

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.019

两种潜流人工湿地对二级生化出水的处理效果

雷培树, 李卿, 孙健, 蔡世颜, 陈才高, 万年红
(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 采用垂直潜流和水平潜流两种人工湿地处理武汉某污水厂二级生化出水,研究了不同水力负荷条件下污染物的去除效果,并进行了相关性分析。结果表明,两种湿地对COD、NH₃-N、TN和TP的去除效果无显著性差异。在水力负荷为0.25 m³/(m²·d)条件下,两种湿地对COD和TN的去除效果较好;在水力负荷为1.00 m³/(m²·d)条件下,对NH₃-N和TP的去除效果较好。相关性分析表明,两种湿地的水力负荷与TN去除率呈显著负相关关系,进水浓度在很大程度上影响着湿地的净化效果,同时各水质指标去除率之间存在一定的相关性。

关键词: 人工湿地; 垂直潜流; 水平潜流; 水力负荷; 二级生化出水; 处理效果

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0115-06

Performances of Two Kinds of Subsurface Flow Constructed Wetlands for Treatment of Effluent from Secondary Biochemical Process

LEI Pei-shu, LI Qing, SUN Jian, CAI Shi-yan, CHEN Cai-gao, WAN Nian-hong
(Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: Vertical and horizontal subsurface flow wetlands were applied to treat secondary biochemical effluent from a wastewater treatment plant in Wuhan. The removal effect of pollutants under different hydraulic loads was investigated, and correlation analysis was carried out. There was no significant difference in the removal efficiency of COD, NH₃-N, TN and TP between the two wetlands. Both wetlands had better removal performances of COD and TN when the hydraulic load was 0.25 m³/(m²·d), and better removal performances of NH₃-N and TP were obtained when the hydraulic load was 1.00 m³/(m²·d). The correlation analysis showed that there was a significant negative correlation between hydraulic load and TN removal efficiency in both wetlands. Pollutant concentrations in influent greatly affected the purification performance of the wetlands, and there were significant correlations among the removal efficiencies of water quality indexes.

Key words: constructed wetland; vertical subsurface flow; horizontal subsurface flow; hydraulic load; effluent from secondary biochemical process; removal performance

我国污水处理厂大多执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,处理后的尾水被排入地表水中,成为其重要的补充水源

之一。然而,污水厂排水水质标准与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类或Ⅳ类水还存在一定差异,其中氮、磷等污染物的排放总量依然很

通信作者: 孙健 E-mail: sunjian813@163.com

大^[1-2]。因此,为提高受纳水体的水环境质量,有必要对污水厂尾水进行深度处理。

目前,针对污水厂尾水的深度处理工艺主要有臭氧/活性炭^[3]、生物滤池^[4]、高效沉淀池^[5]、人工湿地^[6-7]等。其中,人工湿地作为一种典型的生态处理技术,具有建设及运行费用低、维护简单、美化环境等优点,在尾水深度处理中得到越来越广泛的应用^[8-9]。人工湿地主要通过物理、化学和生物作用来改善水质,实现对污水中有机物、悬浮物、营养物的去除^[10-12]。

2018年以来,随着《长江保护修复攻坚战行动计划》的颁布,武汉大力推进污水厂提标改造。笔者以武汉某污水厂二沉池出水为研究对象,采用垂直和水平潜流两种人工湿地开展中试,重点考察不同水力负荷下人工湿地的净化效果,旨在为后期人工湿地处理尾水的工程设计和优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 中试装置

