



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
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>

国外改厕技术模式与管理机制对我国干旱寒冷地区农村改厕的启示

王佳锐, 魏孝承, 陈咄圳, 高文永, 谭璐, 彭皓, 张春雪, 赵文洁, 王强, 郑向群

引用本文:

王佳锐, 魏孝承, 陈咄圳, 高文永, 谭璐, 彭皓, 张春雪, 赵文洁, 王强, 郑向群. 国外改厕技术模式与管理机制对我国干旱寒冷地区农村改厕的启示[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 927–939.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0411>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

农业资源与环境学报. 2022, 39(2): 209–219 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0790>

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, 周海宾, 程红胜, 文宏达

农业资源与环境学报. 2022, 39(2): 230–238 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0552>

巢湖地区农村生活污水产排污调研方法及实证

何源, 吕锡武, 郑向群, 张丹丹, 吴晓斐, 黄治平

农业资源与环境学报. 2022, 39(2): 319–325 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0131>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王佳锐, 魏孝承, 陈咄圳, 等. 国外改厕技术模式与管理机制对我国干旱寒冷地区农村改厕的启示[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 927–939.

WANG J R, WEI X C, CHEN P Z, et al. Reference for technology models and management mechanisms of toilets in dry and cold regions abroad[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4): 927–939.

国外改厕技术模式与管理机制 对我国干旱寒冷地区农村改厕的启示

王佳锐^{1,2}, 魏孝承^{1,2}, 陈咄圳^{1,2}, 高文永³, 谭璐^{1,2}, 彭皓⁴, 张春雪^{1,2}, 赵文洁^{1,2},
王强^{1,2*}, 郑向群^{1,2*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业农村部农村厕所与污水处理技术重点实验室, 天津 300191; 3. 农业农村部管理干部学院, 北京 102208; 4. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 当前我国厕所革命取得了显著成效, 全国农村卫生厕所普及率超过 70%, 但干旱寒冷地区农村改厕在节水防冻技术、技术模式适配性、粪污资源化利用、管护与运维机制等方面还存在短板, 制约着我国农村卫生厕所的整体提升。本文通过文献和数据调研, 分析国外改厕工作的典型技术模式及其优缺点、适用性、运维机制等内容, 总结提炼国外改厕技术模式的经验与启示, 结合我国国情, 建议从改厕技术模式选择、黑灰水协同治理、指导体系和系统运行机制等方面, 全面提升改善我国干旱寒冷地区农村改厕工作成效, 旨在为我国干旱寒冷地区农村改厕提供理论和实践借鉴, 进一步推进我国农村厕所革命进程。

关键词: 农村厕所革命; 干旱寒冷地区; 技术模式; 土地渗滤系统; 生态旱厕

中图分类号: D422.6; R127 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2023)04-0927-13 doi: 10.13254/j.jare.2022.0411

Reference for technology models and management mechanisms of toilets in dry and cold regions abroad

WANG Jiarui^{1,2}, WEI Xiaocheng^{1,2}, CHEN Peizhen^{1,2}, GAO Wenyong³, TAN Lu^{1,2}, PENG Hao⁴, ZHANG Chunxue^{1,2}, ZHAO Wenjie^{1,2},
WANG Qiang^{1,2*}, ZHENG Xiangqun^{1,2*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Key Laboratory for Rural Toilet and Sewage Treatment Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 3. Administration and Management Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 102208, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: At present, the rural toilet revolution in China has achieved remarkable results; the national sanitary toilet penetration rate has reached 70%. However, the improvement in rural toilets in dry and cold regions has experienced shortcomings in terms of water-saving and antifreezing technology, technical mode adaptation, toilet excrement and sewage resource use, toilet management, and operation mechanisms, which have restricted the overall improvement of rural sanitary toilets in China. In this study, we analyzed the typical technical models, advantages and disadvantages, applicability, management, and operation mechanisms of toilet improvement in dry and cold regions abroad, used in toilet renovation and summarized the experiences with and advances in toilet improvement technology models

收稿日期: 2022-06-25 录用日期: 2022-10-24

作者简介: 王佳锐 (1992—), 女, 辽宁朝阳人, 博士研究生, 从事农村人居环境整治研究。E-mail: Wang_jiar@163.com

*通信作者: 王强 E-mail: wq319320@126.com; 郑向群 E-mail: zhengxiangqun@aepi.org.cn

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2022-jbkyywf-wq); 农业农村部“农村典型卫生户厕粪污监测”项目 (09223004); 天津市科技计划项目 (22YFZCSN00170)

Project supported: Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Funds (2022-jbkyywf-wq); Project of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China (09223004); Tianjin Science and Technology Planning Project (22YFZCSN00170)

in dry and cold regions in foreign countries. As a result, we recommended to comprehensively increase the effectiveness of toilet improvement in rural dry and cold regions in China in terms of research and development of toilet improvement technology, collaborative management of black and gray water, guidance systems, and full-chain operation mechanisms, aiming to provide theoretical and practical reference for rural toilet improvement in dry and cold regions in China and further promoting the toilet revolution in China.

Keywords: rural toilet revolution; dry and cold regions; technical mode; land filtration system; ecological toilet

据报道,全球约有40亿人缺乏安全卫生设施,未经有效处理的厕所粪污存在污染地下水、病原体传播致病等风险^[1-2]。我国农村80%的传染疾病(如儿童腹泻、血吸虫病等)与厕所粪污和不安全饮水有关^[3]。农村厕所革命是全面实施乡村振兴战略的一项重要工作,事关农村人居环境和农民身体健康。2018年,《农村人居环境整治三年行动方案(2018—2020年)》明确指出,加快推进户用卫生厕所建设和改造,进一步提升卫生厕所普及率。截至目前,我国农村卫生厕所普及率超过70%,农村人居环境得到了极大的改善,不仅提升了农民的幸福感和获得感,同时促进了美丽乡村建设^[4]。

我国《农村改厕技术规范(试行)》中,把卫生厕所定义为厕屋(有墙、有顶)清洁、无蝇蛆、无臭,贮粪池不渗、不漏、密闭有盖,适时清除粪便并进行无害化处理。根据是否使用水冲,卫生厕所可分为卫生旱厕(粪尿分集式、双坑交替式)和水冲厕所(三格化粪池、双瓮漏斗式、三联通沼气池式和完整上下水道水冲式)两大类。但我国干旱寒冷地区受当地自然条件、经济发展水平、改厕技术模式、农民习惯、民族风俗等多方面的限制,存在农村卫生厕所普及率低、技术模式不适用、环境卫生差、病原体去除不彻底、设施易冻、粪污资源化利用率不高、管护与运维机制不健全等问题。《2019中国卫生健康统计年鉴》数据显示,干旱缺水地区农村下水道水冲式厕所占比为26.62%,其他类型厕所占比为43.80%,然而下水道水冲式厕所并不适用于干旱寒冷农村地区,其他类型厕所也不能完全满足要求,传统旱厕又难以实现粪污无害化处理要求,因此,干旱寒冷地区农村厕所改造缺少适宜的技术支撑^[5-6]。此外,部分农村地区甚至出现已改厕所不能用、不好用,农民不会用、不愿用等现象,严重制约了我国农村卫生厕所改造水平的整体提升。2021年,《农村人居环境整治提升五年行动方案(2021—2025年)》强调,要切实提高改厕质量,加快研发干旱寒冷地区卫生厕所适用技术和产品。干旱寒冷地区农村卫生厕所改造已成为我国农村厕所革命的难点。突破厕所节水防冻、厕屋清洁除臭和粪污处理等“卡脖子”技术,提供适合干旱寒冷地区的技术

模式和解决方案,成为破解当前难题的关键。

国外干旱寒冷地区改厕起步较早,积累了丰富的理论和实践经验,取得了一定成效。因此,本文通过文献调查并结合实地调研分析国外厕所改造技术模式和管护机制等方面措施,总结国外农村改厕典型技术模式及其优缺点、节水防冻技术以及厕所管理与运维模式等方面的经验,结合我国国情,提出切实可行的实践借鉴与参考,旨在为进一步提高我国干旱寒冷地区农村改厕工作的科学性和实效性,为我国农村厕所革命整体提升提供理论支撑和科学依据。

