

模块化废水处理集成技术在农村生活污水治理中应用

李佳宁¹, 张晓明², 李瑞婷¹

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014; 2. 山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心, 山东 济南 250100)

【摘要】新农村及美丽乡村建设对乡村生态环境提出了更高要求,但农村地区生活污水管理粗放,仍存在未经处理肆意排放等现象,给土壤和当地水源带来污染和破坏。为减轻农村污染现状,该研究以花叶芦竹、香蒲为湿地植物,以人工湿地填料为基质,构建垂直流—一级水平潜流—二级水平潜流的组合模块化人工湿地集成系统处理生活污水,探讨模块化人工湿地集成技术对农村生活污水的及季节变化对去除效果的影响。结果表明,模块化集成人工湿地对农村生活污水具有良好的处理能力,对 BOD₅、COD、SS、NH₄-N、TN、TP 的平均去除率为 90.4%、83%、92.9%、78.5%、78%、82.7%。季节气候变化下该集成技术对污染物的去除效果,除 SS 受季节变化影响较小,其余指标受季节变化较大,去除能力规律是:夏季>秋季>春季>冬季。

【关键词】模块化集成;人工湿地;农村生活污水;季节变化

【中图分类号】X703

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2025)-05-0001-05

Application of Modular Wastewater Treatment Integration Technology in Rural Domestic Sewage Treatment

LI Jianing¹, ZHANG Xiaoming², LI Ruiting¹

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China; 2. Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: The construction of program of new countryside and beautiful villages puts forward higher requirements for the rural ecological environment. However, the extensive management of domestic sewage in rural areas results in negative phenomena such as unauthorized discharge without treatment, which pollutes and damages the soil and local water sources. To alleviate the current rural pollution, this study constructed a combined modular constructed wetland integration system of vertical flow – primary horizontal subsurface flow – secondary horizontal subsurface flow, with *Arundo donax* var. *versicolor* and *Typha orientalis* as wetland plants and constructed wetland fillers as substrates, to explore the removal effect of the modular constructed wetland integration technology on rural domestic sewage and the influence of seasonal changes. The results show that the modular integrated constructed wetland has a good treatment capacity for rural domestic sewage, with average removal rates of 90.4%, 83%, 92.9%, 78.5%, 78% and 82.7% for BOD₅, COD, SS, NH₄-N, TN and TP respectively. Under seasonal climate changes, the removal effect of this integration technology on pollutants varies greatly with seasons except for SS, which is less affected. The rule of removal capacity is: summer > autumn > spring > winter.

Key words: Modular integration; Constructed wetland; Rural domestic sewage; Seasonal changes

农村生活污水具有分散性、季节性、成分多样性(洗涤剂、厨余、人畜排泄物混合)的特点,目前农村污水回收处理率较低,处理成本较高,难以长效运行。相较于传统工艺,人工湿地建设成本降低 40%~60%,运维人工需求减少 70%,特别

适合日均处理量<500 t 的场景。

人工湿地系统主要利用土壤、人工介质等按一定比例构成填床,并选择性地植入植被,通过

收稿日期:2025-02-18

作者简介:李佳宁(1990—),女,工程师

介质、植物、微生物的物理、化学、生物三重协同作用,对污水、污泥进行处理,具有运行成本低、绿色低碳、污染物去除能力较强、耐冲击负荷、生态环境效益显著等优点。人工湿地系统按照布水方式的不同可以分为自由表面流人工湿地、水平潜流人工湿地和垂直潜流人工湿地 3 种类型^[1]。综合考虑湿地模块处理技术在农村的占地、运行管理、气候温度适应性及处理效果等因素,本研究构建垂直流与水平流两种模式相组合的潜流人工湿地模块化集成处理系统来处理生活污水,探究组合集成式湿地对农村生活污水中 BOD₅、COD、SS、NH₄-N、TN、TP 的去除效果。

