

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.014

# 曝气方式对复合人工湿地处理城镇生活污水的影响

闫飞龙<sup>1</sup>, 王 怡<sup>1</sup>, 王文怀<sup>1</sup>, 张 恒<sup>1</sup>, 寇晓梅<sup>2</sup>, 吴世璋<sup>2</sup>, 邵 甜<sup>2</sup>,  
牛 乐<sup>2</sup>

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

**摘 要:** 针对人工湿地直接处理生活污水时存在供氧不足及其导致的对碳、氮污染物去除效果差的问题,通过组合垂直流人工湿地(VFCW)和水平流人工湿地(HFCW)构建了复合人工湿地(HCW),探究了曝气方式对HCW处理实际生活污水效果的影响,并对HCW系统中污染物的净化机理进行了解析。结果表明,当水力负荷为 $0.094\ 5\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、气水比为 $6.5:1$ 时,在连续曝气和间歇曝气方式下,HCW均可实现对生活污水的较好处理。与连续曝气相比,间歇曝气更有利于系统中TN的去除,其出水COD、SS、TN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度均可稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准。HCW中污染物沿程变化规律表明,VFCW上部属于复合系统的高效能区,可实现大部分污染物的去除;其余区域作为复合系统的水质提升区,使得污染物得到进一步净化,从而保证了HCW对城镇生活污水的高效稳定处理。

**关键词:** 复合人工湿地; 城镇生活污水; 连续曝气; 间歇曝气; 高效能区; 水质提升区

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2021)19-0085-06

## Effect of Aeration Mode on Treatment of Urban Domestic Sewage by Hybrid Constructed Wetland

YAN Fei-long<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, WANG Wen-huai<sup>1</sup>, ZHANG Heng<sup>1</sup>, KOU Xiao-mei<sup>2</sup>,  
WU Shi-zhang<sup>2</sup>, SHAO Tian<sup>2</sup>, NIU Le<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** There is a problem of poor carbon and nitrogen removal efficiency caused by insufficient oxygen supply when the domestic sewage is directly treated by the constructed wetland. A hybrid constructed wetland (HCW) was built by combining a vertical-flow constructed wetland (VFCW) and a horizontal-flow constructed wetland (HFCW). Moreover, the effect of aeration mode on the treatment of urban domestic sewage by the HCW was explored, and the purification mechanism of the pollutants in the HCW system was analyzed. When the HLR and gas-water ratio were  $0.094\ 5\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  and  $6.5:1$ ,

基金项目: 陕西省重点产业创新链(群)项目(2021ZDLSF05-04); 西安市科技局社会发展科技创新示范项目(20SF0011)

通信作者: 王怡 E-mail: wangyi1003@sina.com

both the continuous aeration and intermittent aeration could achieve better removal performances of the domestic sewage in the HCW system. Compared with the continuous aeration, the intermittent aeration was more conducive to TN removal in the HCW system, and COD, SS, TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the effluent could stably reach the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 – 2002). The variations in pollutant concentrations along the HCW system indicated that the upper part of the VFCW belonged to the high-efficiency area of the HCW system and could remove most of the pollutants in the domestic sewage. The other areas of the HCW system served as the water quality improvement areas, which further purified the pollutants in the system, thus ensuring the efficient and stable treatment of the urban domestic sewage by the HCW.

**Key words:** hybrid constructed wetland; urban domestic sewage; continuous aeration; intermittent aeration; high-efficiency area; water quality improvement area

随着我国城镇化进程的加快,城镇生活污水排放总量逐年上升。城镇生活污水水量小、水质变化大,再加上管理技术相对薄弱,导致目前广泛应用于我国城市污水处理厂的许多工艺并不适于处理城镇生活污水。人工湿地(CW)是通过植物吸收、填料吸附和微生物同化转化等途径去除水中污染物的一种工艺,其具有投资运行成本低、对水质和水量变化适应性强以及对管理要求较低等优势<sup>[1]</sup>,目前被越来越多地应用于农村污水和城镇生活污水处理中<sup>[2-5]</sup>。尽管CW有多种类型,但无论哪种CW均较难单独完成对污水中氮的去除<sup>[6]</sup>,因而不能满足日益严格的氮排放要求,所以实际应用中大多采用复合人工湿地(HCW)<sup>[7-8]</sup>。此外,尽管CW中的氧可以来自于大气扩散、植物根系传递及原水携带等,但供氧不足经常成为制约CW系统去除碳、氮污染物的主要因素<sup>[9]</sup>。因此,对CW系统进行曝气以补充自然复氧不足,是强化CW处理能力的重要途径。然而,作为CW运行管理的重要问题,如何合理曝气对不同的HCW及不同进水水质要求不同。