试验装置由进水泵、垂直潜流人工湿地(VF)、水平潜流人工湿地(HF)和流量计组成,见图1。

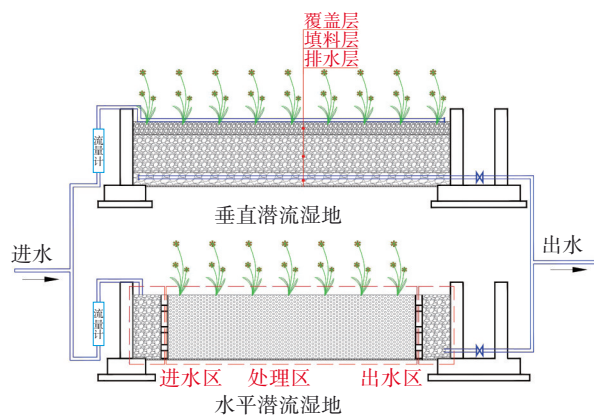


图1 中试装置示意

Fig.1 Schematic diagram of pilot device

两种湿地的尺寸(长×宽×高)为5 m×2 m×1.1 m,种植植物为再力花(10株/m²)。垂直潜流人工湿地从上向下依次布置覆盖层(粒径为5~10 mm砂土,厚度为0.2 m)、填料层(粒径为10~20 mm砂土,厚度为0.5 m)和排水层(粒径为20~30 mm砾石,厚度为0.2 m),进水经过平铺在基质上方的配水管垂直向下通过湿地基质,并经由铺设在湿地底部的集水管收集后排入出水槽。水平潜流人工湿地的基质从进水端沿床体纵向依次布置进水区(粒径为

20~30 mm砾石,长度为0.5 m)、处理区(粒径为10~20 mm砾石,长度为4 m)和出水区(粒径为20~30 mm砾石,厚度为0.5 m),原水从进水区进入,经过处理区,从出水区出水墙进入出水槽。试验原水为污水厂二级生化出水,其COD≤141 mg/L、TN≤9.18 mg/L、NH₃-N≤0.25 mg/L、TP≤6.23 mg/L。

1.2 试验方法

待湿地系统运行稳定后开始试验,持续时间为133 d(5月—9月)。潜流湿地系统在一定水力负荷条件下连续运行7 d后,调节进水阀门,使湿地系统在另一个水力负荷条件下运行,并再次连续运行7 d,然后调节进水阀门,使湿地系统在下一个水力负荷条件下运行,直到所设计的4个水力负荷循环运行完成一次后,再进入下一次的循环运行,具体运行参数见表1。

表1 湿地系统运行参数

Tab.1 Operating parameters of wetland system

湿地类型	流量调节 时间/d	水力负荷/ (m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	流量/(L·h ⁻¹)
水平潜流 湿地	7	0.25(A)、0.50(B)、 0.75(C)、1.00(D)	104(A)、208(B)、 313(C)、412(D)
垂直潜流 湿地	7	0.25(A)、0.50(B)、 0.75(C)、1.00(D)	104(A)、208(B)、 313(C)、412(D)

每次调节进水阀门前,对每种湿地的出水进行采样分析(COD、TP、TN和NH₃-N),其中COD采用重铬酸钾氧化法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,NH₃-N采用纳氏试剂比色法测定。垂直潜流人工湿地和水平潜流人工湿地净化效果的差异采用SPASS 23.0软件One-way ANOVA进行统计分析,显著水平设定为P<0.05;Pearson相关系数用来分析水力负荷、进水浓度与各水质指标去除率之间的关系。

2 结果与讨论

2.1 对COD的去除效果

人工湿地对有机物的去除主要通过微生物和植物根系等作用^[13]。试验期间,水平潜流湿地的出水COD浓度为0.8~20.7 mg/L,垂直潜流湿地的出水COD浓度为0.7~18 mg/L(见图2)。两种湿地的出水COD除在第7天($F=13.845$, $P<0.05$)、第14天($F=106.600$, $P<0.05$)、第21天($F=31.802$, $P<0.05$)、第105天($F=13.091$, $P<0.05$)和第112天

($F=10.922, P<0.05$)存在显著差异外,其他时间内无明显差异。二沉池出水流经水平潜流湿地时,水力负荷为 $0.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水COD为 $0.8\sim 20.7 \text{ mg/L}$,平均去除率为72.78%;水力负荷为 $0.50 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水COD为 $6.7\sim 11.7 \text{ mg/L}$,平均去除率为72.57%;水力负荷为 $0.75 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水COD为 $2.7\sim 8.3 \text{ mg/L}$,平均去除率为64.91%;水力负荷为 $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水COD为 $4\sim 17.3 \text{ mg/L}$,平均去除率为53.04%。对比发现,在水力负荷为 0.25 和 $0.50 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 条件下,系统对COD的去除效果较好。当流经垂直潜流湿地时,水力负荷为 $0.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水COD为 $0.7\sim 17.33 \text{ mg/L}$,平均去除率为71.98%;水力负荷为 $0.50 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水COD为 $7\sim 18 \text{ mg/L}$,平均去除率为65.49%;水力负荷为 $0.75 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水COD为 $5.33\sim 9.67 \text{ mg/L}$,平均去除率为55.08%;水力负荷为 $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水COD为 $4.33\sim 12.67 \text{ mg/L}$,平均去除率为69.74%。可见,当水力负荷为 $0.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时对COD的去除效果较好。低水力负荷条件下,水体在湿地的停留时间越长越有利于去除有机物。

