



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

三格化粪池在我国农村改厕中的应用现状及模式类型

郑向群, 高艺, 徐艳, 张春雪, 王强, 魏孝承, 杨波, 陈咄圳, 李厚禹, 李倩

引用本文:

郑向群,高艺,徐艳,张春雪,王强,魏孝承,杨波,陈咄圳,李厚禹,李倩. 三格化粪池在我国农村改厕中的应用现状及模式类型[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 209–219.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0790>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三格化粪池厕所的功能定位及在农村改厕中的应用误区

张玉, 吕明环, 徐明杰, 李傲, 施云鹏, 李亚惠, 范彬

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 215–222 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0231>

两种典型温度下农村化粪池出水氮素在原地土壤中的迁移转化过程

孟凡凡, 阮建飞, 王文林, 王飞鹏, 刘波, 桑陆宇

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 206–213 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0145>

我国农村厕所改造的区域特征及路径探析

王永生, 刘彦随, 龙花楼

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 553–560 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0245>

我国规模化畜禽养殖粪污资源化利用分析

宣梦, 许振成, 吴根义, 欧玮祺, 李婧, 何文博

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 126–132 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0257>

土壤重金属污染修复植物处置技术进展

王敏捷, 盛光遥, 王锐

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 151–159 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0756>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑向群, 高艺, 徐艳, 等. 三格化粪池在我国农村改厕中的应用现状及模式类型[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 209–219.

ZHENG X Q, GAO Y, XU Y, et al. Application status and model types of three-compartment septic tanks in rural toilet reform in China[J].

Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(2): 209–219.



开放科学 OSID

三格化粪池在我国农村改厕中的应用现状及模式类型

郑向群, 高艺, 徐艳, 张春雪, 王强, 魏孝承, 杨波, 陈咄圳, 李厚禹, 李倩

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:三格式户厕是我国农村改厕推荐模式之一,三格化粪池是三格式户厕的核心组成部分,也是当前我国厕所革命推进过程中应用最广的粪污处理设备。本文基于三格化粪池在我国农村改厕中的应用情况,分析了三格化粪池在实际应用中存在的常见问题,明确了当前粪污资源化利用与达标处理技术类型的适应范围和优缺点,最后对农村三格化粪池技术进行了展望,旨在为三格化粪池模式建设提供技术指导,为进一步优化粪污利用技术、规范改厕工作提供理论参考。

关键词:三格化粪池;农村改厕;黑灰水;粪污资源化

中图分类号:R127;TU824

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)02-0209-11

doi: 10.13254/j.jare.2021.0790

Application status and model types of three-compartment septic tanks in rural toilet reform in China

ZHENG Xiangqun, GAO Yi, XU Yan, ZHANG Chunxue, WANG Qiang, WEI Xiaocheng, YANG Bo, CHEN Peizhen, LI Houyu, LI Qian
(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: A rural household latrine with a three-compartment septic tank is one of the recommended models for improving toilets in rural areas in China. A three-compartment septic tank is the core component of a rural household latrine, and it is also the most widely used fecal treatment equipment in the process of toilet revolution in China. Based on the application of three-compartment septic tank in rural toilet transformation in China, this paper analyzes the common problems existing in the practical application of three-compartment septic tank, and defines the applicable scope, advantages and disadvantages of the current types of fecal sewage resource utilization and standard treatment technology; the last of these includes prospects for rural three-compartment septic tank technology. This paper provides technical guidance and a future development direction for constructing a three-compartment septic tank mode and a theoretical reference for further optimizing the technology that utilizes fecal pollution and standardizing improvements to toilets.

Keywords: three-compartment septic tank; rural toilet reform; black and grey water; manure resource utilization

在经济高速发展和农村城镇化建设不断推进过程中,农村庞大的人口基数和地理位置使其在基础设施、科学技术及发展意识等方面长期处于劣势,尤其是农村厕所,一直是我国农村基础设施建设中最为缺乏和最难解决的问题,农村厕所环境更没有得到足够的重视。受思想观念、生活习惯、经济和自然条件等多种因素的影响,我国大部分农村地区居民使用的厕所比较简陋,甚至在某些地区还存在露天厕所。简陋

厕所除了降低如厕舒适度、影响村容村貌外,更重要的是会导致环境污染、引发疾病传播、危及人体健康。据报道,农村80%的传染疾病,如儿童腹泻、血吸虫病等,是由厕所粪污和不安全饮水引起的^[1]。因此,建立厕所清洁化、粪污无害化的卫生厕所对于改善农村环境卫生、提高农村居民生活品质、提升幸福指数具有重要意义。

国家高度重视农村改厕工作,2018年中央一号

收稿日期:2021-11-15 录用日期:2022-01-07

作者简介:郑向群(1974—),男,湖北英山人,博士,研究员,主要从事农业环境监测、乡村环境污染治理工作。E-mail:zhengxiangqun@126.com

基金项目:创新工程所级重点项目(2020-cxgczdwr-zxq)

Project supported: Innovation Engineering Key Program of Public Welfare Institute (2020-cxgczdwr-zxq)

文件《关于实施乡村振兴战略的意见》提到,应坚持不懈推进农村厕所革命,大力开展农村用户卫生厕所建设和改造,同步实施粪污处理。同时期,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《农村人居环境整治三年行动方案》,提出要合理选择改厕模式,鼓励厕所粪污的资源化利用。2021年,中共中央办公厅、国务院办公厅印发《农村人居环境整治提升五年行动方案(2021—2025)》,要求逐步普及农村卫生厕所,突出强调加强厕所粪污无害化处理与资源化利用,逐步推动厕所粪污就地就农消纳、综合利用。据《中国卫生和计划生育统计年鉴》数据测算,截至2017年底,农村累计使用卫生厕所户数达到21 700.6万,卫生厕所普及率为81.7%,其中三格化粪池的数量超过8 000万,占全国农村卫生厕所户数的37.6%^[2]。但由于统计口径不同等原因,农业农村部调度所得数据与之存在较大差距,该数据显示,2018—2020年全国累计改造农村户厕4 000多万户,截至2020年底,全国农村卫生厕所普及率达68%^[3]。本文仅以《中国卫生和计划生育统计年鉴》的数据为基础,选择三格化粪池作为研究主体,开展化粪池建设情况及应用模式的综述及问题解析。

三格化粪池结构简单、造价低廉且无动力消耗,是构建资源型卫生厕所系统中关键和适宜的技术之一。目前对三格化粪池的研究多集中在如何改善化粪池性能,缺乏对三格化粪池在农村改厕中的具体模式归纳。因此,本研究从三格化粪池的应用现状、模式类型两方面入手,对其在我国农村厕所革命推进中的适配性进行探讨,以为地方改厕模式的选择提供指导性建议,为建立健全农村改厕技术标准体系提供依据。

