

# 废砖基质折流式垂直流人工湿地处理二级生化尾水

张国珍<sup>1</sup>, 尚兴宝<sup>2</sup>, 武福平<sup>1</sup>, 亢瑜<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 兰州分公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 秉着“以废治废”的理念,将建筑垃圾废砖块用作人工湿地填料,用折流式垂直流的运行方式研究人工湿地系统在 $0.15$ 、 $0.25$ 、 $0.35 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 这3种水力负荷条件下对二级生化尾水的净化效果和污染物沿程变化规律。结果表明:废砖块可作为系统生物膜附着生长的载体,并适合湿地植物的正常生长,对尾水中污染物的去除有积极作用。折流式垂直流人工湿地在3种不同水力负荷条件下均可以显著削减进水污染物负荷,出水氮、磷的浓度均随着水力负荷的增加而增加。在 $0.15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的低水力负荷条件下,系统对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN和TP的平均去除率可达到66.52%、72.10%、56.53%和91.55%,出水COD和TP浓度低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅲ类水体标准限值。3种水力负荷条件下,COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN和TP浓度沿程逐渐降低,下流池对污染物的去除效率明显高于上流池,尤其在进水端表层 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 范围内污染物均有一个快速降解的过程。

**关键词:** 折流式垂直流人工湿地; 尾水; 废砖块; 水力负荷

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0100-06

## Tail Water Purification Efficiency of Baffled Vertical-flow Constructed Wetland Using Broken Bricks as Substrate

ZHANG Guo-zhen<sup>1</sup>, SHANG Xing-bao<sup>2</sup>, WU Fu-ping<sup>1</sup>, KANG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Branch, North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** According to the concept of using “waste” for wastewater treatment, an innovative application that used the broken bricks as the main substrate in baffled vertical-flow constructed wetland was researched. The purification effect and the variation of pollutants along the experiment flow under three hydraulic loading rates [ $0.15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,  $0.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  and  $0.35 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ] were evaluated. The results showed that the broken bricks from construction waste could be served as the carrier for the biofilm formation and were suitable for the normal growth of wetland plants, which had a positive effect on the removal of pollutants in the tail water. The baffled vertical-flow constructed wetland significantly reduced the influent pollutants loading in all three hydraulic loading conditions. The concentration of nitrogen and phosphorus in effluent rose with the increase of hydraulic loading rates.

Under low hydraulic loading condition of  $0.15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , the average removal rates of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , TN and TP reached 66.52%, 72.10%, 56.53% and 91.55%, respectively; in addition, the effluent COD and TP concentrations had met the class III water standard in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). Under the different hydraulic loadings, COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , TN and TP concentrations demonstrated a gradually downward trend along the experiment flow direction. Furthermore, the removal efficiency of pollutants in down-flow tank was significantly higher than that in up-flow tank; especially, a rapid degradation process existed in the surface layer (0-30 cm).

**Key words:** baffled vertical-flow constructed wetland; tail water; broken brick; hydraulic load

在我国水资源比较匮乏的西北干旱半干旱地区,城市污水厂尾水深度处理后再利用,具有开源节流与环境保护的双重效益<sup>[1]</sup>。城市生活污水经过二级生物处理可削减水中的大部分污染物,但排放的尾水中氮、磷浓度仍然比较高,会造成地表水污染和受纳水体的富营养化现象。因此,开展污水厂尾水的深度处理显得尤为重要。

人工湿地以其投资及运行成本低、运行维护方便、去除氮磷能力强等优势而成为尾水深度处理的主要工艺之一<sup>[2-6]</sup>。水力负荷是影响人工湿地对污染物去除效果的主要因素之一<sup>[7]</sup>,因此研究不同水力负荷条件下人工湿地的运行效果十分必要。另一方面,填料作为人工湿地的重要组成部分,不但提供了湿地植物生长和生物膜附着的环境,而且其自身还通过物理化学吸附、沉降络合等作用有效去除污染物,特别是对污水中磷的去除起着主要作用<sup>[8]</sup>。

废砖块作为中国城市化建设的副产物,是建筑垃圾的主要组成之一。近年来,随着我国城市化建设进程的加快,建筑垃圾产生量日益增加,其中碎砖(砌)块已占到建筑垃圾总量的30%~50%<sup>[9]</sup>。在我国西北地区,绝大多数建筑砖块是以黄土、页岩、煤矸石和粉煤灰等为原料焙烧而制成的,因此具有较大的比表面积。为此,笔者秉着“以废治废”的原则,选用废砖块作为填料构建折流式垂直流人工湿地,以西北地区的常见植物——芦苇和香蒲为主要湿地植物,研究不同水力负荷条件下系统对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN和TP等污染物的净化效果及污染物的沿程变化规律,以期人工湿地深度处理污水厂尾水提供一定的理论依据和技术参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验水质

