



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>

农村厕所粪污无害化处理技术研究进展

张宇航, 沈玉君, 王惠惠, 丁京涛, 贾懿曼, 范盛远, 周海滨, 程红胜, 文宏达

引用本文:

张宇航, 沈玉君, 王惠惠, 丁京涛, 贾懿曼, 范盛远, 周海滨, 程红胜, 文宏达. 农村厕所粪污无害化处理技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 230–238.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0552>

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>

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>

农村资源化公共厕所技术和实施的效益分析

时义磊, 曹智, 周律

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 677–685 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0340>

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>

基于ISM模型的山东省农村生活环境污染影响因素分析

孙艺榛, 郑军

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 576–581 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0182>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张宇航, 沈玉君, 王惠惠, 等. 农村厕所粪污无害化处理技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 230–238.

ZHANG Y H, SHEN Y J, WANG H H, et al. A study on the harmless treatment technology of night soil in rural toilets[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(2): 230–238.



开放科学 OSID

农村厕所粪污无害化处理技术研究进展

张宇航^{1,2,3}, 沈玉君^{3*}, 王惠惠³, 丁京涛³, 贾懿曼³, 范盛远³, 周海宾³, 程红胜³, 文宏达^{1,2*}

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071001; 2. 河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071001; 3. 农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100121)

摘要:农村厕所粪污无害化处理对于预防粪口传播疾病和控制粪污环境污染,推动我国农村“厕所革命”,实现乡村振兴战略目标具有重要意义。本文对国内外的厕所粪污处理技术进行了梳理总结,分析了现有处理技术的优缺点和限制因素。结合当前我国厕所粪污处理现状及需求,提出应重视粪尿源头分离、加强节水型厕所研发,为粪污快速减量化和资源化提供先决条件。同时结合厕所粪污特性的梳理,提出应加强粪污农用验证和环境风险评价等研究,旨在为农村改厕技术产品选择以及粪污处理利用提供参考和借鉴。

关键词:农村卫生厕所;厕所粪污;无害化处理技术

中图分类号:X799.3;S-1 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2022)02-0230-09 doi: 10.13254/j.jare.2021.0552

A study on the harmless treatment technology of night soil in rural toilets

ZHANG Yuhang^{1,2,3}, SHEN Yujun^{3*}, WANG Huihui³, DING Jingtao³, JIA Yiman³, FAN Shengyuan³, ZHOU Haibin³, CHENG Hongsheng³, WEN Hongda^{1,2*}

(1. College of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. Key Laboratory for Farmland Eco-environment of Hebei Province, Baoding 071001, China; 3. Institute of Energy and Environmental Protection, Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China)

Abstract: The harmless treatment of night soil in rural toilets is significant for the “Toilet Revolution” and the strategy of rural vitalization in China, owing to the prevention of fecal-oral transmitted diseases and controlling night soil pollution. This paper summarizes the development of a technology for night soil treatment worldwide and analyzes the advantages and disadvantages of the technology and the influencing factors. Combined with the present situation and the demand for night soil treatment in China, this paper puts forward a research direction that should pay attention to the source separation of urine and feces, strengthening the research and development of water-saving toilets and providing a prerequisite for rapid reduction and resource utilization of night soil. At the same time, combined with combing the characteristics of night soil, it is suggested that the research on agricultural verification and environmental risk assessment by the application of night soil should be strengthened, aiming at providing a reference for the selection of rural toilet improvement technology products and the treatment and utilization of night soil.

Keywords: rural sanitary toilets; night soil; harmless treatment technology

收稿日期: 2021-08-23 录用日期: 2021-11-29

作者简介: 张宇航(1997—),女,河北保定人,硕士研究生,从事农业废弃物资源化利用技术研究。E-mail: hanghanghang0623@163.com

*通信作者: 沈玉君 E-mail: shenyj09b@163.com; 文宏达 E-mail: wenhd@163.com

基金项目: 农业农村部规划设计研究院自主研发项目(ZZYFXXKFZ201901)

Project supported: Independent R&D Projects of Academy of Agricultural Planning and Engineering, MARA(ZZYFXXKFZ201901)

农村卫生厕所建设和粪便无害化处理对于疾病预防控制和农村人居环境整治具有重要意义。1993年我国农村地区卫生厕所的覆盖率仅为7.5%,2015年无害化卫生厕所的覆盖率为57.5%^[1],经过近几年的努力,截至2020年底,我国农村卫生厕所普及率已超过68%^[2]。2021年1月,中央1号文件《中共中央国务院关于全面推进乡村振兴 加快农业农村现代化的意见》指出,将开展五年农村人居环境整治提升行动,分类有序推进农村厕所革命,加快研发干旱、寒冷地区卫生厕所适用技术和产品,加强中西部地区农村户用厕所改造。

与城市居民的水冲式厕所及管网式粪污统一收集处理系统不同,我国农村居民的厕所千差万别,既有水冲式厕所也有旱厕,且水冲式厕所的冲水量与城市也有差异,粪污收集也分为单户、多户、村级等多种形式及规模。当前,多数农村居民居住分散,厕所粪污多以单户收集处理为主。不同厕所类型及使用情况决定着粪污的特性及无害化处理效果,但农村厕所粪污无害化实际效果仍不清楚。因此,本文通过梳理国内外的厕所类型及相应的厕所粪污处理技术,分析现有处理技术的优缺点和限制因素,提出农村改厕类型与粪污处理技术结合的研究方向,旨在为农村改厕技术产品选择以及粪污处理利用提供参考和借鉴。

1 农村厕所常见类型

当前,我国农村“厕所革命”推广使用的卫生户厕主要有三格化粪池式厕所、三联通沼气池式厕所、双瓮漏斗式厕所、粪尿分集式厕所、完整下水道式厕所和双坑交替式厕所^[3]。三格化粪池式厕所是由地上厕所、地下粪池和其他配套设施组成,地下粪池由三池两管构成,其利用虫卵沉降、厌氧发酵以及生物拮抗等原理实现粪便无害化。三联通沼气池式厕所将

