

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.14.012

农村污水多反应区生物-生态组合工艺设计及应用

刘建伟^{1,2}, 迟名佳^{1,2}, 田洪钰^{1,3}, 史世强^{1,2}

(1. 北京建筑大学 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 3. 中国矿业大学<北京> 化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对农村污水产生分散及水量水质波动大的特点,设计出多反应区生物-生态组合处理工艺,并在北京市某村庄进行了工程应用。工程设计处理规模为 $3.0\text{ m}^3/\text{d}$,工艺主体为多级生物接触+反硝化滤池+生态滤池。其中,多级生物接触单元采用厌氧接触、兼氧接触及好氧接触工艺,反硝化滤池单元采用后置反硝化接触工艺。运行结果表明,该工程出水指标满足《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)中景观湿地环境用水水质要求。该工程的直接运行费用为 $0.99\text{ 元}/\text{m}^3$,具有较好的经济性。

关键词: 农村污水; 生物-生态组合工艺; 多级生物接触氧化; 反硝化滤池

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)14-0075-05

Design and Application of a Biological-Ecological Combined Process with Multiple Reaction Zones for Rural Wastewater Treatment

LIU Jian-wei^{1,2}, CHI Ming-jia^{1,2}, TIAN Hong-yu^{1,3}, SHI Shi-qiang^{1,2}

(1. *Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China*; 2. *Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China*; 3. *School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China*)

Abstract: Decentralized rural sewage is characterized by large fluctuation of water quantity and quality. This paper designed a biological-ecological combined process with multiple reaction zones and applied it in a village of Beijing. The design treatment scale of the project is $3.0\text{ m}^3/\text{d}$, and the main process consists of multi-stage biological contact oxidation, denitrification filter and ecological filter. Among them, the multi-stage biological contact oxidation consists of anaerobic contact, facultative contact and aerobic contact processes, and the denitrification filter adopts post-denitrification contact process. The effluent quality met the water quality requirements for landscape wetland environment in *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Scenic Environment Use* (GB/T 18921-2019). The direct operational cost of the project is $0.99\text{ yuan}/\text{m}^3$, showing a good economic benefit.

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102004)

通信作者: 刘建伟 E-mail: liujianwei@bucea.edu.cn

Key words: rural wastewater; biological-ecological combined process; multi-stage biological contact oxidation; denitrification filter

开展农村污水治理,对于改善农村人居环境和加快建设生态宜居乡村具有重要意义。截止到2020年12月31日,国内的农村污水处理率尚不足50%,其中,建制镇和农村的污水处理率分别仅为65.35%和34.87%^[1],农村污水治理问题亟需得到重视^[2]。

农村污水具有产生分散、不易收集、水量和水质波动大等特点^[3],常规单一A/O、MBR、人工湿地及其简单组合技术已经在农村分散污水处理中得到一定应用。然而,由于处理效率、运行稳定性等影响,单一或简单组合处理技术在农村污水分散处理中的应用受到一定的限制^[4-6]。

北京市某村庄污水处理采用了多级生物接触+反硝化滤池+生态滤池的多反应区生物-生态组合工艺,可为同类农村污水分散处理工程的设计和运行提供借鉴。

1 工程设计

1.1 设计水量、水质

该工程建设于北京市通州区某农村集市的厕所旁边,与常规农村污水相比,该工程进水中厕所污水占一定比例。该工程设计处理规模为 $3.0\text{ m}^3/\text{d}$,处理后的污水回用为景观湿地环境用水,出水水质执行《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)中的景观湿地环境用水标准。工程设计进、出水水质如表1所示。

表1 工程设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of the project

项目	pH	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N / (mg·L ⁻¹)	TN / (mg·L ⁻¹)	TP / (mg·L ⁻¹)
进水	6.0~9.0	200~300	60~90	80~120	2.0~6.5
出水	6.0~9.0	10	5	15	0.5