鉴于西北地区某些城镇污水处理厂的出水

中氮、磷浓度相对较高,试验以校园内某生活污水处理装置的二级出水作为系统进水,其水质如下:pH值为7.46~8.24、COD为33.11~55.69 mg/L、TN为9.57~15.46 mg/L、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为7.10~12.28 mg/L、TP为1.17~1.99 mg/L。

### 1.2 试验装置

折流式垂直流人工湿地试验装置如图1所示。装置由PVC塑料板制成,尺寸为 $0.9 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.85 \text{ m}$ ,由两个中间隔开、底部连通的池子串联而成。两池内铺设不同粒径(由下至上依次为10~20、5~10、2~5 mm)的废砖块作为填料,填料层高度为下流池700 mm、上流池650 mm。系统采用DN20穿孔管布水、侧孔出水。湿地系统下流池表面种植芦苇、上流池表面混植芦苇和香蒲,密度均为78株/ $\text{m}^2$ 。下流池和上流池均在侧面设置3个取样口(其中底部放空口兼作取样口)。系统连续运行2个月至稳定后开展试验研究。

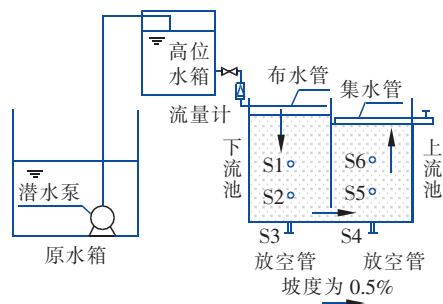


图1 折流式垂直流人工湿地系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of baffled vertical-flow constructed wetland

### 1.3 试验方法

试验控制水力负荷分别为 $0.15$ 、 $0.25$ 、 $0.35 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,于2016年6月—9月研究不同水力负荷下折流式垂直流人工湿地的除污效果。

试验期间系统连续运行,通过阀门控制进水,每3 d 采集1次进出水水样,现场测定温度、DO、pH 值后将水样带回实验室测定 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 浓度等指标,测定方法分别为快速消解分光光度法、纳氏试剂分光光度法、碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 废砖块表面形貌

采用 JSM-6701F 冷场发射型扫描电子显微镜对废砖块进行了表面形貌分析,如图2所示。可以看出,废砖块表面“粗糙”,内部孔道结构非常明显,比表面积较大。这预示着废砖块在湿地系统中可以为生物膜的附着生长提供足够的空间,而且有利于其对污染物的吸附。

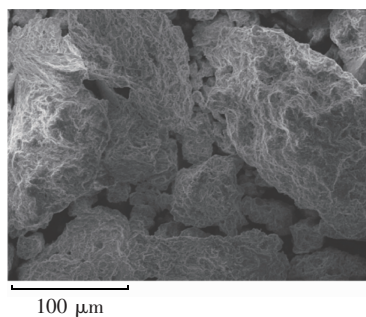


图2 废砖块扫描电镜照片

Fig.2 SEM of broken brick

### 2.2 COD 的去除效果与沿程变化

#### 2.2.1 COD 的去除效果

在湿地系统稳定运行后,于2016年6月3日开始进行水质监测和数据采集。试验结果表明,湿地系统对尾水中 COD 的去除率均保持在60%以上,出水 COD 浓度均低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅲ类水体标准限值(20 mg/L),表明该系统对二级生化尾水的 COD 有较好的去除效果,且系统具有一定的抗冲击负荷能力。在0.15、0.25、0.35  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  的水力负荷下,系统对 COD 的去除效果比较稳定,说明水力负荷对 COD 的去除效果影响相对较小,这与 Deblina 等的研究结论相类似<sup>[7]</sup>。此外,废砖块本身含有机质,加之湿地植物根系腐败分解,使得人工湿地存在一定的背景 COD 浓度<sup>[10]</sup>。