1 组合人工湿地系统实验部分

1.1 实验装置设计及工艺流程

实验所建湿地处理系统位于山东省水利科学研究所的长清试验基地内,湿地结构共分 6 部分,分别是污水池、格栅池、调节池、垂直流人工湿地、一级水平潜流人工湿地、二级水平潜流人工湿地。

工湿地;基质填料共分 3 层,最底层为颗粒较大的砾石,中间使用炉渣、多孔陶瓷作为基质填料,上层选用颗粒较小的砾石进行覆盖填充,并使用土工布做好防渗工作。该三级组合工艺(一级垂直流+二级水平潜流+三级水平潜流),任意单独湿地模块均能独立运行,可进行一级垂直流、二级水流潜流、三级水平潜流、“一级垂直流+二级水平潜流”“二级水平潜流+三级水平潜流”“一级垂直+二级水平潜流+三级水平潜流”6 种运行方式。湿地集成处理系统工艺流程如图 1 所示,设计剖面图如图 2 所示。

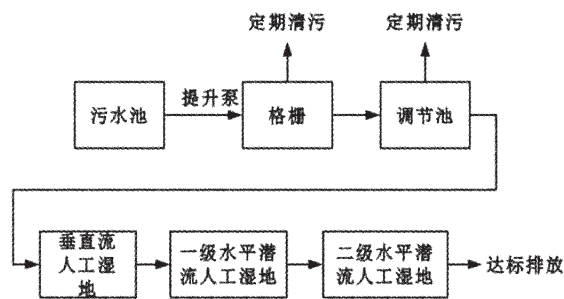


图 1 组合人工湿地系统工艺流程

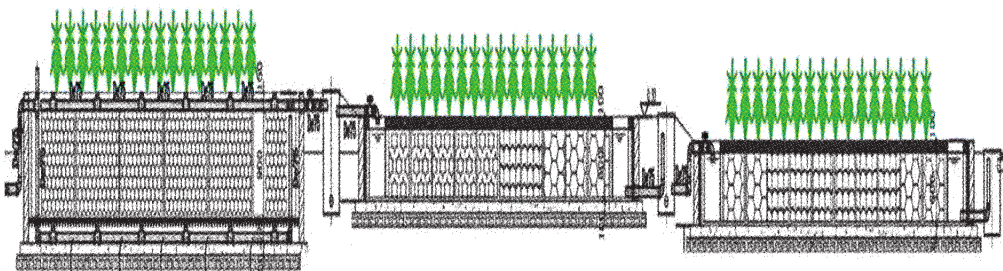


图 2 组合人工湿地系统设计剖面图

该组合人工湿地处理规模为 100 t/d,运维费用 0.13 元/t(含能耗+人工费)。因试验基地中生活污水来源及流量不稳定,为更好地测试系统处理能力,以实验配制污水模拟农村生活污水特性作为系统处理原水,各项指标根据同类污水经验值确定,见表 1^[2],实际初始进水水质指标见表 2。

表 1 农村居民生活污水排放参考取值 mg/L

序号	主要指标	建议取值范围
1	COD	150~400
2	BOD ₅	100~200
3	NH ₄ -N	20~40
4	TN	20~50
5	TP	2.0~7.0
6	SS	100~200
7	PH	6.5~8.5

表 2 实验污水池初始进水水质 mg/L

指标	BOD ₅	COD	SS	NH ₄ -N	TN	TP
含量	124.27	180.13	131.61	26.64	25.29	3.93

前端垂直流人工湿地模块,平面尺寸为 7.2 m×4.8 m,高度 1.25 m;一级水平潜流模块,平面尺寸为 7.2 m×4.8 m,高度 0.7 m;二级水平潜流模块,平面尺寸为 7.2 m×4.8 m,高度 0.7 m;系统设计水力负荷为 1.0 m³/(m²·d),设计流量为 30 m³/d。格栅池,栅隙 5 mm,设计参数为 2.0 m×1.0 m×1.0 m,主要用于拦截污水中体积较大的悬浮或漂浮污染物,防止堵塞水泵或管道;调节池为钢筋混凝土结构,平面面积 330 m²,高度 2.5 m,有效容积 660 m³,主要用于调节处理系统进水水温、水质、水量。