1 我国农村三格化粪池的应用现状

2004—2017年,我国三格化粪池建设数量从3 641.7万户增长至8 146.4万户。为深入了解三格化粪池在我国的应用现状,本文从三格化粪池结构、相关标准规范的发展历程、近年来三格化粪池在我国农村的建设情况,以及应用中常见的问题进行分析,以为我国厕所革命深入开展提供技术指导,指明发展方向。

1.1 三格化粪池的发展历程

1.1.1 三格化粪池结构

目前,市场上推行的三格化粪池结构比例主要分为三种:一是《建筑给水排水设计规范》(GB 50015—

2003)中提出的3:1:1型结构;二是《镇(乡)村排水工程技术规范》(CJJ 124—2008)中提出的2:1:1型结构;三是《农村户厕卫生规范》(GB 19379—2012)中提出的2:1:3型结构。不同规格化粪池用途、适用范围都存在一定差异,这给地方政府推进改厕工作带来了困扰。其中《建筑给水排水设计规范》主要适用于居住小区、公共建筑区、民用建筑、工业建筑和厂房屋面雨水给水排水设计,3:1:1型的化粪池大多作为去除生活污水中悬浮性有机物的处理设施,属于初级过渡性生活污水处理构筑物,其空间主要用于沉降污水中的悬浮物,粪污停留时间12~24 h,液化固态粪便,进而满足排入城市下水管网的进水要求;《镇(乡)村排水工程技术规范》适用于县城以外且规划设施服务人口在50 000以下的镇(乡)和村的新建、扩建和改建的排水工程,2:1:1型的三格化粪池作为生活污水预处理后进入收集系统的设施,其功能与《建筑给水排水设计规范》一致,粪污停留时间为24~36 h;而《农村户厕卫生规范》主要适用于农村户厕的规范、设计、建筑、管理和卫生监督、监测,目的是利用3个格池的沉降使粪污充分发酵,消除病原体,从而实现粪污无害化,确保粪污资源化利用的安全性。其设计要求粪污在第一格停留时间不少于20 d,在第二格的停留时间不少于10 d,第三格原则上要求不低于第一、二格有效时间之和。从停留时间来看,三类化粪池功能存在差异。

三种比例的化粪池在实际应用中可以根据化粪池的功能定位来进行选型,当三格化粪池作为厕所粪污的末端处理设施时,化粪池一般使用2:1:3型三格化粪池且生活杂排水不可排入化粪池内;当三格化粪池作为生活污水预处理构筑物时,生活杂排水可排入化粪池内,此时三种比例的化粪池皆可使用。此外,2:1:3型三格化粪池不仅具有去除和灭杀寄生虫卵等病原体的功能,还可作为粪污的贮存设施,第三池的粪液可适时清掏直接还田。而3:1:1型和2:1:1型三格化粪池的构造理论与平流式沉淀池相似,其进出水口需设置浮渣挡板保证污泥在厌氧的条件下腐化发酵,但其出水的无害化效果却鲜见报道,出水应接入收集系统后进行深度处理。随着城乡一体化建设不断推进,农村地区呈现出人口规模小、居住密度低、分散系数大等特点,常规的集中管网上下水道模式并不适合农村分散地区,且农村分散地区普遍拥有大面积农田,粪污资源化利用需求较高。因此,我国绝大多数农村地区适宜选择2:1:3型三格化粪池。

1.1.2 农村三格化粪池相关标准规范

随着人们对生活品质和环境卫生需求的不断提升,关于农村三格化粪池的相关标准规范也在不断完善(表1)。2003年首次发布的《农村户厕卫生标准》(GB 19379—2003)提出了“无害化卫生厕所”的概念,规定了三格化粪池的基本结构和建筑设计要求。2012年发布的《农村户厕卫生规范》(GB 19379—2012,代替 GB 19379—2003)进一步明确了无害化卫生厕所建设要求,并将三格化粪池作为无害化卫生厕所向全国推荐。然而,对三格化粪池的安装施工要求以及工程质量验收标准还未明确,导致地方政府在推进过程中无标可依。目前,部分地方政府在参考国家现有标准的同时总结了各地农村厕所新建与改建施工与质量验收的实践经验,制定了适宜本地区的农村户厕规范或指南(表1)。2020年4月,国家出台了《农村三格式户厕建设技术规范》(GB/T 38836—2020)和《农村三格式户厕运行维护规范》(GB/T 38837—2020),对三格化粪池的设计、安装与施工、工程质量

验收与运行维护要求进行了具体规定,对农村三格式户厕建设质量和运维提出了更明确的要求。

1.2 近年我国农村三格化粪池建设情况

2004—2017年间我国各省(区、市)三格化粪池的建设情况如图1所示,数据来自中国经济与社会发展统计数据库(西藏、青海和港澳台地区数据缺失)。结果显示,2004—2017年,农村三格化粪池数量以6.94%的年增长率持续增长,且三格化粪池的建设存在着明显的空间区域性差异。尤其是在2015—2017年间东部地区三格化粪池建设数量平均占全国总数的23.48%,而西部和中部平均占比分别为6.19%和6.24%,呈现出明显的“东高西低”布局。然而,2015—2017年东部地区三格化粪池建设年增长率为4.71%,低于西部的12.06%和中部的8.34%,这可能是由于2009年实施国家重大公共卫生农村改厕项目后,国家加大了对中西部地区改厕资金投入,从而推动了中西部地区农村改厕整体进程^[4]。

三格化粪池不仅在东、中、西部地区分布差异较

表1 国家和地方政府出台的部分三格化粪池卫生厕所标准和规范

Table 1 Standards and specifications for sanitary toilets with three-compartments septic tanks issued by the state and local governments

标准和规范 Standards and specifications	标准编号 Standard number	单位 Unit
《农村户厕卫生规范》	GB 19379—2012	国家卫生健康委员会、爱国卫生运动委员会
《玻璃钢化粪池技术要求》	CJ/T 409—2012	住房和城乡建设部
《塑料化粪池》	CJ/T 489—2016	住房和城乡建设部
《关于印发农村户厕建设技术要求(试行)的通知》	国卫办规划函[2019]667号	国家卫生健康委、农业农村部
《农村三格式户厕建设技术规范》	GB/T 38836—2020	农业农村部
《农村三格式户厕运行维护规范》	GB/T 38837—2020	农业农村部
《一体式三格化粪池(聚乙烯、共聚聚丙烯、玻璃纤维增强复合材料)》	DB37/T 2792—2016	山东省住房和城乡建设厅
《农村户厕改造技术标准》	DB22/T 5001—2017	吉林省住房和城乡建设厅
《农村无害化厕所建造技术指南》	DB42/T 1495—2019	湖北省发展和改革委员会
《农村厕所建设和服务规范第2部分:农村三格式卫生户厕技术规范》	DB33/T 3004.2—2015	浙江省卫生和计划生育委员会
《宁夏农村厕所建设技术性指导意见》	宁农居办发[2019]3号	宁夏回族自治区农业农村厅
《农村无害化卫生户厕技术规范》	DB32/950—2006	江苏省卫生厅爱卫办
《农村户厕改造技术规范》	DB63/T 1755—2020	青海省农业农村厅
《一体式化粪池》	DB41/T 1605—2018	河南省住房和城乡建设厅
《农村地区公厕、户厕建设基本要求》	DB11/T 597—2018	北京城市管理委员会
《江西省农村三格化粪池式无害化卫生户厕建设技术规范》		江西省卫生健康委员会
《厕所革命 农村户厕建设与管理规范》	DB5118/T 4—2018	四川省雅安市质量技术监督局
《全省农村户用卫生厕所建设与管理暂行办法》	晋农社发[2020]9号	山西省农业农村厅
《甘肃省农村改厕技术指导手册》		甘肃省卫生健康委员会
《云南省农村厕所改造建设技术指南》(试行)		云南省住房和城乡建设厅
《农村户用卫生厕所建设及粪污处理技术规程》	DB50/T 1137—2021	重庆市农业农村委
《安徽省农村改厕技术导则》(试行)		安徽省住房和城乡建设厅
《辽宁省农村户厕建设技术要求》(试行)		辽宁省卫生健康委员会
《黑龙江省农村室内户厕改造技术导则》(试行)		黑龙江省住房和城乡建设厅

