

# 新型装配式填料人工湿地系统净化生活污水的效能

王守中<sup>1</sup>, 张统<sup>1</sup>, 张琪<sup>2</sup>, 方小军<sup>1</sup>

(1. 北京特种工程设计研究院, 北京 100028; 2. 中国人民解放军陆军工程大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 传统人工湿地多采用砂石作为填料,其施工复杂、基建成本高,长期运行时易发生淤塞。为此,提出并构建了一种新型装配式人工湿地污水处理系统,并考察了两种不同类型湿地对污水的净化效果。平行运行两组采用不同填料的水平潜流人工湿地装置,以连续方式进水,通过脉冲泵调节水力负荷,稳定运行时水力负荷为  $0.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,停留时间为 4 d。实际运行结果表明,装配式人工湿地填料的挂膜能力强,生物量大,对 COD 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率分别达到 94.78%、79.18%,均优于传统人工湿地(90.78%、67.68%);同时,装配式人工湿地的抗冲击负荷能力更强,当进水 COD 为 496.3 mg/L 时,去除率仍能稳定在 80% 以上,可以承受的 COD 负荷达到  $150 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  左右,高出一般湿地 40%~50%。

**关键词:** 装配式人工湿地; 生活污水; 净化效果; 示范工程

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)19-0105-06

## Purification of Domestic Sewage by a New Type Constructed Wetland System with Assembled Packing

WANG Shou-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Tong<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>, FANG Xiao-jun<sup>1</sup>

(1. Beijing Special Engineering and Design Institute, Beijing 100028, China; 2. College of National Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Traditional constructed wetland mostly uses sand and gravel as packing material, which has the drawbacks of complex construction process, high construction cost and likely to silt during long-term operation. Therefore, a new type constructed wetland with assembled packing was proposed, and the purification effect of wastewater by the two types of constructed wetlands was investigated. Two groups of horizontal subsurface flow constructed wetland devices with different packing were operated in parallel. The devices were operated in continuous flow and its hydraulic load was adjusted by pulsed pump. The hydraulic load was  $0.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  with retention time of 4 days at stable states. The actual operational results showed that the assembled packing of the constructed wetland had good biofilm formation capacity and large biomass, and the removal rates of COD and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  reached 94.78% and 79.18%, respectively, which were better than those of the traditional constructed wetland (90.78% and 67.68%). At the same time, the assembled constructed wetland had stronger resistant ability to shock load. When the influent COD was 496.3 mg/L, the removal rate always remained above 80%, and the organic load could reach  $150 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , which was 40%–50% higher than that of normal wetlands.

**Key words:** assembled constructed wetland; domestic sewage; purification effect; demonstration project

人工湿地污水处理系统主要由人工基质(填料)和水生植物组合而成,其利用系统中填料、植物以及微生物三者的协同作用,再结合填料和土壤的过滤、吸附、拦截作用以及植物根系的吸收来实现对污水的净化处理<sup>[1]</sup>。人工湿地污水处理系统作为一种建设成本低、操作管理简单的污水生态处理方法,在小型污水处理中得到了广泛应用。但该技术存在一些不足之处,如传统的人工湿地采用不同粒径砂石作为填料、分层布置造成土建施工复杂、长期运行易发生淤塞、处理效率不高等<sup>[2]</sup>。

笔者开发了一种新型可装配式人工湿地填料来代替传统人工湿地的砂石填料,以强化该填料在湿地系统中的净化功能,并对比了新型装配式人工湿地和传统人工湿地对污水的处理效果,对于小型分散式生活污水的处理和受污染水体的生态修复具有较高的应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与流程

并行运行两组采用不同填料的水平潜流人工湿地试验装置:传统湿地砾石填料的平均粒径为4 cm,孔隙率为30%,黏性阻力系数为166,惯性阻力系数为22;装配式人工湿地采用纤维填料,孔隙率为92%,填充厚度为30 cm,黏性阻力系数为零,水平和垂直的惯性阻力系数分别为0.28、0.11,试验装置如图1所示。