1.2 植物的选用与栽培

用于污水处理湿地的植物选择需综合考虑

耐污能力、去污效率、生态适应性及景观效果等因素。因试验区在北方,需考虑植物的耐寒性(部分植物需具备地下根茎越冬能力)、抗旱性(适应北方季节性干旱,年降水<600 mm)、生长周期(优选多年生植物,避免频繁补种),同时湿地植物还需具有抗病虫能力强,易于维护管理的特点。此实验经过筛选、对比之后,选用花叶芦竹和香蒲作为湿地植物见表3,种植密度为20株/m²,湿地植物于夏季在组合人工湿地种植,一周后对未成活植株进行补种,以保证湿地植物成活数量。

表3 湿地系统植物对比

序号	植物名称	适应温度	净化效能 (年均去除率)	特殊优势
1	芦苇	-25~40℃	COD65%、TN55%	根系深度1.5 m, 抗风蚀
2	香蒲	-20~35℃	TP70%、NH ₃ -N60%	冬季枯叶形成保温层
3	菖蒲	-15~30℃	重金属Cd/Pb80%	分泌抑藻物质
4	水葱	-18~38℃	BOD ₅ 75%	茎秆通气组织发达

1.3 实验方法

人工湿地植物种植一个月后全部成活,且花叶芦竹平均株高60~70 cm,香蒲株高30~40 cm,此时植物根系延展到基质中,基质表面变黑,且附着有生物膜,表明湿地植物已经成熟,湿地处理系统可以开始运行,污水中的有机污染物主要依赖填料和植物根系表面生物膜的氧化降解。悬浮固体(SS)的去除则主要依赖湿地填料以及湿地植物根系的过滤截留等物理作用。此外,在潜流湿地内部,由高到低会依次呈现不同的氧化还原状态。在湿地上部,由于大气中氧气的融入以及湿地植物的氧气释放而呈现好氧状态,而越往湿地下部溶解氧越少,好氧状态逐渐变为缺氧以至厌氧状态。不同的氧化还原环境不仅为污水的生物脱氮除磷,也为阴离子表面活性剂的生物降解提供了外部条件保证。湿地植物对氮磷元素的利用也有助于这些营养元素的去除,但冬季需对枯败的植物茎叶进行收割。而良好的湿地填料对磷元素也有极佳的吸附去除效果。试验周期为10个月,每月采样1次,分析系统进、出水水质。试验分析测定的水质指标有BOD₅、COD、SS、NH₄-N、TN、TP,测定方法采用国家标准方法^[9],具体分析方法见表4。

表4 检测水质指标及方法

检测指标	《地表水环境质量标准》	
	Ⅳ类标准/(mg·L ⁻¹)	
BOD ₅	6	稀释与接种法
COD	30	重铬酸钾法
SS	30	重量法
NH ₄ -N	1.5	纳氏试剂光度法
TN	1.5	过硫酸钾氧化
TP	0.3	钼锑抗分光光度