本研究以实际城镇生活污水为进水,通过构建串联的垂直流人工湿地(VFCW)与水平流人工湿地(HFCW)形成HCW系统,研究不同曝气方式(连续曝气、间歇曝气)对HCW处理生活污水效果的影响,并解析HCW系统对污水中污染物净化的贡献率,以为城镇生活污水的有效处理和HCW的构建、运行及管理提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 HCW系统的构建

中试规模的HCW系统通过在VFCW后串联HFCW组成,如图1所示。VFCW尺寸为0.5 m ×

0.5 m × 1.0 m,有效水深为60 cm,总体积为250 L。填料采用3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。此外,在VFCW底部预埋曝气盘,用于研究曝气方式对净化效果的影响。HFCW尺寸为1.5 m × 0.4 m × 1.0 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总体积为600 L。此外,VFCW在中心位置设置穿孔管作为采样区,分别以2/3、1/3高度处作为上段和下段的沿程采样区;而HFCW分别在距布水板30、60和90 cm处设置穿孔管作为前段、中段和后段的沿程采样区,穿孔管直径和高度分别为3、90 cm。系统启动前,选择长势一致的本土水生植物(芦苇)作为HCW植物,其种植密度为10~12株/m<sup>2</sup>。

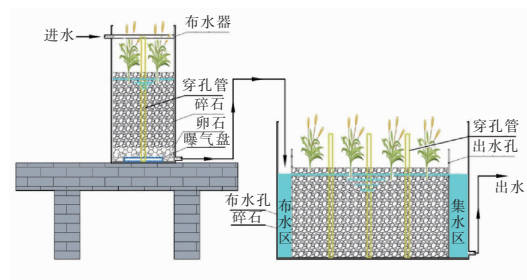


图1 HCW系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of HCW system

### 1.2 实验运行

HCW系统采用连续进水方式于2018年12月中旬开始启动,启动完成后于2019年3月开始正式运行,历时114 d。实验进水为陕西某县污水处理厂

的进水,具体水质如下:COD 为  $(361.68 \pm 52.26)$  mg/L、TN 为  $(64.13 \pm 10.12)$  mg/L、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为  $(59.84 \pm 8.98)$  mg/L、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  为  $(2.21 \pm 1.12)$  mg/L、SS 为  $(350.61 \pm 64.00)$  mg/L、TP 为  $(4.51 \pm 1.28)$  mg/L、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  为  $(3.27 \pm 0.89)$  mg/L、pH 值为  $7.47 \pm 0.17$ 。污水经预沉淀后进入 HCW 系统,实验运行过程中进水水量为 69 L/d, HRT 为 3.5 d,水力负荷(HLR)为  $0.0945 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。实验正式运行后,前 81 d 采用连续曝气、后 33 d 采用间歇曝气,具体曝气方式如表 1 所示。实验期间,当地气温为  $10 \sim 28^\circ\text{C}$ 、水温为  $13 \sim 23^\circ\text{C}$ 。

表 1 不同工况下曝气方式

Tab. 1 Aeration modes under different operating conditions

项 目	运行时间/d	运行工况
阶段 I	81	VFCW 中以气水比为 6.5 : 1 连续曝气
阶段 II	33	VFCW 中以气水比为 6.5 : 1 间歇曝气 (曝气和停曝时间比为 1 : 1)

### 1.3 采样与分析

每 3 d 取样 1 次,每次采样均在早上 09:00 进行。分别采集污水厂进水、沉淀后的 HCW 进水、两级 CW 出水,测定 SS、COD、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ,测定方法依据《水和废水监测分析方法》(第 4 版)。DO 采用 HACH 便携式多功能水质测定仪(HQ-30d)测定,其中间歇曝气阶段曝气期和非曝气期的 DO 测定间隔时间为 15 min。