猪圈、厕所、沼气池联通起来,人畜粪便在沼气池中厌氧发酵,产生的沼气、沼液、沼渣可为居民提供能源与肥料。双瓮漏斗式厕所主要包括厕所、前瓮、后瓮、过粪管及其他配件,厕所粪污在前瓮发酵沉淀后,中层粪液通过过粪管流入后瓮进行厌氧消化,以达到粪便无害化的目的。粪尿分集式厕所采用粪尿分离便器,将粪尿分开储存于储粪池和储尿桶,利用干化原理处理粪便。完整下水道式厕所即水冲式厕所,与污水管网相连,粪尿统一处理^[4]。双坑交替式厕所采用双坑交替使用,粪污在坑内厌氧发酵半年后可实现粪污无害化处理^[5]。

2 厕所粪污特性及处理技术

2.1 厕所粪污特性

我国城乡经济和生活环境差异较大:城市家庭居住集中,主要采用水冲式厕所,厕所粪污与其他生活污水一并进入管网集中收集后,由污水处理厂统一处理,达标后排放;而农村居住较分散,产生的厕所粪污多为单独收集处理,特别是采用的三格式、双瓮式等水冲式户厕类型,产生的厕所粪污性质与城市管网的污水差别较大。此外,干旱寒冷地区农村采用的旱厕类型较多,旱厕粪污与水冲式厕所的粪污特性也存在较大差异。

由表1可知,新鲜人粪尿与不同厕所类型内的粪污基本理化性质存在差异,而且人粪尿中的盐分及粪大肠菌含量高,若直接将人粪尿还田,可能会带来环境污染风险。新鲜人粪尿的电导率(EC)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、粪大肠菌群数远高于三格化粪池第一池和城市污水,这是因为三格化粪池和城市污水管网与水冲式厕所相连,厕所粪污经过冲厕水的稀释,其各项指标低于人粪尿。旱厕卫生条件差,粪污若不经脱水、高温发酵等无害化处理,粪大

表1 不同粪污的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the different night soil

类别 Category	pH	EC/ (mS·cm ⁻¹)	TN/ (mg·kg ⁻¹ 或 mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·kg ⁻¹ 或 mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·kg ⁻¹ 或 mg·L ⁻¹)	粪大肠菌群数 Fecal coliforms/ (个·g ⁻¹ 或个·mL ⁻¹)	参考文献 References
新鲜人粪 ^s	7.39	5.85	45 540.00	4 807.00	957 350.00	33 500.00	[6-8]
新鲜人尿 ^L	8.51	44.00	20 541.00	654.00	13 520.00	—	
旱厕粪污 ^s	8.09	44.10	2 991.48	1 069.49	11 130.00	230 000.00	
三格化粪池粪污(第一池) ^L	7.36	0.40	99.84	13.80	1 324.77	739.27	
城市污水 ^L	7.56	1.18	21.75	1.90	292.00	23.52	[9-11]

注:S代表固体,L代表液体。

Notes:S represents solid,L represents liquid.

肠菌群数在适宜的存放条件下仍会增加,分别是新鲜人粪、三格化粪池第一池粪污、城市污水的 6.87、311.12、9 778.91 倍。三格化粪池第一池的 TN、TP、COD、粪大肠菌群数高于城市污水,这是由于农村的三格式户厕冲水量少,且城市污水还包含厨房、洗浴等其他污水,导致城市污水的 EC 高于三格化粪池第一池。针对不同类型的厕所粪污应采用适宜的处理技术去除污染物,以达到无害化或利用标准。

2.2 厕所粪污处理技术

农村厕所粪污处理技术较多,包括厌氧发酵、好氧发酵、干化、焚烧等技术,此外,还有一些新型技术,如热解^[12]、电解^[13]、深度处理^[14-16]等。不同厕所类型通过与粪污处理技术的结合,实现了厕所系统前端的卫生收集和后端的粪污无害化效果。其中,三格化粪池式、双瓮漏斗式、三联通沼气池式、双坑交替式厕所主要是利用厌氧发酵技术实现厕所粪污无害化处理,粪尿分集式厕所主要是利用干化技术实现厕所粪污无害化处理。厕所粪污经无害化处理后,其中的病原菌和寄生虫卵被杀灭,变成含有高有机质以及氮磷钾等营养元素的农家肥;但若无害化处理不当,厕所粪污农用会导致病原体的传播,造成二次污染。

2.2.1 厌氧发酵技术

厌氧发酵技术在粪污处理技术中相对成熟,在农村改厕工作中应用较广。此种技术是在密闭环境下,利用厌氧消化菌将粪污转化为 CH_4 、 H_2O 、 CO_2 和有机物等^[4,17]。厌氧发酵过程可分为两个阶段:第一阶段是粪便分解、粪液分层和虫卵沉降;第二阶段为充分的厌氧发酵^[4]。粪污经过厌氧发酵后,病原菌被杀灭,产生的沼渣、沼液可以用作有机肥施入农田,产生的沼气可以用于照明、做饭、供暖等日常生活。据报道,国外应用厌氧发酵技术的有德国吕贝克市的真空厕所后续处理工艺^[18]以及美国农村的带自净功能的厕所^[19]等。国内应用厌氧发酵技术的有三格化粪池式、双瓮漏斗式、三联通沼气池式和双坑交替式厕所。通过对相关文献归纳整理,将 75 份粪污处理结果总结于表 2,其中三格化粪池式、双瓮漏斗式、三联通沼气池式、双坑交替式厕所样本量分别为 34、21、18、2 个。

三格化粪池是目前应用最广的厌氧发酵粪污处理设施,处理后的粪污 pH 约为 7.8,粪大肠菌值约为 6.1×10^{-2} , COD_{Cr} 去除率为 57.3% (表 2)。金小林等^[20]通过检测 130 座三格化粪池的污染物指标发现,三格化粪池的第 3 格可去除 99.96% 的粪大肠菌,并全部达

到无害化卫生标准要求,但对氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 的处理效果较差。宋伟民等^[21]分别在寒季、暖季对渗坑式化粪池的污水处理效果各进行了 1 个月的监测,发现暖季的粪大肠菌群含量高于寒季,说明低温不利于粪大肠菌群的繁殖。王玉华等^[22]通过研究 3 个地区的污水处理效果发现三格化粪池出水水质远达不到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的要求,且处理效果与沼气化粪池相比相差甚远。三格化粪池式厕所常见的不达标原因主要有冲水过多、建造质量不合格、生活污水入池等。

