

复合垂直流人工湿地处理生活污水的试验研究

范 英 宏^{1,2}

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司 节能环保环卫研究所,北京 100081;
2.北京中铁科节能环保新技术有限公司,北京 100081)

摘 要:通过小试系统进行了复合垂直流人工湿地处理生活污水的试验研究,分析了水力负荷、进水溶解氧等因素对污水处理效果的影响.试验结果表明,随着水力负荷降低,化学需氧量、总氮、氨氮的去除率显著提高,总磷的去除率随着水力负荷降低而提高,但当水力负荷降低到 100 mm/d 以后总磷的去除率反而降低.湿地系统进水溶解氧浓度对化学需氧量和总磷的去除效果影响不大,但对总氮和氨氮去除效果影响显著,随着溶解氧浓度的增加,总氮和氨氮的去除率显著提高.湿地系统对化学需氧量和总磷的去除作用主要发生在第一级下向流湿地,而对总氮和氨氮的去除作用则在整个湿地系统两级湿地中连续进行.试验结果表明,通过优化湿地系统结构、水力负荷及曝气等条件,可以增强湿地系统的污水净化效果,用于处理铁路中小站区生活污水是可行的.

关键词:人工湿地;复合垂直流;化学需氧量;总氮;总磷;氨氮

中图分类号:X505 **文献标志码:**A

Experimental study on the treatment of sewage by hybrid vertical constructed wetland

FAN Yinghong^{1,2}

(1.Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health Research Institute,
China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081,China;
2. Energy Saving and Environmental Protection New Technology Co., Ltd., CARS, Beijing 100081,China)

Abstract: The influential factors of sewage treatment efficiency caused by hydraulic loading and inlet dissolved oxygen are analyzed through an experimental study on the hybrid vertical-flow wetland by a preliminarily system. The research results show that the removal rate of the chemical oxygen demand, total nitrogen and ammonia nitrogen significantly increase with the decrease of the hydraulic loading. The removal rate of the total phosphorus increases with the decrease of hydraulic loading. When the hydraulic loading is lower than 100 mm/d, the removal rate of the total phosphorus decreases with the decreasing hydraulic loading. The dissolved oxygen shows no obvious influence on the removal efficiency of the chemical oxygen demand and the total phosphorus, but shows great influence on the removal efficiency of the total nitrogen and ammonia nitrogen,

收稿日期:2018-05-02
基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2016Z002-A)
Foundation item: Science and Technology Research and Development Key Program of China Railway Corporation(2016Z002-A)
第一作者:范英宏(1979—),女,河北邢台人,副研究员,博士.研究方向为水污染防治及尘毒污染治理技术.email:fyh_bj@163.com.
引用格式:范英宏. 复合垂直流人工湿地处理生活污水的试验研究[J].北京交通大学学报, 2018, 42(6): 41—47.
FAN Yinghong.Experimetal study on the treatment of sewage by hybrid vertical constructed wetland [J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 41—47.(in Chinese)

the removal efficiency of which increases significantly with the increase of dissolved oxygen concentration. The results also show that in the wetland system, the removal of the chemical oxygen demand and the total phosphorus mainly occur in the first stage of down-flow wetland, and the removal of the total nitrogen and ammonia nitrogen occur in two stages continuously. The test results show that by optimizing the wetland system structure, hydraulic loading and aeration, the purification effect of the wetland system could be enhanced. Therefore, the hybrid vertical constructed wetland is feasible for the treatment of the sewage in the small and medium-sized railway station.

Keywords: constructed wetland; hybrid vertical flow; chemical oxygen demand (COD); total nitrogen(TN);total phosphorus(TP);ammonia nitrogen

人工湿地由于处理污水效果好、氮磷去除能力强、费用低及对负荷变化适应性强等优点,已经成为应用前景较好的污水处理技术之一^[1].人工湿地可分为表面流、水平潜流和垂直潜流等几种形式,其中垂直潜流人工湿地由于具有较强的输氧能力、较好的水力负荷且在任何季节下都保持较好的污染物去除效果等优点而备受关注^[2-5].其中垂直向上流和垂直向下流是垂直流人工湿地 2 种最常见的形式,但单级人工湿地不能同时提供好氧和厌氧的环境而对氮、磷的去除难以达到较高水平^[6-7],复合人工湿地可以使单级人工湿地优势互补,从而增强污水的净化效果^[5,8-11].复合垂直流人工湿地的地表无积水,大部分面积接近中生环境,适合更多植物种类的的生长,从而处理污水效果更好^[12-14].

