

外接堆肥微生物在餐厨废弃物好氧堆肥中的应用

丁晓艳¹ 王越² 王宁^{1, 2} 李婉婷^{1, 2} 丁国春² 李季²

(1. 中国农业大学有机循环研究院(苏州), 苏州 215000; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100089)

摘要: 微生物是堆肥过程的主要驱动力, 其群落在堆肥过程中不断演替, 进而影响好氧发酵进程和堆肥的品质。大量研究表明: 接种外源微生物可促进堆肥进程, 加快有机物分解和堆肥腐熟, 消解抗生素等有害物质等作用。餐厨废弃物油脂、盐、含水量高和易酸化等问题会影响好氧发酵过程中微生物的活动。通过特定样品的富集驯化、选择性培养, 并结合先进的分子生物学技术, 筛选具有不同降解功能的菌株, 并以此为基础构建的微生物菌剂能够一定程度上克服餐厨废弃物用于好氧堆肥的限制性问题。主要阐述了餐厨废弃物好氧发酵过程中微生物菌群的演替规律, 构建微生物菌剂的菌种类型及功能和不同菌剂对好氧发酵的作用及潜在影响机制, 以期能够为相关微生物强化技术的研发提供一些参考。

关键词: 外接堆肥微生物; 餐厨废弃物; 好氧堆肥

DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2022-0137

Application of Exogenous Microbial Inoculum in the Composting of Kitchen Waste

DING Xiao-yan¹ WANG Yue² WANG Ning^{1, 2} LI Wan-ting^{1, 2} DING Guo-chun² LI Ji²

(1. Organic Recycling Institute (Suzhou) of China Agricultural University, Suzhou 215000; 2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100089)

Abstract: Microorganisms are the main drivers of the composting process and their dynamics changes all the time, and then influence the composting process and the quality of compost. Many studies demonstrated that, exogenous inoculants may promote the composting process, accelerate the decomposition of organic matter and composting maturity, reduce antibiotics and other harmful substances. Feature of kitchen wastes, such as high oil, high salt, high moisture, easy acidification, etc., affects the microbial activities of these processes. Combined with advanced molecular biology techniques, enriching, and domesticating specific-condition samples, and then using selective culture which was aiming to attain microbes with different functions for decomposing raw materials. Based on these selected microbes, they could promote the composting process with kitchen wastes and overcome the problems during composting when using them. This paper was mainly described the dynamics of microorganisms in composting process with kitchen wastes, explored the influence of applying these different types and functions of microbial inoculants during composting processes, in order that providing technical support and theoretical reference for the development of kitchen waste resource utilization and biological enhancement.

Key words: exogenous microbial inoculum in composting; kitchen waste; aerobic composting

随着全球经济的快速增长、世界人口激增和人民生活水平的不断提高, 食物浪费现象愈发严重^[1-2]。据统计, 世界上产生的餐厨废弃物约为 194 kg/人/年^[3], 2020 年我国餐厨废弃物的产生量也突

破 12 000 万 t。如果处理不当, 餐厨废弃物会迅速发酵变质, 导致病原体滋生、恶臭和渗滤液的产生以及病毒的传播, 从而造成严重的环境污染和潜在的健康危害。

收稿日期: 2022-01-28

基金项目: 苏州市农业科技创新项目(SNG2021026)

作者简介: 丁晓艳, 女, 硕士, 农艺师, 研究方向: 微生物生态; E-mail: dingxiaoyan@oricau.cn

通讯作者: 丁国春, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 微生物生态; E-mail: gc_ding@cau.edu.cn

目前,餐厨废弃物的处理主要有粉碎直排、填埋、焚烧、饲料化和好氧发酵等方式。餐厨废弃物含水量高、富含有机物^[4-5],极易腐败发酵,粉碎直排过程中含油物料易造成管道堵塞,也会加剧污水处理设施的负担。直接填埋虽然操作简单,处理成本低廉,但会造成二次污染,且有机物厌氧发酵造成甲烷排放或累计,具有一定风险^[6]。另外,垃圾填埋场选址困难、占用大量的土地资源,不利于有机废弃物的可持续治理。我国餐厨废弃物含水率较高,直接焚烧处理能源消耗高,还可能因技术条件限制等原因产生二噁英等有害物质造成二次污染^[7]。利用厨余废弃物制作饲料也存在病原菌、生物有害物质超标等风险。随着生态文明工作的推进,多个城市实施了垃圾分类,产生了包含餐厨废弃物在内的大量有机废弃物。如何将这些有机废弃物高效处理和资源化利用成为目前亟需解决的重要问题。

好氧堆肥是有机废弃物资源化利用的重要手段之一,通过强化微生物活动促进有机物的降解和矿化,形成腐殖质。有机废弃物中的不同组分在好氧发酵的不同阶段被降解。例如,在升温阶段,主要是一些易降解的有机物如糖、碳水化合物等在嗜温型细菌和真菌的作用下分解^[8-9];在高温阶段,则通过嗜热型细菌和放线菌等的活动,降解脂肪、纤维素、半纤维素和木质素等难降解的有机物,影响腐殖质的形成^[10-11];在降温期,堆体中残余有机物继续被嗜温微生物利用转化形成类腐殖质物质,促进腐殖化进程^[12-13]。餐厨废弃物富含可溶性糖、淀粉、脂类、蛋白质、纤维素等易于生物降解的化合物^[14],通过好氧堆肥技术可实现其资源化利用。通过好氧发酵技术,可将废弃物中的大分子有机物分解矿化出 N、P、K 等,形成腐殖质^[15],但同时存在一些限制性因素,如高含水量导致餐厨废弃物极易酸化,影响好氧堆肥的快速启动,高油脂和高盐分抑制微生物活性,影响堆肥效率。因此,探索餐厨废弃物的资源化转化技术具有重要意义。以餐厨废弃物为原料制备的有机肥具有改善土壤物理性质的功能,特别是