三联通沼气池式厕所常用于养殖户。研究发现,沼气池式厕所出粪口 pH 约为 7.5,粪大肠菌值约为 1.6×10^{-2} , BOD_5 为 $318.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 2)。柳树滋等^[23]认为沼气池式厕所具有经济、生态、综合效益和示范意义,符合农户的如厕习惯,无害化处理效果好,可产出优质肥料和清洁能源,并且可使肠道传染病减少 96.18%,但沼气池式厕所对化粪池和沼气的施工要求较高,需要专业的技术人员建造^[24]。

双瓮漏斗式厕所使用时需控制冲水量。研究发现,经双瓮无害化处理后的粪污 pH 约为 7.7,粪大肠菌值约为 3.4×10^{-2} , COD_{Cr} 去除率为 76.4% (表 2)。双瓮式厕所在保证无害化处理的同时还可保持肥效,韩效才等^[25]检测了 120 个双瓮式厕所的无害化指标发现保氮效率达 95.7%。但胡小红等^[26]调查湖南省 2 个村的 24 户改厕户时发现双瓮式厕所无害化指标的达标率仅占 20.8%,这主要是由冲厕用水量过多导致。另外,冯新元等^[27]、齐振文^[28]、徐国雄等^[29]在调研改厕工作进展时都发现了双瓮式厕所管理不到位的问题。对郑州市农村 1269 户双瓮漏斗式厕所的卫生管理质量调查显示,管理较好的农户仅占 43.4%^[27],说明双瓮式厕所在使用中仍需加强管理。

双坑交替式厕所在干旱或半干旱地区广泛推行,该类厕所是典型的无水型厕所,便后可直接用土覆盖,封存四个半月后,粪大肠菌值约为 4×10^{-3} ,蛔虫卵死亡率超过 96%^[5]。若储存时间小于半年,应经过无害化处理使用^[30]。

厌氧发酵技术的研究和应用时间最长,成熟度高,可实现就地处理,无额外污染负荷与嗅觉污染,资源化利用率高,可产出优质肥料和清洁能源。该技术适用条件广,但处理周期略长,后期维护不便,受设施结构、建造质量、温度、外来物等影响因素较多。该技术成本中等,无额外运输、配套设施及供能的支出,建造费用为每户 300~2 000 元,其中双瓮式厕所 208 d 即

表2 厌氧发酵技术在不同厕所类型中的粪污处理效果

Table 2 Effects of different toilets on the night soil with anaerobic fermentation technology

指标 Index	三格式粪池式户厕 ^[20,22,31-33] Threes-septic-tank toilet	双瓮漏斗式厕所 ^[28-29,34-35] Dual-urn toilet	三联通沼气池式厕所 ^[36-37] Biogas-linked toilet	双坑交替式厕所 ^[5] Dual-pit alternate toilet
pH(进)	—	7.1	7.1±0.4	—
pH(出)	7.8±0.1	7.7	7.5±0.5	—
粪大肠菌值(进)	$2.7 \times 10^{-4} \pm 2.3 \times 10^{-4}$	4×10^{-5}	$4.1 \times 10^{-5} \pm 5.4 \times 10^{-5}$	5.6×10^{-5}
粪大肠菌值(出)	$6.1 \times 10^{-2} \pm 5.1 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-2} \pm 4.7 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-2} \pm 1.7 \times 10^{-2}$	4.0×10^{-3}
每100 mL粪污中蛔虫卵数(进)	4.8	$2.6 \times 10^2 \pm 2.4 \times 10^2$	$1.0 \times 10^4 \pm 1.0 \times 10^4$	—
每100 mL粪污中蛔虫卵数(出)	0.1	6.0±6.0	1.1±1.0	—
COD _C (出)/(mg·L ⁻¹)	436.4±290.3	1.7×10^4	—	—
BOD ₅ (出)/(mg·L ⁻¹)	162.6±79.8	7.4×10^3	318.7±67.6	—
NH ₃ -N(出)/(mg·L ⁻¹)	730.2±1 082.4	—	—	—
去除率/%	TN	6.8	29.9	—
	TP	52.3±28.3	85.3±0.7	—
	TK	—	15.4	—
	COD _C	57.3	76.4	—
	BOD ₅	44.5	65.2	—
	NH ₃ -N	63.2	6.4	—

可收回投资成本,以后每投入1元可带来6.90元的收益^[24]。三格式和双瓮式厕所适合气候温暖具备水冲条件的地区,双坑交替式厕所在缺水地区适用,沼气池式厕所推荐种养结合的农户使用。

2.2.2 好氧发酵技术

好氧发酵技术在我国农村应用推广也较多,该技术是将粪便与生物填料或者基质混合后置于储粪池或发酵罐内,利用粪便自身携带的好氧微生物或者定期投放特殊高效菌种进行发酵,将其分解成CO₂、H₂O和小分子有机物^[19],最终变成有机肥,反应过程中产生的高温可杀灭各种病原体、寄生虫。德国的Locus厕所和WC der Zukunft厕所^[38],我国的好氧型免水微生物堆肥厕所、免水微生物降解型厕所,南非的干燥堆肥厕所^[39],挪威和澳大利亚的旋转式堆肥厕所,日本的木屑免水冲生态厕所^[40],英国的“斜坡”厕所^[41]等都采用了好氧发酵技术。其中,Locus厕所和WC der Zukunft厕所是新型堆肥厕所,通过配置特殊装置实现了粪便的就地生物降解,但成本高昂^[38]。

表3选取了20个数据总结出免水微生物堆肥型厕所(6个)和免水微生物降解型厕所(14个)的粪污处理效果。免水微生物堆肥型厕所的发酵温度可达50.0℃,占地小,动力消耗大^[42-43]。盛保华等^[42]研究的免水微生物堆肥型厕所的反应基质3~4个月更换一次,厕所内的物料减量化约为70%。免水微生物降解型厕所内发酵温度约49.7℃,处理后的粪大肠菌值约

为 3.8×10^{-3} ,厕所的填料可使用1~2 a,粪便减量化可维持在95%以上,但成本高,降解效率受粪尿比例的影响较大^[44]。单宁^[45]研制的免水微生物降解型厕所的菌剂可达到“三无”(零污染、零感染和零废弃物排放)、“三化”(减量化、无害化和资源化)的要求,但目前仅进行了初步探讨,仍需深入研究。