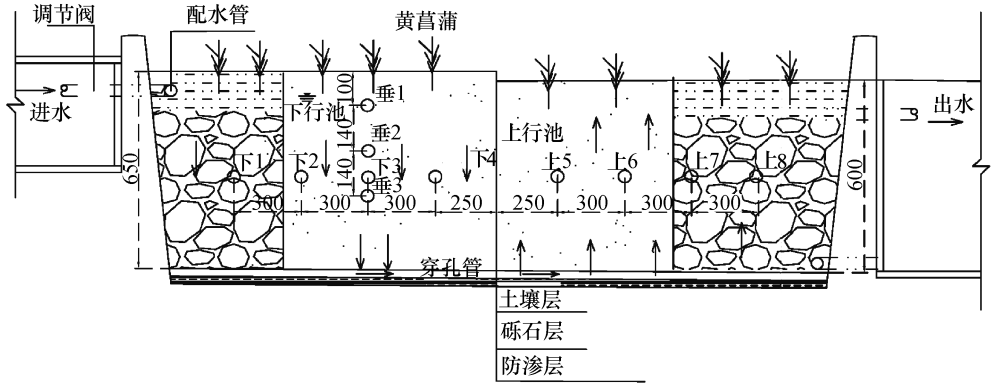
当前针对湿地的研究多是在实验室内从水力负荷、基质、植物等对污染物去除效果的影响方面来开展模拟试验工作,而很少有通过建立人工湿地系统对沿程污染物的去除规律进行系统研究.本文作者建立小型复合垂直流人工湿地系统,进行生活污水处理试验,通过探讨不同水力负荷、进水溶解氧等条件下湿地对污染物的去除效果,再结合污染物在复合垂直流人工湿地系统中沿程降解规律,探讨影响

湿地系统中对不同污染物去除的影响机理,以期为后续铁路中小站区生活污水提供参考依据.

