

吴孔阳,马佳音,杨同香,等. 农业废弃物堆肥技术研究进展[J]. 江苏农业科学,2025,53(11):1-8.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.11.001

农业废弃物堆肥技术研究进展

吴孔阳¹, 马佳音¹, 杨同香², 唐琳¹, 陈雪冬¹, 韩新宽¹, 韩建明¹

(1. 洛阳师范学院生命科学学院,河南洛阳 471934; 2. 河南科技大学食品与生物工程学院,河南洛阳 471023)

摘要:农业废弃物种类丰富、体量庞大,大量农作物秸秆、尾菜、畜禽粪便等处理不及时或不合理所引起的环境污染问题十分突出,而农业废弃物作为一类重要的可再生资源,通过合理地资源化综合利用,实现其价值对于控制农业面源污染、发展农业循环经济以及促进农民增收等具有极其重要的意义。目前,堆肥是解决农业废弃物资源化综合利用的有效途径之一。基于此,本文总结了近年来农业废弃物主要处理方式,重点梳理了国内外在利用堆肥处理农业废弃物研究领域的进展,旨在说明堆肥处理农业废弃物资源化利用的可行性;介绍了蚯蚓堆肥处理技术、膜覆盖好氧堆肥处理技术、高温好氧堆肥处理技术以及超高温好氧堆肥处理技术的关键参数和技术优势,分析了上述堆肥处理技术的特点及其在处理农业废弃物的成效与问题,并从堆肥原材料、处理方式、影响因素等方面进行了总结分析;最后展望了堆肥技术在农业废弃物处理领域研究发展趋势,为合理有效地进行农业废弃物资源化综合利用提供参考依据。

关键词:农业废弃物;堆肥;工艺;综合利用;发展现状

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)11-0001-08

农业废弃物通常被认为是在整个农业生产过程中被丢弃的有机类物质,包括作物生产过程中的植物废弃物、渔牧业生产过程中产生的动物废弃物、农业加工过程中产生的加工类废弃物和农村乡镇生活垃圾等^[1]。随着全球人口持续增加,对生活用品需求也逐年增多,随之产生大量农业废弃物,例如,印度每年产生的农业废弃物大约在 3.5 亿 t,我国每年也产生数以亿计的农业废弃物,其中主要由种植业和养殖业产生^[2-3]。农业废弃物的不合理处置引发的农业面源污染问题一直以来备受各界关注,在碳达峰、碳中和目标背景下实现农业绿色发展显得尤为迫切和重要^[4-7]。很显然,科学解决农业废弃物处理处置问题,无疑对于农业绿色可持续发展起到极大推动作用。目前,有关农业废弃物资源化综合利用的研究主要集中于肥料、饲料、燃

料或其他工副业产品的生产原料等^[8-12]。与利用农业废弃物制备饲料、沼气、外加碳源、建筑材料、食品原料、药物中间体及其他高附加值产品相比,肥料化利用是国内外普遍采用的方式之一,也是农业废弃物资源化综合利用重要的途径之一。本文就近年来以农业废弃物为原料,利用各种堆肥技术制备有机肥的研究进行归纳总结,剖析了蚯蚓堆肥、高温好氧堆肥、膜覆盖好氧堆肥、超高温好氧堆肥等技术的特点,概述了各类堆肥工艺的关键参数、影响因素以及各自优缺点,以期农业废弃物资源化综合利用和绿色农业可持续发展提供决策参考。

1 农业废弃物处理技术

总体而言,经过多年的实践和技术发展,国内外已开发了多种农业废弃物处理技术。目前农业废弃物处理技术主要包括厌氧发酵、堆肥和热解等,其处理之后的产品通常用于工农业生产及环境保护等领域,如沼气、有机肥、饲料、生物炭、基料及包装材料、活性成分(膳食纤维、多糖)等^[13-14]。众多研究表明,堆肥是目前农业废弃物最为有效且最重要的处理方式,它在农业领域是一种常见且合理的做法,堆肥产物可以用作天然有机肥料和土壤养分来源^[13,15]。近年来,有关农业废弃物主要处理技术的比较参见表 1。从表 1 可以看出,对农业废弃物的肥料化利用研究仍是重要的研究方向之一。

收稿日期:2024-07-03

基金项目:河南省科技攻关计划(编号:222102320248、232102110046);河南科技大学研究生课程精品教学案例项目(编号:2024YAL-021);洛阳市核心技术攻关类公益专项(编号:2302036A)。

作者简介:吴孔阳(1985—),男,河南商城人,博士,副教授,主要从事微生物学方面的研究。E-mail:kywu2007@126.com。

通信作者:杨同香,博士,副教授,主要从事食品微生物及农副产品深加工技术研究,E-mail:txyamy@163.com;韩建明,博士,教授,主要从事遗传育种及生物技术研究,E-mail:lyhjm2000@163.com。

