

袁 远,张金辉,李银月,等. 蔬菜废弃物好氧堆肥处理研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(19):29-35.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.19.004

蔬菜废弃物好氧堆肥处理研究进展

袁 远,张金辉,李银月,郭二辉,张发文

(河南农业大学林学院,河南郑州 450002)

摘要:我国蔬菜废弃物种类繁多且产量很高,随意堆弃和低效处理不仅是资源的巨大浪费,更会对环境造成一定的威胁,因此蔬菜废弃物的无害化和资源化处理是一个亟需解决的问题。好氧堆肥因其具有温度高、分解快、堆肥产品稳定性强等特点,适用于蔬菜废弃物的资源化、无害化处理。本文总结了我国常见蔬菜废弃物的处理现状及其理化性质特点,从蔬菜废弃物堆肥化处理的工艺、物料配比、环境条件参数控制、微生物菌剂的接种、堆肥腐熟度评价指标等方面总结了国内外蔬菜废弃物堆肥化处理的研究现状,对堆肥过程中氮素的损失与控制以及有害物质的去除技术等方面作了进一步总结,并对今后的研究方向作了进一步的展望,以为蔬菜废弃物堆肥化处理研究提供依据。

关键词:蔬菜废弃物;好氧堆肥;资源化利用;清洁生产

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)19-0029-07

随着农业结构的不断优化,我国蔬菜产业在农业生产中所占比例日益增大,蔬菜种植面积、产量都一直保持着稳定的增长,2020 年我国蔬菜种植面积达到 2 133.3 万 hm^2 ,全国蔬菜总产量超过 7.2 亿 t,居于世界首位^[1]。同时,蔬菜废弃物的产量也随之增长,根据杨富民等研究可知,2020 年我国蔬菜废弃物产量将超过 2.16 亿 t,数量巨大^[2]。但是由于经济技术及废弃物自身性质等因素的限制,蔬菜废弃物通常都被随意丢弃在田间地头或者经垃圾场进行填埋或焚烧,这不仅造成资源的巨大浪费,而且会造成渗滤液、臭气排放等环境问题,严重阻碍当地蔬菜食品的安全生产^[3-4]。

目前,蔬菜废弃物的资源化处理方法主要包括直接还田、制备饲料、生产沼气、堆肥等。而堆肥作为处理各类蔬菜废弃物的一种有效方法越来越受到人们的关注,可达到 30%~50% 的减量化效果,且高温期能有效杀死病原菌等,抑制恶臭气体释放和蚊虫的繁殖,其产品稳定且养分更均衡^[5]。在近 10 年间,关于蔬菜瓜果等农业有机废物堆肥化的文章数量呈现指数式增长,这也揭示了蔬菜废弃物的

堆肥化已经成为了一种重要的处理方式,并已经成为研究的热点。本文从堆肥工艺、堆肥条件与参数控制、堆肥质量提升等方面对蔬菜废弃物堆肥化的研究进展进行综述分析,为蔬菜废弃物好氧堆肥技术研究提供参考依据。

1 常见蔬菜废弃物的性质

蔬菜废弃物就是在蔬菜的种植、收获、运输、销售等过程中产生的根、茎、叶等废物,与其他农业有机废物相比,蔬菜废弃物的水分含量较高、养分含量丰富,易被微生物降解。表 1 中总结了常见蔬菜废弃物的特点,新鲜蔬菜废弃物的含水量一般能达到 80%~90%,叶菜类最高可以达到 96.20%,茄果类茎秆废弃物的含水量相对较低,但也在 69.40% 以上;pH 值的范围在 4.30~9.23 之间,主要集中在 6.5~8.5;养分含量丰富,以烘干基计算,总氮(TN)含量达到 0.86%~5.39%,总磷(TP)含量为 0.22%~4.89%,总钾(TK)含量在 1.29%~5.17%,碳氮比(C/N)在 5.90~56.20 之间,根茎类 C/N 较高,在 23.80~56.20 之间,叶菜类与茄果类废弃物的 C/N 相对较低,主要集中在 20 以内。总固体含量为 8%~19%,挥发固体的含量占总固体的 80% 以上,有机物中糖类和半纤维素占 75%,纤维素及木质素分别占到 10.70%~35.60% 以及 7.40%~18.30%,叶菜类废弃物的纤维素和木质素含量通常要低于茄果类废弃物^[6]。此外,蔬菜废弃物中不免会携带病原菌及虫卵、农药残留物、重金属

收稿日期:2021-11-14

基金项目:国家重点研发计划项目子课题(编号:2018YFD0800405-04)。

作者简介:袁 远(1975—),女,河南郑州人,博士,讲师,主要研究方向为环境污染治理。E-mail:yuanylc@henau.edu.cn。

通信作者:张发文,博士,副教授,主要研究方向为固体废物处理与资源化利用。E-mail:zhangfawen@henau.edu.cn。

表 1 常见蔬菜废弃物种类及理化性状^[7-20]

