

农村厕所粪污好氧堆肥技术研究进展

朱可针, 周文武, 孟德安, 王加琪, 吴迪, 商晓腾, 万鑫云, 马佳敏, 周鹏, 旦增*
(西藏大学, 西藏拉萨 850000)

摘要: 农村厕所粪污有效处理作为农村环境卫生核心工作之一,既要遵循无害化与资源化利用理念,又要考虑因地制宜原则。就生态价值与经济效益而言,采用好氧堆肥技术处理厕所粪污具有显著的优势,在农村地区应用广泛。结合“厕所革命”的时代背景,通过文献查阅,总结分析了农村厕所粪污的特性和资源化利用潜力,逐条梳理了好氧堆肥的影响因素,重点从农村厕所类型的研发、联合堆肥处理研究、工艺参数优化、外源菌剂和调理剂的应用等方面探讨了厕所粪污的好氧堆肥技术现状及进展,并对农村厕所粪污堆肥处理研究及工程应用提出了展望,为农村厕所粪污高效资源化利用及无害化处置提供借鉴和参考。

关键词: 农村厕所粪污; 好氧堆肥; 厕所类型; 技术优化; 进展

中图分类号: S216.4; X705 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2024)01-0003-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2024010003

Research Progress on Aerobic Composting Technology for Rural Toilet Manure / ZHU Kezhen, ZHOU Wenwu, MENG Dean, WANG Jiaqi, WU Di, SHANG Xiaoteng, WAN Xinyun, MA Jiamin, ZHOU Peng, DAN Zeng* / (Tibet University, Lhasa 850000, China)

Abstract: As one of the core tasks of rural environmental sanitation, the effective treatment of rural toilet feces should not only follow the concept of harmless and resource utilization, but also consider the principle of adapting to local conditions. In terms of ecological value and economic benefits, using aerobic composting technology for toilet manure treatment has significant advantages and is widely used in rural areas. Based on the background of the "toilet revolution" era, the article summarizes and analyzes the characteristics and resource utilization potential of rural toilet manure through literature review, meanwhile sorts out the influencing factors of aerobic composting point by point. The focus is on exploring the current status and progress of aerobic composting technology for toilet manure from the aspects of researches and developments of rural toilet types, research on joint composting treatment, optimization of process parameters, application of exogenous bacteria and conditioners, etc. And prospects are put forward for the research and engineering application of composting treatment of rural toilet manure. This paper provides reference and guidance for the efficient resource utilization and harmless disposal of rural toilet manure.

Key words: rural toilet feces; aerobic composting; toilet type; technical optimization; research progress

自《全国城乡环境卫生整洁行动方案(2015~2020年)》发布以来,我国开始全面推进实施“厕所革命”,农村地区的卫生问题逐渐得到有效整治。由《2000~2018年中国卫生健康统计年鉴》可知,我国卫生厕所普及率在总体上呈现逐年增长的趋势,如图1。从区域上来看,我国农村地区卫生厕所的普及率呈现“东部高,西部低;南部高,北部低”的鲜

明特征^[1]。在“厕所革命”的时代背景下,农村厕所粪污的治理既要遵循无害化与资源化利用的理念,又要考虑因地制宜的原则^[2]。农村厕所粪污的收集规模较小,一般以户、村为单位^[3]。部分农村地区通常是采用抽粪车将厕所粪污收运到有资质的粪污处理厂,无害化处理后就近还田利用^[4]。但由于农村地区改厕工作普遍起步较晚,长期以来存在直

收稿日期: 2023-04-27 修回日期: 2023-06-29

项目来源: 西藏自治区科技厅重点研发计划项目“西藏农村改厕技术研究与应用”(XZ202202ZY0004N); 西藏大学研究生“高水平人才培养计划”项目(2021-GSP-S033); 西藏自治区自然科学基金一般项目(XZ202301ZR0051G); 西藏大学青年博士学术发展支持项目(zdbs202211)。

