



好氧堆肥去除畜禽粪便病原体的研究进展

李明章, 李彦明, 王珏, 李国学, 陈清, 王志刚, 常瑞雪

引用本文:

李明章, 李彦明, 王珏, 李国学, 陈清, 王志刚, 常瑞雪. 好氧堆肥去除畜禽粪便病原体的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 864–872.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0383>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

畜禽粪便堆肥过程中雌激素降解特征

韩进, 程鹏飞, 周贤, 王建, 凌婉婷

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 679–686 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0346>

蚯蚓堆肥对畜禽粪污耐药基因的影响研究进展

牟美睿, 杨凤霞, 田雪力, 韩秉君, 李仲瀚, 张克强

农业资源与环境学报. 2022, 39(6): 1089–1098 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0669>

我国蔬菜废弃物资源化利用技术分析及展望

刘佳豪, 姚昕, 翟胜, 孙树臣, 杨伟鹏, 魏蓉, 陈锦秀, 丁新惠, 田晓飞

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 636–644 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0267>

猪粪及其生物堆肥对小麦幼苗生长和土壤细菌群落结构的影响

邹文萱, 罗慧, 赵境怡, 岳中辉, 刘四义, 梁爱珍, 王新军, 束长龙, 韩丽丽, 沈菊培

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 36–44 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0696>

不同过磷酸钙添加量对蔬菜废弃物堆肥的影响

杨岩, 孙钦平, 李妮, 刘本生, 邹国元, 李吉进, 江丽华, 刘月仙

农业资源与环境学报. 2017, 34(1): 66–72 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0218>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李明章, 李彦明, 王珏, 等. 好氧堆肥去除畜禽粪便病原体的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 864–872.

LI M Z, LI Y M, WANG J, et al. Research progress on aerobic composting for removing pathogens from livestock manure[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4): 864–872.

好氧堆肥去除畜禽粪便病原体的研究进展

李明章¹, 李彦明^{1,2}, 王珏¹, 李国学¹, 陈清¹, 王志刚³, 常瑞雪^{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), 江苏 苏州 215100; 3. 北京大北农科技集团股份有限公司, 北京 102609)

摘要:近年来,非洲猪瘟、甲型H1N1流感、禽流感 and 新冠肺炎等疫情频发,其中甲型H1N1流感和禽流感等人畜共患病的病原体引发的疫情传播逐渐受到固体废弃物处理利用领域的关注。携带大量病原体的畜禽粪便若不能合理循环利用,会对人体健康和生态安全造成威胁。高温好氧堆肥是一种处理固体废弃物的常用方法,堆肥过程的高温阶段能够有效降低病原体数量,但仍有部分堆肥产品因病原体残留而存在安全风险。本文综述了堆肥过程对病原体的去除效果及其影响因素,探讨了堆肥产品中病原体残留的可能原因和存在的风险,并基于此提出了可以提高堆肥病原体去除效果的工艺优化方向,这将最大程度降低堆肥产品的安全风险,确保畜禽粪便堆肥产品的安全高效使用。

关键词:好氧堆肥; 畜禽粪便; 病原菌; 影响因素; 传播风险

中图分类号:S873;X713 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2023)04-0864-09 doi: 10.13254/j.jare.2022.0383

Research progress on aerobic composting for removing pathogens from livestock manure

LI Mingzhang¹, LI Yanming^{1,2}, WANG Jue¹, LI Guoxue¹, CHEN Qing¹, WANG Zhigang³, CHANG Ruixue^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Organic Recycling Research Institute (Suzhou) of China Agricultural University, Suzhou 215100, China; 3. Beijing Da Bei Nong Technology Group Co., Ltd., Beijing 102609, China)

Abstract: In recent years, outbreaks, such as that of African swine fever, influenza A (H1N1), avian influenza, and COVID-19, have occurred frequently. These epidemics, caused by the transmission of zoonotic pathogens such as H1N1 and avian influenza, have gradually attracted the attention of experts in the field of solid waste treatment and utilization. If livestock or poultry manure cannot be reasonably recycled, it may pose a threat to human health and ecological security because of the presence of large number of pathogens. High-temperature aerobic composting is a method of treating solid waste, during which the thermophilic stage can effectively reduce the number of pathogens. However, compost products with residual pathogens may pose safety risks after their application in soil. This review summarizes the effect of the composting process on pathogens and their consequent impacts, and discusses the possible causes and risks of residual pathogens in compost. Based on this, an optimization direction is proposed to improve the pathogen removal efficiency in composting, which would minimize the safety risks and ensure the safe and efficient use of livestock and poultry manure composting products.

