

# 基于多参数评价体系的三种人工湿地净化能力研究

刘 帅<sup>1</sup>, 文 韬<sup>1</sup>, 马 竞<sup>2</sup>, 凌 莉<sup>2</sup>, 薛 伟<sup>1</sup>

(1. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘 要:** 以玉溪海绵城市试点区人工湿地项目为依托,对表面流、水平潜流和垂直潜流三种类型人工湿地净化能力进行了多参数评价。通过对多个污染物参数进行为期两年的污染物监测,对比分析了三种人工湿地的水质净化能力。通过试验研究发现,三种类型人工湿地对污染物的去除效果和机理不同,对 BOD<sub>5</sub> 去除率最高;对水质中 BOD<sub>5</sub>、COD、TN、TP 和高锰酸盐指数指标去除效果最好的为垂直潜流人工湿地,水平潜流人工湿地次之,去除效果最差的为表面流人工湿地;对水质中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果最好的为垂直潜流人工湿地,表面流人工湿地次之,去除效果最差的为水平潜流人工湿地;在不同类型人工湿地对植被的 N 含量、P 含量、N 积累量和 P 积累量方面,垂直潜流人工湿地均显著高于水平潜流和表面流人工湿地。

**关键词:** 人工湿地; 表面流; 水平潜流; 垂直潜流; 净化效果

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)12-0055-05

## Study on Purification Ability of Three Kinds of Constructed Wetlands Based on Multi-parameter Evaluation System

LIU Shuai<sup>1</sup>, WEN Tao<sup>1</sup>, MA Jing<sup>2</sup>, LING Li<sup>2</sup>, XUE Wei<sup>1</sup>

(1. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100160, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The purification ability of three types of constructed wetlands, namely free surface flow, horizontal subsurface flow and vertical subsurface flow wetlands were evaluated by multiple parameters based on the project of constructed wetland in the pilot area of Yuxi sponge city. The water purification ability of three different constructed wetlands were compared and analyzed by monitoring several pollutant parameters for two years. It was found that the removal efficiency and mechanism of three types of constructed wetlands were different, and the removal efficiency of BOD<sub>5</sub> was the highest among all the pollutants. The most effective removal of BOD<sub>5</sub>, COD, TN, TP and potassium permanganate indexes was vertical subsurface flow wetland, followed by horizontal subsurface flow wetland, and free surface wetland had the worst effect. The best removal efficiency of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N was vertical flow wetland, followed by free surface wetland, and the worst removal efficiency was horizontal subsurface flow wetland. The average data of vertical subsurface flow wetland were significantly higher than horizontal subsurface flow wetland and free surface wetland in terms of N content, P content, N accumulation and P accumulation of vegetation in different types of constructed wetlands.

**Key words:** constructed wetland; free surface wetland; horizontal subsurface flow wetland; vertical subsurface flow wetland; purification effect

人工湿地是一种能够提高城市水生态系统的稳定能力和自净化能力的系统,可为水质达标提供有效保障。人工湿地作为海绵城市的重要组成部分,对雨水起到了沉淀、过滤、调蓄、净化作用,采用人工湿地调蓄和净化雨水可以有效治理水污染,减少治理投资,促进生态系统良性循环<sup>[1]</sup>。人工湿地可以创造湿地栖息地以补偿和抵消城市和农业发展带来的自然湿地消失速率,因此可以保护原生植物和动物,包括水生植物、鱼类、水鸟类、爬行动物、两栖动物和无脊椎动物<sup>[2-4]</sup>。

人工湿地系统,按其结构形式可以分为表面流、水平潜流和垂直潜流三种类型<sup>[5-7]</sup>。目前对于一种人工湿地净化水质的研究较多,但通过多种净化参数对不同类型人工湿地净化效果的分析研究较少<sup>[8-9]</sup>。

笔者以玉溪海绵城市试点区人工湿地项目为依托,对三种类型人工湿地的净化能力进行了多参数评价,通过为期两年的污染物及水生植物的监测,对比分析了三种人工湿地的水质净化能力。