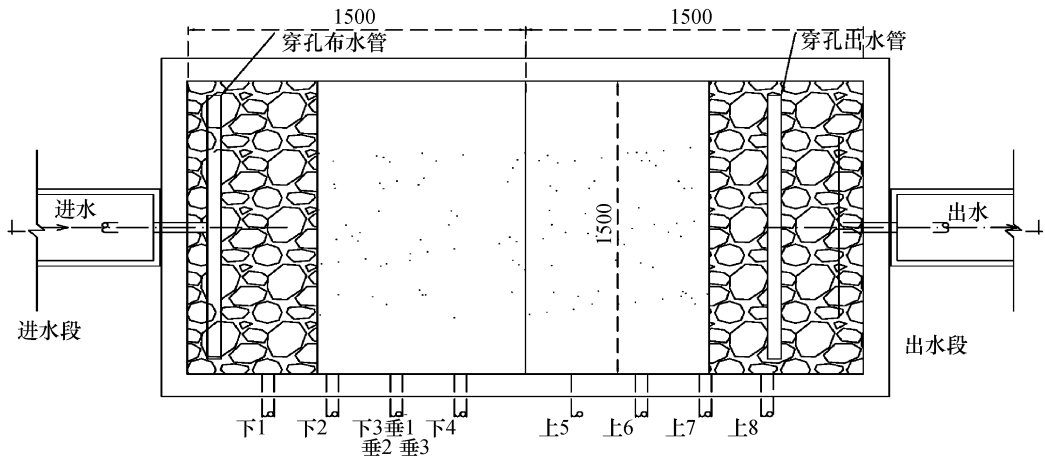
1 材料与方法

1.1 试验装置及数据采集点设置

为进行本次研究,在铁科院怀柔基地建成了平面净尺寸为 3.0 m×1.5 m 的湿地系统,系统前后方向分为下行池和上行池 2 个床体,池体采用砖混结构,做防渗处理,种植黄菖蒲.上下行池的表面尺寸分别为 1.5 m×1.5 m,下行池深为 650 mm,上行池深为 600 mm,两池中间设有隔墙,底部连通.系统进水采用 DN50 mm 穿孔管布水,出水采用侧孔出水.湿地床体基质选用砾石,孔隙率为 0.4,湿地系统种植黄菖蒲,种植密度为 16 株/m².湿地系统试验装置示意图如图 1 所示.采集进水池、第一级下向流湿地(即下行池的下 1、下 2、下 3、下 4 采样口)和第二级上向流湿地(即上行池的上 5、上 6、上 7、上 8 采样口)的水样;采样频率为 1 次/周.采集的水样采用标准方法测定化学需氧量、总氮、氨氮和总磷等水质指标.在进水池和垂 1、垂 2 和垂 3 采样口设置在线溶解氧测定仪测定溶解氧浓度.



(a) 湿地系统试验装置剖面图



(b)湿地系统试验装置平面图

图 1 湿地系统试验装置示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of the experimental wetland system(unit:mm)

1.2 试验用水

采用铁科院怀柔某生产基地生活污水,生活污水量比较小,水质水量波动比较大,水质水量特征与铁路中小站区生活污水比较类似.试验中将污水抽至 2 m³ 的蓄水池,运行方式为连续流.试验系统稳定运行 6 个月之后开始进行试验,控制进水流量为 0.23~1.4 m³/d,水力停留时间分别为 0.8~4.7 d,水力负荷分别为 50、100、200 和 300 mm/d.

1.3 测试指标

水样测定指标为化学需氧量(COD)、总氮(TN)、氨氮和总磷(TP)等.水样溶解氧采用在线测定;化学需氧量采用化学需氧量测定仪;总氮采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;总磷采用钼酸铵分光光度法测定^[15].

1.4 数据处理

污染物质的去除率=(1-C_进/C_出)×100%.

2 试验结果与分析

2.1 复合垂直流人工湿地对污染物的去除效果

在进水溶解氧浓度为 4 mg/L,水力负荷为 200 mm/d的条件下,复合垂直流湿地系统对污染物的去除效果如表 1 所示.由表 1 可知,湿地系统对化学需氧量和总磷的去除效果比较明显,对总氮和氨氮的去除效果不是特别理想.这可能是由于进水的化学需氧量和总氮的比值较低,而且总氮中的氮大多数以氨氮形式存在,溶解氧不能满足氨氮的硝化反应,且化学需氧量不足以满足硝化反硝化过程生物的需要.

表 1 污染物去除效果

Tab.1 Removal efficiency of the pollutants

水质指标	进水/(mg/L)	进水平均值/(mg/L)	出水/(mg/L)	出水平均值/(mg/L)	去除率/%	平均去除率/%
化学需氧量	52.27~146.30	94.47±23.91	5.24~23.79	21.10±11.39	78.78~92.79	77.57±10.46
总氮	40.25~77.67	49.13±10.31	16.40~38.17	29.38±10.98	31.09~68.97	43.30±10.53
氨氮	38.37~50.57	41.58±4.83	15.32~30.43	22.76±5.62	39.73~71.28	45.45±11.26
总磷	0.33~3.24	1.81±0.60	0.08~0.47	0.19±0.13	63.24~99.67	89.62±8.72

2.2 水力负荷对污染物去除效果的影响

水力负荷对化学需氧量、总氮、氨氮和总磷的去除效果的影响如图 2 所示.由图 2 可知,湿地系统在水力负荷为 300、200、100 和 50 mm/d 的条件下对化学需氧量的平均去除率分别为 71.66%±3.80%、75.28%±7.92%、85.89%±8.01%和 92.43%±4.73%.可见湿地系统对化学需氧量即有机物的去除效果随水力负荷的降低而有显著提高.这是由于湿地系统中大部分有机物首先被植物根际和填料表面的生物膜吸附,继而被微生物逐步降解.随着水力

负荷的升高,部分吸附在生物膜表面的有机物来不及被降解即随出水带出,故使化学需氧量的去除率下降^[16].