Keywords: aerobic composting; livestock manure; pathogen; influencing factor; transmission risk

我国是畜禽养殖大国,畜禽养殖业在供应优质肉蛋奶的同时也产生大量的畜禽粪污,年产生量约38亿t^[1]。畜禽粪污中含有较多的细菌、病毒、寄生虫等

致病性病原体,若处置不当会造成人、畜传染病的蔓延^[2]。堆肥技术是实现畜禽粪便无害化处理、资源化利用、衔接种养循环模式的重要手段^[3-4]。虽然高温

收稿日期:2022-06-17 录用日期:2022-09-05

作者简介:李明章(1999—),男,山东枣庄人,硕士研究生,研究方向为固体废弃物无害化处理。E-mail:limingzhang2021@163.com

*通信作者:常瑞雪 E-mail:changrx@cau.edu.cn

基金项目:研究生产学研合作协同育人项目(39012004);“十三五”国家重点研发计划(2018YFC1901002)

Project supported: Research on Cooperative Education Project of Production Science(39012004); National Key R & D Program of China(2018YFC1901002)

好氧堆肥可有效去除粪便中病原体^[5],但其产物仍存在可能诱发环境与公共安全的风险。快速高效是目前堆肥技术的发展趋势,即使处理过程符合相关无害化卫生标准要求,但堆肥能否彻底去除粪便中的病原体仍有待商榷。Ingram^[6]对美国三个不同时期市售的105份堆肥产品进行了病原体检测,6%的堆肥样品检出沙门氏菌,有13%的样品大肠杆菌呈阳性且超过堆肥无害化标准,沙门氏菌污染的食物会导致人体腹泻、发烧^[7],大肠杆菌O157:H7的传播也会导致人患病甚至死亡^[8]。据此推测,这些堆肥施入土壤可能会造成病原菌沿食物链的传播,并产生较大的环境风险^[6,9-10]。

因此,本文系统总结了现有研究中好氧堆肥过程对畜禽粪便中病原体的去除效果,并通过对比分析探讨了堆肥过程中可能影响病原体去除效果的主要因素和可能造成病原体残留的原因,提出了解决这些问题的建议,以期优化堆肥处理工艺、保障堆肥产品的生物安全提供新的思路。

1 畜禽粪便中常见病原体种类及安全标准

1.1 病原体种类

畜禽粪便中的病原体种类主要有细菌、病毒、原生动物和蛔虫卵,如沙门氏菌、大肠杆菌、弯曲杆菌、产气荚膜梭菌、李斯特菌、布鲁氏菌、炭疽芽孢杆菌、分枝杆菌和弓形虫等,均可在粪便中检出。这些病原体中,沙门氏菌、大肠杆菌和弯曲杆菌等病原菌在粪便中大量存在,同时也是食源性疾病暴发的主要病原菌^[11-12]。非洲猪瘟病毒、禽流感病毒和口蹄疫病毒都具有急性、高度传染性以及高发病率的特征,但是易感动物类别不同。非洲猪瘟只会感染猪,口蹄疫有70多种易感动物,而禽流感病毒能感染人类和动物^[13]。不过由于病毒热敏性较强,因此堆肥的高温阶段能够灭

活大多数病毒。畜禽粪便中病原体的致病途径主要是接触粪便或被粪便污染的水源和食物等,其含量、危害以及灭活温度和时间详见表1。

1.2 检测方法

不同检测方法的灵敏度、准确性以及测试时间不同,只有了解各种方法的优缺点,才能在实际生产中快速准确地判断堆肥产品的安全性。病原体的检测方法主要有以下几类:传统检测法、分子生物学方法、免疫学检测技术和电化学/生物传感器。其原理和特点如表2所示,病毒类病原体的检测方法除了没有传统检测法外,其他均与细菌类病原体的检测方法一致。传统检测法成本较低、检测结果可靠,也是国际标准化组织认可的检测方法,因此科学研究中常用传统检测法检测病原体数量。新型检测方法在检测限和测定效率方面得到了很大的优化,但受制于设备复杂、特异性差等关键限制因素,仍需要不断验证和进一步创新,目前主流的新型检测方法以分子生物学方法(PCR技术和基因芯片技术等)居多。

1.3 安全标准

由于病毒可培养性和检测成本的限制,大多数病原体控制标准只规定了少数指示菌的控制指标^[28]。堆肥中病原体的安全控制标准如表3所示。国内外堆肥的无害化通常以高温作为灭活病原体的主要手段,在微生物评价方面,我国的标准更为严格,不仅要求沙门氏菌不得检出,而且对蛔虫卵的死亡率也有规定。

2 好氧堆肥对畜禽粪便病原体的去除效果及影响因素

好氧堆肥是指在有氧条件下,通过一系列好氧微生物的生物氧化作用,使有机物分解矿化并腐化转变为稳定的腐殖质的生物化学过程^[34]。在升温期,随着厌氧过程挥发性脂肪酸的积累,堆体的pH下降,当

