



农村生活污水土壤渗滤系统处理技术研究进展

王淞民, 张春雪, 刘丽媛, 曹昊宇, 彭皓, 魏孝承, 郑向群

引用本文:

王淞民,张春雪,刘丽媛,曹昊宇,彭皓,魏孝承,郑向群. 农村生活污水土壤渗滤系统处理技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 293-304.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0487>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种无动力·蒸发式农村生活污水处理新技术及其工程应用

陈咄圳, 赵建军, 郑向群

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 570-574 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0264>

巢湖流域厌氧-土壤净化床工艺处理农村生活污水生态补偿标准测算

丁健, 吴晓斐, 黄治平, 郑宏艳, 米长虹, 郑宏杰

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 584-591 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0205>

关于“十四五”农村生活污水处理的思考

贾小梅, 于奇, 王文懿, 赵芳, 董旭辉

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 623-626 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0133>

太湖流域农村生活污水处理技术模式调查和分析——以江苏省为例

张亚平, 王海芹, 印杰, 管永祥, 龙珍

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 483-491 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0002>

CAST一体化设备处理农村生活污水工况研究

杨大川, 黄治平, 郑宏艳, 米长虹, 丁健

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 575-583 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0142>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王淞民, 张春雪, 刘丽媛, 等. 农村生活污水土壤渗滤系统处理技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 293-304.
WANG S M, ZHANG C X, LIU L Y, et al. Research progress in treatment technology of rural domestic sewage using soil infiltration system [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(2): 293-304.



开放科学 OSID

农村生活污水土壤渗滤系统处理技术研究进展

王淞民, 张春雪, 刘丽媛, 曹昊宇, 彭皓, 魏孝承, 郑向群*

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:土壤渗滤系统是一种深度处理农村分散式生活污水的土地处理技术, 由于其运行简单、建设成本低以及对污染物去除率高等优点受到越来越多的关注。我国最早于20世纪90年代开始对土壤渗滤系统进行研究使用, 目前土壤渗滤系统在我国农村应用十分广泛。本文简述了土壤渗滤系统的概念、污染物(氮、磷、化学需氧量、固体悬浮物和致病微生物)去除机理及其在国内外应用现状, 并概括分析了土壤渗滤系统存在的氮去除率低、对环境产生影响(污水渗出、温室气体排放和硝态氮淋滤)和系统堵塞等问题。最后结合国外农村污水治理的成功经验对土壤渗滤系统在我国的发展应用前景进行展望。

关键词:土壤渗滤系统; 农村生活污水; 氮去除; 环境影响; 系统堵塞

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2022)02-0293-12 doi: 10.13254/j.jare.2021.0487

Research progress in treatment technology of rural domestic sewage using soil infiltration system

WANG Songmin, ZHANG Chunxue, LIU Liyuan, CAO Haoyu, PENG Hao, WEI Xiaocheng, ZHENG Xiangqun*

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: The soil infiltration system is a land treatment technology that intensely treats the rural decentralized domestic sewage. Due to its simple operation, low construction cost, and high pollutant removal rate, it has attracted increasing attention. Although our country first began to study and utilize these soil infiltration systems in the 1990s, they are still being widely used in the rural areas in China. This paper briefly introduces the concept of soil infiltration system, pollutant removal mechanism (nitrogen, phosphorus, chemical oxygen demand, suspended solids, and pathogenic microorganisms), and its application in our home country and abroad. Additionally, it summarizes the existing problems, such as nitrogen removal, environmental impact (sewage effusion, greenhouse gas emission, and nitrate nitrogen leachate), and system clog. Finally, in combination with the successful implementation of foreign rural sewage treatment, the development prospect of soil infiltration system in China is forecast.

Keywords: soil infiltration system; rural domestic sewage; nitrogen removal; environmental impact; system clog

近年来,随着农村经济快速增长,我国农村居民生活水平不断提高,同时农村水环境问题也日益凸显。我国农村污水来源主要包括厕所粪污污水和厨房洗涤污水等,其中洗涤污水占农村污水总量的50%^[1],洗涤污水中含有大量的磷和阴离子表面活性剂,如烷基苯磺酸钠(LAS),这些物质进入水体后会增加水体中磷负荷,造成水体污染,其中LAS进入水

体后会使水体表面出现持久性泡沫,甚至会导致水体发臭^[2]。目前农村污染物排放量已占全国污染物排放量的一半,其中化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)是主要的污染物。

农村资源较分散,污水集中收集处理的设施不完善。据统计2019年全国对生活污水进行处理的乡(镇)为3 156个,仅占全国乡(镇)总数的33.30%^[3],此

收稿日期: 2021-08-06 录用日期: 2021-10-15

作者简介: 王淞民(1997—),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,研究方向为农业废弃物资源化利用。E-mail: wangsongmin731@163.com

*通信作者: 郑向群 E-mail: zhengxiangqun@126.com

基金项目: 基本科研业务费(院统筹)-科技创新联盟建设专项(2021年度)

Project supported: Basic Research Business Expenses(College Coordination)-Science and Technology Innovation Alliance Construction Project(2021)

外村民们缺乏环保意识,将未处理的生活污水随意排放,使得大量氮磷等污染物进入水体,造成水体污染,直接影响地表水环境质量^[4]。

土壤渗滤系统是一种处理农村分散式污水的装置^[5],其原理简单、建造速度快、造价低廉且无害化效果好^[6],在我国农村地区被广泛使用^[7]。鉴于此,本文从土壤渗滤系统的概念及其对污染物去除机理、国内外应用现状和存在的问题三方面进行介绍,最后结合国外污水治理的成功经验对其进行展望。

1 土壤渗滤系统概念及其对污染物去除机理

1.1 土壤渗滤系统概念

土壤渗滤系统是一种处理农村分散式生活污水的处理工艺^[8],是以生态学为基本原理,将好氧-厌氧相结合的一种土地处理技术^[9]。一般具体做法是通过人工的方法直接将生活污水或将经过化粪池等预处理后的生活污水投配到具有特定结构及渗透性能的地下土壤中,污水通过毛细管浸润和土壤的渗滤作用,利用土壤-植物-微生物这一天然的净化系统,经过物理沉淀、截留,化学吸附和微生物降解等作用^[10]使污水得到净化。土壤渗滤系统属于原位污水处理系统(Onsite wastewater treatment system, OWTS)^[11],其本质是利用填料的吸附和土壤的天然净化机制来处理污水。土壤渗滤系统与其他农村分散式污水处理工艺相比,具有造价低廉、处理效果明显、不易滋生蚊蝇、运行管理简单且美化环境等优点^[12-14]。近些年在我国一些农村地区,土壤渗滤系统经常被用来处理农村生活污水^[15]。

1.2 土壤渗滤系统对农村生活污水中污染物去除机理

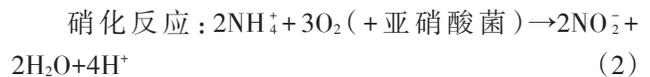
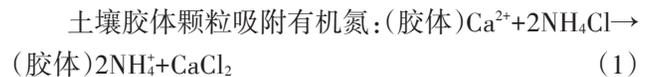
农村生活污水主要由黑水和灰水组成。黑水指的是厕所粪便污水,由于粪便污水中存在大量有机物、溶解性无机物及氮磷等物质,如果村民们将不经过任何处理的粪污污水直接就地排放,会导致农村水环境恶化^[16]。灰水主要包括厨余用水和洗浴、洗涤污水,其中所含的化学成分和磷元素也是造成农村水环境变差的主要因素。目前农村生活污水一般通过地下管道直接进入化粪池进行预处理^[17],但预处理后的尾水中也含有一定的致病菌、粪大肠菌群和蛔虫卵等致病物质,如果直接就地还田利用或者溢流进入原地表层土壤^[18],会导致环境污染,甚至可能引发疾病传播。如果将经三格化粪池预处理^[18]的农村生活污水再利用土壤渗滤系统进行进一步处理,就可以将未处理掉的污染物和细菌去除,达到无害化效果^[6]。

