

乔如陆, 王凌霄, 孙玉鑫, 李国学, 常瑞雪, 李季, 李彦明. 厨余垃圾好氧堆肥技术及优化策略研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29 (4): 821-828
Qiao RL, Wang LX, Sun YX, Li GX, Chang RX, Li J, Li YM. Review of aerobic composting technology and optimization strategy of food waste [J].
Chin J Appl Environ Biol, 2023, 29 (4): 821-828

厨余垃圾好氧堆肥技术及优化策略研究进展

乔如陆^{1,2} 王凌霄¹ 孙玉鑫^{1,2} 李国学¹ 常瑞雪^{1,2} 李季^{1,2} 李彦明^{1,2}✉

¹ 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193

² 中国农业大学有机循环研究院(苏州) 苏州 215100

摘要 垃圾分类政策实施后厨余垃圾的分出量与日俱增, 现有资源化处理利用设施面临巨大挑战. 好氧堆肥技术的处理规模灵活、设施可调整、工艺适配性高, 具有厨余垃圾就地资源化利用的应用潜力, 深入剖析厨余垃圾好氧堆肥存在的问题和解决措施对未来实现其“高效、高品质、低污染”资源化利用具有重要意义. 系统综述好氧堆肥处理厨余垃圾的基本原理和面临的关键性问题, 深入剖析添加微生物菌剂和调节环境参数(自由空域、含水率、颗粒粒径、通风量等)两类方法的优缺点和改进方向. 总结得出两类方法都是通过提高功能性微生物的活性来加快发酵速率并实现污染气体的减排, 而利用土著功能性微生物能够避免菌剂添加失灵、种群间竞争等问题, 并指出环境参数调节应重点关注物料比表面积和孔隙度的平衡, 提高氧气的利用率以增强功能性微生物的活性, 进而获取最佳的厨余垃圾好氧堆肥工艺参数, 为反应器的设计以及现有工程的改造升级提供参数支撑. 未来厨余垃圾好氧堆肥技术的工艺优化应是多方面的有机结合, 通过多学科交叉和高效技术结合实现对功能性微生物的改造, 构建智能化、数字化的厨余垃圾好氧堆肥过程, 降低处理成本. (图4 表1 参81)

关键词 好氧堆肥; 厨余垃圾; 微生物菌剂; 环境参数; 工艺优化

Review of aerobic composting technology and optimization strategy of food waste

QIAO Rulu^{1,2}, WANG Linxiao¹, SUN Yuxin^{1,2}, LI Guoxue¹, CHANG Ruixue^{1,2}, LI Ji^{1,2} & LI Yanming^{1,2}✉

¹ College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

² Organic Recycling Research Institute (Suzhou) of China Agricultural University, Suzhou 215100, China

Abstract The implementation of a garbage-sorting policy resulted in an explosion of food waste in the community, which made the existing facilities for treating waste face great challenges. Aerobic composting technology has the advantages of a flexible treatment scale, adjustable facilities, and high process adaptability and has the potential for local resource utilization of food waste. In-depth analysis of the existing problems and solutions to food waste composting is of great significance for realizing “high efficiency, high quality, and low pollution” in the future. In this study, the basic principles and key problems of aerobic composting of food waste were systematically reviewed, and the advantages and disadvantages and improvement directions of adding microbial agents and regulating environmental parameters (free airspace, water content, particle size, and ventilation volume) were analyzed. Both methods accelerated the fermentation rate and reduced gas pollution by improving the activity of functional microorganisms. The use of indigenous functional microorganisms can avoid the problems of microbial additive failure and inter-population competition. Environmental parameter adjustment should focus on the balance of the specific surface area and porosity of materials, to improve the utilization rate of oxygen to enhance the activity of functional microorganisms. Based on these technologies, the best process parameters for food waste composting can be obtained to support the design of reactors and upgrade existing projects. In summary, future process optimization of food waste composting should be a combination of several aspects. The transformation of functional microorganisms may be realized through a combination of high-efficiency technology and multi-disciplinary crossing to build intelligent and digital aerobic composting processes for food waste and reduce processing costs.

Keywords aerobic composting; food waste; microorganism inoculant; environmental parameter; process optimization

收稿日期 Received: 2023-01-31 接受日期 Accepted: 2023-05-19

北京市设施蔬菜创新团队项目(BAIC01-2023)、“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC1901002)和中国农业大学教授工作站2021050项目(202105510310477)资助 Supported by the Beijing Facility Vegetable Innovation Team Project (BAIC01-2023), National Key R&D Program of China (2018YFC1901002), and Supervisor Workstation Project of China Agricultural University 20210505 (202105510310477)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: liym@cau.edu.cn)

厨余垃圾指易腐烂的、含丰富有机质的生活垃圾,包括家庭厨余垃圾、餐厨垃圾和其他厨余垃圾等,是生活垃圾的重要组成部分^[1]。随着我国经济的高速发展和人民生活水平的不断提高,厨余垃圾产生量日益增加,尤其在2019年大力实施垃圾分类政策之后,厨余垃圾的分出量急剧增加。以北京市为例,垃圾分类政策实施仅半年,北京市厨余垃圾的总体分出量就达到了5 803 t/d,家庭厨余的分出量达3 946 t/d,同比增长11.7倍。厨余垃圾易腐烂变质且含有寄生虫卵、病原菌等有害物质,但也包含了大量的有机质及碳、氮、磷等营养物质,这意味着厨余垃圾是固废的同时,也具备了极大的资源化潜力^[2]。面对急剧增长的厨余垃圾产量,分散式厨余垃圾的处理处置问题将成为城市固废处置的重点和难点之一。

目前厨余垃圾的处理处置方法主要包括卫生填埋、焚烧、好氧堆肥、厌氧发酵等方式^[3-4]。其中卫生填埋虽操作简单、成本低廉,但占用大量土地且不能实现厨余垃圾的资源化利用^[3]。焚烧法虽然可以迅速实现废弃物的减量化,但某些厨余垃圾热值较低,需辅助燃料,处理成本较高,同时焚烧还会产生二次污染,而且该方式也没有实现资源的有效利用^[5]。厌氧消化技术虽能够实现能源回收,但所需设备复杂、工程耗资大耗时长^[6],难以快速投入使用来满足与日俱增的厨余垃圾产生量。好氧堆肥操作简便、经济可行性高,可就近就地实现分散式厨余垃圾的资源化利用,发酵产物可作为有机肥料或土壤改良剂应用于社区内实现资源的循环利用^[7-8],这对于保护生态环境、促进生态农业可持续发展、缓解我国日益紧张的资源与环境问题都有十分重要的意义。

然而,目前好氧堆肥技术处理周期较长、产品品质较低、温室气体及臭气排放等问题严重限制了其在社区层面的推广与应用^[9]。基于此,本文以厨余堆肥为核心,系统总结国内外通过参数优化、外源添加剂以及反应器装置等措施来缩短厨余堆肥的发酵周期、减排污染气体和提升产品品质等方面的研究进展,以期获取适宜的工艺参数体系来提高堆肥处理能力和减少污染气体的排放,并对厨余垃圾堆肥技术的发展前景进行展望。

1 厨余垃圾好氧堆肥瓶颈问题

1.1 好氧堆肥工程数量少、发酵周期长,处理能力不足

好氧堆肥技术是处理厨余垃圾重要的无害化、减量化和资源化方法之一,但由于存在不足,没有得到大规模的市场化应用与推广。如图1所示,随着可持续发展理念深入人心以及技术的改进,堆肥处理厂的数量及处理能力都有所增加,但面对1.25亿t/a的厨余垃圾产量,现有处理能力仅占产生量的1/3,难以满足处理需求^[10]。为进一步提高厨余垃圾的资源化处理能力,国家发展改革委、住房城乡建设部发布了《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》,提出到2025年底,全国城市生活垃圾资源化利用率达到60%左右。厨余垃圾是生活垃圾重要的组成部分,从发布的数据可以看

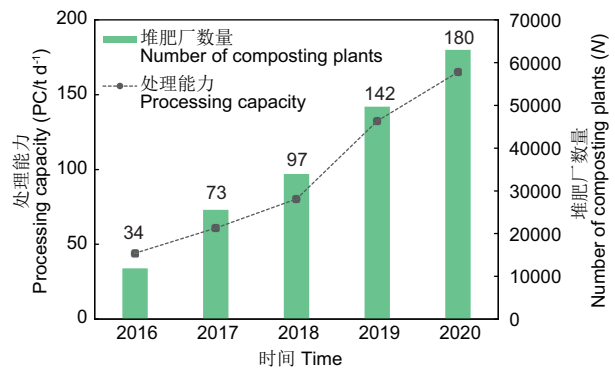


图1 近5年全国堆肥处理厂数量及处理能力变化。

Fig. 1 Changes in number and capacity of the composting plants in recent 5 years.

