

基于土壤渗滤技术的农村生活污水治理及资源化利用研究

赵龙 胡玲 肖爽

湖北寰孝检测技术有限公司, 中国·湖北 孝感 432100

摘要: 农村生活污水具有分散性强、水量波动大、收集难度高的特点, 是当前农村人居环境整治中的重点与难点。土壤渗滤技术作为典型的分散式土地处理技术, 依托土壤-微生物-植物复合生态系统实现污染物逐级降解, 具备建设成本低、运行维护简便、污染物去除效果稳定的优势, 十分契合我国农村地区的治理需求, 自 20 世纪 90 年代引入国内以来已得到广泛应用。

关键词: 农村生活污水; 土壤渗滤技术; 污染物去除; 分散式治理; 资源化利用

Research on rural domestic sewage treatment and resource utilization based on Soil Infiltration Technology

Zhao Long, Hu Ling, Xiao Shuang

Hubei Huanxiao Detection Technology Co., Ltd., China Hubei Xiaogan 432100

Abstract: Rural domestic sewage has the characteristics of strong dispersion, large water volume fluctuation and high collection difficulty, which is the key and difficult point in the current rural residential environment renovation. As a typical decentralized land treatment technology, soil infiltration technology relies on the soil microorganism plant complex ecosystem to realize the gradual degradation of pollutants. It has the advantages of low construction cost, simple operation and maintenance, and stable pollutant removal effect. It is very suitable for the treatment needs of rural areas in China, and has been widely used since it was introduced into China in the 1990s.

Keywords: Rural domestic sewage; Soil infiltration technology; Pollutant removal; Decentralized governance; Resource utilization

0 引言

土壤渗滤技术属于土地处理技术的范畴, 其核心是将污水有控制地投配到土壤表层, 通过土壤颗粒的物理截留、胶体吸附、微生物的分解转化以及植物根系的吸收利用等多重作用, 实现污水中污染物的深度净化。早在上世纪, 欧美等发达国家便已将该技术广泛应用于乡村分散式污水处理, 形成了较为成熟的建设标准与管护体系。我国对土壤渗滤系统的研究与应用始于 20 世纪 90 年代, 经过三十余年的发展, 技术工艺不断优化, 应用场景持续拓展, 已成为我国农村生活污水治理的重要技术选项。

1 农村地区土壤渗滤技术的现存瓶颈

尽管土壤渗滤技术具备诸多优势, 但在长期运行实践中, 仍存在三类较为突出的问题, 制约了技术的推广与效能发挥。

首先是系统脱氮效率偏低的问题, 这也是当前土壤渗

滤技术面临的最核心短板。农村生活污水本身存在碳氮比波动大的特点, 部分地区污水中有机碳含量不足, 难以支撑反硝化过程的顺利进行。同时, 传统土壤渗滤系统内部的氧化还原环境难以精准调控, 好氧硝化与厌氧反硝化的空间与时间匹配度不足, 往往硝化过程较为充分, 但反硝化过程受碳源与厌氧环境限制, 导致大量硝态氮在系统内积累, 总氮去除率难以稳定达到排放标准。脱氮效果不佳不仅影响出水水质, 还可能带来后续的环境风险。

其次是系统运行带来的次生环境影响。第一类环境风险是污水渗出问题, 当系统进水负荷超过土壤渗透能力, 或是因堵塞导致下渗速率下降时, 污水可能从地表漫流, 污染周边的沟渠与农田, 影响农村人居环境。第二类是温室气体排放问题, 土壤渗滤系统内部存在厌氧区域, 在有机物降解与反硝化过程中, 会产生甲烷、氧化亚氮等温室气体, 若系统设计与运行不当, 温室气体排放量会显著增

加,带来气候环境影响。第三类是硝态氮淋滤风险,当系统反硝化不充分时,硝态氮会随下渗水流向深层土壤迁移,最终进入地下水,造成地下水硝酸盐含量超标,威胁饮用水安全^[2]。

