

运用无动力人工湿地分散式处理农村生活污水的研究*

谭迪 雷鸣[#] 龙九妹 李冰玉 江湛如

(湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘要 针对农村生活污水排放分散、难以集中处理等特点,以长沙市望城区光明村3户典型家庭为例,采用无动力人工湿地系统分散式处理农村生活污水,并比较冬、夏两季人工湿地对居民生活污水的净化效果。结果表明,构建的无动力人工湿地对农村生活污水净化效果明显,冬季生活污水COD、TP、TN、氨氮、SS的平均去除率分别达71.83%、97.20%、83.52%、55.34%、71.79%;夏季COD、TP、TN、氨氮、SS平均去除率分别达91.52%、93.99%、83.22%、75.15%、65.04%。经人工湿地净化处理后,TP、TN、氨氮可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A或一级B标准,COD可以达到GB 18918—2002二级标准,但人工湿地对COD及氨氮的去除受冬季低温影响十分显著,且出水SS不能达到GB 18918—2002相关标准,建议增加拦截设施或在冬季设置保温措施以提高人工湿地对农村生活污水的净化效果。

关键词 农村生活污水 无动力人工湿地 分散式处理 净化效果

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.04.018

Application of the non-powered constructed wetland system on rural domestic sewage treatment TAN Di, LEI Ming, LONG Jiumei, LI Bingyu, JIANG Zhanru. (College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha Hunan 410128)

Abstract: Focused on the characteristics of rural domestic sewage, such as scattered distribution and difficult to concentrated disposition, the non-powered constructed wetland system was employed to treat the domestic sewage from three typical families in Guangming Village, Wangcheng District, Changsha City. Moreover, the purification efficiencies of the local non-powered constructed wetland system in the summer and winter were compared. The result showed that the constructed wetland system had obvious purification effect on the rural domestic sewage, the average removal rates of COD, TP, TN, ammonia nitrogen and SS were 71.83%, 97.20%, 83.52%, 55.34% and 71.79% in winter, and 91.52%, 93.99%, 83.22%, 75.15% and 65.04% in summer, respectively. In particular, the effluent TP, TN and ammonia nitrogen could meet the "Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant" (GB 18918-2002) class I A or B after purified by constructed wetland system. And the effluent COD could reach to the class II of GB 18918-2002. However, the low temperature in winter cause a significant effect on the removal efficiencies of COD and ammonia nitrogen, and the effluent SS could not meet the standard of GB 18918-2002. Therefore, it was suggested to increase interception facilities or set up thermal insulation measures in winter to improve the purification efficiency of constructed wetland system on rural domestic sewage.

Keywords: rural domestic sewage; non-powered constructed wetland; dispersed treatment; purification efficiency

我国农村生活污水排放分散,管网不能延伸到户,且水质水量因地理环境、经济条件、季节和生活习惯的差异而有较大不同^[1]。随着农民生活水平提高以及农村生活方式的改变,农村生活污水产量随之增长^[2],如果不对农村生活污水采取有效处理,将会触发农村医疗和经济建设等方面的系列问题。针对农村生活污水难以集中处理的特点,国内外大多学者采用人工湿地处理农村生活污水^[3-4]。研究表

明,在进水污染物浓度较低条件下,人工湿地对COD的去除率可达80%以上,对磷、氮的去除率分别可达90%、60%^[5]。目前,借助地势高差构建的无动力、无操作、自然循环的可持续污水处理系统,即无动力人工湿地系统受到人们的青睐,浙江、广东、天津和江苏等多地针对农村污水无动力处理技术开展了探索和尝试,并取得了一定的进展^[6-7]。湖南省长沙市望城区光明村是全国示范性新农村,村