传统土壤渗滤系统从纵向切面来看共分为三层:配水层(上部)、处理层和出水层(底部)^[19]。其中处理层是处理污染物的主要区域,处理层一般大于600 mm^[20]。农村生活污水经过化粪池预处理后自流入配水层,经土壤毛细作用进入污水渗滤系统处理层,处理层通过土壤渗滤作用能够处理掉生活污水中大部分有机物以及85%以上的COD、TP和悬浮性固体(SS)等污染物^[21]。

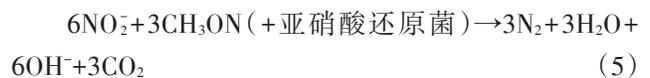
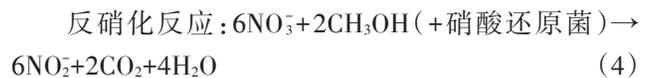
1.2.1 土壤渗滤系统对氮的去除

相较于其他污染物,土壤渗滤系统对氮的去除效果并不理想^[22]。土壤渗滤系统对氮的去除主要通过以下4种方式:氨氮挥发、土壤吸附、植物摄取以及微生物的硝化和反硝化作用,其中最主要的方式是微生物的硝化和反硝化作用^[23]。

生活污水中的氮主要由有机氮和氨氮(NH₄⁺)组成,其中氨氮约占总氮的75%~85%。生活污水进入土壤渗滤系统后,有机氮首先被基质截留或者进行沉淀,然后在微生物的作用下转化为氨氮,少量有机氮被微生物、植物同化吸收。由于土壤胶体颗粒带负电荷,所以带正电荷的氨氮极易被土壤胶体颗粒吸附^[24],被吸附下来的氨氮在硝化细菌的作用下发生硝化反应,生成NO₃⁻。其反应式如下:



随着硝化反应的进行,被土壤胶体颗粒吸附的氨氮逐渐减少,土壤胶体颗粒对氨氮的吸附处于未饱和状态,因而土壤胶体颗粒继续保持着对氨氮的吸附^[25]。由于土壤胶体颗粒无法吸附NO₃⁻,所以NO₃⁻继续向下迁移,一部分被植物根系吸收成为植物所需营养物质,另一部分则在微生物反硝化细菌的作用下发生反硝化反应^[12,26],生成N₂或者N₂O进而挥发^[27]。其反应式如下:



1.2.2 土壤渗滤系统对磷的去除

磷是造成水体富营养化及环境污染的重要因素。生活污水中的磷一般来自厕所粪污污水和洗涤污水等含有化学成分的物质,磷在生活污水中的含量约为

4~7 mg·L⁻¹[28]。

农村生活污水中的总磷一般以可溶性磷酸盐、可溶性有机磷、不溶性有机磷和不溶性磷酸盐的形式存在。土壤渗滤系统对总磷的去除包括植物根系吸收、土壤的吸附和沉淀以及生物作用等,其中土壤的吸附和沉淀是最主要的去除方式[29]。而农村生活污水经过化粪池等预处理之后,污水中的磷则主要以可溶性磷酸的形式存在。而土壤渗滤系统对可溶性磷酸盐的去除主要以土壤吸附和沉淀为主[30-31]。土壤对可溶性磷酸盐的吸附与土壤pH值有关,当土壤呈酸性时,土壤基质带有静电,所以与持有负电荷的磷酸盐发生反应,首先生成微沉淀形态的Ca₂-P,之后Ca₂-P进一步与土壤颗粒反应生成难溶性的Ca₈-P,最后Ca₈-P再进一步与土壤颗粒发生反应生成沉淀形态的Ca₁₀-P[30];当土壤呈碱性时,可溶性磷酸盐与Fe³⁺和Al³⁺生成沉淀形态的Fe-P和Al-P。此外,通过植物根系的吸收和生物的同化作用也可以去除农村污水中一部分磷[32],且去除的磷约占总磷的10%[31]。相关资料表明,通常土壤渗滤系统对磷的去除率高达90%,几乎没有出现磷饱和的情况[22],但是随着系统长时间运行,基质对磷的吸附达到饱和状态,系统对磷的去除效率开始降低,可能引发磷渗透的问题,并且目前没有技术可以解决此问题[33]。

目前国内外对土壤渗滤系统的研究多集中在脱氮方面,而除磷方面的研究却鲜有报道,有待进一步研究。

1.2.3 土壤渗滤系统对COD的去除

COD用于表征水中受还原性物质污染的程度,一般由有机碳组成,常作为有机物含量的指标。COD一般可分为可溶性COD和不可溶性COD。有机物的去除过程包括过滤、吸附和生物氧化等作用。当生活污水通过化粪池预处理后进入土壤渗滤系统时,附着在填料上的微生物会吸附可溶性COD,然后将其从大分子物质逐渐降解为小分子物质,最后以气体、糖和醛等物质的形式排出系统[32]。而不可溶性COD则通过截留、吸附和沉淀等方法进行去除[34]。

1.2.4 土壤渗滤系统对固体悬浮物的去除

生活污水中的固体物质(TS)由溶解性固体(DS)和悬浮性固体(SS)组成。SS是影响土壤渗滤系统去除氮磷等污染物的重要因素之一,其会对土壤渗滤系统内部结构通透性造成影响[35],直接影响系统内部复氧效果,从而引起系统内部微生物(如硝化反硝化细菌)数量及种类的变化,进而影响系统脱氮的能力。

农村生活污水经过化粪池预处理时一部分SS被截留,污染负荷降低。当污水进入土壤渗滤系统时,大部分SS会与系统中的土壤砾石等基质发生物理截留、化学沉淀等作用,少部分SS则在植物根系、原生动物等的作用下被去除[36]。当系统处于好氧状态时,有机性SS会被好氧微生物降解成CO₂排出系统;而当系统处于厌氧状态时,厌氧微生物以有机性SS为底物进行缺氧反应从而将其去除。通常,在土壤渗滤系统中有机性SS去除率较高,但这并不是影响系统处理能力的因素。

1.2.5 土壤渗滤系统对致病微生物的去除

土壤渗滤系统中致病微生物主要为细菌、病毒和寄生虫等。若将化粪池处理后的尾水直接还田利用,尾水中所含有的致病微生物等有毒有害物质可能导致疾病传播,甚至造成流行性传染病[37],因此土壤渗滤系统中致病微生物的去除问题应得到充分重视。蛔虫卵死亡率和粪大肠菌群等指标往往作为评价土壤渗滤系统卫生安全性的重要指标。

致病微生物一般来源于人体的消化系统,一旦离开了寄主,它们的存活时间往往只有几天。当生活污水进入系统后致病微生物会在太阳紫外线[38]、土壤微生物、植物根系分泌物和土壤胶体颗粒的作用下被去除[39]。

2 土壤渗滤系统在国内外的应用现状

19世纪中叶,英国学者LETHEYBY Henry偶然发现了土壤对污水的净化作用,继而提出了土壤渗滤系统这一概念。随着二次工业革命的推进,居民生活水平不断提高,生活用水的排放也随之增加,因此造价低廉、去污效果好、运行简单的土壤渗滤系统受到了世界各国学者们的广泛关注。由于土壤渗滤系统运行效果良好,日本和欧美一些国家对土壤渗滤系统进行了深入研究并取得一定进展。20世纪60年代,土壤渗滤系统在日本应用,随后在80年代研究出尼米(Niimi)槽式土壤渗滤系统,率先在污水处理上取得一些成果[40]。随后,土壤渗滤系统在世界各地被广泛应用。

在理论研究方面,VAN CUYK等[41]的研究表明土壤渗滤系统土壤层最佳厚度为0.60~1.20 m。QUANRUD等[42]研究发现土壤厚度为1.0 m的土壤渗滤系统可以有效地去除脊髓灰质炎病毒和大肠杆菌噬菌体。在工程实例方面,DREWES等[43]的研究表明土壤渗滤系统可以用于污水深度处理,同时能有效地