表 1 农业废弃物主要处理技术比较

原料	利用类型	处理方式	关键工艺参数	优势	劣势	文献
玉米芯、玉米秸秆和小麦秸秆	人工湿地外加破源脱氮	粉碎、碱化处理、烘干	在构建的潜流人工湿地中,顶部添加的废弃物原料约 3 000 g,底部装曝气装置	该方法能有效释放有机碳,释碳速率稳定,并且具备持久析出碳源的优势	—	[16]
稻草秸秆、猪粪	沼气	干法厌氧发酵	采用横卧推流式中试装置,处理量为 5 kg/h,料斗高 1.2 m,“机械搅拌(每天 4 次)+前端气动搅拌(每天 4 次)”组合搅拌方式	以前端气动搅拌为主,机械搅拌为辅的组合模式在能源节省方面具有优势	—	[17]
牛粪、鸡粪、麦秸、玉米渣	氢气和甲烷	厌氧消化	控制 pH 值在 5.5~6.5,并通过恒温浴保持 38 ℃	与单一厌氧消化相比,两阶段厌氧消化的能量回收率高于 30%	—	[18]
食品残渣(果渣、豆渣)、猪粪	肥料	酸化堆肥	初始含水率调节至 65% 左右,通气速率设置为 0.2 L/(min·kg)(干物质重),在 50 L 发酵罐中堆肥发酵 35 d	酸化方式可实现 NH ₃ 与 N ₂ O 的协同减排,提高氮素含量并降低堆肥过程引起的环境代价	酸的安全性、经济性、管控性制约酸化技术发展应用	[19]
鸽子粪、废弃蔬菜	肥料	静态高温堆肥	制成约 2 m 宽、1.5 m 高的圆锥体,堆体的含水量调至 65% 左右,每 3 d 进行 1 次翻堆,周期为 68 d	采用 30% 废弃蔬菜替代量替代腐殖土与鸽子粪进行堆肥发酵,总养分含量优于腐殖土与鸽子粪	—	[20]
猕猴桃废弃物、麦秸秆	肥料	堆肥	覆膜,对堆肥过程进行了为期 176 d 的监测。在此期间,装载机分别在 28、56、90、130 d 后翻堆	添加 10% 秸秆的堆肥卫生质量好、稳定性高、无植物毒性	堆肥具有高 pH 值(9.4)和 EC 值(4.6 dS/m),可能具有植物毒性	[21]
鸡粪	肥料	堆肥	物料含水率为 65%,控制不同阶段发酵罐温度	超高温好氧发酵预处理工艺辅助堆肥比传统堆肥具有提高堆肥腐熟度和加速有机物降解的优点	—	[22]
猪粪、秸秆等	肥料	超高温预处理、好氧堆肥	反应器强制通风,通风量为 10 L/min,通风频率为 5 min/h。初始含水率为 60%~65%,发酵温度为 85 ℃,时间为 48 h	超高温快速堆肥提高畜禽粪便处理效率	堆肥产物施入土壤能减少无机氮肥的施用,但不宜用于育苗	[23]
稻草秸秆	磁性生物炭	热解方式	将秸秆粉末在柠檬酸铁溶液中浸渍过夜后烘干,再放入管式炉中升温至 700 ℃,并保温 3 h	该功能材料具有较高的吸附和光催化效果,罗丹明 B 的最大降解率可达 94.71%	—	[24]
油菜秸秆	生物炭	限氧热解	改性油菜秸秆粉末放入管式气氛炉,以 10 ℃/min 的升温速率进行加热	油菜秸秆生物炭用作缓释载体的潜力巨大	—	[25]

注:“—”表示文中未明确说明。

2 堆肥技术发展现状

2.1 蚯蚓堆肥处理技术

Haimi 最早开展了尝试利用蚯蚓处理畜禽粪便的研究^[26]。之后我国学者针对畜禽粪便-蚯蚓养殖技术进行了系统研究,为蚯蚓堆肥处理技术发展奠定了良好的基础^[27]。蚯蚓堆肥主要是利用蚯蚓、土壤微生物菌群和某些蚯蚓特有的肠道菌群来转化固体废弃物,是一项生态友好型处理技术^[28]。一些研究表明,蚯蚓粪富含 N、P、K、Mg、Ca 和 S 等元素,可以很好地改善土壤健康,而且植物可以很容易吸收这些营养物质^[29-30]。蚯蚓粪还田能有效缓解土壤中的污染物,降低土壤中壬基酚的生物有效性,并能增强作物的抗逆性^[31]。研究还发现,蚓粪不仅能可持续地促进农作物生长和提高产量,还能有效抑制病虫害发生^[32]。

蚯蚓堆肥通常有 2 种处理方式,即蚯蚓原位处理和异位处理,以后者研究报道居多。曹云娥等报道蚯蚓原位堆肥提升番茄连作土壤质量,研究人员将牛粪均匀撒施在栽培垄上,并放入蚯蚓消解牛粪,研究表明,相较于蚯蚓异位堆肥,蚯蚓原位堆肥在提高土壤肥力和增加土壤细菌多样性方面更为有效^[33]。无论采用何种堆肥方式,影响蚯蚓堆肥效果的主要因素是蚯蚓类型、温度、湿度和碳氮比。目前,蚯蚓堆肥过程中所使用的蚯蚓以赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)最为常见^[34-35]。由于蚯蚓属于变温动物,环境和堆体温度对蚯蚓的生长繁殖影响较大。适宜的环境温度不仅能影响蚯蚓的采食、排便和促进生长,而且可以有效提高堆肥处理效率。蚯蚓最适宜的活动温度为 15~25℃。研究发现,同一时期随着温度升高,蚯蚓吞食和堆肥系统内的微生物的协同增效作用能加快系统中溶解性有机质的降解效率^[36]。刘亚纳研究了利用赤子爱胜蚓处理猪粪、鸡粪的工艺条件,结果发现,在温度 15~25℃、湿度 65%~75%、接种密度 8~12 条/盆条件下,蚯蚓堆肥处理效果较好^[37]。此外,王馨悦等开展了基于葛渣肥料化利用的蚯蚓转化技术研究,研究表明,纯鲜葛渣和纯腐熟葛渣不利于蚯蚓的生长和繁殖,当鲜葛渣与牛粪以一定的比例复混时才有利于蚯蚓繁殖,且在 70% 鲜葛渣复混 30% 牛粪条件下进行蚯蚓堆肥,资源化利用效果最佳^[38]。