1.2 工艺流程

该工程的具体工艺流程见图1。

污水经收集后首先进入调节预沉池,该池由原三格式化粪池的第三格改造而成,可调节进水水量和均化水质。出水进入多反应区生物-生态组合处理设备。该设备的主体工艺为多级生物接触+反硝

化滤池+生态滤池。设备总占地面积为 7.05 m^2 ,整体安装于水平硬化地面上。

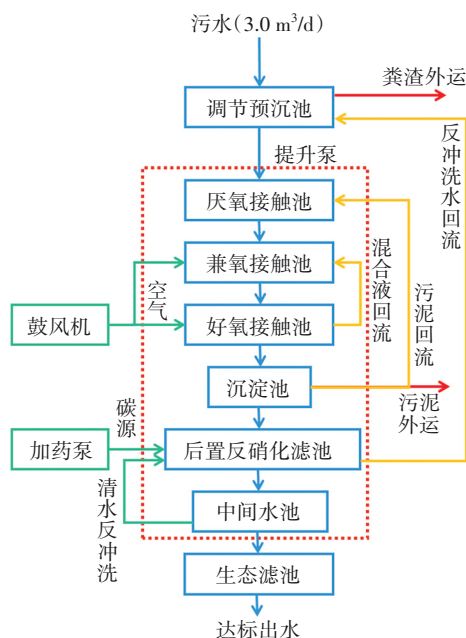


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

多级生物接触单元包括厌氧接触池、兼氧接触池和好氧接触池。好氧接触池和兼氧接触池中均布置微孔曝气管,总曝气量设计值为 40 L/min ,设计气水比分别为 $(10\sim20):1$ 和 $(2\sim10):1$ 。好氧接触池至兼氧接触池的混合液回流比和沉淀池至厌氧接触池的污泥回流比分别设置为 $100\%\sim200\%$ 和 $80\%\sim120\%$,后置反硝化滤池液位计高位报警或达到设定时间后,启动射流泵进行气水反冲洗,反冲洗水回流至调节预沉池。后置反硝化滤池中投加乙酸钠,以保证总氮的去除效果。该工程的出水再经消毒工艺处理后回用为景观湿地环境用水。

2 主要处理单元设计

该工程主要由调节预沉池、多级生物接触/反硝化滤池和生态滤池三部分组成,其中,调节预沉池采用地埋式,多级生物接触/反硝化滤池和生态滤池单元设置在地面上。多级生物接触/反硝化滤池单元外部设置保温层,生态滤池单元设计运行时间为每年的3月—10月。该工程污水处理设施照片见图2。



图2 污水处理设施照片

Fig.2 Photos of the wastewater treatment facilities

2.1 调节预沉池

在不同时间内,农村污水的排放量差异较大。设置调节预沉池能够实现污水水量和水质的均衡调节,设计平面尺寸为 $1.00\text{ m}\times 1.50\text{ m}$,有效水深为 1.50 m ,有效容积为 2.25 m^3 ,可调容积(限高水位与泵吸水口间的容积)为 2.00 m^3 ,污水停留时间为 18 h 。同时,通过在管路中设置时间控制开关和浮球阀执行器协同控制调节预沉池向多级生物接触/反硝化滤池单元的均匀进水,以防止水量、水质波动对污水处理系统产生冲击^[7]。

2.2 多级生物接触/反硝化滤池单元

多级生物接触/反硝化滤池单元平面布置如图3所示。

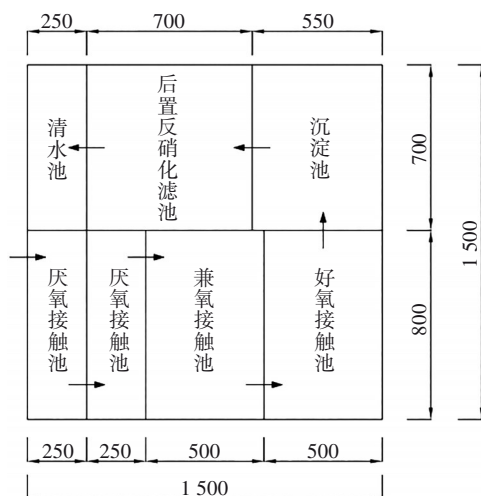


图3 多级生物接触/反硝化滤池单元平面布置

Fig.3 Plane layout of the multi-stage biological contact/denitrification filter unit

