

# 表面流-垂直流复合湿地去除低碳氮比河水中氨氮

黄小龙<sup>1</sup>, 郭亮<sup>1</sup>, 汪尚朋<sup>1</sup>, 李四团<sup>2</sup>, 崔宾飞<sup>2</sup>, 刘卫兵<sup>1</sup>, 刘剑彤<sup>3</sup>

(1. 武汉中科水生环境工程股份有限公司, 湖北 武汉 430071; 2. 晋城市丹河人工湿地管理处, 山西 晋城 048000; 3. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 为了研究丹河人工湿地在不同温度下对低 C/N 值河水中氨氮的去除能力, 于 2015 年 1 月—6 月对丹河人工湿地各处理单元进、出水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 COD 进行了逐日监测。结果显示, 沉水植物型表面流-垂直流复合人工湿地对河水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均去除率随温度的升高从 50.1% 上升到 80.2%, 低温条件下,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  主要在垂直流湿地单元中被去除。温度  $< 15^\circ\text{C}$  时, 复合系统中垂直流单元对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率介于 50.6% ~ 72.3% 之间, 显著高于单一垂直流人工湿地 (27.5% ~ 45.8%), 说明表面流人工湿地有助于后续垂直流人工湿地对氨氮的去除。通过对湿地各单元进、出水中溶解氧含量的测定, 推测表面流湿地单元的增氧作用可能是保证后续垂直流单元在低温条件下具有高氨氮去除能力的主要原因。

**关键词:** 丹河人工湿地; 污染河水; 低碳氮比; 氨氮; 溶解氧

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0070-05

## Removal of Ammonia Nitrogen from River Water with Low C/N Ratio Using Surface Flow - Vertical Flow Integrated Constructed Wetland

HUANG Xiao-long<sup>1</sup>, GUO Liang<sup>1</sup>, WANG Shang-peng<sup>1</sup>, LI Si-tuan<sup>2</sup>, CUI Bin-fei<sup>2</sup>,  
LIU Wei-bing<sup>1</sup>, LIU Jian-tong<sup>3</sup>

(1. Wuhan Zhongke Hydrobiological Environment Engineering Co. Ltd., Wuhan 430071, China;  
2. Jincheng Danhe Constructed Wetland Management Office, Jincheng 048000, China; 3. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The removal of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  from low C/N ratio river water under different temperature in the Danhe constructed wetland was investigated. The concentrations of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and COD in both influent and effluent of each unit were monitored from January to June, 2015. The results showed that the removal rate of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the surface flow - vertical flow integrated constructed wetland increased from 50.1% to 80.2% as the temperature rose, and the  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  was mainly removed in the vertical flow constructed wetland under low temperature condition. When the temperature was below  $15^\circ\text{C}$ , the removal rate of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the vertical flow constructed wetland in the integrated system remained between 50.6% and 72.3%, and the removal rate in the vertical flow constructed wetland only system was from 27.5% to 45.8%, which suggested that the surface flow constructed wetland with submerged plant con-

基金项目: 科技部科技型中小企业技术创新基金资助项目 (12C26214204624); 湖北省科技支撑计划项目 (2015BCA246)

通信作者: 刘卫兵 E-mail: 408617629@qq.com

tributed to the removal of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the subsequent vertical flow constructed wetland. The measurement of dissolved oxygen in each unit indicated that the oxygen supply in surface flow constructed wetland was beneficial to the high removal efficiency of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in vertical flow constructed wetland.

**Key words:** Danhe constructed wetland; polluted river water; low C/N ratio; ammonia nitrogen; dissolved oxygen

随着生活污水、工业废水及面源污染的排入,城市河流污染是我国面临的主要环境问题之一,构建人工湿地技术对河水进行净化也成为研究热点<sup>[1]</sup>。然而污染河水与生活污水不同,它的有机污染物浓度低、氮磷等营养盐浓度相对较高<sup>[2]</sup>,低 C/N 值不利于人工湿地系统对水体中氮的去除<sup>[3]</sup>。研究表明垂直流人工湿地对于污水中氮的去除主要发生在表层 30 cm 处,湿地下部由于碳源缺乏抑制了反硝化过程,基本不能发挥脱氮作用<sup>[4]</sup>。此外,河水具有水量、水质变化大及悬浮颗粒物含量高的特点,这也给人工湿地的持续性运行造成很大困难<sup>[5]</sup>。组合湿地系统对河水中 TSS、BOD<sub>5</sub>、COD、TP 的去除率高于单一湿地<sup>[1]</sup>,但对氮的平均去除率大致相当,此外组合工艺对 TN 的去除率南方明显优于北方<sup>[6]</sup>,这说明温度也是限制人工湿地对河水中氮去除的主要影响因子。