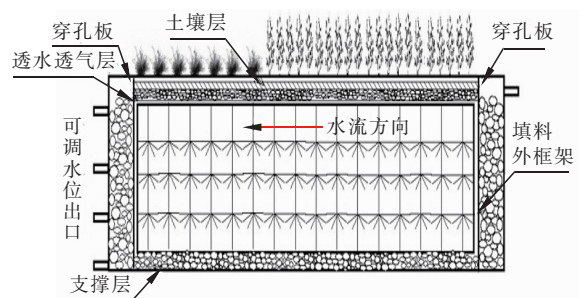


图1 装配式人工湿地试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of assembled constructed wetland

人工湿地试验装置的尺寸为2 200 mm × 560 mm × 330 mm,外结构采用厚度约为2 cm的透明有机玻璃板,在进、出水处分别设置穿孔板,将整个湿地分隔成进水区、填料区和出水混合区。混合区内

部填充砾石(粒径为60 ~ 80 mm),湿地外接出水管,出水管可调节出水水位,从而控制湿地的有效水深。为保证试验结果的可对比性,两组湿地只有内部填料不同,其余运行条件均相同。湿地内部结构从上至下依次为:植物系统、土壤层、透水透气层、承托层、填料系统、集水管、支撑层。其中装配式湿地填料单元(见图2)采用UPVC管做成可承插的框架结构,单元填料尺寸为2 000 mm × 500 mm × 280 mm,具备一定的承重能力。单元填料内置特制弹性束状填料,直径为150 mm,材料为聚酰胺、聚烯烃类特制弹性填料,如图2所示。

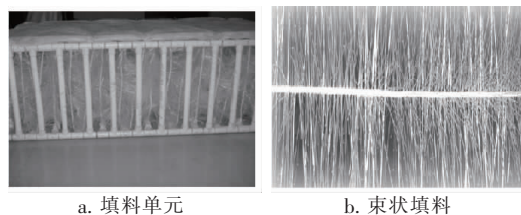


图2 填料单元和束状填料

Fig.2 Packing unit and bundle packing

搅拌罐(400 L)中接入试验厂区的生活污水,混合均匀后打开阀门流入集水池,最后通过计量泵按照设定好的流量(水力负荷)泵入人工湿地装置,为保证进水条件相同,两个湿地共用一个搅拌罐和集水池。

### 1.2 装置运行条件与原水水质

装置运行过程中,室内温度为20 ~ 22 ℃,水温为22 ~ 24 ℃。人工湿地以连续方式进水,通过脉冲泵调节人工湿地的水力负荷。稳定运行时,水力负荷为0.2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · d),停留时间为4 d。

试验用水采用北京市发改委分散式生活污水高效处理与利用技术工程实验室内生活污水,在相同进水水质下运行两种湿地,具体进水水质见表1。

表1 进水水质

Tab.1 Influent quality mg · L<sup>-1</sup>

项 目	最小值	最大值	平均值
COD	200.4	294.8	248.2
TP	5.20	7.23	5.81
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	67.82	83.36	73.93
TN	72.6	85.3	74.6
SS	111	201	165

### 1.3 测定指标及方法

COD 采用快速检测法测定,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  采用纳氏试剂分光光度法测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, TP 采用钼酸铵分光光度法测定, SS 采用重量法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同填料人工湿地的除污效果

#### 2.1.1 对 COD 的去除

装配式人工湿地和传统人工湿地的平均出水 COD 浓度分别为 13.13、22.89 mg/L, 可见两种人工湿地系统都对 COD 有着较好的去除能力, 平均去除率稳定在 80% ~ 90%。在相同条件下, 装配式人工湿地对 COD 的去除效果更佳。人工湿地中, 对 COD 的去除主要依靠微生物的生命活动, 由于两组湿地采用不同的填料, 湿地内部微生物的构成、水流的形态等也有所差异。从微生物学的角度分析, 装配式填料更易于微生物挂膜、生物量大, 对 COD 的去除效果优于传统湿地。

#### 2.1.2 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除

图3为装配式人工湿地和传统人工湿地对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果。可知, 装配式人工湿地和传统人工湿地的平均出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  分别为 15.39、23.89 mg/L, 装配式人工湿地对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果更佳。人工湿地中, 对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除主要是通过微生物的硝化作用, 在好氧环境下将  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  转化为硝态氮和亚硝态氮<sup>[3]</sup>。装配式人工湿地对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果较好, 一方面是由于填料的生物量大, 另一方面湿地的框架式结构能够最大程度保证水流, 使填料和污染物之间充分接触<sup>[4]</sup>, 从而使  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  得到了很好的转化。