由于蚯蚓及其他生物生活在堆体有机物颗粒表面的水膜环境中,且蚯蚓是通过表皮溶解氧气进

行呼吸作用,因此湿度成为其生长、繁殖和分布的限制因素之一^[39]。然而,蚯蚓堆肥过程中的最佳湿度在不同的研究中并不一致。Singh 和 Parthasarathi 利用掘穴环爪蚓(*Perionyx excavatus*)开展堆肥研究,发现其最佳湿度分别为 80%、65%^[40-41]。Pellejero 等在湿度 85% 和最高温度 33℃ 条件下开展了洋葱废弃物和牛粪蚯蚓堆肥的研究,发现当洋葱废弃物和牛粪按质量比 1:1 的比例进行蚯蚓堆肥时效果理想,可用于农业的有机改进剂生产^[42]。此外,碳氮比(C/N)是影响蚯蚓堆肥效果的又一重要因素,调整农业废弃物以适宜的 C/N 进行蚯蚓堆肥,有助于为堆体中的蚯蚓和微生物提供适当的营养物质,加速堆体有机物的分解速率。Tippawan 等选择牛粪、锯末以及甘蔗渣等废弃物进行蚯蚓堆肥研究,采用响应面试验设计优化了蚯蚓堆肥的初始 C/N、湿度和堆肥时间,研究结果表明,C/N 和堆肥时间是其中显著的影响因素,且在初始 C/N 为 33.09、湿度为 50.66% 和堆肥时间为 28.35 d 的条件下,蚯蚓堆肥样品腐熟完全、效果最佳^[43]。Biruntha 等以不同 C/N(23~70)的海藻(T1)、椰糠(T2)、甘蔗废料(T3)以及蔬菜废料(T4)与牛粪进行蚯蚓堆肥,研究了初始 C/N 对蚯蚓堆肥质量的影响,结果表明,T1 组蚯蚓生长速率高于其他处理组,增加 C/N 可能对蚯蚓的生长和产茧量产生不利影响^[44]。C/N 也被认为是评价堆肥腐熟度重要的指标之一,通常由于蚯蚓和微生物代谢活动致使堆体中有机物分解和还原,最终导致 C/N 降低。Balachandar 等以甘蔗滤泥、牛粪原料进行蚯蚓堆肥,结果发现,堆体中总有机碳降低导致 C/N 大幅下降,蚯蚓粪的 C/N 较初始水平下降了 48.09%~61.96%,较对照分别下降了 42.05%、52.73%^[45]。

利用蚯蚓堆肥回收农业有机废弃物,可以减少排放到环境中的废弃物,同时可避免化肥过度使用^[46-47]。通过对上述研究工作的回顾,可以发现牛粪是蚯蚓堆肥的主要原料来源。虽然蚯蚓堆肥在污泥处理方面也显示出巨大的潜力,但是研究表明,100% 污泥不适合蚯蚓的生长繁殖,依然需要添加牛粪或其他农业废弃物才可以加速污泥的稳定化^[48]。尽管科研人员已在蚯蚓堆肥技术方面进行了广泛研究,但仍需进一步深入探讨蚯蚓堆肥过程中的微生物群落构成及其对重金属含量的影响、对植物及其病原体的作用,有机废弃物的筛选以及作用机制等关键问题。

2.2 膜覆盖好氧堆肥处理技术

膜覆盖好氧堆肥处理技术是在静态垛堆肥处理技术基础上发展起来的一种堆肥发酵技术,主要由膜覆盖系统、微压送风系统和控制系统组成^[49-50]。其中,膜覆盖系统通常采用的覆盖膜多为ePTFE(聚四氟乙烯)材料,膜孔径为0.2 μm,能够有效阻隔灰尘、气溶胶和微生物等向外扩散,有些研究也将其称为气流膜堆肥、半透膜覆盖好氧堆肥技术等^[51-52]。在生产实践中,也有使用纳米膜覆盖系统处理畜禽粪便的相关报道,此类纳米膜以ePTFE为核心,夹持在2层聚酯膜中间,其膜孔径在150~350 nm,在堆肥过程中自身形成一个微高压内腔,可加速畜禽废弃物的发酵腐熟^[53]。

膜覆盖堆肥过程中膜材料、辅料配比以及供氧等方面均会影响堆肥效果。李永双等探究了覆盖纳米膜对提升鸡粪便堆肥效率的作用机制,该研究发现,覆盖纳米膜能够加快堆体升温,降低物料pH值以及有机质、氨氮含量,提高电导率,增强脲酶、蛋白酶、纤维素酶、木聚糖酶和过氧化物酶活性,此外NH₃、H₂S和TVOC的总累积排放量分别减少58%、100%、61%,表明覆盖纳米膜能够加快鸡粪堆体腐熟,减少恶臭气体的排放^[53]。秦维等选择了由聚四氟乙烯微孔膜和其他纺织材料制作而成的复合半透膜覆盖堆肥箱体,将污泥、园林垃圾以及玉米秸秆按照质量比7:3:1配比,在通气速率为0.9 m³/h的条件下,堆体总氮含量相对上升9.65%,且腐殖酸类物质的荧光强度相对百分含量增加76.62%,在此条件下堆体内氮素向稳定的可利用含氮物质中迁移最多,堆肥效果最佳^[51]。除此之外,通风供氧被认为是功能膜法好氧堆肥系统必不可少的要素。合理的通风管道布局及通风速率,可极大地提高通风效果和保证工程造价的经济性^[54]。Ma等研究膜覆盖鸡粪好氧堆肥过程中间歇曝气对温室气体排放和细菌群落演替的影响,相比较长间歇(通10 min~关30 min)曝气,在短间歇(通10 min~关10 min)曝气条件下膜覆盖好氧堆肥可提高堆肥细菌群落的丰富度和多样性,有效减少温室气体排放^[55]。随后,该团队在研究膜覆盖对奶牛粪便好氧堆肥过程中气体排放和细菌群落的影响中也发现相似结果,即功能膜覆盖提高了放线菌的相对丰度,全球增温潜势亦有一定程度的下降^[56]。