出我国厨余垃圾资源化处理需求与处理能力之间还存在着较大的空缺。

若要提高好氧堆肥技术的处理能力,就要缩短其在生产单位质量有机肥的耗时,发酵周期越短处理能力就越高,反之越低。目前厨余垃圾好氧堆肥发酵周期在数十天到数月不等,也有些报道称好氧堆肥发酵周期可缩短在几天内,但其堆肥产品的质量不能保证。表1列举了国内外部分研究人员采用好氧堆肥技术处理厨余垃圾所需的发酵周期。从表中数据可以看出厨余垃圾好氧堆肥反应周期一般持续30 d左右,为了适应市场规律,在保证堆肥产品质量的前提下缩短发酵周期是提高好氧堆肥技术的处理效率的重要举措。

1.2 厨余垃圾好氧堆肥污染气体排放严重

好氧堆肥过程主要是通过微生物对其中的有机物及营养物质进行降解转化,过程中会同时存在厌氧环境和好氧环境,这种环境的分布取决于有机物所处的空间结构和位置。好氧堆肥堆体内部空间的氧气含量要低于堆体表面,大颗粒物或颗粒物内部的氧气含量要低于颗粒物外表面,此外堆体含水率高的地方含氧量也较低,通风作为向堆体提供氧气的主要途径,亦是影响氧气含量的关键因素,若在堆体内局部形成厌氧区域就易生成污染气体^[7]。

堆肥过程产生的常见的污染气体约有40余种,其中的温室气体主要有CO₂、N₂O和CH₄等,恶臭气体主要有NH₃、H₂S、CS₂等,其排放转化过程如图2所示^[16]。污染气体的产排会损失碳氮养分,降低堆肥品质,更重要的是会污染环境,影响到堆肥设施周边居民的身体健康,这也是限制堆肥工艺推广的重要因素^[17]。如加拿大某堆肥厂曾因臭气问题被投诉近1 400次,直至停工;我国桂林市某堆肥厂也曾因臭味问题遭投诉后关厂停业,技术升级改造后才重新投入使用^[18]。

1.2.1 温室气体产生机理 在“双碳”的背景下,堆肥过程温室气体的减排无疑是科研人员研究的重点,尤其是对CH₄和N₂O的减排研究。据研究,一分子CH₄造成的温室效应是一分子CO₂的28-36倍,一分子N₂O造成的温室效应是一分子CO₂的296倍^[19]。堆肥过程中,CO₂主要产生于堆体中微生物的呼

表1 厨余垃圾好氧堆肥周期

Table 1 Aerobic composting cycle of food waste

序号 Number	堆肥物料 Compost material	反应器、堆体尺寸 Reactor and reactor size	堆肥时间 Compost time (t/d)	参考文献 Reference
1	厨余垃圾+树叶 Food waste + tree leaves	50 L	49	[11]
2	厨余垃圾 Food waste	200 L	50	[12]
3	厨余垃圾+锯末 Food waste + sawdust	1 m × 1 m × 1 m	35	[13]
4	厨余垃圾+园林绿化垃圾 Food waste + landscaping garbage	0.75 m × 0.45 m × 0.2 m	80	[14]
5	厨余垃圾 Food waste	3 m × 3 m × 1.2 m	31	[15]

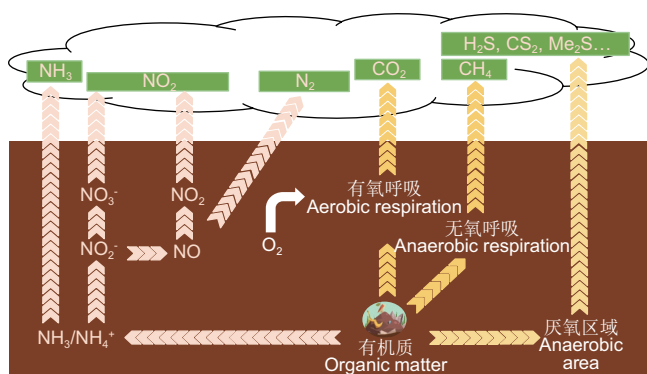


图2 厨余垃圾好氧堆肥过程中主要污染气体排放转化过程(根据文献[16]制作)。

Fig. 2 The main pollution gas emission and transformation process in aerobic composting of food waste (Based on Ref [16]).

吸作用和有机物的矿化过程, CH_4 和 N_2O 的产生主要是由于堆体中孔隙率分布不均匀, 氧气扩散距离有限, 易造成堆体存在大量局部厌氧或兼性厌氧区域, 促进了产甲烷菌和反硝化菌的生长繁殖^[20-22]。

好氧堆肥是微生物在有氧条件下降解有机质, 代谢产生 CO_2 、 H_2O 和释放热量的过程^[23]。堆肥初期, 厨余垃圾中的可溶性糖类、有机酸、淀粉等易降解的有机质先被微生物利用, 微生物快速扩繁, 产生 CO_2 并释放出能量, 促使堆体进入高温期。 CO_2 的排放也主要集中在堆肥的升温期和高温期, 相关研究表明该时期 CO_2 的排放量占全过程的78.5%-86.2%, 进入降温腐熟期后, 随着易降解有机质的减少, CO_2 排放量相对较少且排放速率也较为稳定^[24-25]。有机废弃物是短期碳循环的一部分, 经过堆肥分解产生的 CO_2 被普遍看作是生物排放, 一般不计入温室气体排放中, 且该过程 CO_2 产生的温室效应远小于 CH_4 和 N_2O , 因此在堆肥过程中大多数情况不考虑其对环境产生的影响^[26]。

堆肥过程 CH_4 的产生主要经过水解、产氢产乙酸和产甲烷3个过程。堆体内的含碳有机物先被厌氧或兼性厌氧微生物分解成有机酸, 在产氢产乙酸菌群作用下将产生的有机酸分解为乙酸、氢和二氧化碳, 产甲烷菌再通过消耗氢将含碳物质转变为 CH_4 ^[27]。产甲烷菌也主要活跃于堆体内部的厌氧区域, 在该环境下代谢生成 CH_4 。因此, 厨余垃圾好氧堆肥高温阶段 CH_4 会集中排放, 主要就是因为该阶段 O_2 大量消耗, 导致堆体中产生了大量厌氧区域^[28]。 N_2O 的产生为堆肥过程中硝化作用和反硝化作用共同完成, 与堆体中氧气扩散有直接联系, 也由于堆体内各区域氧气浓度的不同, 硝化作用和反硝化作用同时存在。在厌氧条件下, 堆肥物料中的 NO_x^- 经过反硝化途径产生 N_2O , 相关研究表明 N_2O 的产生主要是通过反硝化作用^[29]。杨帆等在堆肥中添加膨松剂来提高堆体孔隙率, 减少局部厌氧的发生, 结果表明可累计减少42.2%的 N_2O 排放量^[30]。因此, 今后 CH_4 、 N_2O 的减排机理研究应同时关注堆体结构以及颗粒的粒径、孔隙结构和通风供氧等, 避免局部厌氧的发生。

