

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.17.011

复合人工湿地处理生活污水的冬季启动和春季运行

寇晓梅¹, 吴世璋¹, 邵甜¹, 牛乐¹, 闫飞龙², 张恒², 王怡²,
张磊³, 张建华³

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 西安建筑科技大学
环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 3. 眉县污水处理厂, 陕西 宝鸡 722300)

摘要: 以北方某城镇生活污水为实际进水,研究了垂直流+水平流复合人工湿地(HCW)系统的冬季启动和春季运行情况,通过低温条件下曝气工况的变化,探讨强化曝气对HCW冬季启动和春季运行时污染物去除及植物生长的影响。结果表明,在冬季低温启动阶段及春季运行阶段,曝气均明显提高了HCW系统的溶解氧浓度,从而提高了对生活污水中COD、SS、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TP的去除效果。此外,即使在气温为 $(0.3 \pm 2.4)^\circ\text{C}$ 、水温为 $(7.25 \pm 2.7)^\circ\text{C}$ 的条件下,HCW系统的植物分蘖并未停止,植物株高也继续增长。因此,从植物的分蘖和株高变化来看,HCW系统的启动在冬季不受低温影响。冬季启动后的HCW系统在春季运行,出水SS和COD浓度均达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN浓度分别为 (6.81 ± 1.01) 、 $(15.48 \pm 1.34) \text{ mg/L}$ 。

关键词: 复合人工湿地; 冬季启动; 春季运行; 强化曝气; 植物生长

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)17-0069-05

Winter Start-up and Spring Operation of Hybrid Constructed Wetland for Domestic Sewage Treatment

KOU Xiao-mei¹, WU Shi-zhang¹, SHAO Tian¹, NIU Le¹, YAN Fei-long²,
ZHANG Heng², WANG Yi², ZHANG Lei³, ZHANG Jian-hua³

(1. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 2. School
of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an 710055, China; 3. Meixian Sewage Treatment Plant, Baoji 722300, China)

Abstract: The winter start-up and spring operation of a hybrid constructed wetland (HCW) consisted of a vertical flow constructed wetland (VFCW) and a horizontal flow constructed wetland (HFCW) fed domestic sewage from a northern town was investigated. Meanwhile, the effects of enhanced aeration on pollutant removal and plants growth of the HCW during winter start-up and spring operation were explored by changing the aeration conditions at low temperature. During the cold start-up stage in winter and the operation stage in spring, aeration obviously increased the dissolved oxygen in the HCW system, so as to improve the removal performance of COD, SS, TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TP in the domestic sewage. In addition, tillering did not stop and plant height continued to increase in the HCW

system even at low air temperature of $(0.3 \pm 2.4) ^\circ\text{C}$ and water temperature of $(7.25 \pm 2.7) ^\circ\text{C}$. Therefore, the start-up of HCW system was not affected by low temperature in winter as showed by the changes of tillering and plant height. During the operation of the HCW system in spring, the SS and COD in the effluent reached the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002), and the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN in the effluent were $(6.81 \pm 1.01) \text{ mg/L}$ and $(15.48 \pm 1.34) \text{ mg/L}$, respectively.

Key words: hybrid constructed wetland; winter start-up; spring operation; enhanced aeration; plant growth

人工湿地(CW)作为一种生态型污水处理技术,是利用填料、植物及微生物的物理、化学和生物协同作用,通过截留、吸附、沉淀、植物吸收、微生物同化及转化等实现对水中污染物的净化。与传统的污水二级生化处理工艺相比,CW具有建设和运行成本低并具有景观效应的优势,因此在我国被广泛应用于污水处理。CW的成功启动是保证其高效运行的先决条件,许多研究报道了CW的启动模式和效果^[1]。然而,CW的启动时间大多选择植物易于成活和生长的春、夏季^[2],CW的冬季启动一般较少,特别是在我国北方地区。

事实上,由于冬季正值植物的休眠期,因而植物移植的适宜期往往在冬季。鉴于此,本研究通过处理北方地区实际生活污水的垂直流+水平流复合人工湿地(HCW)系统的冬季启动和春季运行,探究低温季节下CW启动的可行方式,以期低温环境下CW的启动及处理效率提高提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 HCW系统的构建