## 1 人工湿地对比试验设计

试验在玉溪师范学校校区海绵城市示范区进行,该区域是高原地区阶梯型坡地海绵特色项目,承载着净化雨水、改善水质的作用。试验采用由有机玻璃制成的长×宽×高为2.0 m×1.8 m×0.7 m的湿地箱,为防止填料下漏,分三层依次进行基质的填充,每一层铺设土工布,垂直潜流底层为15.0 cm高度的过滤介质卵石,粒径为15~30 mm,中层为15.0 cm的沙石垫层,粒径为6~8 mm,上层为20.0 cm沙垫层,粒径为2~5 mm。进水与出水采用 $\varnothing 15$  mm的PVC管,采用顶部进水、底层出水的方式运行。表面流单元填充种植土,进出水均位于试验箱顶部。水平流人工湿地上层为15.0 cm种植土层,中下层为35 cm高度的砂砾层。采用中部进水、中部出水的方式。三种人工湿地试验箱设定的水力负荷均为 $0.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,满足三种类型湿地的正常工作负荷。

人工湿地试验箱的进水为玉溪师范学校校区内蓄水模块调蓄的初期雨水。通过安装在蓄水模块中的潜水泵将初期雨水泵送入试验箱中进行循环净化。设置循环流量为15 L/s,湿地中的水能够通过PVC管与蓄水模块中调蓄的雨水进行不断的循环交换。

试验箱内种植植物为美人蕉,株高为25 cm,株型大小、生物量基本一致,种植行距为0.3 m,株距为0.40 m。2015年2月—2016年11月,每隔半个月对三个湿地样本进行取样分析,水的pH值控制在7.15~7.65,取样处为进水口和PVC管出水口。水质测定项目包括 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、COD、TN、TP和高锰酸盐指数。美人蕉收割后分为地上和地下两部分,通过烘干法测定生物量。

## 2 水质数据分析

### 2.1 COD含量分析

图1为三种类型人工湿地进、出水COD变化情况,可见,进水浓度与出水浓度随时间变化趋势一致,春夏两季浓度较低,秋冬季节浓度较高。三种类型人工湿地在2015年8月净化效果最好,出水浓度分别为41、49、58 mg/L。在观测时间段,三种类型湿地都对COD具有净化作用,其中垂直潜流的净化效果最好,水平潜流的净化效果次之,表面流的净化效果最差。水平潜流和表面流人工湿地去除COD效果差别不大。

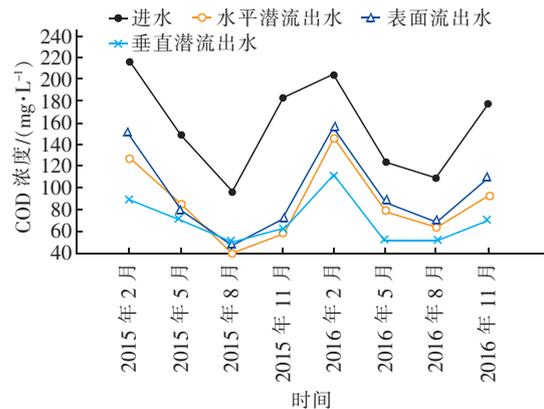


图1 三种湿地的进、出水COD浓度

Fig. 1 Influent and effluent COD of three kinds of wetlands

### 2.2 BOD<sub>5</sub>含量分析

图2为三种类型人工湿地进、出水BOD<sub>5</sub>变化情况。可见,BOD<sub>5</sub>进水浓度与出水浓度随时间变化趋势一致,有着较好的相关性,BOD<sub>5</sub>浓度随季节变化波动较小。在2015年11月,三种类型湿地对BOD<sub>5</sub>的净化能力基本一致,此时垂直潜流湿地的净化能力处于较弱状态。2015年8月及2016年8月,观测垂直潜流湿地净化能力较强。三种类型湿地都具有净化BOD<sub>5</sub>的作用,其中垂直潜流的净化效果最好,水平潜流的净化效果次之,表面流的净化效果最差。水平潜流和表面流人工湿地去除BOD<sub>5</sub>