对于因长期施用化肥造成板结的土壤^[16],餐厨废弃物好氧堆肥,一方面能够降低垃圾焚烧和填埋量,节约土壤和能源;另一方面,也可以实现资源

的循环利用,提高资源使用效率。因此,如何利用好氧发酵实现餐厨废弃物的处理与循环利用是目前研究的一大热点。

微生物是堆肥过程的主体,通过在堆体内部自我调整并进行群落演替来影响堆肥进程,在堆肥过程中起着至关重要的作用。本文主要阐述了餐厨废弃物好氧发酵过程中微生物菌群的演替规律,不同微生物菌剂的菌种类型及功能和其对好氧发酵的作用及潜在影响机制,以期能够为相关微生物强化技术的研发提供参考。

1 餐厨废弃物好氧堆肥过程中的主要微生物群落及演替

好氧堆肥是一个由微生物驱动的生化反应过程。前期由于技术的限制,对堆肥过程的微生物类群结构仅有初步的认识。早期 Ishii 等^[17]采用变性梯度凝胶电泳(DGGE)技术测定餐厨废弃物堆肥过程中的微生物演替发现,在初始阶段主要以分解易降解有机物质的发酵细菌为主,如乳酸菌等;在高温期出现了嗜热芽孢杆菌,降温期后的菌群比之前的菌群更加复杂。但由于当时生物技术手段的局限性,无法更准确、全面地显示菌群的演替。

近年来,高通量测序技术的应用逐步揭示了堆肥过程中微生物群落组成与演替规律^[18]。赵彬涵等^[19]对应用高通量测序技术揭示不同物料堆肥过程中,细菌和真菌的群落组成和演替的研究总结,发现不同堆肥阶段微生物组成存在差异,且堆体中微生物的组成也受原料影响。类似的发现也存在餐厨废弃物堆肥中。目前通过高通量测序手段研究发现,在以餐厨废弃物为主要原料的堆肥过程中,厚壁菌门(Firmicutes)和变形菌门(Proteobacteria)为优势菌门,随着堆肥进程的推进,拟杆菌门(Bacteroidetes)和放线菌门(Actinobacteria)逐步成为优势菌门^[18, 20]。本课题组的研究结果也显示,餐厨废弃物堆肥过程厚壁菌门、变形菌门、拟杆菌门和放线菌门为主要微生物类群,丰度会随着堆肥过程演替,同时会在堆肥腐熟期出现新的优势菌门如疣微菌门(Verrucomicrobia)和绿弯菌门(Chloroflexi)等^[21-22]。与牛粪堆肥相比,餐厨废弃物堆肥中还含有相对较多的厚壁菌门和放线菌门,优势菌属也存

在较大差异^[23]。在污泥堆肥中添加餐厨废弃物,微生物群落组成中厚壁菌门的比例随餐厨废弃物比例的升高而升高^[20]。这也与此前关于厚壁菌门主要存在于餐厨废弃物堆肥中的研究报道相符,主要原因是属于厚壁菌门的乳酸菌抑制其他细菌的生长,降低总体生物多样性^[24]。而乳酸菌是餐厨废弃物好氧堆肥初期出现的重要微生物种类之一,其可促进餐厨废弃物好氧堆肥初期有机酸的降解,减缓有机酸积累造成的物料酸化问题。

不同类型的细菌群落在有机废弃物好氧堆肥过程中起着重要的分解和转化作用。如厚壁菌门与多种代谢活动密切相关,也是木质纤维素降解的重要参与者^[25],其在堆肥升温及高温阶段对于堆肥中物质的降解和转化起着重要作用。拟杆菌门也能有效地降解大分子物质如纤维素和木质素^[26]。变形菌门则有助于降低堆肥产品的生物毒性,提升堆肥品质。在属水平上,芽孢杆菌是餐厨废弃物堆肥过程中的主要优势物种之一^[27-28]。芽孢杆菌在发酵过程中能够分泌大量的蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶等,可促进大分子有机物的分解转化^[29]。这也进一步说明了厚壁菌门在餐厨废弃物堆肥过程中占主要优势的原因。

餐厨废弃物成分复杂,其可提升堆肥中微生物的多样性,促进发酵。如阎中等^[6]研究发现,在以成分更复杂的餐饮垃圾为底物的好氧发酵中,微生物的多样性显著高于厨余垃圾,且发酵效果也优于厨余垃圾。席北斗等^[30]的研究中发现,通过添加锯末、树叶、秸秆和干马粪等有机质可提高餐厨废弃物底物的多样性,有利于提高微生物群落的丰富度,提高发酵效果。原因可能是堆物底物越复杂,营养就越均衡,好氧微生物所需要的酶系统就越多,从而提高好氧堆肥技术处理餐厨废弃物的效果^[31]。

理解微生物群落组成和结构是调控餐厨废弃物好氧堆肥过程的基础。外界条件的改变,如菌剂添加或者物料组成的改变以及环境和反应条件变化等,会使微生物组成和多样性出现较大波动,进而影响餐厨废弃物处理和资源化利用过程^[6]。因此,深入了解餐厨废弃物好氧堆肥各阶段微生物群落的组成、作用及演替规律,有助于提升外接堆肥微生物与土著微生物的协同作用,改善微生物的作用效果,进而促进餐厨废弃物好氧堆肥进程,提升餐厨废弃物