种类	含水率 (%)	pH 值	有机质含量 (%)	TN 含量 (%)	C/N	TP 含量 (%)	TK 含量 (%)	纤维素含量 (%)	木质素含量 (%)
叶菜类	83.99~94.59	4.30~7.60	7.37~43.60	1.78~5.39	5.90~37.00	0.37~2.65	1.29~4.40	10.78~32.10	7.40~11.90
茄果类	69.40~95.10	4.53~9.23	16.80~51.00	1.77~4.52	8.80~29.51	0.20~4.89	2.30~5.17	30.00~35.60	8.01~18.30
根茎类	80.3~94.10	5.30~7.40	34.90~43.21	0.86~1.94	23.80~56.20	0.46~1.56	1.64~3.74	—	—
范围	69.40~95.10	4.30~9.23	7.37~51.00	0.86~5.39	5.90~56.20	0.22~4.89	1.29~5.17	10.7~35.6	7.40~18.30

等有毒有害物质。

2 蔬菜废弃物堆肥化处理

2.1 好氧堆肥工艺

现代化的堆肥系统以好氧堆肥为主,好氧堆肥系统有多种分类方法,一般主要包括条垛式堆肥、槽式堆肥、反应器堆肥和覆膜堆肥等。条垛式堆肥是一种较为开放的堆肥系统,一般堆体体积在 1 m³ 以上,采用人工翻堆的方式供氧,发酵周期为 25 ~ 35 d,陈化周期为 60 ~ 90 d,具有投资成本低、操作简易等特点,但其占地面积大、堆肥周期长、气味难以控制、受气候影响严重等缺点较明显^[21]。与条垛式系统相比,槽式堆肥系统能利用机械化设备更好地控制通风和温度,但因其多为露天堆肥,因此极易受天气条件的影响,虽然加盖大棚可以解决问题,但会增加投资成本。反应器堆肥系统是集进出料、通风、搅拌等于一体,高自动化水平的堆肥系统,虽然受外界环境的影响很小,但是其投资、维护成本及技术要求较高。覆膜堆肥属于半开放式堆肥系统,在堆垛上覆着纳米膜,底部设有通风管道,既避免了繁重的翻堆过程,又能有效减少养分的流失,得到质量稳定的产品。基于以上堆肥工艺模式,近年来有学者对好氧堆肥处理的工艺优化展开了进一步的研究,比如常瑞雪开展了蔬菜废弃物超高温堆肥工艺的构建研究,在较短的堆肥周期内堆体温度能够达到 70 ℃ 以上,达到了完全灭杀植物病毒病的条件,且能有效控制氮素损失,提高堆肥质量^[22];王辉等研究表明,好氧覆膜处理的微生物种类和数目最多,且其微生物降解能力最强,相较于其他方法是最适合蔬菜废弃物的堆肥方式^[23];韩贵成等进一步研究了覆膜静态高温堆肥工艺,发现此方法不仅可以提高堆体的温度,达到无害化标准,还可以有效控制氮素的损失,缩短堆肥周期^[20]。

2.2 好氧堆肥参数控制

2.2.1 环境因素 温度能够直接影响堆体中微生物

物的生长,是影响堆肥腐熟程度的一项重要参数,也是衡量堆体是否能达到无害化的关键因素。一般将堆肥过程分为升温期、高温期及降温期这 3 个阶段。达到高温所需时间以及高温持续时间与物料的性质(组成、水分、粒径等)及通风量有关,且高温持续时间越长,有机质分解的越彻底。常瑞雪研究表明,蔬菜废弃物好氧堆肥最高可以达到 73 ℃ 的高温条件,但温度上限应低于 75 ℃,且超高温持续时间不能超过 24 h,否则会对堆肥产生不可逆的抑制作用^[22];Ajmal 等研究表明,在温度为 65 ℃ 和时间为 18 h 的条件下,堆肥进行得最好,65 ℃ 是一个最佳的处理温度^[24]。在实际堆肥的过程中,应根据堆肥原料的性质,通过翻堆、通风、调节含水率等来控制温度,使堆体保持较适宜的条件。

通风量能直接影响堆肥进程,Gao 等研究发现通风率与好氧堆肥过程中微生物的活动以及整个堆肥腐熟质量有很大关系,因为通风过少会导致堆体内部缺氧,产生厌氧环境,而通风量过大又对堆体的保温效果产生限制,使堆体无法达到高温,影响堆肥质量^[25]。自然通风、翻堆通风及强制通风这 3 类是堆肥常用的通风措施,而堆肥工艺中常用翻堆和强制通风以及二者相结合的通风方式。由于堆肥材料、堆肥工艺等不同,所以堆肥过程中通风量也不是一成不变的。张相锋等以高水分的芹菜和石竹为原料进行堆肥,发现在 0.01 m³/(kgVS·h) 的通风条件下升温速度最快,高温持续长,堆肥效果最好^[26];而 Arslan 等同样进行了通风率对堆肥的影响的研究,发现蔬菜水果废弃物强制通风堆肥的最佳通风率为 0.62 L/(kgVS·min)^[27]。蔬菜废弃物种类繁多,特性多有不同,所以在实际堆肥时需要对不同材料的性质、堆肥条件、环境因素等综合考虑,通过预试验等筛选最佳通风率,保证堆体始终处于最佳条件。