作者简介: 朱可针(1998-),女,河南平顶山人,硕士,研究方向为固体废物处理处置与资源化利用, E-mail: 2684433594@qq.com

通信作者: 旦增, E-mail: yongzhong2008@163.com

排和泄露的现象,尤其是粪污无害化处理不到位的问题亟待解决^[5]。

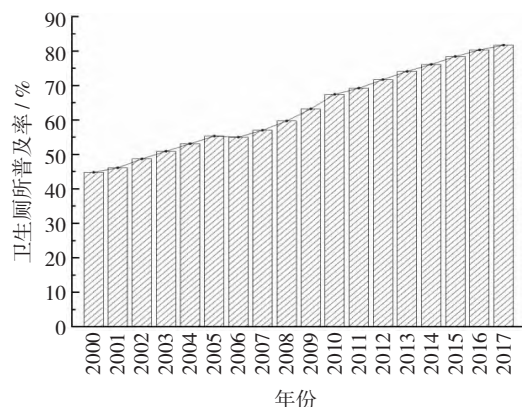


图1 我国2000~2017年卫生厕所普及情况

注:数据来源于《2000~2018年中国卫生健康统计年鉴》

农村厕所粪污无害化与资源化处理处置主要采用好氧堆肥、厌氧发酵、干化、焚烧等技术。其中,好氧堆肥是在有氧条件下,利用好氧微生物的新陈代谢作用,将有机废物中的可降解成分向稳定的腐殖质转化的生物化学过程^[6]。通常采用锯末、木屑等作为辅料或微生物载体进行混合堆肥,将人类排泄物转化为有机肥,或者用作土壤改良剂^[7]。好氧堆肥技术应用广泛,操作简单,无害化效果好,堆肥产品可作为缓效型肥料。农村厕所粪污的好氧堆肥化处理技术在环境科学研究及工程应用领域备受青睐。目前,就农村厕所粪污好氧堆肥方面而言,系统性研究综述鲜见报道。本文通过文献查阅,从粪污堆肥影响因素、厕所类型的研发、联合堆肥处理的研究、工艺优化、外源菌剂和调理剂的选择等方面归纳总结好氧堆肥技术的研究现状及进展,以期在农村

厕所粪污的高效资源化利用及无害化处理处置提供理论与技术支持。

1 农村厕所粪污特性及资源化利用潜力

粪污的理化特性是选择粪污处理处置方式的主要判据。通过粪污的理化特性可以分析其资源化利用潜力,这是实现粪污高效资源化利用的技术基础。

1.1 农村厕所粪污的基本理化性质

受饮食结构的影响,人类粪便和尿液中的成分较为复杂。人类粪便中含有大量有机物,如脂类、半纤维素、纤维素、蛋白质和木质素等^[8]。人类尿液的含水率大约为97%,其余部分为可溶性有机物、无机盐类等其他物质^[9]。粪污中的易腐物质不经充分发酵分解会产生恶臭气体,污染空气。人类排泄物中还存在大量病菌和致病性寄生虫^[10],容易传播疾病,所以必须经过无害化处理后才能排放。

尽管卫生厕所普及率很高,传统旱厕仍然是农村大部分地区的主要卫生设施。不同类型的厕所对粪污的收集方式不同,粪污的性质也存在显著差异。表1归纳总结了农村厕所粪污的基本理化性质,并与农村生活污水和《GB 5084—2021 农田灌溉水质标准》进行对比。传统旱厕一般仅有收集储存功能,因此厕所粪污的特性基本与人粪尿的特性相同。由于厕所冲水的稀释,水冲式厕所粪污的总氮(TN)和总磷(TP)含量一般均低于化粪池和沼气池式厕所。粪尿冲洗污水(黑水)是农村生活污水的主要来源,程方奎^[11]等研究表明 NH_4^+-N 、TN和TP的污染负荷占比分别达到了80%、81%和72%。农村厕所粪污的COD含量通常高于农田灌溉水质标准,所以未经处理直接排放可能导致农用土壤污染。