在水力负荷为 300、200、100 和 50 mm/d 条件下,湿地系统对总氮的平均去除率分别为 36.41%±6.31%、48.36%±5.47%、52.12%±3.47%和 61.38%±2.92%,对氨氮平均去除率为 30.50%±5.90%、39.58%±5.50%、45.66%±5.29%和 55.95%±4.53%.随着水力负荷的降低,湿地对总氮和氨氮的去除率有显著的提高,这与其他人的研

究结果比较一致^[17-18].这是因为在垂直流湿地系统中硝化、反硝化作用是氮去除的重要环节,较低的水力负荷使基质可以快速复氧,有利于硝化与反硝化,使出水总氮和氨氮浓度较低;而水力负荷大时,水力停留时间短,微生物的硝化和反硝化作用时间不够,故出水总氮和氨氮浓度较高^[19].

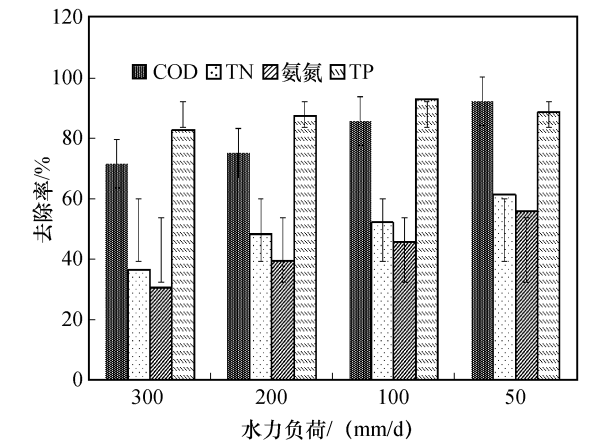


图 2 水力负荷对化学需氧量、总氮、氨氮和总磷的去除效果的影响

Fig.2 Influence of hydraulic loading on the removal efficiency of the chemical oxygen demand, total nitrogen, ammonia nitrogen and the total phosphorous

在水力负荷分别为 300、200、100 和 50 mm/d 的条件下,湿地系统对总磷的平均去除率分别为 $82.92\% \pm 4.30\%$ 、 $87.52\% \pm 4.10\%$ 、 $93.24\% \pm 3.58\%$ 和 $88.72\% \pm 4.72\%$.有研究表明,水力负荷越低,湿地对总磷的去除效果越好^[20].由于湿地系统中总磷的去除主要是通过基质的吸附作用和沉降作用来实现的^[21-22],力负荷过大造成污水的流速过大,产生较大的水流冲击,将填料表面及植物根部吸附的磷冲走,造成出水总磷浓度升高,影响净化效果.湿地对总磷的去除有一个比较适合的水力负荷,低于或高于此值都会对总磷的去除产生不利影响^[23-24],本文作者研究表明,在水力负荷为 100 mm/d 的条件下,对总磷的去处效果最好,这与凌祯等^[23]的研究结果比较接近.

2.3 进水溶解氧对污染物去除效果的影响

在水力负荷为 100 mm/d 的条件下,通过对湿地进水进行曝气,探讨溶解氧对污染物去除效果的影响.图 3 为溶解氧对污染物去除效果的影响.由图 3 可知,溶解氧对化学需氧量和总磷去除率影响不大,而对总氮和氨氮的去除率影响比较显著.湿地系统对总氮和氨氮的去除过程十分复杂,主要有挥发作用、氨化作用、硝化作用、反硝化作用、植物吸收、厌氧氨化等^[6,14].为了探讨湿地系统对总氮和氨氮的去除机理,

在进水溶解氧浓度分别为 2、4 和 6 mg/L 的条件下测定了第一级下向流湿地中垂直方向溶解氧的浓度(见表 2).可知,随着进水溶解氧浓度的升高,第一级下向流湿地表层水中溶解氧浓度升高,有利于硝化反应的发生,随着水流向下流动,溶解氧浓度逐渐降低,有利于进行反硝化作用.提高进水的溶解氧,为硝化过程的发生创造了良好的条件,随着水流在湿地系统中的运行,逐渐发生反硝化过程从而去除总氮.夏艳阳等^[25]的研究也表明,硝化过程需要有一定的溶解氧水平,湿地系统氧充足条件下硝化过程才能顺利进行,对总氮的去除效果明显提高,这与本试验结果一致.在本试验过程中,进水中的总氮主要以氨氮的形式存在,而氨氮在湿地系统的去除主要有挥发、基质吸附和氨化作用转化为硝态氮.实际上当湿地系统 $pH < 8.5$ 时,氨氮挥发可以忽略,因此,除了硝化和反硝化作用外,本系统氨氮的去除过程中填料的过滤和沉淀作用也是比较重要的.