多级生物接触/反硝化滤池单元的设计尺寸为 $1.50\text{ m}\times 1.50\text{ m}\times 2.00\text{ m}$,超高为 0.30 m 。该单元主要由厌氧接触池、兼氧接触池、好氧接触池、沉淀池和后置反硝化生物滤池组成。各池体之间由导流管连接,水头逐级减少 20 mm 。各池内水流均采用

上向流,以减少污泥沉降。厌氧接触池、兼氧接触池、好氧接触池和反硝化生物滤池内均填充组合填料,填料填充高度均为 1.50 m ,填充密度按比表面积 $2000\text{ m}^2/\text{m}^3$ 设计。

厌氧接触池:分为2个格室,每个格室平面尺寸均为 $0.80\text{ m}\times 0.25\text{ m}$,池内污水上升流速设计为 $0.7\sim 1.5\text{ m/h}$,水力停留时间设计为 $4\sim 6\text{ h}$ 。设置由沉淀池至厌氧接触池的污泥回流,以保持池内较高的污泥浓度,回流污泥在第1格室底部与进水混合。

兼氧接触池:厌氧接触池出水与好氧接触池回流水混合后进入兼氧接触池。兼氧接触池仅进行微曝气,以防止污泥沉淀,气水比设计为 $(2\sim 10):1$,保证池内 DO 在 $0.5\sim 1.0\text{ mg/L}$ 。兼氧接触池通过回流和微曝气量的控制实现池内缺氧和好氧条件的变换,由此创造必要的反硝化条件。兼氧接触池平面尺寸为 $0.80\text{ m}\times 0.50\text{ m}$,有效容积为 0.72 m^3 ,水力停留时间设计为 5.76 h 。

好氧接触池:好氧接触池的尺寸、面积、有效容积及水力停留时间设计值均与兼氧接触池相同。该池内气水比设计为 $(10\sim 20):1$, DO 设计值为大于 2 mg/L 。出水回流至兼氧接触池,回流周期设计为 $2.5\text{ min}/30\text{ min}$,回流流量为 $3.0\text{ m}^3/\text{h}$ 。

沉淀池:为矩形竖流沉淀池,设计平面尺寸为 $0.70\text{ m}\times 0.55\text{ m}$,中心筒流速设计为 0.03 m/s 。进水经布水器布水后在池体内自下而上流动,池体底部锤形泥斗的有效容积为 120 L ,污泥回流周期设计为 $3\text{ min}/60\text{ min}$,流量设计值为 $3.0\text{ m}^3/\text{h}$ 。沉淀池表面负荷设计为 $0.40\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,停留时间为 2 h 。

后置反硝化滤池:设计平面尺寸为 $0.70\text{ m}\times 0.70\text{ m}$,由下至上分别为配水区(高度 300 mm)、承托层(高度 100 mm ,鹅卵石,粒径 $8\sim 16\text{ mm}$)、滤层(高度 500 mm ,双层圆形烧结黏土陶粒,下层陶粒粒径 $4\sim 8\text{ mm}$,上层陶粒粒径 $3\sim 5\text{ mm}$)和重质压床滤料层(高度 150 mm ,均质石英砂,粒径 $2\sim 4\text{ mm}$)。滤池的空床接触时间为 2.6 h ,滤速为 0.25 m/h 。滤池反冲水量为 $1.5\text{ m}^3/\text{次}$ 。该滤池内主要发生亚硝酸盐和硝酸盐的反硝化反应,从而实现污水中总氮的去除。