1.2.2 恶臭气体产生机理 好氧堆肥是在微生物的作用下将有机物通过矿质化及腐殖化过程转化为安全、稳定的腐殖质。但在腐殖化过程中微生物会对蛋白质、氨基酸进行脱羧作用和脱氨作用, 该过程会伴随着大量恶臭气体的产生。已有研究表明, 厨余垃圾堆肥过程中会产生大量的 NH_3 、 H_2S 、 CS_2 、硫醚、硫醇等恶臭气体, 其中 NH_3 和 H_2S 是排放浓度最高的臭气^[31]。

NH_3 主要来自含氮有机物(蛋白质、多肽等)的降解, 这些物质在微生物介导下水解为氨基酸、氨基糖等小分子含氮

物质, 再经微生物酶的作用进行脱氨基转化为 NH_4^+ , NH_4^+ 通过水解作用转化为 NH_3 ^[32]。好氧发酵过程中 NH_3 的排放主要受pH及堆体温度的影响, 但在其他研究中发现堆体孔隙率也会影响到 NH_3 的排放^[33]。

H_2S 通常被认为是堆肥过程中最主要的强致臭物质, 其主要产生的途径有两种, 一种是在硫酸盐还原菌(SRB)的作用下将堆体中的硫酸盐或亚硫酸盐还原成 H_2S ; 另一种生成途径是堆体中的含硫有机物在厌氧环境中由硫酸盐还原菌发挥主导作用降解生成 H_2S , 生成的 H_2S 会溶于水, 当水体处于饱和状态并且堆体温度较高时, 多余的 H_2S 将会排放到环境中^[34-35]。同时, 半胱氨酸在厌氧条件下也可以被直接降解为 H_2S ^[36-37]。厌氧环境是影响 H_2S 产生的主要环境因素, 因此在 H_2S 的减排研究中亦要关注堆体结构, 考虑堆体孔隙率以及氧气扩散等因素, 避免局部厌氧的发生。

2 厨余垃圾堆肥技术的改良

2.1 添加微生物菌剂

好氧堆肥是在人工控制的条件下, 利用微生物降解有机废弃物, 形成稳定的高腐殖化物质的过程, 其主要过程如图3所示。可以看出微生物是好氧堆肥的核心要素之一, 其活性、种类与数量直接影响好氧堆肥过程的进行^[38]。传统堆肥法一般都是直接利用物料中的土著微生物来降解有机物, 但传统堆肥法存在发酵周期长、肥效低且易产生污染气体等问题^[39]。为改善堆肥工艺, 早在20世纪40年代, 美国学者就开始向堆体中接种细菌^[40]。尽管在是否需要好氧堆肥过程中添加微生物菌剂的问题上, 研究人员持有不同观点, 然而大量的实验研究充分确认了微生物菌剂的添加对堆肥具有促进作用。

2.1.1 添加单一功能菌剂 微生物菌剂主要有两方面来源: 一是将原本的堆体作为菌种源, 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, 通过一定技术干预筛选出特定条件下的微生物^[41]。好氧堆肥过程中为了达到某种效果(缩短发酵周期、减少 NH_3 、 H_2S 排放等)往往会向堆体中添加特定的功能菌剂。万文娟等在厨余垃圾堆肥中添加具备油脂降解功能的地衣芽孢杆菌, 结果表明物料的降解效率得到有效提高^[42], 这主要是因为厨余垃圾高油脂的特性, 所以接种该菌剂产生了较好的效果。另外, 考虑到厨余垃圾中含有较难降解的纤维素成分, 研究人员向其中添加纤维素降解菌来加速对纤维素的降解。诸葛诚祥向堆肥中添加筛选得到纤维素降解菌, 结果将发酵周期缩短了6 d^[43]。为减少堆肥中污染气体的排放, 提高堆肥产品的肥效, 大量减少 NH_3 、 H_2S 、 N_2O 和 CH_4 排放的功能菌剂也开始应用。邢伟杰等通过向堆肥中添加芽孢杆菌, 结果表明该菌剂对污染气体的减排效果明显, 其中对 NH_3 和 H_2S 减排率分别达41.16%和39.82%^[44]。但是单一菌剂功能效果毕竟有限, 要想获得更佳的堆肥效果向堆体中添加复合微生物菌剂成为国内外学者研究的重要方向。

2.1.2 添加复合菌剂 复合菌剂一般有两种或两种以上的微生物, 选择适当比例的微生物进行培养, 发挥它们的联合作用, 以达到最佳的应用效果^[45]。为了促进物料快速分解、提高堆肥产品的质量, 在大多数情况下使用的都是复合微生物菌剂。

罗一鸣在堆肥试验中证实添加VT菌剂加速了升温速度^[46], 这与其中芽孢杆菌能够高效地降解纤维素有密不可分^[47]。余增斌等将枯草芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌等按比例制成复合菌剂添加到厨余垃圾中堆肥, 发现该

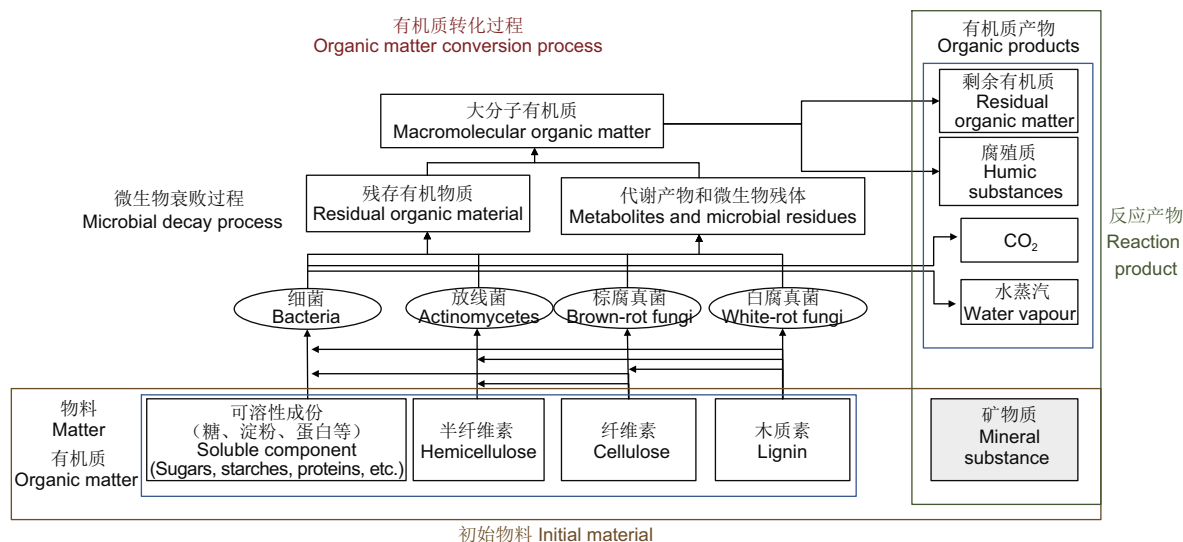


图3 好氧堆肥过程中有机质转化过程。

Fig. 3 Organic matter conversion in aerobic composting.