尽管已有大量人工湿地对受污染河流净化机理及影响因素的研究,但是人工湿地在处理河水过程中实际应用效果却缺乏报道。基于此,笔者对大型人工湿地——山西晋城丹河人工湿地各处理系统进、出水中氨氮浓度进行了连续半年(1月—6月)的监测,旨在探明大型人工湿地系统在我国北方去除河水中氨氮的实际应用效果及影响因素,讨论沉水植物型表面流-垂直流复合人工湿地系统对低碳氮比河水中氨氮的去除过程及机理,为这一技术的完善和推广提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 丹河人工湿地简介

丹河人工湿地位于山西省晋城市泽州县金村镇水北村,处于北石店河、丹河两河交汇处,共分三期工程完成,每天约接纳  $8 \times 10^4 \text{ m}^3$  的工业废水和生活污水。一期、二期工程均为垂直流人工湿地,湿地床厚 1.5 m,分五层,湿地面主要种植芦苇。一期工程占地 7  $\text{hm}^2$ ,于 2009 年通水运行;二期工程占地 14  $\text{hm}^2$ ,于 2012 年投入运行。针对北石店河来水悬浮物指标过高,为防止堵塞二期垂直流人工湿地,于

2011 年开工建设三期工程,工程占地面积 23  $\text{hm}^2$ 。三期工程主要工艺为沉水植物型表面流人工湿地,内部种植有黑藻、狐尾藻、马来眼子菜及黄丝草等沉水植物,该工程于 2013 年 6 月全面竣工。三期完成后,针对丹河支流北石店河水形成了由沉水植物型表面流人工湿地和垂直流人工湿地组成的复合人工湿地系统处理工艺,笔者将重点分析该复合系统对河水中氨氮的去除效果及影响因素。

### 1.2 试验方法

2015 年 1 月 1 日—6 月 30 日,对丹河人工湿地各单元进、出水中 COD 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  逐日进行测定。进、出水水样每天采集一次,水体水温( $T$ )、溶解氧(DO)及 pH 值使用 YSI Professional plus 多参数水质分析仪现场测定,COD 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  分别采用重铬酸钾法和纳氏试剂比色法测定。数据使用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析,当  $p < 0.05$  时认为存在显著性差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 进、出水 COD 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化

随着晋城煤化工行业的快速发展,大量工业废水、生活污水排入,导致丹河流域水环境受到严重污染。图 1 显示了 2015 年 1 月 1 日—6 月 30 日复合人工湿地进、出水中 COD 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的变化。可以看出,复合人工湿地进水(即北石店河河水)COD 浓度介于 13~69  $\text{mg/L}$  之间,其平均浓度为 27  $\text{mg/L}$ ;复合人工湿地出水 COD 浓度介于 2~26  $\text{mg/L}$  之间,平均值为 12.4  $\text{mg/L}$ ;2015 年上半年复合人工湿地对北石店河河水中 COD 的去除率为 55.2%。复合人工湿地进水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度介于 3.7~13.2  $\text{mg/L}$  之间,平均值为 7.1  $\text{mg/L}$ ;复合人工湿地出水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度介于 0.2~6  $\text{mg/L}$  之间,平均值为 2.2  $\text{mg/L}$ ;2015 年上半年复合人工湿地对北石店河河水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率为 68.8%。监测期间复合人工湿地进水中 COD/ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  均值为 3.99,介于 1.65~11.31 之间,持续处于较低的 C/N 值水平。