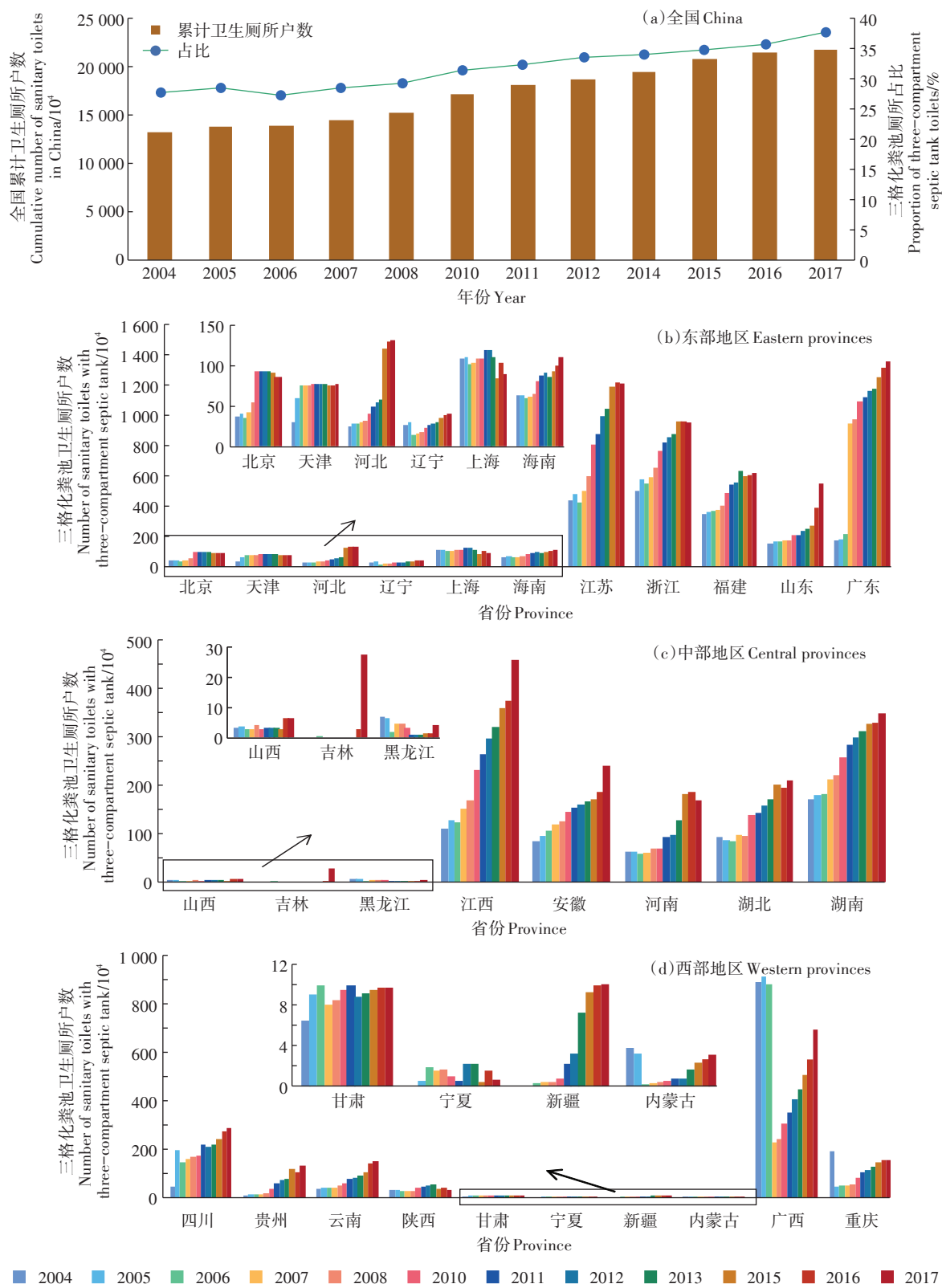


图 a 为 2004—2017 年全国累计农村卫生厕所户数及三格化粪池卫生厕所占比; 图 b、c、d 分别为东部、中部、西部地区各省份近年来三格化粪池卫生厕所户数

Figure a shows the cumulative number of sanitary toilets and the proportion of three-compartment septic tank toilets in China from 2004 to 2017;
Figure b, c and d show the number of sanitary toilets with three-compartments in the eastern, central and western provinces in recent years

图 1 2004—2017 年全国累计卫生厕所及三格化粪池卫生厕所户数

Figure 1 Total number of sanitary toilets and three-compartment septic tank toilets in China from 2004 to 2017

大,而且在各地区内不同省份间也存在显著差异($P < 0.01$)。东部地区,广东省、江苏省及浙江省三格化粪池累计建设量位居前三,截至2017年,广东省累计建成达1 354.4万座;中部地区,江西省三格化粪池建设数量最高,累计达457.6万座;西部地区,除广西壮族自治区外,其余省份三格化粪池建设数量普遍较低。

李晓龙^[5]通过对2003—2012年间我国改厕公平性的影响因素分析发现,影响各地区改厕状况的外界因素主要为当地经济状况、风俗民情、教育水平及气候条件等,其中经济状况为主导因素。张梦杰等^[4]比较了2006—2015年我国农村卫生厕所基尼系数和泰尔指数,结果显示我国农村卫生厕所分布差异逐年缩小,但无害化卫生厕所仍存在显著的区域分布差异。王永生等^[6]则指出由于西部地区经济水平低,农村改厕的财政支持力度小,且西部主要为多民族分散居住区,地理气候复杂,改厕难度较大,导致总体改厕进度滞后。图1中,三格化粪池户数低于50万户的省份主要集中在我国的东北部和西北部地区,这些地区冬季平均气温均在零下30℃左右,且持续时间较长,我国水资源分布南多北少、降水自东向西逐渐递减,尤其是西北地区水资源紧缺,因此,冬季结冰和供水难等问题导致三格化粪池难以在我国西北、东北地区推广。