好氧发酵技术成熟度略低于厌氧发酵技术,前者改变了农户的如厕习惯,耗能高,且需要外界干预,效果受填充基质的影响较大,但卫生效果好,处理周期短,安装方便,可产出有机肥^[4]。在处理效果的稳定性和产品质量的安全性方面好氧发酵技术还有待提高^[39],后期使用维护管理不当易导致堆肥失败。好氧

表3 好氧发酵技术(高温堆肥)在不同厕所类型中的粪污处理效果

Table 3 Effect of different toilets on the night soil with aerobic fermentation technology (high temperature composting)

指标 Index	免水微生物堆肥型厕所 ^[42,46] Water-free microbial composting toilet	免水微生物降解型厕所 ^[44-45,47-48] Water-free microbial degradation toilet
温度/℃	50.0	49.7±11.5
含水率/%	51.7±8.5	50±10
pH(进)	7	5.3
pH(出)	8.3	7.8
粪大肠菌值(进)	—	$1.0 \times 10^{-5} \pm 8.7 \times 10^{-6}$
粪大肠菌值(出)	—	$3.8 \times 10^{-3} \pm 4.8 \times 10^{-4}$

发酵技术保温、搅拌、曝气等会造成额外能耗支出,尤其是需要特殊菌剂处理的免水微生物降解型厕所需在购买菌剂方面投入更多,但其具有免水的优势,若替换掉我国所有家庭的冲水马桶,全国每年可节约100亿元的水费和280亿元的污水处理费用^[44]。好氧发酵技术适用于干旱缺水地区,但需负担额外费用,如持续供电和添加菌剂等。

2.2.3 干化技术

干化技术即用强化加热或添加覆盖物的方法使粪污脱水,进行干燥堆肥。圣萨尔瓦多的太阳能厕所、我国农村和瑞典普遍使用的粪尿分集式厕所、芬兰的无水堆肥马桶等^[41]都是干化技术的具体应用。

表4收集到粪尿分集式厕所和太阳能式厕所的卫生学数据共36份,其中粪尿分集式厕所34份,太阳能厕所2份。粪尿分集式厕所收集的尿液可以直接或经简单处理后利用,收集的粪便被草木灰等易吸收水分的偏碱性物质覆盖进行干燥堆肥,可将粪便中的病原体消除^[39,49]。粪尿分集式厕所产物的含水率约为30.1%,粪大肠菌值约为 1.1×10^{-2} (表4)。实际应用中,粪尿分集式厕所常因为管理和使用观念问题达不到预期效果。此类厕所需长期覆盖偏碱性覆盖物,且覆盖不完全会导致嗅觉污染、蚊虫滋生,覆盖物过多促进病原体滋生^[50],影响粪污无害化效果。王俊起等^[51]调查发现,粪尿分集式厕所建设运行成本低,无需水冲,可建于寒旱区^[52],但冬季无害化处理速度较缓慢^[53],且该类厕所改变了用户如厕习惯,使用不当会出现粪污暴露、臭味重等问题。

太阳能厕所利用太阳能集热板干燥粪便,通过吸收太阳的热能加速粪便脱水,无环境污染^[54-55]。太阳能厕所脱水效果较好,处理后的粪便含水率可低至0.02%^[55],但CONSTANZE等^[56]的研究发现太阳能厕所主要受太阳紫外线灯安装位置和当地气候条件影响,

易出现温度低或加热时长不足的情况,影响卫生处理效果。杨兰等^[57]发现,太阳能板与粪尿分集式厕所结合对杀灭蛔虫卵的效果优于使用单一技术的厕所。

干化技术成熟度中等,无环境污染,处理3个月以上可产出有机肥。其中粪尿分集式厕所使用维护较复杂,改变了如厕习惯,处理效果取决于后期使用维护程度,而太阳能厕所主要受外界条件的影响,处理效果不稳定。所有粪污处理技术中成本最低的是干化技术中的粪尿分集式厕所,其成本可低至每户100元^[24],且无额外资金投入,而太阳能厕所的运行费用比普通厕所低。

2.2.4 热处理技术

热处理是利用热化学转化原理将有机质分解为气体和残渣的过程,无害化效果好、减量化程度高,但系统较复杂,存在能耗高、技术产品投入大以及对技术安全性要求高等问题,可在特殊环境下使用。该技术分为焚烧与热解两种处理方式。目前,已有应用该技术的相应厕所产品在国内外进行生产销售,如使用焚烧原理的CINDI®family燃烧式马桶,不仅可以实现粪尿快速减量化,还可有效处理粪污燃烧过程中产生的烟气。该类厕所在我国北京的史家胡同和国外的部分房车中已有应用,但其生产成本低,且使用过程中高温分解技术的安全性还有待于进一步验证。

焚烧是利用燃烧过程中的高温杀死粪便中的病原微生物和寄生虫等,实现厕所粪污的减量化,产生的热量还可用于发电、干化处理等。Stokes团队设计了一套可自动实现粪便干化和焚烧的循环工艺,在供给初始能源后,设备可对粪便进行干化和焚烧,这一过程中产生的热量可用作能源供设备运行,实现能量循环,不足之处在于该系统较复杂且成本较高,需要及时对物料进行补充^[58]。在大规模社区,粪便焚烧产生的热量还可以用于发电^[59]。美国的“incinole”电焚烧厕所可以直接将粪便焚烧,定期清理焚烧后的灰烬,此类厕所节水、无味,适用于特殊极限地区^[40]。

热解是通过热能将粪便分解成可利用的固态和液态物质。AFOLABI等^[12]应用热解技术将粪便热解为尿素和清洁水,可以实现粪便的减量化和无害化,但该技术对粪便的含水率要求较高,进入反应器碳化前需要脱水,且水热碳化过程对压力条件要求苛刻,不易管理,成本高昂,所以目前还没有投入市场应用。