效果差别不大。

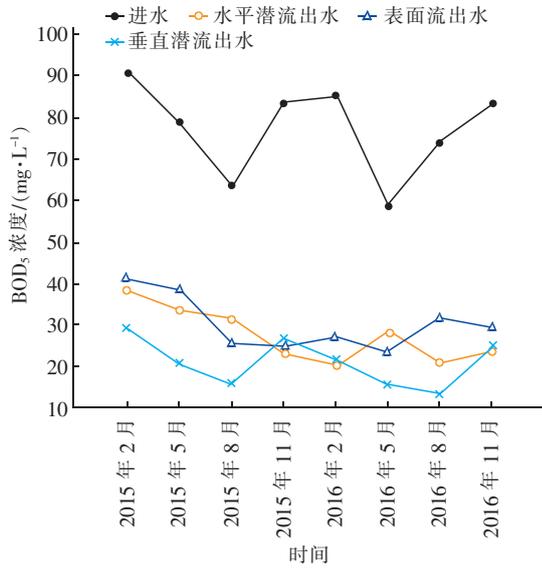


图 2 三种湿地的进、出水 BOD<sub>5</sub> 浓度

Fig. 2 Influent and effluent BOD<sub>5</sub> of three kinds of wetlands

### 2.3 高锰酸盐指数含量分析

图 3 为三种类型人工湿地进、出水高锰酸盐指数变化情况,可见,高锰酸盐指数进水浓度与出水浓度随时间变化趋势一致,有着较好的相关性。净化前高锰酸盐指数浓度随季节变化波动较大,净化后高锰酸盐指数浓度随季节变化波动较小。三种类型湿地都具有净化高锰酸盐指数的作用,其中垂直潜流的净化效果最好,表面流的净化效果次之,水平潜流的净化效果最差。

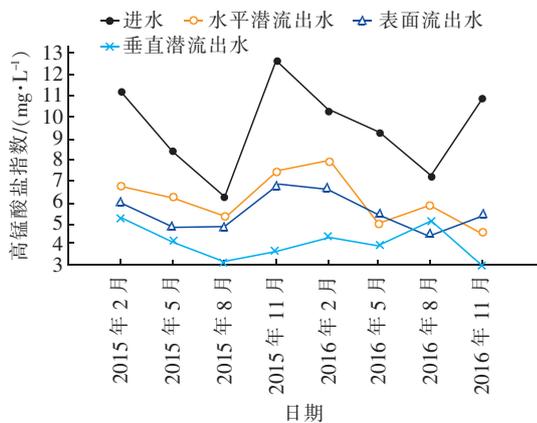


图 3 三种湿地的进、出水高锰酸盐指数

Fig. 3 Influent and effluent COD<sub>Mn</sub> of three kinds of wetlands

### 2.4 TP 含量分析

图 4 为三种类型人工湿地进、出水 TP 变化情况。可见,TP 进水浓度与出水浓度随时间变化趋势

一致,有着较好的相关性,净化前 TP 浓度随季节变化波动较大,净化后 TP 浓度随季节变化波动较小。三种类型湿地都具有净化 TP 的作用,其中垂直潜流的净化效果最好,表面流的净化效果和水平潜流的净化效果基本一致,水平潜流的净化效果随时间变化波动幅度较大。

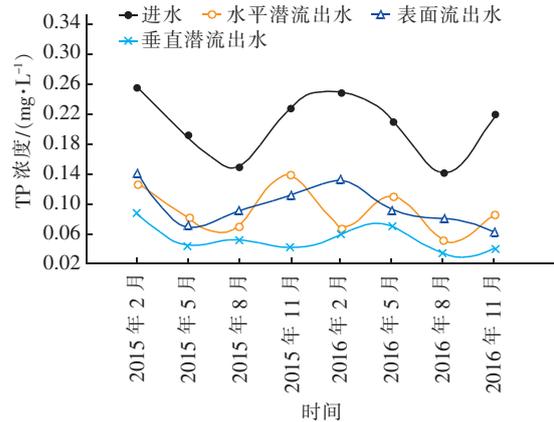


图 4 三种湿地的进、出水 TP 浓度

Fig. 4 Influent and effluent TP of three kinds of wetlands

### 2.5 TN 含量分析

图 5 为三种类型人工湿地进、出水 TN 变化情况,可见,TN 进水浓度与出水浓度随时间变化趋势一致,有着较好的相关性,净化前 TN 浓度随季节变化波动较大,净化后 TN 浓度随季节变化波动较小。三种类型湿地都具有净化 TN 的作用,三种类型湿地的 TN 净化效果春夏两季最好,秋冬两季较差,净化效果上差别不明显。