1.3 三格化粪池应用中常见的问题

虽然三格化粪池在我国农村改厕工作中覆盖面很广,但三格化粪池在应用中出现问题屡见不鲜。2019年国务院农村人居环境整治工作检查组在河南省、安徽省等地抽查发现,三格化粪池普遍存在质量及运行问题,例如出粪口损毁、格池间隔板变形导致串水、排气管未安装等,甚至个别地区三格化粪池厕所建而不用。这些问题的出现直接关系到改厕质量和居民日常生活。

1.3.1 有效容积不足

《农村户厕卫生规范》规定三格化粪池的有效容积 $\geq 1.5 \text{ m}^3$,但部分厂家为了节约生产成本将三格化粪池的总容积按 1.5 m^3 生产,其实际有效容积仅 1.2 m^3 左右,从而无法保证粪污发酵停留时间,导致化粪池出水未达到《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)标准。另外,化粪池的有效容积与农村实际冲水能力相冲突。根据《节水型卫生洁具》(GB/T 31436—2015)标准要求,节水型坐便器、蹲便器用水量一般为4~6 L,按最低4 L的冲水量和每人每日5次如厕进行计算,一个3口之家每日可产生60 L厕所污水,如要

保证粪污在化粪池中60 d(三个格池)的停留时间,则需化粪池的容积至少为 3.6 m^3 ,超出目前常用的 1.5 m^3 和 2.5 m^3 的化粪池容积。若使用有效容积为 1.5 m^3 的化粪池,则粪污停留时间在25 d左右,达不到粪便无害化的厌氧消化时间要求,直接还田可能引发人体健康风险。而选择粪污清掏转运方式的农户,由于化粪池容积过小,缩短了清掏周期,增加了清掏频率,加重了农户的经济和生活负担,从而降低了厕所的实用性,影响农户改厕积极性。

1.3.2 化粪池质量不达标

化粪池质量是保证改厕工作顺利实施的核心,而原材料、生产工艺、技术人员操作等都可能影响化粪池质量^[7]。从早期的砖砌化粪池、现浇钢筋混凝土化粪池,到预制钢筋混凝土化粪池、整体式玻璃钢化粪池和塑料化粪池,化粪池的生产工艺和材质在不断改进,一定程度上减少了易腐蚀、易渗漏的问题,但化粪池格池串水的现象仍然普遍存在^[8]。此外,基于化粪池企业的注册资金统计分析发现,我国农村改厕企业主要为中小型规模。农村改厕企业多数为兼营化粪池产品,且销售模式多以政府、工程订购为主,委托代理为辅,极少数产品以直销模式进行销售^[9]。因此,部分企业为压低价格,生产的化粪池减料减配,如在塑料化粪池生产过程中添加过多辅料,减少原材料用量,使生产的化粪池壁变薄,达不到国家标准要求。据2019年12月初的《焦点访谈》报道,甘肃凉州区某企业化粪池中标价格为每套1 400元,但真实成交价格一套不足600元,导致大量新改厕所化粪池出现质量问题^[10]。因此,应加强化粪池等产品的质量保障力度,例如建立质量评估体系,加大产品质量抽检等,避免不合格化粪池进入改厕现场。

1.3.3 施工质量难以保证

三格化粪池施工过程是改厕的关键环节。部分化粪池质量本身并无问题,但由于施工不规范,导致化粪池变形、破损,无法正常使用。如开封市在厕所改造检查中发现,个别村已填埋的预制三格化粪池已经出现开裂、变形等问题,部分三格化粪池由于坑底未铺设垫层导致化粪池出现沉降、渗漏等问题^[11]。影响施工质量的原因主要有两方面:一是缺乏全流程监督,厕所改造涉及大量农户,过程监督成本较高,一些地方的过程监督及验收只有数量指标没有质量指标,加之对改厕过程中出现的偷工减料、操作不规范等现象把控不严,导致施工质量达不到标准要求;二是施工队伍缺乏专业性,绝大部分施工队伍凭借经验进行

改厕,另外,国家鼓励农民自主投工投劳参与改厕,未经专业培训和指导,因此施工作业达不到国家标准要求,导致化粪池建设及后期运行中出现诸多质量问题^[12]。

1.3.4 粪污处理处置不当

当前各地积极推进农村改厕行动,但部分地方存在“重建轻管”现象,一味强调化粪池的数量,而忽视了厕所粪污的处理处置问题。由化粪池泄漏和粪污不规范排放等引起的非点源污染是造成农村环境污染的重要因素^[13]。李锦冰等^[14]通过对福建省安溪县的调研发现,部分农户三格化粪池的出水直接排放到周围水体,对环境造成污染。任丽华等^[15]发现浙江省化粪池出水约36%直接排入周围土壤,8%左右直接排入水体。目前,我国大部分地区还未建立改厕后的社会化管护机制,粪污抽取、转运和利用等后续工作机制尚不健全,导致粪污资源化利用方式欠规范,主要依据农户自身需求时间对粪污进行清掏利用,并未考虑是否已达到无害化,从而引发了一系列环境卫生问题。RICHARDS等^[16]指出化粪池系统中存在致病菌,如大肠杆菌、志贺氏菌和沙门氏菌等,这些病菌可引起人体腹泻、恶心、痢疾和肝炎等健康问题。TAN等^[17]通过宏基因组学对天津农村三格化粪池出水中的病原体 and 抗生素抗性基因进行研究,发现携带耐药基因的致病菌被高频检出,其进入环境后将威胁动物和人体健康。GAO等^[18]对我国10个省份50户农村家庭厕所粪污微生物群落结构进行分析,也发现三格化粪池出水样品均检测出多种致病微生物。因此,需健全厕所末端对粪污的处理处置工作,加强对粪污的无害化处理,避免将污染排入环境中,引发环境及健康问题。

2 粪污资源化利用与达标处理技术模式类型

国外的化粪池多与末端处理设施配套使用,共同处理厕所粪污和其他生活污水。化粪池和末端处理设施构成一个“现场污水处理系统”(Onsite wastewater treatment system),化粪池仅作为黑灰水预处理装置,黑灰水在化粪池内停留1~2 d,达到沉淀、液化和初步厌氧处理,而无害化、降碳脱氮除磷等主要功能后移至末端处理设施。而我国采用的三格化粪池主要处理厕所粪污,以延长停留时间(粪污需停留1~2个月)的方式使粪污得到充分沉淀和厌氧消化,在化粪池内实现粪污无害化,保留氮磷等养分元素,处理后的粪污可作为肥料还田利用,或后续配套深度处理