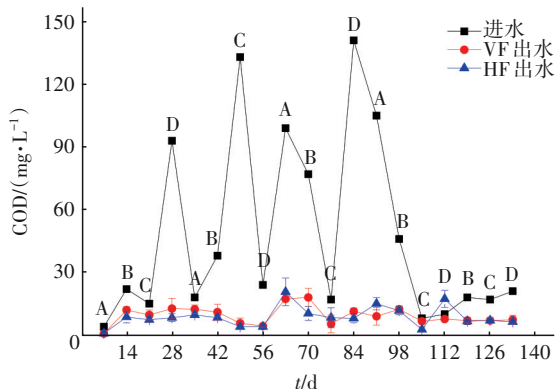


图2 潜流湿地出水COD的变化

Fig.2 Changes of COD concentration in effluent from subsurface wetlands

2.2 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果

水体中去除氨氮的方法主要有两种:①通过硝化作用将氨氮转变为硝酸盐;②作为营养元素被水生植物吸收。水平潜流湿地的出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 $0.01\sim 0.5 \text{ mg/L}$,垂直潜流湿地为 $0.03\sim 0.44 \text{ mg/L}$ (见图3)。垂直潜流湿地的出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在第70天、第84天和第105天显著高于水平潜流湿地(第70天: $F=10.000, P<0.05$;第84天: $F=8.000, P<0.05$;第105天: $F=9.031, P<0.05$),在第21天显著低于水

平潜流湿地($F=36.029, P<0.05$),而在其他时间内无明显差异。垂直潜流湿地处理二沉池出水时,水力负荷为 $0.25, 0.50, 0.75$ 和 $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别为 $0.03\sim 0.44, 0.04\sim 0.16, 0.04\sim 0.15$ 和 $0.03\sim 0.28 \text{ mg/L}$,平均去除率分别为50.11%、46.29%、40.38%和75.09%。因此,垂直潜流湿地在水力负荷为 $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 下运行时对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果较好。二沉池出水流经水平潜流湿地时,水力负荷为 $0.25, 0.50, 0.75$ 和 $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度分别为 $0.01\sim 0.50, 0.03\sim 0.18, 0.03\sim 0.25$ 和 $0.02\sim 0.08 \text{ mg/L}$,平均去除率分别为59.19%、48.29%、52.60%和83.13%。可见,水平潜流湿地在水力负荷为 $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 下运行时对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果较好。

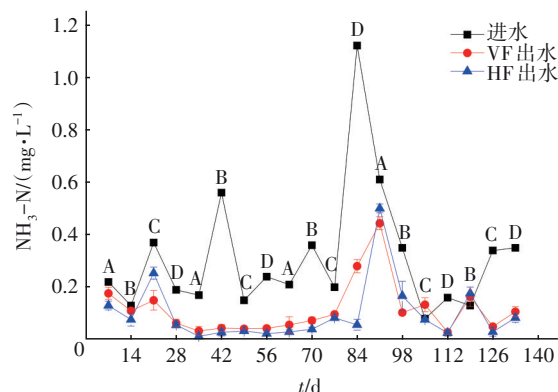


图3 潜流湿地出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的变化

Fig.3 Changes of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in effluent from subsurface wetlands

2.3 对TN的去除效果

人工湿地对TN的去除主要通过微生物反硝化作用。水平潜流湿地的出水TN浓度为 $0.37\sim 5.12 \text{ mg/L}$,垂直潜流湿地为 $0.37\sim 5.25 \text{ mg/L}$ (见图4)。垂直潜流湿地的出水TN在第70天和第98天显著高于水平潜流湿地(第70天: $F=44.566, P<0.05$;第98天: $F=16.372, P<0.05$),第7天显著低于水平潜流湿地($F=8.106, P<0.05$),其他时间无明显差异。采用垂直潜流湿地处理二沉池出水时,水力负荷为 $0.25, 0.50, 0.75$ 和 $1.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的出水TN浓度分别为 $0.45\sim 1.99, 0.37\sim 3.14, 1.09\sim 4.50$ 和 $1.41\sim 5.25 \text{ mg/L}$,平均去除率分别为69.01%、46.11%、42.31%和45.09%。可见,垂直潜流湿地在水力负荷为 $0.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 条件下运行时对TN的去除效果较好。二沉池出水流经水平潜流湿地时,水力负

