2.2 m,孔隙率为 60%。

在总进水渠末端设超越出水口,当来水水质好时直接超越进入后续碎石床处理单元进行处理,总进水渠中流速为 0.5 m/s 左右,较低的流速可使水中颗粒物发生沉淀,根据需要随时进行清理。



### 3.2 植物碎石床

植物碎石床共设 18 个单元,左岸右岸各设 9 个单元,每个单元设计 3 个子单元,每个子单元占该单元湿地面积的 1/3。为保证进、出水均匀,每个子单元的进水采用穿孔配水管,出水采用穿孔集水管。为便于调节水位,在每个子单元的出水端设置出水调节阀。为使污水在每个模块中很好地流动,防止出现死角,池底设计 1% 的坡度。每个子单元设计有效水深为 1.3 m,超高为 0.3 m。碎石床设计总有效面积为 7.5 hm<sup>2</sup>,左岸右岸各占 1/2,碎石深度为 1.2 m,粒径为 20 mm。

植物碎石床具体构造如图 5 所示。

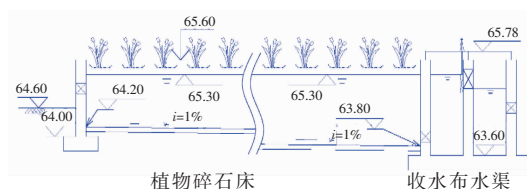


图 5 植物碎石床构造

Fig. 5 Plant gravel bed construction

### 3.3 碎石床植物的选择

湿地植物选择基于以下原则：

- ① 首选净化能力强的植物。
- ② 其次要考虑植物对区域环境的适应性以利于植物成活,尽可能选择本地物种,避免出现严重的病虫害或其他生态风险。
- ③ 尽量选用生长量较小的植物,以降低运营管理费用。
- ④ 选用年生长长期较长的水生植物,以免出现因冬季植物枯萎死亡或生长休眠而导致功能下降的现象。
- ⑤ 兼具景观效果。

根据上述原则,在植物碎石床第一子单元种植芦苇,第二子单元种植香蒲,第三子单元种植千屈菜<sup>[7-10]</sup>。

## 4 生态砾石床和植物碎石床运行效果

### 4.1 COD 去除效果

该工程于 2016 年 5 月开始运行,现选取 2016 年 5 月—8 月的实际运行数据进行分析,结果如图 6、7 所示。由图 6、7 可知:经过几个月的连续运行,河水 COD 呈下降趋势,系统最终出水 COD 浓度能够稳定达到设计要求。对于生态砾石床,运行初期对 COD 的去除以物理吸附为主,去除率较低;随着

系统挂膜成功,对 COD 的去除率逐渐升高并趋于稳定,此时对有机物的去除率约 40%。而对于植物碎石床,5 月植物刚刚栽种,此时对 COD 的去除主要为床体中的基质对有机物的吸附,去除率较低;随着时间推移,植物生长趋于旺盛,对 COD 的去除率逐渐升高。相对其他月份而言,7 月植物碎石床对 COD 的去除率降低,原因可能是该月降雨量较大,缩短了污水在湿地床中的停留时间,导致对污染物去除效率下降。8 月植物生长旺盛,对污染物去除效率较高,平均去除率在 30% 左右,出水水质接近地表水Ⅳ类限值。相对植物碎石床,砾石床对 COD 的去除率较高。