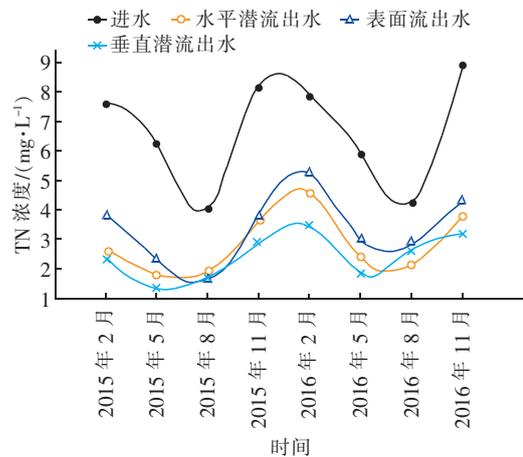


图 5 三种湿地的进、出水 TN 浓度

Fig. 5 Influent and effluent TN of three kinds of wetlands

### 2.6 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 含量分析

图 6 为三种类型人工湿地进、出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 变

化情况。可见,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  进水浓度与出水浓度随时间变化趋势一致, 有着较好的相关性, 三种类型湿地都具有净化  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的作用, 三种类型湿地的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  净化效果春夏两季最好, 秋冬两季较差, 净化效果上差别不明显。

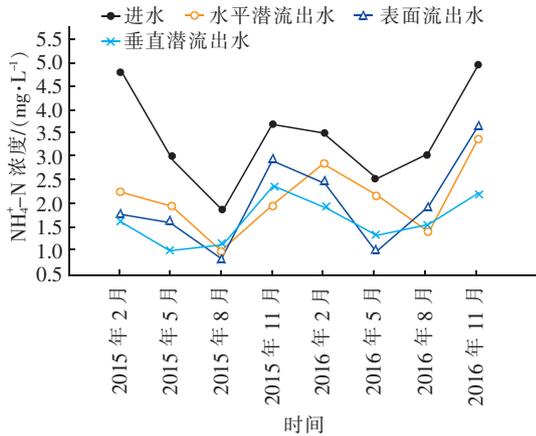


图 6 三种湿地的进、出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度

Fig. 6 Influent and effluent  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  of three kinds of wetlands

### 3 植被数据分析

三种类型人工湿地植被生理特性见表 1。

表 1 三种类型人工湿地植被生理特性

Tab. 1 Vegetation physiological characteristics of three kinds of wetlands

项目	根冠比	N 含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	P 含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	N 积累 量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	P 积累 量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
水平潜流	1.71	19.5	2.0	6.99	0.87
表面流	1.73	18.3	2.4	4.97	0.96
垂直潜流	1.89	22.1	3.9	10.38	1.49

由表 1 可见, 三种类型人工湿地对植被的 N 积累量和 P 积累量方面的影响均大于对 N 含量和 P 含量方面的影响, 地上生物量和地下生物量表现一致。在不同类型人工湿地对植被的 N 含量、P 含量、N 积累量和 P 积累量方面, 垂直潜流人工湿地均显著高于水平潜流和表面流人工湿地。垂直潜流型湿地的 N 含量为表面流湿地的 1.20 倍, P 含量为 1.625 倍, N 积累量为 2.09 倍, P 积累量为 1.55 倍。垂直潜流型湿地的 N 含量为水平潜流湿地的 1.13 倍, P 含量为 1.95 倍, N 积累量为 1.48 倍, P 积累量为 1.71 倍。