2.2.2 物料配比 碳和氮是微生物生长发育的能量来源和基本材料,在堆肥过程中起到至关重要的作用。在 C/N 过低的环境中,由于碳源的限制,微

生物仅能利用较少部分的氮,从而导致多余的氮以氨气的形式流失,同时伴随着大量可溶性盐的生成,对植物的生长产生不利影响^[28]。而 C/N 过高时,氮素供应不足,微生物生长发育缓慢,导致有机质降解缓慢,堆体升温减缓。合理的物料配比能够促进堆肥进程的加快,有利于堆体的腐熟,表 2 中总结了一些文献中学者推荐的不同种类堆体的 C/N 值,一般好氧堆肥的适宜 C/N 在(20~30):1 之间,而蔬菜废弃物的 C/N 比较低,不适合用于单独堆肥,因此通常与其他大田作物秸秆、菌渣、林木修剪废料、锯末或者畜禽粪便等联合堆肥,以便调节 C/N,优化堆肥条件。Kulcu 等在对葡萄园废物和鸡粪混合物进行堆肥化研究时发现,只有单一物料进行堆肥时会受到其自身的理化性质及组成的限制,而将二者按照 1:1 的比例进行堆肥时可以大大加速腐熟的进程^[29];王哲以木糖醇渣、菌渣等作为碳源调理剂调节 C/N,发现尾菜占比为 30%(C/N=24:1)时的堆肥效果最好,随着蔬菜废弃物添加比例梯度增大(C/N 降低),有机质降解速率降低且高温持续时间缩短^[30]。因此,多种物料联合更有利于堆肥的腐熟与产品质量的提升。

水分含量是保证有效堆肥的关键参数,也是优化堆肥系统的一个重要因素。含水率过高,会造成局部的厌氧环境,不利于好氧微生物的繁殖及有机质的降解,影响堆肥腐熟效果;而含水率过低,同样

会限制微生物的活性,使堆肥品质不能得到保证。Luangwilai 等研究表明,好氧堆肥过程中微生物生长所需的最适含水率在 40%~70% 之间,此环境下的微生物活性较高,有机质的降解速率较快^[31];雷大鹏等设置物料初始含水率 41%、50%、55%、65% 和 75% 的梯度来研究基质含水率对牛粪好氧堆肥的影响,发现在堆肥物料初始含水率为 65% 时对堆肥最有利^[32]。表 2 中同样总结了一些文献中相关学者推荐的不同物料堆肥含水率,适合堆肥的最佳物料含水率主要集中在 60%~70%。蔬菜废弃物的含水率相比于其他类型的有机废料较高,且结构较为松散,不适合直接用于堆肥,在进行堆肥时可以通过晾晒、添加水分较低的膨胀材料等使堆体含水率保持在 60%~70%,以保证一个适宜的堆肥环境。

此外,物料的 pH 值、粒径等因素对堆肥的腐熟也会产生一定的影响。在堆肥过程中,中性偏碱性的环境更适合微生物的生存^[33],蔬菜废弃物的 pH 值主要集中在 6.5~8.5 之间,所以蔬菜废弃物堆肥时一般不需要去调节物料的 pH 值;小颗粒物料要比大颗粒物料具有较大的表面积,所以在相同条件下小颗粒物料更容易与微生物及氧气接触,因此更有机会被微生物降解,堆肥物料粒径范围在 0.13~0.76 cm,但是蔬菜废弃物的含水率较大,结构较为松散,为防止物料粒径过小影响通气,可以相应增大粒径至 1~3 cm。

表 2 不同学者对不同堆肥原料推荐的 C/N 及含水率

原料	C/N	含水率 (%)	堆肥效果	来源
蔬菜废弃物	20:1	68	腐熟效果最好,臭气排放降低	[34]
厨余垃圾(蔬菜水果废物≥75%)	(17~19):1	—	升温迅速,完全腐熟	[35]
番茄秸秆-羊粪/鸡粪	27	60	升温快,高温持续时间久,养分保留率高	[36]
黄瓜秧-玉米秸秆/木本泥炭	25	60	加速堆肥进程,气体损失低	[37]
牛粪-秸秆	(25~30):1	65	升温快、腐熟彻底、营养损失少	[38]
鹅粪-玉米秸秆	30:1	70	养分损失少,有机质降解率高	[39]
猪粪/污泥-锯末	15:1	57.94	高温持续时间较长,有机质降解充分	[40]
猪粪-玉米秸秆	20:1	60~65	腐熟效果最好	[41]
驴粪	35:1	55	温室气体排放最低,堆体完全腐熟	[42]
园林废弃物-鸡粪	22:1	43.95±1.89	降低氮素损失	[43]

