

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.13.018

复合型人工湿地对污水厂尾水的深度处理效果

潘成荣^{1,2}, 陈建¹, 彭书传¹, 张浏², 刁飞^{3,4}, 刘璐³,
刘志爽¹, 柯凡³

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省环境科学研究院,
安徽 合肥 230001; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室,
江苏 南京 210008; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用由微曝气垂直流湿地(UFCW)、水平潜流湿地(HFCW)和沉水植物氧化塘(SOP)组成的复合人工湿地工艺对肥西县中派污水处理厂尾水进行深度处理,在平均水温为28.8℃左右、UFCW单元曝气量为0.3 m³/h且HRT为0.12 d、HFCW单元HRT为1.30 d并投加反硝化缓释碳源、SOP单元HRT为1.60 d的条件下,复合人工湿地系统对TN、TP和SS的去除率较高,分别为82.5%、63.4%和85.3%,SOP单元对脱氮有贡献。系统出水TN、COD和SS平均浓度分别为1.42、22.7和7.1 mg/L,优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准;出水NH₄⁺-N平均浓度为0.2 mg/L,达到GB 3838—2002的Ⅱ类标准;出水TP平均浓度为0.15 mg/L,优于GB 3838—2002的Ⅲ类标准。

关键词: 人工湿地; 污水厂尾水; 深度处理; 脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0111-06

Advanced Treatment Efficiency of Effluent from Wastewater Treatment Plant by Composite Constructed Wetland

PAN Cheng-rong^{1,2}, CHEN Jian¹, PENG Shu-chuan¹, ZHANG Liu², DIAO Fei^{3,4},
LIU Lu³, LIU Zhi-shuang¹, KE Fan³

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Institute of Environmental Sciences, Hefei 230001, China; 3. State Key Laboratory of Lake and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A composite constructed wetland process consisting of micro-aerated vertical flow wetland, horizontal subsurface flow wetland and submerged plant oxidation pond was applied to advanced treatment of the effluent from Zhongpai Wastewater Treatment Plant in Feixi County. When water temperature was 28.8℃, aeration rate and hydraulic retention time (HRT) of the micro-aerated vertical flow wetland were 0.3 m³/h and 0.12 d, HRT of the horizontal subsurface flow wetland with dosage of slow release carbon source was 1.30 d and HRT of the submerged plant oxidation pond was 1.60 d, the composite constructed wetland system had higher removal efficiencies of TN, TP and SS, which were

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07603-004)

通信作者: 柯凡 E-mail: fke@niglas.ac.cn

82.5%, 63.4% and 85.3%, respectively, and the submerged plant oxidation pond contributed to nitrogen removal. The average TN, COD and SS in effluent were 1.42 mg/L, 22.7 mg/L and 7.1 mg/L, respectively, which were better than the class IV criteria specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The average NH_4^+-N in effluent was 0.2 mg/L, which met the class II criteria specified in GB 3838-2002. The average TP in effluent was 0.15 mg/L, which was better than the class III criteria specified in GB 3838-2002.

Key words: constructed wetland; effluent from wastewater treatment plant; advanced treatment; nitrogen removal

合肥市肥西县派河是巢湖的重要入湖河流,也是引江济淮工程的输水廊道,按其水功能区划要求达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类标准,而流域内的上派镇中派污水处理厂每日有超过 $7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的尾水排入派河,目前执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,为保障引江济淮输水水质,亟需对污水处理厂尾水进行深度处理。

人工湿地与其他深度净化工艺相比具有投资及运维成本低、景观效果好等优点,常用于污水厂尾水处理工程^[1-2]。污水处理厂尾水的一个典型特点就是C/N较低^[3],大量工程应用实践表明,传统人工湿地的反硝化能力不足^[4-5],致使脱氮效果不佳,成为污水厂尾水深度处理的难点^[6-7]。为此研究者提出在人工湿地中投加外源性碳源来增强其反硝化脱氮效果^[8-11],但目前尚未见到大规模的工程化应用。