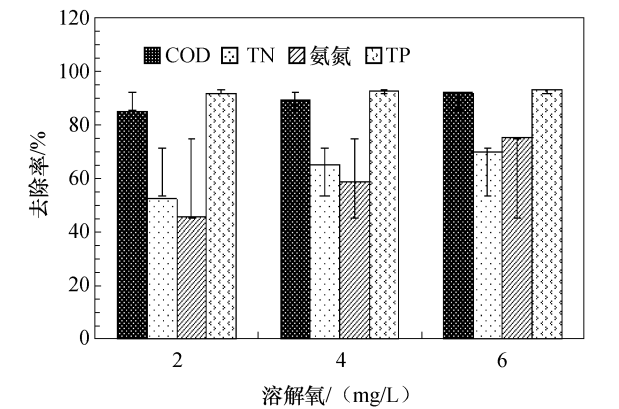


图 3 溶解氧对污染物去除效果的影响
Fig.3 Influence of dissolve oxygen on removal efficiency of pollutants

表 2 不同进水溶解氧浓度条件下湿地系统中溶解氧浓度垂向变化

oxygen concentration inflow mg/L			
进水溶解氧 (DO)	湿地溶解氧 (DO)		
	垂 1 采样口	垂 2 采样口	垂 3 采样口
2	0.50	0.36	0.25
4	0.76	0.48	0.31
6	1.05	0.52	0.33

2.4 湿地系统中污染物沿程变化规律

2.4.1 化学需氧量沿程变化规律

湿地系统对化学需氧量的去除效果如图 4 所示.在水力负荷为 100 mm/d,进水化学需氧量为 110.70 mg/L 的条件下,经过湿地的沿程去除作用到接近第二级上向流湿地的出口位置(上 8 采样口)

化学需氧量仅为 9.58 mg/L,去除率高达 91.35%。由图 4 可知,在第一级上向流湿地接近出口的位置(下 4 采样口)化学需氧量为 10.10 mg/L,去除率已达到 90.88%。可见在第一级上向流湿地,微生物的吸收代谢和基质填料的截留已经对化学需氧量有很好的去除效果,第二级对剩余的化学需氧量有一定的去除效果,最终累积去除率达到 91.35%。

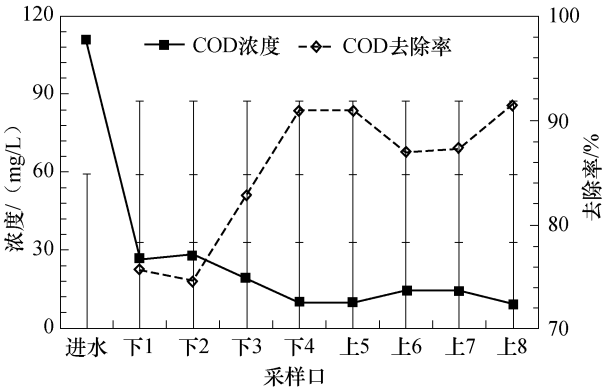


图 4 湿地系统对化学需氧量的去除效果

Fig.4 Removal efficiency of the chemical oxygen demand of the wetland system

2.4.2 总氮和氨氮沿程变化规律

湿地系统对总氮、氨氮的去除效果如图 5 和图 6 所示。

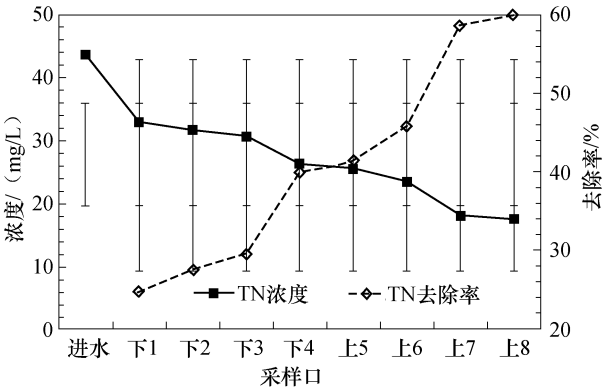


图 5 湿地系统对总氮的去除效果

Fig.5 Removal efficiency of total nitrogen of the wetland system

由图 5 和图 6 可知,湿地系统中总氮和氨氮的浓度变化规律趋于一致,这与湿地进水中总氮成分以氨氮为主有关。总氮和氨氮的去除作用在第一级下向流湿地和二级上向流湿地中连续进行,到接近第二级上向流湿地的出口位置(上 8 采样口),氨氮占总氮的比例由 90%下降为 80%,且去除率高达 64.24%。湿地系统对氨氮的高去除率和氨氮在总氮内所占比例的降低过程说明湿地系统内部存在着可进行硝化作用的自养菌,将总氮中的氨氮转化为硝态氮,然后通过反硝化去除总氮。氨氮的去除,除了硝化反硝化过程