的资源化利用效率。

2 外接堆肥微生物菌剂在餐厨废弃物好氧堆肥中的应用

针对餐厨废弃物的特殊性,筛选相关功能的堆肥微生物并接种于餐厨废弃物的处理过程中,是实现餐厨废弃物的减量化、无害化和资源化的重要手段之一。

2.1 外接堆肥微生物的类型和功能

外接堆肥微生物菌种的来源主要分为两大类,一是将好氧堆肥的堆体作为菌种源,直接或通过进一步强化后筛选的土著微生物;二是将环境样品如土壤、水体等作为菌种源,通过一定手段干预筛选适用于对应条件下的微生物^[32-33]。我国餐厨废弃物包含的有机物质主要为淀粉、蛋白、纤维素和油脂等,易酸化、盐分含量高,应用于餐厨废弃物的外接堆肥微生物类群主要特质为耐酸耐盐且可高效降解淀粉、蛋白、纤维素和油脂4种有机大分子物质。目前常用于餐厨废弃物好氧堆肥添加的微生物类群为芽孢杆菌属(*Bacillus*)、短芽孢杆菌属(*Brevibacillus*)、乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)、柠檬酸杆菌属(*Citrobacter*)、链霉菌属(*Streptomyces*)、曲霉属(*Aspergillus*)、木霉属(*Trichoderma*)和指状青霉(*Penicillium digitatum*)等。外接堆肥微生物菌剂可以由单一菌群构成,如万文娟等^[34]用地衣芽孢杆菌制备的油脂降解功能菌剂,Tran等^[35]用乳酸片球菌TM14制备的可促进堆肥初期有机酸降解的菌剂等;也可以由数种不同的微生物菌群组成的复合菌剂,如李华芝等^[36]用筛选获得的4株在高温条件下能产生淀粉酶、脂肪酶、蛋白质酶及纤维素酶的不同高效菌株制备的多功能高温菌剂等。大量的研究表明,单一微生物菌群促进堆肥进程的作用多不如多种微生物复合菌群。Awasthi等^[37]首次比较了单一和多功能菌群对餐厨废弃物堆肥的影响,结果表明,具有降解4种大分子有机物功能的多功能复合菌群通过增加有机物降解速率,使堆肥腐熟时间比只具有油脂降解功能的单一功能菌群提前20 d,且在含油量降低指标上多功能微生物复合菌群的效果仅比特定单一功能菌群的效果低5%左右。现阶段的外接堆肥微生物菌剂研究也优选于多功能复

合菌群。但不同微生物菌种各有其功能和特点,需更加清晰地认知菌种的相关特性和协同作用机制,以便根据不同的应用场景和堆肥产品的用途等,选择更加适配的微生物接种剂。

2.2 外接堆肥微生物在餐厨废弃物好氧堆肥中的作用

2.2.1 改善餐厨废弃物好氧堆肥初期酸化,促进堆肥快速启动 餐厨废弃物的易降解特性使其极易在堆肥初期积累大量有机酸,降低堆肥初期的 pH,抑制微生物活性,导致堆肥启动慢、升温延迟,甚至发酵崩溃等问题^[38-40]。研究表明接种相关外接堆肥菌剂可有效解决此问题^[28, 41],可通过加速餐厨废弃物堆肥初期有机酸的转化,改善初期堆肥的 pH,为堆肥中的微生物提供适宜的活动环境,调控堆肥的优势微生物菌群的演替,进而促进堆肥的快速启动升温,加速堆肥进程。如 Nakasaki 等^[42]通过在餐厨废弃物好氧堆肥初期接种毕赤酵母,快速降解堆肥初期物料中的有机酸,使堆肥 pH 值在 2 d 内超过中性水平,有效解决了餐厨废弃物堆肥初期酸化抑制堆肥启动的问题。在以餐厨废弃物为原料的堆肥早期阶段均能检测到乳酸菌的存在,其中乳酸菌片球菌可通过产生乳酸阻止乙酸的生成,从而激活本地堆肥微生物过程,加速堆肥过程。因此有学者研究了外接乳酸菌在堆肥初期解决其酸化问题的作用。如 Tran 等^[35]将乳酸菌片球菌 TM14 接种于餐厨废弃物堆肥中,其可刺激具有降解有机酸能力的真菌的生长,降解堆肥初期的有机酸,改变 pH 值和环境条件,使其他微生物得以发挥重要作用;同时发现将在餐厨废弃物堆肥初期中占主导地位的乳酸菌片球菌 TM14 与异发性乳酸菌 TA15 按一定比例接种于堆肥中,可以有效地促进堆肥过程中有机物的降解^[43]。Song 等^[44]将耐酸菌剂接种于餐厨废弃物堆肥,显著提高乙酸和丙酸降解菌群的相对丰度和生物多样性,使堆肥初期酸问题得到有效解决;该研究学者团队同期也开发了一种协同降解有机酸的微生物菌群(MCDOA),其能消除由于过度酸化引起的堆肥初期温度上升滞后,有效缩短堆肥周期^[45]。丁杰等^[46]通过接种抗酸化复合菌于餐厨废弃物和稻壳为堆肥原料的堆肥中,能有效缓解堆肥初期