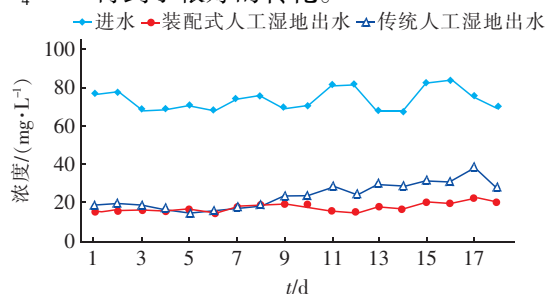


图3 装配式人工湿地和传统人工湿地对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果

Fig. 3 Removal effect of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  by assembled constructed wetland and traditional constructed wetland

#### 2.1.3 对 TP 的去除

图4为装配式人工湿地和传统人工湿地对 TP 的去除效果。可以看出, 装配式人工湿地的出水 TP 为 2.1 ~ 2.3 mg/L, 平均为 2.23 mg/L。传统人工湿地的平均出水 TP 为 1.47 mg/L。装配式人工湿地的处理效果不佳主要是由于填料对磷的吸附量不够大, 虽然吸附速度较快, 但是由于吸附量不大, 导致对磷的去除效果有限。可以采取强化预处理措施或通过分配污染负荷, 在装配式人工湿地后面适当增加传统人工湿地单元。

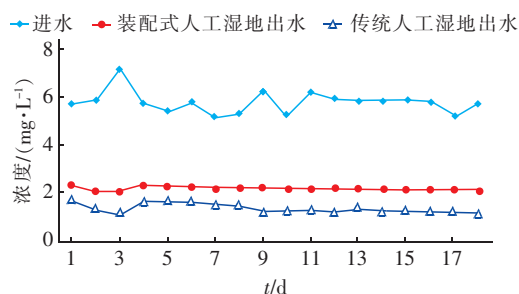


图4 装配式人工湿地和传统人工湿地对 TP 的去除效果

Fig. 4 Removal effect of TP by assembled constructed wetland and traditional constructed wetland

### 2.2 人工湿地水动力学模拟分析

运行时间较长的人工湿地会遇到淤塞问题, 这是由于进水中的悬浮物和湿地内部产生的污泥堵塞了湿地内部的填料。针对不同填料人工湿地进行两相流水力学模拟, 通过模拟结果的对比分析, 探讨湿地内部水力流态对人工湿地运行寿命、效果等影响的途径和程度。

#### 2.2.1 人工湿地内部水动力学特性分析

水平潜流人工湿地主要依靠进水与出水之间的势压差形成驱动力, 平均到人工湿地长度上这种驱动力就很小了。实际上传统人工湿地内部污水流动的形式主要由几股水流组成, 其余绝大部分是极缓的渗流甚至是死流, 运行几年以后就会发生淤塞等问题。所以很多的水平潜流人工湿地采用高进低出的布水方式, 以提高势压和流速, 但是置于底部的出水管容易淤塞, 或是遇到较大降雨造成短期水量增加使得出水 SS 升高, 造成水质恶化。

在潜流人工湿地系统设计中, 理想的人工湿地系统内部水流方式是推流, 但实际上人工湿地系统内部水流情况非常复杂, 不仅仅是一种多孔介质的非均匀流, 而且由于在实际施工过程中, 砂石填料级



配进行了筛分使得整个湿地内部的水力传导系数在各个方向上呈现不均一性。另外,在一些局部区域,特别是错综的根系及基质周围极易出现紊流、回流、短流等情况,其内部水流甚至可看作是一液多固的多相流。目前人工湿地内部水动力学研究大多采用示踪法和模型试验法,其中示踪法虽然可以测得湿地内部污染物的停留时间,但是不能反映湿地内部流态变化等细节。本试验将湿地内部模拟对象合理简化,重点研究两相流(污水、污泥颗粒)在多孔介质中的运动,以揭示湿地内部的水动力学特性。