菌剂不仅能缩短了约40%的堆肥周期,而且提高了厨余垃圾31%的降解率^[48]。Zhao等通过筛选出不同物种优势菌株(8种细菌、1种放线菌和3种真菌)制成复合微生物菌剂YH,在厨余垃圾堆肥过程中添加该菌剂,研究表明该菌剂可将发酵周期缩短1/3且减少了约40%的 NH_3 排放和30%左右的 H_2S 排放量,有效地提高了堆肥产品的质量^[49]。陈文旭等在厨余垃圾堆肥中添加了VT-1000复合微生物菌剂,在第2天添加菌剂的堆体就进入了高温期,有效地提高了发酵速率,另外,相比于对照组该处理减少了16.3%的 CO_2 、19.1%的 CH_4 和49.2%的 N_2O ,温室效应排放当量减排率高达45.42%^[50]。但目前复合菌剂中各菌属发挥的重要作用机理尚不明确,且大多未在体系内定殖并扩繁,而作用的发挥又与物料性质和过程控制参数密切相关,这也造成相同的菌剂在不同的体系中可能会发挥差异性的影响,因此仍有必要根据物料的性质选择各组分功能明确且显著、菌剂功效稳定的菌剂产品。

2.1.3 微生物菌剂应用的局限性 微生物菌剂价格相对昂贵,增加了处理成本,限制了其在堆肥中的广泛应用。另外,有研究发现部分微生物菌剂在接种后存在效果不佳甚至无效果、适用范围窄等问题,其主要原因可能在于堆体环境限制了其活性且不宜微生物的生长繁殖,或者添加的微生物和土著微生物之间存在着竞争^[51]。因此,若想要从根本上解决这些问题,仍需要从微生物的生存环境出发来提高其在堆肥中的存活力和活性,主要包括调节堆肥过程中的温度、含水率、颗粒粒径、通风量等参数,使之有利于堆体中的微生物的生长和繁殖^[52]。

2.2 影响好氧堆肥过程的关键环境参数

堆肥化是微生物转化分解有机物,环境条件是影响堆肥过程的又一核心要素。若堆体的环境不适宜,即使添加微生物菌剂也难以发挥作用,由此可见堆肥环境参数的重要性。厨余垃圾好氧堆肥的本质是微生物利用堆体中的氧气降解有机物,有机物、微生物、氧气是好氧堆肥的三大元素,氧气作为三大元素之一是堆肥过程中最重要的控制因素。当堆体氧气浓度过低时不仅会延长发酵周期,还会因局部厌氧产生大量的污染气体,降低堆肥产品的质量^[53]。堆肥过程中能够影响堆体氧气含量以及其在堆体中扩散的环境参数主要有自由空域、颗粒粒径、含水率、通风速率、通风频率等^[54-55]。

2.2.1 自由空域 自由空域(free air space, FAS)被定义为堆肥中的气体体积与堆料总体积之比,是好氧堆肥的一个重要工艺参数,可作为衡量堆体中氧气扩散情况的重要指标^[56]。堆肥中,自由空域直接影响着堆体中的氧气浓度和微生物对厨余垃圾的降解。适宜的FAS可以保持较适宜的供氧状况,且有利于好氧微生物利用氧气,减少局部厌氧情况的发生,提高发酵速率、缩短堆肥周期和减少污染气体的排放等^[57-58]。SEVIK等堆肥试验发现当堆体FAS为37%时,物料的降解率最高,有效地缩短了堆肥发酵周期,提高了处理能力^[59]。徐志程在厨余垃圾堆肥时设置了高(65%)、中(55%)和低(45%)3个水平的FAS,结果表明55%水平下的FAS更有利于温室气体及臭气的协同减排以及物料的腐熟^[19],这可能是堆体在该水平自由空域下更有利于氧气扩散导致的。研究表明最佳的FAS范围为30%-55%,但该数值受很多因素的影响,其中与堆体的含水率和物料的粒径联系最为密切,通风量对其也有一定的影响^[60-61]。

2.2.2 含水率 微生物生长和代谢需要以水作为介质,水还参与其生化反应。同时,含水率的高低还会影响到氧气在堆体中的扩散,所以堆肥过程中含水率对发酵速率和污染气体排放有着重要的影响^[62]。研究表明当含水率太高时,堆体中的氧气因难以扩散会造成大量局部厌氧的情况;但含水率低于30%时,却由于水分的缺失,反应过程会完全停止^[63]。Yeh等在厨余垃圾堆肥过程中设置了6个梯度(42%、55%、61%、66%、70%和78%)的含水率,其中含水率在42%时堆体升温速度最慢,可能是缺水条件下微生物活性受到了抑制;含水率在78%时升温亦较慢,可能是含水率太高影响堆体中微生物对氧气的利用^[64]。李丹阳等在堆肥试验中发现含水率为75%时发酵反应不能正常进行,堆体中微生物对氧气的利用率也较低,且释放了大量厌氧环境才会产生的 CH_4 ,而初始含水率为65%时,堆料具有足够的自由空域,更有利于氧气的扩散,堆体的发酵速率较快;相比含水率为75%, CH_4 的减排率达到了52.01%, N_2O 排率达到了53.04%^[65]。因此,含水率不仅会影响微生物自身的生长繁殖,还会影响堆体孔隙率和微生物对氧气的利用,进一步影响堆肥周期和污染气体的产生。

2.2.3 颗粒粒径 堆肥物料的分解主要发生在颗粒的表面或接近颗粒表面的地方,由于氧气可以扩散进入包裹颗粒的

水膜,所以这些地方有足够的氧气保证有氧代谢的需求^[58]。在一定条件下,有机物的比表面积与降解速率成正比,因此颗粒大小对好氧堆肥发酵速率和堆肥周期的长短都有着重要影响^[66]。另外,物料粒径的大小不仅影响着发酵周期还影响着堆体的孔隙结构,过大的粒径易使气体扩散会导致热量散失,粒径过小时会造成局部厌氧,这些都不利于堆肥过程的进行^[67]。已有研究表明物料最佳的堆肥粒径为5-50 mm,但由于物料性质的差异,没有统一的标准^[68-69]。郑卫聪等将物料碎至50 mm,结果在第2天时堆体温度就达到60℃以上的高温阶段,在高温阶段维持15 d左右^[70]。付丽丽等采用不同粒径(< 5、5-10、> 10 mm)物料堆肥,结果显示小颗粒和中颗粒组由于具有较大的比表面积,发酵速率较快,但其因堆体结构较差,产生了大量的NH₃;相比之下中等颗粒玉米芯具有更适宜的堆积密度和通风条件,具有较好的发酵速率和最佳NH₃减排效果^[33]。因此,堆肥前在对物料进行粉碎时既要考虑到堆体适宜的孔隙率,粒径过大或者过小都会对发酵周期以及污染气体的排放产生影响。

2.2.4 通风速率 通风是物料与氧气间建立联系的重要环节,通风量更是堆肥工艺中极为重要的参数之一,其决定了堆体中微生物可利用氧气的含量^[71]。通风量过小,堆体孔隙率较低,堆体会产生大量厌氧区域,导致好氧微生物活性低,延长堆肥周期,加剧臭气排放;通风量过高,易导致堆体升温慢、水分损失严重,延长发酵周期。一般认为,堆体中的氧浓度保持在8%-18%比较适宜^[72]。何明浩等^[73]在厨余堆肥过程中设置了高(0.6 L/min)、中(0.4 L/min)和低(0.2 L/min)3个水平的通风速率进行试验,结果表明高通风速率虽能加快堆体氧浓度恢复速率和减少堆体局部厌氧的发生,但不利于堆体高温的维持;通风速率为0.4 L/min时不仅可以维持较高的堆温还可以减少温室气体的排放^[73]。徐志程采用了不同通风速率(0.24、0.36和0.48 L kg⁻¹ min⁻¹)进行厨余垃圾堆肥试验,研究表明通风速率的提高,减少了堆体中的厌氧区域,从而减少了N₂O、H₂S的排放,其中H₂S的减排量达到了19%以上;其中0.36 L kg⁻¹ min⁻¹更有利于缩短堆肥周期和污染气体的协同减排^[19]。因此,堆肥过程中设置通风速率时要考虑到堆体需氧量的同时不能过度通风,不利于堆体快速升温。