去除三级出水中的有机物,并改变废水中有机物特征。ORON^[44]研究发现土壤的渗滤作用可以有效地去除市政二级出水和污水中病原体等致病微生物,并且可以直接将其还田利用。RICE等^[45]利用土壤渗滤系统处理预处理后生活污水的研究结果表明,土壤渗滤系统对氨氮、有机物等污染物具有较高的去除率。LANCE等^[46]的研究发现在土壤中添加有机碳可以提高系统对氮的去除率。

在美国,土壤渗滤系统主要用于分散式生活污水治理,通常由化粪池和土壤渗滤系统组成。美国国家环保局(USEPA)2002年发布《污水分散处理系统手册》,用于指导地方管理分散污水处理系统;2005年发布《分散式污水处理系统管理手册》,以引导地方政府和群众安装分散式处理系统,并参与管理和维护。美国国家环保局推荐8种土壤渗滤系统,详见表1和图1。澳大利亚运行的分散式污水处理技术中有75%是土壤渗滤系统^[40],其优良的经济和环境效益使之成为许多发达国家处理分散式污水的首选技术^[47]。

在我国,1981年《光明日报》“科学家论坛”发表了《实行科学污灌,发展土地处理利用系统》的文章,一时引起了广泛关注和积极响应,随后我国开始对土壤渗滤系统进行初步研究^[47]。20世纪90年代我国通过与欧美国家的学术交流逐步加深对土壤渗滤系统的研究。1992年,污水地下毛管渗透处理系统模型在北京市环境保护科学研究院首次建成并投入试运行^[48]。1991—1995年期间,中国科学院沈阳应用生态

研究所利用地下毛管渗透处理系统模型进行实地示范研究,并在随后几年逐步对其工艺模型进行优化。2000年清华大学等高校联合开展的“滇池面源污染控制技术”课题,利用地下污水渗滤系统对农村生活污水进行处理并取得良好效果^[49]。2000年12月,贵州省环境科学研究设计院与日本国立环境研究所合作,引进日本最新一代的土壤渗滤系统净化技术,并进行实地示范,取得了良好的污水净化效果^[50]。2003年,沈阳师范大学建立并应用土壤渗滤系统处理校园绿化用水和景观湖用水,实现了灌溉期污水零排放^[54]。2010年,沈阳大学设计了处理能力为300 m³·d⁻¹的生物接触氧化-地下渗滤工艺,经过此工艺处理后的污水能达到可回用的标准^[51]。自2010年起,各高校和科研单位也相继对土壤渗滤系统污染物去除效果、系统堵塞等方面进行研究。王鑫等^[52]利用微米槽式土壤渗滤系统处理校园生活污水,结果表明该系统对污染物具有良好的去除效果。

3 土壤渗滤系统存在的问题

尽管土壤渗滤系统具有诸多优点,但是随着土壤渗滤系统研究和实际应用的深入,存在的一些问题已逐渐被学者们发现^[41]。土壤渗滤系统存在的问题主要集中在氮的去除率低^[53]、对环境产生不良影响和系统堵塞^[8]三方面。

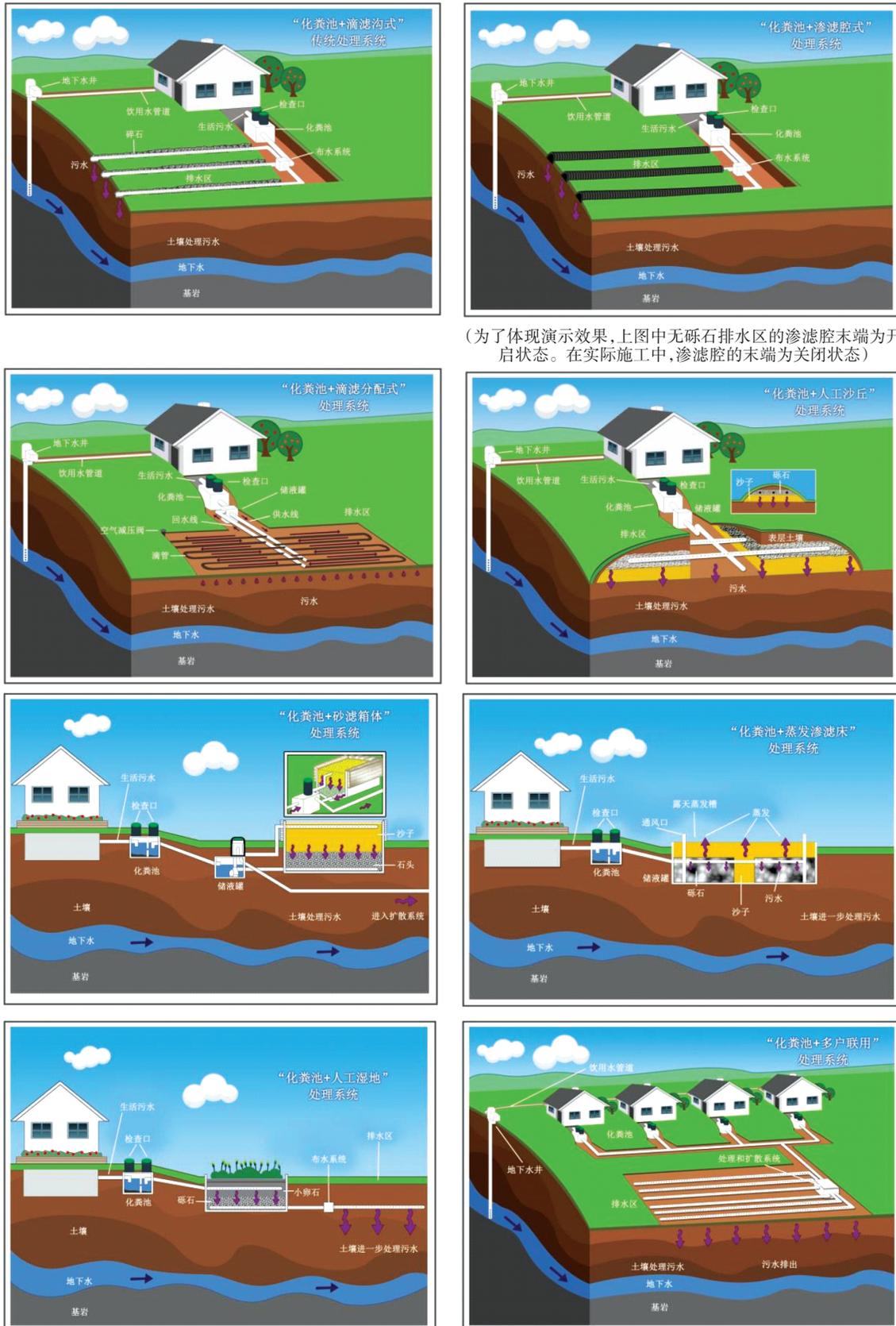
3.1 氮的去除

在土壤渗滤系统中相较于其他污染物,氮素去除率较低且不稳定,再加上对生活污水的预处理方式不

表1 美国国家环保局推荐的8种分散式农村污水治理模式特点

Table 1 Characteristics of 8 decentralized rural sewage treatment models recommended by USEPA