实验采用如图1所示的HCW(垂直流VFCW+水平流HFCW)系统,湿地植物选择长势一致的本土水生植物芦苇,种植密度为 $10 \sim 12 \text{ 株/m}^2$ 。VFCW尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$,填料采用三级组配,其中最下层铺设厚为6 cm、孔隙率为41%、粒径为4~5 cm的卵石,中层铺设厚为4 cm、孔隙率为37%、粒径为2~3 cm的卵石,最上层铺设厚为55 cm、孔隙率为53%、粒径为1~2 cm的普通碎石,有效水深为60 cm,VFCW有效体积为76 L。HFCW尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$,填料采用粒径为1~2 cm、孔隙率为53%的普通碎石,碎石填充高度为70 cm,有效水深为65 cm,HFCW有效体积为165 L。此外,VFCW在中心位置设置穿孔管作为采样点,HFCW分别在距布水板30、60和90 cm的位置

设置穿孔管作为前段、中段和后段的沿程采样点,所有穿孔管直径和高度均分别为3 cm和90 cm。

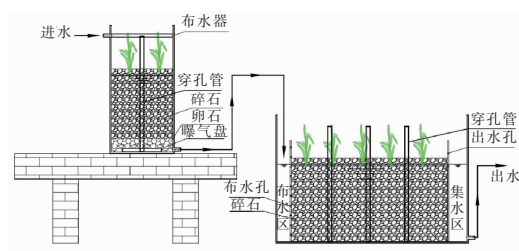


图1 HCW系统示意

Fig. 1 Diagram of HCW system

1.2 HCW系统的启动和运行

HCW系统采用连续进水方式于冬季(12月中旬)启动,进水为北方某县污水处理厂实际生活污水,具体水质如下:COD为 $(413.51 \pm 39.18) \text{ mg/L}$ 、TN为 $(81.36 \pm 7.10) \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $(70.86 \pm 5.03) \text{ mg/L}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $(3.22 \pm 1.31) \text{ mg/L}$ 、SS为 $(312.88 \pm 88.00) \text{ mg/L}$ 、TP为 $(5.96 \pm 1.79) \text{ mg/L}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 为 $(3.70 \pm 1.16) \text{ mg/L}$ 、pH值为 7.57 ± 0.19 。生活污水经沉淀后进入HCW系统,处理水量为69 L/d,HCW系统的HRT为3.5 d、HLR为 $0.0945 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。HCW系统在冬季启动(阶段I、II)和春季运行(阶段III),具体工况如表1所示。

表1 HCW系统的冬季启动和春季运行工况

Tab. 1 Winter start-up and spring operating conditions of HCW system

| 项目 | 时间/d | 气温/ $^\circ\text{C}$ | 水温/ $^\circ\text{C}$ | 运行条件 |
|-----|------|----------------------|----------------------|--------------------|
| I | 42 | 0.3 ± 2.4 | 7.25 ± 2.7 | VFCW以气水比为6.5:1连续曝气 |
| II | 40 | 5.3 ± 2.9 | 9.7 ± 2.3 | 无曝气 |
| III | 39 | 13.8 ± 3.2 | 13.4 ± 2.4 | VFCW以气水比为6.5:1连续曝气 |

1.3 采样与分析

取样周期为3 d,每次采样均在早上09:00进行,分别采集污水厂进水、经沉淀后的HCW进水、两级HCW出水各500 mL,测定COD、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和SS,测定方法依据《水和废水监测分析方法》(第4版)。

每个工况运行结束时,对HCW系统进行沿程分析。HFCW沿程取样点高度位于35 cm处,VFCW采样点分别位于1/3(上段)和2/3(下段)高度处。

2 结果和讨论

2.1 沿程DO浓度变化

DO是影响CW处理效率的主要因素,表2为HCW系统沿程DO浓度变化。可知,污水处理厂实际进水中DO浓度相对较低,且所有工况下DO浓度在HCW系统中沿水流逐渐下降。相对于无曝气的启动阶段Ⅱ,对VFCW进行连续曝气的启动阶段Ⅰ和运行阶段Ⅲ,HCW系统内DO浓度显著提高。

表2 HCW系统中DO浓度沿程变化

Tab.2 Variation of DO concentration along HCW system

| 项 目 | 进水 | VFCW | | HFCW | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| | | 上段 | 下段 | 前段 | 中段 | 后段 |
| 阶段Ⅰ | 0.30 | 2.12 | 1.68 | 1.35 | 1.03 | 0.78 |
| 阶段Ⅱ | 0.15 | 0.32 | 0.35 | 0.52 | 0.42 | 0.30 |
| 阶段Ⅲ | 0.19 | 1.76 | 1.86 | 1.23 | 1.00 | 0.90 |