酸化的抑制作用,使堆肥快速进入高温期且持续时间更长。以上研究通过添加相关微生物菌剂促进了餐厨废弃物好氧堆肥在初期酸化环境下的快速启动,改善了堆肥升温滞后问题,也初步说明了相关微生物的作用机制,但仍需进一步深入研究微生物的协同作用机理。

2.2.2 促进餐厨废弃物好氧堆肥进程,提升堆肥品质 餐厨废弃物含油量高,抑制了微生物在其好氧发酵过程中的活动,延长堆肥周期,抑制堆肥腐熟。研究发现通过添加油脂降解相关功能的菌剂可明显改善这一问题。詹亚斌等^[47]通过添加自筛并复配的高效油脂降解菌剂,使餐厨废弃物堆肥过程中的油脂降解率提升 12%,且更快达到腐熟标准。俞培斌等^[48]将枯草芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌等比例制作成复合菌剂用于餐厨废弃物堆肥,发现该复合菌剂不仅能明显缩短堆肥周期(约 40%),而且将餐厨废弃物降解率提高了 31%。万文娟等^[34]将筛选的一株具有油脂降解功能的地衣芽孢杆菌制备成菌剂,添加到以餐厨废弃物为原料的好氧堆肥中,能够有效提高降解效率、缩短处理时间。耐热脂解放线菌(*Thermoactinomyces vulgaris* A31)接种降低了堆肥的粗脂肪含量,并缩短了堆肥的成熟时间^[49]。Awasthi 等^[50]筛选一株高效高温油脂降解菌,其在含有餐厨废弃物处理中的减油率最高可达 65.12%。

我国餐厨废弃物含盐量一般为 2%-5% (质量分数),且随着地域饮食习惯的不同而有显著差异^[51]。虽然餐厨废弃物的高有机质含量使其适合好氧堆肥处理,但其高盐含量的特性抑制了堆肥进程^[52-53]。含盐量高于 1.5% 时,堆肥微生物活性明显受到抑制,影响堆肥效率^[54]。在餐厨废弃物好氧堆肥过程中接种的微生物菌剂多以通过高耐受盐浓度的条件筛选功能微生物并进行复配,可以减缓甚至抵消高盐对微生物活动的抑制作用,进而促进堆肥进程。石娟等^[32]通过将耐盐能力作为筛选条件获得一株耐盐嗜热菌 *Aneurinibacillus thermoaerophilus* H7,具有耐盐性和降解高浓度油脂的功能,可用于高盐高油脂含量的餐厨废弃物堆肥中。陈彦廷^[55]通过耐盐浓度筛选获得了耐盐菌株,并复配了耐盐

的复合多功能菌剂,可促进餐厨废弃物好氧堆肥的快速启动和腐熟。陈远哲等^[56]筛选获得一株耐盐菌 *Staphylococcus equorum*,其产生的蛋白酶能在较高盐浓度环境中有效地降解蛋清蛋白。余培斌等^[48]通过盐度的耐受性筛选获得3株具有淀粉、纤维素、蛋白质及油脂强降解力的菌株,并复配菌剂应用于餐厨废弃物好氧堆肥中,可缩短堆肥周期,提高降解率。

堆肥中的高温期是难降解有机物(如纤维素、木质素等)降解的重要阶段。在餐厨废弃物堆肥过程接种耐热复合菌系可延长高温期,促进有机质的降解,提高堆肥效率。通过在全程高温堆肥工艺中接种高有机质降解效率的耐热复合菌系,可实现堆肥中难降解物质如木质纤维素的更快降解,缩短餐厨废弃物堆肥进程^[57-58]。李华芝等^[36]从厨余垃圾处理系统中分离筛选4株高温高效菌种,并制成高温菌剂,24 h内对厨余垃圾中粗脂肪和粗纤维有明显的降解效果,降解效率分别为30.7%和11.3%,粗蛋白含量增加了9.5%。李龙涛等^[59]将包含枯草芽孢杆菌、酵母菌和木霉菌的菌剂B1添加到餐厨废弃物水稻秸秆混合堆肥中,使堆体嗜温菌代谢活性增高,高温期更持久,60℃以上高温期较CK延长了4 d,物料分解较为彻底。还有学者利用纤维素降解微生物来加强纤维素的降解,如邹德勋^[60]在餐厨废弃物堆肥过程中加入纤维素降解菌短芽孢杆菌FA2,木质素降解率增加了5.09%,促进了堆肥腐熟;诸葛诚祥^[61]从菌糠中筛选、驯化构建的高效纤维素降解菌剂HJ,可促进堆肥发酵,缩短腐熟时间并提高堆化质量;Manu等^[62]将含有乳酸菌、酵母菌和光合细菌的复合菌剂接种于餐厨废弃物堆肥中,提高了木质纤维素降解率,并且有机肥中的腐殖质和黄腐酸含量得到了提高。段绍君等^[63]通过接种引进日本东北大学选育的复合菌种将餐厨废弃物发酵分解成有机肥料,结果表明复合菌种处理餐厨废弃物减量率85%以上,且升温快速,高温维持时间较长,腐熟时间较短,腐熟彻底。

以上研究均表明,外接功能菌剂以及复合菌剂均能在一定程度上促进以餐厨废弃物为原料的好氧堆肥进程,但对其作用机理仍需进一步深入研究。餐厨废弃物堆肥过程受到不同因素的影响,依赖不

同功能和类型微生物的协同作用。进一步了解不同微生物类群在餐厨废弃物堆肥过程发挥的作用,解析这一复杂过程中不同微生物的协同作用机制,将更加有利于提高堆肥效率,更好地提升堆肥品质。同时也可微生物菌剂的开发和应用提供支持。