表1 畜禽粪便中常见病原体及其对人的危害

Table 1 Common pathogens in animal manure and its harm to human

病原菌种类 Pathogen	猪粪中含量 Content in pig manure/ (CFU·g ⁻¹)	灭活温度与时间 Death temperature and time	革兰氏染色结果 Gram staining result	危害 Harm	参考文献 Reference
大肠杆菌	4.0×10 ² ~5.8×10 ⁵	55℃、1h内死亡;60℃、15~20min死亡	G ⁻	腹痛、腹泻、呕吐	[14-15]
沙门氏菌	1.0×10 ² ~5.0×10 ⁴	56℃、1h内死亡;60℃、15~20min死亡	G ⁻	伤寒、败血症、肠胃炎	[14-15]
弯曲杆菌	1.0×10 ² ~5.2×10 ⁴	55℃时以每分钟一个数量级的速度减少	G ⁻	腹泻、肠胃炎	[16]
肠球菌	1.8×10 ⁴ ~1.7×10 ⁶	温度大于45℃时生长受到抑制	G ⁺	腹泻、腹痛	[14-15]
非洲猪瘟病毒		55℃、30min或60℃、10min死亡		对猪致病率高,没有疫苗	[17]
口蹄疫病毒		60℃、48h后减少6个数量级		呕吐、发烧、腹痛	[18]
禽流感病毒		35℃以上超过36h死亡		鼻塞、病毒性肺炎	[19]

表2 病原体常用检测方法分析
Table 2 Analysis of detection method for common pathogens

类别 Category	检测方法 Detect method	原理 Principle	优点与缺点 Advantage and disadvantage	参考文献 Reference
传统检测方法	多管发酵法	大肠菌群能发酵乳糖产酸产气	优点:实验的要求和成本低 缺点:准确性易受其他因素的干扰	[20]
	滤膜法	滤膜过滤器过滤水样,使细菌截留在滤膜上,然后将滤膜放在适当的培养基上进行培养,大肠菌群可直接在膜上生长,从而可直接计数	优点:费用较低、原理简单,利于推广 缺点:检测时间相对较长、步骤繁琐、干扰因素多,不适于大量样品的分析	[21]
	MPN/平板计数法	将待测活菌稀释为单个的细胞,将单个的细胞培养成肉眼可看的单个菌落,再根据稀释倍数推测菌数	优点:成本低,适用范围广 缺点:必须经历增菌、纯化、生化鉴定等步骤,费时且复杂,无法满足现场快速检测的需要	[21]
新型检测方法	常规PCR	在DNA聚合酶的作用下,进一步特异性扩增核酸模板链	优点:可快速进行微量检测,灵敏度高,具有良好的特异性 缺点:易产生假阳性	[22-23]
	定量PCR	利用荧光信号累积对PCR过程进行定量分析	优点:高特异性、高灵敏度,所需时间短,不易污染 缺点:存在局限性	[22-23]
	多重PCR	在反应体系中同时加入多种特异性引物,扩增出多种DNA片段	优点:高效性、系统性以及经济实用性 缺点:反应体系容易产生交叉或抑制反应,特异性不强	[24]
	基因芯片技术	把探针固定于芯片表面之后,与样品杂交,然后通过检测杂交信号对样品进行分析	优点:可用于多种病原体检测,并且污染较少、灵敏度高 缺点:成本高	[25-26]
	酶联免疫吸附法	采用抗原抗体杂交技术,依赖病原体细胞与特定捕获抗体相互作用	优点:检测精度高、准确性强、速度快等 缺点:对实验人员的专业技术具有较高的要求	[20]
	生物传感器技术	制备或选择出可与待测物特异性结合的适配体作为识别原件,然后选择一类纳米粒子作为信号传导元件,形成适配体生物传感器	优点:高效、特异、结构小巧、经济实用 缺点:生物固化膜不够稳定,不能同时监测多种病原体	[27]