1 典型改厕技术模式

针对改厕技术模式,国外已开展了一系列的探索,根据是否用水改厕类型可分为水冲厕所和旱厕(表1),其中水冲厕所主要包括化粪池+土地渗滤系统、净化槽等模式,旱厕可分为通风改良坑式旱厕、堆肥式旱厕、粪尿分集式厕所等,其中适用性较广的化粪池+土地渗滤系统和净化槽以及通风改良坑式旱厕等模式,因其施工成本低、处理效果好、管护方便等优点,被广泛应用。除上述几种典型模式外,还包括一些针对干旱寒冷地区研发且已投入实际应用的新型厕所技术。

1.1 水冲厕所

1.1.1 化粪池+土地渗滤系统

化粪池+土地渗滤系统(Septic tank+land infiltration system,图1)是许多发达国家处理分散农村生活污水和厕所粪污耦合使用的技术模式。16世纪,瑞典和德国开启了针对污水灌溉技术的研究。19世纪中叶,英国人Henry Letheby发现土壤对污水的净化作用,首次提出了土壤渗滤系统的概念^[7-9]。20世纪70年代,面对人口、资源、能源和环境的挑战,土地渗滤系统作为一种投资少、成本低、免管护、环境友好型现代污水处理新技术在很多国家得到了应用和发展^[10-12]。澳大利亚有土地处理设施150万个,占污水就地处理设施的75%以上^[13]。20世纪90年代,美国约有23%的家庭使用土地渗滤系统,其中佛蒙特州、北卡罗莱纳州使用比例高达55%和40%^[12,14]。该技

表 1 国外干旱寒冷地区典型改厕技术模式

Table 1 Typical toilet modification technology model in dry and cold regions abroad

类型 Type	技术模式 Mode	模式特征 Feature	可适用范围 Range	代表国家 Country
水冲厕	化粪池+土地渗滤系统	免管护、美化环境/环境友好	寒冷地区	美国、加拿大
	净化槽	建设及运行所需成本低,维护简单,适用范围广	寒冷地区	日本、俄罗斯
	真空负压式	体积小、省水、冲刷效果好、臭气控制好、安装方便、可就地处理,易于养分回收	干旱地区	美国、印度、墨西哥、巴西、土耳其、沙特
旱厕	双坑交替式	成本低、简单实用	干旱地区	南非
	通风改良坑式	除臭效果好、粪污降解快	干旱地区	南非、加拿大、俄罗斯
	堆肥式	粪污可资源化利用,无害化效果好	干旱地区	瑞典、加拿大、英国、美国、澳大利亚
	粪尿分集式	粪污可资源化利用,肥料养分含量高	干旱地区	瑞典、美国、厄瓜多尔、纳米比亚
新型厕所	焚烧/干燥脱水式	粪便转化成可燃物进行焚烧,节约水资源	干旱、寒冷地区	美国、荷兰
	打包密封式	将粪污打包收集,统一无害化处理,移动便捷,卫生无臭	干旱、寒冷地区	美国
	高温处理式	高温高压加快分解速度	干旱、寒冷地区	美国
	冰冻式	冰冻细菌,适合温度低的地区	干旱、寒冷地区	瑞典、芬兰
	空气增压、气压式节水厕所	通过外力形成的气压或补气进行冲洗	干旱地区	英国

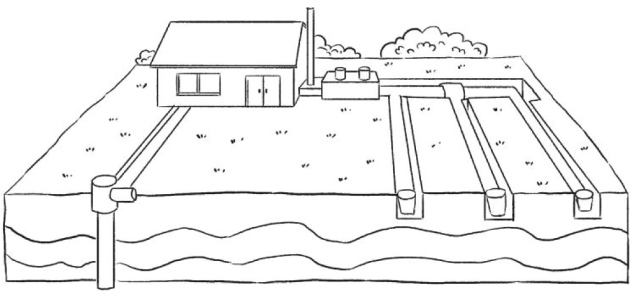


图 1 化粪池+渗漏沟式土地渗滤系统
Figure 1 Septic tank + leakage of groove type land infiltration system

术在日本也得到了广泛应用,20 世纪 80 年代日本学者开发出土壤毛管浸润沟污水净化工艺,处理生活污水的出水水质优于二级处理出水^[13]。目前,美、法、德、以色列等发达国家均推行了与土地渗滤技术相关的土地处理工艺^[15-17]。

化粪池+土地渗滤系统主要由化粪池、布水管(渗滤腔)、渗滤沟、砾石层、处理场地等构成,是以生态学为基本原理,利用好氧-厌氧处理相结合的技术模式,使污水得到净化的一种原位污水处理系统(On-site Wastewater Treatment System, OWTS)^[18-19]。生活污水和厕所粪污经化粪池预处理后,通过布水管道排进具有特定结构及渗透性能的土地渗滤系统中,经过砾石层的过滤作用后,到达渗滤沟下方土壤,经植物根系吸收、土壤吸附、微生物降解等作用,能够去除生活污水中大部分有机物以及 85% 以上的 COD(化学需氧量)、TP(总磷)和 SS(悬浮性固体)等污染物^[20-21]。该系统具有成本低廉、处理效果明显、运行

维护简单且美化环境等优点,已成为许多发达国家处理污水的首选技术模式^[22-24]。以每户每天产生污水量为 1 t 计算,美国规定配套 200 m²的土地渗滤系统,土壤层最佳厚度为 0.60~1.20 m,污水投配到具有一定构造、距地面约 30~40 cm 深的填料中,填料层高度 15~30 cm,常用的填料有砾石、陶砾、碎石、沙土、粉煤灰、碳化稻壳等,且不允许向系统外出水,不能对外环境有影响^[25-27]。为了避免冬季上冻问题,通常采用保温材料进行保温,如带有泡沫材料涂层的套管、高性能玻璃纤维等,以及利用地表杂草和积雪等方式解决保温问题。部分国家对渗漏或休眠化粪池采取解冻应急措施,如美国、加拿大采用 Aero-Stream 有氧修复系统直接给冰冻化粪池通热气,或采用冰钻破冰、添加乙二醇融冰等^[28]。目前,美国国家环保局推荐了 8 种分散式生活污水和厕所粪污处理技术模式(表 2),其中,化粪池+渗滤沟式土地渗滤系统作为典型技术模式,具有良好的经济、环境效益和应用推广价值^[29-30],但在使用时需考虑匹配的面积、系统堵塞和对地下水的污染问题。

1.1.2 净化槽

净化槽(Purification tank,图 2)起源于日本,是一种小型生活污水处理装置,用于家庭全部废水(包括厨房、洗衣、洗澡、厕所废水等)的收集,并增加好氧区进行生化处理^[31]。20 世纪 50 年代,日本经济高速发展,对冲水马桶需求急剧增加,用于处理污水的单独式净化槽迅速发展^[32]。但单独式净化槽最初只是类似于化粪池的简易装备,只对厕所废水加以厌氧处

表2 美国8种分散式生活污水和厕所粪污处理技术模式

Table 2 Characteristics of 8 decentralized rural sewage treatment models recommended by USEPA

技术模式 Technical mode	基本构成 Basic composition	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
化粪池+渗滤沟式传统处理系统	化粪池、沟渠和砾石	建设简单易维护	占地面积相对较大
化粪池+渗滤腔式处理系统	化粪池、开底室或织物包裹的管道和合成材料	运输和建设方便,无需滤料,材料易得、环保	对渗滤腔体材料的选择要求高
化粪池+滴滤分配式处理系统	化粪池和滴灌支管	处理可控,无需占用大量土地	耗能高,需额外组件,增加建设和管护成本
化粪池+人工沙丘处理系统	化粪池、土丘、排水沟和泵	对土壤层厚度要求较低	需要大量空间和定期维护
化粪池+砂滤箱体处理系统	化粪池、泵和砂滤器	养分净化能力强,地上或地下建造均可	建设成本高,耗能高
化粪池+蒸发渗滤床处理系统	化粪池和防水材料	运行简单,不污染土壤和地下水	对光照、温度等环境条件要求高
化粪池+人工湿地处理系统	化粪池和防渗层、砾石和沙子填充物以及湿地植物	投资少,维护方便、美化景观	占地面积大,地域差异性较大
化粪池+多户联用处理系统	两个或多个住宅或建筑物、布水管道	对农户庭院面积要求低	占地面积大,需有合适场地