技术,实现达标排放,避免形成面源污染。基于目前我国广泛使用三格化粪池处理粪污的现实情况,本文仅探讨以化粪池为主体实现粪污资源化利用和达标处理目标的技术模式。

2.1 资源化利用技术模式

三格化粪池粪污资源化利用模式可分为两种类型,一种是“三格化粪池+就地分散利用”,另一种是“三格化粪池+清掏转运+集中利用”。

“三格化粪池+就地分散利用”模式主要用于单户联户农村改厕及粪污就地资源化,适用于居住分散、有粪污还田需求的农村地区。本团队提出了“粪污不出户,粪污不出田”的就地利用理念,建立了“缺水山区改厕和厕所粪污庭院消纳及大田回用”模式,并在贵州省剑河县进行了示范,已稳定运行3年,当地农户满意度较高^[19]。广西壮族自治区提出了“两次处理-两次利用-实现两化”的“三个两”生态循环型改厕模式,该模式利用单户建设的三格化粪池出水浇灌自家房前屋后的微菜园或微果园,实现第一次处理和利用,随后接入粪污集中处理池,进行农田灌溉利用,实现粪污的第二次处理和利用,最终达到粪污无害化和资源化处理的目的。柳博等^[20]在山东省广饶县基于“厕所+三格化粪池+庭院消纳+菜园经济”模式,探究农村三格化粪池尾水原位土壤消纳对蔬菜种植土壤环境的影响,结果表明三格化粪池尾水原位土壤消纳方式可提高庭院菜园土壤肥力和土壤微生物多样性,实现尾水资源化利用。而针对粪污就地利用可能引发的土壤环境问题,部分学者也开展了相关研究。宋洪锋等^[21]研究发现将发酵后的人类粪施于土壤中不仅能改善土壤理化性质,而且可提升农作物品质。罗凤彬等^[22]指出施用发酵后的人粪便可以在一定程度上提高土壤养分含量、酶活性和微生物丰度,改善了土壤质量。

“三格化粪池+清掏转运+集中利用”模式主要用于整村改厕及粪污资源化,适用于城郊或有经济条件的居住集中的农村地区。该模式主要是通过吸粪车定期抽吸粪液,转运至粪污集中收集站进行集中无害化处理,生产的粪肥根据各地需求再进行资源化利用。河北省邱县创制了“专业抽取,综合处理,变废为宝”的三步处理模式,粪渣最终被制成有机肥自用或对外销售,实现粪污循环利用,同时增加了村集体收益^[23]。目前,粪污清掏转运和集中利用已逐步实现信息化和智能化,山东省无棣县开发了智能化管控系统,通过信息化手段,对中转站、运输车辆、处理中心

和操作人员全要素、全方位实时监控,实现了维修、收集和清运各环节全流程、可追溯的管控^[24]。

目前,由于农村人口的空心化程度不断加剧,个体农户对粪肥的需求急剧萎缩,且农户生产生活观念发生转变,农户不愿自己清掏粪污。同时,农村土地流转率逐年增加,家庭农场、种植大户逐年增多,规模化使用有机肥替代化肥的需求也在不断增加。鉴于上述原因,“三格化粪池+清掏转运+集中利用”模式在农村厕所粪污资源化利用中应用更多。但两种技术模式相较而言,“三格化粪池+就地分散利用”模式建设成本低,易于管护;“三格化粪池+清掏转运+集中利用”模式建设和运营成本相对较高,需要配备专业管护队伍和设备,但易于管理,利用效率高。因此,各地在选择农村改厕和粪污资源化技术模式时,需因地制宜、因村施策。

2.2 达标处理技术模式

KOOTTATEP等^[25]研究指出发展中国家的主要水污染问题之一是化粪池等现场卫生系统排放的污水,其中含有大量的有机污染物、营养物质和病原微生物,检测发现生化需氧量(BOD)、氨态氮(NH₄⁺-N)含量、总磷(TP)含量和粪大肠菌群数分别为102.0~330.0 mg·L⁻¹、20.0~43.0 mg·L⁻¹、3.0~34.0 mg·L⁻¹和7.3×10⁶~1.3×10⁸ MPN·L⁻¹。显而易见,在我国农村改厕的背景下,水冲式厕所大量替代免水冲厕所将导致大量液态粪污产出,如不经深度处理而直接外排,会加重农村水体污染,极大增加了农村生活污水治理压力。然而,截至2020年底我国农村生活污水治理率仅为25.5%^[26]。因此,很多学者为提高传统三格化粪池的处理效率,对其结构和功能的优化升级进行了积极探索,主要体现在以下几个方面:

(1)在化粪池中设置适当的填料层。主要利用填料对常规化粪池进行升级,其中填料增加了微生物附

着面积,提高了微生物对污染物的降解率,同时起到过滤效果^[27]。近期,有研究学者对填料利用进行了优化,主要有两种思路(表2):一种是经化粪池厌氧消化后的出水再进入填料单元,利用填料对污染物进行截留(过滤)、吸附,增加微生物降解效率,提高出水水质^[28~30];另一种是将填料单元内置于三格化粪池中,利用填料拦截大颗粒的有机物,并增加微生物密度及生化反应速率来净化水质^[31~32]。

(2)改变化粪池中的污水水流形态以增强化粪池的处理效果。当进水量较大时,传统的三格化粪池水流状态为水平流,出水水质较差,对污染物的去除效率低。为更好地将厕所污水和生活污水进行协同处理,许多研究人员在化粪池污水水流形态方面进行了一些改进和优化,形成了以升流式厌氧污泥床反应器(Upflow anaerobic sludge blanket, UASB)和厌氧折流板(Anaerobic baffle reactor, ABR)为代表的新型污水处理装置。其中UASB工艺采用上流模式进料,不仅能更好地利用反应器的工作容积还能充当沉降装置^[33]。在适宜的物理和化学条件下,厌氧污泥可以絮凝并形成具有优良沉降性能的颗粒,从而将污染物截留在生物反应器中,而无需过滤器或在流化床中使用填料^[34]。与UASB不同,ABR的基本原理是增加污水与污泥中的活性生物物质之间的接触^[35],主要通过一系列垂直挡板迫使生活污水从入口流向出口,高浓度的生物物质保留在每个格池的上流区域,不仅提高污水处理效率还能减少污泥的产生量。相比UASB,ABR对水力负荷和有机冲击负荷具有更高的耐受性、更长的生物物质保留时间和更低的污泥产率,且它的构建和操作简单,维护方便。陈志强等^[36]利用ABR化粪池和传统化粪池对哈尔滨某居民楼的生活污水进行对比研究,发现在水温24℃时,ABR化粪池对化学需氧量(COD)的去除率相比传统化粪池提高了30.5%。表3