外,主要是靠基质的吸附和沉淀作用。

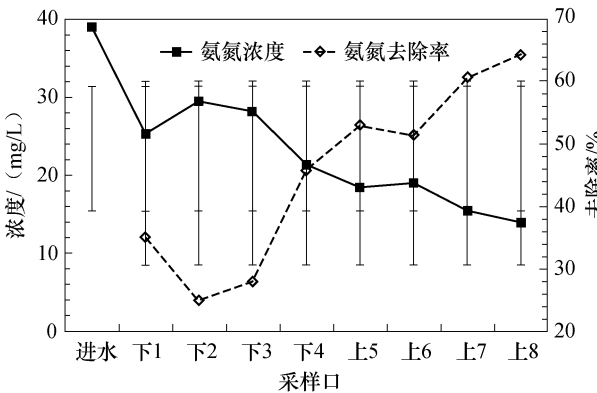


图 6 湿地系统对氨氮的去除效果

Fig.6 Removal efficiency of ammonia nitrogen of the wetland system

2.4.3 总磷沿程变化规律

湿地系统对总磷的去除效果如图 7 所示。由图 7 可知,总磷的浓度在第一级下向流湿地中是沿程降低的,而且湿地系统对总磷的去除主要发生在第一级下向流湿地中,在第二级上向流湿地中去除率很低。湿地系统对总磷的去除主要依靠颗粒态磷的沉淀、截留等作用,颗粒态磷中的有机磷会在异养菌的作用下最终转化为无机态的磷酸盐,这部分磷中有一部分会与基质中的钙、镁等金属离子或水合物反应生成沉淀脱离水相。

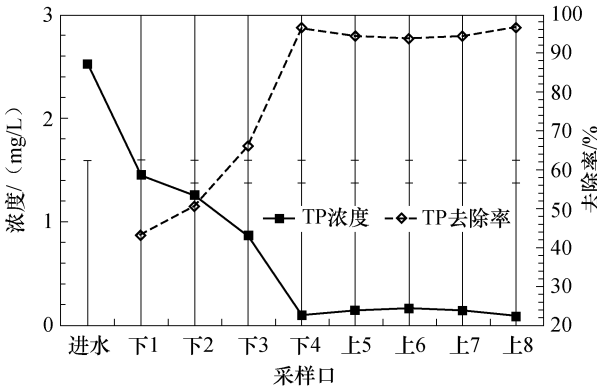


图 7 湿地系统对总磷的去除效果

Fig.7 Removal efficiency of total phosphorous of the wetland system

3 结论

复合垂直流人工湿地系统对化学需氧量、总氮、氨氮和总磷的去除率分别为 78.78%~92.79%、31.09%~68.97%、39.73%~71.28% 和 63.24%~99.67%。在本试验过程中化学需氧量和总磷均可以达到城镇污水处理厂污染物排放一级标准(A 标准);在水力负荷为 100 mm/d 条件下,总氮可以达到一级标准(B 标准)^[26],而氨氮可以达到城镇污水

处理厂污染物排放二级标准和污水排放标准中其他排污单位的氨氮排放标准^[26-27].在有些偏远的铁路中小站区,通过优化湿地系统结构、水力负荷及曝气等条件,可以增强湿地系统污水的净化效果,达到污水综合排放中其他排污单位的一级排放标准,因此复合垂直流人工湿地用于处理铁路中小站区生活污水是可行的.

对比其他研究结果,湿地系统对化学需氧量和总磷的去除效果非常好,对总氮和氨氮的去除效果较好,但不稳定.对化学需氧量和总磷的去除主要发生在第一级下向流湿地中,对总氮和氨氮的去除则是在第一级下向流和第二级上向流湿地中沿程稳步进行.