表3 国内外堆肥无害化标准
Table 3 Domestic and foreign standards of harmlessness composting

国家(地区) Country(Region)	温度 Temperature	粪大肠菌群数 Number of fecal coliform	沙门氏菌 <i>Salmonella</i>	其他 Other	参考文献 Reference
中国	≥50 °C, 10 d; 60 °C, 5 d	≤100 个·g ⁻¹	不得检出	蛔虫卵死亡率≥95%	[29]
英国	≥65 °C, 7 d	≤1 000 MPN·g ⁻¹	25 g 未检出	不含发芽的种子与植物体	[30]
欧盟	≥65 °C, 5 d	≤1 000 MPN·g ⁻¹	25 g 未检出	不含发芽的种子与植物体	[31]
	≥60 °C, 7 d	≤1 000 MPN·g ⁻¹	25 g 未检出	不含发芽的种子与植物体	[31]
	≥55 °C, 14 d	≤1 000 MPN·g ⁻¹	25 g 未检出	不含发芽的种子与植物体	[31]
意大利	≥55 °C, 3 d	≤1 000 MPN·g ⁻¹	25 g 未检出		[31]
德国	≥55 °C, 14 d; ≥65 °C(封闭式工厂 60 °C), 7 d	≤1 000 MPN·g ⁻¹	25 g 未检出		[32]
美国	通风静态堆肥或反应器堆肥: >55 °C, 3 d。条垛式堆肥: >55 °C, 14 d; >40 °C, 5 d 且 >55 °C, 4 h	A类: <1 000 MPN·g ⁻¹ B类: <2×10 ⁶ MPN·g ⁻¹	<3 MPN·g ⁻¹		[33]
丹麦	≥55 °C, 14 d	<100 CFU·g ⁻¹	不得检出		[31]

注:MPN指最大或然数,CFU指菌落形成单位。

Note:MPN refers to the maximum probable number, and CFU refers to colony forming unit.

pH 低于 5 时,短链脂肪酸的浓度越高,对病原体甚至所有堆体微生物的毒害作用就越强。当温度逐渐上升至 50 °C 时,堆体进入高温阶段。由于不同微生物生长的最适温度不同,堆肥不同阶段占主导地位的微生物出现明显的更替^[35]。与此同时,堆肥中大部分的病原体和寄生虫因高温被杀死^[36],在高温期,氨排放也会随着温度升高而增强,氨气透过细胞膜在细胞内发生解离使 pH 升高,对病原体造成毒害。在降温及

腐熟期,存活的土著微生物(真菌和放线菌)占主导地位,土著微生物的丰度和活性取决于堆肥原料的类型,土著微生物可能产生抗微生物物质或与病原体竞争营养物质从而抑制病原体的生长。因此,堆肥过程的灭菌效果受到各种堆肥因素和环境因素的影响,不同阶段影响病原体数量的因素^[37-39]如图 1 所示。

Wong 等^[40]分析了猪粪、石灰和粉煤灰混合堆肥过程中病原体数量的变化,发现 8 d 后物料中的大肠

杆菌、沙门氏菌以及粪链球菌被全部去除,其中添加石灰4%、粉煤灰50%的处理所需发酵周期更短。而当牛粪与秸秆以体积比3:1的方式充分混合时,仅需堆肥7 d大肠杆菌和沙门氏菌的数量就降到检测限以下^[41]。在鸡粪和稻壳生物炭以干质量比4:1的比例混合进行堆肥时也可以得出类似的结果,但发酵周期需要两周^[42]。尽管这些畜禽粪便堆肥施入土壤后传播风险的概率大大降低,但处理周期的差异性使得工厂化堆肥并不能从这些结果中获取有价值的周期参考。

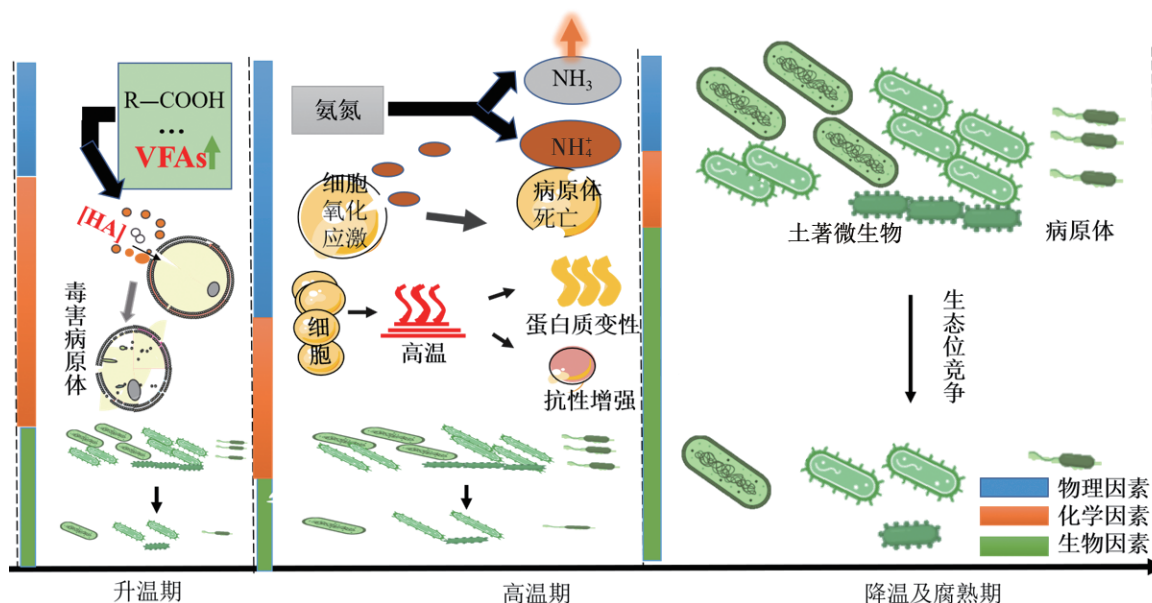
不仅如此,一些研究通过试验证实,在经过一定周期的堆肥后,物料中仍有病原体残存。由于冬季气温较低,条垛堆肥表面很容易检测到大肠杆菌、沙门氏菌等病原体^[9]。高温阶段病原菌产生热休克蛋白,可增强病原体的耐热性,Hutchison等^[43]发现55℃的堆肥温度下部分沙门氏菌仍未失活。造成以上差异性结果的原因是多方面的,涉及温度、挥发性脂肪酸、氨气、碳氮比、pH以及含水率等因素对病原菌灭活效果的影响,而且在堆肥过程中或腐熟期环境条件变得有利时,残留的病原体有可能重新生长^[44]。