表2 填料型化粪池的相关研究
Table 2 Related researchs on filler septic tank

优化方案 Optimization	实验效果 Experimental effect	文献 Literature
选取化粪池污水处理中典型的三种悬浮填料,每种类型再选取两类常用规格,探究结构相同的悬浮填料在相同填充率下的处理效果	K3填料和多面空心球填料 I 对 COD _{Cr} 、NH ₃ -N 净化效果好;在相同流化程度条件下,总面积大的填料对污水处理效果较好	张新喜等 ^[28] (2018)
采用新型的凹土陶粒和竹丝填料制成复合材料对校园化粪池污水进行净化	复合填料对污水的净化效果优于单一填料,在去除营养盐方面表现良好	张雁秋等 ^[29] (2015)
采用批式试验研究了复合式竹丝填料对化粪池出水中悬浮固体(SS)、化学需氧量(COD)的去除效果	可有效去除化粪池出水中 SS、COD,平均去除率为 90.0% 和 85.4%	曹文平等 ^[30] (2010)
在传统三格化粪池第三格内置陶粒填料	第三格室填料层的设置能够对污染物起到较好的拦截过滤作用	韦昆 ^[31] (2017)
以陶粒(10~12 mm)作为填料对化粪池污水进行处理	对 COD、总悬浮固体(TSS)和病原菌的去除率都超过 85%,并对负荷波动有一定抗干扰作用	SHARMA 等 ^[32] (2014)

表3 UASB和ABR处理污水的相关工作参数和处理效果

Table 3 Relevant working parameters and treatment effects of UASB and ABR in wastewater treatment

生物反应器配置 Configuration of bioreactor	体积 Volume/L	工作温度 Operating temperature/℃	水力停留时间 Hydraulic retention time/h	进水COD Influent COD/ (mg·L ⁻¹)	COD去除率 COD removal rate/%	文献 Literature
UASB	60 000	18~25	23~27	1531	51	HALALSHEH 等 ^[37] (2005)
	120	27	6	195~816	53~57	LEITÃO 等 ^[38] (2006)
	5.65	15	24	800~1 000	83	AKILA 等 ^[39] (2007)
	30	12~27	5.08	30~700	70	GOMEZ 等 ^[40] (2009)
ABR	10	23~31	8	500	90	KRISHNA 等 ^[41] (2009)
	1 000	18	12	760	43	HAHN 等 ^[42] (2015)

所示为UASB和ABR处理污水的相关工作参数和处理效果。

(3)化粪池后衔接不同处理工艺,如“化粪池+自然处理”技术。该技术目前在国际上应用较为广泛,以两格化粪池为主同步收集黑灰水,后端配备土地渗滤等技术。例如,美国环境保护署推荐了以化粪池连接后端排水场或土壤吸收场为主的10种最常用的“化粪池+”处理模式,全美使用比例达20%以上^[43];澳大利亚运行的分散污水处理系统中至少75%以上采用“化粪池+土地渗滤”处理系统^[44];英格兰和威尔士大约有10%的家庭分散污水使用“化粪池+”处理系统^[45]。这种就地污水处理系统不会形成出水的地表外排,为保护公众安全和节约水资源做出了巨大贡献。近年来,随着黑灰水的自然处理技术成为国内研究热点,“化粪池+自然处理”技术在国内也被诸多学者研究与应用。目前常见的自然处理技术包括人工湿地^[46]、土地渗滤^[47]、稳定塘^[48]等,其主要通过过滤、吸附、氧化还原、生物转化、植物吸收等功能处理污水。蒙语桦^[49]探讨了将化粪池和人工湿地结合用于湖南农村地区生活污水生态处理的可行性与适应性条件,发现化粪池与人工湿地联用对污水具有较好的处理效果,并具有投资少、能耗低和管理方便的特点,该模式可复制到气候条件与湖南省相似且土地资源较充足的其他农村地区。张洪玲等^[50]通过多级土壤渗滤系统工程处理示范区污水,在进水水质波动较大、浓度较低条件下,系统对COD_{Cr}、TN、NH₄-N及TP的平均去除率分别为70%、59%、83%和76%,能够达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准。王淞民等^[51]利用“三格化粪池+渗滤沟式土壤渗滤系统”对天津市张老仁庄农户的黑灰水进行处理,研究表明,土壤渗滤系统处理农村黑灰水会显著提高土壤TN、TP含量,经土壤渗滤系统处理农村黑灰水前后的

菜地土壤卫生学指标无显著性差异,同时降低致病微生物对环境的风险。张博雄^[52]通过监测化粪池后端的稳定塘中水质变化情况发现,水体溶解氧含量随时间的推进和沿水面距离的增加而增加,COD_{Cr}、NH₄-N和TP呈逐渐降低的趋势,平均含量接近地表水Ⅱ类水质标准。

三种技术方式相较而言,化粪池中增设填料层方式对填料性质要求较高,若选择不当,易造成阻塞,降低处理效果;改变化粪池中污水水流形态的方式应根据不同的应用条件和出水去向进行选择,后续需适当增加处理工艺以保证达标排放;化粪池后衔接不同处理工艺的方式应借助当地土地和坑塘沟渠等自然条件,因地制宜组装和设计技术路线,充分发挥水土自净功能,实现达标排放。

3 农村三格化粪池技术展望

厕所革命已从单纯的农村改厕发展到改厕和粪污处理及资源化并重阶段,农村对粪污的处理利用需求也越来越高。为确保农村改厕质量,提升农村人居环境整治效果,三格化粪池技术需在以下几个方面进一步改进和发展。

(1)构建三格化粪池产品与施工质量技术标准体系。建立三格化粪池产品质量控制标准,规范三格化粪池选料用料、生产工艺和过程、出厂质量管控等相关环节,从源头确保产品质量合格;建立三格化粪池施工与验收标准,规范施工队伍、施工流程和验收等相关环节,实现施工队伍专业化、施工管理标准化;推动产品及施工的市场化认证及第三方评估。

(2)建立“三格化粪池+资源化利用/达标处理”系统化改厕新模式。三格化粪池功能单一,应将三格化粪池建设和末端资源化或达标处理进行整合,以资源化利用或达标处理技术对三格化粪池技术进行优化

升级,优选增加末端资源化利用功能模块,对厕所粪污及生活污水进行协同治理,为农村庭院与大田种植供水供肥,实现农村改厕与农村庭院经济和农业绿色发展相结合。

(3)构建厕所粪污资源化利用或达标处理的环境及健康风险评价体系。粪污资源化利用及达标处理是未来发展趋势,应探索厕所粪污中养分循环利用规律,提升养分利用效率;加强厕所粪污处理及利用过程中的典型污染物迁移、转化和累积机理研究,防控环境污染风险;开展人体暴露及摄入风险研究,保障人体健康。

参考文献:

- [1] 石炼,秦嘉琦,程小文,等.中部地区某县农村“厕所革命”专项规划实践研究[J].给水排水,2019,55(6):16-21. SHI L, QIN J Q, CHENG X W, et al. Study on the practice of special planning of rural toilet revolution in a county of central region[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(6):16-21.
- [2] 国家卫生健康委员会.中国卫生健康统计年鉴[M].北京:中国协和医科大学出版社,2018. National Health Commission. China health statistics yearbook[M]. Beijing: China Union Medical University Press, 2018.
- [3] 李伟国.把农村厕所革命作为乡村振兴一项重要工作扎实向前推进[EB/OL].(2021-10-12)[2021-11-15]. https://mp.weixin.qq.com/s/6oOnKb_l9bPGjPFkYYKgQ? LI W G. Take the rural toilet revolution as an important task of rural revitalization and move forward firmly [EB/OL]. (2021-10-12) [2021-11-15]. https://mp.weixin.qq.com/s/6oOnKb_l9bPGjPFkYYKgQ?
- [4] 张梦杰,姚伟,付彦芬.2006—2015年我国农村卫生厕所分布差异性分析[J].环境与健康杂志,2018,35(1):61-64. ZHANG M J, YAO W, FU Y F. Distribution disparity of sanitary latrines construction in rural China during 2006—2015[J]. *J Environ Health*, 2018, 35(1):61-64.
- [5] 李晓龙.公共卫生服务公平性研究[D].北京:北京邮电大学,2015. LI X L. Study on equity of public health services—sanitation improvement in rural China as an example[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [6] 王永生,刘彦臻,龙花楼.我国农村厕所改造的区域特征及路径探析[J].农业资源与环境学报,2019,36(5):553-560. WANG Y S, LIU Y S, LONG H L. Regional characteristics and pathway optimization of China's rural toilet improvement[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5):553-560.
- [7] 安洁,翟国印,张伟.农村卫生厕所改造中塑料化粪池产品性能与质量标准的研究[J].中国标准化,2019(19):202-205, 213. AN J, ZHAI G Y, ZHANG W. Research on the standard for performance and quality of plastic septic tank in rural sanitary toilet reinvention: Taking Shandong Province as an example[J]. *China Standardization*, 2019 (19):202-205, 213.
- [8] 赖竹林,于振江,周雪飞,等.我国农村化粪池技术发展现状及趋势[J].安徽农业科学,2020,48(19):69-72. LAI Z L, YU Z J, ZHOU X F, et al. The development status and trend of septic tank technology in Chinese rural areas[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(19):69-72.
- [9] 陈国良,魏海春.全国农村改厕产业化现状调查[J].环境与健康杂志,2015,32(4):328-331. CHEN G L, WEI H C. Investigation on marketization of rural latrines improvement related industry in China [J]. *Journal of Environment and Health*, 2015, 32(4):328-331.
- [10] 新京网.《焦点访谈》曝光厕所改造问题后,省委书记省长严厉批示[EQ/OL].(2019-01-26)[2021-11-15]. <http://www.bjnews.com.cn/feature/2019/01/26/543220.html>. BJNEWS.COM.CN. After the focus interview exposed the problem of toilet renovation, the secretary of the provincial Party Committee and the governor gave strict instructions[EQ/OL]. (2019-01-26) [2021-11-15]. <http://www.bjnews.com.cn/feature/2019/01/26/543220.html>.
- [11] 霍雅芬.农村“厕所革命”政策实施问题研究——基于河南省四市的分析[D].郑州:河南大学,2019. HUO Y F. Research on the implementation of rural “Toilet Revolution” policy: Based on the analysis of four cities in Henan Province[D]. Zhengzhou: Henan University, 2019.
- [12] 刘建锋,陈勇民.浅谈农村三格化粪池建设运行中存在的问题与对策[J].科技致富向导,2011(6):223-223. LIU J F, CHEN Y M. Discussion on the problems and countermeasures in the construction and operation of three-compartment septic tanks in rural areas [J]. *Keji Zhifu Xiangdao*, 2011(6):223-223.
- [13] BILLIAN H, KROMETIS L-A, THOMPSON T, et al. Movement of traditional fecal indicator bacteria and source-tracking targets through septic drainfields[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610: 1467-1475.
- [14] 李锦冰,刘德明,郑子萱,等.福建省安溪县吾邦村地区三格化粪池出水水质调查[J].福建建设科技,2019(4):62-63, 86. LI J B, LIU D M, ZHENG Z X, et al. Investigation on effluent quality of septic tanks with three boxes in Wubang Village, Anxi County, Fujian Province[J]. *Fujian Construction Science & Technology*, 2019(4):62-63, 86.
- [15] 任丽华,楼晓明,陈卫中,等.浙江省农村卫生厕所无害化效果现状调查[J].环境与健康杂志,2013,30(10):924-925. REN L H, LOU X M, CHEN W Z, et al. Investigation on harmless effect of rural sanitary toilets in Zhejiang Province[J]. *Journal of Environment and Health*, 2013, 30(10):924-925.
- [16] RICHARDS S, PATERSON E, WITHERS P J A, et al. Septic tank discharges as multi-pollutant hotspots in catchments[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542:854-863.
- [17] TAN L, ZHANG C X, LIU F, et al. Three-compartment septic tanks as sustainable on-site treatment facilities? Watch out for the potential dissemination of human-associated pathogens and antibiotic resistance[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300:113709.
- [18] GAO Y, LI H Y, YANG B, et al. The preliminary evaluation of differential characteristics and factor evaluation of the microbial structure of rural household toilet excrement in China[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2021, 28(32):43842-43852.