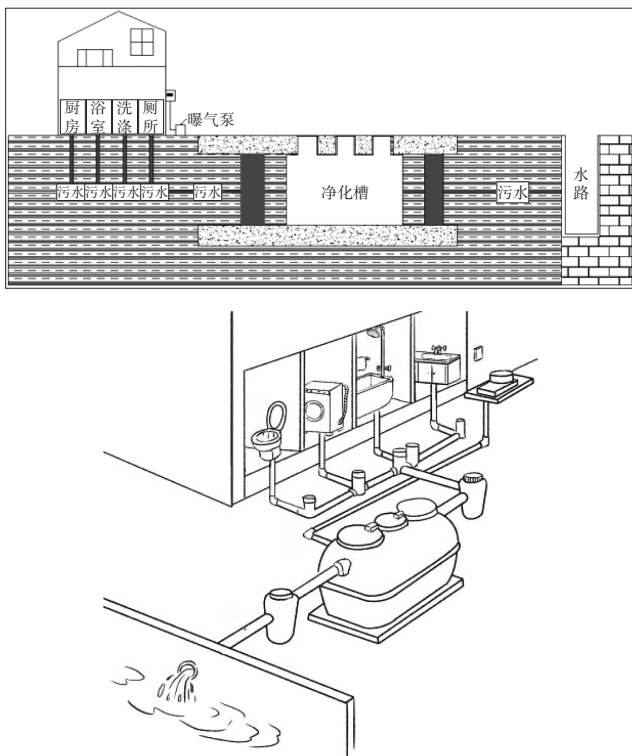


图2 净化槽模式

Figure 2 Purification tank

理,对污染物的降解效果差,仅可作为一种贮水容器使用^[31]。20世纪70年代初,日本研发了小型合并净化槽,可以处理厨房、洗浴、洗衣、厕所等所有生活污水。2001年日本立法取缔了单独净化槽,要求将家庭不同来源的生活污水一同处理,进一步推动了合并式净化槽的发展。合并式净化槽与单独式净化槽相比有两个重要的不同:一是收水对象不同;二是生化处理模式不同,合并式净化槽增加了好氧区域。净化槽是运用物理与生物技术对污水予以有效处理的一

类设施^[33]。对有机物的去除主要是厌氧水解酸化和好氧生物降解作用。净化槽厌氧区内装有各种不同类型的填料并具有厌氧生物膜,使不溶解的大分子有机污染物水解成可溶性的小分子污染物,再进入好氧区停留,经过好氧生物降解得到有效去除^[34]。目前日本的深度处理净化槽技术已经非常成熟,可以达到出水 BOD_5 (五日生化需氧量) $<10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 TN (总氮) $<10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $TP<1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水平。生化工艺原理主要有生物膜滤池、填料流动池、生物滤床流动池、膜反应器等。净化槽技术在日本北海道和俄罗斯南部沿海等低温地区使用时通常采用隔热板或埋深等方式进行保温处理^[35]。该技术具有建设及运行成本低、维护简单、冬季运行良好等特点,适用于居住分散、无集中管网、水质及水量变化较大的农村地区。相比于传统化粪池,净化槽仅增加了一个好氧过程,由于对净化槽理念的认知不足以及推广速度过快等原因,大量净化槽处理效率低、出水水质较差^[34]。

1.1.3 真空厕所

真空厕所(Vacuum toilet,图3)起源于美国,利用冲厕系统产生的气压差,以气吸形式把便器内的污物吸走,以达到减少使用冲厕水的目的,是集环保节水、污物收集、中水回用及绿色制肥系统于一体的技术^[36]。1975年,美国的詹姆斯·肯普尔发明了真空马桶,最初为了解决飞机乘客如厕问题,后来也常用于缺少冲厕水的环境,还常见于游轮、旅客列车等。与传统厕所相比,真空厕所在舒适性上与传统的冲水马桶相似,但产生的黑水的体积和特性有所不同。真空马桶每次冲水平均使用 $0.5\sim 1.5\text{ L}$ 水,每人每天产生 $5\sim 7\text{ L}$ 黑水,而传统马桶产生的黑水要多出 $6\sim 15$ 倍^[37]。真空马桶产生的黑水含有高浓度的营养物质,

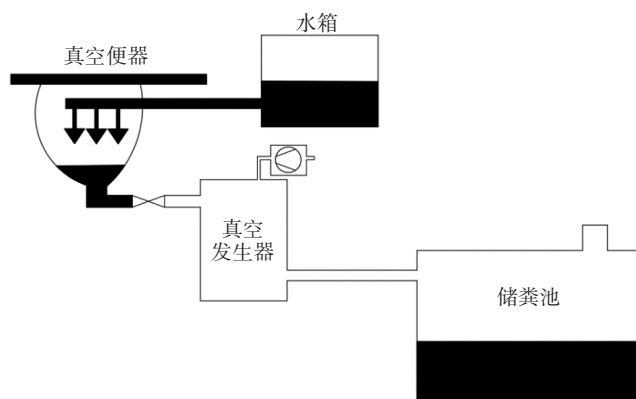


图3 真空厕所

Figure 3 Vacuum toilet

如 $1.4\sim 1.7\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 N 和 $0.15\sim 0.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 P, 浓度为家庭废水的 25 倍^[38-40]。真空厕所具有体积小、省水、冲刷效果好、臭气控制好、安装方便、可就地处理、易于养分回收等优点。但仍然存在使用噪音大、耗电量大、建设成本高、维修管护复杂等问题,在农村地区难以大面积推广。因此,需要研发舒适、低成本、高度节水节能、轻简化、易维护的技术和产品。

1.2 旱厕

1.2.1 双坑交替式厕所

双坑交替式厕所(Double pit latrine, 图4)由传统的坑式旱厕改造而来,一般由厕屋、两个便器和两个贮存池组成,每个便器对应1个独立的贮存池,其中一个使用,另一个封闭堆肥,填满时再将贮存池内的粪便清掏并启用另一个贮存池,实现双坑交替使用。该模式在非洲、南亚等干旱地区应用较为广泛,造价较低,节省水资源,且可对粪便进行干化处理,在高寒地区不易产生厕所冻结问题,但如厕后需要添加填料,很大程度地改变农户如厕习惯,处理不当会直接影响粪便无害化。此外,在孟加拉等国还推行使用双坑微水冲式厕所,用在干旱或地下水位高的地区,排泄物在坑内不需要立即清空,排泄物分解后,可由家庭成员安全排空,经太阳干燥 60 d 后可去除蛔虫卵和病原体,用作宅基地园艺的土壤改良剂^[41-42]。

1.2.2 通风改良坑式厕所

通风改良坑式厕所(Ventilated improved pit, 图5)在非洲地区应用较为广泛,在拥有卫生设施的南非家庭中,约 17.2% 使用这种厕所^[43]。同时也是日本、韩国、美国、欧盟早期水冲厕所采用的模式。通风改良坑式厕所具有永久性的单坑式结构,由深度约 1.5 m 的厕坑以及凝灰岩马桶、蹲台板、通风管和防飞网组成,要想如厕环境舒适卫生,坐便需是直通式的,粪便

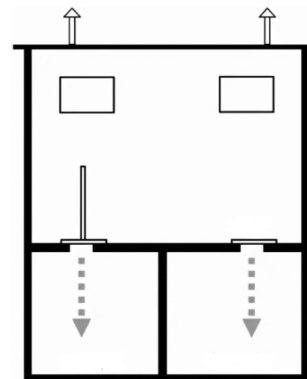


图4 双坑交替式厕所

Figure 4 Double pit latrine

不挂壁^[44]。其原理是粪便在自然通风条件下,长期发酵降解成为腐殖质,粪便中的病原微生物、寄生虫卵等病原体逐渐被杀灭。该系统完成了旱厕的厕所革命,建立了舒适卫生的如厕环境和粪污资源化系统,具有技术简单、造价低廉、无需水冲等优点,同时能达到无害化卫生要求。此外,由于坑式厕所中粪便降解效果好,粪便减量化明显,使用周期可长达 25 年,根据贮罐容积,一般每年两次清淤,基本与农作时机相对应,可用作有机堆肥原料或进一步无害化处理^[45],极大降低了厕所的管护成本,农民满意度较高。但有害物质和致病菌可能渗入地下水,存在污染生态环境的风险^[46]。