荷为 0.25、0.50、0.75 和 1.00 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的出水 TN 浓度分别为 0.66~2.75、0.37~2.29、1.01~4.80 和 1.23~5.12 mg/L , 平均去除率分别为 60.86%、54.10%、43.10% 和 46.90%。可见, 水平潜流湿地在水力负荷为 0.25 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 条件下运行时对 TN 的去除效果较好。

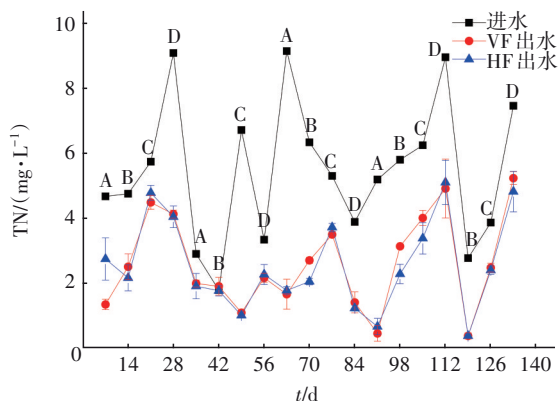


图4 潜流湿地出水 TN 浓度的变化

Fig.4 Changes of TN concentration in effluent from subsurface wetlands

2.4 对 TP 的去除效果

人工湿地主要通过两种途径去除水体中的磷: ①基质及附着的微生物对磷的吸附、沉淀、吸收作用; ②湿地植物对磷的吸收和转化^[14]。水平潜流湿地的出水 TP 浓度为 0.12~0.31 mg/L , 垂直潜流湿地为 0.13~0.32 mg/L , 如图 5 所示, 二者出水 TP 不具有显著性差异 ($P>0.05$)。

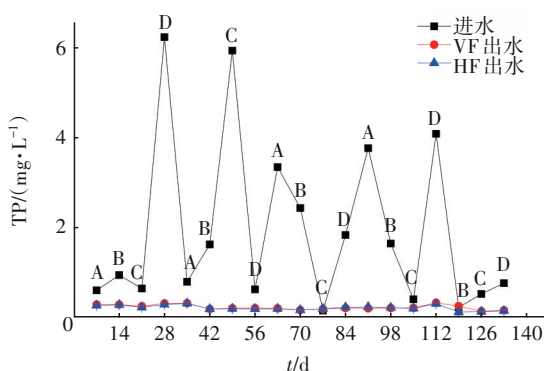


图5 潜流湿地出水 TP 浓度的变化

Fig.5 Changes of TP concentration in effluent from subsurface wetlands

垂直潜流湿地处理二沉池出水时, 水力负荷为 0.25、0.50、0.75 和 1.00 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的出水 TP 浓度分别为 0.20~0.31、0.16~0.28、0.13~0.25 和 0.16~0.32 mg/L , 平均去除率分别为 75.31%、65.12%、

51.09% 和 84.37%。可见, 垂直潜流湿地在水力负荷为 1.00 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 条件下运行时对 TP 的去除效果较好。二沉池出水流经水平潜流湿地时, 水力负荷为 0.25、0.50、0.75 和 1.00 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的出水 TP 浓度分别为 0.19~0.31、0.12~0.28、0.13~0.22 和 0.14~0.30 mg/L , 平均去除率分别为 76.27%、77.30%、52.43% 和 85.37%。可见, 水平潜流湿地在水力负荷为 1.00 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 条件下运行时对 TP 的去除效果较好。

综上所述, 两种湿地对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除效果无显著差异, 原因可能是水平和垂直潜流湿地基质深度和植物种植密度相同, 导致湿地内氧分布和微生物种群一致, 对污染物的去除差异不明显。低水力负荷 [0.25 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$] 条件下, 两种湿地对 COD 和 TN 的去除效果较好, 在高水力负荷 [1.00 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$] 条件下, 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 的去除效果较好。低水力负荷下, 水体在湿地的停留时间较长, 有利于有机物的充分降解和反硝化作用的进行^[15]; 而在高水力负荷下, 水力停留时间较短, 一方面基质可以对磷进行快速吸附, 另一方面湿地内不容易形成厌氧条件, 不会导致微生物厌氧释磷, 因对磷的去除率较高。