2.2.5 其他技术模式

目前针对污水处理研发的新技术有电解技术^[13]、深度处理法^[14-16]、超临界水氧化技术^[60]、湿式氧化技

表4 干化技术在不同厕所类型中的粪污处理效果

Table 4 Effects of different toilets on the night soil with drying technology

指标 Index	粪尿分集式厕所 ^[49,52,57] Urine diversity toilet	太阳能厕所 ^[55] Solar toilet
含水率(出)/%	30.1±10.3	0.02
pH(进)	9.2±1.5	7.4
pH(出)	9.1±1.2	—
粪大肠菌值(进)	4×10^{-8}	—
粪大肠菌值(出)	1.1×10^{-2}	—
蛔虫卵死亡率(出)/%	97.8±1.8	—

术^[6]等,而作为农村生活污水的一部分,厕所粪污在处理过程中可以借鉴这些新技术。

电解技术是在电解条件下去除污染物并产生清洁水的处理方法^[3]。目前电解技术已进入商业化生产初期^[6],如艾科森太阳能循环水冲生态厕所(简称Eco-san),该厕所将电解技术与其他工艺耦合,可实现污水净化回用。深度处理法是利用膜的选择性分离作用和有机物的特性,实现粪污与清洁水的分离和污染物降解,产生的清洁水可用于回冲厕所或施入农田,如Blue Diversion Toilet,其BAMBi反应器产出的清洁水可满足冲厕水的要求^[4-5]。超临界水氧化技术可以使粪污在超临界水中被快速分解为CO₂,产生清洁水,具有效率高、无嗅觉污染等优点,但需额外供能,成本高^[6]。湿式氧化技术是利用高温高压杀灭病原体,将有机物分解为小分子物质,但能耗较高且效果不稳定^[6]。新型技术虽提升了资源化、减量化、无害化的效果,但成本也大大增加。

各类厕所粪污处理技术的差异见表5。当前各种处理技术在应用中存在的问题主要包括:①厌氧、好氧等生物处理技术仍无法克服用户舒适度不够、环境条件限制等问题,在应用时具有局限性;②以粪尿分集式厕所为代表的干化技术在一定程度上改变了用户的如厕习惯,易出现使用不当和粪污处理效果不达标现象;③焚烧、热解和电解技术成本过高,难以应用于我国农村地区;④污水深度处理法未实现资源循环利用,仅单纯去除污染物,使养分物质浪费;⑤部分技术因能耗高、处理时间长等问题影响了技术的进一步应用推广。因此,在选择粪污处理技术时不能盲目推广,应根据农村实际情况,因地制宜选择经济合理、

资源化水平高的处理方案。

3 结论与展望

厕所粪污无害化处理研究对农村“厕所革命”、资源循环利用以及农业农村发展具有重要意义,但现阶段应用的厕所粪污无害化处理技术均存在各自的局限性,且无害化效果因厕所类型、使用过程不同等存在差异。经对比分析发现,在满足粪污无害化的前提下,厌氧和好氧发酵技术适用地区广,成本中等,可直接产出农家肥,无需二次处理,应进行推广使用。当前,粪污长期农用效果和环境风险尚不明确,仍需深入研究。新型厕所粪污处理技术应结合物理、生物、化学方法,在满足用户基本需求和传统使用习惯的基础上,科学设计厕所系统内部结构,筛选高效的微生物菌群,选择适宜技术工艺及材料,使粪污达到最大程度的减量化和无害化。综合前人的研究和应用现状,未来农村改厕类型及粪污处理技术的发展方向应从以下几个角度考虑:

(1)便器设计满足粪尿源头分离。尿液中几乎不含致病病原体,养分种类和含量也高于粪便,粪尿源头分离处理可以保证粪便和尿液不被稀释和互相污染,减少需处理的排水量和污染负荷,提高处理和利用效率。

(2)冲水设施应节约水资源。水冲厕所不仅消耗大量水资源,还会增加后续处理的工作量,改进现有处理方式,通过真空负压、便器结构优化、新型材料选用等方式减少用水是未来发展趋势。

(3)厕所系统应提高如厕舒适度。研发舒适度高、使用方便、管理简单、卫生效果好的生态厕所,科

表5 各类厕所粪污处理技术比较

Table 5 Comparison of disposal techniques of various toilet types on night soil

项目 Item	厌氧发酵 Anaerobic fermentation	好氧发酵 Aerobic fermentation	干化 Desiccation	焚烧 Incineration	热解 Pyrolysis	电解 Electrolysis	深度处理 Advanced treatment	超临界水 氧化 Supercritical water oxidation	湿式氧化 Wet oxidation
原理	厌氧发酵	好氧发酵	脱水	高温	热解碳化	电解	膜的选择性分离	高温高压	降解
适用地区	温带地区和种养殖户	干旱地区	寒旱区、贫困地区和易长期获得偏碱性覆盖物的农户	特殊极限地区	尚未明确(仍处于研发阶段)	生态敏感地区	尚未明确(仍处于研发阶段)	尚未明确(仍处于研发阶段)	尚未明确(仍处于研发阶段)
优势	成本适中、产沼气、沼液、沼渣	成本适中、节水、产有机肥	成本低、节水、耐寒、施工方便	减量化效果好、可发电	减量化效果好	快速灭菌、产清洁水	无味、产清洁水	无味、产清洁水	消毒、产清洁水
劣势	耗水量大、占地面积大、耐寒系数低、影响因素较多	影响因素较多、后期使用维护管理不当易导致堆肥失败	改变了如厕习惯、不适合畜禽养殖户	耗能高、资源化程度低	成本高	成本高、技术难度大	成本高、流程复杂	反应条件苛刻、能耗高、成本高	能耗较高、效果不稳定

学选择技术产品及材料,使用节水、节能、环保的处理技术,开展厕屋与便器内部、便器与化粪池内部双重隔离结构设计优化,避免粪污暴露,减轻厕屋臭味,提高如厕舒适度。

(4)粪污处理工艺应最大程度满足资源化和快速减量化需求。基于粪便中污染物和养分物质并存的特性,可尝试将多种技术进行组合,优化处理效果的同时将污染物分解或转化成养分物质,以实现资源循环利用最大化,科技工作者应结合国际领先研究,探索新型粪污处理技术和农用技术。

(5)粪污农用效果和环境风险应探明。深入研究粪污农田施用效果与环境风险评价,从经济效益、社会效益、生态效益三方面综合评估无害化处理后的粪污农田施用效果和环境风险,指导粪污科学利用,促进农村厕所革命的顺利推进和人居环境的有效治理。