表1 不同粪污的基本理化性质

类别	pH值	TN/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	参考文献
人粪(鲜基)	6.8~7.2	1.16%	0.26%	—	[12]
人尿(鲜基)	8.0~8.3	0.53%	0.04%	—	
三格化粪池粪污	—	112~386	2.5~31.6	165~926	[5]
沼气池粪污	—	870.93	115.51	—	[13]
水冲式厕所粪污	—	95.81	12.71	586.46	
海南某农村生活污水	5~8	45~50	3~6	150~350	[14]
成都某农村生活污水	6.67~8.41	8.38~66.1	0.3~4.95	31~183	[15]
上海某农村生活污水	—	—	2.6	141.5	[16]
农田灌溉 水田作物	5.5~8.5	—	—	150	[17]
水质标准 旱地作物	—	—	—	200	
蔬菜	—	—	—	100 ^a , 60 ^b	

注: ^a 为加工、烹调及去皮蔬菜; ^b 为生食类蔬菜、瓜类和草本水果。

1.2 农村厕所粪污堆肥的资源化利用潜力

农村厕所粪污中含有丰富的 N、P 等营养元素和有机质,因此可以通过生化处理进行资源化利用。厕所粪污堆肥化处理后可制备成有机肥,作为基肥和追肥施用可获得良好的增产效益^[9]。有研究发现,人均每年产生的排泄物大约相当于 3.340 kgTN、0.443 kgTP 和 1.048 kgTK;通过有机堆肥可实现就近还田利用,被 0.17 亩大田作物或 0.05 亩蔬菜或 6 棵果树完全消纳^[13]。

近年来,厕所粪污堆肥与化肥配施成为资源化利用的重要研究方向。有学者研究发现尿肥可以作为矿物肥料的替代品,其合理施用可以增加作物产量和营养质量,改善土壤的理化性质^[18-19]。王瑾^[20]等通过盆栽试验发现生态厕所堆肥与化肥配施在 10 g·kg⁻¹ 营养水平上既能够显著改善油菜品质,还能够实现化肥的减量增效。研究表明粪肥和化肥联合施用的增产效果优于单施化肥或有机肥料,有助于增加土壤耕作层的有机碳、速效磷和速效钾的含量,提高土壤养分供应能力及酶活性^[21-22]。由此可见,将厕所粪污转化为有机肥还田利用的粪污处理模式,兼具生态价值与经济效益。

2 好氧堆肥技术的影响因素

好氧堆肥过程既受到堆肥原料和微生物等因素的直接影响,又受到环境因素的间接影响。直接影响堆肥生物降解过程的因素有堆肥原料的成分和性质如碳氮比、含水率、pH 值、颗粒度和孔隙度等,还有堆肥过程中的微生物群落结构。对于堆肥工艺来说,堆肥过程中的环境因素主要包括温度、通气方式等因素,以及外源菌剂和堆肥调理剂的加入。

2.1 堆肥原料和堆肥微生物

堆肥原料成分的调节是堆肥反应进行的前提条件,堆肥原料性质的合理调控是堆肥过程稳定运行的必要条件。堆肥原料的碳氮比一般控制在 25:1~35:1 为宜,含水率一般应保持在 50%~60%,pH 值控制在 6.7~9.0 范围内^[6]。堆肥原料及辅料的颗粒度和孔隙度的调控,可以改善堆肥的通气性,为堆肥微生物营造良好的生长环境。此外,堆肥原料自身的性质也有可能影响堆肥过程,如人类粪便中的四环素被发现存在干扰堆肥过程中的微生物群落结构和阻碍生物活性的不利影响^[23]。

好氧堆肥的关键在于不同类型微生物对有机物的协同生物降解。在堆肥过程中,不同阶段的微生物

群落结构也不同。堆肥初期属于升温阶段,发挥主导作用的是细菌、真菌、放线菌等中温、需氧型微生物^[24]。高温发酵阶段,细菌和放线菌等嗜热性微生物最为活跃,纤维素、蛋白质等复杂有机物被强烈分解,同时杀灭病原菌和寄生虫^[25]。降温腐熟阶段,嗜温性微生物再次占据优势地位,腐殖质含量不断增加,堆肥趋于稳定^[26]。