第一作者:谭迪,女,1994年生,硕士研究生,主要从事环境污染修复方面的研究。[#] 通讯作者。

* 湖南省“灌溉水源净化技术试点研究”项目(财政厅湘农联[2015]112号)。

内居住 3 605 人,为有效处理农村生活污水,该村建设无动力人工湿地处理系统对农村生活污水进行净化,出水达标后可用于农田灌溉。本研究在分析光明村生活污水排放规律的基础上,考察了无动力人工湿地系统对农村生活污水的处理机制,为分散处理农村生活污水提供参考和科学依据。

1 材料与方法

1.1 处理系统工程概况

以家庭为单位,根据人口及人均排水量设置不同规模的人工湿地处理系统,其简要流程见图 1。系统中厌氧罐用于分解大分子有机物,同时杀死有毒虫卵及致病菌,其具备污泥消化池的功能。厌氧罐内设有沉淀截污设施,能有效截流沉淀并分解污水中的胶态和非溶解性有机污物^[8]。该无动力人工湿地处理系统污水处理效率高,不易发生短流现象,且运行无需应用任何电气设备和任何操作^[9],利用地势高差进行自然沉降进行处理,28 d 为一个循环。

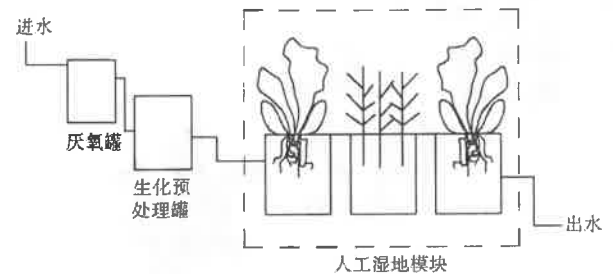


图 1 光明村人工湿地系统结构
 Fig.1 Flow of the constructed wetland

系统中采用市售成品厌氧罐,主体材质由硬塑料制作,由于污水的水量、水质不均匀,故设生化预

处理罐均化污水的水质水量,罐内安装厌氧细菌载体,大大提高厌氧生化菌群数量,提高厌氧处理效率,并改善污水的可生化性能^[10]。生化预处理水力停留时间控制在 11~15 h,人工湿地系统采用模块化成套设备,单个湿地模块尺寸为 1.0 m×0.6 m×1.5 m,湿地模块填料为蛭石、土壤,主要种植美人蕉、菖蒲、水竹、石兰等,单位面积模块污水处理能力约为 0.30 m³/(m²·d)。

1.2 采样方法

本研究根据人口数量、家庭类型、经济状况等选择 3 户典型家庭进行农村生活污水采样,采样分为冬、夏两个季节,每季各采样 3 次,家庭基本情况见表 1。通过调查问卷和实地调查的方法对人工湿地接纳的各类污水的产量及类型进行统计。同时,对该 3 个人工湿地系统的进、出水进行采样并检测相关水质指标。

1.3 分析方法

水质分析项目包括 COD、TP、TN、氨氮、SS。水质检测方法均参考文献[11]。试验数据采用 Excel 97 软件进行分析,光明村农村生活污水水质见表 2。

2 结果与讨论

2.1 不同家庭的用水量分布特征

光明村生活用水主要分为餐厨用水(洗菜、洗碗、做饭)、洗浴用水(洗澡、洗漱)和卫生用水(洗衣服、冲厕)。洗浴用水量占总用水量的比例最高,为 65%~70%;其次为卫生用水,占 25%~30%,餐厨用水仅占 5%左右。从季节上来看,夏季各类生活用水量明显高于冬季;从家庭人口上看,人口数量越

表 1 光明村 3 户典型家庭的基本信息
 Table 1 Basic information of 3 typical families in Guangming village

名称	人口数	家庭类型	经济状况	冬季污水量 (L·d ⁻¹)	夏季污水量 (L·d ⁻¹)	湿地模块数
家庭 A	4	务农	一般	378.77	601.57	6
家庭 B	6	部分务农	中等	547.69	724.82	9
家庭 C	9	非务农	较好	623.55	803.29	12