总的来说,近年来有关农业废弃物膜覆盖好氧堆肥处理技术的研究主要集中于堆肥发酵工艺控

制、堆体微生物群落、堆肥系统设计等方面^[51,57-58]。诸多研究表明,膜覆盖堆肥技术可提高对氧的利用效率、减少堆肥过程中温室气体及氨气的排放^[50,58]。膜覆盖好氧堆肥处理技术结合开放式好氧堆肥发酵和封闭式好氧堆肥发酵处理技术的优势,能有效降低堆肥过程中的氮素损失,减少臭气对周围环境的影响,同时提高了堆肥品质^[59-61]。膜覆盖好氧堆肥已成为有机废弃物资源化利用的重要技术。

2.3 高温好氧堆肥处理技术

高温好氧堆肥处理技术可有效脱臭及杀菌,有利于肥料的养分保持,是我国畜禽粪便处理的主要方式^[62]。目前,高温好氧堆肥处理农业废弃物主要有2种方式:一种是在密闭的环境中进行,如发酵罐、发酵仓(反应器)等;另外一种是在露天环境下进行,如在发酵槽中或制成条形垛堆肥。

用于堆肥的生物反应器通常由控制面板、发酵罐、空压机通风系统、气体吸收塔等部件构成,发酵罐的容积可根据日处理量选择合适型号设备,通常容积大小为50~200 m³。此类堆肥系统具有占地较小,有除臭装置,无二次污染,且通过微电脑搭配各类传感器,使堆肥发酵进程更加智能化等优点。晏琛等利用新型高温好氧堆肥器测试了鸡粪谷壳好氧堆肥的效果,结果表明,经过40 d的堆肥周期,可获得黑色无臭味、圆球状及无病原菌的堆肥产物,施用该堆肥产物的肥效高于施用化肥获得的肥效,研究还表明,通过氨吸收塔回收氨气产生的磷酸铵镁可有效提高堆肥产物的整体肥效^[62]。此外,不同反应器好氧堆肥处理农业废弃物的结果也呈现不同差异。陈言鑫等开展了不同反应器好氧堆肥工艺对猪粪中磺胺甲噁唑降解效果的研究,结果表明,强制通风+翻抛反应器堆肥工艺可以更有效地促进堆肥腐熟及磺胺甲噁唑的降解^[63]。也有研究人员比较了不同农业废弃物在反应器好氧堆肥的效果。黄艳艳等对南方5种农业废弃物在反应器好氧堆肥过程中温度、养分含量和堆肥腐熟度指标的变化进行比较,结果表明,5个堆肥产物处理组的理化指标总体上显著升高,其中蔗渣、橡胶木屑和椰糠堆肥产物对小白菜的增产效果较好^[64]。近年来,研究人员还比较了反应器好氧堆肥与条形垛堆肥的差别。刘宗萌等利用卧式滚筒好氧堆肥反应器和条垛式好氧堆肥技术处理玉米秸秆和鸡粪,结果表明,与条垛式堆肥相比,卧式滚筒好氧堆肥可

加速堆肥进程,减少堆肥时间(缩短至 13 d),提高堆肥效率,保证堆肥质量^[65]。

在实践中发现,反应器好氧堆肥处理农业废弃物尽管拥有上述诸多优点,但其缺点也值得思考,比如处理量偏小、投资高等。对于农业废弃物规模化处理而言,发酵槽或条形垛堆肥处理农业废弃物具有更广泛的适用性。通常采用铲车将物料堆成宽 2.0 m、高 1.5 m 的条形垛,垛的长度根据生产场地进行调整^[66]。王秀红等利用条垛堆和圆锥堆进行牛粪好氧堆肥研究,结果表明,2 种堆肥方式均能使物料达到完全腐熟,其生物学性状和物理性状基本能满足栽培基质配料要求^[67]。刘敏茹等研究了规模化养鸡场鸡粪“两段式”好氧堆肥工艺,第 1 阶段在初级发酵槽进行,第 2 阶段在立式发酵罐进行,该工艺具有发酵速度快、堆肥时间短等优势^[68]。

2.4 超高温好氧堆肥处理技术

早在 2003 年,Kanazawa 等研究发现,由超嗜热菌堆肥作用产生的肥料容易被植物根系吸收^[69]。后来,Kanazawa 等报道了一种新型的堆肥系统,堆肥系统中超嗜热菌在耐受 80 ℃ ~ 100 ℃ 环境下依然很活跃,该堆肥系统可用于处理污水厂的污泥、食品加工工业及农场产生的废弃物,他们还提出了利用超高温好氧堆肥细菌发展太空循环农业的构想^[70]。Oshima 等从温度高达 80 ℃ 的生活污泥堆肥样品中分离并鉴定了 1 株新的极端嗜热菌 *Caldaterra* gen. nov., 将其命名为 YM081, 该菌株最