注:表中“—”表示未获取具体数据。

2.3 微生物菌剂的接种

蔬菜废弃物中含有木质素、纤维素等不易降解的有机质,所以需要提前进行破碎处理或者添加微生物菌剂以提高有机质的降解效率^[44]。接种外源

微生物在有机物分解、提高堆肥品质等方面发挥重要作用,常见的有市售 EM 菌剂和自制菌种。另外,腐熟的堆肥产品、禽畜粪便等都含有较丰富的微生物,也可以用于堆肥的外源微生物。龚建英等研究

表明,添加微生物菌剂不仅能加速堆肥进程,还能够减轻产品对轮作作物生长发育的不良影响^[45];陈晓飞等以蔬菜秸秆和牛粪为原料,添加自制速腐菌剂,结果表明,接种菌剂组温度较高,高温持续时间较长,高温期 CO_2 释放量较高,pH 值和电导率变化幅度大, NH_3 释放量较低,有利于减少氮损失^[46];杨冬艳等以 3 种不同腐熟有机肥作为添加剂,进行番茄秸秆的好氧堆肥试验,发现添加 3 种腐熟有机肥均能明显促进堆肥进程,提升堆肥产品质量^[36];戴美玲等研究不同微生物菌剂对菜粕堆肥的影响,结果表明添加微生物菌剂可加速物料升温,提高发酵温度,延长高温维持时间,缩短发酵周期,促进菜粕堆肥养分的转化,减少养分流失,提高有机肥品质^[47];Awasthi 等的研究也证实了接种外源微生物以调整微生物的数量和结构是优化堆肥过程的可行方法^[48]。

3 堆肥腐熟质量评价

好氧堆肥因其物料、工艺、条件等方面的不同,因此关于堆肥腐熟度的评价并没有一个统一的标准,但一般会将堆肥腐熟度评价指标分为物理指标、化学指标以及生物学指标。

我国《蔬菜废弃物高温堆肥无害化处理技术规范》(NY/T 3441—2019)中明确指出物理参考指标,即堆体温度 55 ~ 65 °C 的持续时间要达到 5 d 以上,以便达到无害化;随着堆肥的进行,腐熟的堆肥颜色一般会呈现出黑褐色,难闻的气味会逐渐消失,并散发出泥土味。然而,物理性指标并不能进行量化的分析,所以一般将其作为判别堆肥腐熟的辅助性指标来使用。化学指标中常以 T 值法、硝化指数及 CEC/水溶性有机碳的比值等具有代表性,Vuorinen 等研究发现,不同堆体初始与腐熟时 C/N 的比值变化不大,在 0.5 ~ 0.7 之间,因此提出以 T 值法来判断堆肥的腐熟度,并以 $T < 0.6$ 来表示堆肥腐熟,T 值法适用于不同物料堆肥的腐熟度评价^[49]。硝化指数 [铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)/硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)]作为判断堆肥腐熟度的评价指标必须尽可能的低,Fernández - Delgado 等研究认为,铵态氮/硝态氮 ≤ 0.16 ,堆肥达到腐熟^[50];Bernal 等研究发现,不同原料堆肥结束时 CEC 与水溶性有机碳的比值都能控制在 1.7 ~ 1.9 之间,因此提出堆体的 CEC/水溶性有机碳的比值大于 1.7 时表明堆体达到腐熟^[51]。种子发芽指数是一种较综合性的指标,

兼顾种子的发芽率与植物毒性物质对种子根系发育的影响,是目前最可靠的生物性指标之一。一般认为种子发芽指数为 80% 以上时表示堆肥达到完全腐熟,高建程等通过不同预堆期对牛粪和秸秆混合堆肥进程的影响研究建议 $\text{GI} > 105\%$ 作为牛粪堆肥腐熟度的参考指标^[52]。有学者提出了植物毒性指数 (GIC80% 和 RGIC0.8),用于堆肥腐熟度的评估,Young 等用 GIC80% 来定义导致发芽指数为 80% 的浸提物的最低浓度,用 RGIC0.8 来定义抑制芽根生长的浸提物的最低浓度,并建议植物毒性指数 $\geq 100\%$ 时表示堆肥达到腐熟^[53]。我国最新的有机肥标准 NY/T 525—2021《有机肥料》中明确指出,使用萝卜或黄瓜种子进行发芽测试, $\text{GI} \geq 70\%$ 时可认为堆肥达到腐熟。此外,该标准对有机肥产品中重金属及生物卫生指标做出了规定性要求,以烘干基计算,砷、汞、铅、铬、镉的含量应分别低于 15、2、50、150、3 mg/kg,粪大肠菌群数应 ≤ 100 个/g,蛔虫卵死亡率 $\geq 95\%$ 。