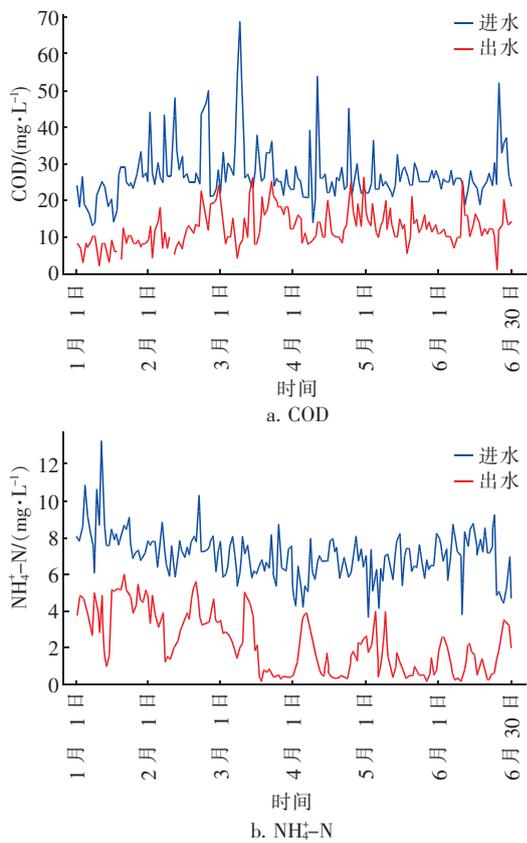


图1 复合人工湿地系统进、出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  与 COD 浓度变化  
 Fig. 1 Variation of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and COD in influent and effluent of integrated constructed wetland

### 2.2 丹河人工湿地对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除

复合人工湿地由沉水植物型表面流湿地和垂直流人工湿地组成,图2显示了复合人工湿地在不同月份对北石店河水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除及表面流、垂直流单元所起的作用。

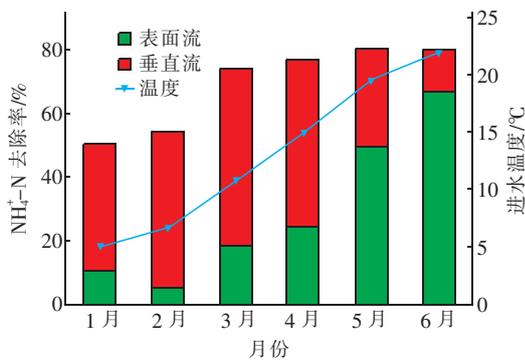


图2 复合人工湿地在不同月份对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果  
 Fig. 2 Removal efficiency of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  by integrated constructed wetland in different months

由图2可以看出,2015年1月—6月,随着温度

升高,复合人工湿地对氨氮的去除率从 50.1% 逐渐上升到 80.2% 左右。这主要是因为,随着温度升高,人工湿地中硝化细菌的活性增强,从而有利于氨氮的去除;同时,夏季植物生长良好,新陈代谢旺盛,使得植物的吸收量和根际的微生物活性增强,加速了氨氮的去除。通过对人工湿地在我国受污染河水治理中应用统计分析后,钟林等发现各类人工湿地对河水中氨氮的平均去除率介于 50% ~ 60%,且有很强的不稳定性,组合工艺对河水中氨氮的去除率最低仅为 16.5%,去除率的标准偏差为 28.5<sup>[6]</sup>。由此可见,相较于其他组合方式而言,沉水植物型表面流湿地与垂直流人工湿地组合对河水中氨氮具有很好的去除效果,且具有相对较强的稳定性,北方冬季的氨氮去除率仍能保持在 50% 左右。

由图2还可以看出,试验期间,表面流和垂直流人工湿地在不同月份对河水中氨氮的去除作用差异显著,在低温条件下,表面流人工湿地对氨氮的去除效果不明显,仅能去除河水中 10% 左右的氨氮,河水中氨氮的去除主要依靠垂直流人工湿地的去除作用。随着温度的上升,表面流湿地对河水中氨氮的去除效果也逐渐上升,6月份时可达 66.7%。可以看出,仅依靠沉水植物型表面流人工湿地不能有效去除北石店河水中的氨氮。

为了分析复合人工湿地中垂直流人工湿地单元与单一垂直流人工湿地(丹河人工湿地一期工程)对氨氮去除能力的区别,将复合人工湿地系统中垂直流人工湿地单元与丹河人工湿地一期工程在不同月份的氨氮去除率进行了对比。结果表明,在1月—4月,水温低于 15 °C 时,单一垂直流人工湿地对氨氮的去除率为 27.5% ~ 45.8%,而复合系统中垂直流人工湿地对氨氮的去除率介于 50.6% ~ 72.3% 之间,显著高于单一垂直流湿地 ( $p < 0.05$ )。由此可知,尽管复合人工湿地中表面流湿地单元在低温条件下对河水中氨氮的去除能力很弱,但是其有助于强化后续垂直流人工湿地单元对氨氮的去除,从而保证了复合人工湿地在低温条件下对水体中的氨氮去除率始终高于 50%。在5月—6月,单一垂直流对氨氮的平均去除率可达 70.2%,微高于复合系统中垂直流湿地,但无显著差异,这主要是因为此段时间复合系统中表面流人工湿地对氨氮的去除率很高,导致复合系统垂直流湿地进水中氨氮浓度已经很低。