2.2 环境因素

好氧堆肥作为一种生化过程,温度、通风供氧等环境因素对微生物活性具有显著影响。在好氧堆肥的不同阶段,微生物所需的温度范围不同,微生物的活性与环境温度的变化密切相关。Liu^[27]等探究了环境温度变化对小规模堆肥系统的影响,发现环境温度的剧烈波动不利于堆肥反应器温度的维持。在好氧堆肥过程中,通风供氧以保证充足的氧气是十分必要的,常用的通风方式包括:自然通风、翻堆通风、强制通风或抽气等^[6]。

除了原料本身的微生物群落结构外,添加外源菌剂和调理剂也有助于提高有机物的分解效率,加快堆肥进程。微生物的接种可以迅速提高堆体温度,且连续投加有利于维持高温,缩短堆肥腐熟过程^[28]。研究发现外接菌剂(EM 菌剂)对于家庭规模的堆肥具有积极作用,可以减少臭气排放,加快堆肥反应进程^[29]。生物炭、膨松剂等调理剂的加入和调控可以增强堆料结构,改善堆肥的通气性能,从而促进有机物分解,减少臭气排放。研究发现添加 10% 的生物炭和 20% 的膨松剂有利于堆肥过程中腐殖质的形成,较高比例的填充剂可增加腐殖酸(HAs)的羧基比例^[30]。

3 农村厕所粪污好氧堆肥技术优化研究进展

随着我国卫生厕所的普及,农村厕所粪污的处理与处置技术也取得了一定的进展,对农村厕所粪污好氧堆肥技术的研究也不胜枚举。结合农村实际,厕所粪污好氧堆肥技术的优化主要围绕农村厕所类型的研发、联合堆肥处理技术的研究、工艺参数的优化、外源菌剂和调理剂的选择等方面取得了一定研究进展。

3.1 农村厕所类型的研发方面

近年来,我国卫生厕所的功能不断完善,不同类型的厕所逐渐形成了与之相适应的粪污处理技术。根据《农村厕所粪污无害化处理与资源化利用指南》,卫生厕所的模式主要包括^[1]:三格化粪池式、

双瓮漏斗式、三联沼气池式、粪尿分离式、完整下水道水冲式和双坑交替式(见图2)。完整下水道水冲式厕所粪污通过污水管道进入污水处理系统,经过集中处理后达标排放。而其他卫生厕所粪污通常就地就近堆沤腐熟,堆肥无害化处理并进行还田利用^[2]。这些改厕模式结合农村实际与民意,把粪污收集与后端无害化处理集于一体,生态与经济效益兼备。

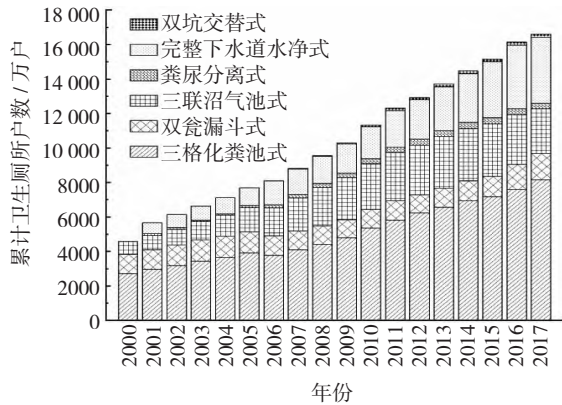


图2 我国2000~2017年卫生厕所类型

注: 数据来源于《2000~2018年中国卫生健康统计年鉴》

除了国家推广应用的卫生厕所外,农村厕所类型的研发着眼于厕所粪污的固液分离、自动进料与堆肥、搅拌系统和通风系统等技术的优化。国外研发的No Mix厕所、EcoSan厕所等厕所不仅具备粪尿分离的功能,还可以将人类尿液和粪便转化为高效有机肥料^[31-32]。李炎^[33]等设计了一款可自动进料与堆肥的家用转鼓式堆肥箱,对搅拌系统进行了改进,通风总量可达 $7.42 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,堆肥试验结果均可满足无害化与堆肥品质的要求。侯善策^[34]等研发了一种移动式农村户用堆肥反应器,具备负压抽吸进料与螺旋盘管曝气等功能。