微曝气垂直流湿地(UFCW)+水平潜流湿地(HFCW)+沉水植物氧化塘(SOP)的复合型人工湿地污水净化工艺在多个万吨级污水厂尾水深度处理工程中有所应用^[12],该工艺通过UFCW单元氧化尾水中的有机物与氨氮,生成的硝酸盐在HFCW单元中进行反硝化,最后通过SOP系统中的沉水植物实现磷的深度处理。然而由于污水厂尾水C/N较低,无法为反硝化提供足够的碳源,最终出水总氮浓度与地表Ⅳ类水质标准仍有差距。

在前人研究的基础上,笔者采用固态缓释碳源与基质层混合对UFCW+HFCW+SOP复合湿地工艺进行强化,在合肥市肥西县派河流域开展中试规模研究,处理上派镇中派污水处理厂尾水,研究污染物的去除效果,分析氮、磷营养盐在工艺流程中的迁移转化过程,微调优化工艺参数,以期使处理后

的水质能达到地表水Ⅳ类水质标准。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

复合型人工湿地建于中派污水处理厂内,露天放置,由UFCW、HFCW及SOP三个模型单元串联构成,为调控优化每个单元的水力负荷,在每个单元前均设置了三通和水量调节阀。试验装置工艺流程见图1。

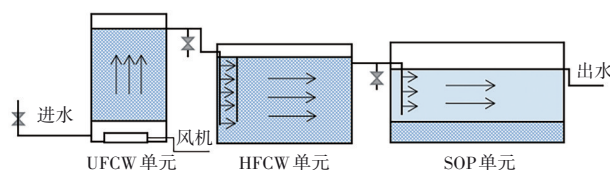


图1 复合人工湿地工艺流程

Fig.1 Flow chart of composite constructed wetland process

微曝气垂直流湿地:UFCW装置为直径50 cm、高100 cm的亚克力圆柱,有效容积为196 L。内置石灰石填料,粒径为5~10 mm。进水方式为下进上出,填料托盘距离底部25 cm,填料有效高度为60 cm,运行水深为90 cm,底部设有曝气盘,填料上层栽种西伯利亚鸢尾。

水平潜流湿地:HFCW装置有效容积为1 200 L,长、宽、高分别为150、100、80 cm。内置粒径为5~10 mm的石灰石填料,填料层高70 cm,运行水深为65 cm,基质体积为1.05 m^3 。将6 kg的X-Nitro反硝化碳源(见图2)与基质混合投加,此碳源为固态缓释碳源,释放时间长,多孔结构不易造成基质层堵塞,主要成分为聚己酸内酯(PCL)。湿地上栽种菖蒲和旱伞草,密度为20株/ m^2 。

沉水植物氧化塘:SOP装置有效容积为1 600 L,长、宽、高分别为200、100、80 cm。装置底部铺有粒径为5~10 mm的石灰石填料,高度为20 cm,混合

栽种金鱼藻、轮叶黑藻、苦草以及菹草,运行水深为60 cm。



图2 X-Nitro反硝化碳源

Fig.2 X-Nitro carbon source for denitrification

运行方式:用水泵将污水厂二沉池的出水抽至蓄水桶(2 000 L)内,作为复合湿地系统进水。如图1所示,UFCW单元进水为下进上出,HFCW和SOP单元均为水平推流态,采用垂直打孔管道布水,SOP单元出水经管道排入污水厂的排水渠中。复合型人工湿地系统运行稳定后,UFCW单元的曝气量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$,水力负荷为 $7.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,水力停留时间(HRT)为 0.12 d ;HFCW单元的水力负荷为 $1.15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,HRT为 1.30 d ;SOP单元的水力负荷为 $1.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,HRT为 1.60 d 。

1.2 试验方法

1.2.1 试验水质

试验系统进水为合肥市肥西县中派污水处理厂二沉池出水,试验时间为2019年5月底至8月31日。初始时每周一至周五取水检测,一个月后改为两天采一次样检测,每次采集两组平行样。采样时间为早上9点。进水水质如下:水温为 $(28.8 \pm 2.5)^\circ\text{C}$,SS为 $(48.2 \pm 28.7) \text{ mg/L}$,DO为 $(7.05 \pm 0.77) \text{ mg/L}$,氧化还原电位(ORP)为 $(175.5 \pm 55.3) \text{ mV}$,COD为 $(35.76 \pm 17) \text{ mg/L}$,TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 (8.1 ± 1.0) 、 (7.1 ± 0.9) 、 $(0.43 \pm 0.46) \text{ mg/L}$,TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 分别为 (0.4 ± 0.1) 、 $(0.26 \pm 0.08) \text{ mg/L}$ 。