4 堆肥质量优化

4.1 氮素损失的控制

氮素含量是影响堆肥进程与产品质量的一个重要因素,堆肥过程中氮素的存在形态主要包括铵态氮、硝态氮及有机氮等。尽管蔬菜废弃物中含有较高的氮素水平,但是废弃物中的有机氮易被微生物分解转化为铵态氮挥发到环境中,研究发现,氨气挥发是高温堆肥过程中氮素损失的主要形式,占氮素损失总量的 44% ~ 99%,这不仅降低了肥料中的养分含量,也导致了堆肥场所恶臭,造成环境的二次污染^[54-55]。尽管目前堆肥工艺已经得到了很大的发展,但是不管是采用哪种堆肥工艺,氮素损失仍旧是一项很严重的问题,据统计,堆肥过程中氮素损失量在 16% ~ 74% 之间,平均在 40% 左右^[56]。

影响堆肥过程中氮素损失的因素主要有 C/N、pH 值、通风频率、通风量、温度等,有学者通过改变堆肥工艺以达到保氮的目的,张相锋等提出控制物料初始水分并利用温度反馈通气量技术可使堆体内的氧含量始终保持较高水平,这样可以避免堆体内的厌氧环境,抑制反硝化的进行,减少硝态氮的损失^[26,57]。Webb 等将畜禽粪便经过覆盖和压实进行堆肥研究,发现可以减少 90% 以上的 NH_3 损失^[58]。杨宇等比较了间歇和连续 2 种不同的通风方式对堆肥过程中氮、磷养分保留量的影响,结果

表明采取间歇通风的堆体 N 素损失量占堆料初始 TN 的 12.4%, 连续通风方式的 N 素损失量占物料初始 TN 的 30.3%, 相比于连续通风, 间歇式通风更有利于堆体氮素的保留^[59]。

除了调整堆肥工艺之外, 添加吸附材料、富碳物料、化学药剂以及保氮微生物菌剂等方法也是目前控制堆肥氮素损失的研究热点。以吸附性物质作为保氮剂添加到堆肥中, 可以通过吸附原理有效地减少氮素的损失, 例如 Zhang 等将天然沸石添加到堆肥中进行保氮研究, 结果表明其具有较好的吸附 NH_3 的能力, 能够达到堆肥保氮的效果^[60]; 叶素萍在以鸡粪和锯末为主要原料开展的高温堆肥研究中发现, 在堆肥期间 NH_3 的挥发量随 C/N 比值的增加而呈现出明显下降的趋势, 并认为好氧高温堆肥适宜的 C/N 范围在 25 ~ 35, 因此, 很多富碳物料被当作碳源调理剂运用到堆肥中, 以调节堆体 C/N, 降低氮素损失^[61]; 添加化学药剂与堆肥过程中释放的氨发生反应是目前研究的热点之一, 史春梅等研究发现, 磷酸二氢钾与氯化镁组合是猪粪稻草堆肥中最佳的固氮材料, 固氮率达到了 66.07%^[62]。任丽梅等研究表明, 以氢氧化镁和磷酸作为固氮剂添加到堆肥中, 固氮效率最高可达 97% 以上, 且氮素固定效果随混合物中的磷酸含量和混合物投加量的增加而增加^[54]; Chan 等利用氧化镁和磷酸氢二钾作为添加剂, 并通过沸石对其进行盐度以及氮素损失的修正, 结果表明, 氧化镁和磷酸氢二钾与 10% 沸石共同修正可以将氮损失减少到 18%, 且有效降低盐度到 2.82 mS/cm, 保证了堆肥的质量^[63]; 添加外源微生物可调控堆肥过程中碳、氮的代谢, 控制氮素物质分解为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 后的气态挥发损失, 保留更多的养分^[64]; 周肖红等研究发现, 添加已腐熟堆肥可以减少氮损失, 增加堆肥氮素利用水平, 能够提高堆肥养分含量, 获得品质较高的堆肥产品, 也有助于控制堆肥过程中的臭味^[65]。Jiang 等在猪粪堆肥中接种 1% 氮周转细菌 (NTB), 发现可以使氮损失降低到 35%, 总氮含量最大增加 36.1%, 能有效控制氮素损失, 促进堆肥的成熟^[66]。刘艳婷等利用自制复合菌剂对猪粪进行好氧堆肥效果研究, 结果表明与对照组相比, 总氮和有机氮损失分别减少了 17.3% 和 18.5%, 接种微生物菌剂对猪粪堆肥化进程、氮素保持等具有重要影响^[67]。

虽然通过调整工艺和添加保氮物质都能获得不错的保氮效果, 但是这些措施仍有一些不可避免

地缺点, 比如间歇式通风有利于氮素的保留, 但是不利于氧气的持续供应; 控制高温可以减少氨的散失, 但是不利于达到无害化要求; 添加物理保氮剂具有一定的保氮效果, 但氮素仍多以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 形态存在, 存在挥发的可能性; 大量添加镁盐或磷酸盐等化学物质的固氮效率虽然很高, 但是会造成堆肥产品的盐度升高, 对非盐碱耐性作物的生长产生抑制作用。有学者将物理吸附物质、化学物质或微生物菌剂联合使用, 以修正因单个措施引起的不良结果, 但是目前此类研究尚少, 仍需要进一步地深入开展研究。