2.2.5 通风频率 好氧堆肥不仅要有合适的通风量,而且还要有合适的通风频率^[74]。通过观察持续通风试验发现,堆体中各个时期微生物对氧气有着不同的需求量。其中高温期生化反应较为剧烈,氧气的消耗量较多;腐熟期时微生物则消耗较少的氧气。Magalhaes等认为堆体中氧气浓度达到10%以上微生物就可保持最高的活性。研究也表明,合理的通风频率不仅利于堆体升温与缩短发酵周期,而且可减少堆肥过程中污染气体的排放^[75]。因此,选择合适的通风间隔不仅可能减少能耗,还可能达到较好的堆肥效果^[76]。郑玉琪等研究表明通风5 min可以保证堆体中氧气的充分供应,通风结束后,前10 min堆体内氧气供应充足,微生物活动较高,氧气浓度会呈快速下降趋势^[77]。但该研究仅提供参考,具体的通风频率应根据通风速率以及堆体所处的发酵时期来确定。

2.3 厨余垃圾堆肥过程供氧策略优化

好氧堆肥工艺中氧气能否在堆体中较好地扩散以及被微生物充分利用受到多方面的影响。在一定范围内,好氧堆肥各个参数之间的影响如图4所示。因此在调整工艺参数时,需要寻求物料比表面积和物料空隙度的平衡,使堆肥物料保持较好的自然供氧量,以维持堆肥中较高的好氧微生物活性,对缩短发酵周期、减少污染气体排放和提高堆肥质量有着重要意义。

氧气是好氧堆肥中的必需元素,更是对好氧堆肥是否成

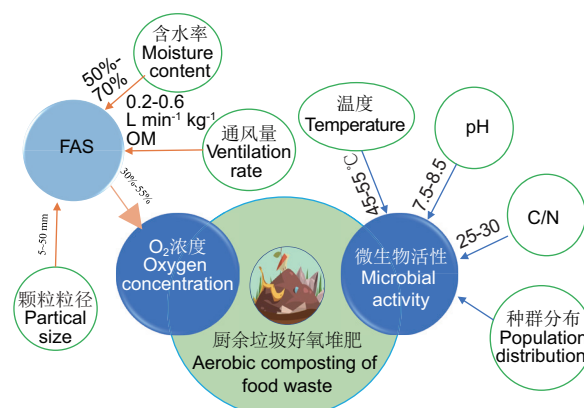


图4 好氧堆肥过程中参数间的相互关系。OM: 有机质。

Fig. 4 Relationship between the parameters in aerobic composting process. OM: Organic matter.

功起着决定性作用。大多数工艺参数实现对好氧堆肥的影响也主要是通过直接或者间接影响堆体中的氧气浓度来实现。其次,微生物能否较好地利用堆体中的氧气是影响好氧堆肥过程的关键。因此,针对目前厨余垃圾堆肥发酵周期长、易产生污染气体且肥效低等问题,可以从提高堆体中氧浓度方面入手,对好氧堆肥工艺进行优化。

随着研究的深入,研究人员发现简单的持续通风方式并不契合堆肥微生物的生长规律,通风速率供给与微生物呼吸作用之间不存在连续的线性关系,通风速率存在1个流量阈值,超过该阈值后氧气含量的增加并不会影响微生物的活性反而还会不利于堆体升温^[78]。Qasim等在通风速率分别为0.3、0.6、0.9 L kg⁻¹ min⁻¹情况下进行堆肥,发现通风量大的情况下并不能提高发酵速率,反而低通风速率下微生物活性较高,升温较好^[79]。由此可见,可以根据堆肥微生物的生长与生活特性对通风策略进行调整优化,不但可以优化厨余垃圾堆肥工艺,还可以达到节省能源的目的。

此外,随着人工智能的飞速发展,使得将其应用为好氧堆肥领域也成为一种可能。丁国超等通过数据搭建一套适用于好氧堆肥反应器内部环境的通风量在线预测系统,该系统可准确预测堆肥过程中所需的通风供氧量并通过控通风阀使堆肥过程中有充足的氧气能加快反应进程,避免因通风量不够而产生局部厌氧的情况^[80]。这将对实际应用中通风速率的调节有着较好的指导作用。

近年来,单片机与传感器技术迅速发展,在堆肥领域运用得也越来越多。Anand等研发了一种由PLC控制的高效曝气堆肥系统,该系统通过测定堆体中的温度来负反馈调节堆肥的通风量,增强堆肥不同阶段微生物的活性,使堆肥进程更加快速、稳定^[81]。该系统能耗低,可全由太阳能进行供电,大大降低了堆肥的成本。另外,传感器技术的应用使好氧堆肥向自动化、智能化方向发展,在加快了好氧堆肥发酵速率的同时,也节省了大量的成本。

3 结论与展望

“双碳”背景下,好氧堆肥技术的发展方向必将是以清洁生产为目标的高效、绿色、可持续的处理技术。厨余垃圾好氧堆肥过程中发酵进程缓慢和污染气体排放量的最主要原因是堆体环境限制了微生物对氧气的高效利用。外源菌剂的添加时要考虑外源微生物对堆肥环境适应性较强且不会与土著微生物之间存在竞争等问题以避免应用效果受限。环境参数优化要重点关注物料比表面积和孔隙度的平衡,提高氧气的

利用率以增强功能性微生物的活性。因此,基于生物学技术的发展和现代工艺技术的进步,功能性菌剂的研发和工艺参数的优化应是厨余垃圾好氧堆肥技术今后研究的重点与方向。

微生物菌剂具有缩短发酵周期、减少污染气体排放和提高肥效等多方面功效,可有时难以适应堆体环境参数而发挥不出作用,随着基因工程的发展,在未来研究中若能利用基因工程技术构建起对堆体环境普适性强、保碳保氮能力强且扩培成本低的菌剂库,那将进一步强化微生物菌剂的作用。另外,若能探明菌剂中各个菌株的功能作用,按照厨余垃圾中各

成分的降解顺序,分阶段添加功能菌剂并实现定殖并扩繁,那将大大节约处理成本,提高厨余垃圾的处理效率。

厨余垃圾好氧堆肥过程中,影响堆体中氧气扩散的因素有很多,但关于这些因素之间相互作用的机理研究相对较少。很多学者都采用单因素确定最佳工艺条件,但此方法无法说明变量的相互作用效应。未来,若能将数学建模以及数值模拟等方法运用在堆肥领域,将使得各参数之间的作用机理以及对堆体中氧气扩散的影响更加清晰准确,为实现厨余垃圾高效堆肥处理提供更明确的理论依据。

参考文献 [References]