表 2 光明村生活污水水质状况
 Table 2 Characteristics of domestic sewage in Guangming village

水质指标	冬季		夏季	
	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差
COD	206.50~280.30	236.20±38.95	167.50~210.32	182.79±23.89
TP	2.00~2.09	2.06±0.05	1.57~2.06	1.89±0.28
TN	103.92~138.96	118.76±18.12	94.92~139.56	123.60±24.89
氨氮	13.84~52.28	35.71±19.76	9.89~47.92	31.33±19.47
SS	176~391	264±113	136~383	225±137

多总用水量越大,经济情况越好,人均用水量越少。经调研,家庭 A 成员日常均在家务农,人均用水量最高;家庭 B 成员中有 2 位学生平时在外读书,故日常用水量稍高于家庭 A;家庭 C 成员均有正式工作,工作时间段不在家,虽然总用水量最高但其人均用水量最低。

农村生活污水量可以根据折算系数法利用生活用水量计算得出,洗浴用水、冲厕用水的折算系数为 0.8,餐厨用水折算系数为 0.6,洗衣用水折算系数为 0.7。根据 3 户家庭不同类别的生活用水量统计(见图 2),计算得到家庭 A、家庭 B、家庭 C 夏季农村生活污水量分别为 601.57、724.82、803.29 L/d,远高于冬季 378.77、547.69、623.55 L/d。

2.2 无动力人工湿地的水质净化效果

2.2.1 对 COD 的净化效果

COD 主要由人工湿地的截流、过滤以及微生物的新陈代谢作用去除,以往研究表明,人工湿地对 COD 有较好的脱除效果^[12]。由表 3 可见,3 组人工湿地进水 COD 浓度相差总体不大,却有明显的季

节之分,冬季进水 COD 高于夏季。其中家庭 A、家庭 B、家庭 C 人工湿地的 COD 去除率分别为 66.10%~89.45%、78.27%~90.13%、71.11%~94.98%,家庭 A 的 COD 去除率略低于家庭 B 和家庭 C,可能是由于务农人数多的家庭产生的生活污水中有机物含量偏高,影响了人工湿地对 COD 的净化效率。3 组人工湿地的 COD 去除率均呈现出夏季高于冬季的规律,这与人工湿地植物对有机物的吸收利用、土壤吸附以及填料微生物分解的协同作用相关。3 组人工湿地冬季 COD 平均去除率为 71.83%,出水 COD 平均质量浓度为 67.60 mg/L,夏季 COD 平均去除率为 91.52%,出水 COD 平均质量浓度为 15.80 mg/L,均符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)二级标准(100 mg/L)。

2.2.2 对 TP 的净化效果

光明村人工湿地对 TP 的去除效果见表 4。由表 4 可见,人工湿地进水 TP 总体差别不大,其中家庭 A 人工湿地的 TP 去除率在 93.75%~95.44%,家庭 B 为 95.63%~98.85%,家庭 C 为 90.89%~