技术模式 Technical mode	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	适宜地区 Appropriate area
化粪池+渗滤沟式传统处理系统	便于建设和维护,应用广泛	占地面积相对较大	农户房前屋后有闲置土地的农村地区
化粪池+渗滤腔式处理系统	易于运输和建设,无需滤料,节约成本	必须针对区域具体情况,科学筛选适宜的渗滤腔体材料	地下水位较高或砾石稀少的地区
化粪池+滴滤分配式处理系统	处理可控,适合家庭外出务工人员多、黑灰水排放量及排放时间不稳定的农户	耗能高,需要电源等其他组件,增加建设成本和管护费用	地下水位较低、远离水源地的农村地区
化粪池+人工沙丘处理系统	人工沙丘高于地表,对土壤层厚度要求较低	需要大量地表空间,需定期维护	土壤层浅、无法深挖的地区,或者地下水位高的地区
化粪池+砂滤箱体处理系统	净化能力强,效率高,建设位置灵活,可设置在地上也可埋入地下	造价较高,后期耗能	地下水位较高的地区,或者靠近水源的地区
化粪池+蒸发渗滤床处理系统	处理效率高、周期短	对光照、温度等环境条件要求高,不适合雨雪过多的地区使用	光照强、蒸发量大的西北干旱地区
化粪池+人工湿地处理系统	投资少,维护方便,配合种植功能性植物可达到美化景观的效果	占地面积大,植物易受病虫害影响,运行效果地域差异性较大	人口密度较低、污染排放较少、温度适宜的农村地区
化粪池+多户联用处理系统	农户庭院内不需要建设排水区,对农户庭院面积要求低	集中处理污水的排水区占地面积大,需有合适场地	居住密集的农村社区,或者农户住宅相对集中的农村地区



(为了体现演示效果,上图中无砾石排水区的渗滤腔末端为开启状态。在实际施工中,渗滤腔的末端为关闭状态)

图中的化粪池尺寸并非实际比例,具体参照实际施工要求

图1 美国国家环保局推荐的8种分散式农村生活污水治理模式示意图

Figure 1 Schematic diagram of 8 decentralized rural sewage treatment modes recommended by USEPA

同,导致氮的去除率变化区间在10%~80%。近年来,国内外学者针对土壤渗滤系统氮素去除问题开展了诸多研究。目前强化土壤渗滤系统脱氮的方法有以下几种:补充碳源、改善氧化还原条件、改良基质和调整进水碳氮比(C/N)等。

3.1.1 补充碳源

在预处理为好氧条件的土壤渗滤系统中,硝化-反硝化是系统脱氮的主要途径,其中反硝化过程是在缺氧环境下,以碳源为电子供体,以硝态氮为电子受体,通过反硝化细菌发生反硝化过程,其过程主要发生在土壤渗滤系统中下部。但是污水中的大部分有机碳源在系统中上层被分解^[54],且有机物降解效率随着土层加深而降低,而反硝化反应最有效的土层深度为0.7~1.5 m,因此导致系统深层土壤反硝化过程所需供体不足,反硝化过程不完全,这使得氮素成为系统中最难去除的成分。

系统中碳源不足的问题可以通过两种方式解决:一是优化土壤渗滤系统工艺,利用系统内部资源来补充碳源,这类碳源被称为内部碳源,它包括污水中自带的有机碳和从原污水中分离出来的颗粒状初沉污泥;二是外加碳源,通过添加外部碳源使厌氧区反硝化细菌可利用的有机物浓度升高,进而提高系统反硝化能力。传统外加碳源一般有甲醇、乙醇、乙酸和葡萄糖等。严群等^[55]通过添加0.5~1.0 g·L⁻¹葡萄糖碳源,提升了进水COD浓度,同时也提高进水COD/TN值,TN的去除率由26.9%提升至55.7%,且随着COD/TN值增高,系统TN去除率也提高。谢希等^[56]利用丝瓜络作为固体碳源增强系统反硝化过程,结果表明系统出水TN去除率从26.83%提升至80.77%,出水硝酸盐浓度也从34.3 mg·L⁻¹降至7.32 mg·L⁻¹,由此证明以丝瓜络作为碳源增强系统反硝化过程具有可行性。李海波等^[57]的研究表明适当添加有机碳源可以促进系统反硝化过程,但是添加过量可能降低脱氮菌群活性,进而降低系统脱氮能力;同时研究还发现添加碳源可以降低N₂O的产生量,减少土壤渗滤系统对外界环境的污染。周子琳等^[58]研究发现在水力负荷为10 cm·d⁻¹时,与添加乙酸钠相比,添加葡萄糖作为碳源的系統对COD、TN和TP具有更高的去除率。王虹^[59]对比了单段和两段进水的工艺后发现,单段进水管#1条件下,系统对TN去除率仅为37.33%,而在#1#2或#1#3同时布水且系统最佳布水分配比为2:1时,系统对TN的去除率分别达到43.26%和60.42%,对COD、TP、NH₃-N等污染物的去除率均在80%以上,出水各项

指标均达到城镇生活污水处理厂一级B的排放标准。

宋思雨^[60]通过构建一套模拟土壤渗滤系统来探究最适合土壤渗滤系统运行的关键参数,结果表明最适合土壤渗滤系统的C/N为3:1,此时系统硝化-反硝化作用最为明显,同时系统内各指标去除率最高,若C/N小于3:1,此时系统反硝化细菌受到抑制而不利于系统对氮的脱除。而我国南方一些地区生活污水COD浓度普遍偏低,此时则需要通过添加外部碳源来强化系统的脱氮效果。

3.1.2 改善氧化还原条件

在预处理为好氧条件的土壤渗滤系统中,脱氮主要通过植物吸收、氨氮挥发、土壤吸附和微生物硝化-反硝化作用来实现,其中微生物的硝化-反硝化作用是土壤渗滤系统脱氮的主要途径,但是土壤渗滤系统中氧化还原电位(ORP)是影响土壤渗滤系统硝化-反硝化作用的主要因素。良好的氧化还原条件有利于基质中微生物处于微生物合成和内源代谢交替的活跃状态,有利于提高基质中微生物表面吸附有机质的降解效率,有利于提高土壤渗滤系统对污染物的去除效率^[61]。目前改善氧化还原环境的措施主要包括基质改良、干湿交替、植物根系输氧和通风等。

(1) 基质改良

基质是影响土壤渗滤系统应用的重要因素,是土壤渗滤系统中污染物去除的主要单元,能为微生物生长提供必需的生长环境,也能够直接决定土壤渗滤系统去除污染物的效率和效果。基质改良可以改善土壤渗滤系统氧化还原环境,增强系统水力负荷,提高土壤渗滤系统对氮的去除;也可以通过改良原有基质组成结构,使基质组分结构发达、吸附容量大、透气性强、渗透率高,提高土壤渗滤系统内部溶解氧,以此来改善土壤渗滤系统内部氧化还原条件。

杨铮铮等^[62]将腐熟牛粪、粉煤灰与土壤混配,通过设置分层装填与混合装填两种模拟土壤渗滤系统对农村生活污水进行净化,结果表明两种不同装填方式都能提高土壤渗滤系统脱氮除磷能力,两种模型对出水TN去除率分别达到75.1%和71.3%,其中分层装填净化能力强于混合装填。李英华等^[15]将草甸棕壤、煤渣和活性污泥等生物基质按13:6:1比例混合使用,研究在不同水力负荷和污染负荷下土壤渗滤系统的脱氮效果,结果表明当进水BOD₅负荷为12.0 g·m⁻²·d⁻¹时,随着水力负荷的增加系统基质层ORP降低,系统脱氮效率也降低。当水力负荷为0.08 m⁻³·m⁻²·d⁻¹时,基质层ORP随着进水BOD₅负荷增高而降

低,系统脱氮效率也随之下降。综合考虑后认为,水力负荷 $0.065\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 BOD_5 污染负荷 $12.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 为土壤渗滤系统最佳运行条件。