1.2.2 水质检测方法

水温、ORP、DO、pH:哈希HQ40d多参数水质检测仪;TN、TP:过硫酸钾消解法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$:紫外分光光度法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$:纳氏试剂分光光度法; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$:钼锑抗分光光度法;SS:重量法;COD:哈希快速消解分光光度法。

2 结果与分析

2.1 DO浓度和pH的变化

湿地系统各单元DO浓度与pH的变化如图3所示。可知,复合湿地进、出水pH变化不大。进水pH

均值为7.45,经过UFCW和HFCW单元处理后pH基本不变,但再经SOP单元处理后,pH均值升高至8.0左右,这是因为在SOP单元,沉水植物的光合作用消耗了水中的 CO_2 ,改变了水体中 $\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$ 的平衡,从而导致pH升高^[13]。复合湿地系统进水DO浓度平均值为 7.05 mg/L ,经过UFCW处理后DO平均浓度升高到 7.54 mg/L ,主要原因是湿地底部设有曝气系统,系统持续曝气使得水中DO浓度升高;UFCW出水进入HFCW后,由于湿地好氧微生物的作用,使得出水DO平均浓度降到 5.68 mg/L ,最后由于SOP单元沉水植物的光合作用释氧,使得系统最终出水DO浓度升高到 8.45 mg/L 。

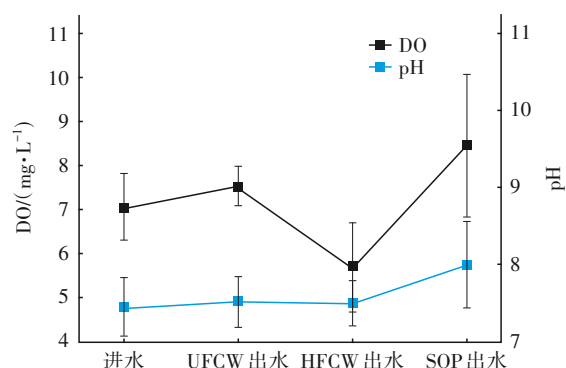


图3 湿地系统各单元DO浓度与pH的变化

Fig.3 Variation of DO concentration and pH in constructed wetland

复合人工湿地进水平均水温为 28.8°C ,波动较小;UFCW、HFCW和SOP单元水温平均值维持在 28.6°C 左右,相对稳定且适宜湿地的温度条件,为试验装置提供了良好的运行环境。湿地系统进水及各工艺单元出水的ORP均值在 $162.0 \sim 175.5 \text{ mV}$ 之间波动,均处于弱氧化状态,说明该湿地系统以氧化过程为主,污染物的去除主要在好氧条件下进行。

2.2 污染物去除效果

2.2.1 系统对SS的去除效果

湿地系统各工艺单元对SS的去除效果见图4。可知,进水SS浓度平均值为 48.2 mg/L ,系统最终出水SS浓度降至 7.1 mg/L ,总去除率达到85.3%。UFCW单元对SS的平均去除率达到57.56%,使SS浓度降至 20 mg/L 左右,这说明UFCW单元中的基质对SS有较好的过滤和吸附作用。再经HFCW单元处理后,出水SS浓度降至 8.5 mg/L 左右;SOP单元中浓密的沉水植物可进一步截留水体中的SS,使