第三类突出问题是系统的堵塞问题,这是影响土壤渗滤系统使用寿命的关键因素。系统堵塞可分为物理堵塞、生物堵塞与化学堵塞三类,其中物理堵塞最为常见,污水中的悬浮固体不断在表层土壤孔隙中积累,填充孔隙空间,导致土壤渗透系数持续下降。生物堵塞则是由于土壤中微生物大量繁殖,形成的生物膜与胞外聚合物堵塞土壤孔隙,尤其在连续淹水的运行模式下,生物堵塞问题会更为严重。

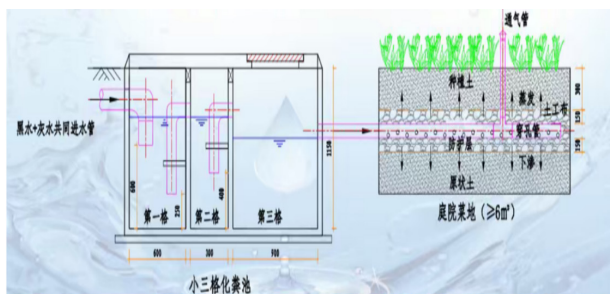


图1 单户小三格化粪池

2 土壤渗滤系统处理效能的优化提升路径

2.1 运行模式的优化调整

针对系统脱氮效率低与易堵塞的问题,运行模式的优化是最为经济有效的改进手段,其中干湿交替的运行方式已被大量实践证明具有显著效果。所谓干湿交替运行,是指系统周期性地进淹水投配与落干休灌,在湿期,污水持续进入系统,土壤处于淹水状态,逐步形成厌氧环境,为反硝化作用创造条件;在干期,系统停止进水,空气逐渐进入土壤孔隙,恢复好氧环境,一方面促进硝化细菌的生长与氨氮的硝化反应,另一方面好氧环境可加速降解截留在土壤中的悬浮物与有机质,减少孔隙堵塞物的积累。

通过合理调控干湿周期的比例,可以有效协调整个系统的硝化与反硝化过程,兼顾氨氮与总氮的去除效果,同时缓解系统的堵塞问题,延长系统使用寿命。在实际应用中,干湿周期的设置需要结合进水水质、土壤质地与气候条件进行调整,例如夏季温度高、微生物活性强,可适当缩短干期时长;冬季温度低,微生物代谢缓慢,则需要延长干期保障硝化效果。除了干湿交替运行之外,合理控制水力负荷也是保障系统稳定的关键,需根据土壤渗透系数确定每日的投配水量,避免因负荷过高引发堵塞与污水漫流问题^[3]。

2.2 填料改性与复合填料体系构建

传统土壤渗滤系统多采用当地原生土壤作为主要填料,往往存在渗透系数低、吸附容量有限、微生物附着能力不足等问题,因此通过填料改性与构建复合填料体系,是强化系统处理效能的重要技术方向。当前的研究与应用中,常向原生土壤中掺入沸石、蛭石、生物炭、钢渣、粉煤灰等功能性填料,不同填料可发挥不同的强化作用。例如沸石具有发达的孔隙结构与较强的阳离子交换能力,可显著提升对氨氮的吸附效果;生物炭比表面积大,既能吸附磷素与有机污染物,又能为微生物提供良好的附着载体,同时还可调节土壤的通透性;钢渣中含有大量钙、铁离子,可通过化学沉淀作用强化磷的去除。

单一改性填料往往只能强化某一类污染物的去除效果,因此将多种填料与原生土壤按一定比例复配,构建复合填料体系,可实现氮、磷、有机物等多类污染物的协同强化去除。需要注意的是,复合填料的配比并非固定不变,不同地区的土壤质地不同、进水水质存在差异,对应的最优填料配比也有所区别。在实际工程应用前,需要通过小试与中试试验,结合当地的实际条件确定最佳的填料配比,在保障处理效果的同时,兼顾工程成本与施工便利性。此外,优先选用当地易得的工业废渣、农业废弃物制备功能性填料,可进一步降低系统建设成本,更符合农村地区的实际需求。

2.3 预处理优化与碳源调控策略

前端预处理的完善是保障土壤渗滤系统长期稳定运行的基础。农村生活污水中含有大量悬浮物与大颗粒杂质,若直接进入渗滤系统,会快速造成表层土壤的物理堵塞。因此,在污水进入渗滤系统前,需设置格栅、沉淀池、化粪池等预处理设施,去除大部分悬浮固体与大颗粒有机物,减轻系统的处理负荷与堵塞风险。部分地区采用好氧预处理装置与土壤渗滤系统联用的工艺,好氧预处理可有效降解进水中的大部分有机物,提升出水的稳定性,但同时也会消耗污水中大量的有机碳,导致后续渗滤系统反硝化阶段碳源不足,进一步加剧脱氮效率低下的问题。