参考文献:

- [1] CHENG S K, LI Z F, NAZIM U, et al. Toilet revolution in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 216: 347-356.
- [2] 人民日报. 全国农村卫生厕所普及率超68%[EB/OL]. (2021-04-08)[2021-08-23]. http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2021-04/08/nw.D110000renmrb_20210408_3-13.htm. The Peoples Daily. The penetration rate of sanitary toilets exceeded 68% in China rural areas [EB/OL]. (2021-04-08)[2021-08-23]. http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2021-04/08/nw.D110000renmrb_20210408_3-13.htm.
- [3] 范彬,王洪良,朱仕坤,等.我国乡村“厕所革命”的回顾与思考[J]. 中国给水排水, 2018, 34(22): 19-24. FAN B, WANG H L, ZHU S K, et al. Reviews and reflection on "Toilet Revolution" in the countryside of China[J]. *China Water and Wastewater*, 2018, 34(22): 19-24.
- [4] 李慧,付昆明,周厚田,等.农村厕所改造现状及存在问题探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 13-18. LI H, FU K M, ZHOU H T, et al. Current situation and problems of rural dry toilet renovation in China [J]. *China Water and Wastewater*, 2017, 33(22): 13-18.
- [5] 王俊起,南山,孙凤英,等.双坑交替式农村旱厕的卫生学评价[J]. 环境与健康杂志, 2000, 17(4): 210-211. WANG J Q, NAN S, SUN F Y, et al. Sanitary assessment on in-turn-used double-vault dry latrines in rural area[J]. *Journal of Environment and Health*, 2000, 17(4): 210-211.
- [6] YADAV K D, TARE V, AHAMMED M M. Vermicomposting of source-separated human faeces for nutrient recycling[J]. *Waste Management*, 2010, 30(1): 50-56.
- [7] 潘攀,王晓昌,李倩,等.初始温度对人粪好氧堆肥过程的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 939-945. PAN P, WANG X C, LI Q, et al. Effect of initial temperature on aerobic composting of human feces[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(2): 939-945.
- [8] 时红蕾,王晓昌,李倩.人粪好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3434-3442. SHI H L, WANG X C, LI Q. Removal of typical antibiotics during aerobic composting of human feces[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3434-3442.
- [9] 夏世斌,陈小珍,张兆基,等.复合MBR处理厕所污水与回用的试验研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(5): 14-17. XIA S B, CHEN X Z, ZHANG Z J, et al. Study on hybrid membrane bioreactor for black water treatment and reuse[J]. *China Water and Wastewater*, 2007, 23(5): 14-17.
- [10] 田伟,李从文,孙玉龙.一体化中水处理装置在生活污水处理中的应用[J]. 工业用水与废水, 2009, 40(2): 88-90. TIAN W, LI C W, SUN Y L. Application of integrated reclaimed water treatment device in domestic sewage treatment[J]. *Industrial Water and Wastewater*, 2009, 40(2): 88-90.
- [11] 董玉瑛,雷炳莉,王壮,等.废(污)水的理化指标及其对发光细菌的毒性分析[J]. 中国给水排水, 2008, 24(21): 96-98. DONG Y Y, LEI B L, WANG Z, et al. Wastewater characterization and analysis of its toxicity to photobacteria[J]. *China Water and Wastewater*, 2008, 24(21): 96-98.
- [12] AFOLABI O O D, SOHAIL M, THOMAS C P L. Microwave hydrothermal carbonization of human biowastes[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2015, 6(2): 147-157.
- [13] 周燕,梅小乐,杜兵.国内外生态厕所类型分析及其应用研究[J]. 环境与发展, 2013, 25(6): 21-25. ZHOU Y, MEI X L, DU B. The analysis and applicable study on types of foreign and domestic ecological toilets[J]. *Environment and Development*, 2013, 25(6): 21-25.
- [14] RAVNDAL K T, KÜNZLE R, DERLON N, et al. On-site treatment of used wash-water using biologically activated membrane bioreactors operated at different solids retention times[J]. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 2015, 5(4): 544-552.
- [15] RAHEL K, WOUTER P, EBERHARD M, et al. An energy-efficient membrane bioreactor for on-site treatment and recovery of wastewater [J]. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 2015, 5(3): 448-455.
- [16] 许阳宇,周律,贾奇博.厕所系统排泄物处理与资源化厕所技术发展近况[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 22-29. XU Y Y, ZHOU L, JIA Q B. State-of-the-art of resource recovery toilet technology: A review[J]. *China Water and Wastewater*, 2018, 34(6): 22-29.
- [17] 刘春,刘晨阳,王济民,等.我国畜禽粪便资源化利用现状与对策建议[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(2): 35-43. LIU C, LIU C Y, WANG J M, et al. The current situation of resource utilization of livestock and poultry manure in China and the countermeasures and suggestions[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(2): 35-43.
- [18] 李子富, RALF O. 德国某居住区生态卫生系统污水分流处理示范工程[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 81-83. LI Z F, RALF O. Demonstration project of sewage diversion treatment in an ecological health system in a German residential area[J]. *Water and Wastewater Engineering*, 2007, 33(4): 81-83.
- [19] 杜兵,司亚安,孙艳玲.生态厕所的类型及粪污处理工艺[J]. 给水排水, 2003, 29(5): 60-62. DU B, SI Y A, SUN Y L. Types of ecological toilets and night soil treatment technology[J]. *Water and Waste-*