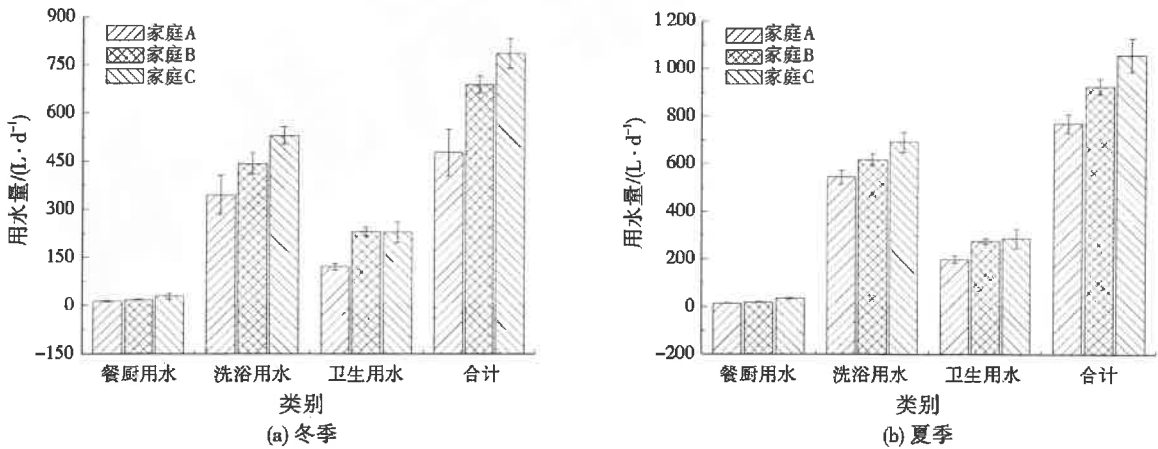


图 2 3 户典型家庭用水量统计
Fig.2 Water consumption of 3 typical families

表 3 光明村人工湿地对 COD 的去除效果
Table 3 Removal of COD from constructed wetland in Guangming Village

项目	进水/(mg·L ⁻¹)		出水/(mg·L ⁻¹)		COD 去除率/%
	冬季	夏季	冬季	夏季	
家庭 A	280.30±12.02	210.32±9.98	95.03±4.51	22.18±1.08	66.10~89.45
家庭 B	221.79±10.96	170.55±7.67	48.20±1.74	16.83±0.69	78.27~90.13
家庭 C	206.50±9.65	167.50±8.41	59.65±3.00	8.41±0.39	71.11~94.98

表 4 光明村人工湿地对 TP 的去除
Table 4 Removal of TP from constructed wetland in Guangming Village

项目	进水/(mg·L ⁻¹)		出水/(mg·L ⁻¹)		TP 去除率/%
	冬季	夏季	冬季	夏季	
家庭 A	2.08±0.10	2.04±0.10	0.13±0.01	0.09±0.01	93.75~95.44
家庭 B	2.09±0.10	2.06±0.11	0.02±0	0.09±0.01	95.63~98.85
家庭 C	2.00±0.10	1.57±0.07	0.02±0	0.14±0.06	90.89~99.00

表5 光明村人工湿地对TN的去除效果
Table 5 Removal of TN from constructed wetland system in Guangming Village

项目	进水/(mg·L ⁻¹)		出水/(mg·L ⁻¹)		TN 去除率/%
	冬季	夏季	冬季	夏季	
家庭 A	103.92±4.93	139.56±5.57	20.60±1.03	19.70±0.93	80.18~85.88
家庭 B	138.96±6.78	136.32±5.98	22.30±1.32	20.30±1.21	83.95~85.11
家庭 C	113.40±5.33	94.92±4.18	16.40±0.81	19.40±1.14	79.56~85.54

表6 光明村人工湿地对氨氮的去除
Table 6 Ammonia nitrogen removal of constructed wetland system in Guangming Village

项目	进水/(mg·L ⁻¹)		出水/(mg·L ⁻¹)		氨氮去除率/%
	冬季	夏季	冬季	夏季	
家庭 A	52.25±2.35	36.19±1.69	16.90±0.79	2.81±0.13	67.67~92.22
家庭 B	41.00±2.11	47.92±2.28	12.71±0.58	9.97±0.51	69.00~79.20
家庭 C	13.84±0.66	9.89±0.38	9.78±0.42	4.55±0.18	29.34~54.02

99.00%,3组人工湿地冬、夏季TP平均去除率分别为97.20%、93.99%,出水TP浓度较为稳定,达到GB 18918—2002一级A标准(0.5 mg/L)。人工湿地的除磷效果主要依靠植物及微生物在土壤中的物理化学作用,温度会影响土壤的氧化还原点位从而影响除磷效果,而土壤氧化还原电位变化对TP的去除效果的影响相对较小^[13],因此TP去除率季节性差异相对较小。