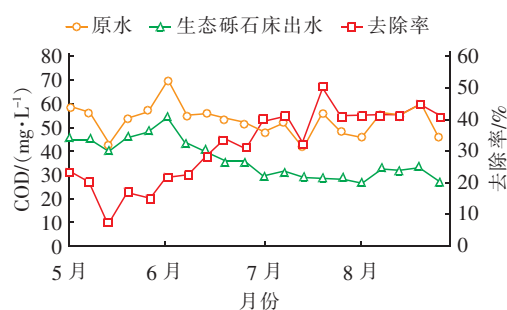


图 6 生态砾石床对 COD 的去除率

Fig. 6 Removal effect of COD by ecological gravel bed

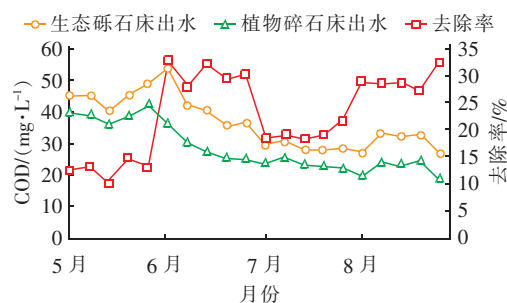


图 7 植物碎石床对 COD 的去除率

Fig. 7 Removal effect of COD by plant gravel bed

### 4.2 氨氮去除效果

2016 年 5 月—8 月氨氮的实际监测数据如图 8、9 所示。由图 8、9 可知:在系统运行之初,生态砾石床和植物碎石床对氨氮的去除能力均较低,随着砾石填料挂膜成功及植物的旺盛生长,两系统对氨氮去除率升高。相对其他月份,8 月植物碎石床对氨氮的去除率明显高于砾石床,这可能是因为夏季气温较高,水体中可利用的溶解氧较少,导致硝化反应不充分从而使脱氮效率下降。而夏季植物生长旺盛,微生物活性高,在发达的植物根系附近存在好氧

区和厌氧区,相当于一座 A/O 池,可进行充分的硝化和反硝化反应,从而达到对氨氮的去除<sup>[11-13]</sup>。

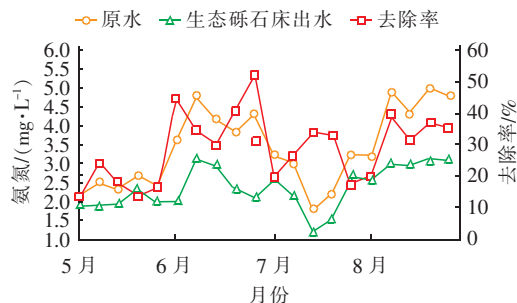


图8 生态砾石床对氨氮的去除率

Fig. 8 Removal effect of ammonia nitrogen by ecological gravel bed

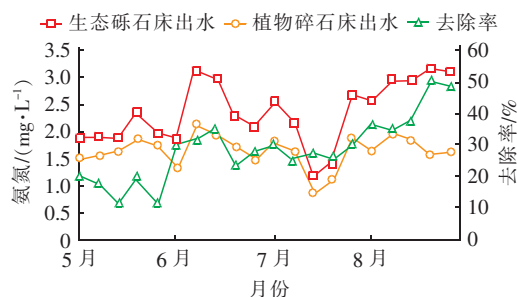


图9 植物碎石床对氨氮的去除率

Fig. 9 Removal effect of ammonia nitrogen by plant gravel bed

## 5 运行费用

所有设备均采用手动控制,无电耗,运行费用仅为日常运营的人工费和植物的维护管理费。按配备4人考虑,人均工资2 500元/(人·月),则日常运营的人工费为12.00万元/a;植物的维护管理费包括植物栽植、补种、除草、除虫、收割、清理等产生的人工、材料和机械使用费等,约为19.68万元/a,则运行总费用为31.68万元/a,折合吨水运行费为0.006元/m<sup>3</sup>,运行费用极低。

## 6 效益分析

本项目实施后,逐步改变了原河道水体受面源污染影响而出现水质日益恶化的现象,COD年削减量为2.52t,氨氮年削减量为0.126t,大幅提高了生态砾石床附近的河道水质,有效改善了下游水体的水环境质量。

## 7 结论

① 黑臭水体经生态砾石床和植物碎石床处理后,最终出水水质能够稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V类水体限值。

② 相对植物碎石床,生态砾石床对COD及氨氮均具有较高的去除效果,但容易受到季节变化等因素影响。

③ 生态砾石床和植物碎石床组合工艺能有效削减黑臭水体中的COD、氨氮含量,运行费用极低(折合运行费仅为0.006元/m<sup>3</sup>),具有较强的工程可借鉴性。