(2)干湿交替运行

土壤渗滤系统运行方式可以分为连续和间歇两种形式。连续运行指的是系统长时间不间断进水,间歇运行也就是干湿交替运行,是指进水-落干-进水-落干交替进行。如果连续进水时间较长,会导致系统中氧气不足,降低好氧微生物活性;而干湿交替运行则会改善这一状况,当系统进水时,系统中缺少氧气,当系统落干时,氧气再次进入系统,补充有机物消耗的溶解氧,以此调节系统ORP,使系统又恢复原有的功能和好氧环境,以确保硝化反应顺利进行。另外干湿交替运行也可以缓解土壤孔隙因悬浮物沉积、有机物生长而造成的系统堵塞,可以有效地保持系统土壤渗透性^[63]。梁成龙^[64]的研究表明系统ORP会随着土壤干化期的延长而增加,而干湿交替可以影响系统ORP,进而改善系统好氧-厌氧环境。此外,与连续进水相比,干湿交替运行能通过对干湿比的控制使土壤渗滤系统对污染物的去除达到理想效果。李英华等^[65]研究了室内模拟土壤渗滤系统在干湿比为1:2、1:1、2:1、3:1和4:1时对污染物的去除效果,结果表明在干湿比为1:1时效果最佳,此时系统对铵态氮和TN的去除率分别为86.9%和79.1%,出水水质满足景观环境用水标准。LI等^[66]的研究表明,干湿交替运行可以改变系统ORP,进而影响系统对TN和氨氮的去除。

(3)通风

在土壤渗滤系统中通风会改善系统ORP,可以明显提高系统脱氮效率。通风是一种增加土壤渗滤系统内部溶解氧的途径,具体是指在系统外增加通风管,但是通风管在土壤渗滤系统内所发挥的作用有限,所以学者们使土壤渗滤系统在干湿交替条件下运行,当系统落干时,渗滤基质处于饱水状态,孔隙水在重力作用下排干,土壤渗滤系统内压强减小,在内外压强不一致时,外界空气进入系统,为硝化反应提供好氧环境,同时也可以改善系统ORP,进而提高系统脱氮效率。SCHUDEL等^[67]的研究表明设置通风管后系统不会产生气体传输问题,即使在微生物最活跃的上层土壤,氧分压也很大。

目前,也有很多研究把人工曝气应用到土壤渗滤系统中。人工曝气分为连续曝气和间歇曝气,这两种曝气方式都会提高系统内溶解氧含量进而推进土壤

渗滤系统硝化反应的进行。PAN等^[68]的研究表明,在进水C/N为12时,间歇曝气的脱氮效率略高于连续曝气;潘晶等^[69]研究发现,间歇曝气为土壤渗滤系统基质50 cm深度创造了好氧环境,同时也促进了土壤渗滤系统硝化与反硝化反应。PAN等^[70]研究了4种土壤渗滤系统:系统A(无分流分配废水)、系统B(间歇曝气)、系统C(间歇分配废水)和系统D(间歇曝气和分流分配废水)对有机物和氮的去除效果,结果表明土壤渗滤系统D对有机物和氮的去除效果最好。另有研究^[71-72]表明,间歇曝气不仅可以为硝化-反硝化反应同时进行创造条件,而且可以促进土壤渗滤系统中细菌、真菌、硝化细菌和反硝化细菌的生长^[73]。

(4)植物输氧

土壤渗滤系统是一种污水生态处理技术,在土壤渗滤系统表面种植植物可以形成一种微生态效应系统。植物通过从大气中吸收氧气,再将氧气输送到根部气体导管,从而使根茎接触的土壤呈好氧状态,离植物根系较远的地方则呈厌氧状态,这两个区域分别有利于硝化细菌和反硝化细菌的生长,进而有利于系统脱氮。在土壤渗滤系统表面种植蔬菜不仅可以促进系统脱氮,还可以利用蔬菜根系吸收系统中N、P等营养物质,促进植物生长,同时降低土壤渗滤系统处理压力。

3.2 对环境的影响

土壤渗滤系统对周边环境的影响也是一个值得关注的问题。近些年土壤渗滤系统对周边环境的影响主要集中在污水渗出、温室气体排放和硝态氮淋滤等。

YANG等^[74]的研究表明,水力负荷是影响土壤渗滤系统出水效果的重要因素,污染物的去除效率随着水力负荷的增加而降低,水力负荷与污水水力停留时间(HRT)成反比。当污水水力负荷较小时,污水流速也小,污水在土壤渗滤系统中停留时间则会较长,污水与土壤渗滤系统中填料基质接触时间越久,对污染物的去除效果越好。当水力负荷较大时,若系统出水中污染物去除效果不理想,其原因可能是土壤渗滤系统进水水量较大,污水在基质中停留时间较短,污水未能与系统中基质、微生物充分接触,导致污水直接渗入地下,污染地下水。除此之外,也有可能因出水污染物浓度过大、水量过多而导致系统堵塞。因此,在实际土壤渗滤系统工程中,寻找适合土壤渗滤系统的水力负荷,是近年来学者们关注的一个问题。李海波等^[75]的研究表明,水力负荷对 BOD_5 和TN的去除效

果有明显影响,水力负荷越大,系统BOD₅和TN去除率越低。COD和SS受水力负荷影响较小,而TP和铵态氮则基本不受水力负荷影响。

土壤渗滤系统对氮素的去除过程会产生NH₃、N₂、N₂O^[76]、CO₂、CH₄和SO₂等气体,这些气体会产生温室效应,其中N₂O的单分子增温潜势是CO₂的298倍,此外其分解产物也是NO的主要来源,而NO是破坏臭氧层的链式化学反应中的关键物质^[77]。李海波等^[57]研究发现,N₂O的产生是土壤渗滤系统硝化与反硝化反应共同作用产生的重要副产物^[77],其产量随着时间的延长而降低。李英华等^[78]的研究表明随着进水N负荷的增加,N₂O的产生与转化率呈先升高再降低的趋势,当进水N负荷为2.4 g·m⁻²·d⁻¹时,N₂O的产生与转化率最高。SUN等^[79]的研究表明,间歇曝气与生物炭和污泥相结合是减少N₂O排放的一种方法。许多研究表明工艺类型、植物类型及种植方式、基质性质、温度和外源氮素输入都是土壤渗滤系统N₂O释放的影响因子,但是关于影响因子交互作用的研究却鲜有报道。此外关于主导因子对N₂O释放通量的影响机制的研究有待进一步加强,明确N₂O释放驱动机制以及建立基于理论框架的N₂O释放调控方法也将是未来研究重点。

土壤渗滤系统中另一个对环境造成危害的隐患是硝态氮、致病菌等对地下水的污染。硝态氮渗滤是由于系统缺少反硝化反应所需的碳源而造成大量硝态氮聚集,最终流入地下水。硝酸盐含有毒有害成分,过量摄取可能会导致人体缺氧、呼吸急促,甚至可能导致胃癌等消化系统疾病^[80]。致病细菌进入地下水则可能导致人类感染多种疾病。STEVIK等^[81]的研究表明土壤会吸附污水中约90%的致病菌,并且致病菌数量会随着土壤深度的增加而降低,渗滤层30 cm下几乎检测不到致病菌。但是从安全角度考虑,在施工时应尽量保护原土层,或用高密度聚乙烯树脂薄膜塑料作为防渗装置。

目前,对于土壤渗滤系统对周围环境影响的研究多集中在温室气体排放、硝态氮淋滤等,而关于其对土壤环境影响的报道却鲜见。蒯伟等^[82]的研究表明TP、总有机碳等物质与三格化粪池周围横向、纵向土壤致病微生物存在相关性,因此从土壤环境效应的角度来评估土壤渗滤系统的适用性将是今后研究的重点方向之一。

3.3 系统堵塞

土壤渗滤系统堵塞是由系统内部悬浮物截留、吸

附和微生物生长所导致,它不仅会影响系统水力负荷,还会影响系统寿命。据报道,美国将近七成的土壤渗滤系统由于系统堵塞而不得不重新挖土和更换填料,澳大利亚也有70%的土壤渗滤系统因堵塞而瘫痪。土壤渗滤系统堵塞一般分为物理堵塞、生物堵塞和气体堵塞。