1.2.3 堆肥厕所

生态厕所是堆肥厕所和粪尿分离厕所的总称^[47]。

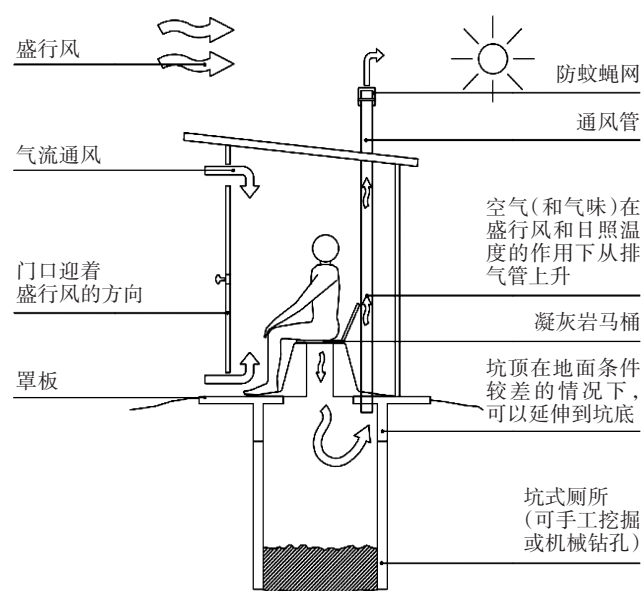


图5 通风改良坑式厕所

Figure 5 Ventilated improved pit toilet

堆肥式旱厕(Composting toilet,图6)主要应用于供水能力不足并缺少集中排污管道系统的欠发达地区,替代传统的水冲式厕所,同时实现粪污的资源化和肥料化,满足物料资源可持续循环经济发展新模式^[48]。1859年,英国的亨利·莫尔牧师发明了第一个有记载的堆肥厕所(地球便器),经各地不同研究者因地制宜地改进和提升,20世纪70年代,该厕所获得了广大农民的认可,在欧美、日本的农村地区被广泛应用,同时在路边与国家公园也较为常见^[49]。另外,日本的正和电工开发了Bio-Lux厕所,芬兰的碧奥兰发明纳托姆干式堆肥厕所^[50-51]。堆肥式旱厕主要由堆肥槽、风扇和排气管组成,通常利用安装的滤网或排水沟来清除渗滤液,并设置一个单独清理堆肥的通道门以便于粪污的清掏。堆肥式旱厕注重对粪便的发酵处理,很少用水或不用水,大小便混合在一起排入下方的储粪罐,掺入木屑、椰棕和泥土等物质混合堆积,经过发酵、腐熟、杀菌等过程,利用微生物将粪便转化成卫生、无味的有机肥。这种厕所具有节能环保、气味小的优点,产生的堆肥可用于作物种植、土壤调节剂等^[52-54]。但后期维护工作量大、占地面积大,初始成本为600~57 000美元,普遍高于抽水马桶,但由于降低了运营成本和影响,其生命周期成本、能源使用和相关的温室气体排放可能低于冲水马桶^[55]。

1.2.4 粪尿分集厕所

粪尿分集式厕所(Urine separating toilet,图7)可将粪便和尿液分开收集,人类的尿液比粪便释放的氮多7~10倍、钾多2~3倍、磷多2~3倍,养分含量高且基本无害的尿液经过短期发酵可直接用作肥料,而含有

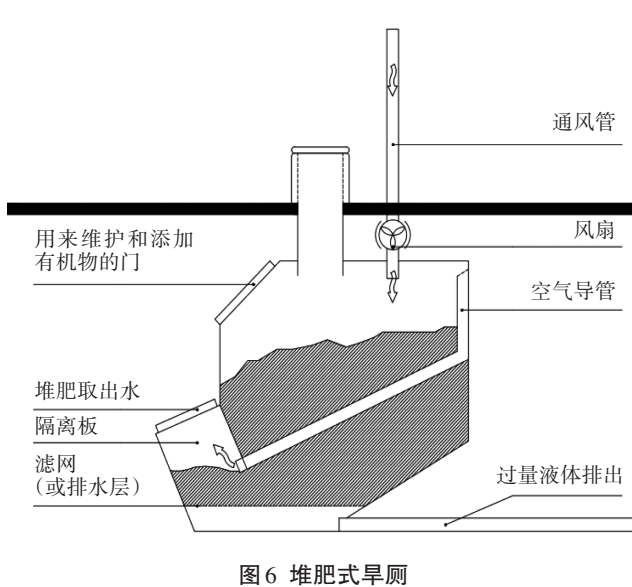


图6 堆肥式旱厕

Figure 6 Composting toilet

寄生虫卵和肠道致病菌的粪便可采用干燥脱水、自然降解的方法实现无害化,变成腐殖质回收利用^[56]。在一些欧洲国家,粪尿分集式厕所已经被广泛应用^[57]。尿液分离可以减少堆肥中多余的气味和水分,分离出的尿液还是一种高效的有机肥料^[48]。粪尿分集式厕所适用于缺水、给水排水系统等基础设施建设成本高,以及环境条件严苛和地下水位较高容易受污染的地区,但由于其建设成本偏高、需要改变使用者的如厕习惯等原因,农户接受程度普遍不高^[58]。

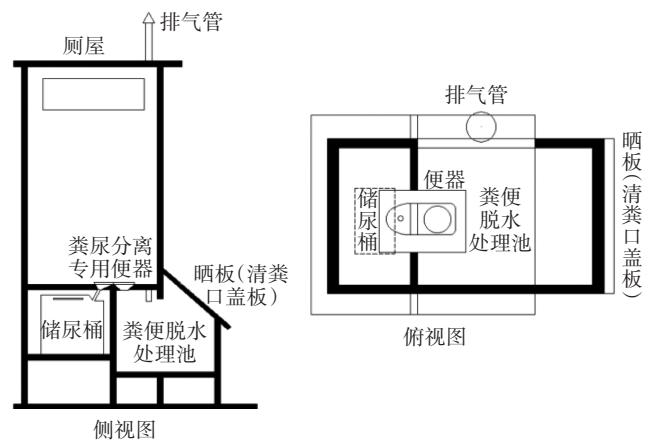


图7 粪尿分集式厕所

Figure 7 Urine separating toilet

1.3 新型厕所

针对干旱寒冷地区农村改厕节水防冻技术瓶颈,当前已研发出焚烧/干燥脱水式厕所、打包密封式厕所、高温处理厕所、冰冻式厕所和空气增压厕所等新型厕所。

焚烧/干燥脱水式厕所基于电化学的消毒与固体焚烧技术,将粪便转化成可燃物进行焚烧,产生的热能则通过热化学器件转化为电能,余热也被利用起来,用于烘干、燃烧粪便。该厕所免冲水,高温(400~500℃)消毒灭菌彻底,卫生、安全、健康,粪便减量化显著,可直接用作肥料,在美国、荷兰等国家应用较多。但该厕所成本高、耗能大,因此应用场景存在一定的限制,常见于露天野外集会的应急使用。

打包密封式厕所是采用生物可降解材料(高分子聚合材料等)打包袋将粪污打包密封收集,再进行统一无害化处理的一种移动便捷、卫生无臭的新型厕所。但该厕所粪便需二次运输和处理,增加了使用成本,同时存在粪便二次污染风险,适用于展会、建筑工地、灾区营地等临时性、应急性场所^[59]。

高温处理厕所是一种基于高温高压处理设计的

新型厕所。高温处理工艺能快速升温到60~70℃以上,不仅能加快粪便分解速度,提高处理效率,同时还能杀死病原微生物等致病菌,防止致病风险传播。

冰冻式厕所于20世纪70年代由瑞典研发,通电降温后粪便中的细菌在低温状态下代谢速率降低,臭味大减,同时制冷机产生的热量能够烘热马桶圈,不需要通风和添加化学药剂。此外,冰冻式厕所的制冷压缩机在低温条件下能更好地运行,适合在寒冷地区应用。

空气增压厕所2006年由英国发明家设计,是一种在原有马桶水箱的基础上,增加一个气压装置对马桶进行补气冲洗的新型厕所,可达到节水目的。同原理的还有气压式节水厕所,改用气箱通过外力形成的气压来冲走便池内的污物,并喷出一小股清水冲刷池壁,从而达到节约用水且卫生的目的。