#### 2.2.2 COD 浓度的沿程变化

在3种水力负荷下,湿地系统中 COD 浓度沿程均逐渐降低(见图3)。尾水中 COD 浓度在进水端

有一个快速下降的过程,而且在下流池中大部分有机物已被去除,COD 在下流池的去除率分别达到63.89%、54.05%、51.61%,3种水力负荷下 COD 浓度的沿程变化趋势相似。这主要是由于尾水中 COD 浓度相对较低,尾水向下流动的过程中大多数有机物通过基质(废砖块)吸附、植物根系截留以及好氧、兼氧、厌氧微生物的降解作用而被高效去除。当污水从下流池流至上流池时,有机物浓度已经较低,导致微生物活性也比较低,而且植物根系腐败变质也会释放部分有机物,所以上流池去除率曲线变化较平缓。栾晓丽等<sup>[11]</sup>以砾石+矿渣为湿地基质研究了复合垂直流与潜流人工湿地对污水中 COD 等的沿程去除规律后得出了相似的结论,但其对 COD 的去除效果不如本系统,这可能是因为废砖块的表面结构适合生物膜的生长,对提高系统处理尾水的效果有促进作用。

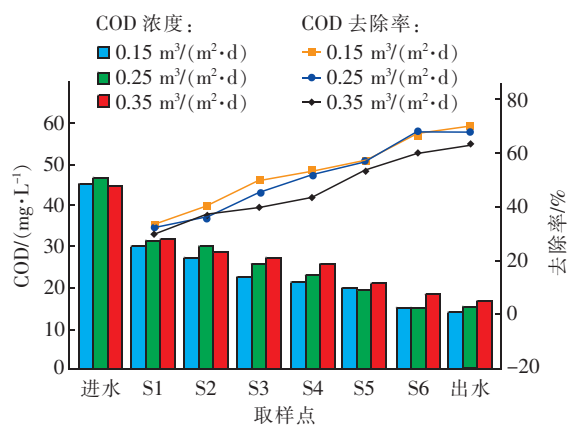


图3 COD 浓度的沿程变化

Fig.3 Variation of COD along the experiment flow

### 2.3 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果与沿程变化

#### 2.3.1 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

人工湿地对氨氮的去除作用主要包括植物的吸收、基质的吸附、氨挥发作用和微生物的硝化作用<sup>[12]</sup>。该湿地系统对尾水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  总体保持了较高的去除率,出水氨氮  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度  $< 3 \text{ mg/L}$ 。在0.15、0.25、0.35  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  水力负荷下,对氨氮的平均去除率分别为72.10%、64.03%、62.88%,系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果随水力负荷的增加而降低。研究表明<sup>[13]</sup>,人工湿地系统中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的主要去除机理是微生物的硝化作用,供氧不足会成为潜流湿地进行硝化作用的限制性因素。而在折流式垂直流人工湿地系统中,硝化作用所需的氧气由



进水中携带的 DO (浓度为 0.9 ~ 3.2 mg/L) 和湿地植物的根系供给,系统的低溶解氧状态对此耗氧过程存在一定的限制作用。另一方面,随着水力负荷的增大,尾水在人工湿地系统中的停留时间缩短,使得氨氧化细菌与氨氮的接触时间变短,硝化反应不充分而导致人工湿地系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效率降低。

### 2.3.2 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的沿程变化

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的沿程变化见图 4。可知,进水端氨氮浓度有一个骤降过程,进、出水端表层氨氮去除率均高于中下层,采样口 S1 处的氨氮去除率分别占总去除率的 38.67%、33.74%、35.47%。这是因为:试验期间正值湿地植物生长的旺盛期(6月—8月),湿地表层发达的植物根系泌氧的同时可以同化吸收一部分氮素;硝化反应的最佳 pH 值为 7.0 ~ 8.2<sup>[14]</sup>,试验进水 pH 值呈弱碱性(7.84 ± 0.53),有利于氨氮的去除;废砖块较大的比表面积既有利于其对氨氮的吸附,也为根系微生物进行硝化作用提供了条件。整个系统在不同水力负荷下  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度均沿程下降,尾水中大部分  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在下流池已被吸附降解,其余少部分在上流池被去除。研究表明,填料对氨氮的吸附通常是快速可逆的<sup>[15]</sup>,湿地系统中被吸附氨氮的解吸作用,再加上系统底部及上流池的缺氧环境抑制了  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的硝化作用,两者的综合作用致使上流池中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除趋势较平缓。