- [19] 人民网. 第一届全国农村改厕技术产品创新大赛——剑河斩获一等奖[EQ/OL]. (2019-10-23)[2021-11-15]. <http://gz.people.com.cn/n2/2019/1123/c194827-33569961.html>. PEOPLE. CN. The first national rural toilet technology product innovation competition: Jianhe won the first prize[EQ/OL]. (2019-10-23)[2021-11-15]. <http://gz.people.com.cn/n2/2019/1123/c194827-33569961.html>.
- [20] 柳博, 杨波, 刘丽媛, 等. 农村三格化粪池尾水原位土壤消纳研究[J/OL]. (2021-03-23)[2021-11-15]. 农业资源与环境学报, <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0768>. LIU B, YANG B, LIU L Y, et al. Study on in situ soil absorption of tail water in a rural three-compartment septic tank[J/OL]. (2021-03-23)[2021-11-15]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0768>.
- [21] 宋洪锋, 潘玉欣, 李彤, 等. 不同处理下人粪肥对土壤肥效及小白菜影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(7): 1111-1114. SONG H F, PAN Y X, LI T, et al. Effect of human manure on soil fertility and Chinese cabbage under different treatments[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(7): 1111-1114.
- [22] 罗凤彬, 李彤, 张杰, 等. 人粪便对土壤微生物及理化性质的影响[J]. 河南农业, 2019(23): 10-13, 15. LUO F B, LI T, ZHANG J, et al. The influence of human excrement on soil microbes and physical and chemical properties[J]. *Agriculture of Henan*, 2019(23): 10-13, 15.
- [23] 高淑云. 邯郸邱县农村生活污水治理管控的问题及对策[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(10): 40-42. GAO S Y. Problems and countermeasures of rural domestic sewage treatment and control in Qiuxian of Handan[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37(10): 40-42.
- [24] 刘延涛, 荆胤淇. 农村居民改厕意愿影响因素探析——对山东省无棣县C镇的调查[J]. 中国农村卫生, 2017(9): 10-13. LIU Y T, JING Y Q. Analysis on the influencing factors of rural residents' willingness to change toilets: An investigation of C town, Wudi County, Shandong Province[J]. *China Rural Health*, 2017(9): 10-13.
- [25] KOOTTATEP T, EAMRAT R, PUSSAYANAVIN T, et al. Hydraulic evaluation and performance of on-site sanitation systems in central Thailand[J]. *Environmental Engineering Research*, 2014, 19(3): 269-274.
- [26] 李松. 分区分类推进农村生活污水治理[J]. 农村工作通讯, 2022(1): 46-47. LI S. Zoning and classification to promote rural domestic sewage treatment[J]. *Rural Work Newsletter*, 2022(1): 46-47.
- [27] 范彬, 王洪良, 张玉, 等. 化粪池技术在分散污水治理中的应用与发展[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1314-1321. FAN B, WANG H L, ZHANG Y, et al. Application and development of septic tank technology in decentralized wastewater treatment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(3): 1314-1321.
- [28] 张新喜, 程晨, 胡小兵, 等. 不同悬浮填料处理化粪池尾水的差异性及影响分析[J]. 净水技术, 2018, 37(9): 88-93. ZHANG X X, CHENG C, HU X B, et al. Analysis of differences and influence on treatment of tail water from septic tank with different suspended packings[J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(9): 88-93.
- [29] 张雁秋, 曹文平, 汪银梅, 等. 复合填料曝气生物滤池净化校园化粪池出水中的营养盐[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2015, 30(4): 24-27. ZHANG Y Q, CAO W P, WANG Y M, et al. Removing nutrients from septic tank effluent by using a biological aerator filter with hybrid carriers[J]. *Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2015, 30(4): 24-27.
- [30] 曹文平, 张君, 宫秀学, 等. 复合式竹丝填料生物反应器处理化粪池出水[J]. 中国给水排水, 2010, 26(3): 106-108. CAO W P, ZHANG J, GONG X X, et al. Treatment of septic tank effluent by hybrid bioreactor with filamentous bamboo carrier[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(3): 106-108.
- [31] 韦昆. 一种用于农村生活污水预处理的新型化粪池[D]. 南京: 东南大学, 2017. WEI K. A modified septic tank for rural sewage pretreatment[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [32] SHARMA M K, KHURSHEED A, KAZMI A A. Modified septic tank-anaerobic filter unit as a two-stage onsite domestic wastewater treatment system[J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(17): 2183-2193.
- [33] GOMEZ C Y. High-rate anaerobic treatment of domestic wastewater at ambient operating temperatures: A review on benefits and drawbacks[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2010, 45(10): 1169-1184.
- [34] CHERNICHARO C A L, VAN LIER J B, NOYOLA A, et al. Anaerobic sewage treatment: State of the art, constraints and challenges[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2015, 14(4): 649-679.
- [35] CHEN Z, WEN Q, GUAN H, et al. Anaerobic treatment of domestic sewage in modified septic tanks at low temperature[J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(17): 2123-2131.
- [36] 陈志强, 关华滨. 新型化粪池处理生活污水启动阶段的实验[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1267-1272. CHEN Z Q, GUAN H B. Experiment on start-up phase of new modified septic tanks treating domestic sewage[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(4): 1267-1272.
- [37] HALAISHEH M, SAWAJNEH Z, ZU'BI M, et al. Treatment of strong domestic sewage in a 96 m³ UASB reactor operated at ambient temperatures: Two-stage versus single-stage reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(5): 577-585.
- [38] LEITÃO R C, VAN HAANDEL A C, ZEEMAN G, et al. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(9): 1105-1118.
- [39] AKILA G, CHANDRA T S. Performance of an UASB reactor treating synthetic wastewater at low-temperature using cold-adapted seed slurry[J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42(3): 466-471.
- [40] GOMEZ C Y, EROGLU V, WILDERER P A. Identifying aceticlastic and hydrogenotrophic methanogens in psychrophilic and mesophilic granular sludges treating synthetic sewage by means of fish and CSLM[J]. *Journal of Rapid Methods and Automation in Microbiology*, 2009, 17(2): 135-153.
- [41] KRISHNA G V T G, KUMAR P, KUMAR P. Treatment of low-strength soluble wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(1): 166-176.

- [42] HAHN M J, FIGUEROA L A. Pilot scale application of anaerobic baffled reactor for biologically enhanced primary treatment of raw municipal wastewater[J]. *Water Research*, 2015, 87:494-502.
- [43] United States Environmental Protection Agency. Types of septic systems[EB/OL]. (2021-07-04) [2021-11-15]. <https://www.epa.gov/septic/septic-systems-overview>.
- [44] BEAL C D, GARDNER E A, KIRCHHOF 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.
- [45] WITHERS P J A, MAY L, JARVIEH P, et al. Nutrient emissions to water from septic tank systems in rural catchments: Uncertainties and implications for policy[J]. *Environmental Science & Policy*, 2012, 24:71-82.
- [46] 徐德星, 海热提, 丁文明, 等. 人工湿地对化粪池出水净化效果的对比研究[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(8):164-168. XU D X, HAI R T, DING W M, et al. Comparison of purification efficiency of septic tank effluent by artificial wetland[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(8):164-168.
- [47] 孟凡凡, 阮建飞, 王文林, 等. 两种典型温度下农村化粪池出水氮素在原地土壤中的迁移转化过程[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(2):206-213. MENG F F, RUAN J F, WANG W L, et al. The in-situ translocation and transformation of the nitrogen of rural septic tank effluent in the soil at two typical temperatures[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2):206-213.
- [48] 杨凤飞, 刘锋, 李红芳, 等. 生物滤池-人工湿地-稳定塘组合生态系统处理南方农村分散式污水[J]. *环境工程*, 2018, 36(12):70-74. YANG F F, LIU F, LI H F, et al. Application of integrated process of biofilters-constructed wetland-stabilization pond in decentralized rural wastewater treatment system in south China[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(12):70-74.
- [49] 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 H. Study on domestic wastewater treatment of rural area in Hunan Province by using septic tank coupled with constructed wetland[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [50] 张洪玲, 邹俊, 陈昕. 多级土壤渗滤系统处理太湖流域农村生活污水的工程研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(9):5178-5180. ZHANG H L, ZOU J, CHEN X. Engineering study on the treatment of multi-soil-layering system on the rural domestic wastewater in Taihu basin[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(9):5178-5180.
- [51] 王淞民, 刘丽媛, 魏孝承, 等. 土壤渗滤系统处理农村黑灰水对庭院菜地土壤环境的影响[J/OL]. (2021-09-29)[2021-11-15]. *农业资源与环境学报*, <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0404>. WANG S M, LIU L Y, WEI X C, et al. Effects of rural black-gray water treatment by soil infiltration system on the soil environment of vegetable garden[J]. (2021-09-29)[2021-11-15]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0404>.
- [52] 张博雄. 井陘县东庄村稳定塘处理农村生活污水技术[J]. *水科学与工程技术*, 2018(2):70-73. ZHANG B X. Application of river ecological stabilization pond technology in Dongzhuang Village[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2018(2):70-73.