2 国外干旱寒冷地区厕所节水防冻技术措施

针对干旱寒冷地区厕所季节性无法正常使用等情况,美国、加拿大、北欧等国家和地区采取了一系列节水防冻措施(表3)。

2.1 防冻措施

一是经常使用厕所。美国、加拿大学者普遍认为,经常使用的化粪池冻住的可能性较低,主要是因

为化粪池底部的土壤热量会传递给化粪池得以增温;同时,化粪池中的微生物生长和粪污发酵等作用也会产生热量;此外,来自室内的冲水为室温,也为化粪池提供了一定的增温效果^[60]。只有在非常寒冷、没有或有很少积雪覆盖的地方,且化粪池不经常使用或新安装的化粪池系统,才需要考虑防冻保温问题^[28]。二是水冲厕所入室。水冲厕所的厕屋建在室内,可充分利用室内暖气提供热量,确保便器和冲水系统不冻结,解决上下水管道冻裂问题。三是适度埋深。美国要求将管道和化粪池埋深到46~61 cm,并不建议深埋,以便降低深埋对化粪池材质性能的要求,以此降低化粪池产品的制作成本,同时,适度埋深能大幅降低施工建设成本^[61-62]。四是覆盖物或积雪层防冻。该方法为国外防冻的主要措施,利用稻草、树叶、干草或其他松散的材料覆盖管道、化粪池和土壤处理系统,厚度一般为20~30 cm,覆盖范围向化粪池外延伸1~1.5 m,且不能压实。此外,顶部覆盖超过30 cm厚的积雪也能起到很好的防冻效果^[28]。五是包裹保温材料。常用保温棉套包裹管道,或在设施上端铺设聚苯乙烯等材料的保温层。六是安装增温设施。利用电加热或电辅热等措施对管道和化粪池增温^[60]。七是采用集热蓄热、储热材料。厕屋、地理管道、粪污设施等采用集热、蓄热等材料,将太阳能光热、电制热、地热等

表3 国外干旱寒冷地区节水防冻技术

Table 3 Water-saving and anti-freezing technology in dry and cold regions abroad

措施 Measure	技术 Technology	技术特点 Feature	缺点 Disadvantage	适用地区 Range	代表国家和地区 Country and region
防冻措施	经常使用	保持水的流动	不能闲置	寒冷地区	美国
	水冲入室	利用室内温度保护冲水系统和便器不上冻	成本费用高	寒冷地区	美国
	适度埋深	管道和化粪池埋深到46~61 cm	管道与化粪池接口处易开裂	寒冷地区	美国、加拿大
	覆盖保温	利用稻草、干草或其他松散的材料覆盖管道、化粪池和土壤处理系统以保持温度	保温效果欠佳	寒冷地区	美国、加拿大、北欧
	包裹保温材料	保温棉套包裹管道,或在设施上端铺设聚苯乙烯等保温层	成本较高	寒冷地区	美国、加拿大
	加装增温设施	利用电加热对管道和化粪池增温	成本费用高	寒冷地区	美国、加拿大
	采用集热蓄热、储热材料	厕屋、地理管道、粪污设施等采用集热、蓄热等材料	成本费用高	寒冷地区	美国、加拿大
	防止渗漏	加强管道、化粪池防渗功能	工艺要求高	寒冷地区	美国、加拿大
	引入低温耐冷降解菌	通过低温耐冷降解菌在低温环境去除氮磷	降解效果不稳定、易受环境条件影响	寒冷地区	加拿大、日本
	应急处理	对冻住的化粪池,采用热水冲、打入高温蒸汽的方式打通管道,用冰钻破冰	非防范措施	寒冷地区	美国、加拿大、北欧
节水措施	采用生态旱厕	减少冲水	冬季效率低	干旱、寒冷地区	北欧
	污水回用技术	污水在系统内循环,实现节水	需用电	干旱、寒冷地区	加拿大、北欧
	雨水回用技术	收集雨水替代冲厕用水	占地面积大	干旱地区	中欧
	表面涂层	马桶表面涂有光滑涂层	生产成本高	干旱地区	美国、加拿大

热能进行储存,并在寒冷时释放,达到保温防冻作用。八是防止渗漏。渗漏是引发管道冻结的重要原因,管道、化粪池或土地处理场渗液可能发生冻结并逐渐堵塞管道^[28],因此,应及时对系统防渗功能进行安全检查,并采取相应措施对系统进行防渗处理,以防止渗漏现象的发生。九是引入低温耐冷降解菌。加拿大大学针对低温条件下耐冷菌对粪污的降解研究,从南极和北极分离出4株耐冷丝状蓝细菌,在低温环境时对粪污中氮和磷均有较高的去除率^[63]。十是应急处理。针对已经冻结的化粪池,可采用热水冲厕,或打入高温高压蒸汽的方式疏通管道,或采用冰钻对化粪池进行破冰处理,以应对厕所冻结的问题。

同时,各国也提出了一些不推荐的应急措施:一是在化粪池埋设地面上点火增温。二是采取连续供水来解冻已冻结的管道。三是在化粪池或管道冻结后再铺设覆盖物。四是添加防冻剂、盐或添加剂^[64]。此外,少数地区也有采用乙二醇、丙二醇防冻剂给化粪池解冻的做法。以上做法应谨慎使用。

2.2 节水措施

一是采用生态旱厕或节水厕所。在北欧、加拿大等国家和地区,地处偏远或居住分散的农户,或者一些环保主义者,通常采用生态旱厕或节水厕所来减少冲水^[65-66]。生态旱厕技术与国内相似,包括堆肥式和生物降解式两种类型。二是污水、雨水回用。利用污水、雨水回用等技术,丰水期储水、枯水期用水,实现干旱地区节水冲厕^[54,67-68]。三是表面涂层。通过便器表面涂层减小粪便对便器的黏附性,减少冲水量。光滑涂层(如特氟龙 PEF 和 PFA 等)具有优良的不粘性,结冰期不会脆化,可节约大量水资源,也可适应高寒地区的环境条件,在便器改造上具有可行性^[69]。

3 国外干旱寒冷地区厕所管理与运维机制

北欧、美国、加拿大、日韩等发达国家和地区针对干旱寒冷地区的农村厕所管理与运维开展了一系列探索和实践并取得一定的成效,逐渐形成了较为成熟的管理模式与运维机制。

一是完备的法律法规。1972年,美国颁布了《清洁水法案》(The Clean Water Act, USEPA),采用国家污染物排放消除制度、对排入地表水的农村水处理设施实行排污许可证制度、对水质受损流域内的农村面源污染进行控制、对水质受损流域的所有农村污染源制定排放限值等方式方法,实行总量控制。此外,还颁布了《安全饮用水法案》《水质法案》等,各州都有相

关立法,形成了一套较为完整的法律法规体系^[70]。在日本,围绕净化槽出台了《净化槽法》《净化槽法施行规则》《农业村落排水设施设计指针》等,在建设、运行和维护等方面建立了技术指导和市场监管体系,推动了净化槽产业规范化、专业化和规模化发展^[71]。

二是完善的标准体系。日本制定了内容详细、规范明确的化粪池、净化槽技术标准体系。1960年的《化粪池使用人员计算方法》规定了不同用途的化粪池的使用人员计算方法,又先后颁布了构造标准、维护检查技术标准、清扫技术标准、施工技术标准和出水技术标准等工业标准,明确规定了处理工艺选择、处理性能、结构设计等,形成了较为完善的技术标准体系^[72-73]。此外,日本还颁布了《净化槽性能评价方法及细则》等,建立了认证和性能评价体系^[73-74]。美国联邦环保局发布了《分散处理系统手册》《分散处理系统管理指南》等,为农村生活污水处理提供了技术规范。

三是专业的管理机构。国外厕所建设和管护主要由政府主导实施,农户及企业参与设计、建造和管理,针对厕所运行和管护过程中常见的紧急事件,建立了相应的管护应急处理机制(如建立管护队等)。此外,美国、芬兰、新加坡、韩国、日本等对于厕所管理都设有专门机构——厕所协会,其主要职能是在政府委托下为公共厕所的建设提供援助,对厕所进行管护、品质认证,组织关于厕所的研讨、交流,征集关于厕所的设计和创意,对全国的公共厕所实施等级制度等^[75]。此外,日本拥有全国性的净化槽管理体系,目前有超过64 000名公务人员负责管理净化槽,确保该系统在全国稳定运行。1985年,日本成立“净化槽协会”,并且创建了自己的刊物,掀起了“厕所文化”建设,日本逐渐成为世界上厕所普及率最高的国家之一,形成了“清洁化、人性化、科技化”为核心内涵的日本厕所文化^[76]。