## 2 结果和讨论

### 2.1 HCW 系统中 DO 浓度的沿程变化

图 2 为 HCW 系统中 DO 浓度的沿程变化情况。由图 2(a)可知,HCW 系统进水 DO 浓度较低,平均为 0.19 mg/L;第一级的 VFCW 连续曝气时,VFCW 中 DO 浓度沿水流方向呈升高趋势,至 VFCW 下段时平均为 1.75 mg/L,当进入 HFCW 后 DO 浓度沿水流逐渐下降,至 HFCW 后段时平均为 0.72 mg/L。由图 2(b)可知,当 VFCW 中采取曝停比为 1 : 1 的间歇曝气时,DO 浓度呈现出明显的周期性变化,曝气时 DO 浓度为 3.04 ~ 4.33 mg/L,停止曝气时 DO 浓度逐渐下降至 0.28 mg/L,且曝气期间 VFCW 上段 DO 浓度明显低于 VFCW 下段;VFCW 采取曝气或停止曝气对 HFCW 中 DO 浓度影响较小,HFCW 中 DO 浓度始终保持在 0.32 ~ 0.59 mg/L,且前段略大于后段。

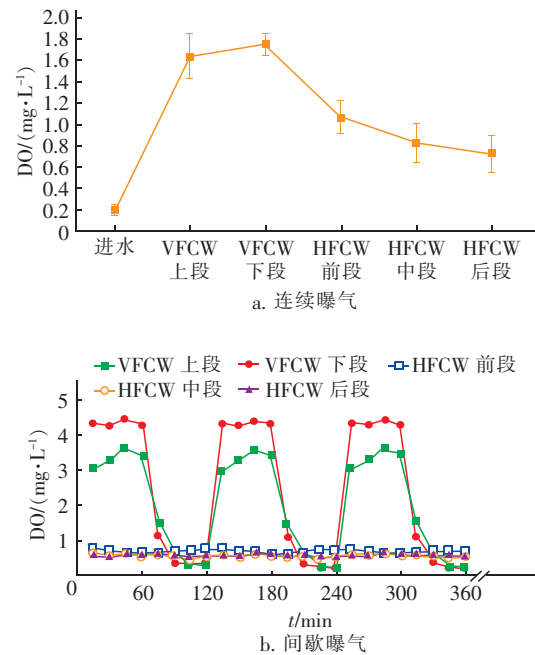


图 2 HCW 系统中 DO 浓度沿程变化

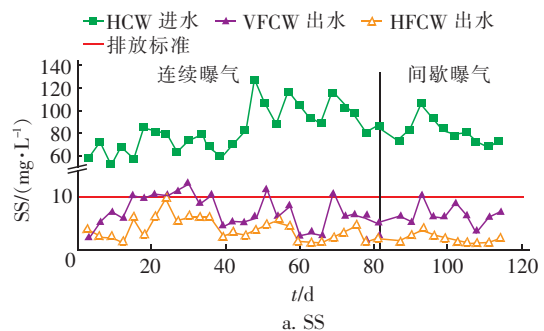
Fig. 2 DO concentration along HCW system

### 2.2 HCW 系统中污染物浓度变化

#### 2.2.1 HCW 系统进出水污染物浓度历时变化

##### ① SS 和 COD 浓度的历时变化

图 3 为 HCW 系统进出水 SS 和 COD 浓度的历时变化。可知,HCW 系统在两种曝气方式下,出水 COD 和 SS 浓度均达到了 GB 18918—2002 的一级 A 标准,但是单级的 VFCW 在两种工况下均不能保障 SS 的达标排放。在连续曝气阶段,HCW 系统出水 SS 和 COD 浓度分别为  $(2.28 \pm 1.48)$ 、 $(23.82 \pm 4.43)$  mg/L,平均去除率分别为 97.7%、88.4%。在间歇曝气阶段,HCW 系统出水 SS 和 COD 浓度分别为  $(1.48 \pm 0.82)$ 、 $(23.32 \pm 2.59)$  mg/L,平均去除率分别为 98.3%、86.4%。两种曝气方式下 HCW 对 SS 和 COD 的去除效果差异较小,表明曝气方式对 HCW 去除 SS 和 COD 的影响较小。



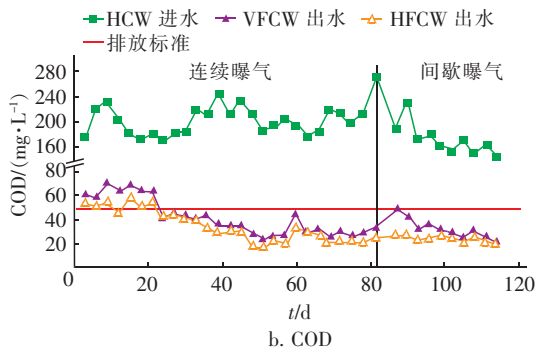


图3 HCW系统进出水SS和COD浓度历时变化

Fig.3 Diachronic variation of SS and COD concentrations in influent and effluent of HCW system