针对这一问题,适当补充外部碳源是提升系统脱氮能力的有效手段。在碳源选择上,除了传统的液体碳源之外,更适合农村地区的是采用秸秆、木屑、玉米芯等农业废弃物作为缓释碳源。这类农业废弃物在农村地区来源广泛、成本低廉,将其埋设在渗滤系统的厌氧层中,可缓慢释放有机碳,为反硝化细菌持续提供电子供体,促进反硝化反应的进行,显著提升总氮去除率。

3 农村生活污水资源化利用的模式构建与实践方向

3.1 因地制宜的分区治理体系构建

我国农村地域广阔，不同地区的地形地貌、气候条件、居住布局与经济水平差异巨大，农村生活污水治理不能采用统一的模式，必须坚持因地制宜、分区分片的原则，结合每个村落的实际情况选择适配的土壤渗滤技术模式。对于地势平坦、居住相对集中的平原村落，可采用集中式的土壤渗滤处理系统，将全村的生活污水收集后统一处理，处理后的出水可集中回用至周边农田；对于丘陵与山地村落，居民居住分散，管网铺设难度大，则适合采用分户式或联户式的小型地下渗滤系统，利用农户房前屋后的闲置土地建设，无需大规模铺设管网，降低工程投入^[4]。

3.2 生产生活一体化的循环利用模式

在源头控制环节，以农村改厕与污水收集为核心，推行黑灰水分离的收集方式。黑水即厕所污水，污染物浓度高，经化粪池预处理后进入土壤渗滤系统进行深度处理；灰水即洗衣、厨房、洗浴废水，污染物浓度相对较低，经简单处理后可直接用于庭院灌溉，降低系统的处理负荷。在过程治理环节，打通村内的自然水系，实施雨污分流改造，充分发挥村内沟渠、坑塘的自然净水功能，将其作为土壤渗滤系统的配套生态缓冲单元，进一步净化出水水质，同时利用村内闲置土地与林带的蓄水与污染吸收能力，构建多级生态净化体系。在末端利用环节，将处理达标后的再生水用于生态庭院浇灌、农田灌溉与田园景观补水，结合美丽田园与生态庭院建设，实现污水治理与农业生产、乡村景观提升的有机结合，让污水治理成果直接惠及村民。

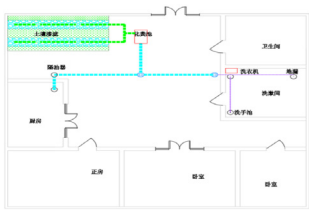


图 2 土壤渗滤系统布置示意图

4 结语

土壤渗滤技术作为一种适配农村分散式污水治理的生态处理技术，在我国农村具有广阔的应用前景。在未来的应用与发展中，土壤渗滤技术不能仅停留在污水达标处理的层面，更应向资源化利用的方向延伸。结合我国农村的地域特征与生产生活需求，构建因地制宜、分区分片的治理模式，打造生产生活一体化的污水循环利用体系，将污水治理与农业生产、乡村生态建设相结合，可充分发挥技术的生态效益与经济效益。

参考文献：

[1] 王国栋, 谢美连, 张栋. 农村生活污水治理出户管防止返臭设计探究[J]. 建筑科技, 2026,10(7):112-115.

[2] 姜云鹏, 陈康康, 刘莎等. 农村生活污水治理设施长效运维机制的构建与实践效果分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2026,7(13):168-170.

[3] 陈健纯. 农村生活污水集中处理与资源化利用的原则和实践路径[J]. 农村科学实验, 2026(12):100-102.

[4] 徐宁静, 李云, 李志涛等. 农村生活污水治理中土壤渗滤系统堵塞问题研究进展[J/OL]. 环境工程技术学报, 1-15[2026-08-19].

作者简介：赵龙（1996.02-），男，汉族，湖北襄阳，学士，工程师，研究方向：环境工程。