### 2.2.2 人工湿地内部水动力学特性模拟

人工湿地内部流场可以简单地看作是多孔介质中的固液两相流动,即通过连续相(即液相)和分散相(即固相)来描述流场的流动。这是建立在不考虑生物化学反应对扩散传质、质量守恒等影响下,将人工湿地内部流场描述为一个泥水混合两相流在多孔介质中的流动,其中将泥相作为颗粒处理,而泥的摄入主要由来流带入和湿地内部产生,这样人工湿地流场模拟就可以简化为对泥水混合物两相流的模拟。依据人工湿地的基本构造,设计人工湿地的模型如图5所示。装配式人工湿地网格模型的长度为220 cm,高为35 cm,入水方向为从右至左,先后流经进水口、进口混合区、穿孔板、多孔介质(填料)、出口混合区、穿孔板、出口,穿孔板均匀布置孔径为1 cm的3个开孔,入水开孔、出水开孔均为2 cm。填充砾石的传统人工湿地网格模型的边界条件与装配式人工湿地相同。

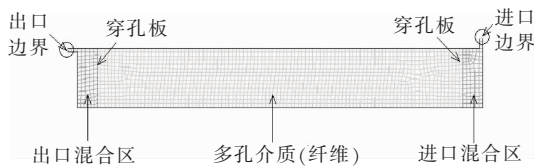


图5 装配式人工湿地的网格模型

Fig.5 Grid model of assembled constructed wetland

### 2.2.3 模拟结果与分析

#### ① 湿地系统的填料淤塞模拟分析

人工湿地长时间运行会遇到淤塞的问题,主要原因是污水和湿地内部产生的污泥沉降堵塞了孔隙率有限的湿地内部填料。目前对于湿地堵塞的研究主要集中在如何改变水力负荷、布水方式、运行管理条件等方面,但是由于人工湿地淤塞主要发生在填料区域内,与填料性质有很大的关系。因此,研究填

料性质对人工湿地淤塞的影响就显得十分重要。

图6为传统人工湿地分别运行10 h、1年、3年和5年的泥相分布。从图6(a)可以看出,传统人工湿地初始运行时污泥在整个湿地内部的体积分数为零,运行10 h后,湿地底部开始淤积污泥,且进水混合区的淤积污泥要多于填料区的活性污泥,这时出水SS很低。从图6(b)可知,各填料层区域内污泥浓度梯度趋于明显(底层污泥浓度较高,污泥体积率达到2%,中上层污泥含量较小,体积率在0.1%~1%之间,出水中SS含量较少)。从图6(c)可以看出,运行3年后,污泥已经沉降在填料区3/4的区域且体积率达到2%,上部污泥的体积率约为1%,考虑到这部分填料的实际孔隙率只有25%,出水口下部已有污泥淤积现象发生,填料区上层会出现壅水现象,这时如果不及时清理这部分淤泥将会直接影响整个湿地流场,破坏出水水质。从图6(d)可以看出,湿地中污泥体积率超过2%的区域基本上占满整个湿地内部,湿地内部基本上不存在浓度差,这时如果不进行一定的清淤措施,污泥浓度会继续积累上升,最终堵塞整个湿地。

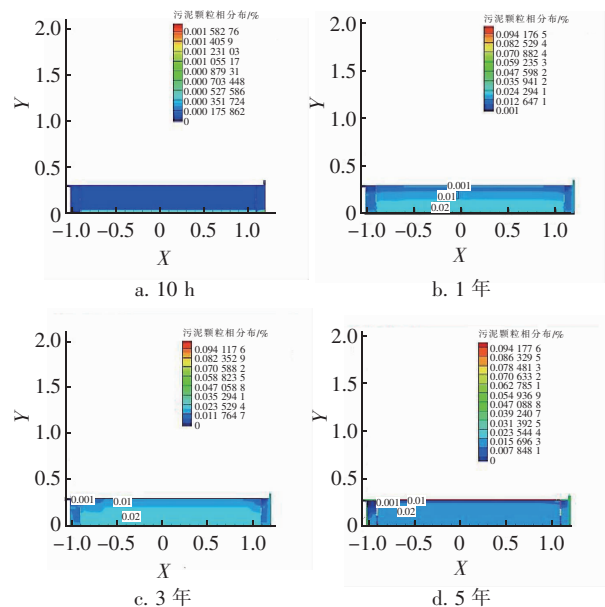


图6 传统人工湿地分别运行10 h、1年、3年和5年的泥相分布

Fig.6 Sludge phase distribution in traditional constructed wetland with running for 10 h, 1 year, 3 years and 5 years