- water Engineering*, 2003, 29(5):60-62.
- [20] 金小林,李健,陈晓进,等.三格式化粪池粪便无害化处理的效果[J].中国血吸虫病防治杂志,2009,21(6):515-518. JIN X L, LI J, CHEN X J, et al. Evaluation of non-hazardous treatment efficiency of night soil in "three-grille mode" septic tanks[J]. *Chinese Journal of Schistosomiasis Control*, 2009, 21(6):515-518.
- [21] 宋伟民,卢纯惠,李锦梅.土壤渗滤处理三格化粪池粪液的可行性论证[J].上海环境科学,1997,16(3):36-37. SONG W M, LU C H, LI J M. Feasibility demonstration on land permeation treatment of night soil sewage from septic tank[J]. *Shanghai Environmental Science*, 1997, 16(3):36-37.
- [22] 王玉华,方颖,焦隽.江苏农村“三格式”化粪池污水处理效果评价[J].生态与农村环境学报,2008,24(2):80-83. WANG Y H, FANG Y, JIAO J. Evaluation of night soil treatment efficiency of "Three-Grille-Mode" septic tanks in the rural area of Jiangsu[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(2):80-83.
- [23] 柳树滋,白志勤.推广“三联通沼气池”的可行性研究[J].新东方,2000(9):50-55. LIU S Z, BAI Z Q. Feasibility study on popularizing "Three Unicom Biogas Digesters"[J]. *The New Orient*, 2000(9):50-55.
- [24] 张丽娜,胡梅,王农,等.当前我国生态厕所的主要技术类型选择[J].农业环境与发展,2009,26(2):33-38. ZHANG L N, HU M, WANG N, et al. Selection of main technical types of ecological toilets in China at present[J]. *Agro-Environment & Development*, 2009, 26(2):33-38.
- [25] 韩效才,乔树海,孙秀芳,等.双瓮漏斗式厕所无害化效果调查报告[J].中国初级卫生保健,1992,6(2):28-29. HAN X C, QIAO S H, SUN X F, et al. Investigation report on harmless effect of double-urn funnel toilet[J]. *Chinese Primary Health Care*, 1992, 6(2):28-29.
- [26] 胡小红,苏爱湘,王光杏,等.双瓮漏斗式厕所粪便无害化处理效果调查[J].实用预防医学,2002,9(3):262-263. HU X H, SU A X, WANG G X, et al. Investigation on the effect of harmless treatment of feces in double urn funnel toilet[J]. *Practical Preventive Medicine*, 2002, 9(3):262-263.
- [27] 冯新元,张本界,阎振生.郑州市农村双瓮漏斗厕所建造与卫生质量调查[J].环境与健康杂志,2001,18(6):347-348. FENG X Y, ZHANG B J, YAN Z S. Investigation on quality of construction and sanitation of double-urn-and-single-funnel latrines in countryside of Zhengzhou[J]. *Journal of Environment and Health*, 2001, 18(6):347-348.
- [28] 齐振文.焦作市农村改厕工作调查[J].中国初级卫生保健,2004,18(3):67. QI Z W. Investigation on toilet improvement in rural areas of Jiaozuo City[J]. *Chinese Primary Health Care*, 2004, 18(3):67.
- [29] 徐国雄,闫振生,张本界.河南省农村环境卫生适宜技术之一——双瓮漏斗式厕所[J].中国卫生工程学,1993,2(4):182-185. XU G X, YAN Z S, ZHANG B J. One of the suitable technologies of rural environmental sanitation in Henan Province: Double urn funnel toilet[J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 1993, 2(4):182-185.
- [30] 中华人民共和国卫生部.农村户厕卫生规范:GB 19379—2012[S].北京:中国标准出版社,2012. Ministry of Health of the People's Republic of China. Hygienic specification for rural household latrine: GB 19379—2012[S]. Beijing:Standards Press of China, 2012.
- [31] 张振农,苏瑾,葛国良,等.农村水冲式卫生净化户厕的建设和卫生学评价[J].环境与健康杂志,1994,11(5):210-212. ZHANG Z N, SU J, GE G L et al. Construction and hygienic evaluation of rural flush sanitary toilet[J]. *Journal of Environment and Health*, 1994, 11(5):210-212.
- [32] 高奕,夏时畅,胡伟,等.浙江省“中央农村改厕项目”无害化处理效果分析[J].中国农村卫生事业管理,2013,33(1):35-37. GAO Y, XIA S C, HU W, et al. Analysis of harmless treatment effect of "Central Rural Toilet Improvement Project" in Zhejiang Province[J]. *China Rural Health Service Administration*, 2013, 33(1):35-37.
- [33] 张建鹏,吴和岩,潘尚霞,等.广东省农村无害化卫生厕所效果评价[J].环境卫生学杂志,2013,3(6):510-514. ZHANG J P, WU H Y, FAN S X, et al. Effect evaluation on non-hazardous latrine in rural areas of Guangdong Province[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2013, 3(6):510-514.
- [34] 王谋江.塑料瓮式化粪池粪便无害化处理效果评价[D].合肥:安徽医科大学,2011. WANG M J. Effect evaluation of non-hazardous excrement disposal of urn type plastic septic tanks[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2011.
- [35] 张本界,徐国雄,程璋,等.双瓮漏斗厕所粪液无害化特性参数的调查研究[J].环境与健康杂志,1997,14(5):21-23. ZHANG B J, XU G X, CHENG Z, et al. Investigation and study on the characteristic parameters of soak of feces in double-urn latrine with funnel-shaped pan[J]. *Journal of Environment and Health*, 1997, 14(5):21-23.
- [36] 刘义,侯通,刘海明,等.沼气户厕的设计和卫生效果研究[J].中国卫生工程学,2002,1(1):41-42. LIU Y, HOU T, LIU H M, et al. Study on the design and sanitary effect of biogas household toilet[J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2002, 1(1):41-42.
- [37] 邵宗体,熊孟韬,冯锡光,等.云南省洱源县血吸虫病流行区农村卫生厕所现状及粪便无害化效果分析[J].中国血吸虫病防治杂志,2015,27(4):348-352. SHAO Z T, XIONG M T, FENG X G, et al. Current situation and effect of non-hazardous treatment of excrement of sanitary latrines in rural schistosomiasis endemic areas of Eryuan County, Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Schistosomiasis Control*, 2015, 27(4):348-352.
- [38] 姚越,周律,许阳宇.环境友好便器研发现状的分析[J].中国给水排水,2017,33(18):39-45. YAO Y, ZHOU L, XU Y Y. Environment-friendly toilet system: State-of-the-art[J]. *China Water and Wastewater*, 2017, 33(18):39-45.
- [39] 何御舟,付彦芬.农村地区卫生厕所类型与特点[J].中国卫生工程学,2016,15(2):191-193,195. HE Y Z, FU Y F. Types and characteristics of sanitary toilets in rural areas[J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2016, 15(2):191-193,195.
- [40] 唐微微.景区生态厕所除臭复合菌剂的研制及应用[D].成都:四川师范大学,2013. TANG W W. Research and application on the complex microbial deodorizer for the household excrement in scenic region[D]. Chengdu:Sichuan Normal University, 2013.
- [41] 高素坤.农村厕所低成本改造技术与应用研究[D].泰安:山东农