图 7 为人工湿地植被美人蕉根系情况。可见, 美人蕉的新生须根较多, 有利于根区微生物的着生,

优选根系发达、生物量较大、富集污染元素较强的植被构建各种植被组合的人工湿地可以更有效地提高其净化水质能力。通过多参数对三种类型湿地效果进行评价, 发现垂直潜流型湿地净化效果较好, 因此位于玉溪市红塔区的东风广场采用了垂直潜流型湿地, 其效果和展示如图 8 所示。



图 7 美人蕉根系情况

Fig. 7 Root conditions of Canna



a. 效果图

b. 实际图

图 8 东风广场湿地

Fig. 8 Dongfeng Square wetland

### 4 结论

① 表面流、水平潜流、垂直潜流三种类型人工湿地对水中污染物的去除效果和机理不同。同负荷运行的情况下, 三种类型人工湿地对  $\text{BOD}_5$  的去除率均很高, 三种类型人工湿地对  $\text{BOD}_5$  的去除差异不显著。

② 三种类型人工湿地在净化水质性能中, 同负荷运行情况下, 对  $\text{BOD}_5$ 、COD、TN、TP 和高锰酸盐指数指标去除效果最好的为垂直潜流人工湿地, 水平潜流人工湿地去除效果次之, 去除效果最差的为表面流人工湿地。对水质中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除效果最好的为垂直潜流人工湿地, 表面流人工湿地去除效果次之, 去除效果最差的为水平潜流人工湿地。

③ 人工湿地对植被的 N 积累量和 P 积累量方面的影响大于对 N 含量和 P 含量方面的影响, 地上生物量和地下生物量表现一致。在不同类型人工湿地对植被的 N 含量、P 含量、N 积累量和 P 积累量方面, 垂直潜流人工湿地均显著高于水平潜流和表面流人工湿地。

④ 人工湿地植被的新生须根较多, 有利于根

区微生物的着生,因此优选根系发达、生物量较大、富集污染元素较强的植被构建各种植被组合的人工湿地可以更有效地提高其净化水质能力。

#### 参考文献:

- [1] Wang Y T, Sun M X, Song B M. Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China [J]. *Resour Conserv Recycl*, 2017, 122: 11 – 20.
- [2] Liu R, Wang J, Shi J, *et al*. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions [J]. *Sci Total Environ*, 2013, 468/469C: 1069 – 1077.
- [3] Zhang Q, Miao L, Wang X, *et al*. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution [J]. *Landscape Urban Plan*, 2015, 144: 142 – 150.
- [4] Hu Y, Zhao Y, Sorohan B. Removal of glyphosate from aqueous environment by adsorption using water industrial residual [J]. *Desalination*, 2011, 271 (1/3): 150 – 156.
- [5] Amado L, Albuquerque A, Santo A E. Influence of stormwater infiltration on the treatment capacity of a LECA-based horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. *Ecol Eng*, 2012, 39: 16 – 23.
- [6] Maniquiz-Redillas M, Lee-Hyung Kim. Fractionation of heavy metals in runoff and discharge of a stormwater management system and its implications for treatment [J]. *J Environ Sci*, 2014, 26 (6): 1214 – 1222.
- [7] Villaseñor J, Capilla P, Rodrigo M A, *et al*. Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland – microbial fuel cell treating wastewater under different organic

loading rates [J]. *Water Res*, 2013, 47 (17): 6731 – 6738.

- [8] Doherty L, Zhao Y, Zhao X, *et al*. A review of a recently emerged technology: Constructed wetland – microbial fuel cells [J]. *Water Res*, 2015, 85: 38 – 45.
- [9] 李立青, 朱仁肖, 郭树刚, 等. 基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究 [J]. *环境科学*, 2010, 31 (12): 2896 – 2904.
- Li Liqing, Zhu Renxiao, Guo Shugang, *et al*. Research on spatial differentiation of urban stormwater runoff quality by source area monitoring [J]. *Environmental Science*, 2010, 31 (12): 2896 – 2904 (in Chinese).



作者简介:刘帅(1984 – ),男,辽宁东港人,本科,工程师,中建二局西南分公司总经理,从事电气工程及其自动化工程施工与管理。

E-mail: 422824386@qq.com

收稿日期: 2018 – 10 – 22

幸福生活靠奋斗,美丽河湖靠呵护