2 结果与讨论

湿地植物于7月份生长成熟,组合湿地处理系统正常运行,开始对湿地系统的进、出水水质进行定期检测,至第二年4月,期间各月份平均气温、检测当日水温如图3、图4所示。

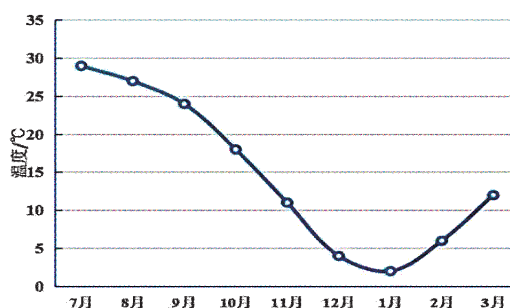


图3 试验期间各月份平均气温变化趋势

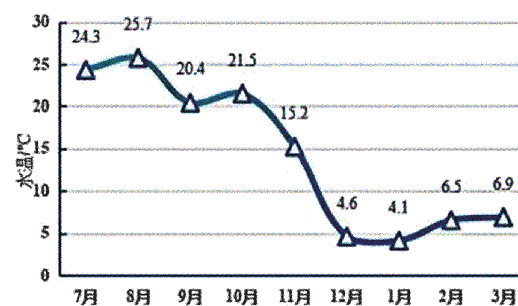


图4 各月份试验检测当日水温变化趋势

2.1 BOD₅ 去除效果

人工湿地对BOD₅的去除主要是通过湿地基质和植物截留沉淀、植物及微生物的吸附降解和转化吸收等作用,植物根系具有泌氧作用,在根际形成好氧区^[4],促进异养菌(如假单胞菌)将BOD₅转化为CO₂和H₂O。通过图5分析可知,该组合湿地系统对BOD₅的去除率平均可达90.4%。BOD₅的去除效果随季节变化,受温度影响较大,去除效果的季节变化规律为:夏季>秋季>春季>冬季。在废水生物处理中,微生物的代谢活动与温度变化密切相关,一般多数微生物的

适宜温度范围在 16~35 ℃,当温度低于 10 ℃时,微生物的酶结构可能会发生变化,影响微生物的代谢与生长繁殖。因此在冬季,微生物代谢速率低,有机颗粒及胶体的降解能力就会降低。

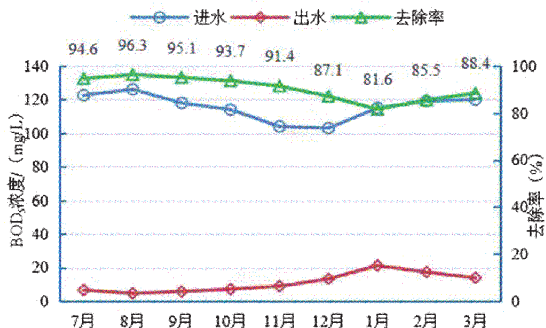


图5 组合人工湿地进出水 BOD₅ 浓度及去除率

2.2 COD 去除效果

生态处理系统对 COD 去除途径主要包括以下 3 种:1)湿地中的基质和植物根系形成的过滤系统对悬浮的、颗粒较大的不溶性有机物进行截留,而后被微生物代谢降解;2)植物根系的泌氧作用,形成好氧、缺氧和厌氧等不同微环境,通过氧化还原反应对 COD 进行降解;3)湿地系统中的微生物通过生物降解及植物吸收转化较低水体 COD 浓度。根据图 6 分析可知,该组组合湿地系统对 COD 的平均去除率可达 83%,除冬季外,污水处理后的 COD 平均浓度为 29.54 mg/L,符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) IV 类标准。COD 的去除率,夏季最高,冬季最低。

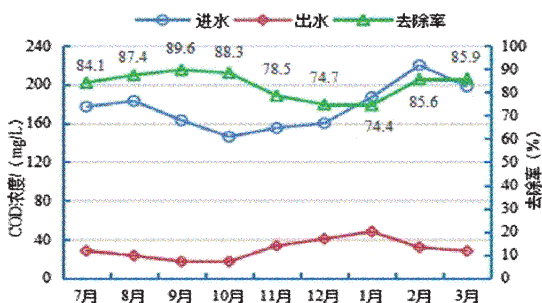


图6 组合人工湿地进出水 COD 浓度及去除率

2.3 SS 去除效果

通过图 7 分析可以看出,该组合人工湿地对 SS 平均去除率为 92.9%,污水处理后的 SS 浓度均可达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)IV 类标准,且 SS 的去除率受季节变化影响较小,全年维持在较高的处理水平。主要原因是人工湿地中 SS 主要是由密集的填料颗粒及植物