2.2.3 降低餐厨废弃物好氧堆肥的负面环境效应 餐厨废弃物的易腐败特性,致使在处理过程中易产生恶臭气体,有研究发现餐厨废弃物堆肥过程中产生最重要的含氮污染物是氨气,这与餐厨废弃物堆肥过程中碳氮比(C/N)较低有关。传统的堆肥处理造成养分损失,外接堆肥微生物菌剂可显著提升堆肥效率,促进有机质的降解和转化,减少养分损失,降低臭气和温室气体排放。有研究发现在食物垃圾与膨体材料混合中接种嗜热和脂肪分解微生物,可增强餐厨废弃物的降解,提升堆肥中氮的含量,减少养分损失^[58];在餐厨废弃物水稻秸秆混合堆肥中接种枯草芽孢杆菌、酵母菌、木霉菌复合菌剂,促进了有机物的降解,在堆肥完成时的C/N更低,堆肥产品的氮、磷含量更高,减少了养分的损失^[59]。通过添加红酵母、葡萄牙棒孢酵母、米曲霉与菌株31418的组合菌于餐厨废弃物中,对其进行发酵,不仅可以降低发酵过程中产生的气味,同时显著提升了肥料对植物的促生作用。Zhao等^[64]通过筛选12株具有高降解性的不同物种优势菌株(8种细菌、1种放线菌和3种真菌)开发复合微生物制剂YH,可显著抑制堆肥过程中NH₃和H₂S的排放。邹德勋^[60]研究发现在餐厨废弃物中添加菌糠,NH₃的释放量仅占餐厨废弃物+秸秆处理释放量的36.49%,堆肥过程的臭味也明显减少,说明菌糠具有一定的抑臭保氮作用。外接堆肥微生物的添加可减少堆肥过程中的养分损失,促进其转化,且可改善堆肥过程中臭气和温室气体的产生,改善堆肥环境,降低负面环境效应。

3 总结与展望

好氧堆肥是实现餐厨废弃物资源化的重要途径之一。而微生物在好氧堆肥过程中起着至关重要的作用,深入了解餐厨废弃物堆肥过程中微生物的动态变化及作用机理等,对开发新型外接堆肥微生物菌剂产品,提高微生物在堆肥中的作用具有重要意义。

义。外接堆肥微生物可以起到促进餐厨废弃物好氧堆肥快速启动, 加快腐熟, 提高堆肥品质, 减少臭气和温室气体排放, 提高堆肥产品附加值等多方面作用, 具有良好的应用和市场前景。

我国垃圾分类正在全面推进实施, 大规模以餐厨废弃物为原料的好氧堆肥处于刚起步阶段。餐厨废弃物的特殊性, 如高含水性, 多结合辅助加热使其在短时间内快速降低含水量, 以方便运输。但过高的辅助加热使其含水迅速降低、含盐量增加等, 通常不利于微生物在其处理过程中的定殖和活动, 无法对餐厨废弃物中的有机质等进行有效降解, 后续进行集中好氧发酵时还需进行各种调节来满足发酵条件, 耗费人力物力。此外, 部分外接堆肥微生物存在效果不明显、适用范围小等问题, 一方面是餐厨废弃物处理的特殊性使外接微生物在其中定殖困难, 另一方面还存在与土著微生物的竞争, 解决这些问题需要从多方面进行调整优化。首先, 要优化设备的处理工艺, 使其能够给微生物提供更适合的环境, 如温度、pH、通氧量等, 使微生物在初步处理餐厨废弃物的过程中起到最大的作用。其次, 在后续的好氧发酵过程使其发酵条件满足微生物活动所需。另外, 需要提升微生物的适应性, 筛选更有活力、适应性更广的土著微生物, 分阶段多次添加微生物, 保持各阶段优势微生物的活性和数量, 将外接微生物与起爆剂(红糖、蜜糖等)或者其他物质混合, 给微生物提供更适宜的初始环境, 维持微生物的活性, 抵御初始不良环境的影响, 快速启动发酵过程。还需结合现代生物技术, 对不同环境条件下的餐厨废弃物好氧发酵过程中微生物的群落组成、演替、功能和作用机制进行深入解析, 为微生物菌剂的研发和科学应用提供支撑。