2.3 生态滤池

生态滤池设计为水平潜流人工湿地,过滤区设置三个流槽。

生态滤池结构如图4所示。

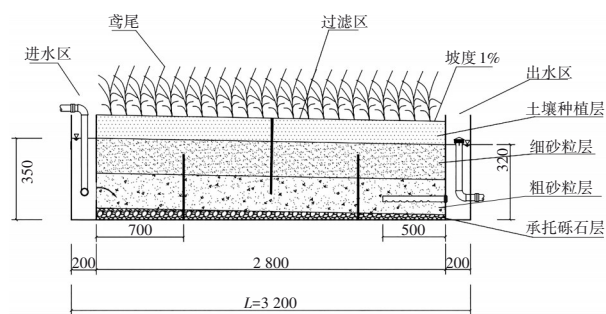


图4 生态滤池结构示意图

Fig.4 Structure schematic diagram of ecological filter

生态滤池由进水区、过滤区和出水区三部分组成,滤池总设计尺寸为 $L \times B = 3.20 \text{ m} \times 1.50 \text{ m}$,表面水力负荷为 $0.25 \sim 0.40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其中,进水区和出水区长度均为 0.20 m 。图4为其中1个流槽的布置形式,每个流槽长度为 2.80 m ,宽度为 0.50 m ,且流槽中设置上、下交替折流板以延长水流流程,同时减少滤池的“死区”体积。过滤区自上而下分别为土壤种植层(高度 100 mm)、细砂粒层(高度 150 mm ,粒径 $2 \sim 4 \text{ mm}$)、粗砂粒层(厚度 150 mm ,粒径 $4 \sim 8 \text{ mm}$)和承托砾石层(高度 $20 \sim 50 \text{ mm}$,粒径 $16 \sim 32 \text{ mm}$)。其中,承托砾石层前、后端的铺设厚度差为 30 mm ,沿水流方向的滤层坡度为 1% 。各填料层之间利用无纺布进行分隔,以防止填料层的相互错层。土壤种植层选择种植抗风力、耐污以及具有较高氮磷吸收能力的挺水植物鸢尾,种植密度为 $17 \sim 18 \text{ 株}/\text{m}^2$ 。生态滤池单元通过植物的吸收、吸附以及基质的物理过滤作用实现对多级生物接触/反硝化滤池单元出水中污染物的进一步去除^[9]。

3 运行效果

该工程于2021年4月初开工建设,4月中旬竣工并投入使用。在处理设施运行的第30天, BOD_5 去除率达 95.1% ,且较为稳定;好氧接触池 MLSS 为 $4\,032 \sim 5\,120 \text{ mg/L}$;各接触池的填料挂膜效果较好,出水清澈且无可视悬浮物。表明该工程的多级生物接触/反硝化滤池单元成功启动。

稳定运行期各单元对污染物的去除效果见表2。

表2表明,在稳定运行期,该工程对进水 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 和 TP 的平均去除率分别为 95.1% 、 94.2% 、 91.6% 和 97.9% ,出水 BOD_5 、 TN 和 TP 指标均满足《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)中景观湿地环境用水水质要

求,表明该工程对农村污水具有较好的处理效果。

表2 各单元对污染物的去除效果

Tab.2 Removal effect of pollutants by each unit

项 目	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			
	BOD_5	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
调节预沉池	72~182	35.8~61.8	54.6~78.0	1.3~12.8
多级生物接触/反硝化滤池	7.3~9.4	1.8~5.0	8.7~12.7	0.8~2.1
生态滤池	5.3~7.9	1.6~4.1	3.8~7.4	0~0.2

4 工程经济分析

本工程投资为 4.50 万元,主要包括设备基础、设备加工及安装费用,单位投资为 1.50 万元/ m^3 。

本工程污水处理设备运行用电量如表3所示。

表3 污水处理设备用电量

Tab.3 Electricity consumption of wastewater treatment equipment

项 目	功率/ kW	折工时/ h	能耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{d}^{-1})$
污水提升泵	0.37	1	0.37
污水回流泵/射流泵	0.37	2	0.74
污泥回流泵	0.50	1	0.50
风机	0.15	8	1.20
自控设备及其他	0.06	24	1.44
合计			4.25