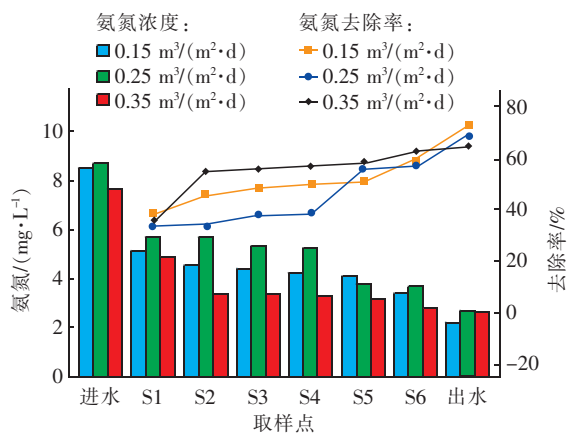


图4  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的沿程变化

Fig. 4 Variation of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  along the experiment flow

## 2.4 TN 的去除效果与沿程变化

### 2.4.1 TN 的去除效果

结果表明,当水力负荷分别为 0.15、0.25 和

0.35  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  时,系统对总氮的平均去除率分别为 56.53%、49.45% 和 41.06%,说明水力负荷对该湿地系统去除总氮的影响较大,降低水力负荷是提高折流式垂直流人工湿地系统脱氮能力的有效措施。系统对 TN 的去除率较低,总体维持在 40% ~ 60% 之间,但出水总氮浓度远低于一级 A 标准的限值。研究表明<sup>[16]</sup>,系统进水氮形态会影响 TN 的去除率,本湿地系统进水氮形态以  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为主,因而去除率较之以  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  为主的系统偏低。此外,系统碳源不足会直接影响人工湿地的反硝化作用,本试验进水 C/N 值较低(C/N 值 < 6),这可能是造成系统对总氮去除率较低的重要因素。

### 2.4.2 TN 浓度的沿程变化

不同水力负荷下,TN 浓度明显地表现为下流池的浓度降幅较大,而上流池的浓度降低比较平缓,尤其是表层 30 cm 处 TN 浓度降幅比较明显,分别占总去除率的 51.33%、39.45%、49.11%。这主要是因为:一方面,湿地表层植物根系发达,微生物数量多且活性较强,氮素被吸附截留后逐渐转化为  $\text{N}_2$  逸出系统;另一方面,尾水首先进入下流池耗氧,造成上流池 DO 浓度较低,不能提供良好的硝化作用环境条件,导致硝化和反硝化路径不顺畅。此外,研究发现每去除 1 mg  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  需要消耗 6.7 ~ 8.0 mg COD<sup>[17]</sup>,反硝化作用作为一个耗能过程,上流池中较少的碳源限制了反硝化作用的顺利进行,导致上流池对 TN 去除率的贡献较小。

## 2.5 TP 的去除效果与沿程变化

### 2.5.1 TP 的去除效果

Lantze 等<sup>[18]</sup>研究发现,短期运行条件下湿地系统对磷的去除贡献大小为:基质 > 水生植物 > 微生物,而植物吸收对磷的去除作用与植物的生长状态、植物种类、收割频率及时期、进水负荷和气候条件等有关<sup>[14]</sup>。由此可见,湿地系统中磷的主要去除途径是基质吸附沉淀和植物同化吸收作用,而且基质的吸附沉淀作用占主导地位。

试验结果表明,在 3 种水力负荷下,系统出水 TP 浓度分别为 0.15、0.2、0.24 mg/L,低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 IV 类水体标准限值(0.3 mg/L)。可以看出,随水力负荷的增加,系统对 TP 的去除率呈下降趋势,可见尾水中磷素的去除与水力负荷有较大关系。较低的水力负荷有利于废砖块对磷的吸附沉淀和植物的同化吸收,而

增大水力负荷会使尾水在湿地中的停留时间变短,导致二级尾水中的磷来不及被吸附转化而排出;另一方面,较高水力负荷条件下,水流对基质的冲击可能使原先吸附在基质或植物根茎表面的磷冲出系统<sup>[19]</sup>,造成TP去除率下降。湿地系统对TP有很好的净化效果,对磷的总去除率可达90%左右。相比运行条件相似的其他湿地,本湿地对磷的去除率较高,这主要是因为废砖块的“粗糙”多孔结构对磷有较强的吸附能力。