3.2 联合堆肥处理技术研究方面

联合堆肥处理技术通常是将不同类型的固体废物与厕所粪污协同处理,不仅可以综合处理各种固体废物,还能够实现资源化利用。可供堆肥的原料种类繁多,如畜禽粪便、农林废弃物、污泥等。不同类型的堆肥原料与辅料混合处理后,厕所粪污及堆肥辅料的结构与理化性质均得以改善。

联合堆肥技术可以调节堆肥原料的碳氮比,在各种理化性质上形成互补,协同促进堆肥过程。研究发现豆秆、玉米秸秆、锯末、厨余垃圾等作为厕所粪污堆肥的辅料,有利于增加堆肥产品中N、P、K的营养含量,使堆肥产品达到有机肥的标准^[35-37]。

Yang^[38]等采用联合堆肥探究好氧堆肥过程中不同碳氮比对木质纤维素(纤维素、半纤维素和木质素)降解及相应酶活性的影响,结果发现C/N为25:1时木质纤维素的降解率最高。Gao^[39]等选用多种农村固体废物进行堆肥试验,结果发现“41.4%猪粪+13.7%人粪+44.9%稻草”的配比是混合堆肥的最佳组合,实现了多组分废弃物的综合处理和高值化利用。

3.3 工艺参数优化研究方面

虽然好氧堆肥过程可以自然地进行,但人为控制环境因素不仅对堆肥过程中的养分转化、微生物活性、臭气排放等有显著影响,还影响着堆肥产品的品质和无害化处理效果。温度、含水量、曝气方式等工艺参数的合理调控,是已被实践证明了的优化好氧堆肥工艺的有效途径。

堆肥温度的调控是好氧堆肥系统成功运行的关键因素。根据《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012),堆肥温度在 $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上保持10 d,或者 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上保持5 d,即可杀灭堆肥中所含致病菌。时红蕾^[40]等发现高温堆肥可以有效去除抗生素, $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温条件对抗生素的去除率超过了90%。白帆^[41]等探究温度对人粪便堆肥的影响,结果发现 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的堆肥温度可以加快好氧堆肥的有机质腐熟过程,还可以有效降低氮素损失。

初始含水率对好氧堆肥过程中微生物的活性有显著影响,适宜的含水率有利于有机物的生物降解过程。研究发现^[42]堆肥原料含水率会影响堆肥产品的质量,水分调节至65%~75%范围内更有利于堆肥的腐熟。周亚文^[43]等设置不同水平的初始含水率作为自变量,探究人粪和玉米秸秆好氧堆肥过程中堆肥腐熟及微生物群落结构的变化,结果发现含水率对微生物群落结构的影响主要发生在堆肥初期,且最佳含水率为65%。

通风供氧作为好氧堆肥不可或缺的关键技术,既能够减少臭气排放,又能降低养分流失。Peng^[44]等探究不同曝气速率、曝气方式和翻堆频率对堆肥的影响,结果表明:间歇曝气有利于臭气减排,连续曝气有助于堆肥腐熟,3天1次的翻堆频率可达到快速堆肥的最佳工艺效果。Wang^[45]等研究发现间歇曝气模式(平均曝气速率为 $0.21 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,曝气10 min,停止10 min)可以减少 CO_2 和 NH_3 的排放,调整曝气方式与频率可能是限制 NH_3 和温室气体排放、减少碳氮损失的有效策略。

此外,堆肥原料的 pH 值、碳氮比等工艺参数的优化,也可以有效促进粪污的堆肥资源化和无害化。Ge^[46] 等研究发现堆肥过程中细菌和真菌的群落演替主要受到 pH 值、初始含水率和总碳含量的显著影响($p < 0.05$),且 pH 值 8.5 和 MC 60% 的堆肥条件更有利于堆肥腐熟过程。堆肥原料为微生物生长代谢提供基本的物质和能量,在适宜的碳氮比范围内(C/N 在 25~35)对有机物的分解快速且彻底^[6]。