四是健全的补贴机制。美国和日本都通过补贴的方式引导居民更多地安装分散型污水处理系统^[77]。美国《清洁水法案》授权联邦政府为各州设立滚动基金,以低息或无息贷款的形式帮助各州实施污水处理。美国国家环保局、农业部、房屋和城市发展部以及州政府提供了如贴息贷款项目、为当地居民减免税收、提供资金支持长期维护等多种形式的支持。日本农村污水处理项目的建设资金主要来自地方政府筹资和中央政府拨款,运营管理资金主要来自污水处理费。对于使用家庭生活污水全收集处理的净化槽,国

家和地方政府会对当地村民进行补助。此外,对于净化槽的补助,如果以村庄为单位进行安装,则国家补贴70%、地方政府补贴20%、个人承担10%。如果个人安装,则国家补贴70%、个人承担30%。但最初净化槽和安装费都由个人垫付,国家和地方政府补助部分将通过个人所得税扣除方式,逐年还给用户^[78]。

4 国外模式和机制对我国干旱寒冷地区农村改厕的启示

4.1 改厕技术模式

目前,我国推进农村厕所革命要从农民实际需求出发,具备条件的地方可推广水冲卫生厕所,要统筹做好供水保障和污水处理二大任务;不具备条件的地区可建设卫生旱厕,并从两方面进行突破:一是建立舒适卫生的如厕环境,二是加强粪污资源化利用。

(1)干旱地区节水技术模式。针对传统旱厕保有量大和厕所环境卫生条件差等问题,一是开展厕所环境提升及空气、粪便除臭技术研究;二是开展厕所结构和功能改造、原位防渗漏技术以及粪污无害化技术研究,整体提升传统旱厕的如厕环境。针对免水冲厕所粪污无害化程度低和粪污清掏难等问题,开展生态旱厕新技术新产品研发,通过微生物菌种和补碳材料筛选,采取风、光、电等互补供能方式,进一步强化粪污降解速率;针对常规管道排污用水量大、抗冻耐寒性能不佳等问题,开展微水冲管道厕所关键新技术和新装备研发。关于模式的选择,首先应考虑生态旱厕,以生态方式实现粪污的无害化和资源化;其次选择节水冲、微水冲甚至免水冲的技术。本文将我国干旱缺水地区分为常年干旱地区和季节性干旱地区,对于常年干旱地区(如西北地区),主要推广卫生旱厕,适度推广节水型水冲厕,可以选择双坑交替式、通风改良坑式、粪尿分集式厕所,建立舒适卫生的如厕环境,同时提升厕所粪污资源化利用效率;供水困难且经济条件一般的地区、牧区可推广堆肥式旱厕;供水困难但经济条件较好的地区,可推广应用生物降解式旱厕;对于有冲水条件的地区,可推广水冲式卫生厕所,但要以节水冲、微水冲技术为前提。对于季节性干旱地区,可实施水资源“夏储冬用”等多举措,农村改厕应注重冲水设施建设,完善储水系统建设,实现降雨季节储水,补给枯水季用水。

(2)寒冷地区防冻技术模式。针对我国寒冷地区低温环境下厕所系统冰冻、爆管、粪污处理效率低、运行管护难等问题,可开展以下方面的研发:一是开展厕所系统保温技术研发,开发保温防冻包裹新材料以

及双层保温管道及粪污处理设施;二是开展厕所系统增温技术研发,利用太阳能集热-储热实现管道和设施增温;三是开展厕所粪污增效处理技术研发,筛选低温菌剂,增强粪污厌氧环境稳定化处理效果,实现寒冷地区厕所粪污增效处理。关于模式的选择,首先考虑防冻效果,其次是运维管护,同时也要考虑经济成本和技术实用性等。我国旱厕主要适用于室外,随着水冲厕所入室成为趋势,寒冷地区更需要解决的是水冲厕所的防冻问题。目前,我国寒冷地区农村水冲厕所应用最为广泛的是深埋技术,但大规模应用还存在一定问题:一是深埋过程中土方开挖和回填量大,若填埋操作不规范易造成设施和管道位移,导致连接处错位或变形开裂;二是深埋的化粪池等后端粪污储存和处理设施若损坏,维修难度大;三是后期清掏管护不方便,需要采用专用的运维管护设备。笔者实地调研也发现,各地对该技术模式的施工成本高、管材易破裂、管护难度大等问题反响强烈。借鉴国际经验,课题组在黑龙江呼兰、内蒙古兴安等地试验了浅埋双层保温化粪池,其通过了2个冬天的稳定运行考验,化粪池埋深在60 cm时,室外-20℃仍然正常使用,建议我国寒冷地区的水冲厕所入室,可采用适度深埋+表面覆盖等技术,选用双层保温化粪池,埋深可以提升至约60 cm,管道包裹保温材料,地表覆盖20~30 cm秸秆或其他当地易获取的材料。

(3)寒旱地区农村黑灰水协同处理技术模式。与我国单纯开展农村改厕不同,国外发达国家的农村厕所并非一个独立的单元,而是厕所改造兼顾生活污水与厕所粪污统筹收集处理,将生活污水与厕所粪污集中收集,处理后达标排放或实现资源化利用。如今,厕所粪污无害化处理与资源化利用已成为农村改厕的重点工作之一。国外广泛采用化粪池+土地渗滤技术,同步处理厕所污水、厨房污水和洗涤污水,实现了生活污水和厕所粪污的资源化利用。我国也可推进农村改厕和黑灰水协同处理,借鉴并改进化粪池+土地渗滤系统,利用农村闲置土地消纳厕所粪污和生活污水,或利用庭院种植及大田种植实现资源化利用。

4.2 改厕机制

(1)建立专业化、多元化、规范化、标准化、制度化“五化”指导体系。国外发达国家针对农村改厕建立了较为完善的专业管理体系、法律法规体系以及技术标准体系。目前,我国还未设置专门的管理农村厕所的机构,在厕所建造和粪污治理方面缺少相关的法律 and 标准。我国可借鉴发达国家组织建立厕所协会,

对厕所进行管理和维护;以法律形式明确各主体的强制性责任,并对污染物的排放行为进行约束;对于厕所改造、生活污水系统,特别是土地渗滤系统、净化槽、通风改良坑式厕所、堆肥式旱厕和粪尿分集式厕所的产品设备、工程设计、技术方法、建设验收、运行维护、清理检查 and 环境保护等多方面建立完善的技术标准体系。

(2)建立“建设-管理-使用-付费-补贴”全链条运行机制。国外厕所在建设、管护、使用、处理和补贴方面建立了全链条的运营机制,目前,我国以奖补方式支持和引导各地推动农村厕所革命,国家层面实施农村厕所革命整村推进财政奖补政策,每年补贴近百亿元,地方也配套相应的资金。而我国部分地区改厕资金完全由地方政府和国家资金支持,无需农户出资或投工投劳。借鉴国外经验,我国可适当探索建立农民付费制度,鼓励农民投工投劳,构建政府、农户、企业共同建设、管理、维护,农户使用付费和政府补贴全链条运行机制。

(3)建立服务(Service)、示范(Show)、监督(Supervise)“3S”管理机制。干旱寒冷地区农村改厕施工难度大、技术要求高、产品质量严、管护压力大,需要有针对性地开展干旱寒冷地区农村改厕技术指导与培训服务,组织高校、科研院所和企业对深埋、适度浅埋、保温材料覆盖等有较高要求的防冻技术,在施工建设、正确使用和日常维护方法等方面对改厕基层干部、技术骨干和施工单位开展培训并进行全面指导,保证厕所有效发挥作用,同时消除老百姓的顾虑和担忧。相关部门可组织开展干旱寒冷地区改厕新技术、新产品展示交流活动,展示成熟技术和适用产品,提供经济适用、操作方便的产品,并对新技术产品开展试点示范,经过一个完整春夏秋冬周期后再推广使用。此外,地方政府应加强对农村厕所革命的持续监督,借鉴日本经验,分片包干责任到人,发挥乡镇干部、驻村干部和村干部的积极作用,对厕具质量、厕所建设、竣工验收、维护管理等过程进行持续监督。