4.2 有害物的去除

农药残留 (有机磷、有机氯及氨基甲酸酯类)、病原菌及病毒病等是蔬菜废弃物中常见的有害物质, 直接影响到堆肥产品的品质及市场竞争力。利用微生物的代谢活动可以有效地降解大部分农药残留物, 和丽忠等在蔬菜废弃物堆肥过程中接种 3 种微生物菌剂来研究其农药残留量的变化, 结果表明 3 种微生物菌剂均能促进农药残留的降解, 其中甲胺磷与乙酰甲胺磷的降低量最高可分别达到 68.13% 与 84.87%, 降解效果明显^[68]。张圆圆等在以黄瓜秧为原料的静态好氧发酵过程中发现, 随着堆高的增加, 静态条垛的温度升高, 促进了农药在尾菜中的物理降解过程, 同时促进微生物的发酵, 提高农药的微生物降解效率, 从而加速了农药的降解, 在堆高为 2.5 m 时对农药降解最有利^[69]。好氧堆肥的最佳温度一般在 55 ~ 60 °C, 在此范围内大部分微生物能保持较高的活性, 有利于有机物的降解, 且绝大多数的病原微生物及寄生虫卵可以被杀死, 但蔬菜废弃物中不免含有高温 (≥ 70 °C) 才能灭活的病原菌或病毒, 常瑞雪通过调整初始物料容重为 0.35 kg/L, 易降解有机质比例为 45%, 并辅以微生物菌剂, 实现了最高堆温达到 70 °C 以上的超高温工艺的构建, 满足灭活病毒性病原菌的温度要求。但此工艺仅以茄果类蔬菜为代表, 对于其他类蔬菜 (叶菜类、根茎类等) 废弃物还有待于进一步的试验研究与验证^[22]。

5 总结与展望

蔬菜废弃物含水率高、C/N 值低、易携带病原菌等有害物质, 且我国蔬菜产区分散, 蔬菜废弃物种类繁多、性质差异大、季节性强等现状对堆肥来说是一种限制, 与其他处理方式相比, 好氧堆肥法