参考文献

- [1] Yin Y, Liu YJ, Meng SJ, et al. Enzymatic pretreatment of activated sludge, food waste and their mixture for enhanced bioenergy recovery and waste volume reduction via anaerobic digestion [J]. *Appl Energy*, 2016, 179 : 1131-1137.
- [2] Tian L, Zhang LX, Liu YT, et al. Clean production of ethyl levulinate from kitchen waste [J]. *J Clean Prod*, 2020, 268 : 122296.
- [3] Corrado S, Sala S. Food waste accounting along global and European food supply chains : state of the art and outlook [J]. *Waste Manag*, 2018, 79 : 120-131.
- [4] Dahiya S, Sarkar O, Swamy YV, et al. Acidogenic fermentation of food waste for volatile fatty acid production with co-generation of biohydrogen [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 182 : 103-113.
- [5] Awasthi SK, Sarsaiya S, Awasthi MK, et al. Changes in global trends in food waste composting : research challenges and opportunities [J]. *Bioresour Technol*, 2020, 299 : 122555.
- [6] 阎中, 王婧瑶, 王凯军. 基于强化推流工艺(PFR)的餐厨垃圾堆肥微生物群落结构解析[J]. *中国沼气*, 2020, 38(3):3-9. Yan Z, Wang JY, Wang KJ. Analysis of microbial community structure in food waste composting with plug flow reactor(PFR)[J]. *China Biogas*, 2020, 38(3) : 3-9.
- [7] 王佳君. 餐厨垃圾的厌氧发酵及资源化利用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016. Wang JJ. Anaerobic digestion and resource utilization for food waste [D]. Harbin : Harbin Engineering University, 2016.
- [8] Gill SS, Jana AM, Shrivastav A. Anaerobic bacterial degradation of kitchen waste : a review [J]. *International Journal of Research and Development in Pharmacy and Life Sciences*, 2014, 3(2) : 850-854.
- [9] 刘阳, 徐凤花, 王彦伟, 等. 低温复合发酵剂对冬季牛粪堆肥微生物多样性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012(3) : 94-98. Liu Y, Xu FH, Wang YW, et al. Influence of low temperature compound starter on varieties of biodiversity in cow muck compost in winter [J]. *Soil Fertil Sci China*, 2012(3) : 94-98.
- [10] Mao H, Zhang HY, Fu Q, et al. Effects of four additives in pig manure composting on greenhouse gas emission reduction and bacterial community change [J]. *Bioresour Technol*, 2019, 292 : 121896.
- [11] 张晓叶. 餐厨废弃物好氧堆肥研究[J]. *污染防治技术*, 2017, 30(6) : 29-30, 45. Zhang XY. A study on kitchen waste aerobic composting [J]. *Pollut Control Technol*, 2017, 30(6) : 29-30, 45.
- [12] Jurado M, López MJ, Suárez-Estrella F, et al. Exploiting composting biodiversity : study of the persistent and biotechnologically relevant microorganisms from lignocellulose-based composting [J]. *Bioresour Technol*, 2014, 162 : 283-293.
- [13] Albrecht R, Périssol C, Ruauvel F, et al. Functional changes in culturable microbial communities during a co-composting process :

- carbon source utilization and co-metabolism [J]. Waste Manag, 2010, 30 (5): 764-770.
- [14] Wang JY, Stabnikova O, Ivanov V, et al. Intensive aerobic bioconversion of sewage sludge and food waste into fertiliser [J]. Waste Manag Res, 2003, 21 (5): 405-415.
- [15] Cerda A, Artola A, et al. Composting of food wastes: status and challenges [J]. Bioresour Technol, 2018, 248 (Pt A): 57-67.
- [16] 叶世娟, 王成志. 增施有机肥料改善土壤物理环境 [J]. 中国农业大学学报, 1997, 2 (S1): 151-155.
- Ye SJ, Wang CZ. Add organic manure to soil to improve the physical behavior [J]. J China Agric Univ, 1997, 2 (S1): 151-155.
- [17] Ishii K, Fukui M, Takii S. Microbial succession during a composting process as evaluated by denaturing gradient gel electrophoresis analysis [J]. J Appl Microbiol, 2000, 89 (5): 768-777.
- [18] Wang XJ, Pan SQ, Zhang ZJ, et al. Effects of the feeding ratio of food waste on fed-batch aerobic composting and its microbial community [J]. Bioresour Technol, 2017, 224: 397-404.
- [19] 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 (1): 223-240.
- Zhao BH, Sun XY, Huang J, et al. Application and effects of microbial additives in aerobic composting of organic solid wastes: a review [J]. Microbiol China, 2021, 48 (1): 223-240.
- [20] Qin RH, Su CY, Mo TH, et al. Effect of excess sludge and food waste feeding ratio on the nutrient fractions, and bacterial and fungal community during aerobic co-composting [J]. Bioresour Technol, 2021, 320 (Pt A): 124339.
- [21] 孟雅. 厨余废弃物好氧发酵嗜高温复合菌剂的研发 [D]. 北京: 中国农业大学, 2021.
- Meng Y. Development of microbial inoculants for aerobic fermentation of kitchen waste using thermophilic bacteria. [D]. Beijing: China Agricultural University, 2021.
- [22] 赵彩虹. 餐厨废弃物堆肥的油脂降解菌筛选应用与机制分析 [D]. 北京: 中国农业大学, 2021.
- Zhao CH. Screening and application of oil degrading bacteria in food waste composting and analysis of mechanism [D]. Beijing: China Agricultural University, 2021.
- [23] Kitamura R, Ishii K, Maeda I, et al. Evaluation of bacterial communities by bacteriome analysis targeting 16S rRNA genes and quantitative analysis of ammonia monooxygenase gene in different types of compost [J]. J Biosci Bioeng, 2016, 121 (1): 57-65.
- [24] Hemmi H, Shimoyama T, Nakayama T, et al. Molecular biological analysis of microflora in a garbage treatment process under thermoacidophilic conditions [J]. J Biosci Bioeng, 2004, 97 (2): 119-126.
- [25] Pankratov TA, Ivanova AO, Dedysh SN, et al. Bacterial populations and environmental factors controlling cellulose degradation in an acidic *Sphagnum* peat [J]. Environ Microbiol, 2011, 13 (7): 1800-1814.
- [26] Chen S, Cheng H, Wyckoff K N, et al. Linkages of Firmicutes and Bacteroidetes populations to methanogenic process performance [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2016, 43 (6): 771-781.
- [27] Li Y, Chen Z, et al. Changes in aerobic fermentation and microbial community structure in food waste derived from different dietary regimes [J]. Bioresource Technology, 2020, 317 (8): 123948.
- [28] Nakasaki K, Hirai H, Mimoto H, et al. Succession of microbial community during vigorous organic matter degradation in the primary fermentation stage of food waste composting [J]. Sci Total Environ, 2019, 671: 1237-1244.
- [29] Carvalho R, TLR Corrêa, JCMD Silva, et al. Optimization of culture conditions for the production of amylases by thermophilic *Bacillus* sp. and hydrolysis of starches by the action of the enzymes [J]. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2008, 28 (2): 380-386.
- [30] 席北斗, 刘鸿亮, 孟伟, 等. 厨余垃圾堆肥蓬松剂技术研究 [J]. 安全与环境学报, 2003 (3): 41-45.
- Xi B, Liu HL, Meng W, et al. An improvement to domestic waste composting by adding different bulking agents [J]. Journal of Safety and Environment, 2003 (3): 41-45.
- [31] 张剑敏. 餐厨垃圾的微生物处理技术 [J]. 中国资源综合利用, 2017, 35 (2): 28-29.
- Zhang JM. Microbial treatment technology of food waste [J]. China Resour Compr Util, 2017, 35 (2): 28-29.
- [32] 石娟, 周攀, 陈意超, 等. 一株耐盐嗜热菌 *Aneurinibacillus thermoaerophilus* H7 的分离及其油脂降解特性 [J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (1): 214-219.
- Shi J, Zhou P, et al. Isolation and oil degrading characterization of a halotolerant thermophile *Aneurinibacillus thermoaerophilus* H7 [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021, 27 (1): 214-219.
- [33] 郑吁, 陈泽斌, 夏体渊, 等. 餐厨垃圾好氧降解菌的筛选鉴