- 1 张子龙. 厨余垃圾资源化利用技术分析[J]. 广东化工, 2022, **49** (14): 120-121+144 [Zhang ZL. Analysis of food waste resource utilization technology [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2022, **49** (14): 120-121+144]
- 2 薛映. 厨余垃圾堆肥过程含氮物质变化及微生物群落特征研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 6-7 [Xue Y. Study on the changes of nitrogenous compounds and microbial community characteristics during food waste composting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 6-7]
- 3 常燕青, 蔡静晶, 常中龙, 于强, 李月中, 吴海锁. 谈国内外典型城市垃圾分类现状[J]. 山西建筑, 2021, **47** (13): 1-3 [Chang YQ, Cai JJ, Chang ZL, Yu Q, Li ZY, Wu HS. Discussion on the status quo of typical urban garbage classification [J]. *Shanxi Arch*, 2021, **47** (13): 1-3]
- 4 靳晨曦, 孙士强, 盛维杰, 杨殿海, 马亚东, 贺文智, 李光明. 中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择[J]. 中国环境科学, 2022, **42** (3): 1240-1251 [Jin CX, Sun SQ, Sheng WJ, Yang DH, Ma YD, He WZ, Li GM. Food waste treatment technology and resource solution options in China [J]. *Chin Environ Sci*, 2022, **42** (3): 1240-1251]
- 5 黄帮群. 厨余垃圾处理方法和建议[J]. 中国环保产业, 2020 (8): 36-38 [Huang BQ. Kitchen waste treatment methods and relevant suggestions [J]. *Chin Environ Prot Ind*, 2020 (8): 36-38]
- 6 谭业琴. 国内餐厨垃圾提油技术综述[J]. 中国资源综合利用, 2022, **40** (10): 96-100 [Tan YQ. Review on oil extraction technology of domestic kitchen waste [J]. *Chin Resour Compr Util*, 2022, **40** (10): 96-100]
- 7 江洋, 鞠美庭, 李维尊, 刘金鹏, 刘乐. 餐厨垃圾好氧堆肥技术市场化推广与应用的关键问题分析[J]. 生态经济, 2017, **33** (4): 96-101+106 [Jiang Y, Ju MT, Li WZ, Liu JP, Liu L. Analysis on the key problems of the marketization and application of aerobic composting technology for kitchen waste [J]. *Ecol Econ*, 2017, **33** (4): 96-101+106]
- 8 王旭彤, 张蕊, 颜蓓蓓, 陈冠益, 侯立安, 旦增. 西藏自治区污泥特性与资源化利用潜力分析[J]. 环境工程学报, 2019, **13** (11): 2753-2769 [Wang XT, Zhang R, Yan BB, Chen GY, Hou LA, Dan Z. Analysis on characteristics and resource utilization potential of sewage sludge in Tibet [J]. *Chin J Environ Eng*, 2019, **13** (11): 2753-2769]
- 9 Zhu YL, Zheng GD, Gao D, Chen, TB, Wu FK, Niu MJ, Zou KH. Odor composition analysis and odor indicator selection during sewage sludge composting [J]. *J Air Wast Manage Assoc*, 2016, **66** (9): 930-940
- 10 Wu X, Wang J, Shen L, Wu X, Amanze C, Zeng W. Effect of bamboo sphere amendment on the organic matter decomposition and humification of food waste composting [J]. *Waste Manag*, 2021, **133**: 19-27
- 11 Waqas M, Nizami AS, Aburiazaiza AS, Barakat MA, Ismail IMI, Rashid MI. Optimization of food waste compost with the use of biochar [J]. *J Environ Manag*, 2018, **216**: 70-81
- 12 Wang Y, Tang Y, Yuan Z. Improving food waste composting efficiency with mature compost addition [J]. *Bioresour Technol*, 2022, **349**: 126830
- 13 Pandey PK, Cao W, Biswas S, Vaddella V. A new closed loop heating system for composting of green and food wastes [J]. *J Cleaner Prod*, 2016, **133**: 1252-1259
- 14 Zhang S, Wang J, Chen X, Gui J, Sun Y, Wu D. Industrial-scale food waste composting: effects of aeration frequencies on oxygen consumption, enzymatic activities and bacterial community succession [J]. *Bioresour Technol*, 2021, **320**: 124357
- 15 Zang B, Li S, Michel F. Control of dimethyl sulfide and dimethyl disulfide odors during pig manure composting using nitrogen amendment [J]. *Bioresour Technol*, 2017, **224**: 419-427
- 16 Yang F, Li Y, Han Y, Qian WT, Li GX, Luo WH. Performance of mature compost to control gaseous emissions in kitchen waste composting [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **657**: 262-269
- 17 卫志强, 马华敏. 桂林市上窑污泥处置项目改造工程研究与分析[J]. 中国资源综合利用, 2017, **35** (12): 59-61 [Wei Z Q, Ma H M. Research and analysis of guilin kiln sludge disposal project rehabilitation project [J]. *Chin Resour Compr Util*, 2017, **35** (12): 59-61]
- 18 Xu ZC, Qi CR, Zhang LX, Ma Y, Li JG, Li GX, Luo WH. Bacterial dynamics and functions for gaseous emissions and humification in response to aeration intensities during kitchen waste composting [J]. *Bioresour technol*, 2021, **337**: 125369
- 19 徐志程. 基于污染气体减排的厨余垃圾堆肥过程调控及微生物驱动机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2022: 4-5 [Xu ZC. Regulation of gaseous emissions and its microbially driven mechanisms during kitchen waste composting [D]. Beijing: China Agricultural University, 2022: 4-5]
- 20 Nasini L, De Luca G, Ricci A, Ortolani F, Caselli A, Massaccesi L, Regni L, Gigliotti G, Proietti P. Gas emissions during olive mill waste composting under static pile conditions [J]. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2016, **107**: 70-76
- 21 Ge JY, Huang GQ, Li JB, Han LJ. Particle-scale visualization of the evolution of methanogens and methanotrophs and its correlation with CH₄ emissions during manure aerobic composting [J]. *Waste Manag*, 2018, **78**: 135-143
- 22 石建新. 禽畜粪便堆肥温室气体排放及其控制研究进展[J]. 农业与技术, 2023, **43** (3): 30-33 [Shi JX. Research progress on greenhouse gas emissions and control of livestock manure composting [J]. *Agric Technol*, 2023, **43** (3): 30-33]
- 23 曹玉博, 张陆, 王选, 马林. 畜禽废弃物堆肥氨气与温室气体协同减排研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39** (4): 923-932 [Cao YB, Zhang L, Wang X, Ma L. ergistic mitigation of ammonia and greenhouse gas emissions during livestock waste composting [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2020, **39** (4): 923-932]
- 24 朱新梦, 董雯怡, 王洪媛, 严昌荣, 刘宏斌, 刘恩科. 牛粪堆肥方式对温室气体和氨气排放的影响[J]. 农业工程学报, 2017, **33** (10): 258-264 [Zhu XM, Dong WY, Wang HY, Yan CR, Liu HB, Liu EK. Ects of cattle manure composting methods on greenhouse gas and ammonia emissions [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2017, **33** (10): 258-264]
- 25 王义祥, 高凌飞, 辛思洁, 叶菁, 李艳春, 翁伯琦. 菌渣-发酵床废弃垫料堆肥中温室气体排放及与微生物的关系[J]. 环境科学学报, 2017,