物理堵塞是指系统进水中悬浮物浓度过高、渗滤基质孔径和填料孔隙率过小所导致的可恢复性堵塞,一般解决这种堵塞的办法是将系统进水进行预处理^[83],降低进水中悬浮物含量。在农村,预处理设施一般指化粪池等。生物堵塞是指随着系统运行时间变长,系统内细胞体、胞外聚合物等不断增多,使得土壤非毛细孔隙率不断减少,最后导致生物堵塞^[84]。针对微生物堵塞,一般做法是通过人工曝气、干湿交替进水^[83]等方式来缓解,除此之外还可添加一些微生物抑制剂和融菌剂来减缓。气体堵塞是指土壤渗滤系统中微生物的硝化、反硝化等化学反应产生的CO₂、N₂、N₂O等气体过多,导致系统内土壤间隙堵塞,最终抑制系统对污染物的去除。对于气体堵塞,可以采用干湿交替的进水方式来解决。LI等^[85]对比了长期运行(7年)和短期运行(1年)的土壤渗滤系统对污染物的去除率,结果显示长期运行的土壤渗滤系统对各污染物的去除率均低于短期运行,这表明长期运行会影响土壤渗滤系统土壤渗透性、孔隙度及气体累积情况,进而影响系统对污染物的去除率。

综上所述,对进水进行预处理以及采用干湿交替的进水方式可以解决农村土壤渗滤系统堵塞的问题,除此之外,控制进水污染物负荷也可以在一定程度上缓解系统堵塞。

4 结论与展望

本文简要介绍了土壤渗滤系统的概念及污染物去除机理,并针对土壤渗滤系统脱氮效果差、对环境产生影响和系统堵塞等问题进行归纳总结。基于此,根据国外农村污水治理的成功经验,结合我国农村污水治理现状,提出关于我国未来对土壤渗滤系统应用的一些展望。

(1)干湿交替运行方式是目前我国土壤渗滤系统主要运行方式,它不仅可以提高系统脱氮效率,也可以缓解系统堵塞问题。脱氮效果差仍是土壤渗滤系统面临的主要问题之一,改善氧化还原条件和补充碳源是提升系统脱氮能力的主要手段。利用新型复合填料强化系统脱氮成为土壤渗滤系统发展的新趋势,

同时应探寻最佳填料配比以达到最佳脱氮效率。另外在土壤渗滤系统与好氧预处理装置联用的情况下适当添加外部碳源,不仅能有效提高系统脱氮效率,而且可以减轻因系统缺少碳源而造成的地下水污染。

(2)农村地区应因地制宜、分区分片确定治理模式和方法,根据每个村的地势地貌建设不同技术模式的土壤渗滤系统。同时,构建生产生活一体化模式,建立就地循环利用机制,以农村改厕、污水收集为源头控制措施;打通村内水系,实施雨污分离、黑灰水分离,发挥村内沟渠、坑塘的净水功能,发挥农户房前屋后、村内闲置土地的蓄水和污染吸收功能,开展农村水环境的过程治理;以建设生态庭院和美丽田园为末端利用方式,实现农村污水治理、垃圾处置与生态农业发展、农村生态文明建设有机衔接。此外,我国应该学习国外农村污水治理的成功经验,以村或乡镇为单位,定期对长时间使用的土壤渗滤系统进行维护与填料更换,形成有效的后期管护机制。

(3)地广人稀的农村地区应充分利用自然净化能力强的特点,尽可能将生活污水资源化利用,将工程措施和生态措施相结合,推广符合当地实际情况的低成本、低能耗、高效率、免(少)管护的技术模式。例如,村民们可以利用土壤渗滤系统处理化粪池出水,同时在系统上种植蔬菜或适宜的作物,蔬菜和作物可以通过其根系吸收污水中N、P等营养物质,实现资源化利用,但这种做法的合理性、安全性以及对环境的影响仍需进行科学验证。

参考文献:

- [1] 晏雯雯. 人工快速渗滤技术用于处理农村生活污水的研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2020. YAN W W. Study on the application of constructed rapid infiltration technology in the treatment of rural domestic sewage[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [2] 王曼如, 闫湘, 李秀英. 表面活性剂在农业中的应用及对水环境的危害[J]. 中国土壤与肥料, 2018(6): 11-15. WANG M R, YAN X, LI X Y. Application of surfactant in agriculture and its harm to water environment[J]. *Soil and fertilizer in China*, 2018(6): 11-15.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2019年城乡建设统计公报[R]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2020. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC. 2019 urban and rural development statistics bulletin[R]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC, 2020.
- [4] WU H M, FAN J L, ZHANG J, et al. Decentralized domestic wastewater treatment using intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Impact of influent strengths[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 176: 163-168.
- [5] LIU C J, XIE J Z, SONG M L, et al. Nitrogen removal performance and microbial community changes in subsurface wastewater infiltration system (SWISs) at low temperature with different bioaugmentation strategies[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250: 603-610.
- [6] SUSILAWATI H L, SETYSNTO P, ARIANI M, et al. Influence of water depth and soil amelioration on greenhouse gas emission from peat soil columns[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 62(1): 57-68.
- [7] SUN Y F, QI S Y, ZHENG F P, et al. Organic removal, nitrogen removal and N₂O emission in subsurface infiltration wastewater system amended with/without biochar and sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 249: 57-61.
- [8] LI W, LIANG C L, DONG X, et al. Accumulation and characteristics of fluorescent dissolved organic matter in loess soil-based subsurface wastewater infiltration system with aeration and biochar addition[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 269: 116100.
- [9] LI Y H, LI H B, YANG L, et al. Study on the contribution of different depth layers to N₂O emission in subsurface wastewater infiltration system[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 133: 69-75.
- [10] JIANG Y Y, SUN Y F, PAN J, et al. Use of dewatered sludge as microbial inoculum of a subsurface wastewater infiltration system: Effect on start-up and pollutant removal[J]. *Water SA*, 2017, 43(4): 595-601.
- [11] 张晓辉, 崔建宇, 蓝艳, 等. 不同草坪覆盖地下渗滤系统处理生活污水研究[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 165-170. ZHANG X H, CUI J Y, LAN Y, et al. Study on subsurface wastewater infiltration system covered by different turfgrass for domestic sewage treatment[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1): 165-170.
- [12] 郑彦强, 卢会霞, 许伟, 等. 地下渗滤系统处理农村生活污水的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(10): 2235-2238. ZHENG Y Q, LU H X, XU W, et al. Study on rural sewage treatment by subsurface infiltration system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(10): 2235-2238.
- [13] WU S B, CARVALHO P N, MULLER J A, et al. Sanitation in constructed wetlands: A review on the removal of human pathogens and fecal indicators[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 8-22.
- [14] YANG S L, ZHENG Y F, MAO Y X, et al. Domestic wastewater treatment for single household via novel subsurface wastewater infiltration systems (SWISs) with NiiMi process: Performance and microbial community[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 1-13.
- [15] 李英华, 李海波, 王鑫, 等. 生物填料地下渗滤系统对生活污水的脱氮[J]. 环境工程学报, 2013, 7(9): 3369-3374. LI Y H, LI H B, WANG X, et al. Nitrogen removal in domestic sewage by bio-substrate based subsurface wastewater infiltration system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(9): 3369-3374.
- [16] YANG Y, ZHAN Y, ZHOU Y, et al. Effect of hydraulic loading rate on pollutant removal efficiency in subsurface infiltration system under intermittent operation and micro-power aeration[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 205: 174-182.
- [17] 蒙语桦. 化粪池与人工湿地联用处理湖南农村地区生活污水研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016. MENG Y Y. Study on domestic wastewater treatment of rural area in Hunan Province by using septic tank coupled with constructed wetland[D]. Changsha: Hunan University, 2016.