- 定[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 420-424.
- Zheng X, Chen ZB, Xia TY, et al. Screening and identification of aerobic degradation bacteria in kitchen waste[J]. Southwest China J Agric Sci, 2016, 29(2): 420-424.
- [34] 万文娟, 张赞彬, 聂志妍, 等. 耐高温餐厨垃圾分解细菌的筛选、鉴定及应用[J]. 食品与机械, 2019, 35(6): 54-58, 68.
- Wan WJ, Zhang YB, Nie ZY, et al. The screening and identification of thermostable decomposition bacteria in kitchen waste and the relative application[J]. Food Mach, 2019, 35(6): 54-58, 68.
- [35] Tran QNM, Mimoto H, Nakasaki K. Inoculation of lactic acid bacterium accelerates organic matter degradation during composting[J]. Int Biodeterior Biodegrad, 2015, 104: 377-383.
- [36] 李华芝, 李秀艳, 胡启平, 等. 处理厨余垃圾的高温菌剂研制及其降解性质研究[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2011(2): 126-133.
- Li HZ, Li XY, Hu QP, et al. Development and study of the thermophilic microbial agent for disposing the food waste and its degradation properties[J]. J East China Norm Univ Nat Sci, 2011(2): 126-133.
- [37] Awasthi MK, Selvam A, Lai KM, et al. Critical evaluation of post-consumption food waste composting employing thermophilic bacterial consortium[J]. Bioresour Technol, 2017, 245(Pt A): 665-672.
- [38] Chan MT, Selvam A, Wong JWC. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment[J]. Bioresour Technol, 2016, 200: 838-844.
- [39] Cheung HNB, Huang GH, Yu H. Microbial-growth inhibition during composting of food waste: effects of organic acids[J]. Bioresour Technol, 2010, 101(15): 5925-5934.
- [40] Wang X, Selvam A, Chan MT, et al. Nitrogen conservation and acidity control during food wastes composting through struvite formation[J]. Bioresour Technol, 2013, 147: 17-22.
- [41] 宋彩红, 张亚丽, 李鸣晓, 等. 抗酸化微生物复合菌系对餐厨垃圾堆肥腐殖质组分光谱学性质的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(11): 3533-3539.
- Song CH, Zhang YL, Li MX, et al. Impact of anti-acidification microbial consortium on spectral characteristics of humic fractions in food waste compost[J]. Spectrosc Spectr Anal, 2019, 39(11): 3533-3539.
- [42] Nakasaki K, Araya S, Mimoto H. Inoculation of *Pichia kudriavzevii* RB1 degrades the organic acids present in raw compost material and accelerates composting[J]. Bioresour Technol, 2013, 144: 521-528.
- [43] Tran QNM, Mimoto H, Koyama M, et al. Lactic acid bacteria modulate organic acid production during early stages of food waste composting[J]. Sci Total Environ, 2019, 687: 341-347.
- [44] Song CH, Li MX, Qi H, et al. Impact of anti-acidification microbial consortium on carbohydrate metabolism of key microbes during food waste composting[J]. Bioresour Technol, 2018, 259: 1-9.
- [45] Song CH, Zhang YL, Xia XF, et al. Effect of inoculation with a microbial consortium that degrades organic acids on the composting efficiency of food waste[J]. Microb Biotechnol, 2018, 11(6): 1124-1136.
- [46] 丁杰, 郝艳, 侯佳奇, 等. 接种抗酸化复合菌对餐厨废弃物堆肥酸化缓解及腐殖化的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(12): 1887-1894.
- Ding J, Hao Y, Hou JQ, et al. Effects of anti-acidification microbial agents (AAMA) on reducing acidification and promoting humification during kitchen waste composting[J]. Res Environ Sci, 2016, 29(12): 1887-1894.
- [47] 詹亚斌, 魏雨泉, 陶兴玲, 等. 耐高温油脂降解菌株的筛选、鉴定及其在好氧堆肥中的应用[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(7): 812-818.
- Zhan YB, Wei YQ, Tao XL, et al. Screening and identification of high temperature resistant oil degrading strain and its application in aerobic composting[J]. Environ Pollut Control, 2021, 43(7): 812-818.
- [48] 余培斌, 杜晶, 陈建新. 高温好氧堆肥过程中芽孢杆菌的筛选、鉴定及应用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 199-205, 212.
- Yu PB, Du J, Chen JX. Study on screening and identification of *Bacillus* in the process of high-temperature aerobic composting and its application[J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(12): 199-205, 212.
- [49] Ke GR, Lai CM, Liu YY, et al. Inoculation of food waste with the thermo-tolerant lipolytic actinomycete *Thermoactinomyces vulgaris* A31 and maturity evaluation of the compost[J]. Bioresour Technol, 2010, 101(19): 7424-7431.
- [50] Awasthi MK, Selvam A, Chan MT, et al. Bio-degradation of oily food waste employing thermophilic bacterial strains[J]. Bioresour