### 2.5.2 TP浓度的沿程变化

在不同水力负荷条件下,TP浓度沿程均呈降低趋势,去除率曲线变化较平缓(见图5)。这可能是由于湿地系统中磷的去除主要通过生长旺盛的芦苇、菖蒲的吸收作用和废砖块的吸附沉淀作用,受微生物活性和DO浓度的影响较小。由图5可知,在进水端TP浓度迅速降低,下流池中TP的去除率分别达到71.24%、64.19%和56.16%,占系统总去除率的81.54%、74.85%和68.67%。这说明折流式垂直流人工湿地中总磷的去除主要发生在下流池。

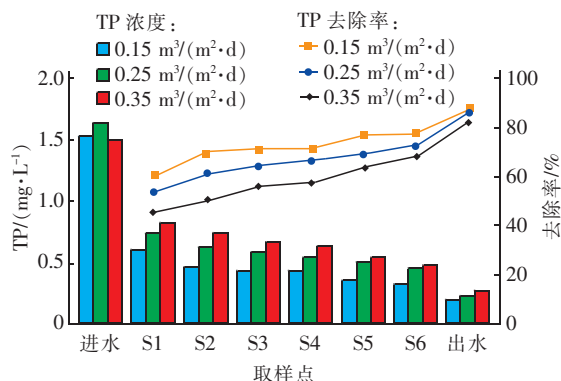


图5 TP浓度的沿程变化

Fig.5 Variation of TP along the experiment flow

## 3 结论

① 以废砖块为填料的折流式垂直流人工湿地系统在处理二级生化尾水过程中表现出相对较高的除磷脱氮能力,这说明将废砖块用作折流式垂直流人工湿地填料,达到了“以废治废”的效果,具有很强的实践意义和推广价值。

② 水力负荷对折流式垂直流人工湿地除污效果有直接影响,污染物去除率随水力负荷的增加均呈下降趋势(COD除外),即减小水力负荷有利于降低湿地系统出水污染物的浓度。

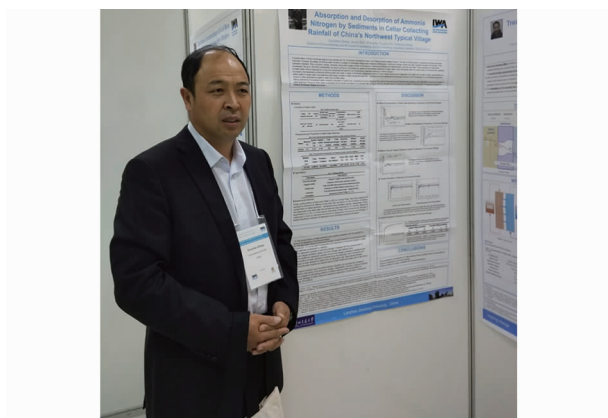
③ 不同水力负荷下,折流式垂直流人工湿地

对污染物的去除主要发生在下流池,尤其在湿地表层0~30 cm范围内。

## 参考文献:

- [1] 张丽,朱晓东,邹家庆. 人工湿地深度处理城市污水处理厂尾水[J]. 工业水处理,2008,28(1):85-87.  
Zhang Li, Zhu Xiaodong, Zou Jiaqing. Application of constructed wetland to the advanced treatment of effluent in a municipal sewage plant [J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(1): 85-87 (in Chinese).
- [2] 韩瑞瑞,袁林江,孔海霞. 复合垂直流人工湿地净化污水厂二级出水的研究[J]. 中国给水排水,2009,25(21):50-52.  
Han Ruirui, Yuan Linjiang, Kong Haixia. Purification of secondary effluent from WWTP by integrated vertical-flow constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(21): 50-52 (in Chinese).
- [3] 谷先坤,王国祥,刘波,等. 复合垂直流人工湿地净化污水厂尾水的研究[J]. 中国给水排水,2011,27(3):8-11.  
Gu Xiankun, Wang Guoxiang, Liu Bo, et al. Advanced purification of effluent from sewage treatment plant by integrated vertical-flow constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(3): 8-11 (in Chinese).
- [4] Yu D, Wiliński P R, Dzakpasu M, et al. Impact of hydraulic loading rate and season on water contaminant reductions integrated constructed wetlands [J]. Wetlands, 2011, 31(3): 499-509.
- [5] 杨林,李咏梅. 组合人工湿地处理工业园区污水厂尾水的中试研究[J]. 环境工程学报,2012,6(6):1846-1850.  
Yang Lin, Li Yongmei. Pilot-scale study on advanced treatment of tail-water from wastewater treatment plant in industrial park using hybrid constructed wetland system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(6): 1846-1850 (in Chinese).
- [6] 许明,储时雨,蒋永伟,等. 太湖流域化工园区污水处理厂尾水人工湿地深度处理实验研究[J]. 水处理技术,2014,40(5):87-91.  
Xu Ming, Chu Shiyu, Jiang Yongwei, et al. Advancement treatment of a constructed wetland system for the tail-water of chemical industrial park wastewater treatment plant in Taihu Lake Basin [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(5): 87-91 (in Chinese).
- [7] Deblina G, Brij G. Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow

- constructed wetland[J]. *Ecol Eng*, 2010, 36(8): 1044 – 1051.
- [8] 王飞宇,洪剑明,靖德兵,等. 人工湿地生态系统污水净化研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(12): 5641 – 5643, 5689.
- Wang Feiyu, Hong Jianming, Jing Debing, *et al.* Progress in sewage purification of artificial wetland ecosystem [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(12): 5641 – 5643, 5689 (in Chinese).
- [9] 翟旭娜. 以建筑废砖为吸附剂去除水中污染物的可行性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2012.
- Zhai Xuna. Feasibility Study on the Removal of Pollutants in Wastewater Using Construction Waste Brick as an Adsorbent [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012 (in Chinese).
- [10] Otto R S, Joel A B, Paul B H, *et al.* Plant species and temperature effects on the  $k - C^*$  first-order model for COD removal in batch-loaded SSF wetlands [J]. *Ecol Eng*, 2006, 26(2): 100 – 112.
- [11] 栾晓丽, 王晓, 赵钰, 等. 复合垂直流与潜流人工湿地沿程脱氮除磷对比研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(11): 26 – 29, 34.
- Luan Xiaoli, Wang Xiao, Zhao Yu, *et al.* Purified efficiency of nitrogen and phosphate through two types of constructed wetlands [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2009, 31(11): 26 – 29, 34 (in Chinese).
- [12] 程龙, 李怀, 阎百兴, 等. 无植物水平折流式潜流人工湿地对氮和磷的净化效果[J]. *湿地科学*, 2016, 14(2): 219 – 225.
- Cheng Long, Li Huai, Yan Baixing, *et al.* The nitrogen and phosphorus removal efficiency of horizontal baffle subsurface flow constructed wetland without plants [J]. *Wetland Science*, 2016, 14(2): 219 – 225 (in Chinese).
- [13] 帖靖玺, 郑正, 钟云, 等. 潜流 – 上行垂直流复合人工湿地对氮磷去除效果[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(3): 265 – 269.
- Tie Jingxi, Zheng Zheng, Zhong Yun, *et al.* Removal of nitrogen and phosphorus by integrated subsurface flow-upward vertical flow constructed wetland process [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(3): 265 – 269 (in Chinese).
- [14] Antoniou P, Hamilton J, Koopman B, *et al.* Effect of temperature and pH on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria [J]. *Water Res*, 1990, 24(1): 97 – 101.
- [15] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2670 – 2677.
- Lu Shaoyong, Jin Xiangcan, Yu Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2670 – 2677 (in Chinese).
- [16] 连小莹, 金秋, 李先宁, 等. 氮形态对人工湿地氮去除效果的影响[J]. *环境科技*, 2011, 24(1): 26 – 28.
- Lian Xiaoying, Jin Qiu, Li Xianning, *et al.* Effect of nitrogen forms on denitrifying efficiency in constructed wetlands [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 24(1): 26 – 28 (in Chinese).
- [17] Lin Y F, Jing S R, Wang T W, *et al.* Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal groundwater in constructed wetlands [J]. *Environ Pollut*, 2002, 199(3): 413 – 420.
- [18] Lantzke L R, Mitchell D S, Heritage A D, *et al.* A model of factors controlling orthophosphates removal in planted vertical flow wetlands [J]. *Ecol Eng*, 1999, 12(1/2): 93 – 105.
- [19] 黄德锋. 人工湿地净化富营养化景观水的效果及机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- Huang Defeng. Study on Purification Eutrophic Scenic Water and the Mechanisms with Constructed Wetlands [D]. Shanghai: Tongji University, 2007 (in Chinese).



作者简介: 张国珍 (1969 – ), 男, 甘肃靖远人, 博士, 教授, 研究方向为区域和流域水环境污染控制与资源化、水污染治理理论与技术等。

E-mail: guozhenzhang126@126.com

收稿日期: 2018 – 11 – 20