易乃康等人^[3]研究表明,CW降解污染物所需的氧主要来自植物组织的输氧和根系的泌氧、湿地表层大气复氧以及进水携带的DO,而湿地植物的输氧速率远大于空气向湿地表层的扩散速率,由于进水中携带的DO浓度较低,因此CW系统供氧主要途径是植物组织的输氧和植物根系的泌氧。本研究表明,对处于启动阶段的HCW系统,由于冬季植株生长不够旺盛,植物泌氧能力较弱,使得不曝气的自然状态下(阶段Ⅱ)HCW系统中DO浓度相对较低。因此,曝气对于冬季HCW系统DO浓度的提高非常关键。

2.2 SS和COD浓度历时变化

图2为HCW冬季启动和春季运行阶段进出水SS和COD浓度历时变化。可知,强化曝气的阶段Ⅰ和阶段Ⅲ,HCW对SS和COD的去除效果均优于无曝气的阶段Ⅱ,其中阶段Ⅰ和阶段Ⅲ的出水SS以

及阶段Ⅲ出水COD均达到了GB 18918—2002的一级A标准。

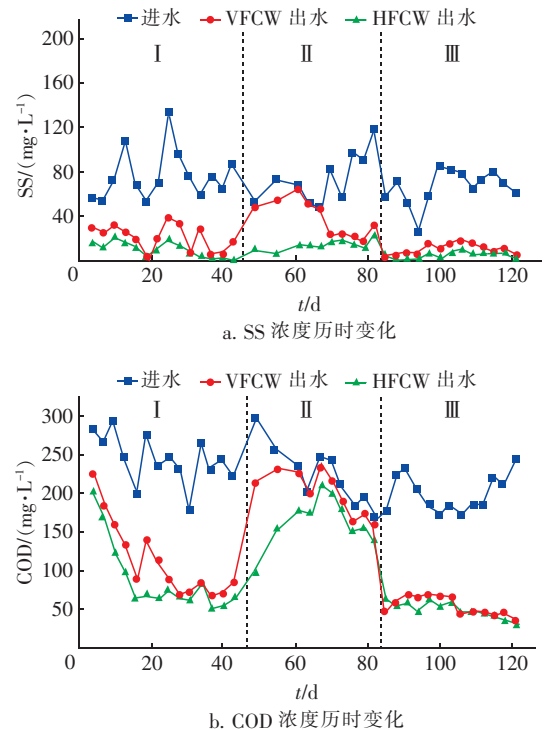


图2 HCW系统冬季启动和春季运行中进出水SS和COD浓度历时变化

Fig.2 Diachronic variation of SS and COD concentrations in influent and effluent of HCW during winter start-up and spring operation

污水中的不溶性有机物主要通过湿地的过滤作用被截留在湿地中,可溶性有机物则通过植物根系和填料表面生物膜的吸附、吸收及生物降解过程而被分解去除^[4]。Tunçsiper等人的研究表明^[5-6],对人工湿地进行曝气不仅有利于异养微生物对COD的降解,而且还可以降低SS,因为好氧条件有利于原生动物的特别是可捕食悬浮单细胞菌的纤毛虫群落的繁衍。

2.3 氮浓度的历时变化

图3为HCW系统冬季启动和春季运行中氮浓度的历时变化。由图3(a)、(b)可知,HCW对氨氮和TN的去除趋势一致,阶段Ⅰ中HCW系统对TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率明显大于阶段Ⅱ,虽然阶段Ⅱ的水温和气温均高于阶段Ⅰ,这说明曝气对于HCW的冬季启动非常重要^[7]。经过冬季启动后,进入初春运行的阶段Ⅲ,HCW已可有效降低生活污水中的氮,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN浓度分别为 (6.81 ± 1.01)

和 $(15.48 \pm 1.34) \text{ mg/L}$ 。由图3(b)可知, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在阶段Ⅰ相对较低,运行31 d以后 HCW 出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度略有提高;在阶段Ⅱ, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度相对较低且变化较小;进入春季运行的阶段Ⅲ,HCW 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度逐渐提高,且 VFCW 出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度明显高于第二级的 HFCW 出水浓度,表明 VFCW 中的曝气导致其主要发生硝化作用,而 HFCW 中可以发生反硝化作用降低 TN 浓度。