- Technol, 2018, 248 (Pt A): 141-147.
- [51] 王攀, 李冰心, 黄燕冰, 等. 含盐量对餐厨垃圾干式厌氧发酵的影响 [J]. 环境污染与防治, 2015, 37 (5): 27-31.
- Wang P, Li BX, Huang YB, et al. Effect of salt content on dry anaerobic fermentation for food waste [J]. Environ Pollut Control, 2015, 37 (5): 27-31.
- [52] Liu L, Wang SQ, Guo XP, et al. Succession and diversity of microorganisms and their association with physicochemical properties during green waste thermophilic composting [J]. Waste Manag, 2018, 73 : 101-112.
- [53] Cheng HF, Hu YA. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy : current and future practices in China [J]. Bioresour Technol, 2010, 101 (11): 3816-3824.
- [54] 任连海, 黄燕冰, 王攀. 含盐量对餐厨垃圾堆肥理化特性变化规律的影响 [J]. 重庆大学学报, 2014, 37 (7): 104-109.
- Ren LH, Huang YB, Wang P. Effect of salt content on the change of physicochemical characteristics of restaurant garbage during aerobic composting [J]. J Chongqing Univ, 2014, 37 (7): 104-109.
- [55] 陈彦廷. 耐盐菌剂堆肥及其强化番茄抗盐胁迫的研究 [D]. 北京 : 中国农业大学, 2021.
- Chen YT. Effects of halotolerant bacterial consortium on kitchen waste composting and its improvement of tomato resistance to salt stress [D]. Beijing : China Agricultural University, 2021.
- [56] 陈远哲, 黄熙莺, 鲁安娜, 等. 耐盐菌发酵对咸鸭蛋蛋清脱盐及抗氧化活性的影响 [J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38 (11): 130-136.
- Chen YZ, Huang XY, Lu AN, et al. Research on the desalination salted duck egg white and antioxidant activity by salt-tolerant bacterium fermentation [J]. J Food Sci Biotechnol, 2019, 38 (11): 130-136.
- [57] 宋彩红, 齐辉, 等. 耐热复合菌系强化全程高温堆肥快速处理餐厨垃圾 [J]. 环境工程, 2021, 39 (5): 111-117, 130.
- Song CH, Qi H, et al. High-speed treatment of food waste by continuous high-temperature composting enhanced by thermophilic microbial consortium [J]. Environ Eng, 2021, 39 (5): 111-117, 130.
- [58] Tsai SH, Liu CP, Yang SS. Microbial conversion of food wastes for biofertilizer production with thermophilic lipolytic microbes [J]. Renew Energy, 2007, 32 (6): 904-915.
- [59] 李龙涛, 饶中秀, 等. 微生物菌剂在餐厨垃圾和水稻秸秆堆肥上的效果研究 [J]. 湖南农业科学, 2021 (8): 28-31.
- Li LT, Rao ZX, et al. Effects of microbial agents on kitchen waste and rice straw composting [J]. Hunan Agric Sci, 2021 (8): 28-31.
- [60] 邹德勋. 以菌糠为调理剂的餐厨垃圾好氧堆肥技术及其机制研究 [D]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学, 2010.
- Zou DX. Research on aerobic composting technology of kitchen waste with spend mushroom substrate as amendments and its mechanism [D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2010.
- [61] 诸葛诚祥. 菌糠高效降解菌剂的研发及其在堆肥中的应用 [D]. 杭州 : 浙江大学, 2017.
- Zhuge CX. Research on high efficiency degrading microbial inoculum of spent mushroom substrate and its application in composting [D]. Hangzhou : Zhejiang University, 2017.
- [62] Manu MK, Kumar R, Garg A. Performance assessment of improved composting system for food waste with varying aeration and use of microbial inoculum [J]. Bioresour Technol, 2017, 234 : 167-177.
- [63] 段绍君, 金浩, 毛冠华, 等. 新型复合菌种降解餐厨垃圾 [J]. 环境工程学报, 2017, 11 (2): 1123-1130.
- Duan SJ, Jin H, Mao GH, et al. Pilot-scale experiment of new composite bacterial species to dispose restaurant garbage [J]. Chin J Environ Eng, 2017, 11 (2): 1123-1130.
- [64] Zhao KN, Xu R, Zhang Y, et al. Development of a novel compound microbial agent for degradation of kitchen waste [J]. Braz J Microbiol, 2017, 48 (3): 442-450.

(责任编辑 李楠)