- 业大学, 2017. GAO S K. Study on low cost transformation technology and application of rural toilet[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017.
- [42] 盛保华, 高良敏, 钱新, 等. 堆肥式生态厕所处理人类排泄物变化规律研究[J]. 江苏环境科技, 2007, 20(2): 15-17. SHENG B H, GAO L M, QIAN X, et al. Study on changing rule of weight of human feces in the dunghill bio-toilet[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2007, 20(2): 15-17.
- [43] 邢东伦, 刘天舒, 景全荣, 等. 农村免水生态厕所发展现状及趋势[J]. 农业工程, 2020, 10(10): 45-47. XING D L, LIU T S, JING Q R, et al. Development status and trend on ecological toilet without water in rural areas[J]. *Agricultural Engineering*, 2020, 10(10): 45-47.
- [44] 潘理黎, 吕伯昇, 严国奇, 等. 我国免水生态厕所的发展现状与展望[J]. 科技导报, 2005, 23(11): 68-70. PAN L L, LÜ B S, YAN G Q, et al. Current situation and prospect of ecological toilet without water in China[J]. *Science and Technology Herald*, 2005, 23(11): 68-70.
- [45] 单宁. 免水生物降解型生态厕所的实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008: 51-53, 57. SHAN N. Experimental study of ecological non-water toilet[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2008: 51-53, 57.
- [46] 高良敏, 宁桂兴, 钱新, 等. 免水资源综合利用型生态厕所试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 359-362. GAO L M, NING G X, QIAN X, et al. Eco-toilet with comprehensive utilization of water-free resources[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 359-362.
- [47] 古长庆, 李君文, 段惠丽, 等. 免水冲生态厕所在坑道中的应用效果[J]. 解放军预防医学杂志, 2006, 24(1): 16-18. GU C Q, LI J W, DUAN H L, et al. Application of water-free toilet in tunnel[J]. *Journal of Preventive Medicine of PLA*, 2006, 24(1): 16-18.
- [48] 田金丽, 刘士杰, 毛平淮, 等. 环保智能型免水冲厕所生物降解研究[J]. 科技经济市场, 2009(2): 13-14. TIAN J L, LIU S J, MAO P H, et al. Study on biodegradation of environmental protection intelligent flushing toilet[J]. *Science and Technology Economic Market*, 2009(2): 13-14.
- [49] 孙凤英, 潘力军, 王友斌, 等. 电加热粪尿分集式船用生态卫生厕所的卫生微生物学评价[J]. 中国卫生工程学, 2007, 6(4): 196-197, 203. SUN F Y, PAN L J, WANG Y B, et al. Hygienic microbiology assessment of electronic heating eco-sanitation latrine with urine and feces separation used in ship[J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2007, 6(4): 196-197, 203.
- [50] 王飞, 谢鲁. 生态旱厕在四川藏区牧民居住点的应用研究[J]. 城市道桥与防洪, 2013(8): 371-373, 403-404. WANG F, XIE L. Study on application of ecological dry toilet in Sichuan Tibetan herds-men residence[J]. *Urban Roads Bridges and Flood Control*, 2013(8): 371-373, 403-404.
- [51] 王俊起, 孙凤英, 王友斌, 等. 粪尿分集式生态卫生厕所的应用与推广[J]. 卫生研究, 2001, 30(5): 282-283. WANG J Q, SUN F Y, WANG Y B, et al. Application and popularization of urine and feces separation ecological sanitary toilet[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2001, 30(5): 282-283.
- [52] 王俊起, 孙凤英, 王友斌, 等. 粪尿分集式厕所设计及粪便无害化效果评价[J]. 中国卫生工程学, 2002, 1(1): 11-15. WANG J Q, SUN F Y, WANG Y B, et al. Designation, application and evaluation of effectiveness of non-hazardous disposal of excreta[J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2002, 1(1): 11-15.
- [53] 支国强. 粪尿分集式生态卫生厕所的建造和环境卫生效果研究[J]. 云南环境科学, 2003, 22(S2): 42-45. ZHI G Q. Research on building ecologic and healthy toilet collecting the faeces and the urine separately and its environmental health effect[J]. *Environmental Science Survey*, 2003, 22(S2): 42-45.
- [54] 王应宽, 蒲应龔. 太阳能生态卫生厕所[J]. 太阳能, 2001(3): 20-23. WANG Y K, PU Y Y. Solar ecological toilet[J]. *Solar Energy*, 2001(3): 20-23.
- [55] SEYRAM K S, MARIAM S, NOWAKI H, et al. Inactivation kinetics of indicator microorganisms during solar heat treatment for sanitizing compost from composting toilet[J]. *Journal of Water and Environment Technology*, 2016, 14(2): 37-46.
- [56] CONSTANZE W, RALF O. Solar versus non-solar urine diversion dehydration toilets—evaluation of temperatures inside the vaults of different UDDT systems[J]. *Journal of Environmental Protection*, 2016, 7(9): 1121-1243.
- [57] 杨兰, 黎学铭, 吴钦华, 等. 粪尿分集式厕所对猪蛔虫卵灭活效果的观察[J]. 中国寄生虫病防治杂志, 2003, 16(5): 299-301. YANG L, LI X M, WU Q H, et al. Observation on the inactivation effect on *Ascaris suum* eggs in urine directing toilet[J]. *Journal of Pathogen Biology*, 2003, 16(5): 299-301.
- [58] STOKES C D, BALDASARO N G, BULMAN G E, et al. Thermoelectric energy harvesting for a solid waste processing toilet[C]. Baltimore: Proceedings of the SPIE, 2014: 91150G1-91150G5.
- [59] ROMPS W D M. Strategy to achieve energy and water sustainability in Latin America through humanitarian assistance and disaster relief operations[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2016.
- [60] Duke University. Improving Sanitation for developing countries[EB/OL]. [2021-11-25]. <http://sanitation.pratt.duke.edu/>.