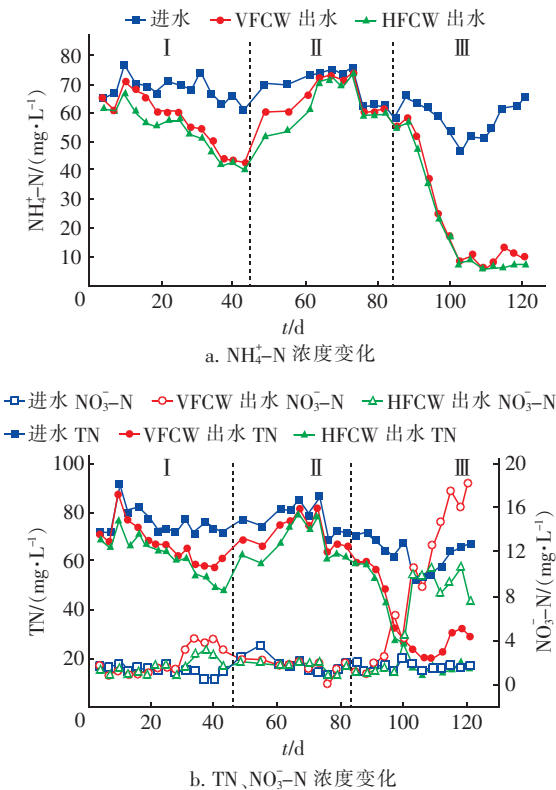


图3 HCW 冬季启动和春季运行中进出水氮浓度的变化
Fig.3 Variation of nitrogen concentrations in influent and effluent of HCW during winter start-up and spring operation

2.4 磷浓度的历时变化

图4为 HCW 冬季启动和春季运行中 TP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度的历时变化。可以看出,CW 对 TP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除趋势一致。启动16 d后 HCW 对 TP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除趋于稳定,在阶段Ⅰ,系统对 TP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的平均去除率分别为36.8%和24.6%。在阶段Ⅱ,HCW 对 TP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的平均去除率分别为8.8%和6.2%,明显小于阶段Ⅰ。进入春季运行的阶段Ⅲ,HCW 对磷的去除率逐渐升高,明显大于阶段Ⅱ;运行100 d后系统对磷的去除趋于稳定,对 TP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的平均去除率分别为

56.5%和53.5%。尽管湿地采用的填料为当地的碎石,其对磷具有一定的吸附能力,但是阶段Ⅲ较高的磷去除率则主要归结于微生物生长代谢或植物生长所利用。此外,无论是冬季启动还是春季运行,曝气对污水中磷的去除均有积极影响。

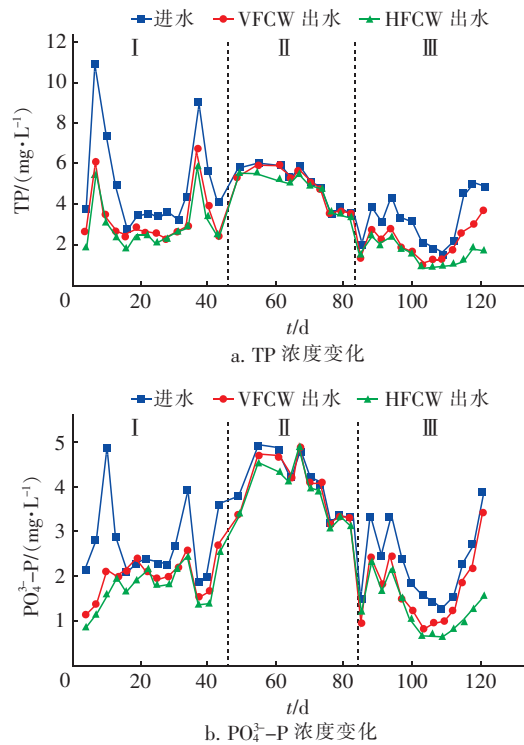


图4 HCW 冬季启动和春季运行中进出水磷浓度的变化
Fig.4 Variation of phosphorus concentrations in influent and effluent of HCW during winter start-up and spring operation
2.5 植物的生长变化

表3为 HCW 冬季启动和春季运行中植物的生长变化。可以看出,即使在冬季低温条件(水温 $< 10^\circ\text{C}$)下,HCW 中的植物分蘖并未停止,在启动后第16天(阶段Ⅰ),植物开始萌发新蘖,至阶段Ⅱ结束,第一级的 VFCW 中植株数增长了66.7%,第二级的 HFCW 中植株数增长了200%。与此同时,植物株高在冬季启动中也在继续增长,至阶段Ⅱ结束,第一级的 VFCW 中植物株高增长了60.9%,第二级的 HFCW 中植物株高增长了125%。此外,在 HCW 启动之前所栽入的所有芦苇长势一致,经过启动阶段后,第一级的 VFCW 中植物株高明显大于第二级 HFCW 中的株高,其中阶段Ⅰ中第一级的植物株高是第二级的5.75倍,阶段Ⅱ中第一级的植物株高是第二级的4.11倍。进入春季运行的阶段Ⅲ,HCW 中的植物分蘖仍在继续,植物株数飞速增加。总之,