更为符合我国国情需要。

本文综述了国内外好氧堆肥工艺、参数控制、质量提升等方面的研究进展,并且为后续的研究方向做了进一步的展望:(1)现代化好氧堆肥需要投资一定的设备,并且对操作、管理都有一定的技术要求,因此在作为蔬菜主产区的广大农村地区不易进行推广,优化堆肥预处理、简化堆肥工艺流程的研究需进一步的开展;(2)蔬菜废弃物中可能会携带重金属、农药残留等有害物质,蔬菜废弃物堆肥研究应着重开展对物料重金属的钝化、残留农药的降解等问题的研究,保证堆肥产品的安全性;(3)仍需持续关注堆肥过程中氮素损失及控制的问题,可以结合现代分子生物学技术筛选培育特定高效的固氮微生物细菌,以及深入开展保氮剂联合修正的研究,以提升堆肥产品质量;(4)堆肥过程中会产生恶臭、刺激性气体及 VOCs 等,危害周边环境和人体健康,但国内外对于这类问题的研究相对较少,今后应当开展对堆肥过程中恶臭气体减排及收集的研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2015.
- [2] 杨富民,张克平,杨敏. 3 种尾菜饲料化利用技术研究[J]. 中国生态农业学报,2014,22(4):491-495.
- [3] 杨学琴,赵丽娜. 蔬菜废弃物无害化处理及再利用的探讨[J]. 农业与技术,2019,39(8):23-24.
- [4] 谢计平,郑智韬,王立光. 甘肃省尾菜资源化利用模式探析[J]. 甘肃农业科技,2019(9):77-80.
- [5] DeLaune P B, Moore Jr P A, Daniel T C, et al. Effect of chemical and microbial amendments on ammonia volatilization from composting poultry litter[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(2): 728-734.
- [6] 王丽英,吴硕,张彦才,等. 蔬菜废弃物堆肥化处理研究进展[J]. 中国蔬菜,2014(6):6-12.
- [7] 黄鼎曦,陆文静,王洪涛,等. 农村蔬菜废物的分散化微生物处理[J]. 清华大学学报(自然科学版),2003,43(10):1347-1350.
- [8] 莫舒颖,张志刚,尚庆茂,等. 蔬菜残株的化学组成分析[J]. 中国蔬菜,2008(12):21-23.
- [9] 刘荣厚,王远远,孙辰,等. 蔬菜废弃物厌氧发酵制取沼气的试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(4):209-213.
- [10] 李吉进,邹国元,孙钦平,等. 蔬菜废弃物沤制液体有机肥的理化性状和腐熟特性研究[J]. 中国农学通报,2012,28(13):264-270.
- [11] 刘芳,邱凌,李自林,等. 蔬菜废弃物厌氧发酵产气特性[J]. 西北农业学报,2013,22(10):162-170.
- [12] 韩雪,常瑞雪,杜鹏祥,等. 不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(4):377-382.
- [13] 常瑞雪,王骞,甘晶晶,等. 易降解有机质含量对黄瓜秧堆肥腐熟和氮损失的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(1):231-237.
- [14] 郭秋月,常瑞雪,孙霞,等. 初始物料水溶性有机碳含量对番茄秧堆肥进程的影响[J]. 中国蔬菜,2018(5):42-47.
- [15] 王菊华. 蔬菜废物高温厌氧发酵产沼气及微生物群落结构研究[D]. 昆明:云南师范大学,2020.
- [16] 王艳飞. 厌氧消化过程中温度对产甲烷代谢途径及微生物群落结构变化的影响研究[D]. 昆明:云南师范大学,2019.
- [17] 付龙云,李彦,赵自超,等. 接种比对叶菜类尾菜厌氧发酵产沼气性能影响的研究[J]. 山东农业科学,2020,52(2):75-82.
- [18] 董晓莹. 蔬菜废弃物两相厌氧发酵工艺产沼气试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [19] 邵子听. 蔬菜废弃物厌氧发酵产沼气及其残留物的应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2020.
- [20] 韩贵成,闫实,梁金凤,等. 牛粪与蔬菜秸秆覆膜静态高温堆肥试验研究[J]. 农业科技通讯,2020(1):64-67.
- [21] 张胜利,刘晓旺,李鸿志,等. 不同堆肥模式处理畜禽粪便的优劣[J]. 北方牧业,2021(10):27.
- [22] 常瑞雪. 蔬菜废弃物超高温堆肥工艺构建及其过程中的氮素损失研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.
- [23] 王辉,晋小军,赵洁,等. 蔬菜废弃物不同堆制方法对微生物数量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2012(4):84-86.
- [24] Ajmal M, Shi A P, Awais M, et al. Optimization of pilot-scale in-vessel composting process for various agricultural wastes on elevated temperature by using Taguchi technique and compost quality assessment[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 140:34-45.
- [25] Gao M C, Li B, Yu A, et al. The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6):1899-1903.
- [26] 张相锋,王洪涛,聂永丰. 通风量对蔬菜和花卉废弃物混合堆肥的影响[J]. 农业工程学报,2005,21(10):134-137.
- [27] Arslan E I, Ünlü A, Topal M. Determination of the effect of aeration rate on composting of vegetable-fruit wastes[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2011, 39(11):1014-1021.
- [28] Awasthi M K, Pandey A K, Khan J, et al. Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting[J]. Bioresource Technology, 2014, 168:214-221.
- [29] Kulu R, Yaldiz O. Composting dynamics and optimum mixture ratio of chicken manure and vineyard wastes[J]. Waste Management & Research, 2005, 23(2):101-105.
- [30] 王哲. 蔬菜废弃物不同混配比例对堆肥进程的影响及产品应用[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
- [31] Luangwilai T, Sidhu H S, Nelson M I. One-dimensional spatial model for self-heating in compost piles: investigating effects of moisture and air flow[J]. Food and Bioproducts Processing, 2018, 108:18-26.
- [32] 雷大鹏,黄为一,王效华. 发酵基质含水率对牛粪好氧堆肥发酵