由试验结果可知,水力负荷对湿地化学需氧量、总氮和氨氮的去除效果影响比较明显,而对总磷的去除效果影响不明显.溶解氧对化学需氧量和总磷的去除效果影响不明显,对总氮和氨氮的去除效果影响较大.这是由于总氮的硝化和反硝化要有一定的溶解氧水平,只有在湿地系统氧充足条件下硝化过程才能顺利进行,对总氮和氨氮的去除效果才能明显提高;而除了生物作用外,湿地系统基质及根系截留对化学需氧量和总磷的去除也起着重要作用.

参考文献 (References):

[1] O'HOGAIN S. The design, operation and performance of a municipal hybrid reed bed treatment system[J]. Water Science & Technology, 2003, 48(5):119-126.

[2] 魏东洋,董磐磐,李杰,等. 新型组合工艺在农村生活污水治理示范工程中的应用[J]. 中国给水排水,2013, 29(18): 110-112.

WEI Dongyang, DONG Panpan, LI Jie, et al. Application of new combined process in demonstration project for rural sewage treatment [J]. China Water and Wastewater, 2013, 29(18): 110-112. (in Chinese)

[3] PROCHASKA C A, ZOUBOULIS A I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate[J]. Ecological Engineering, 2006, 26(1):293-303.

[4] LANGERABER G, LEROCH K, PRESSL A, et al. High-rate nitrogen removal in a two-stage subsurface vertical flow constructed wetland [J]. Desalination, 2009, 246(2): 55-68.

[5] BRIX H, ARIAS C A. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines[J]. Ecological Engineering, 2005, 25(7): 491-500.

[6] VYMAZAL J. Removal of nutrient in various types of constructed wetland[J]. Science of the Total Environ-

ment, 2007, 380(1): 48-65.

[7] KONNERUP D, KOOTTATEP T, BRIX H. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 248-257.

[8] GÓMEZ CERESO R, SUÁREZ M L, VIDAL-ABARCA M R. The performance of a multi-stage system of constructed wetlands for urban wastewater treatment in a semiarid region of SE Spain[J]. Ecological Engineering, 2001, 16(4): 501- 517.

[9] XIE Xiaohong, HE Feng, XU Dong, et al. Application of large-scale integrated vertical-flow constructed wetland in Beijing Olympic Forest Park: design, operation and performance[J]. Water and Environment Journal, 2012,26(1): 100-107.

[10] AYAZ S Ç, AKTAŞ Ö, FINDIK N, et al. Effect of recirculation on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system[J]. Ecological Engineering, 2012, 40: 1-5.

[11] 程滨,盛樱子,张慧. 多种人工湿地组合在不同进水负荷条件下的净化效果[J]. 环境工程学报,2014,8(11): 4695-4700.

CHENG Bin, SHENG Yingzi, ZHANG Hui. Purification performance of various combinations of constructed wetlands under different influent loads[J].Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(11): 4695-4700. (in Chinese)

[12] 张迎颖,丁为民,陈秀娟,等. 复合垂直流人工湿地的脱氮机理及影响因素分析 [J]. 环境工程, 2009,27(5):36-40.

ZHANG Yingying, DING Weimin, CHEN Xiujuan, et al. Analysis of nitrogen removal mechanism and influence factors in integrated vertical flow constructed wetland[J]. Environmental Engineering, 2009, 27(5): 36-40. (in Chinese)

[13] 吴振斌,詹德昊,张晟,等. 复合垂直流构建湿地的设计方法及净化效果[J]. 武汉大学学报(工学版),2003,36(1):12-16.

WU Zhenbin, ZHAN Dehao, ZHANG Sheng, et al. Design method and purification efficiency of integrated vertical flow constructed wetland [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(1): 12-16. (in Chinese)

[14] 唐孟煊,吴娟,代嫣然,等. 组合式垂直流人工湿地工艺及其污水处理效果[J]. 环境工程学报, 2016,10(3): 1017-1022.