2.1 高温及持续时间

一直以来,温度都被认为是堆肥中导致病原体灭活的主导因素。每种病原体都有其最适的生长温度,高温对大多数病原体的灭活具有显著作用。大肠杆菌O157:H7的最适温度为37℃^[45],有研究发现,牛的

尸体、牛粪与秸秆混合堆肥(温度大于40℃)时,7 d内大肠杆菌便完全失活^[46];在进行牛粪和干木屑堆肥(温度大于45℃)时,大肠杆菌在72 h后达到检测限(100 CFU·g⁻¹)以下^[47];在猪粪、锯末和秸秆堆肥(温度达到55℃)中,72 h后未检测到大肠杆菌^[48]。一般而言,温度越高,灭活病原体的时间越短,灭活效果越好。因此也有学者尝试构建70℃以上超高温体系以保证废弃物的无害化^[49]。然而,在商售有机肥成品中检测发现,个别肥料仍含有病原体^[6]。其中关键原因之一是开放式堆肥系统内部温度分布不均,堆体表面温度较低,病原体不能被完全灭活。此外,适应干燥环境的沙门氏菌可以在高温下存活,这是因为微生物暴露在高于其正常生长范围的温度时,就会发生热休克。堆肥过程中温度逐渐升高,从环境温度到升温阶段,然后到高温阶段,这可能引起热休克或刺激伴随的遗传和生理热休克反应^[8]。特别是在堆肥的延长升温阶段,一些病原体可能会在达到致死温度之前适应亚致死的高温,从而能够存活,并且增强了对恶劣环境的抗性^[50]。

诸多研究分析了堆肥过程中原料及堆肥参数的差异对指示生物(粪大肠菌群数、蛔虫卵等)灭活的潜在影响,发现一些抗性增强的病原体仍存在于堆体之中,不能完全消除安全风险^[43,51-52]。事实上,只有在实验室条件下才能模拟单一影响因素(温度)对病原体灭活效果的差异,而在不同反应器中进行的堆肥存在



VFAs:挥发性脂肪酸;[HA]:未解离分子。

VFAs: Volatile fatty acids; [HA]: Undissolved molecules.

图1 堆肥不同阶段影响病原体灭活的主要因素^[37-39]

Figure 1 The main factors affecting the inactivation of pathogens at different composting stages^[37-39]