5 展望

目前,我国干旱寒冷地区农村改厕技术还存在很大短板,在借鉴应用国外典型技术模式时需要作适应性调整。

①对于卫生旱厕,需进一步提升舒适卫生的如厕环境,突破厕所粪污高效除臭技术瓶颈,加强粪污资源化利用,突破低温粪污厌氧发酵及污染物稳定去除

技术等,进一步开发轻简化、无害化卫厕改造及粪污处理装备与产品,研发厕所粪污和生活杂排水协同低碳处理关键技术及装备等。②对于水冲厕所,需进一步研发节水冲、微水冲或免水冲技术和就地高效无害化、资源化技术,针对寒冷地区研发低成本、轻简化、多模式的上下水管道及处理设施保温防冻技术及装备,如研发浅埋上下水管道及粪污设施保温防冻材料、结构及工艺,研发高效太阳能集热-蓄热-增温技术及储能部件等。除系统工程处理技术和装备之外,寿命周期也需考虑在内,以确保工程项目长期稳定运行。③及时填补适宜技术模式标准的空白。目前我国已有部分农村改厕技术产品、施工建设和粪污处理的标准,但针对干旱寒冷地区改厕技术的标准还是空白。未来应抓紧编制干旱寒冷地区适用的技术模式建设标准,加强其系统性、适用性、前瞻性,逐步完善标准体系建设。此外,鼓励干旱寒冷地区在国家标准和行业标准基础上,立足本地改厕主要问题,编制出台地方标准,形成适合寒旱地区的农村改厕技术模式清单和相关标准,并开发搭建农村厕所管理技术与智慧信息化运营平台。

参考文献:

- [1] WHO. Progress on drinking water sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines[R]. Geneva: World Health Organization, 2017.
- [2] HENNIGS J, RAVNDAL K T, BLOSE T, et al. Field testing of a prototype mechanical dry toilet flush[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 668: 419-431.
- [3] 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, 45(6): 6. 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 and Wastewater Engineering*, 2019, 45(6): 6.
- [4] 中央人民政府网. 全国农村卫生厕所普及率超过 70%[EB/OL]. (2022-06-28)[2022-07-08]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-06/28/content_5698070.htm. The Central People's Government of the People's Republic of China. More than 70 percent of rural residents have access to sanitary toilets[EB/OL]. (2022-06-28)[2022-07-08]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-06/28/content_5698070.htm
- [5] 范盛远, 王惠惠, 丁京涛, 等. 中国寒旱区农村卫生旱厕技术调研及评价[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8): 225-233. FAN S Y, WANG H H, DING J T, et al. Technical investigation and evaluation of rural sanitary dry toilets in cold and arid regions of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(8): 225-233.
- [6] 余靖, 张超杰, 周琪, 等. 典型高寒缺水农村地区厕所现状及改厕技术[J]. *环境卫生工程*, 2021, 29(1): 1-8, 13. YU J, ZHANG C J, ZHOU Q, et al. Current situation of toilets in alpine-cold and water shortage rural regions and toilet renovation technology[J]. *Environmen-*

- tal Sanitation Engineering, 2021, 29(1):1-8, 13.
- [7] PARK J, CHO K H. Organic matter composition of manure and its potential impact on plant growth[J]. *Sustainability*, 2019, 11(8):2346.
- [8] PANDEY V, PATEL A, PATRA D D. Amelioration of mineral nutrition, productivity, antioxidant activity and aroma profile in marigold (*Tagetes minuta* L.) with organic and chemical fertilization[J]. *Industrial crops and products*, 2015, 76:378-385.
- [9] HEISTAD A, PARUCH A M, VRÅLE L, et al. A high-performance compact filter system treating domestic wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(4):374-379.
- [10] DUAN J, GENG C, LI X, et al. The treatment performance and nutrient removal of a garden land infiltration system receiving dairy farm wastewater[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 150:103-110.
- [11] FIDJELAND J, SVENSSON S E, VINNERÅS B. Ammonia sanitization of blackwater for safe use as fertilizer[J]. *Water Science and Technology*, 2015, 71(5):795-800.
- [12] MALKKI S. Human faeces as a resource in agriculture[J]. *Nordisk Jordbruksforskning*, 1999.
- [13] AULENBACH D B, NIE M S. Studies on the mechanism of phosphorus removal from treated wastewater by sand[J]. *Water Pollution Control Federation*, 1988, 60(12):2089-2094.
- [14] CARROLL S, GOONETILLEKE A, KHALIL W A S, et al. Assessment via discriminant analysis of soil suitability for effluent renovation using undisturbed soil columns[J]. *Geoderma*, 2006, 131(1):201-217.
- [15] 张永吉. 美国应用土地处理城市生活污水的状况[J]. *环境科学动态*, 1986(12):25-27. ZHANG Y J. The use of land to treat municipal sewage in the United States[J]. *Environment and Sustainable Development*, 1986(12):25-27.
- [16] GUO S, ZHOU X, SIMHA P, et al. Poor awareness and attitudes to sanitation servicing can impede China's rural toilet revolution: evidence from western China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 794:148660.
- [17] LIU N, XU L, HAN L, et al. Microbiological safety and antibiotic resistance risks at a sustainable farm under large-scale open-air composting and composting toilet systems[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401:123391.
- [18] LI W, LIANG C, DONG L, 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.
- [19] LI Y, LI H, 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.
- [20] ZHANG Y, SUN Y, 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 Research*, 2017, 43(4):595-601.
- [21] WORRALL F, PARKER A, RAE J E. A study of the sorption kinetics of isoproturon on soil and subsoil: the role of dissolved organic carbon [J]. *Chemosphere*, 1997, 34(1):87-97.
- [22] WU S, CARVALHO P N, MÜLLER 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.
- [23] YANG S, ZHENG Y, MAO Y, 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, 279:123434.
- [24] 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.
- [25] CUYK S V, 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.
- [26] 王勇, 邓凯洋. 地下土壤渗滤系统在农村生活污水分散处理工程中的设计及应用[J]. *城市道桥与防洪*, 2010(9):191-194. WANG Y, DENG K Y. Design and application of underground soil infiltration system in country domestic sewage separate treatment project [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2010(9):191-194.
- [27] 高拯民, 李宪法. 城市污水土地处理利用设计手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1991. GAO Z M, LI X F. Urban sewage land treatment and utilization design manual[M]. Beijing: Standards Press of China, 1991.
- [28] REED J, MCCARTHY B J, HENNECK J, et al. Freeze survey summary report: onsite wastewater treatment systems[R]. Duluth: University of Minnesota, 2001.
- [29] 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.
- [30] USEPA. Types of septic systems[EB/OL]. (2022-08-23)[2022-10-08]. <https://www.epa.gov/septic/types-septic-systems>.
- [31] 王昶, 王洪亭, 曾明, 等. 农村生活污水分散式处理的技术开发与应用[J]. *天津科技大学学报*, 2017, 32(5):1-9, 27. WANG C, WANG H T, ZENG M, et al. Development and application of decentralized treatment of domestic sewage in rural areas[J]. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2017, 32(5):1-9, 27.
- [32] RENOU S, GIVAUDAN J G, POULAIN S, et al. Landfill leachate treatment: review and opportunity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(3):468-493.
- [33] 南洋, 刘永. 净化槽技术及其在国内外应用进展和前景[J]. *资源节约与环保*, 2019(9):127-128, 138. NAN Y, LIU Y. Purification tank technology and its application progress and prospect at home and abroad[J]. *Resources Economization and Environmental Protection*, 2019(9):127-128, 138.
- [34] 王昶, 卜宇岚, 贾青竹, 等. A²O滤床生活污水净化槽的特性研究[J]. *天津科技大学学报*, 2008(2):1-5. WANG C, BU Y L, JIA Q Z, et al. Study on characters of purifying-tank combined A²O and filter-bed[J]. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2008(2):1-5.