2.5 水质指标与水力负荷相关性分析

为探究水质指标与水力负荷之间的关系, 利用 Pearson 进行相关性分析, 结果如表 2 和表 3 所示。可以看出, 垂直和水平潜流湿地的水力负荷与 TN 去除率呈显著负相关, 这与上述结果一致。两种湿地的进水 COD 浓度与 COD 去除率、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率、TN 去除率和 TP 去除率呈显著正相关, 进水 TN 浓度与 TN 去除率和 TP 去除率呈显著正相关; 垂直潜流湿地的进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD 去除率、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率和 TP 去除率呈显著正相关, 进水 TP 浓度与 COD 去除率、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率、TN 去除率和 TP 去除率呈显著正相关; 水平潜流湿地的进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 COD 去除率和 TP 去除率呈显著正相关, 进水 TP 浓度与 TN 去除率和 TP 去除率呈显著正相关, 说明进水浓度很大程度上影响着湿地的净化效果。垂直潜流湿地的 COD 去除率与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率、TN 去除率、TP 去除率呈显著正相关, 这可能与湿地微生物脱氮除磷需要消耗的能量有关。垂直和水平潜流湿地的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率与 TN 去除率呈显著负相关, 与 TP 去除率呈显著正相关。

表 2 垂直潜流湿地各指标去除率和水力负荷的相关性系数

Tab.2 Correlation coefficient between removal rate of water quality indexes and hydraulic load of vertical subsurface flow wetland

项 目	水力负荷	进水 COD	进水 NH ₃ -N	进水 TN	进水 TP	COD 去除率	NH ₃ -N 去除率	TN 去除率	TP 去除率
水力负荷	1.000	0.220	0.122	0.256	0.130	-0.021	0.171	-0.297*	0.056
进水 COD	0.220	1.000	0.522**	0.266*	0.705**	0.672**	0.282*	0.512**	0.546**
进水 NH ₃ -N	0.122	0.522**	1.000	-0.284*	0.003	0.422**	0.309*	-0.009	0.331*
进水 TN	0.256	0.266*	-0.284*	1.000	0.615**	0.096	0.071	0.268*	0.362**
进水 TP	0.130	0.705**	0.003	0.615*	1.000	0.419**	0.285*	0.416**	0.609**
COD 去除率	-0.021	0.672**	0.422**	0.096	0.419**	1.000	0.455**	0.281*	0.410**
NH ₃ -N 去除率	0.171	0.282*	0.309*	0.071	0.285*	0.455**	1.000	-0.266*	0.483**
TN 去除率	-0.297*	0.512**	-0.009	0.268*	0.416**	0.281*	-0.266*	1.000	0.039
TP 去除率	0.056	0.546**	0.331*	0.362**	0.609**	0.410**	0.483**	0.039	1.000

注： *表示在 0.05 水平相关性显著;**表示在 0.01 水平相关性显著。

表 3 水平潜流湿地各指标去除率和水力负荷的相关性系数

Tab.3 Correlation coefficient between removal rate of water quality indexes and hydraulic load of horizontal subsurface flow wetland

项 目	水力负荷	进水 COD	进水 NH ₃ -N	进水 TN	进水 TP	COD 去除率	NH ₃ -N 去除率	TN 去除率	TP 去除率
水力负荷	1.000	0.022	0.122	0.256	0.130	-0.197	0.252	-0.281*	0.014
进水 COD	0.022	1.000	0.522**	0.266*	0.705**	0.462**	0.269*	0.592**	0.511**
进水 NH ₃ -N	0.122	0.522**	1.000	-0.284*	0.003	0.277*	0.248	0.035	0.282*
进水 TN	0.256	0.266*	-0.284*	1.000	0.615**	-0.229	0.105	0.280*	0.279*
进水 TP	0.130	0.705**	0.003	0.615**	1.000	0.023	0.233	0.446**	0.586*
COD 去除率	-0.197	0.462**	0.277*	-0.229	0.023	1.000	-0.044	0.242	0.098
NH ₃ -N 去除率	0.252	0.269*	0.248	0.105	0.233	-0.044	1.000	-0.288*	0.318*
TN 去除率	-0.281*	0.592**	0.035	0.280*	0.446**	0.242	-0.288*	1.000	0.255
TP 去除率	0.014	0.511**	0.282*	0.279*	0.586*	0.098	0.318*	0.255	1.000