该工程日常运行费用包括运行电费、药剂费和耗材费。其中运行电费为 0.71 元/ m^3 [电价按 0.50 元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计],药剂费为 0.19 元/ m^3 ,组合填料使用寿命 5 年,折合耗材费为 0.09 元/ m^3 。合计年运行费用为 $1\,084$ 元,直接运行成本为 0.99 元/ m^3 (每年以 365 d计)。

5 结论

该农村污水处理工程采用基于多级生物接触+反硝化滤池+生态滤池的多反应区生物-生态组合工艺。其中,多级生物接触单元采用厌氧接触、兼氧接触及好氧接触工艺。在稳定运行期,工程出水指标满足《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)中景观湿地环境用水水质要求,取得了较好的工程效果。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴 2020 [M]. 北京:中国统计出版社,2021.

- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. China Urban-Rural Construction Statistical Yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese).
- [2] 王俊能,赵学涛,蔡楠,等. 我国农村生活污水污染排放及环境治理效率[J]. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2665-2674.
- WANG Junneng, ZHAO Xuetao, CAI Nan, *et al.* Pollution discharge and environmental treatment efficiency of rural domestic sewage in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33 (12): 2665-2674(in Chinese).
- [3] 王海波,陈怡,高峰. 北京市某农村污水治理设计案例分析及总结[J]. 给水排水, 2020, 46(9): 32-36.
- WANG Haibo, CHEN Yi, GAO Feng. Rural sewage treatment project and design experience in Beijing [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(9): 32-36 (in Chinese).
- [4] 付昆明,杨宗玥,刘凡奇,等. 碳源种类对农村污水反硝化过程脱氮效果的影响[J]. 环境工程学报, 2020, 14(9): 2331-2338.
- FU Kunming, YANG Zongyue, LIU Fanqi, *et al.* Effect of carbon sources on nitrogen removal in denitrification process of rural wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14 (9): 2331-2338 (in Chinese).
- [5] 黄锦楼,陈琴,许连煌. 人工湿地在应用中存在的问题及解决措施[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 401-408.
- HUANG Jinlou, CHEN Qin, XU Lianhuang. Problems and countermeasures in the application of constructed wetlands [J]. Environmental Science, 2013, 34 (1): 401-408(in Chinese).
- [6] 张巍,路冰,刘峥,等. 北方地区农村生活污水生态稳定塘处理示范工程设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 49-52.
- ZHANG Wei, LU Bing, LIU Zheng, *et al.* Demonstration project design of ecotypic stabilization pond for rural domestic sewage treatment in northern China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(6): 49-52(in Chinese).
- [7] 刘建伟,康心悦,岳鹏,等. 城市生活垃圾综合处理厂渗滤液全量化处理工程设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(10): 70-75.
- LIU Jianwei, KANG Xinyue, YUE Peng, *et al.* Project design of total quantitative treatment of leachate of urban municipal waste comprehensive treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (10): 70-75 (in Chinese).
- [8] 方源,谢培,谭林,等. 生境对挺水植物生长的影响及其反馈作用机制综述[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2610-2619.
- FANG Yuan, XIE Pei, TAN Lin, *et al.* A review of the influence of habitat on emergent macrophyte growth and its feedback mechanism [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2610-2619 (in Chinese).
- [9] 潘伟亮,练春江,曹云鹏,等. 生态滤池工艺处理农村生活污水的季节特征分析[J]. 水处理技术, 2021, 47(3): 106-109.
- PAN Weiliang, LIAN Chunjiang, CAO Yunpeng, *et al.* Seasonal characteristics analysis of ecological filter in the treatment of rural domestic sewage [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47 (3): 106-109 (in Chinese).

作者简介:刘建伟(1979-),男,山东济宁人,博士,教授,主要研究方向为分散污水处理技术。

E-mail:liujianwei@bucea.edu.cn

收稿日期:2022-07-08

修回日期:2022-09-25

(编辑:孔红春)

科学防御水旱灾害,有效促进人水和谐