- 37 (12): 4662-4669 [Wang YX, Gao LF, Xin SJ, Ye J, Li YC, Weng BQ. Greenhouse gas emission and its correlation with microbial in composting of waste packing and fungus chaff [J]. *Acta Sci Circumst*, 2017, **37** (12): 4662-4669]
- 26 Brown S, Kruger C, Subler S. Greenhouse gas balance for composting operations [J]. *J Environ Qual*, 2008, **37** (4): 1396-1410.
- 27 魏晶晶. 生物炭添加对牛粪堆肥过程中养分固持和有害气体减排的影响[D]. 西宁: 青海师范大学, 2021: 5-6 [Wei J J. Effects of biochar addition on nutrient retention and emission reduction of harmful gases during cow manure composting [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2022: 5-6]
- 28 缪颖程. 过磷酸钙添加对猪粪好氧堆肥CH₄和N₂O排放的影响及其微生物学机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020: 9-10 [Miu Y C. Superphosphate effects on CH₄ and N₂O emissions from pig manure composting and the microbial mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020: 9-10]
- 29 Maeda K, Toyoda S, Philippot L, Hattori S, Nakajima K, Ito Y, Yoshida N. Relative contribution of nirK-and nirS-bacterial denitrifiers as well as fungal denitrifiers to nitrous oxide production from dairy manure compost [J]. *Environ Sci Technol*, 2017, **51** (24): 14083-14091
- 30 杨帆, 欧阳喜辉, 李国学, 罗文海, 杨青原. 膨松剂对厨余垃圾堆肥CH₄、N₂O和NH₃排放的影响[J]. 农业工程学报, 2013, **29** (18): 226-233 [Yang F, Ou Yang XH, Li GX, Luo WH, Yang QY. Effect of bulking agent on CH₄, N₂O and NH₃ emissions in kitchenwaste composting [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, **29** (18): 226-233]
- 31 李赞, 袁京, 李国学, 张地方, 王国英, 张邦喜, 宫小燕. 辅料添加对厨余垃圾快速堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37** (3): 1031-1039 [Li Y, Yuan J, Li GX, Zhang DF, Wang GY, Zhang BX, Gong XY. Use of additive to control odors and promote maturity of municipal kitchen waste during aerobic composting [J]. *Chin Environ Sci*, 2017, **37** (3): 1031-1039]
- 32 Wang S, Zeng Y. Ammonia emission mitigation in food waste composting: a review [J]. *Bioresour technol*, 2018, **248**: 13-19.
- 33 付丽丽, 阚培赢, 刘娟, 范影, 姜彬慧, 米文杰, 张颜. 颗粒粒径对玉米芯混合鸡粪堆肥氨气减排的影响[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2019, **39** (5): 36-39 [Fu LL, Zhang N, Liu J, Fan Y, Jiang BH, Mi WJ, Zhang Y. Removal of H₂S by non-thermal plasma combined with corncob adsorption [J]. *J Liaoning Shihua Univ*, 2019, **39** (5): 36-39]
- 34 Zang B, Li S, Michel JF, Li GX, Luo Y, Zhang DF, Li YY. Effects of mix ratio, moisture content and aeration rate on sulfur odor emissions during pig manure composting [J]. *Waste Manage*, 2016, **56**: 498-505
- 35 Zang B, Li S, Michel F C, Li GX, Zhang DF, Li YY. Control of dimethyl sulfide and dimethyl disulfide odors during pig manure composting using nitrogen amendment [J]. *Bioresour technol*, 2017, **224**: 419-427
- 36 王站付, 邱韩英, 陆利民, 徐四新, 杨晓磊, 林天杰, 朱恩. 餐厨垃圾堆肥产品施用对水稻产量及土壤环境的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, **48** (23): 93-97 [Wang ZF, Qiu HY, Lu LM, Xu SX, Yang XL, Lin TJ, Zhu E. Influences of application of kitchen waste compost on rice yield and soil environment [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2020, **48** (23): 93-97]
- 37 杨天杰, 张令昕, 顾少华, 潘子豪, 江高飞, 王世梅, 韦中, 徐阳春, 沈其荣. 好氧堆肥高温期灭活病原菌的效果和影响因素研究[J]. 生物技术通报, 2021, **37** (11): 237-247 [Yang TJ, Zhang LX, Gu SH, Pan ZH, Jiang GF, Wang SM, Wei Z, Xu YC, Shen QR. Effects on pathogen inactivation at the thermophilic stage of aerobic composting and its impact factors [J]. *Biotechnol Bull*, 2021, **37** (11): 237-247]
- 38 卢月. 不同调理剂对鹿粪堆肥温室气体排放及氮素转化的影响研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019: 68-69 [Lu Y. Effects of different amendments on greenhouse gas emissions and nitrogen transformation in deer manure composting [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019: 68-69]
- 39 席北斗, 刘鸿亮, 孟伟, 李捍东, 王庆生. 高效复合微生物菌群在垃圾堆肥中的应用[J]. 环境科学, 2001 (5): 122-125 [Xi BD, Liu HL, Meng W, Li HD, Wang QS. Composting process of municipal solid waste with high effective complex microbial community [J]. *Environ Sci*, 2001 (5): 122-125]
- 40 陈世和, 张所明. 城市垃圾堆肥原理与工艺[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990: 7 [Chen SH, Zhang SM. Principle and technology of municipal waste composting [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1990: 7]
- 41 石娟, 周攀, 陈意超, 刘晓风, 李东. 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, Chen Y C, Liu XF, Li D. Isolation and oil degrading characterization of a halotolerant thermophile *Aneurinibacillus thermoaerophilus* H7 [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2021, **27** (1): 214-219]
- 42 万文娟, 张赞彬, 聂志妍, 毛彦佳, 许静, 喻莹. 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, Mao YJ, Xu J, Yu Y. The screening and identification of thermostable decomposition bacteria in kitchen waste and the relative application [J]. *Food Mach*, 2019, **35** (6): 54-58+68]
- 43 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: 80-83 [Zhu GCX. Research on high efficiency degrading microbial inoculum of spent mushroom substrate and its application in composting [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 80-83]
- 44 邢伟杰, 储卫华, 金波, 顾华兵, 蒋一秀, 李尚民, 彭兵, 范建华. 嗜热除臭型发酵菌剂筛选及其对猪粪堆肥发酵中的研究[J]. 农业开发与装备, 2019 (1): 121-122 [Xing WJ, Chu WH, Jin B, Gu HB, Jiang YY, Li SM, Peng B, Fan JH. Screening of thermophilic deodorizing fermentation bacteria and its application to pig manure compost fermentation [J]. *Agric Devel Equip*, 2019 (1): 121-122]
- 45 倪晶霞. 厨余垃圾生物降解菌的筛选及微生物-酶组合降解新方法的研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021: 7-8 [Ni JX. Screening of biodegradation bacteria for kitchen waste and study on new methods of microbial-enzyme combined degradation [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021: 7-8]
- 46 罗一鸣, 张丽丽, 吴迪梅, 张卓毅, 刘佳, 刘京蕊. VT菌剂对规模养猪场粪便高温堆肥腐熟进程的影响[J]. 环境工程, 2015, **33** (S1): 610-614 [Luo YM, Zhang LL, Wu DM, Zhang ZY, Liu J, Liu JR. Effects of VT microbes on high-temperature composting process of pig manure [J]. *Environ Eng*, 2015, **33** (S1): 610-614]
- 47 杨伟平, 丁雅倩, 马梦柯, 肖琅琅, 陈万光, 张耀文. 动物粪便中纤维素分解菌的分离和鉴定[J]. 家畜生态学报, 2019, **40** (2): 75-79+85 [Yang WP, Ding YQ, Ma MK, Xiao LL, Chen WG, Zhang YW. Isolation and identification of cellulolytic bacteria from animal feces [J]. *J Dom Anim Ecol*, 2019, **40** (2): 75-79+85]
- 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 Ferm Ind*, 2020, **46** (12): 199-205+212]
- 49 Zhao K, Xu R, Zhang Y, Tang H, Zhou C, Cao A, Guo H. Development of a novel compound microbial agent for degradation of kitchen waste [J]. *Braz J Microbiol*, 2017, **48**: 442-450
- 50 陈文旭, 刘逸飞, 蒋思楠, 武泽月, 王睿旗, 李国学, 李彦明, 宫小燕. 微生物菌剂对厨余垃圾堆肥温室气体减排的影响[J]. 农业工程学报, 2022, **38** (23): 181-187 [Chen WX, Liu YF, Jiang SN, W ZY, Wang QQ, Li GX, Li YM, Gong XY. Mitigation effects of microbial agents on greenhouse gas emissions from kitchen waste composting [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2022, **38** (23): 181-187]
- 51 Awasthi MK, Selvam A, Chan MT, Wong JW. Bio-degradation of oily food waste employing thermophilic bacterial strains [J]. *Bioresour Technol*, 2018, **248**: 141-147