高生长温度为 83 ℃,通过胶原酶活性检测,研究人员推测在更高温度的堆肥样品中还存在一些未培养的极端嗜热菌^[71]。随后,研究人员在不同的堆肥样品中分离得到许多新的极端嗜热菌,比如 *Calditerricola* gen. nov. 和 *Calditerricola satsumensis* sp. nov.^[72]。我国研究人员近年来也从堆肥样品中分离出一些极端嗜热菌,并逐步开发出工艺先进、操作简单的超高温堆肥处理技术,目前在污泥处理方面应用较广泛^[73-77]。笔者所在团队前期也从环境中筛选出多种具有耐高温特性的菌株,并在畜禽废弃物、污泥堆肥等处理方面发挥着生物强化作用^[78-79]。

传统堆肥过程的高温期一般在 50 ~ 70 ℃,余震等研究认为,在堆肥过程中堆体温度能够达到 80 ℃ 及以上,此阶段可谓超高温期(hyperthermophilic phase)^[80]。近 5 年有关农业废弃物超高温堆肥处理的研究见表 2。从表 2 可以看出,目前超高温堆肥过程中,依赖堆体中自身微生物菌群产生的高温基本在 80.00 ~ 92.62 ℃,部分研究报道畜禽废弃物超高温堆肥的温度可达 100 ℃ 以上,最高可达 106 ℃^[81-82]。超高温堆肥技术在农业废弃物处理方面优势显著,不仅可以大幅缩短堆肥发酵周期,而且在降低氮素损失、加速有机物腐殖化进程方面效果显著^[83]。

3 展望

伴随着人类生产的发展和人口增长,巨量的农

表 2 近 5 年有关农业废弃物超高温堆肥处理的研究

废弃物类型	工艺参数	堆体最高温度	堆肥时间(d)	文献
牛粪、厨余	辅料、牛粪、厨余质量比为 3 : 1 : 1, 含水率 49.55%, 连续曝气	80 ℃ 以上	13	[84]
秸秆、厨余	厨余与秸秆质量比为 3 : 1, 含水率 67%, 间歇曝气	85 ℃	14	[85]
玉米秸秆、厨余、菜园废物等	厨余与玉米秸秆、菜园废物等质量比约为 11 : 1, 含水率 70%, 连续曝气	82 ℃	30	[8]
谷壳、米糠、污泥	谷壳、米糠、污泥质量比为 2 : 1 : 12, 曝气量为 1.2 m ³ /h	92.62 ℃	15	[86]
人粪便	含水率 45%, 连续曝气, 曝气量为 3 ~ 6 m ³ /h	84 ℃	10	[87]
新鲜畜禽粪便、稻壳、已腐熟的干料或蘑菇菌渣等	含水率 60% ~ 70%, 间歇曝气	80 ℃ 以上	20 ~ 30	[88]
牛粪、玉米秸秆	牛粪与秸秆质量比为 15 : 4, 含水率约为 66%, 曝气量 7 L/min	85.8 ℃	30	[89]
牛粪、羊粪、马粪、木屑	有机废弃物(牛粪、羊粪、马粪、木屑)和全发酵堆肥按质量比 1 : 1 混合, 含水率为 60%, 曝气量 0.1 L/min	104 ℃	35	[81]
鸡粪、稻壳	鸡粪与稻壳质量比为 20 : 3, 连续曝气, 曝气量为 0.1/(t·h)	82.5 ℃	44	[90]
猪粪	含水率为 45%	106 ℃	42	[82]
树叶、厨余、污泥	初始碳氮比为 27.26, 含水率约为 43%, 曝气量约为 3 024 m ³ /d	90 ℃ 以上	38	[91]
玉米秸秆、生活垃圾	秸秆与生活垃圾质量比为 3 : 17, 含水率约为 51.6%, 曝气量为 0.015 ~ 0.2 m ³ /min	80.3 ℃	35	[92]

业废弃物所带来的诸多问题引起人们广泛关注,各国也越来越重视农业废弃物的处理和利用,就其发展趋势而言,无害化、稳定化、减量化、资源化是其必由之路。从技术层面讲,目前厌氧发酵、好氧堆肥和热解等仍然是农业废弃物的主要处理技术。目前,蚯蚓堆肥、高温好氧堆肥、膜覆盖好氧堆肥以及超高温好氧堆肥在生产实践中取得了有益的效果,并且好氧堆肥被认为是农业废弃物处理较为简便、经济和生态的技术方法,其中,利用膜覆盖好氧堆肥和超高温好氧堆肥技术处理农业废弃物前景广阔。从目前发展现状来分析,笔者认为,未来农业废弃物处理技术可将功能膜技术与超高温堆肥技术相结合,深入开展膜覆盖超好氧堆肥体系中物料的理化特性、有机质转化、微生物群落特征以及堆肥产物品质特性分析等方面研究。此外,堆肥发酵的核心微生物菌种资源的挖掘和功能特性研究也有必要加大力度,最终获得更多具有我国知识产权的、应用于农业废弃物堆肥处理的菌种资源。

参考文献:

- [1] 谢立勇. 农业自然资源导论[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2019:281-286.
- [2] Koul B, Yakoob M, Shah M P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability [J]. *Environmental Research*, 2022, 206:112285.
- [3] 姜文来. 农业废弃物资源化利用一部力作:评《种植业废弃物资源化利用技术模式与技术价值评估研究》[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(5):42-75.
- [4] 于法稳, 林 珊. 碳达峰、碳中和目标下农业绿色发展的理论阐释及实现路径[J]. *广东社会科学*, 2022(2):24-32.
- [5] 王小彬, 闫 湘, 李秀英. 畜禽粪污厌氧发酵沼液农用之环境安全风险[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(1):110-139.
- [6] Yang S, Yang D Z, Shi W, et al. Global evaluation of carbon neutrality and peak carbon dioxide emissions: current challenges and future outlook [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(34):81725-81744.
- [7] Valerii H, Antonina K, Anna B, et al. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emissions of agricultural residue feedstock for bioenergy [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5):2009.
- [8] Peng L J, Ma R N, Jiang S N, et al. Co-composting of kitchen waste with agriculture and forestry residues and characteristics of compost with different particle size: an industrial scale case study [J]. *Waste Management*, 2022, 149:313-322.
- [9] Valverde - Orozco V, Gavilanes - Terán I, Idrovo - Novillo J, et al. Characterization of agro-livestock wastes for composting in rural zones in Ecuador: the case of the parish of San Andrés [J]. *Agronomy*, 2022, 12(10):2538.
- [10] 刘德军, 王家鑫, 周艳吉, 等. 农业有机废弃物压制绿化基质砖成型机理与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(12):243-252.
- [11] 谢 腾, 王雅君, 丛宏斌, 等. 玉米秸秆炭和典型农业废弃物混合成型与燃烧特性试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15):227-234.
- [12] 米日扎提·艾热提, 祖丽皮亚·玉努斯, 乌斯满·依米提. 氨基酸副产物对蔬菜废弃物青贮饲料发酵品质及消化率的影响[J]. *饲料研究*, 2021, 44(12):90-92.
- [13] Waqas M, Hashim S, Humphries U W, et al. Composting processes for agricultural waste management: a comprehensive review [J]. *Processes*, 2023, 11(3):731.
- [14] Hénault - Ethier L, Quinche M, Reid B, et al. Opportunities and challenges in upcycling agri-food byproducts to generate insect manure (frass): a literature review [J]. *Waste Management*, 2024, 176:169-191.
- [15] Karak T, Bhattacharyya P, Paul R K, et al. Evaluation of composts from agricultural wastes with fish pond sediment as bulking agent to improve compost quality [J]. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 2013, 41(7):711-723.
- [16] 许 兵, 郭培勋, 刘 佳, 等. 利用农业废弃物强化人工湿地处理污水处理厂尾水机理研究[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(2):411-418.
- [17] 王 晨, 张 敏, 王振旗, 等. 中试条件下稻秸干法厌氧发酵搅拌方式的优化[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(4):1323-1330.
- [18] Bertasini D, Battista F, Mancini R, et al. Hydrogen and methane production through two stage anaerobic digestion of straw residues [J]. *Environmental Research*, 2024, 247:118101.
- [19] 张 陆, 王宏戈, 王惟帅, 等. 新型酸化方式对农业废弃物堆肥氮转化的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(5):796-806.
- [20] 刘 宇, 席运官, 高 丽, 等. 有机农场蔬菜废弃物堆肥效果研究[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(1):182-186.
- [21] Fernandes P, Pinto R, Correia C, et al. Valorization of kiwi waste through composting [J]. *Environmental Technology*, 2024, 45(28):6121-6135.
- [22] Ajmal M, Shi A P, Awais M, et al. Ultra-high temperature aerobic fermentation pretreatment composting: Parameters optimization, mechanisms and compost quality assessment [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4):105453.
- [23] 曹 云, 黄红英, 吴华山, 等. 畜禽粪肥超高温堆肥产物理化性质及其对小白菜生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(12):251-257.
- [24] 王俊宏, 莫凤敏, 张影星, 等. 磁性含碘生物炭的制备及其水处理应用[J]. *功能材料*, 2023, 54(7):7180-7185.
- [25] 徐 洋, 任奕林, 王浩杰, 等. 不同制备条件下油菜秸秆生物炭用作缓释载体的综合评价[J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(4):893-902.
- [26] Haimi J. Growth and reproduction of the compost-living earthworms *Eisenia andrei* and *E. fetida* [J]. *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol*, 1990, 27(4):415-421.
- [27] 孙振军, 刘玉庆, 李文立. 温度、湿度和酸碱度对蚯蚓生长与繁