- [18] 王文林, 刘波, 童仪, 等. 农村化粪池尾水无动力原地土地系统脱氮处理研究简述及展望[J]. 环境生态学, 2019, 1(3): 26-30. WANG W L, LIU B, TONG Y, et al. A brief introduction and prospect of nitrogen removal from rural septic tank tail water by unpowered *in-situ* land system[J]. *Environmental Ecology*, 2019, 1(3): 26-30.
- [19] 聂俊英. 改良的地下渗滤系统处理污水及相关机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011. NIE J Y. Study on wastewater treatment by fortified subsurface soil infiltration system as well as its mechanism [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [20] LEE S H, VIGNESWARAN S, MOON H. Adsorption of phosphorus in saturated slag media columns[J]. *Separation and Purification Technology*, 1997, 12(2): 109-118.
- [21] WORRALL F, PARKER A, RAE J E, et al. A study of the sorption kinetics of isotoproturon on soil and subsoil: The role of dissolved organic carbon[J]. *Chemosphere*, 1997, 34(1): 87-97.
- [22] USEPA. Wastewater treatment/disposal for small communities EPA/625/R-92/005[R]. Washington DC: USPEA, 1992.
- [23] ZHI W, JI G D. Quantitative response relationships between nitrogen transformation rates and nitrogen functional genes in a tidal flow constructed wetland under C/N ratio constraints[J]. *Water Research*, 2014, 64: 32-41.
- [24] 丁越. 复合填料渗滤系统污水处理效果及其脱氮机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019. DING Y. Study on wastewater treatment effect and denitrification mechanism of composite packing filtration system[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.
- [25] 谢希. 添加固体碳源对污水土地处理系统脱氮效果的影响研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013. XIE X. Study on effects of external solid carbon source on denitrification in land treatment system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [26] LI H B, LI Y H, SUN T H, et al. The use of a subsurface infiltration system in treating campus sewage under variable loading rates[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 38(1): 105-109.
- [27] ZHANG M K, WANG L P, HE Z L. Spatial and temporal variation of nitrogen exported by runoff from sandy agricultural soils[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(9): 1086-1092.
- [28] ROBERT A P. Phosphorus sorption for on-site wastewater assessments[C]. Conference on-site 01. Advancing on-site wastewater systems, 2001: 307-314.
- [29] BROOKS A S, ROZENWALD M N, GEOHRING L D, et al. Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(1): 121-132.
- [30] FORBES M G, DICKSON K L, SALEH F, et al. Recovery and fractionation of phosphorus retained by lightweight expanded shale and masonry sand used as media in subsurface flow treatment wetlands[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(12): 4621-4627.
- [31] 王亚男, 王红旗, 舒艳. 含磷污水淋滤条件下土壤中磷迁移转化模拟实验[J]. 环境科学学报, 2001, 21(6): 737-741. WANG Y N, WANG H Q, SHU Y. Simulated study on transferring and transforming of phosphorus in soil leached by waste water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(6): 737-741.
- [32] 汪宏. 生物基质强化地下渗滤系统脱氮效果及机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016. WANG H. Research on the efficiency and mechanism for intensified denitrification of bio-substrate in subsurface wastewater infiltration system[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.
- [33] BELILA A, GHRABI A, HASSEN A. Molecular analysis of the spatial distribution of sulfate-reducing bacteria in three eutrophicated wastewater stabilization ponds[J]. *Annals of Microbiology*, 2010, 61(3): 563-573.
- [34] 董泽琴, 孙铁珩, 李培军, 等. 悬浮填料床/地下渗滤系统深度处理生活污水[J]. 中国给水排水, 2006(8): 70-73. DONG Z Q, SUN T H, LI P J, et al. Suspended carrier floating-bed/subsurface infiltration system for advanced treatment of domestic sewage on the campus[J]. *China Water & Wastewater*, 2006(8): 70-73.
- [35] 黄绍敏, 皇甫湘荣, 宝德俊, 等. 土壤中硝态氮含量的影响因素研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 351-354. HUANG S M, HUANGFU X R, BAO D J, et al. Factors affecting content of nitrate-nitrogen in soil[J]. *Agro-Environment Protection*, 2001, 20(5): 351-354.
- [36] 潘晶. 地下渗滤系统微生物特征及强化脱氮工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009. PAN J. Studies on microbiology character and intensified nitrogen removal technics in subsurface infiltration system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [37] 曹雨. 农村污水处理技术研究进展[J]. 建筑与预算, 2019(11): 75-78. CAO Y. Research progress of rural sewage treatment technology [J]. *Construction and Budget*, 2019(11): 75-78.
- [38] 郭笃发, 陈友云. 污水土地处理系统的研究现状[J]. 山东师大学报(自然科学版), 1994(2): 85-88. GUO D F, CHEN Y Y. Research status of sewage land treatment system[J]. *Journal of Shandong Normal University(Natural Science)*, 1994(2): 85-88.
- [39] 吴莹, 张经, 李道季. 营养盐(氮, 磷)在湿地中的迁移与循环[J]. 海洋科学, 2004, 28(3): 69-72. WU Y, ZHANG J, LI D J. Transport and recycling of nutrients (N, P) in the wetland[J]. *Marine Science*, 2004, 28(3): 69-72.
- [40] BEAL B C, GARGNER E A, KIRCHHOFF G, et al. Long-term flow rates and biomat zone hydrology in soil columns receiving septic tank effluent[J]. *Water Research*, 2006, 40(12): 2327-2338.
- [41] VAN CUYK S, SIEGRIST R L. Virus removal within a soil infiltration zone as affected by effluent composition, application rate, and soil type [J]. *Water Research*, 2007, 41(3): 699-709.
- [42] QUANRUD D M, CARROLL S M, GERBA C P, et al. Virus removal during simulated soil-aquifer treatment[J]. *Water Research*, 2003, 37(4): 753-756.
- [43] DREWES J E, REINHARD M, FOX P. Comparing microfiltration-reverse osmosis and soil-aquifer treatment for indirect potable reuse of water[J]. *Water Research*, 2003, 37(15): 3612-3621.
- [44] ORON G. Soil as a complementary treatment component for simultaneous wastewater disposal and reuse[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 34(11): 243-252.
- [45] RICE R C, BOUWER H. Soil-aquifer treatment using primary effluent[J]. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1984, 56(1):