装配式人工湿地的填料采用课题组开发的人工填料,这种填料的孔隙率较大,在水平与垂直方向上惯性阻力有差别,属于一种水力传导各向异性的

填料,图7为装配式湿地分别运行10 h、1年、3年和5年的泥相分布。

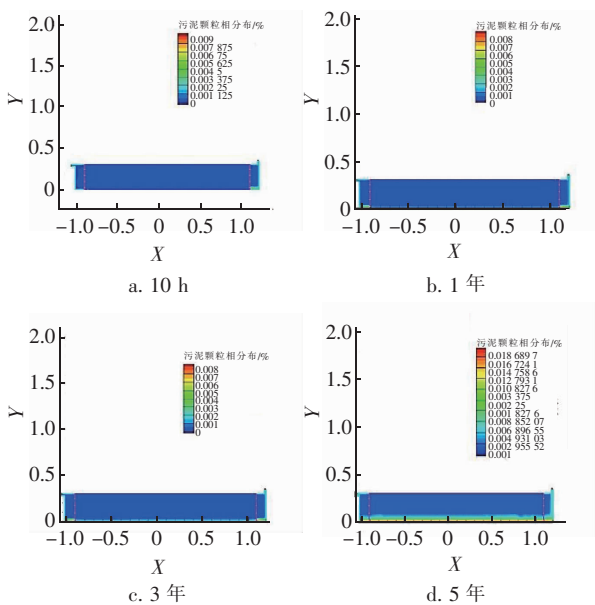


图7 装配式人工湿地分别运行10 h、1年、3年和5年的泥相分布

Fig. 7 Sludge phase distribution in assembled constructed wetland with running for 10 h, 1 year, 3 years and 5 years

装配式人工湿地的初始状态与传统湿地相同,从图7(a)可以看出,装配式人工湿地运行10 h后填料区泥相分布均匀,进水挟带的泥相淤积量大于活性污泥产生量,并在运行初期淤积在进水混合区内,这点与传统人工湿地模拟结果基本一致。

经过1年的运行,装配式人工湿地中由于各向异性填料的使用,污泥在池底部的淤积非常少,分析原因主要是因为:①相较于传统人工湿地,装配式人工湿地填料对水的惯性阻力小,污水可以均匀地通过整个湿地,运行效率较高。②各向异性填料的使用能够让湿地内部水流在经过一段水平流动后,水流速度减少到一定程度,由于水平方向的压力大于垂直方向的压力开始向下流动;同时由于黏性的存在,形成一些大尺度的缓慢漩涡,这部分漩涡可对上下层水流起到加速传质作用,有利于提高湿地的处理效能。

经过3年甚至5年的运行,装配式人工湿地的内部泥相并没有形成大面积沉降,整个填料区只有底部淤积有部分污泥,污泥体积率达到0.9%~1.4%,而且污泥浓度分布均匀,长时间运行也不会形成较多的填料堵塞。

## ② 湿地系统内部流场的模拟与分析

图8为传统人工湿地运行3年时水相流速等廓线和迹线。可以看出,传统人工湿地中进水经穿孔板获得较大的动压后可以汇入填料区底层,但是由于这块区域的污泥浓度高,水流阻力较大,流速很快降为零,这部分水流就会成为死流。这时大部分水流进入填料区后会从污泥浓度较小、孔隙率大的上层填料区通过,这样就造成了湿地短流。

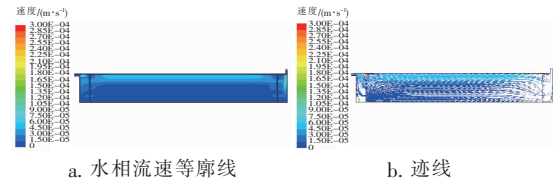


图8 传统人工湿地运行3年时水相流速等廓线和迹线

Fig. 8 Water flow velocity profile and trace of traditional constructed wetland with running for 3 years

图9为装配式人工湿地运行3年时水相流速等廓线和迹线。可以看出,整个装配式湿地填料区内水流速度非常均匀,进水通过穿孔板进入湿地内部,首先因为垂直方向上的水力阻力系数低于水平方向,水流会有一个上升的过程,然后比较均匀地通过填料进入出水混合区。相较于传统湿地,装配式人工湿地中水流的分布更加均匀,也就是说进水中的有机污染物可以均匀分布在湿地填料区内。