- 52 赵彬涵, 孙宪昀, 黄俊, 李少杰. 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, Li SJ. Application and effects of microbial additives in aerobic composting of organic solid wastes: a review [J]. *Micr Chin*, 2021, **48** (1): 223-240]
- 53 车悦驰, 颜蓓蓓, 王旭彤, 陈冠益, 旦增, 孟德安. 污泥堆肥技术及工艺优化研究进展[J]. 环境工程, 2021, **39** (4): 164-173 [Che YC, Yan BB, Wang XT, Chen GY, Dan Z, Meng DA. Research process of technical optimization of sewage sludge composting [J]. *Environ Eng*, 2021, **39** (4): 164-173]
- 54 倪姆娣, 陈志银, 程绍明, 赵素芬. 不同通风量下猪粪好氧堆肥中氧气浓度的变化[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005 (5): 603-607 [Ni MD, Chen ZY, Cheng SM. Variation of oxygen concentration in pig-manure composting piles under different aeration flowrates[J]. *J Zhejiang University (Agric Life Sci)*, 2005 (5): 603-607]
- 55 王永江, 黄光群, 韩鲁佳. 自由空域对猪粪麦秸好氧堆肥的影响实验分析[J]. 农业机械学报, 2011, **42** (6): 122-126 [Wang YJ, Huang GQ, Han LJ. Effects analysis of free airspace to pig slurry wheat straw aerobic composting in laboratory reactor [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2011, **42** (6): 122-126]
- 56 Annan K. The quiet revolution [J]. *Global Gover*, 1998, 4: 123
- 57 Haug RT. The practical handbook of compost engineering [M]. London: Routledge, 2018
- 58 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: 105-106 [Chang RX. Research on ultra high temperature compost process and nitrogen loss during vegetable waste composting [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 105-106]
- 59 Sevik F, Tosun I, Ekinic K. The effect of FAS and C/N ratios on co-composting of sewage sludge, dairy manure and tomato stalks [J]. *Waste Manag*, 2018, **80**: 450-456
- 60 陈同斌, 罗维, 高定, 郑国砥. 混合堆肥过程中自由空域(FAS)的层次效应及动态变化[J]. 环境科学, 2004 (6): 150-153 [Chen TB, Luo W, Gao D, Zheng GD. Stratification of free air space and its dynamics in the process of co-composting [J]. *Environ Sci*, 2004 (6): 150-153]
- 61 Zhou L, Jiang EC, Li BS. Effect of wood vinegar on seed germination and water implantation of corn [J]. *J N Agric Univ*, 2009, **16** (02): 6-11
- 62 卢昱初, 孙衣楠, 刘甜甜, 耿明君, 宗世纪, 张瀚, 谷志攀. 厨余垃圾堆肥技术及研究进展[J]. 山东化工, 2021, **50** (14): 62-64 [Lu YR, Sun YN, Liu TT, Geng MJ, Zong SJ, Zhang H, Gu ZP. Technology and research progress of kitchen waste composting [J]. *Shandong Chem Ind*, 2021, **50** (14): 62-64]
- 63 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2011 [Li J, Peng SP. Practical manual for composting engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011]
- 64 Yeh CK, Lin C, Shen HC, Cheruiyot NK, Camarillo ME, Wang CL. Optimizing food waste composting parameters and evaluating heat generation [J]. *Appl Sci*, 2020, **10** (7): 2284
- 65 李丹阳, 马若男, 元传仁, 袁京, 李国学, 孙少泽, 刘燕. 含水率对羊粪堆肥腐熟度及污染气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, **36** (20): 254-262 [Li DY, Ma RN, Qi CR, Yuan J, Li GX, Su SZ, Liu Y. Effects of moisture content on maturity and pollution gas emissions during sheep manure composting [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2020, **36** (20): 254-262]
- 66 蓝俞静. 餐厨垃圾生物降解工艺影响因素与过程分析研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2013: 74-75 [Lan YJ. Research on the influences and process of food waste microbial degradation technology [D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2013: 74-75]
- 67 Onwosi CO, Igbokwe VC, Odimba JN, Eke IE, Nwankwoala MO, Iroh IN, Ezeogu LI. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects [J]. *J Environ Manag*, 2017, **190**: 140-157
- 68 梅娟. 园林废弃物好氧堆肥处理技术的研究进展[J]. 化工时刊, 2014, **28** (12): 29-32 [Mei J. Research progress of composting treatment technologies of garden waste [J]. *Chem Ind Times*, 2014, **28** (12): 29-32]
- 69 Reyes-Torres M, Oviedo-Ocaña ER, Dominguez I, Komilis D, Sánchez A. A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies [J]. *Waste Manag*, 2018, **77**: 486-499
- 70 郑卫聪, 王俊, 王晓明, 陈晓蓉, 毛小云. 不同堆置措施对园林有机废弃物堆肥有机物降解的影响[J]. 华南农业大学学报, 2012, **33** (1): 28-32 [Zheng WC, Wang J, Wang XM, Cheng XR. Effects of different disposing measures on the organics degradation during the organic garden waste composting [J]. *J S Chin Agric University*, 2012, **33** (1): 28-32]
- 71 Guo R, Li G, Jiang T, Schuchardt F, Chen T, Zhao Y, Shen Y. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost [J]. *Bioresour Technol*, 2012, **112**: 171-178
- 72 张红玉. 通风量对厨余垃圾堆肥腐熟度和氨气排放的影响[J]. 环境工程, 2013, **31**(S1): 483-486 [Zhang HY. Effects of an aeration rate on maturity and ammonia emission during kitchen waste composting [J]. *Environ Eng*, 2013, **31** (S1): 483-486]
- 73 何明浩, 徐超, 李兵, 胡甜甜, 石志华. 通风量对餐厨垃圾堆肥中氮素转化及N₂O释放的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2021, **34** (6): 114-120 [He MH, Xu C, Li B, Hu TT, Shi ZH. The influence of ventilation rate on nitrogen conversion and N₂O releasing in composting of kitchen waste [J]. *J Ningbo University (NSEE)*, 2021, **34** (6): 114-120]
- 74 马闯, 李明峰, 赵继红, 张宏忠, 魏明宝, 叶长明. 通风策略对废弃物好氧堆肥的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2013, **41** (11): 350-353 [Ma C, Li MF, Zhao HJ, Wei MB. A review of the effect of ventilation strategies on aerobic composting of waste [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2013, **41** (11): 350-353]
- 75 Magalhaes AMT, Shea PJ, Jawson MD, Wicklund EA, Nelson DW. Practical simulation of composting in the laboratory [J]. *Waste Manage Res*, 1993, **11** (2): 143-154
- 76 闫博. 物料投配与通风策略对中药渣好氧堆肥过程的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 69-70 [Yan B. Material mixing and ventilation strategy on aerobic composting of Chinese medicine herbal residues [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 69-70]
- 77 郑玉琪, 陈同斌, 高定, 黄启飞. 猪粪快速好氧堆肥过程中氧浓度的变化[J]. 生态学报, 2002 (5): 747-751 [Zheng YQ, Chen TB, Gao D, Huang QF. Oxygen variation in aerobic composting process of pig manure [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002 (5): 747-751]
- 78 Mejías L, Komilis D, Gea T, Sánchez A. The effect of airflow rates and aeration mode on the respiration activity of four organic wastes: Implications on the composting process [J]. *Waste Manag*, 2017, **65**: 22-28
- 79 Qasim W, Moon BE, Okyere FG, Khan F, Nafees M, Kim HT. Influence of aeration rate and reactor shape on the composting of poultry manure and sawdust [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2019, **69** (5): 633-645
- 80 丁国超, 徐艳婷, 胡军, 施雪玲. 好氧堆肥曝气供氧量预测系统的设计[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2021, **33** (6): 100-105+113 [Ding GC, Xu YT, Hu J, Shi XL. Software design of oxygen supply prediction system for aerobic composting [J]. *J HLJ Bayi Agric Univ*, 2021, **33** (6): 100-105+113]
- 81 Anand M, Anjali TB, Akhilesh KB, Satheesh JK. Composting of food waste: a novel approach [M]//Kathi S, Devipriya S, Thamaraiselvi K. Cost Effective Technologies for Solid Waste and Wastewater Treatment. Amsterdam: Elsevier, 2022: 87-99