- [35] 刘兰岚, 郝晓雯. 日本的分散式污水处理设施[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(27): 16714–16715, 16749. LIU L L, HAO X W. Decentralized rural sewage treatment facilities in Japan[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(27): 16714–16715, 16749.
- [36] SVEN O, SIGVARD S. Vacuum toilet system: EP0277786B1[P]. 1995-06-06.
- [37] JENSSEN P D, GREATOREX G M, WARNER W S. Sustainable wastewater management in urban areas[R]. Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt Universität Hannover, 2004.
- [38] TODT D. Source separating sanitary systems—energy efficient treatment of blackwater and minimizing greenhouse gas emissions[R]. Oslo: Norwegian University of Life Science, 2015.
- [39] TODT D, JENSSEN P D, KLEMENČIČ A K, et al. Removal of particles in organic filters in experimental treatment systems for domestic wastewater and black water[J]. *Journal of Environmental Science & Health Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2014, 49(8): 948–954.
- [40] DE GRAAFF M S, ZEEMAN G, TEMMINK H, et al. Long term partial nitrification of anaerobically treated black water and the emission of nitrous oxide[J]. *Water Research*, 2010, 44(7): 2171–2178.
- [41] HUSSAIN F, CLASEN T, AKTER S, et al. Advantages and limitations for users of double pit pour-flush latrines: a qualitative study in rural Bangladesh[J]. *BMC Public Health*, 2017, 17(1): 515.
- [42] DEY D, HAQUE A T M R, KABIR B, et al. Fecal indicator and Ascaris removal from double pit latrine content[J]. *Journal of Water and Health*, 2016, 14(6): 972–979.
- [43] Statistics South Africa. General household survey 2018[C]//Statistical release P0318. Pretoria: Statistics SA, 2019.
- [44] MARA D. The design of ventilated improved pit latrines[R]. Washington D.C.: World Bank Group, 1984.
- [45] BROUCKAERT C J, FOXON K M, WOOD K. Modelling the filling rate of pit latrines[J]. *Water SA*, 2013, 39(4): 555–562.
- [46] BEUKES L S, SCHMIDT S. Manual emptying of ventilated improved pit latrines and hygiene challenges: a baseline survey in a peri-urban community in KwaZulu-Natal, South Africa[J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2022, 32(5): 1043–1054.
- [47] ALISON W, BLACKHURST M, LAWLER D F, Will U. S. homeowners adopt eco-toilets? [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2017, 143(6): 05017002.
- [48] ANAND C K, APUL D S. Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation: a review[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2): 329–343.
- [49] EPSTEIN E. The science of composting[M]. Florida: CRC Press, 2017.
- [50] 韩光辉, 王洪波, 盛守福, 等. 人粪便序批式好氧堆肥热平衡分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(5): 18–21, 37. HAN G H, WANG H B, SHENG S F, et al. Analysis on heat balance of human feces composting in fed-batch aerobic composting reactor[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(5): 18–21, 37.
- [51] NAKAGAWA N, OTAKI M, MIURA S, et al. Field survey of a sustainable sanitation system in a residential house[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(6): 1088–1093.
- [52] ABURTO-MEDINA A, SHAHSAVARI E, KHUDUR L S, et al. A review of dry sanitation systems[J]. *Sustainability*, 2020, 12(14): 5812.
- [53] LOURENÇO N, NUNES L M. Review of dry and wet decentralized sanitation technologies for rural areas: applicability, challenges and opportunities[J]. *Environmental Management*, 2020, 65(5): 642–664.
- [54] ANAND C, APUL D S. Economic and environmental analysis of standard, high efficiency, rainwater flushed, and composting toilets[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 419–428.
- [55] ANAND C K, APUL D S. Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation: a review[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2): 329–343.
- [56] LARSEN T A, PETERS I, ALDER A, et al. Peer reviewed: re-engineering the toilet for sustainable wastewater management[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(9): 192A.
- [57] LIENERT J, LARSEN T A. High acceptance of urine source separation in seven european countries: a review[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(2): 556–566.
- [58] LIENERT J, THIEMANN K, KAUFMANN-HAYOZ R, et al. Young users accept NoMix toilets: a questionnaire survey on urine source separating toilets in a college in Switzerland[J]. *Water Science and Technology*, 2006, 54(11/12): 403–412.
- [59] 尹文俊, 于振江, 徐悦, 等. 新型厕所系统及技术发展现状与展望[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(5): 1–7. YIN W J, YU Z J, XU Y, et al. New-type toilet system and current status and prospects of technologies[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2019, 27(5): 1–7.
- [60] HANEGAN T, DENBRAVEN K. The feasibility of using a septic tank as a heat source for geothermal heat pumps[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1999, 121(4): 207–209.
- [61] USEPA. Design manual: onsite wastewater treatment and disposal systems[R]. Washington D.C.: USEPA, 1980.
- [62] USEPA. Onsite wastewater treatment—systems manual[R]. Washington D.C.: USEPA, 2002.
- [63] CHEVALIER P, PROULX D, LESSARD P, et al. Nitrogen and phosphorus removal by high latitude mat-forming cyanobacteria for potential use in tertiary wastewater treatment[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2000, 12(2): 105–112.
- [64] STINTZING A, JÖNSSON H, SCHÖNNING C, et al. Urine diverting toilets in climates with cold winters[R]. Utrecht: Women in Europe for a Common Future, 2007.
- [65] HANÆUS J, HELLSTRÖM D, JOHANSSON E. A study of a urine separation system in an ecological village in northern Sweden[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(9): 153–160.
- [66] BOEHLER M, JOSS A, BUETZER S, et al. Treatment of toilet wastewater for reuse in a membrane bioreactor[J]. *Water Science and Technology*, 2007, 56(5): 63–70.
- [67] BINT L, GARNETT A, SIGGINS A, et al. Alternative water sources in New Zealand's commercial buildings[J]. *Water Science and Technology Water Supply*, 2018, 19: 2018082.
- [68] VÍTĚZOVÁ M, VÍTĚZ T, NITAYAPAT N. Effects of de-icing salts on the respiration of the microorganisms of activated sludge[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2016, 227(11): 1–7.

- [69] WANG J, WANG L, SUN N, et al. Viscoelastic solid-repellent coatings for extreme water saving and global sanitation[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(12):1097-1105.
- [70] 范彬. 美国乡村污水管理经验与启示[J]. 水工业市场, 2009(10):30-33. FAN B. American rural sewage management experience and enlightenment[J]. *Water-Industry Market*, 2009(10):30-33.
- [71] 范彬, 武洁玮, 刘超, 等. 美国和日本乡村污水治理的组织管理与启示[J]. 中国给水排水, 2009, 25(10):6-10, 14. FAN B, WU J W, LIU C, et al. Organization, administration and illumination of rural sewage treatment in USA and Japan[J]. *China Water and Wastewater*, 2009, 25(10):6-10, 14.
- [72] 夏玉立, 夏训峰, 王丽君, 等. 国外农村生活污水治理经验及对我国的启示[J]. 小城镇建设, 2016(10):20-24. XIA Y L, XIA X F, WANG L J, et al. Experience of rural domestic sewage treatment abroad and its enlightenment to China[J]. *Development of Small Cities and Towns*, 2016(10):20-24.
- [73] 嵇欣. 国外农村生活污水分散治理管理经验的启示[J]. 中国环保产业, 2010(2):57-61. JI X. Revelations on management experience of decentralized domestic wastewater treatment in rural areas in foreign countries[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2010(2):57-61.
- [74] 许春莲, 宋乾武, 王文君, 等. 日本净化槽技术管理体系经验及启示[J]. 中国给水排水, 2008, 24(14):1-4. XU C L, SONG Q W, WANG W J, et al. Experience and enlightenment of Japanese technological management system of purification tank[J]. *China Water and Wastewater*, 2008, 24(14):1-4.
- [75] 朱诗琳. 农村“厕所革命”的借鉴、思考与展望[J]. 广西城镇建设, 2018(7):42-52. ZHU S L. The reference, thinking and prospect of “toilet revolution” in rural areas[J]. *Cities and Towns Construction in Guangxi*, 2018(7):42-52.
- [76] 赵解春. 国外厕所行动对中国农村“厕所革命”的启示[J]. 农业工程技术, 2020, 40(35):41-44. ZHAO J C. The enlightenment of foreign toilet action to “toilet revolution” in rural China[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2020, 40(35):41-44.
- [77] 孔德, 张晓岚. 农村污水处理运行模式的国际经验及对我国的启示[J]. 环境保护, 2019, 47(19):61-64. KONG D, ZHANG X L. International experience study and suggestions on rural sewage treatment operation model in China[J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(19):61-64.
- [78] 贾小梅, 董旭辉, 于奇, 等. 中日农村环境管理对比及对中国的启示[J]. 中国环境管理, 2019, 11(2):5-9. JIA X M, DONG X H, YU Q, et al. Comparison of rural environmental management between China and Japan and its enlightenment to China[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2019, 11(2):5-9.