## 参考文献:

- [1] Lin J L, Tu Y T, Chiang P C, *et al.* Using aerated gravel-packed contact bed and constructed wetland system for polluted river water purification: A case study in Taiwan[J]. J Hydrol, 2015, 525: 400–408.
- [2] 黄河,秦根泉,周天鸿,等. 生态治河理念及中小河流生态治理技术应用探析[J]. 中国水运, 2017, 17(12): 179–181.  
Huang He, Qin Genquan, Zhou Tianhong, *et al.* Concept of ecological governance rivers and application of ecological harnessing techniques in middle and small rivers[J]. China Water Transport, 2017, 17(12): 179–181 (in Chinese).
- [3] 熊家晴,王怡雯,葛媛,等. 不同基质复合人工湿地对高污染河水的净化[J]. 工业水处理, 2015, 35(7): 35–39.  
Xiong Jiaqing, Wang Yiwen, Ge Yuan, *et al.* Purification of high polluted river water by different matrix composite constructed wetland[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(7): 35–39 (in Chinese).
- [4] 冀泽华,冯冲凌,吴晓芙,等. 人工湿地污水处理系统填料及其净化机理研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2234–2243.  
Ji Zehua, Feng Chongling, Wu Xiaofu, *et al.* Research progress on filler and purification mechanism of constructed wetland wastewater treatment system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8): 2234–2243 (in Chinese).
- [5] 尉中伟,王晓昌,郑于聪,等. 水平潜流人工湿地脱氮功效中植物的作用[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 595–603.  
Wei Zhongwei, Wang Xiaochang, Zheng Yucong, *et al.* Effect of plants on nitrogen removal efficiency in horizontal underflow constructed wetland[J]. Environmental Engineering Circumstantiae, 2015, 9(2): 595–603 (in Chinese).
- [6] 安彪,蔚东升,张鹏. 水平潜流人工湿地对氮去除的

- 作用机理[J]. 能源与节能,2014(5):119-110.
- An Biao, Wei Dongsheng, Zhang Peng. Mechanism of nitrogen removal by horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. Energy and Energy Saving, 2014(5):119-110(in Chinese).
- [7] 胡世琴. 人工湿地不同植被净化污水效果及其氮磷累积研究[J]. 水土保持研究,2017,24(1):200-205.
- Hu Shiqin. Effect of different vegetation purification on constructed wetland and nitrogen and phosphorus accumulation study [J]. Soil and Water Conservation Research,2017,24(1):200-205(in Chinese).
- [8] 熊家晴,杜晨,郑于聪,等. 植物和基质级配对水平流人工湿地处理污染河水的影响[J]. 工业水处理,2015,35(8):22-25.
- Xiong Jiaqing, Du Chen, Zheng Yucong, et al. Influence of plant and matrix gradation to horizontal flow artificial wetland treatment polluted river water [J]. Industrial Water Treatment,2015,35(8):22-25(in Chinese).
- [9] Carballera T, Ruiz I, Soto M. Effect of plants and surface loading rate on the treatment efficiency of shallow subsurface constructed wetlands [J]. Ecol Eng, 2016, 90:203-214.
- [10] 宋金枝,丁爽,杨允菲. 十年来国内芦苇研究进展[J]. 通化师范学院学报,2018(2):18-20.
- Song Jinzhi, Ding Shuang, Yang Yunfei. Development of domestic reed research in ten years [J]. Journal of Tonghua Normal University, 2018(2):18-20(in Chinese).
- [11] 文科军,张玉瑶,吴丽萍,等. 潜流园林人工湿地脱氮除磷效果正交试验[J]. 环境科学与技术,2015,38(9):113-116.
- Wen Kejun, Zhang Yuyao, Wu Liping, et al. Orthogonal experiment on effect of nitrogen and phosphorus removal in subsurface flow constructed wetland [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(9):113-116(in Chinese).
- [12] 关卓今,李达,王恩怡,等. 人工湿地植物根区氧气来源与进化研究进展[J]. 山东建筑大学学报,2015(6):572-578.
- Guan Zhuojin, Li Da, Wang Enyi, et al. Oxygen source and evolution research progress of root zone in constructed wetland plant [J]. Journal of Shandong Jianzhu University,2015(6):572-578(in Chinese).
- [13] 王玮,丁怡,王宇晖,等. 湿地植物在人工湿地脱氮中的应用及研究进展[J]. 水处理技术,2014,40(3):22-26.
- Wang Wei, Ding Yi, Wang Yuhui, et al. The application and research progress of wetland plants in the nitrogen removal of constructed wetlands [J]. Water Treatment Technology,2014,40(3):22-26(in Chinese).



作者简介:李婧(1983-),女,河南漯河人,工学学士,主要从事水处理设计工作。

E-mail:lijing\_dream@126.com

收稿日期:2018-09-02

贯彻执行《中华人民共和国水污染防治法》