根系的拦截过滤和 SS 的沉降作用,以及附着在上面的微生物和小型动物摄取和分解等去除的。实验中的组合人工湿地分为 3 级过滤,有效提高了对固体悬浮物的截留去除。

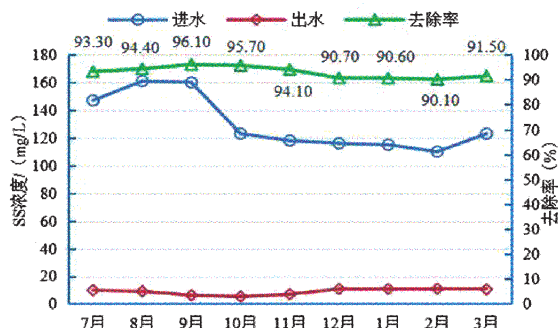


图7 组合人工湿地进出水 SS 浓度及去除率

2.4 NH₄-N 去除效果

通过图 8 分析可知,试验组合湿地系统对 NH₄-N 的平均去除率为 78.5%,随季节变化规律为:秋季>夏季>春季>冬季。在适宜温度范围内,温度升高,植物及根际的微生物活性增强、代谢旺盛,有利于硝化和反硝化作用。硝化与反硝化反应的适宜温度为 20~40 ℃,8-11 月温度正适合微生物硝化/反硝化反应。而在冬季,植物及根际的微生物生长及代谢速率下降,不利于对污水的净化效果,NH₄-N 的去除率下降。12 月、1 月所测的 NH₄-N 出水浓度偏高,超过《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)IV 类标准,较夏季相比,去除效果下降明显。微生物的硝化和反硝化作用是湿地系统处理 NH₄-N 的主要路径,其作用效果与水中溶解氧含量直接相关。温度过高时水中溶解氧含量降低,微生物的硝化和反硝化作用也受到抑制,因此一般温度应不超过 20~30 ℃。

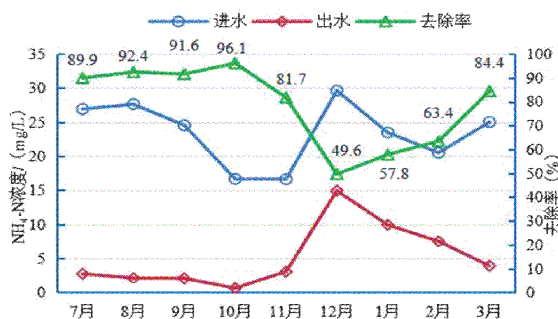


图8 组合人工湿地进出水 NH₄-N 浓度及去除率

2.5 TN 去除效果

人工湿地污水中氮的去除主要为微生物的硝化和反硝化脱氮生物作用以及氨化、离子交换

等化学作用。其去除效率同样受温度变化影响较大。通过图9中分析可知,该组合湿地系对TN的平均去除率为78%,去除率随季节变化规律为夏季>秋季>春季>冬季,温度对去除效果影响较大。系统处理后的TN浓度未达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)IV类标准。