- 殖的影响[J]. 莱阳农学院学报,1993,10(4):297-300.
- [28] Panda A K, Mishra R, Dutta J, et al. Impact of vermicomposting on greenhouse gas emission; a short review[J]. Sustainability,2022,14(18):11306.
- [29] Mahmud M, Abdullah R, Yaacob J S. Effect of vermicompost on growth, plant nutrient uptake and bioactivity of *ex vitro* pineapple (*Ananas comosus* var. MD2)[J]. Agronomy,2020,10(9):1333.
- [30] Guo L Y, Wu G L, Li C H, et al. Vermicomposting with maize increases agricultural benefits by 304% [J]. Agronomy for Sustainable Development,2015,35(3):1149-1155.
- [31] Wang X X, Zhao F Y, Zhang G X, et al. Vermicompost improves tomato yield and quality and the biochemical properties of soils with different tomato planting history in a greenhouse study[J]. Frontiers in Plant Science,2017,8:1978.
- [32] Yattoo A M, Ali M N, Ahmad Baba Z, et al. Sustainable management of diseases and pests in crops by vermicompost and vermicompost tea. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development,2021,41(1):7.
- [33] 曹云娥,尹翠,吴泽帅,等. 蚯蚓原位堆肥提升番茄连作土壤质量研究[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(2):247-259.
- [34] Devi J, Pegu R, Mondal H, et al. Earthworm stocking density regulates microbial community structure and fatty acid profiles during vermicomposting of lignocellulosic waste: unraveling the microbe-metal and mineralization-humification interactions[J]. Bioresource Technology,2023,367:128305.
- [35] Zhou Y W, Xiao R, Klammsteiner T, et al. Recent trends and advances in composting and vermicomposting technologies: a review [J]. Bioresource Technology,2022,360:127591.
- [36] 侯素霞,雷旭阳,张辉,等. 基于 EEM 与 PCR-DGGE 技术分析温度对蚯蚓堆肥处理城镇污泥的影响[J]. 生态环境学报,2021,30(5):1060-1068.
- [37] 刘亚纳. 赤子爱胜蚓处理畜禽粪便的工艺条件研究[D]. 郑州:河南农业大学,2005:38.
- [38] 王馨悦,成艳红,何绍浪,等. 基于葛渣肥料化利用的蚯蚓转化技术研究[J]. 农业资源与环境学报,2022,39(1):201-208.
- [39] Qin J, Fu X Y, Chen X M, et al. Changes in physicochemical properties and microfauna community during vermicomposting of municipal sludge under different moisture conditions [J]. Environmental Science and Pollution Research International,2021,28(24):31539-31548.
- [40] Singh N B. Optimum moisture requirement during vermicomposting using *Perionyx excavatus*[J]. Applied Ecology and Environmental Research,2004,2(1):53-62.
- [41] Parthasarathi K. Influence of moisture on the activity of *Perionyx excavatus* (Perrier) and microbial-nutrient dynamics of pressmud vermicompost[J]. Iranian Journal of Environmental Health, Science & Engineering,2007,4(3):147-156.
- [42] Pellejero G, Rodriguez K, Ashchkar G, et al. Onion waste recycling by vermicomposting: nutrients recovery and agronomical assessment [J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2020,17(6):3289-3296.
- [43] Tippawan P, Jienkulsawad P, Limleamthong P, et al. Composting time minimization of mature vermicompost using desirability and response surface methodology approach[J]. Computers & Chemical Engineering,2022,167:108037.
- [44] Biruntha M, Karmegam N, Archana J, et al. Vermiconversion of biowastes with low-to-high C/N ratio into value added vermicompost[J]. Bioresource Technology,2020,297:122398.
- [45] Balachandar R, Baskaran L, Yuvaraj A, et al. Enriched pressmud vermicompost production with green manure plants using *Eudrilus eugeniae*[J]. Bioresource Technology,2020,299:122578.
- [46] Shi Z M, Liu J H, Tang Z W, et al. Vermiremediation of organically contaminated soils: concepts, current status, and future perspectives [J]. Applied Soil Ecology,2020,147:103377.
- [47] Motamedi A, Jafarpour M, Oshaghi M. Improving the vermicompost quality by using horticultural and agronomic residues[J]. Journal of Plant Nutrition,2022,45(5):727-738.
- [48] 李英凯,李佳丽,孙溪悦,等. 添加牛粪和园林废弃物对污泥蚯蚓堆肥的影响[J]. 环境工程学报,2020,14(1):197-208.
- [49] 杨丽楠,李昂,袁春燕,等. 半透膜覆盖好氧堆肥技术应用现状综述[J]. 环境科学学报,2020,40(10):3559-3564.
- [50] Sun X X, Huang G Q, Huang Y P, et al. Large semi-membrane covered composting system improves the spatial homogeneity and efficiency of fermentation [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19(23):15503.
- [51] 秦维,蒋心茹,刘明刚,等. 辅料配比及通风速率对污泥气流膜堆肥过程氮素迁移的影响[J]. 农业环境科学学报,2022,41(6):1357-1367.
- [52] 杨丽楠. 膜覆盖好氧堆肥系统处理农业废弃物的效能及系统优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020:4-8.
- [53] 李永双,孙波,陈菊红,等. 纳米膜覆盖对畜禽粪堆肥好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响[J]. 环境科学,2021,42(11):5554-5562.
- [54] 盛金良,朱金龙,胡海鹤,等. 污泥膜覆盖好氧发酵堆体流场模拟及应用研究[J]. 环境工程学报,2014,8(1):298-304.
- [55] Ma S S, Xiong J P, Cui R X, et al. Effects of intermittent aeration on greenhouse gas emissions and bacterial community succession during large-scale membrane-covered aerobic composting[J]. Journal of Cleaner Production,2020,266:121551.
- [56] Ma S S, Xiong J P, Wu X Y, et al. Effects of the functional membrane covering on the gas emissions and bacterial community during aerobic composting [J]. Bioresource Technology,2021,340:125660.
- [57] 孙晓曦,崔儒秀,马双双,等. 智能型规模化膜覆盖好氧堆肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):356-362.
- [58] Fang C, Su Y, Liang Y Y, et al. Exploring the microbial mechanism of reducing methanogenesis during dairy manure membrane-covered aerobic composting at industrial scale [J]. Bioresource Technology,2022,354:127214.
- [59] Xiong J P, Su Y, He X Q, et al. Effects of functional membrane coverings on carbon and nitrogen evolution during aerobic composting: insight into the succession of bacterial and fungal