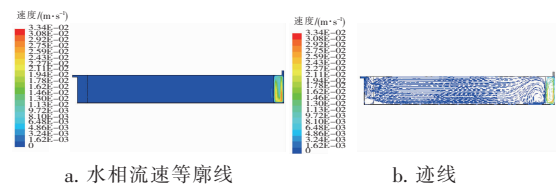


图9 装配式人工湿地运行3年时水相流速等廓线和迹线

Fig. 9 Water flow velocity profile and trace of assembled constructed wetland with running for 3 years

## 2.3 装配式人工湿地设计参数及施工规范

装配式人工湿地系统自上而下共设计7层,依次为土壤层(200~400 mm)、隔土层(1 mm的无纺布)、承托层(20 mm的带孔PE板)、装配式人工填料单元(800~1 000 mm)、卵石承托层(200 mm)、防渗层(1.5~3 mm的土工膜)、基础层。装配式人工湿地系统施工时主要考虑以下几点:

- 根据工程进出水水质设计预处理单元及湿地尺寸;
- 根据设计尺寸开挖,底部留坡,底部及四周夯

实,底部和四周铺设防渗层;

c. 底部铺设卵石承托层,粒径为 25 ~ 40 mm;

d. 铺设装配式单元填料;

e. 铺设承托层;

f. 安装隔土层;

g. 均匀铺设土壤层;

h. 建议种植根系不发达植物,以适应各地气候的草坪为主。

### 3 结论

① 与传统人工湿地相比,装配式人工湿地填料的挂膜能力强,生物量大,对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率分别达到 94.78% 和 79.18%,均优于传统人工湿地(90.78%、67.68%)。

② 与传统人工湿地相比,装配式人工湿地拥有更好的抗冲击负荷能力,当 COD 浓度为 496.3 mg/L 时,去除率仍能稳定在 80% 以上。装配式人工湿地可以承受  $150 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  左右的 COD 负荷,高出一般湿地 40% ~ 50%。

③ 根据防堵塞水力学模拟结果,装配式人工湿地具有良好的水动力学特点,能够有效地均匀分布来水负荷,不容易产生死流、短流,可以有效延长湿地寿命。

④ 装配式人工湿地不仅具备了一定的脱氮除磷能力,而且由于其独特的工程构筑形式和工艺特点,能够适应较大的水质水量变化冲击,不易堵塞失效,运行管理简单可靠;简单实用的预处理系统受季节影响不大;能够适应各种复杂地形地貌,是一种值得在小水量分散点源地区推广的污水处理技术。

### 参考文献:

- [1] 王守中,张统. 我国农村的水污染特征及防治对策[J]. 中国给水排水,2008,24(18):1-4.  
Wang Shouzhong, Zhang Tong. Characteristics and prevention countermeasures of Chinese rural water pollution[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(18):1-4(in Chinese).
- [2] 白晓慧,王宝贞. 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 Xiaohui, Wang Baozhen. Development of constructed wetland wastewater treatment technology and its application in China[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture, 1999, 32(6):88-92(in Chinese).

- [3] 尹连庆,谷瑞华. 人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究[J]. 环境工程,2008,26(S1):151-155.

Yin Lianqing, Gu Ruihua. Ammonia nitrogen removal mechanism and affecting factors of constructed wetland[J]. Environmental Engineering, 2008, 26(S1):151-155(in Chinese).

- [4] 尹军,崔玉波,韩相奎,等. 潜流人工湿地对污染物的降解特性[J]. 中国给水排水,2004,20(6):47-49.

Yin Jun, Cui Yubo, Han Xiangkui, et al. Characteristics of pollutants degradation by subsurface flow type constructed wetland[J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(6):47-49(in Chinese).



作者简介:王守中(1972-),男,河南商丘人,博士,副研究员,全军环境保护专家,主要研究方向为小型分散点源污水处理及资源化、危化品事故应急处置、军民融合技术转化等,先后获国家科技进步二等奖1项,部委级科技进步一等奖5项、二等奖6项,中国技术市场协会“金桥奖”,国家授权发明专利9项,编写著作5部,发表论文50余篇。

E-mail:18901181265@189.cn

收稿日期:2019-04-22