3.4 外源菌剂和调理剂的选择

堆肥物料中有机物的降解是在不同微生物的共同作用下进行的,因此除了原料本身的微生物群落结构,外源菌剂的应用可以高效提高堆肥效率。同时,调理剂作为外源添加物应用于堆肥工艺优化,在堆肥腐熟的进程、除臭效果、产品肥效、重金属的钝化等方面也发挥着重要作用。

金贺^[47]将高效木质素降解菌、纤维素降解菌、除臭菌和其他功能菌(蛋白酶菌、淀粉酶菌)配制成堆肥复合菌剂后应用于堆肥体系,结果发现复合菌剂既可促进堆肥腐熟,又能增强肥效。张羽鑫^[48]等研究发现超高温菌的引入可以有效缩短堆肥周期,仅需 10 d 堆肥就达到了腐熟标准,且堆肥品质优于传统好氧堆肥。Huan^[49]等以多面体球体作为生物滴滤池(BTF)的填料,接种驯化的活性污泥,实验结果显示 H₂S 和 NH₃ 的去除率可达 91.34%,为堆肥除臭提供了解决思路。韩玮^[50]等通过模拟堆肥试验探究纤维素酶和蛋白酶对堆肥的影响,结果发现两种外源酶制剂可以协同促进堆肥腐熟的进程。李荣华^[51]等发现添加生物炭复合菌剂在增加堆肥产品中氮、磷的有效性方面具有良好的效果。Liu^[52]等研究发现外源添加剂(磷矿和废硼)通过腐殖化作用促进了 Cu 的转化,降低了 Cu 的生物有效性,对重金属具有钝化作用。

4 结论与展望

目前,关于农村厕所粪污的好氧堆肥技术的研究和应用,主要从厕所类型的研发、联合堆肥处理技术的研究、堆肥工艺参数的优化、外源菌剂和调理剂的应用这些方面进行,国内外已有诸多研究成果值得借鉴和参考。农村厕所粪污好氧堆肥工艺的优化需要综合考虑多种因素:1) 关于厕所类型的研发,既要考虑厕所粪污的收集与后端处理,又要关注粪尿分离、堆肥系统、通风和控制系统等功能的完善。

2) 在厕所粪污堆肥技术优化方面,可以采用多种固体废物联合堆肥的处理模式,并对环境参数(温度、含水量、曝气方式、pH 值、碳氮比等)进行合理调控。此外,外源菌剂和调理剂的选择也是行之有效的堆肥技术优化策略。

农村厕所粪污好氧堆肥以供给农业生产用肥为最终目的,具有广阔的应用前景。虽然农村厕所粪污的好氧堆肥处理工艺已经取得了一定进展,但仍然存在堆肥周期长、臭气排放、无害化处理不到位、堆肥产品肥效不佳等问题。所以还要加强对以下方面的研究:1) 因地制宜,联系农村地区的实际情况选择与之相适应的厕所类型,结合相应的堆肥工艺装置,优化好氧堆肥工艺。2) 针对不同地区厕所粪污的特征,筛选出粪污高效降解微生物,复配多功能菌剂和酶制剂,并与生物炭等调理剂联合应用于好氧堆肥过程中,以期实现堆肥效果的最优化。3) 将智能化控制应用于堆肥工艺中,探索出集温度控制、自动进料与搅拌、通风供氧于一体的堆肥反应器。监测并调控堆肥工艺参数以确定最优的运行条件,使堆肥反应更加节能高效。

参考文献:

- [1] 王永生,刘彦随,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(05): 553-560.
- [2] 农业农村部办公厅. 国家卫生健康委办公厅 生态环境部办公厅关于印发《农村厕所粪污无害化处理与资源化利用指南》和《农村厕所粪污处理及资源化利用典型模式》的通知 [J]. 中华人民共和国农业农村部公报, 2020(09): 14-23.
- [3] 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(02): 230-238.
- [4] 丁艳华,郑效旭,徐圣君,等. 深圳市宝安区城市粪污污泥处理管理现状及对策 [J]. 环境工程学报, 2022, 16(08): 2699-2710.
- [5] 张凤芝,黄文星,马友华. 安徽省农村改厕粪污处理利用现状、问题及对策 [J]. 安徽农业大学学报(社会科学版), 2022, 31(01): 24-28+125.
- [6] 陈冠益,马文超,颜蓓蓓. 生物质废物资源综合利用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 346-350.
- [7] D DEL PORTO, C STEINFELD. The composting toilet system book: A practical guide to choosing, planning and maintaining composting toilet systems, a water-saving,

- pollution-preventing alternative [M]. The Center for Ecological Pollution Prevention (CEPP), 2000.
- [8] 王洪波,盛守福,王晓昌,等.堆肥反应器对人粪便中不同有机成分的降解特性[J].中国给水排水,2011,27(03):81-83.
- [9] 全国农业技术推广服务中心编著.中国有机肥料养分志[M].北京:中国农业出版社,1999:2-3.
- [10] BHILEGAONKAR K N, KOLHE R P. Transfer of viruses implicated in human disease through food [M]. Present Knowledge in Food Safety,2023: 786-811.
- [11] 程方奎,汪晨晨,温仓祥,等.太湖流域农村生活污水产污特征及治理模式分析[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(03):578-585.
- [12] 高祥照.肥料实用手册[M].北京:中国农业出版社,2002:50-51.
- [13] 赵畅.典型农村厕所粪污肥效特性及利用对策[D].重庆:重庆大学,2020.
- [14] 胡成亮,谢多娇.海南农村生活污水治理现状及运营经验探讨[J].资源节约与环保,2022(09):88-92.
- [15] CHEN X, CHAO L, WAN Y, et al. Study of the characteristics of pollutants in rural domestic sewage and the optimal sewage treatment process: a Chengdu Plain case study [J]. Water Science and Technology, 2023, 87(9): 2373-2389.
- [16] 范淼.上海某乡镇农村生活污水收集处理研究[J].给水排水,2022,58(S1):590-595.
- [17] 中华人民共和国生态环境部.农田灌溉水质标准:GB 5084—2021[S].北京:中国环境出版社,2021.
- [18] PRADHAN S K. Yield and quality of vegetables fertilized with human urine and wood ash [M]. Itä-Suomen yliopisto, 2010:6.
- [19] KASSA K, ALI Y, ZEWDIE W. Human urine as a source of nutrients for maize and its impacts on soil quality at Arba Minch, Ethiopia [J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2018, 8(4): 516-521.
- [20] 王瑾,钱新,谢英荷,等.生态厕所堆肥种植油菜的肥效试验研究[J].农业环境科学学报,2008(03):1242-1247.
- [21] 柳博.农村厕所粪污化肥配施对菜地土壤环境的风险研究[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [22] 逢娜,程松,张水梅,等.化肥配施有机肥对黑土肥力与春玉米产量的影响[J].华北农学报,2021,36(04):124-131.
- [23] SHI H, WANG X C, LI Q, et al. Effects of elevated tetracycline concentrations on aerobic composting of human feces: composting behavior and microbial community succession [J]. Indian journal of microbiology, 2018, 58(4): 423-432.
- [24] BERNAL M P, ALBURQUERQUE J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review [J]. Bioresource technology, 2009, 100(22): 5444-5453.
- [25] 丁文川,李宏,郝以琼,等.污泥好氧堆肥主要微生物类群及其生态规律[J].重庆大学学报(自然科学版),2002(06):113-116.
- [26] 赵彬涵,孙宪昀,黄俊,等.微生物在有机固废堆肥中的作用与应用[J].微生物学通报,2021,48(01):223-240.
- [27] LIU X, LI Z F, BOSE E, et al. Effect of Ambient Temperature during Small Scale Co-Composting of Human Faecal Matter [J]. Advanced Materials Research, 2012, 1793(518-523): 3316-3320.
- [28] 陈威,任勇翔,王晓昌,等.接种微生物与人粪便同步连续投加对好氧堆肥效果的影响[J].环境工程学报,2014,8(02):677-682.
- [29] VAN FAN Y, LEE C T, Klemeš J J, et al. Evaluation of Effective Microorganisms on home scale organic waste composting [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 216: 41-48.
- [30] LIU H, GUO H, GUO X, et al. Probing changes in humus chemical characteristics in response to biochar addition and varying bulking agents during composting: A holistic multi-evidence-based approach [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 300: 113736.
- [31] LIENERT J, LARSEN T A. High acceptance of urine source separation in seven European countries: a review [J]. Environmental science technology, 2010, 44(2): 556-566.
- [32] BIPLOB P, SARKIER R C, SARKER D C. Eco-san toilet for sustainable sanitation practice in Bangladesh [J]. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2011, 11(05): 139-147.
- [33] 李炎.家用粪便转鼓式堆肥箱的研究设计[D].武汉:湖北工业大学,2020.
- [34] 侯善策,沈玉君,王惠惠,等.农村户用粪污堆肥反应器设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(14):237-242.
- [35] LIU N, LI W Q, QIAN X, et al. On-Site Operation of a Composting-Type Eco-Toilet Using Beanstalk and Sawdust as Matrix [J]. Advanced Materials Research, 2012, 599: 592-597.
- [36] 陈卓帛,李佳彬,李路瑶,等.原位发酵床处理干旱寒