### ② 氮浓度的历时变化

图4为HCW系统进出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN浓度的历时变化。

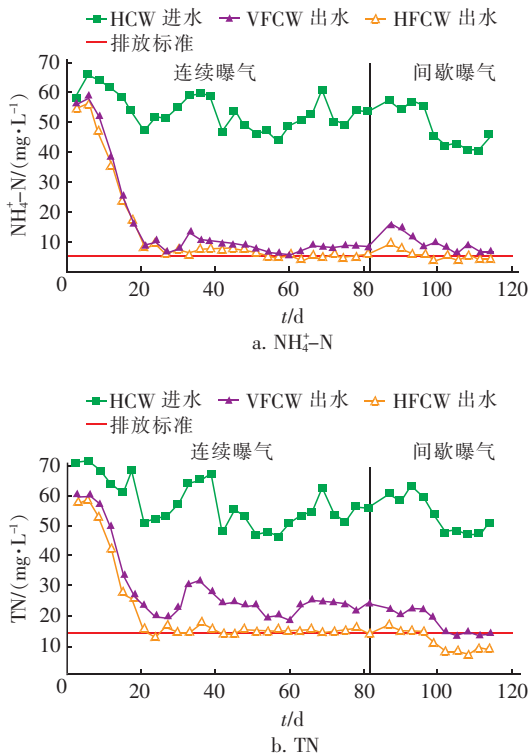


图4 HCW进出水氮浓度历时变化

Fig.4 Diachronic variation of nitrogen concentrations in influent and effluent of HCW system

由图4可知,HCW系统对TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除趋势相似。连续曝气阶段,HCW出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN浓度均值分别为 $(4.22 \pm 0.61)$ 、 $(15.03 \pm 0.46)$  mg/L,平均去除率分别为91.7%、71.7%。尽管如此,TN浓度仍有超标现象。

间歇曝气阶段,HCW系统出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN

浓度均值分别为 $(3.97 \pm 0.80)$ 、 $(8.32 \pm 1.05)$  mg/L,平均去除率分别为89.8%、82.8%。HCW第一级VFCW进行间歇曝气,使其形成如图2(b)所示的好氧/缺氧交替环境,提高了HCW对TN的去除效果。图4表明,在稳定运行后期单级VFCW可以完成TN的达标排放,但不能完成 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的达标排放,经过HCW第二级HFCW的强化去除,最终可以实现对TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的同时高效稳定去除。间歇曝气的HCW从稳定运行的12 d后 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN浓度均可达标。

总之,连续曝气和间歇曝气的HCW系统对TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 均具有较好的去除效果,远高于普通CW对TN的去除<sup>[10-11]</sup>。相比于连续曝气,间歇曝气的HCW可以保障TN的稳定达标排放。

### ③ 磷浓度的历时变化

图5为HCW系统进出水磷浓度的历时变化,可知HCW对TP和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除趋势相似。

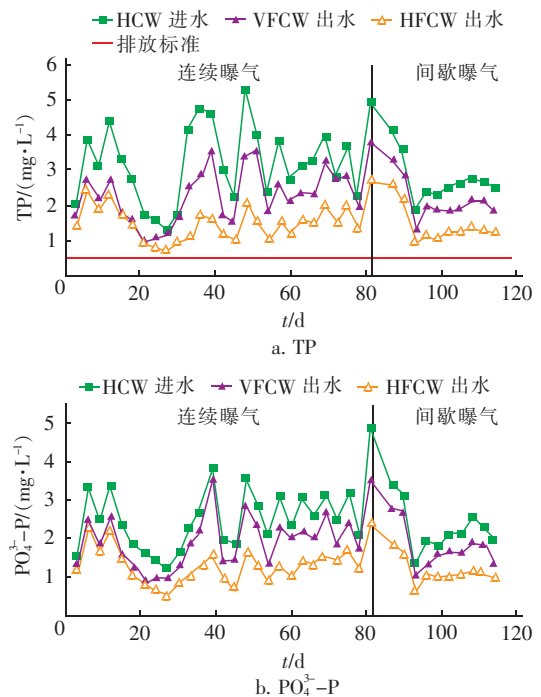


图5 HCW系统进出水磷浓度的历时变化

Fig.5 Diachronic variation of phosphorus concentrations in influent and effluent of HCW system