- 84-88.
- [46] LANCE J C, WHIRLE F D. Stimulation of denitrification in soil columns by adding organic carbon to wastewater[J]. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1976, 48(2):346-356.
- [47] LOWE K S, SIEGRIST R L. Controlled field experiment for performance evaluation of septic tank effluent treatment during soil infiltration[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2008, 134(2):93-101.
- [48] ROBERT A, PATTERSON P. Phosphorus sorption for on-site wastewater water land application[J]. *Atmosphere Environment*, 1999, 33: 2115-2121.
- [49] 刘志强, 苗群, 邵长飞, 等. 滇池流域村镇生活污水污染及处理技术[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2003, 24(1):13-17. LIU Z Q, MIAO Q, SHAO C F, et al. Pollution and treatment techniques of wastewater from villages and towns in Dianchi Lake valley[J]. *Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering*, 2003, 24(1):13-17.
- [50] 安乐. 地下渗滤系统运行参数优化与强化脱氮研究[D]. 沈阳:东北大学, 2014. AN L. Study of optimizing operational parameters and enhanced nitrogen removal of subsurface wastewater infiltration system[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [51] 李英华, 李海波, 孙铁珩, 等. 接触氧化-地下渗滤工艺在校园污水处理中的应用[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2012, 24(2):26-30. LI Y H, LI H B, SUN T H, et al. Combined process of biological contact oxidation and subsurface wastewater infiltration system for campus sewage treatment[J]. *Journal of Shenyang University(Natural Science)*, 2012, 24(2):26-30.
- [52] 王鑫, 王士满, 王洪. 高负荷尼米槽式地下渗滤系统处理校园生活污水[J]. 中国给水排水, 2015, 31(15):20-23. WANG X, WANG S M, WANG H. Treatment of campus sewage under high hydraulic loading in subsurface wastewater infiltration system using NiiMi process[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(15):20-23.
- [53] MANDER U, MADDISON M, SOOSAAR K, et al. The impact of a pulsing water table on wastewater purification and greenhouse gas emission in a horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 80:69-78.
- [54] LI Y H, LI H B, SUN T H, et al. Study on nitrogen removal enhanced by shunt distributing wastewater in a constructed subsurface infiltration system under intermittent operation mode[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189(8):336-341.
- [55] 严群, 吴一蒙, 杨健, 等. 复合填料地下渗滤系统的强化脱氮研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(5):697-703. YAN Q, WU Y F, YANG J, et al. Intensified denitrification of compound mixed subsurface wastewater infiltration system[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2010, 38(5):697-703.
- [56] 谢希, 何圣兵, 崔洪升, 等. 固体缓释碳源强化污水土地处理系统的反硝化效能[J]. 中国给水排水, 2014, 30(3):84-86. XIE X, HE S B, CUI H S, et al. Improving denitrification efficiency of wastewater land treatment system with solid sustained-release carbon source[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(3):84-86.
- [57] 李海波, 李英华, 徐新阳, 等. 碳源对地下渗滤系统脱氮及产生 N_2O 的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(6):877-880. LI H B, LI Y H, XU X Y, et al. Effect of carbon source on nitrogen removal and N_2O generation in subsurface wastewater infiltration system[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2018, 39(6):877-880.
- [58] 周子琳, 严群, 丁越, 等. 碳源及水力负荷对渗滤系统污水处理效果影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(1):144-149. ZHOU Z L, YAN Q, DING Y, et al. Impact of carbon source and hydraulic load on sewage treatment effect of subsurface wastewater infiltration system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(1):144-149.
- [59] 王虹. 两段进水改善地下渗滤系统脱氮效果的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013. WANG H. Research on the improvement of nitrogen removal by two-stage feeding in SWI system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [60] 宋思雨. 污水地下渗滤系统氨氮、有机氮的去除机理及影响因素研究[D]. 沈阳:沈阳师范大学, 2017. SONG S Y. Study on removal mechanism and influencing factors of ammonia nitrogen and organic nitrogen in subsurface infiltration water system[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2017.
- [61] DAVID A, JAIME N. Energy requirements for nitrification and biological nitrogen removal in engineered wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(2):184-192.
- [62] 杨铮铮, 张思, 刘春敬, 等. 基质混配地下渗滤系统脱氮除磷机理研究[J]. 水处理技术, 2016, 42(1):56-61. YANG Z Z, ZHANG S, LIU C J, et al. Nitrogen and phosphorus removal mechanism of matrix mixed in subsurface infiltration system[J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(1):56-61.
- [63] ZOU J L, DAI Y, SUN T H, et al. Effect of amended soil and hydraulic load on enhanced biological nitrogen removal in lab-scale SWIS[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(2):816-822.
- [64] 梁成龙. 生物炭联合曝气强化土壤渗滤系统处理农村生活污水的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019. LIANG C L. Study on rural domestic wastewater treatment in soil infiltration system by biochar and intermittent aeration strengthening measures[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [65] 李英华, 李海波, 孙铁珩, 等. 干湿交替运行对地下渗滤系统脱氮效果的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10):2081-2085. LI Y H, LI H B, SUN T H, et al. Effects of alternate dring-wetting on nitrogen removal efficiency of subsurface infiltration system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(10):2081-2085.
- [66] LI Y H, LI H B, WANG H, et al. Comparison of the treatment performance of bio-substrate based and meadow brown soil based subsurface infiltration systems for domestic wastewater treatment[J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(3):506-513.
- [67] SCHUDEL P, BOILER M. Onsite wastewater treatment with intermittent buried filters[J]. *Water Science & Technology*, 1990, 22(3/4):93-100.
- [68] PAN J, QI S Y, SUN Y F, et al. Nitrogen removal and nitrogen functional gene abundances in three subsurface wastewater infiltration system under different modes of aeration and influent C/N ratio[J]. *Biore-source Technology*, 2017, 241:1162-1167.
- [69] 潘晶, 张智宇, 孙博, 等. 曝气与进水分流强化地下渗滤系统污水

- 净化效果[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(4):332-338. PAN J, ZHANG Z Y, SUN B, et al. Removal performance strengthened by intermittent aeration and influent shunt distributing in subsurface infiltration system[J]. *Journal of Shenyang Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 38(4):332-338.
- [70] PAN J, YUAN F, YU L, et al. Performance of organics and nitrogen removal in subsurface wastewater infiltration systems by intermittent aeration and shunt distributing wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211:774-778.
- [71] LIANG C L, LI Y, CHAI B B, et al. Evaluating the effects of intermittent aeration and biochar addition on enhancing removal performance of subsurface wastewater infiltration system with loess soil[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2019, 5:12-19.
- [72] JIANG Y Y, SUN Y F, PAN J, et al. Nitrogen removal and N₂O emission in subsurface wastewater infiltration system with/without intermittent aeration under different organic loading rates[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 244:8-14.
- [73] PAN J, YUAN F, ZHANG Y, et al. Nitrogen removal in subsurface wastewater infiltration system with and without intermittent aeration [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94:471-477.
- [74] YANG Y Q, ZHAN X, WU S J, et al. Effect of hydraulic loading rate on pollutant removal efficiency in subsurface infiltration system under intermittent operation and micro-power aeration[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 205:174-182.
- [75] 李海波, 马吉福, 王鑫, 等. 水力负荷对污水地下渗滤系统处理效果的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2):544-550. LI H B, MA J F, WANG X, et al. Effect of hydraulic loading rate on sewage treatment efficiency of subsurface wastewater infiltration system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(2):544-550.
- [76] LIU W L, HUANG L, XIAO G Q, et al. Effect of carbon source and COD/N ratio on N₂O emissions in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245:171-181.
- [77] JIA W, ZHANG J, LI P, et al. Nitrous oxide emissions from surface flow and subsurface flow constructed wetland microcosms: Effect of feeding strategies[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11):1815-1821.
- [78] 李英华, 李海波, 徐新阳, 等. 进水氮负荷波动下地下渗滤系统 N₂O 释放研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(12):1999-2004. LI Y H, LI H B, XU X Y, et al. Study on N₂O release in subsurface wastewater infiltration system under variable influent nitrogen loading[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2016, 25(12):1999-2004.
- [79] SUN Y F, QI S Y, ZHENG F P, et al. Organics removal, nitrogen removal and N₂O emission in subsurface wastewater infiltration systems amended with/without biochar and sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 249:57-61.
- [80] 王贺, 谷洪彪, 迟宝明, 等. 柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2016, 37(5):1699-1706. WANG H, GU H B, CHI B M, et al. Distribution characteristics and influencing factors of nitrate pollution in shallow groundwater of Liujiang Basin[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5):1699-1706.
- [81] STEVIK T K, AUSKAND G, DEINBOLL P, et al. Removal of *E. coli* during intermittent filtration of wastewater effluent as affected by dosing rate and media type[J]. *Water Research*, 1999, 33(9):2088-2098.
- [82] 蒯伟, 李厚禹, 高艺, 等. 三格式化粪池出水水质特征及对周边土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5):1051-1061. KUAI W, LI H Y, GAO Y, et al. Environmental risk and influencing factors of effluent from three-compartment septic tanks[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5):1051-1061.
- [83] HUA G, ZENG Y, ZHAO Z, et al. Applying a resting operation to alleviate bioclogging in vertical flow constructed wetlands: An experimental lab evaluation[J]. *Journal of Environment Management*, 2014, 136(8):47-53.
- [84] ABDEL AAL G Z, ATEKWANA E A, ATEKWANA E A. Effect of bioclogging in porous media on complex conductivity signatures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115:G00G07.
- [85] LI Y H, LI H B, PAN J, et al. Performance evaluation of subsurface wastewater infiltration system in treating domestic sewage[J]. *Water Science and Technology*, 2012, 65(4):713-720.