从植物的分蘖和株高变化来看,HCW 启动在冬季不受低温影响。而在冬季启动,有利于 HCW 在春季尽快进入正常运行状态。

表 3 HCW 冬季启动和春季运行中植物的生长变化

Tab. 3 Growth changes of plants in winter start-up and spring operation of HCW

| 项 目 | VFCW | | HFCW | |
|--------|------|-------|------|-------|
| | 株数 | 株高/cm | 株数 | 株高/cm |
| 阶段 I | 3 | 23 | 2 | 4 |
| 阶段 II | 5 | 37 | 6 | 9 |
| 阶段 III | 15 | 37 | 13 | 50 |

3 结 论

① HCW 冬季低温启动时,强化曝气可以弥补冬季植物泌氧能力有限的缺陷,有效提高 CW 对 COD、SS、TN、NH₄⁺ - N 和 TP 的去除效果。

② HCW 冬季低温启动时,植物分蘖并未停止,植物株高也继续增长,因此从植物的分蘖和株高变化来看,HCW 在冬季启动不受低温影响。

③ HCW 冬季启动后,能够加快进入春季运行期的适应,春季运行 39 d 后,以城镇生活污水为进水时,出水 SS 和 COD 浓度达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准,出水 NH₄⁺ - N 和 TN 浓度分别为 (6.81 ± 1.01) 和 (15.48 ± 1.34) mg/L。

参考文献:

[1] 陈李达,高海鹰,任峰,等. 人工湿地处理城市污水启动期运行特性[J]. 环境工程学报,2013,7(6):2105 - 2110.
CHEN Lida, GAO Haiying, REN Feng, *et al.* Operation characteristics during start-up period by sewage treatment system of subsurface constructed wetlands[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7 (6): 2105 - 2110(in Chinese).

[2] 卢建,杨扬. 组合人工湿地对生活污水中有机物的去除效果[J]. 中国给水排水,2016,32(15):104 - 107.
LU Jian, YANG Yang. Combined constructed wetlands system for removal of organic compounds from domestic sewage [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(15):

104 - 107(in Chinese).

[3] 易乃康,彭开铭,陆丽君,等. 人工湿地植物对脱氮微生物活性的影响机制研究进展[J]. 水处理技术, 2016,42(4):12 - 16.
YI Naikang, PENG Kaiming, LU Lijun, *et al.* Research advances on the influence mechanism of wetland plants on microbial activity in nitrogen removal[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(4): 12 - 16(in Chinese).

[4] 沈莹,郑于聪,王晓昌,等. 不同尺度潜流人工湿地对污染河水的净化机制[J]. 环境工程学报,2018,12(6):1667 - 1675.
SHEN Ying, ZHENG Yucong, WANG Xiaochang, *et al.* Mechanism of different scales subsurface flow constructed wetlands for purifying polluted river water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(6): 1667 - 1675(in Chinese).

[5] TUNÇSİPER B, DRIZO A, TWOHIG E. Constructed wetlands as a potential management practice for cold climate dairy effluent treatment—VT, USA[J]. Catena, 2015, 135:184 - 192.

[6] ANDREO-MARTÍNEZ P, GARCÍA-MARTÍNEZ N, QUESADA-MEDINA J, *et al.* Domestic wastewaters reuse reclaimed by an improved horizontal subsurface-flow constructed wetland; a case study in the southeast of Spain [J]. Bioresource Technology, 2017, 233:236 - 246.

[7] 张国珍,尚兴宝,武福平,等. 废砖基质折流式垂直流人工湿地处理二级生化尾水[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9):100 - 105.
ZHANG Guozhen, SHANG Xingbao, WU Fuping, *et al.* Tail water purification efficiency of baffled vertical-flow constructed wetland using broken bricks as substrate[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (9): 100 - 105 (in Chinese).

作者简介:寇晓梅(1973 -),女,陕西西安人,硕士,教授级高工,主要研究方向为环境保护和水环境治理。

E - mail:364914196@qq.com

收稿日期:2019 - 08 - 20

修回日期:2019 - 11 - 01

(编辑:刘贵春)