2.2.3 对TN的净化效果

人工湿地需要经过氨化、硝化及反硝化过程将生活污水中的氮转化为N₂以达到脱氮的效果^[14]。3组人工湿地对TN的去除效果见表5。由表5可见,系统整体脱氮效率较高,家庭A、家庭B、家庭C人工湿地的TN去除率分别在80.18%~85.88%、83.95%~85.11%、79.56%~85.54%,TN处理效果较为稳定,季节差异较小,3组人工湿地系统冬、夏季TN平均去除率分别为83.52%、83.22%。系统出水TN较低,基本在GB 18918—2002一级B标准(20 mg/L)左右。光明村人工湿地植物有美人蕉、菖蒲、水竹、石兰等,系统TN去除效率较高可能与人工湿地表层植物对氮的吸收量大有关。

2.2.4 对氨氮的净化效果

光明村人工湿地对氨氮的去除效果见表6。由表6可见,家庭C进水氨氮的浓度明显低于其他两户家庭,通过调查采访知悉家庭C成员白天几乎都在外工作,故生活用水量较低,因此生活污水中氨氮浓度相对偏低。家庭A人工湿地的氨氮去除率为67.67%~92.22%;家庭B人工湿地的氨氮去除率为69.00%~79.20%;家庭C人工湿地的氨氮去除率为29.34%~54.02%。家庭C经济条件最好,但氨氮去除率明显低于其他两户家庭,可能是原始进水氨氮浓度过低导致。人工湿

地夏季氨氮去除率显著优于冬季,3组人工湿地系统冬、夏季TN平均去除率分别为55.34%、75.15%。人工湿地对氨氮的去除是植物和微生物共同作用的结果,水生植物将其获得的90%左右的氧气传输到根际区域,从而使根际区域形成有利于微生物硝化作用的有氧环境^[15]。因此,植物生长状况直接影响到人工湿地对氨氮的去除效果。冬季植物开始衰老,其输氧能力下降,从而使微生物的硝化作用强度下降^[16]。此外,微生物的硝化作用对温度比较敏感,水温为10℃时硝化作用受到抑制;温度为6℃时硝化速率为零^[17]。家庭A、家庭B、家庭C人工湿地冬季出水氨氮分别为16.90、12.71、9.78 mg/kg,夏季出水氨氮分别为2.81、9.97、4.45 mg/kg,总体看来,除家庭A冬季出水氨氮外,其他人工湿地出水氨氮均达GB 18918—2002一级B标准(15 mg/L),部分达到GB 18918—2002一级A标准(8 mg/L)。

2.2.5 对SS的净化效果

光明村人工湿地对SS的去除效果见表7。由表7可见,家庭A人工湿地的SS去除率为83.89%~87.21%;家庭B人工湿地的SS去除率为53.50%~64.44%;家庭C人工湿地的SS去除率为54.41%~67.05%。可见,家庭A人工湿地的SS去除效率明显高于家庭B和家庭C,这与进水SS浓度有关,而进水SS浓度与家庭成员生活习惯相关。经调查,家庭A屋内泥沙、灰尘较多,故SS的产生量较高,因此进水SS浓度较大,与研究结果相符。人工湿地对SS的去除主要通过物理吸附实现,因此SS净化效果较为稳定,季节差异较小,3组人工湿地冬、夏季TN平均去除率分别为71.79%、65.04%。虽然经过人工湿地处理后,进水中大部分

表 7 光明村人工湿地系统对 SS 的去除
Table 7 SS removal of constructed wetland system in Guangming Village

项目	进水/(mg·L ⁻¹)		出水/(mg·L ⁻¹)		SS 去除率/%
	冬季	夏季	冬季	夏季	
家庭 A	391±188	383±19	63±3	51±3	83.89~87.21
家庭 B	225±11	157±7	80±4	73±4	53.50~64.44
家庭 C	176±8	136±6	58±3	62±3	54.41~67.05

SS 被净化去除,但出水 SS 均未达到 GB 18918—2002 的三级标准(50 mg/L)。因此,建议在人工湿地系统增加水生植物拦截或水利拦截以提高 SS 的净化效率。