堆肥物料、工艺参数以及环境条件的差异,使堆肥过程中的土著微生物丰度、pH和氨排放等影响因素干扰到温度对病原体灭活的效果。

2.2 挥发性脂肪酸

在堆肥的初始阶段,pH一般会先降低再升高,pH的降低是由挥发性脂肪酸引起的^[53],即同一体系内由pH差异导致的病原菌去除效果的不同与挥发性脂肪酸的产生与分解有关。作为微生物分解过程的中间体,挥发性脂肪酸分为短链脂肪酸(如乙酸等)和长链脂肪酸(如苯甲酸等),主要在堆肥的升温阶段由厌氧菌和兼性厌氧菌产生,属于厌氧过程的微生物产物;也有一些由大肠杆菌或者乳酸菌在有氧气条件下氧化有机物产生。短链脂肪酸在pH<5时能对所有微生物(包括病原体)产生毒性,其灭活机理主要是有机酸的未解离分子大量进入微生物细胞,导致细胞内酸化,降低微生物的活性。因此,在既定pH下,酸度系数(p*K_a*)较高的酸具有更多的未解离分子,毒性更大,所以常见短链脂肪酸毒性作用的强弱顺序为乙酸>丙酸>乳酸^[42]。在堆肥过程中,当挥发性脂肪酸形成和积累时,如果氧气被重新供应,这些挥发性脂肪酸就会成为碳和能源,也就是说,产酸时适当控制堆肥过程便不会影响堆肥腐熟^[54]。在餐厨垃圾堆肥的高温和酸性条件下,嗜热微生物比嗜温微生物更能耐受有机酸的抑制作用,而有机酸对嗜温微生物的抑制作用却会影响堆肥进程的正常进行^[42]。通过比较不同碳氮比的牛粪堆肥中病原体灭活效果发现,低碳氮比(20:1)条件下与高碳氮比(40:1)条件下累积热暴露量无显著差异,但低碳氮比的堆肥挥发性脂肪酸的产量(14.5 mg·g⁻¹)更多,且灭活速度更快,这在一定程度上为挥发性脂肪酸协同温度共同作用实现病原体的高效灭活提供了参考^[55]。目前,厌氧发酵过程中发挥去除病原菌作用的挥发性脂肪酸浓度与好氧堆肥升温期的数量级(8 mg·g⁻¹)类似^[39,56],据此推测好氧堆肥的挥发性脂肪酸也可能发挥相同的作用,但能否通过改变堆肥参数调整挥发性脂肪酸的产生量进而辅助去除病原体,还有待进一步探究。

2.3 氨气

氨气可以透过细胞膜、病毒包膜等进入细胞,进而影响核糖核酸使病原体失活。堆肥过程中的氨气主要是在高温阶段通过有机质的矿化作用和蛋白质氨化作用产生。温度、堆肥方式、含水率、pH等都会影响氨挥发^[57-58]。与粪便病原体初始数量相比,仅做干燥或者通氨气24 h处理使粪便病原体数量减少不足

2个数量级,但干燥后暴露于氨气24 h后大肠杆菌O157:H7数量减少了4个数量级,鼠伤寒沙门氏菌减少3个数量级,单核细胞增多性李斯特菌减少2个数量级,当氨气处理时间从24 h延长至72 h时,氨气浓度接近4 mg·g⁻¹,鼠伤寒沙门氏菌和大肠杆菌O157:H7减少近8个数量级,单核细胞增多性李斯特菌也减少了4个数量级以上^[59]。这说明氨气是导致病原体灭活的重要因素,并且干燥和氨气对病原体的灭活有协同作用。堆肥高温期产生的氨气累积排放量可以达到4 mg·g⁻¹^[60],尽管高浓度氨气有利于病原体的灭活,但是也会对一般微生物种群的生存造成负面影响,因此,仅通过氨气灭活病原体的方法存在一定的局限性。

原料类型和比例不同,其在堆肥过程中对病原体的影响也不同。合适的碳氮比和含水率会促进堆体升温,从而对病原体的灭活产生影响;不同的辅料类型对堆体结构的调节能力具有差异,会形成不同的土著微生物群落和升温速率,进而影响病原体的灭活效果。

2.4 碳氮比

碳氮比是影响堆肥中病原体灭活效果的重要参数之一,它会通过影响温度、挥发性脂肪酸和氨的产生来影响病原体的灭活效果。较低的碳氮比容易导致较高的氨挥发损失,所以大肠杆菌O157:H7和肠炎沙门氏菌等革兰氏阴性菌在低碳氮比条件下更容易灭活;而较高的碳氮比则更有利于所有病原体的灭活^[61]。Erickson等^[62]用牛粪、麦秸和棉籽配成碳氮比为20、30和40的堆肥物料,发现其对沙门氏菌的灭活时间分别为2.8、2.9 d和3.6 d,但是不同碳氮比对李斯特氏菌的灭活时间没有显著影响。考虑到现场条件产热更慢,灭活沙门氏菌的时间差异也会变大。在累积产热相似的这三种碳氮比条件下造成灭活沙门氏菌时间差异的原因可能是低碳氮比高温期以前产生了挥发性脂肪酸且pH值较低^[62]。有学者用鸭粪和木屑堆肥配制成32.9和67.5的碳氮比,在低碳氮比的堆肥中,经过12 d的堆肥后总大肠菌群和粪链球菌都已达到检测限以下,而高碳氮比堆肥由于无法达到50℃高温,对病原体的灭活不彻底,在堆肥结束时,总大肠菌群、粪链球菌以及革兰氏阴性菌在高温阶段后的适宜环境条件下会再生长^[63]。由此可见,碳氮比对病原体存活没有较大的直接影响,而是通过影响堆体温度来间接影响病原体生存,合适的碳氮比不但有利于堆肥腐熟,也有助于病原体的灭活和