### 2.3 表面流湿地对后续垂直流湿地的影响

人工湿地脱氮机理主要包括挥发、氨化、硝化/反硝化、植物摄取和基质吸附,但是微生物的硝化/反硝化被认为是人工湿地最主要的脱氮机理<sup>[7]</sup>。硝化反应中溶解氧浓度通常应保持在 2 mg/L 以上<sup>[7]</sup>,因此提高溶解氧浓度是目前人工湿地高效脱氮的一个研究方向<sup>[8,9]</sup>。同时,碳源作为反硝化过程的电子供体,是影响人工湿地反硝化过程的主要因素,高含氮污水中低碳氮比是导致脱氮效果低的主要原因<sup>[10]</sup>。

为了探究溶解氧和有机碳对人工湿地去除氨氮的影响,测定了复合系统各处理单元及单一垂直流人工湿地出水 DO、COD 分别与进水 DO、COD 的比例,见图 3。

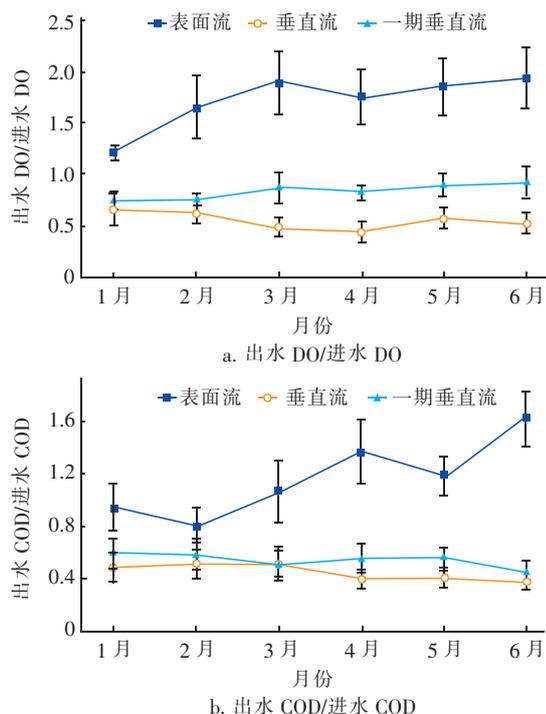


图3 丹河人工湿地不同处理单元出水 DO、COD 分别与进水 DO、COD 的比值

Fig. 3 Ratio of effluent DO and COD to influent DO and COD of each unit of Danhe constructed wetland

由图 3(a) 可知,复合系统中表面流湿地单元出水 DO/进水 DO 介于 1.2~1.9 之间,说明表面流人工湿地中沉水植物通过光合作用能有效提高水体中 DO,从而使复合系统中垂直流湿地单元进水 DO  $[(8.8 \pm 2.6) \text{ mg/L}]$  高于单一垂直流人工湿地进水 DO  $[(6.6 \pm 1.7) \text{ mg/L}]$ 。王磊等人研究发现曝气

增氧能显著加强垂直流人工湿地的硝化作用<sup>[9]</sup>,不仅如此,Ouellet<sup>[11]</sup>发现曝气在冬季对人工湿地脱氮能力的提升效果更为明显,由此可见表面流湿地单元的增氧作用可能是复合系统中垂直流单元在冬季仍具有较高氨氮去除能力的主要原因。此外,由于持续有氧供给,复合系统垂直流湿地单元中好氧微生物活性高,使其对氧使用效率更高,该单元出水与进水溶解氧比例明显低于单一垂直流人工湿地。

由图 3(b) 可以看出,复合系统中表面流湿地单元出水与进水 COD 的比例介于 0.81~1.62 之间,而且随着温度升高,表面流湿地单元出水有机质含量逐渐升高,这表明表面流湿地单元对进水中有机质不能有效去除,而且在合适温度下可提高水体中有机质含量。这主要有两个方面的原因:一方面,复合系统进水主要为工业废水,工业废水中一般为难降解有机质,不易在表面流人工湿地中去除;另一方面,表面流湿地单元中沉水植物及浮游植物通过光合作用可以固定二氧化碳,植物死亡分解后能增加水体中可降解有机质的含量。复合湿地系统垂直流单元出水 COD 与进水 COD 的比值平均为 0.45,而单一垂直流湿地出水 COD 与进水 COD 的比值平均为 0.54,说明北石店河水流经表面流湿地单元处理后,水体中有机质的降解率有所提高。由此可见,复合系统中沉水植物型表面流人工湿地对湿地原水中有机质含量及组分的改变,也可能是其提高后续垂直流人工湿地对有机质及氨氮去除能力的原因之一,这一点有待进一步研究。