3 结论与建议

(1) 光明村无动力人工湿地系统对农村生活污水净化效果显著,冬季人工湿地对生活污水中 COD、TP、TN、氨氮和 SS 的平均去除率分别达 71.83%、97.20%、83.52%、55.34%、71.79%;夏季分别达 91.52%、93.99%、83.22%、75.15%、65.04%。

(2) 人工湿地对 COD 以及氨氮的去除受冬季低温影响十分显著,建议在冬季进行一些适当的保温措施与维护以巩固人工湿地的稳定运行。

(3) 人工湿地对 SS 的去除效果受进水污染负荷影响较大,进水 SS 浓度越高,去除率越大。建议在人工湿地系统增加水生植物拦截或水利拦截以提高 SS 的净化效率。

(4) 美人蕉、水竹均属不耐寒植物,应适当多种植菖蒲、香蒲、吉祥草、鸢尾草等耐寒抗冻、生命力顽强且净化效果好的植物,以提高人工湿地冬季运行效率。

参考文献:

- [1] 张克强.农村污水处理技术[M].北京:中国农业科学技术出版社,2006.
- [2] 张曼雪,邓玉,倪福全.农村生活污水处理技术研究进展[J].水处理技术,2017(6):5-10.
- [3] 梁康,王启烁,王飞华,等.人工湿地处理生活污水的研究进展[J].农业环境科学学报,2014,33(3):422-428.
- [4] 龙翠芬,郑离妮,唐晓丹,等.农户庭院型人工湿地对农村生活污水的净化效果[J].环境工程学报,2012,6(8):2560-2564.
- [5] 董文杰,陆广,严立,等.分散式绵远生活污水生态处理技术研

- 究进展[J].环境污染与防治,2014,36(8):84-88.
- [6] LANA L C O, MORAES D C, SPERLING M, et al. Performance of a single stage vertical flow constructed wetland system treating raw domestic sewage in Brazil[J]. Water Science & Technology, 2013, 68(7):1599-1606.
- [7] SCHOLZ M, XU J. Comparison of constructed reed beds with different filter media and macrophytes treating urban stream water contaminated with lead and copper[J]. Ecological Engineering, 2002, 18(3):385-390.
- [8] 宋志文,王仁卿,席俊秀,等.人工湿地对氮磷的去除效率与动态特征[J].生态学杂志,2005,24(6):648-651.
- [9] 董贝,刘杨,杨平.人工湿地处理农村生活污水研究与应用进展[J].水资源保护,2011,27(2):80-85.
- [10] 杜新,施春红,马方曙.有机负荷对潮汐流人工湿地净化农村生活污水的影响[J].生态与农村环境学报,2015,31(3):380-384.
- [11] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.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.
- [12] 鲍振博,靳登超,刘玉乐,等.无动力组合型人工湿地处理农村生活污水工程实践[J].中国给水排水,2009,25(20):47-48.
- [13] 刘春常,安树青,夏汉平,等.几种植物在生长过程中对人工湿地污水处理效果的影响[J].生态环境学报,2009,16(3):860-865.
- [14] GONZALO O G, RUIZ I, SOTO M. Integrating pretreatment and denitrification in constructed wetland systems[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584/585:1300-1309.
- [15] 项学敏,杨洪涛,周集体,等.人工湿地对城市生活污水的深度净化效果研究:冬季和夏季对比[J].环境科学,2009,30(3):713-719.
- [16] 胡智锋,陈爱民,裘知,等.模拟垂直潜流人工湿地中植物种类和植物多样性对脱氮效果的影响[J].环境污染与防治,2016,38(3):45-49.
- [17] HU Y, HE F, MA L, et al. Microbial nitrogen removal pathways in integrated vertical-flow constructed wetland systems[J]. Bioresource Technology, 2016, 207:339-345.

编辑:丁 怀 (收稿日期:2017-07-28)