在连续曝气阶段,HCW出水TP和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度分别为 $(1.62 \pm 0.44)$ 、 $(1.39 \pm 0.38)$  mg/L,平均去除率分别为50.7%、51.8%。在间歇曝气阶段,HCW出水TP和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度分别为 $(1.41 \pm 0.50)$ 、 $(1.12 \pm 0.32)$  mg/L,平均去除率分别为



49.4%、50.8%。总之,无论哪种曝气模式,HCW 对磷的去除率均保持在 50% 左右,这一结果与其他研究者的结果接近,如 Vymazal 总结了 100 座 CW 近 10 年的运行情况,发现其对 TP 的去除率均在 51% 左右<sup>[12]</sup>。

2.2.2 污染物浓度沿程变化及各段的去除贡献率

表 2 为两种曝气方式稳定运行时 HCW 中污染物浓度沿程变化及各段的去除贡献率。可以看出,在两种曝气方式下,HCW 系统中 SS 和 COD 的去除均主要在 VFCW 的上段实现,平均去除率分别为

64.1%、56.2%,并在 VFCW 下段和 HFCW 中进一步去除,这与 Ayaz 等人的研究结果一致<sup>[13]</sup>。与此同时,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的去除也主要集中在 VFCW 上段,平均去除率分别为 74.9%、53.8%、23.8% 和 22.7%。如前所述,VFCW 仅占 HCW 系统总体积的 30%,而仅占 HCW 系统总体积不到 15% 的 VFCW 上段对有机物和氮的平均去除率均高于 50%,对磷的去除量占到总去除量的 40%。因此,VFCW 上段属于 HCW 系统的高效能区,而其余区域则属于水质提升区。

表 2 HCW 系统中污染物浓度沿程变化及各段的去除率

Tab. 2 Pollutants concentration along HCW system and contribution of removal rate of each segment  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目		进水均值	VFCW		HFCW		
			上段浓度	下段浓度	前段浓度	中段浓度	后段浓度
SS	I	106.0	32.5 (66.5%)	12.0 (21.9%)	5.5 (6.1%)	3.5 (2.2%)	3.0 (0.5%)
	II	73.0	28.0 (61.6%)	9.0 (26.1%)	6.0 (4.1%)	2.0 (5.5%)	2.0 (0%)
COD	I	212.7	98.3 (53.8%)	41.3 (26.8%)	24.2 (8.0%)	22.3 (0.9%)	20.0 (1.1%)
	II	177.3	73.6 (58.5%)	34.9 (21.8%)	22.4 (7.1%)	20.9 (0.8%)	19.7 (0.7%)
TN	I	56.2	29.6 (47.2%)	25.4 (7.6%)	18.6 (12.0%)	16.7 (3.4%)	15.6 (1.9%)
	II	51.4	20.4 (60.4%)	16.7 (7.2%)	11.4 (10.3%)	10.7 (1.3%)	10.0 (1.3%)
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	I	53.5	13.3 (75.1%)	10.5 (5.2%)	6.4 (7.7%)	5.2 (2.2%)	4.8 (0.8%)
	II	46.6	11.5 (74.7%)	9.0 (5.6%)	5.4 (7.8%)	4.8 (1.4%)	4.7 (0.2%)
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	I	1.6	15.5	14.7	11.8	10.4	9.9
	II	2.1	8.2	7.5	5.1	5.6	4.8
TP	I	5.2	3.9 (24.7%)	3.7 (4.3%)	3.5 (4.9%)	2.9 (10.1%)	2.6 (5.5%)
	II	2.4	1.9 (22.9%)	1.6 (10.5%)	1.5 (5.9%)	1.4 (4.1%)	1.3 (4.5%)
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	I	4.8	3.7 (23.6%)	3.4 (7.0%)	3.1 (4.9%)	2.6 (10.4%)	2.3 (6.2%)
	II	1.9	1.5 (21.8%)	1.3 (10.3%)	1.2 (4.4%)	1.2 (4.1%)	1.0 (9.9%)