### 3 结论

① 沉水植物型表面流-垂直流复合人工湿地对低 C/N 值河水中氨氮具有很好的去除效果,氨氮去除率介于 50.1%~80.2% 之间,且随着温度升高而增大。

② 低温条件下,复合人工湿地系统进水氨氮的去除主要发生在垂直流人工湿地单元;随着温度升高,复合系统中表面流人工湿地对氨氮的去除能力增强。

③ 1月—4月,复合系统中垂直流人工湿地单元对氨氮的去除效果(50.6%~72.3%)显著高于单一垂直流人工湿地(27.5%~45.8%)。复合人工湿地系统中表面流湿地单元的增氧作用是保证后续垂直流单元对水体中氨氮在低温条件下仍具有较高去除率的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 关艳艳, 余宗莲, 周艳丽, 等. 人工湿地处理污染河水的研究进展[J]. 水处理技术, 2010, 36(10): 10-15.  
Guan Yanyan, She Zonglian, Zhou Yanli, *et al.* An overview on the application of constructed wetlands for polluted river water treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(10): 10-15 (in Chinese).
- [2] 赵建, 朱伟, 赵联芳. 人工湿地对城市污染河水的净化效果及机理[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 32-38.  
Zhao Jian, Zhu Wei, Zhao Lianfang. Efficiency and mechanism of treating the polluted river water with constructed wetland [J]. *Journal of Lake Science*, 2007, 19(1): 32-38 (in Chinese).
- [3] Fan J, Wang W, Zhang B, *et al.* Nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Impact of influent COD/N ratios [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 143(9): 461-466.
- [4] 赵联芳, 朱伟, 赵建. 人工湿地处理低碳氮比污染河水时的脱氮机理[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1821-1827.  
Zhao Lianfang, Zhu Wei, Zhao Jian. Nitrogen removal mechanism in constructed wetland used for treating polluted river water with lower ratio of carbon to nitrogen [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(11): 1821-1827 (in Chinese).
- [5] 张建, 何苗, 邵文生, 等. 人工湿地处理污染河水的持续性运行研究[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1760-1764.  
Zhang Jian, He Miao, Shao Wensheng, *et al.* Sustainable operation of subsurface constructed wetland treating polluted river water [J]. *Environment Science*, 2006, 27(9): 1760-1764 (in Chinese).
- [6] 钟林, 郑蕾, 丁爱中, 等. 人工湿地在我国污染河水治理中的应用及去除效果统计分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2012, 48(1): 66-73.  
Zhong Lin, Zheng Lei, Ding Aizhong, *et al.* Reconstructed wetlands to treat polluted river—pollutant removal efficiency in China [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2012, 48(1): 66-73 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] Foladori P, Ruaben J, Ortigara A R. Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: A comparative study for treating high load wastewater [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 149(12): 398-405.
- [9] 王磊, 李文朝, 柯凡, 等. 低氧接触氧化/微曝气人工湿地工艺净化污染河水[J]. 中国给水排水, 2008, 24(5): 22-26.  
Wang Lei, Li Wenchao, Ke Fan, *et al.* Combined process of low DO contact oxidation and micro-aeration constructed wetland for treatment of polluted river water [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(5): 22-26 (in Chinese).
- [10] 肖蕾, 贺锋, 黄丹萍, 等. 人工湿地反硝化外加碳源研究进展[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(1): 139-143.  
Xiao Lei, He Feng, Huang Danping, *et al.* Research advances of adding extra carbon sources to denitrification for constructed wetlands [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(1): 139-143 (in Chinese).
- [11] Ouellet C. Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate [J]. *Ecol Eng*, 2006, 27(3): 258-264.



作者简介: 黄小龙(1989-), 男, 湖北松滋人, 博士, 工程师, 主要研究方向为污染生态学及生态修复工程技术。

E-mail: h.xl0210@163.com

收稿日期: 2017-11-12