- 产热的影响[J]. 生态与农村环境学报,2011,27(5):54-57.
- [33]陈晓萍. 蚕沙堆肥及其堆肥产品的生物学效应研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [34]刘文杰,王黎明,沈玉君,等. 碳氮比对蔬菜废弃物好氧发酵腐熟度及臭气排放的影响[J]. 环境工程,2020,38(6):233-239.
- [35]张红玉. 碳氮比对厨余垃圾堆肥腐熟度的影响[J]. 环境工程,2013,31(2):87-91.
- [36]杨冬艳,冯海萍,谢 华,等. 不同有机肥添加对番茄秸秆堆肥腐熟品质质量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2020,41(5):19-24.
- [37]常瑞雪,甘晶晶,陈 清,等. 碳源调理剂对黄瓜秧堆肥进程和碳氮养分损失的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(S2):254-259.
- [38]张 鹤,李孟婵,杨慧珍,等. 不同碳氮比对牛粪好氧堆肥腐熟过程的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(1):60-67.
- [39]黄晓凤,杨旭生,王启贵,等. 碳氮比对鹅粪渣-玉米秸秆混合堆肥效果的影响[J]. 西南农业学报,2019,32(5):1127-1132.
- [40]林 皓,卓 倩,吴 菁,等. 碳氮比对半静态强制通风堆肥反应器堆肥腐熟度的影响[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2017,33(6):43-49.
- [41]刘成琛,袁蓉芳,周北海. 碳氮比对猪粪-玉米秸秆混合堆肥的影响[J]. 中国资源综合利用,2018,36(9):23-26.
- [42]陈 辉,王巨媛,田晓飞,等. 含水率与 C/N 耦合对驴粪堆肥过程中温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报,2019,28(2):341-347.
- [43]杨海君,许云海,肖 为,等. 温度和物料配比对城市园林绿化废物与鸡粪水浴法好氧堆肥的影响[J]. 水土保持通报,2019,39(6):35-43,51.
- [44]Yogev A, Raviv M, Hadar Y, et al. Induced resistance as a putative component of compost suppressiveness [J]. Biological Control, 2010,54(1):46-51.
- [45]龚建英,田锁霞,王智中,等. 微生物菌剂和鸡粪对蔬菜废弃物堆肥化处理的影响[J]. 环境工程学报,2012,6(8):2813-2817.
- [46]陈晓飞,呼世斌,张婷敏. 微生物菌剂对农业废弃物腐熟进程影响研究[J]. 农机化研究,2012,34(4):198-202.
- [47]戴美玲,江 涛,谭 美,等. 微生物菌剂对菜粕好氧堆肥发酵的影响[J]. 磷肥与复肥,2020,35(5):20-23.
- [48]Awasthi M K, Duan Y M, Awasthi S K, et al. Effect of biochar and bacterial inoculum additions on cow dung composting [J]. Bioresource Technology, 2020,297:122407.
- [49]Vuorinen A H, Saharinen M H. Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co-composting in a drum composting system [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1997,66(1):19-29.
- [50]Fernández-Delgado Juárez M, Prähauser B, Walter A, et al. Co-composting of biowaste and wood ash, influence on a microbially driven-process[J]. Waste Management, 2015,46:155-164.
- [51]Bernal M P, Sánchez-Monedero M A, Paredes C, et al. Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1998,69(3):175-189.
- [52]高建程,于金莲,石登荣,等. 不同预堆期对牛粪堆肥进程的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2008,27(3):1214-1218.
- [53]Young B J, Rizzo P F, Riera N I, et al. Development of phytotoxicity indexes and their correlation with ecotoxicological, stability and physicochemical parameters during passive composting of poultry manure [J]. Waste Management, 2016,54:101-109.
- [54]任丽梅,贺 琪,李国学,等. 氢氧化镁和磷酸混合添加剂在模拟堆肥中的保氮效果研究及其经济效益分析[J]. 农业工程学报,2008,24(4):225-228.
- [55]冯 蓉,刘 丽,杨胜竹,等. 好氧高温堆肥氮素损失及保氮技术研究进展[J]. 山地农业生物学报,2020,39(6):47-52.
- [56]陈孟立. 蔬菜废弃物堆肥过程中有机氮转化的机理[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [57]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.
- [58]Webb J, Chadwick D, Ellis S. Will storing farmyard manure in compact anaerobic heaps be a simple and effective means of reducing ammonia emissions? [C]//Technology transfer. Proceedings of the 9th International Conference on the FAO ESCORENA Network on recycling of agricultural, municipal and industrial residues in agriculture. Gargano, Italy, 2001:161-166.
- [59]杨 宇,魏源送,刘俊新. 不同通风方式对添加镁盐后猪粪堆肥过程中氮磷保存的影响[J]. 环境科学,2009,30(4):1238-1243.
- [60]Zhang J Y, Sui Q W, Li K, et al. Influence of natural zeolite and nitrification inhibitor on organics degradation and nitrogen transformation during sludge composting [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016,23(2):1324-1334.
- [61]叶素萍. 农牧业固体废弃物堆肥化处理过程中氮素损失调控技术的研究[D]. 北京:中国农业大学,2000:18-31.
- [62]史春梅,王继红,李国学,等. 不同化学添加剂对猪粪堆肥中氮素损失的控制[J]. 农业环境科学学报,2011,30(5):1001-1006.
- [63]Chan M T, Selvam A, Wong J W C. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment [J]. Bioresource Technology, 2016,200:838-844.
- [64]李国学,李玉春,李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. 农业环境科学学报,2003,22(2):252-256.
- [65]周肖红,韩 伟,葛雨萱. 添加已腐熟堆肥和 EM 菌对草末堆肥过程的影响[J]. 现代农业科技,2011(17):265-268.
- [66]Jiang J S, Liu X L, Huang Y M, et al. Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting [J]. Waste Management, 2015,39:78-85.
- [67]刘艳婷,郑 莉,宁寻安,等. 微生物菌剂对畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属钝化与氮转化的影响[J]. 环境科学学报,2020,40(6):2157-2167.
- [68]和丽忠,陈 喜,陈锦玉,等. 蔬菜废弃物无害化处理农药残留量变化研究[J]. 西南农业学报,2006,19(增刊1):125-128.
- [69]张圆圆,李 峰,张宇娇,等. 农田尾菜发酵过程中农药残留变化特征[J]. 农药学报,2020,22(1):122-130.