得SS平均浓度进一步降至7.1 mg/L,且试验期间出水SS较为稳定,基质未出现堵塞情况。

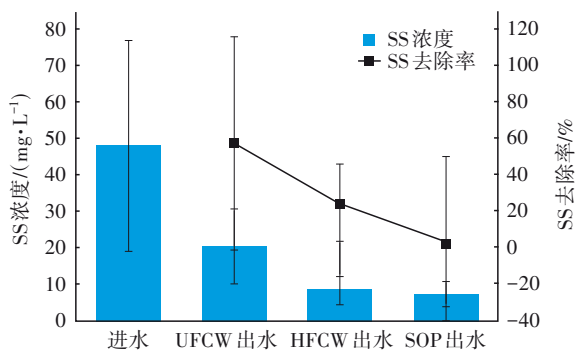


图4 人工湿地系统各单元对SS的去除效果

Fig.4 Removal of SS in each unit of constructed wetland

2.2.2 系统对COD的去除效果

复合湿地系统对COD的去除效果如图5所示。可知,系统进水COD浓度并不高,平均值为35.76 mg/L,经过复合湿地系统处理后,出水COD平均浓度降到22.7 mg/L左右,对COD的总去除率为36.5%,接近地表水Ⅲ类水质标准。尾水中的COD主要在UFCW单元被去除,其对COD的平均去除率为25.03%,而SOP和HFCW单元的平均去除率分别为10.65%和0.87%。COD一部分会因附着在悬浮物上被去除,另一部分则通过微生物的降解作用而被去除。本试验中,湿地系统进水SS与COD浓度都不高,颗粒物所吸附的有机物较少,且污水处理厂尾水中的COD大部分为难降解有机物,因此复合湿地系统对COD的总去除率并不高。

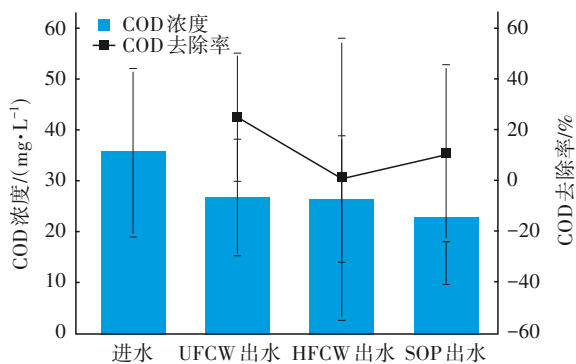


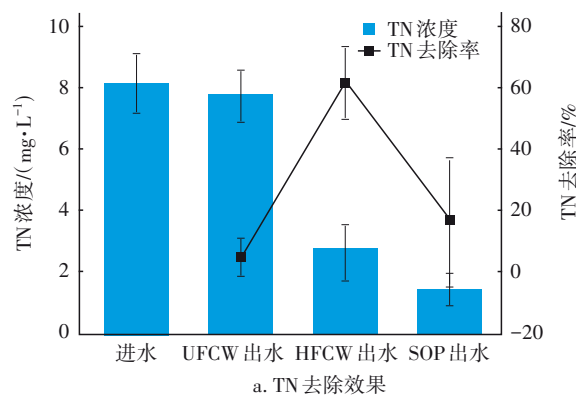
图5 人工湿地系统各单元对COD的去除效果

Fig.5 Removal of COD in each unit of constructed wetland

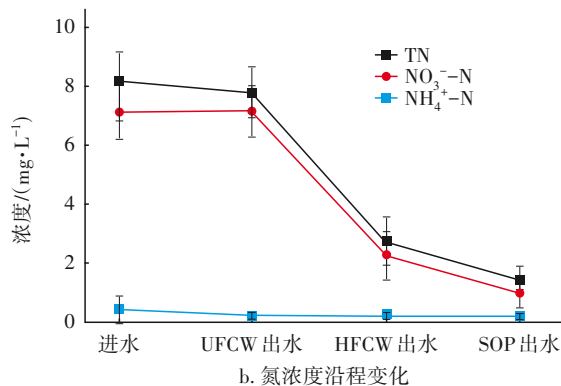
2.2.3 系统对氮元素的去除效果

复合湿地系统进水TN浓度达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级

A标准,其中氮元素形态主要为 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N,分别占TN的87.1%和5.3%,而 NO_2^- -N几乎可以忽略不计。UFCW单元将进水中剩余的有机氮和氨氮转化成硝态氮,而HFCW单元是主要的反硝化脱氮区。复合湿地系统对氮元素的去除效果如图6所示。湿地系统对TN和 NO_3^- -N的总去除率均超过了80%,对 NH_4^+ -N的总去除率超过了50%。在进水TN浓度均值为8.1 mg/L的条件下,UFCW对TN和 NH_4^+ -N的去除率分别为4.8%和51.16%, NH_4^+ -N浓度从0.43 mg/L降到0.21 mg/L。HFCW单元将TN和 NO_3^- -N浓度从7.73、7.09 mg/L分别降到2.74、2.25 mg/L,对TN和 NO_3^- -N的去除率分别达到了64.55%、68.27%,而 NH_4^+ -N浓度基本不变,HFCW单元的反硝化效果比较好,这是因为投加了X-Nitro碳源。SOP单元进一步将TN、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N浓度分别降到了1.42、0.98、0.2 mg/L,复合人工湿地系统的最终出水TN浓度优于地表水Ⅳ类水质标准。