TANG Mengxuan, WU Juan, DAI Yanran, et al. Treatment of domestic wastewater by hybrid vertical constructed wetland[J].Chinese Journal of Environmental

- Engineering, 2016, 10(3): 1017—1022. (in Chinese)
- [15] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese)
- [16] 吴振斌, 任明迅, 付贵萍, 等.垂直流人工湿地水力学特点对污水净化效果的影响[J].环境科学, 2001, 22(5): 45—49.
- WU Zhenbin, REN Mingxun, FU Guiping, et al. The influence of hydraulic characteristics on waste water purifying efficiency in vertical flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2001, 22(5): 45—49. (in Chinese)
- [17] 余志敏, 袁晓燕, 崔理华, 等.复合人工湿地对城市受污染河水的净化效果[J].环境工程学报, 2010, 4(4): 741—745.
- YU Zhimin, YUAN Xiaoyan, CUI Lihua, et al. Removal efficiency of integrated constructed wetlands for treating polluted river water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(4): 741—745. (in Chinese)
- [18] 尹连庆, 谷瑞华.人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究[J].环境工程, 2008, 26(增): 151—155.
- YIN Lianqing, GU Ruihua. Ammonia nitrogen removal mechanism and affecting factors of constructed wetland [J]. Environmental Engineering, 2008, 26(S): 151—155. (in Chinese)
- [19] 聂志丹, 年跃刚, 李林锋, 等.水力负荷及季节变化对人工湿地处理效率的影响[J].给水排水, 2006, 32(11): 28—31.
- NIE Zhidan, NIAN Yuegang, LI Linfeng, et al. Effect of hydraulic loading and seasonal fluctuation on pollution removal of constructed wetlands[J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(11): 28—31. (in Chinese)
- [20] 卢少勇, 李珂, 贾建丽, 等.串联垂直流人工湿地去除河水中磷的效果[J].环境科学研究, 2016, 29(8): 1218—1223.
- LU Shaoyong, LI Ke, JIA Jianli, et al. Phosphorus removal efficiency of the simulated series vertical flow constructed wetlands treating river water[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(8): 1218—1223. (in Chinese)
- [21] 刘波, 陈玉成, 王莉玮, 等.4种人工湿地填料对磷的吸附特性分析[J].环境工程学报, 2010, 4(1): 44—48.
- LIU Bo, CHEN Yucheng, WANG Liwei, et al. Phosphorus adsorption characteristics of four substrates in constructed wetland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(1): 44—48. (in Chinese)
- [22] 李紫霞, 唐晓丹, 崔理华.3种负荷对模拟垂直流人工湿地去除氮、磷效果的影响[J].环境工程学报, 2016, 10(2): 637—642.
- LI Zixia, TANG Xiaodan, CUI Lihua. Effects of three kinds of loads on the removal of TN and TP in a simulated vertical flow constructed wetlands [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(2): 637—642. (in Chinese)
- [23] 凌祯, 杨具瑞, 于国荣, 等.不同植物与水力负荷对人工湿地脱氮除磷的影响[J].中国环境科学, 2011, 31(11): 1815—1820.
- LING Zhen, YANG Jurui, YU Guorong, et al. Influence of different plants and hydraulic loading on the nitrogen and phosphorus removal of constructed wetlands [J]. China Environmental Science, 2011, 31(11): 1815—1820. (in Chinese)
- [24] 张毓媛, 曹晨亮, 任丽君, 等.不同基质组合及水力停留时间下垂直流人工湿地的除污效果[J].生态环境学报, 2016, 25(2): 292—299.
- ZHANG Yuyuan, CAO Chenliang, REN Lijun, et al. Research on pollutants removal effect of different combined substrate under different hydraulic retention time in vertical flow constructed wetlands [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(2): 292—299. (in Chinese)
- [25] 夏艳阳, 崔理华.复合垂直流-水平流人工湿地系统除氮效果的影响因素[J].环境工程技术学报, 2017, 7(2): 175—180.
- XIA Yanyang, CUI Lihua. Influential factors of nitrogen removal efficiency by the integrated vertical-flow and horizontal-flow constructed wetlands [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(2): 175—180. (in Chinese)
- [26] 国家环境保护总局.城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918—2002 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2002: 1—8.
- The State Environmental Protection Administration. Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant: GB 18918—2002 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese)
- [27] 国家环境保护总局.污水综合排放标准: GB 8978—1996 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 1—20.
- The State Environmental Protection Administration. Integrated wastewater discharge standard: GB 8978—1996 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997: 1—20. (in Chinese)