注: 括号内数值为该段对污染物的去除率。

3 结论

① 采用 VFCW 与 HFCW 复合的 HCW 系统处理实际城镇生活污水,在相同的 HLR 和曝气量条件下,连续曝气时系统对 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 COD 的平均去除率分别为 71.7%、91.7% 和 88.4%,相应的出水浓度分别为  $(15.03 \pm 0.46)$ 、 $(4.22 \pm 0.61)$  和  $(23.82 \pm 4.43) \text{ mg/L}$ ;间歇曝气时系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 COD 的平均去除率分别为 89.8%、82.8% 和 86.4%,相应的出水浓度分别为  $(3.97 \pm 0.80)$ 、 $(8.32 \pm 1.05)$  和  $(23.32 \pm 2.59) \text{ mg/L}$ 。因此,在相同条件下 HCW 采用间歇曝气对 TN 的去除率高于连续曝气。

② 采用 VFCW 与 HFCW 复合的 HCW 处理实际生活污水,在 HLR 为  $0.0945 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、HCW 第一级 VFCW 以气水比为 6.5:1 进行间歇曝气时,

出水 COD、SS、TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度均可稳定达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准。其中,VFCW 上段属于复合系统的高效能区,可实现大部分污染物的去除;VFCW 下段和 HFCW 作为复合系统的水质提升区,可使系统中残余污染物得到进一步去除。

参考文献:

[1] 唐晓丹,崔理华,郑离妮,等. 两种人工湿地对农村生活污水的净化效果比较[J]. 中国给水排水,2012,28(23):117-120.  
TANG Xiaodan, CUI Lihua, ZHENG Lini, et al. Comparison between two different integrated constructed wetlands for rural domestic sewage purification [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(23): 117-120 (in Chinese).  
[2] 付新喜,吴晓芙,奚成业,等. 农户型组合人工湿地系

- 统生活污水处理效果分析[J]. 给水排水, 2017, 43(7): 25–30.
- FU Xinxi, WU Xiaofu, XI Chengye, *et al.* Efficiency of rural sewage treatment by a household multiple-cell constructed wetland system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(7): 25–30 (in Chinese).
- [3] 孔令为, 邵卫伟, 梅荣武, 等. 浙江省城镇污水处理厂尾水人工湿地深度提标研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(2): 39–43.
- KONG Lingwei, SHAO Weiwei, MEI Rongwu, *et al.* Study on constructed wetland for advanced treatment of terminal effluent of wastewater treatment plant in Zhejiang Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(2): 39–43 (in Chinese).
- [4] 金立建, 黄凯, 杨华. “治、用、保”模式在农村水环境综合整治中的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 119–122.
- JIN Lijian, HUANG Kai, YANG Hua. Application of control, utilization and protection in the treatment of rural domestic sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(10): 119–122 (in Chinese).
- [5] 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).
- [6] WANG J, TAI Y, YING M, *et al.* Capacity of various single-stage constructed wetlands to treat domestic sewage under optimal temperature in Guangzhou City, South China [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 115: 35–44.
- [7] GAJEWSKA M, SKRZYPIEC K, JOZWIAKOWSKI K, *et al.* Kinetics of pollutants removal in hybrid treatment wetlands—case study comparison [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 222–229.
- [8] AVILA C, PELISSARI C, SEZERINO P H, *et al.* Enhancement of total nitrogen removal through effluent recirculation and fate of PPCPs in a hybrid constructed wetland system treating urban wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584/585: 414–425.
- [9] LI F, LU L, ZHENG X Z, *et al.* Enhanced nitrogen removal in constructed wetlands: effects of dissolved oxygen and step-feeding [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 169(5): 395–402.
- [10] JACOME J A, MOLINA J, SUAREZ J, *et al.* Performance of constructed wetland applied for domestic wastewater treatment: case study at Boimorto (Galicia, Spain) [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 324–329.
- [11] PELISSARI C, AVILA C, TREIN C M, *et al.* Nitrogen transforming bacteria within a full-scale partially saturated vertical subsurface flow constructed wetland treating urban wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 390–399.
- [12] VYMAZAL J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience [J]. *Ecological Engineering*, 2002, 18(5): 633–646.
- [13] AYAZ S C, AKTAS O, AKCA L, *et al.* Effluent quality and reuse potential of domestic wastewater treated in a pilot-scale hybrid constructed wetland system [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 156: 115–120.

作者简介: 闫飞龙 (1994–), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与资源化。

E-mail: yanfeilong@live.xauat.edu.cn

收稿日期: 2020–03–01

修回日期: 2020–04–12

(编辑: 刘贵春)