- communities[J]. *Bioresource Technology*,2023,369:128463.
- [60] Li Y C, Liu Y D, Yong X Y, et al. Odor emission and microbial community succession during biogas residue composting covered with a molecular membrane [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297:122518.
- [61] Xiong J P, Su Y, He X Q, et al. Effects of functional - membrane covering technique on nitrogen succession during aerobic composting: metabolic pathways, functional enzymes, and functional genes[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 354:127205.
- [62] 晏琛, 曹雷鹏, 刘玉环, 等. 利用新型高温好氧堆肥器提高鸡粪壳壳有机肥肥效[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(3):1103-1111.
- [63] 陈言鑫, 王健, 孟海波, 等. 不同反应器好氧堆肥工艺对猪粪中磺胺甲噁唑降解效果研究[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2024(5):1-7.
- [64] 黄艳艳, 杨旭, 雷菲, 等. 5种热带农业废弃物好氧堆肥过程中的变化及堆肥产物施用效应分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2023, 32(6):50-58.
- [65] 刘宗萌, 邓进超, 李彩斌, 等. 卧式滚筒好氧堆肥和条垛式好氧堆肥技术的比较研究[J]. *家畜生态学报*, 2023, 44(10):63-70.
- [66] 周卫红, 马慧钟, 崔明江, 等. 肉羊粪污全量收集集中处理模式[J]. *北方牧业*, 2023(23):17.
- [67] 王秀红, 史向远, 李欣欣, 等. 畜禽粪便好氧堆肥腐熟度及其用于设施栽培基质的可行性分析[J]. *山西农业科学*, 2020, 48(3):411-415, 435.
- [68] 刘敏茹, 林镇荣, 李家杰, 等. 规模化养鸡场鸡粪“两段式”好氧堆肥工艺研究[J]. *广东化工*, 2024, 51(6):57-60.
- [69] Kanazawa S, Yamamura T, Yanagida H, et al. New production technique of biohazard - free compost by the hyper - thermal and aerobic fermentation method [J]. *Soil Microorganisms*, 2003, 57(2):105-114.
- [70] Kanazawa S, Ishikawa Y, Tomita - Yokotani K, et al. Space agriculture for habitation on Mars with hyper - thermophilic aerobic composting bacteria [J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(5):696-700.
- [71] Oshima T, Moriya T. A preliminary analysis of microbial and biochemical properties of high - temperature compost [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, 1125(1):338-344.
- [72] Moriya T, Hikota T, Yumoto I, et al. *Calditerricola satsumensis* gen. nov., sp. nov. and *Calditerricola yamamurae* sp. nov., extreme thermophiles isolated from a high - temperature compost [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2011, 61(Pt 3):631-636.
- [73] Tang Y F, Dong B, Dai X H. Hyperthermophilic pretreatment composting to produce high quality sludge compost with superior humification degree and nitrogen retention [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 429:132247.
- [74] Chen X H, Huang Y H, Lü H X, et al. Plant - scale hyperthermophilic composting of sewage sludge shifts bacterial community and promotes the removal of organic pollutants [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347:126702.
- [75] Liao H P, Lu X M, Rensing C, et al. Hyperthermophilic composting accelerates the removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in sewage sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(1):266-276.
- [76] Yu Z, Liu X M, Zhao M H, et al. Hyperthermophilic composting accelerates the humification process of sewage sludge: molecular characterization of dissolved organic matter using EEM - PARAFAC and two - dimensional correlation spectroscopy [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 274:198-206.
- [77] 吴孔阳, 傅柏春, 杨学义. 我国污泥堆肥相关技术研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(12):39-41.
- [78] 吴孔阳, 李婉婉, 杨同香, 等. 1株耐高温纤维素酶产生菌的分离与鉴定 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(9):312-314.
- [79] 吴孔阳, 杨同香, 杨学义, 等. 一种枯草芽孢杆菌及其应用: 202011491192.2 [P]. 2023-06-16.
- [80] 余震, 周顺桂. 超高温好氧发酵技术:堆肥快速腐熟与污染控制机制 [J]. *南京农业大学学报*, 2020, 43(5):781-789.
- [81] 王艳成, 黄升日, 董巍巍, 等. 超高温堆肥过程中微生物群落及其理化性质研究 [J]. *延边大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(4):319-323.
- [82] 勇银华, 李贺. 养殖场猪粪超高温好氧堆肥试验研究 [J]. *江西化工*, 2020, 36(1):76-77.
- [83] Cui P, Liao H P, Bai Y D, et al. Hyperthermophilic composting reduces nitrogen loss via inhibiting ammonifiers and enhancing nitrogenous humic substance formation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692:98-106.
- [84] 黄殿男, 侯文涛, 刘闯, 等. 超高温好氧堆肥厨余垃圾技术研究 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2022, 38(3):570-576.
- [85] 付锦涛, 侯磊, 侯振华, 等. 添加嗜热菌促进餐厨垃圾超高温堆肥发酵效果 [J]. *现代化工*, 2022, 42(增刊2):311-314.
- [86] Ma F, Zhu T, Yao S, et al. Coupling effect of high temperature and thermophilic bacteria indirectly accelerates the humification process of municipal sludge in hyperthermophilic composting [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 166:469-477.
- [87] 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(4):179-185.
- [88] 邢睿智, 艾超凡, 王梦怡, 等. 畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例 [J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11):2405-2411.
- [89] 马骏. 畜禽养殖废弃物超高温堆肥技术研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021:35-36.
- [90] 崔鹏, 艾超凡, 廖汉鹏, 等. 超高温堆肥微生物群落强化产热功能特征分析 [J]. *土壤学报*, 2022, 59(6):1660-1669.
- [91] 王新杰, 郁昂, 黄韦辰, 等. 超高温好氧堆肥技术对隔离区餐厨垃圾处理的应用可行性分析 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(3):354-359.
- [92] 王晓诚, 郭颖, 颜开红. 超高温自发热好氧堆肥工艺处理生活垃圾探究 [J]. *环境工程*, 2020, 38(10):183-189.