a. TN去除效果



b. 氮浓度沿程变化

图6 人工湿地系统各单元对TN的去除效果

Fig.6 Removal of TN in each unit of constructed wetland

SOP单元对TN的去除贡献约占23%,其DO浓度维持在8.45 mg/L左右,高于其他两个单元,但仍然具有较好的脱氮效果,其内部在好氧条件下实现

了脱氮^[14],Zhao等人^[15]的研究也发现了类似现象。试验期间SOP单元生长旺盛的沉水植物对水体中的硝态氮也具有一定的吸收作用。本试验在进水TN浓度低于10 mg/L的条件下,通过在UFCW单元投加X-Nitro反硝化碳源强化湿地脱氮效果,使得TN的平均去除率达到了82.5%左右,且脱氮效果较为稳定。

2.2.4 系统对磷元素的去除效果

复合湿地系统进水中的磷主要为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,平均占TP的70.73%。系统中磷浓度的沿程变化如图7所示。系统对TP的总去除率为63.4%,磷元素的去除主要在HFCW与SOP单元完成。HFCW单元对TP的去除率为31.7%,对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率为27.6%;SOP单元对TP的去除率为24.4%。系统最终出水TP平均浓度为0.15 mg/L,优于地表水Ⅲ类水质标准,最终出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均浓度在0.07 mg/L左右。

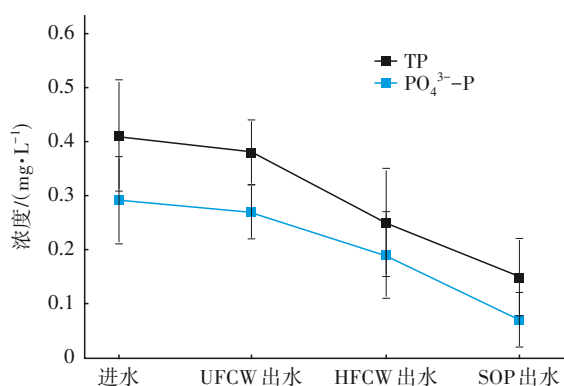


图7 TP与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的沿程变化

Fig.7 Variation of TP and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations along process

3 结论

① 采用UFCW+HFCW+SOP复合人工湿地系统深度处理污水处理厂尾水,在平均温度约为28.8℃、UFCW单元曝气量为0.3 m³/h且HRT为0.12 d、HFCW单元投加X-Nitro固态缓释碳源且HRT为1.30 d、SOP单元HRT为1.60 d的条件下,系统整体表现出较好的净化效果,对TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、COD和SS的平均去除率分别为82.5%、53.5%、63.4%、36.5%和85.3%,以上指标的平均出水浓度分别为1.42、0.2、0.15、22.7和7.1 mg/L,优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准。

② HFCW单元通过添加固态缓释碳源强化反

硝化后,复合湿地工艺整体表现出优异的脱氮效果,实现了污水处理厂尾水水质从国家一级A标准提升至地表水Ⅳ类水质标准,可以为污水厂尾水深度处理、低污染河湖水质净化工程等提供参考。HFCW和SOP单元均在好氧条件下实现了TN的去除,其脱氮机理值得进一步研究,以扩大好氧条件下脱氮技术的有效应用范围。

参考文献:

- [1] 杜曼曼,张琼华,连斌,等.城市污水处理厂尾水人工湿地净化工程调试与运行[J].中国给水排水,2020,36(9):94-100.
DU Manman, ZHANG Qionghua, LIAN Bin, et al. Commissioning and operation of constructed wetland project for purification of tail water from municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 94-100 (in Chinese).
- [2] 魏俊,赵梦飞,刘伟荣,等.我国尾水型人工湿地发展现状[J].中国给水排水,2019,35(2):29-33.
WEI Jun, ZHAO Mengfei, LIU Weirong, et al. Development status of constructed wetland (CWs) for treatment of terminal effluent of wastewater treatment plants (WWTPs) in China [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2): 29-33 (in Chinese).
- [3] 赖后伟,刘丽红,刘畅,等.两段式DN-BAF深度处理城市污水厂尾水的效能[J].中国给水排水,2018,34(11):6-9.
LAI Houwei, LIU Lihong, LIU Chang, et al. Two-stage denitrification-BAF process for advanced treatment of tail water of municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(11): 6-9 (in Chinese).
- [4] DĄBROWSKI W, MALINOWSKI P, KAROLINCZAK B. Application of SS-VF bed for the treatment of high concentrated reject water from autothermal thermophilic aerobic sewage sludge digestion [J]. Journal of Ecological Engineering, 2018, 19(4): 103-110.
- [5] 李旭宁,梅峰,刘欢,等.缺氧/好氧生物塘深度处理污水厂尾水的中试[J].中国给水排水,2013,29(17):85-88.
LI Xuning, MEI Feng, LIU Huan, et al. Advanced treatment of effluent from sewage treatment plant by anoxic/oxic biological pond [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(17): 85-88 (in Chinese).
- [6] WANG W, DING Y, WANG Y H, et al. Intensified

- nitrogen removal in immobilized nitrifier enhanced constructed wetlands with external carbon addition [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 218: 1261–1265.
- [7] FU G P, HUANGSHEN L K, GUO Z P, *et al.* Effect of plant-based carbon sources on denitrifying microorganisms in a vertical flow constructed wetland [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 214–221.
- [8] 陶梦妮, 陶正凯, 王印, 等. 人工湿地复合生物燃料电池强化脱氮研究[J]. *应用化工*, 2018, 47(10): 2212–2216.
- TAO Mengni, TAO Zhengkai, WANG Yin, *et al.* Study on enhanced nitrogen removal in microbial fuel cell integrated with constructed wetlands [J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(10): 2212–2216 (in Chinese).
- [9] RUSTIGE H, NOLDE E. Nitrogen elimination from landfill leachates using an extra carbon source in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Water Science and Technology*, 2007, 56(3): 125–133.
- [10] 常军军, 刘虎, 罗通, 等. 花卉秸秆为碳源的潜流人工湿地对硝氮的去除及其负效应[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(9): 5313–5318.
- CHANG Junjun, LIU Hu, LUO Tong, *et al.* Nitrate removal and negative effects of subsurface constructed wetlands adding flower straws as carbon source [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(9): 5313–5318 (in Chinese).
- [11] 魏星, 朱伟, 赵联芳, 等. 植物秸秆作补充碳源对人工湿地脱氮效果的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 916–922.
- WEI Xing, ZHU Wei, ZHAO Lianfang, *et al.* Effect of the carbon source of plant straw supplement in constructed artificial wetland on nitrogen removal [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 916–922 (in Chinese).
- [12] 曹大伟, 沙玥, 金秋, 等. 多级复合型人工湿地工艺对污水厂尾水处理净化效果的试验研究[J]. *环境科技*, 2019, 32(3): 12–16.
- CAO Dawei, SHA Yue, JIN Qiu, *et al.* Study on purification efficiency of multistage composite constructed wetland process on tail water treatment of wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 32(3): 12–16 (in Chinese).
- [13] TANK S E, LESACK L F W, MCQUEEN D J. Elevated pH regulates bacterial carbon cycling in lakes with high photosynthetic activity [J]. *Ecology*, 2009, 90(7): 1910–1922.
- [14] 闫苗苗, 张海涵, 钊珍芳, 等. 生物脱氮技术中好氧反硝化细菌的代谢及应用研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(3): 668–676.
- YAN Miaomiao, ZHANG Haihan, ZHAO Zhenfang, *et al.* Research progress of metabolism and application of aerobic denitrifying bacteria in biological denitrification technology [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(3): 668–676 (in Chinese).
- [15] ZHAO H G, XU X G, KE F, *et al.* Nitrogen removal from waste water plant secondary effluent in a compound natural treatment system [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 361–365.

作者简介:潘成荣(1966—),男,安徽合肥人,博士,正高级工程师,从事水环境保护与环境规划研究。

E-mail:ccrp@sina.com

收稿日期:2020-02-01

修回日期:2020-05-12

(编辑:刘贵春)

借自然之力,护绿水青山