- 冷区农村厕所粪污研究 [J]. 农业环境科学学报, 2023,42(04): 912-920.
- [37] 韩娟娟. 新型农村堆肥式生态厕所技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [38] YANG H, ZHANG H, QIU H, et al. Effects of C/N Ratio on Lignocellulose Degradation and Enzyme Activities in Aerobic Composting [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(11): 482.
- [39] GAO Y, TAN L, LIU F, et al. Optimization of the proportion of multi-component rural solid wastes in mixed composting using a simplex centroid design [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 341: 125746.
- [40] 时红蕾. 粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的行为特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [41] 白帆, 王晓昌. 人粪便好氧堆肥温度对氮迁移转化的影响 [J]. *环境化学*, 2011, 30(07): 1266-1270.
- [42] GUO R, LI G, JIANG T, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 112: 171-178.
- [43] 周亚文, 张宇航, 沈玉君, 等. 初始含水率对人粪污好氧堆肥腐熟及微生物群落结构变化的影响 [J]. *环境工程学报*, 2022, 16(12): 4108-4120.
- [44] PENG L, TANG R, WANG G, et al. Effect of aeration rate, aeration pattern, and turning frequency on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting [J]. *Environmental Technology Innovation*, 2023, 29: 102997.
- [45] WANG Y, QIU H, LI M, et al. Influence of Aeration Method on Gaseous Emissions and the Losses of the Carbon and Nitrogen during Cow Manure Composting [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(24): 11639.
- [46] GE M, SHEN Y, DING J, et al. New insight into the impact of moisture content and pH on dissolved organic matter and microbial dynamics during cattle manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126236.
- [47] 金贺. 促进鸡粪与玉米苞叶好氧堆肥复合微生物菌剂的研制与应用 [D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
- [48] 张羽鑫, 刘闯, 黄殿男, 等. 超高温菌好氧堆肥技术对人粪便的处理效果 [J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(04): 179-185.
- [49] HUAN C, FANG J, TONG X, et al. Simultaneous elimination of H_2S and NH_3 in a biotrickling filter packed with polyhedral spheres and best efficiency in compost deodorization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 284: 124708.
- [50] 韩玮, 何明. 外源酶对秸秆堆肥进程的影响及腐熟度模糊评价 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3742-3749.
- [51] 李荣华, 涂志能, ALI AMJAD, 等. 生物炭复合菌剂促进堆肥腐熟及氮磷保留 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(08): 3449-3457.
- [52] LIU H, WANG L, ZHONG R, et al. Binding characteristics of humic substances with Cu and Zn in response to inorganic mineral additives during swine manure composting [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114387.