注： *表示在 0.05 水平相关性显著;**表示在 0.01 水平相关性显著。

3 结 论

① 在相同水力负荷下两种湿地对二级生化出水中 COD、NH₃-N、TN、TP 的去除效果无显著差异。

② 在低水力负荷[0.25 m³/(m²·d)]条件下,垂直潜流湿地对 COD 和 TN 的去除率分别达到 71.98% 和 69.01%,水平潜流湿地对 COD 和 TN 的去除率分别达到 72.78% 和 60.86%;在高水力负荷[1.00 m³/(m²·d)]条件下,垂直潜流湿地对 NH₃-N 和 TP 的去除率分别达到 75.09% 和 84.37%,水平潜流湿地对 NH₃-N 和 TP 的去除率分别达到 83.13% 和 85.37%。低水力负荷条件有利于有机物的充分降解和反硝化作用的进行,而高水力负荷可以缓解微生物厌氧释磷。

③ Pearson 相关性分析表明,两种湿地的水力负荷与 TN 去除率呈显著负相关,进水浓度与水质指标去除率以及各水质指标去除率之间存在一定的相关性。

参考文献:

[1] 邵志昌,王长平,黄孟斌,等. 老旧水厂深度处理改造工程实践[J]. 中国给水排水, 2018, 34 (2): 81-85.

SHAO Zhichang, WANG Changping, HUANG Mengbin, *et al.* Reconstruction practice of advanced treatment process in an aging waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (2): 81-85 (in Chinese).

[2] WANG C H, HE R, WU Y, *et al.* Bioavailable

- phosphorus (P) reduction is less than mobile P immobilization in lake sediment for eutrophication control by inactivating agents [J]. *Water Research*, 2017, 109: 196–206.
- [3] CHUANG Y H, SZCZUKA A, SHABANI F, *et al.* Pilot-scale comparison of microfiltration/reverse osmosis and ozone/biological activated carbon with UV/hydrogen peroxide or UV/free chlorine AOP treatment for controlling disinfection byproducts during wastewater reuse[J]. *Water Research*, 2019, 152: 215–225.
- [4] 何翔. 深度处理技术用于北京某污水处理厂升级改造[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(8): 80–84.
HE Xiang. Application of advanced treatment technology in the upgrading project of an existing wastewater treatment plant in Beijing [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(8): 80–84(in Chinese).
- [5] 王阳, 张月, 王晓康, 等. 高排放标准下的改良AAO+深度处理工程案例[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(18): 56–59.
WANG Yang, ZHANG Yue, WANG Xiaokang, *et al.* Project case of modified AAO and advanced treatment process under high emission standards[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(18): 56–59(in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 钱静, 高守有. 高标准污水处理厂提标改造工程的设计与调试运行[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(8): 29–32.
QIAN Jing, GAO Shouyou. Design, commissioning and operation of high-standard upgrading and reconstruction project of wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(8): 29–32(in Chinese).
- [8] 戴杨叶. 某城市污水处理厂二级出水的人工湿地深度处理运行效果分析[J]. *净水技术*, 2018, 37(4): 96–100.
DAI Yangye. Operation effect analysis of advanced treatment by constructed wetland for secondary effluent in a municipal wastewater treatment plant [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(4): 96–100 (in Chinese).
- [9] 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, 104.
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, 104(in Chinese).
- [10] BAI Y H, LIAN J S, LIU R P, *et al.* Metagenomic analysis reveals microbial diversity and function in the rhizosphere soil of a constructed wetland [J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(20): 2521–2527.
- [11] 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).
- [12] VYMAZAL J. Constructed wetlands for wastewater treatment [J]. *Encyclopedia of Ecology*, 2019, 25(5): 475–477.
- [13] VYMAZAL J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: a review of a recent development [J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 4795–4811.
- [14] 王翔, 朱召军, 尹敏敏, 等. 组合人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(6): 97–101.
WANG Xiang, ZHU Zhaojun, YIN Minmin, *et al.* Application of hybrid constructed wetland in tail water treatment of municipal sewage plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(6): 97–101 (in Chinese).
- [15] HU Y, HE F, WANG L, *et al.* The fate of ammonium in integrated vertical-flow constructed wetlands using stable isotope technique [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25(3): 1–6.

作者简介:雷培树(1974–),男,湖北仙桃人,大学本科,高级工程师,从事给排水科研和设计工作。

E-mail:13100714777@163.com

收稿日期:2020-12-27

修回日期:2021-01-08

(编辑:任莹莹)