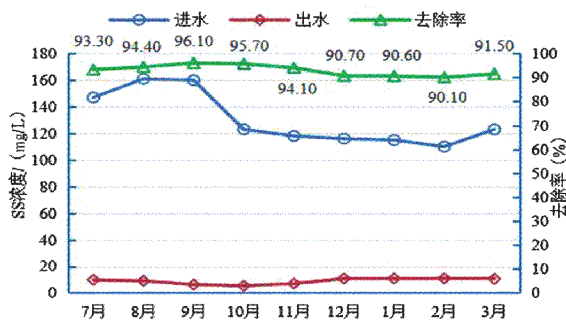


图9 组合人工湿地进出水 TN 浓度及去除率

2.6 TP 去除效果

湿地对磷的去除是系统中植物、微生物及填料床的物理、化学及生物降解等几方面协同作用完成的。如,湿地的基质如土壤、砾石、沸石等具有较大的比表面积和表面电荷,能够通过静电吸附、离子交换等方式吸附污水中的磷酸根离子。人工湿地中的水生植物可以通过根系吸收污水中的磷酸盐,用于合成植物体内的核酸、磷脂等有机化合物,从而将磷从污水中转移到植物体内。同时,一些聚磷菌在好氧条件下能过量摄取磷并以聚磷酸盐的形式储存在细胞内,在厌氧条件下又能释放磷,定期清理湿地系统的底泥可将聚集沉淀在污泥中的磷有效去除。

通过图10中分析可知,该组合湿地系统TP的平均去除率为82.7%。邹渝等^[9]人在不同类型单一人工湿地对生活污水的净化效果的研究中发现:不同类型人工湿地对TP去除率变化范围为38.51%~58.78%。与其他常规单一人工湿地相比,该组合人工湿地对TP的去除能力提高约70%。除7月、12月及来年1月、2月、3月的检测数据外,其余数据均达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)IV类标准,去除率随季节变化规律为夏季>秋季>春季>冬季。磷的去处效果与温度变化有明显相关关系,夏季去除率比冬季可提高30%。另外,影响除磷效果的另一个主要因素是水力停留时间,随着水力停留时间的增长,磷的去除率明显提高,但是过长的水力停留时间,

会导致磷的析出或溶解,从而影响除磷效果。

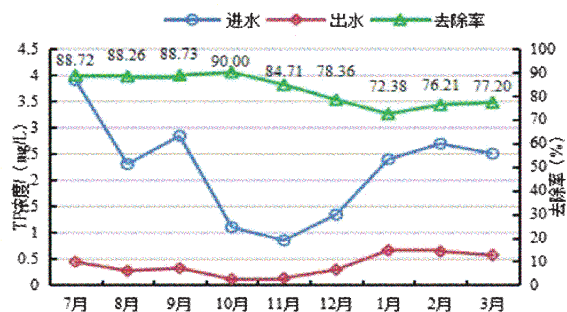


图10 组合人工湿地进出水 TP 浓度及去除率

3 结论

此文以山东省水利科学院长清实验基地设计的模块化组合湿地系统为研究对象,通过季节周期变化试验,探讨组合人工湿地系统对农村生活污水的BOD₅、COD、SS、NH₄-N、TN、TP去除效果及温度变化对去除效果的影响,结果表明:

1) 设计的三级串联组合模块化湿地系统对农村生活污水具有较高的去除效果,对BOD₅、COD、SS、NH₄-N、TN、TP的平均去除率为90.4%、83%、92.9%、78.5%、78%、82.7%。

2) 组合湿地系统对SS的去除效果基本不受季节变化影响,BOD₅、COD、NH₄-N、TN、TP的去除主要与湿地植物及土壤微生物的代谢和活性有关,去除能力随季节变化为夏季>秋季>春季>冬季。

3) 利用该组合湿地系统处理农村生活污水,处理后的污水各项指标一年中大部分时间基本符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)IV类标准,为我国利用人工湿地处理农村生活污水提供了借鉴。

参考文献

- [1] 何利华,王守富.人工湿地技术处理农村生活污水效果研究[J].当代化工,2019,48(12):2754-2757,2761.
- [2] 住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.农村生活污水处理工程技术标准:GB/T51347-2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [3] 国家环保总局.水和废水监测分析方法[M].第四版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [4] 高原.深度脱氮除磷水培植物净化床系统的应用研究[D].西南科技大学,2018.
- [5] 邹渝,李云祯.不同类型人工湿地对生活污水的净化效果[J].江苏农业科学,2017,45(7):252-257.

(责任编辑 崔春梅)