抑制其再生长。

2.5 pH值

pH值对病原体灭活既有直接影响,也有间接影响。通常,微生物的适宜pH值在一个范围内,过酸或者过碱都不利于其存活,沙门氏菌的适宜pH值为6.5~7.5,在pH值大于9.5时便不会生长^[64]。据报道,添加生石灰可以提高粪便pH值并通过放热反应提高温度,能够有效地消毒和灭活病原体^[65]。有学者在猪粪堆肥中添加不同比例的粉煤灰和石灰,结果发现添加4%石灰混合粉煤灰能有效杀灭病原体,大肠杆菌和沙门氏菌等完全失活,且稳定后不易再生^[66]。此外,pH值的变化还会影响挥发性脂肪酸的毒性和氨气产量的差异,进而影响到病原体的灭活。在牛粪堆肥中比较不同碳氮比对病原体的灭活效果发现,大肠杆菌O157:H7的减少和挥发性脂肪酸的产生与低pH值相关,当pH值<5时,挥发性脂肪酸的毒性增强,从而更快地灭活病原体^[55]。同时,较高的pH值还会使氨排放量增加,高浓度的氨也有助于病原体的灭活^[67-68]。

2.6 含水率

水分是运输微生物生命活动所需营养物质的重要载体,也是堆肥中微生物生长和存活的限制因素。堆肥原料中有机质含量越高,其最适的初始含水率也越高,一般50.0%~60.0%的初始含水率较为合适^[69]。有研究表明,温度也会影响含水率,进而影响病原体的灭活^[70]。当温度较高时,水分蒸发快,含水率就会降低。在含水率较高时,土著微生物的抑制作用非常重要,合适的含水率有助于本土菌群的生长,其与病原体争夺营养物质从而抑制了病原体的繁殖。*S. arizonae* 3924(沙门氏菌)接种到含水率为10%的腐熟堆肥产品中,接种量为 1.2×10^5 MPN·g⁻¹,堆肥2 d后病原体数量降为 8.4×10^2 MPN·g⁻¹;而接种到含水率为40%和80%的腐熟堆肥产品时病原体数量降低较慢,分别由 9.2×10^4 、 1.2×10^5 MPN·g⁻¹降至 1.5×10^3 、 2.0×10^4 MPN·g⁻¹; *E. coli* 84(大肠杆菌)在不同含水率的腐熟堆肥产品中的灭活情况与沙门氏菌相似^[71]。这些结果证实了土著微生物与病原体的拮抗作用。由此可见,对腐熟的堆肥进行干燥处理有助于抑制病原体的繁殖,从而降低病原体的数量。

2.7 辅料类型

堆肥时,含氮量高的原料(如粪便等)一般配以含碳量高的辅料来构建合适的碳氮比。不同的辅料因其本身结构和性质的不同,也会对病原体产生不同的

灭活效果。比如粪便堆肥中常用秸秆作为辅料,秸秆可以降低含水量并且有助于堆肥腐熟,进而促进高温的产生,增强对病原体的灭活效果。木质素降解过程中产生的酚类等抑菌物质也会促进病原体的灭活^[72]。生物炭能提供更多的自由空隙,增强微生物活性,促进高温和热分解,从而加速病原体的灭活^[73]。此外,堆肥最终的碳源组成决定了腐熟期的微生物数量,预先放入牛粪堆肥中的腐生微生物能够产生不利于病原体存活的抗菌化合物^[74]。

2.8 堆肥方式

目前常用的好氧堆肥技术有很多种,分类也很复杂,按照有无发酵装置可分为开放式堆肥系统和密闭式堆肥系统^[53]。除反应器堆肥外,其他堆肥方式很容易在堆体内部出现温度分布不均匀的状况,导致堆体表面和底部温度相对较低,如静态条垛堆肥的温度表现为中层最高,其次是上层,下层最低。对比堆体不同深度的升温速率发现,堆体内部各层次温度分布产生差异的主要原因是堆体内部氧浓度分布不均匀^[36]。因此,氧浓度分布也是保障开放式堆肥系统顺利升温并实现无害化的重要参数。

3 堆肥中病原体残留的可能原因及对策建议

堆肥过程因其原料复杂性和过程动态性而存在众多影响病原体灭活的因素,病原体也因此产生相应的应激反应进而出现亚致死性损伤,即没有被灭活或者进入非可培养(Viable But Non-Culturable, VBNC)状态。这种非芽孢形成菌抵御不良环境的生存机制,应作为堆肥灭活畜禽粪便病原体的研究重点,主要包括以下三个方面:

(1)热应激:堆肥高温阶段产生的高温能够灭活大多数病原体,但一些病原体在达到致命温度之前会适应亚致死高温,并以此状态存活且继续繁殖,大型堆肥和静态堆肥比小型堆肥和翻堆堆肥更容易受到病原体的污染^[75]。

(2)干燥应激:堆肥高温阶段的蒸发和自热会迅速降低堆肥混合物,特别是堆体表面的水分含量。病原体产生干燥应激后会在相似环境(如土壤、沙子和堆肥表面)中存活更久。

(3)酸应激:病原体在进入小肠或结肠定殖之前会先经受胃部的酸性环境,因此耐酸性对食源性病原体尤其重要。堆肥中产生的少量挥发性脂肪酸可能会使病原体耐酸性增强,这就增加了这些病原体危害人体的可能性。

针对干燥应激现象,建议在堆肥高温期及腐熟期适当补充水分,以维持合适的湿度条件。对于热应激和酸应激现象,鉴于病原体对不同影响因素的敏感性或抗性不同,需要探明单一因素灭活病原体的规律,在此基础上,加强对生物因素(土著微生物的拮抗作用)、物理因素(脱水干燥)和化学因素(挥发性酸、氨氮)等多因素协同灭活作用的研究,为好氧堆肥灭活动物源性病原体提供科学参考。

4 结论

(1)好氧堆肥能够灭活畜禽粪便中的大多数病原体,但是不同的堆肥方式、不同的工艺和环境条件对病原体的灭活效果不尽相同。

(2)好氧堆肥灭活病原体的机制是一个复杂的生物化学过程,许多影响病原体灭活的因素之间能够相互作用,尤其是挥发性脂肪酸和氨氮,在灭活病原体的同时可能会对堆肥进程产生不利影响。

(3)翻堆和补水工艺有助于灭活病原体,但是在既能减少翻堆次数,又能最大程度降低病原体传播风险方面仍缺乏足够的研究来明确灭菌效果的优劣。

因此,需要进一步探明不同工艺参数对病原体的实际灭活效果,提升堆肥的处理效率和安全性,实现高效“促腐灭菌”的双重目标。

参考文献:

- [1] 任丽娟,林敏,董仁杰,等.厌氧消化灭活畜禽粪污中病原菌的研究进展[J].中国沼气,2021,39(6):22-31. REN L J, LIN M, DONG R J, et al. Pathogen inactivation of livestock and poultry manure through anaerobic digestion: a review[J]. *China Biogas*, 2021, 39(6):22-31.
- [2] 张俊亚,隋倩雯,魏源送.畜禽粪污处理处置中危险生物因子赋存与控制研究进展[J].农业环境科学学报,2021,40(11):2342-2354. ZHANG J Y, SUI Q W, WEI Y S, et al. The fate and control of dangerous biological agents (DBAs) during the treatment and disposal of livestock manure: the state of arts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11):2342-2354.
- [3] 吴浩玮,孙小淇,梁博文,等.我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1168-1176. WU H W, SUN X Q, LIANG B W, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6):1168-1176.
- [4] ALEGBELEYE O O, SANT'ANA A S. Manure-borne pathogens as an important source of water contamination: an update on the dynamics of pathogen survival/transport as well as practical risk mitigation strategies[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2020, 227:113524.
- [5] AGGA G E, COUCH M, PAREKH R R, et al. Lagoon, anaerobic digestion, and composting of animal manure treatments impact on tetracycline resistance genes[J]. *Antibiotics*, 2022, 11(3):391.
- [6] INGRAM D T. Assessment of foodborne pathogen survival during production and pre-harvest application of compost and compost tea[D]. Maryland: University of Maryland, 2009.
- [7] DONG Y Y. *Salmonella* outbreak has infected 640 people in 43 states [EB/OL]. (2020-08-10) [2022-06-09]. <https://www.cn-healthcare.com/article/20200810/content-540669.html>.
- [8] HRUDEY S E, PAYMENT P, HUCK P M, et al. A fatal waterborne disease epidemic in Walkerton, Ontario: comparison with other waterborne outbreaks in the developed world[J]. *Water Science and Technology*, 2003, 47(3):7-14.
- [9] SHEPHERD M W, SINGH R, KIM J, et al. Effect of heat-shock treatment on the survival of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* Typhimurium in dairy manure co-composted with vegetable wastes under field conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14):5407-5413.
- [10] LIAO Y T, SUN X C, QUINTELA I A, et al. Discovery of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC)-specific bacteriophages from non-fecal composts using genomic characterization[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10:627.
- [11] CHEN Z, JIANG X. Microbiological safety of chicken litter or chicken litter-based organic fertilizers: a review[J]. *Agriculture*, 2014, 4(1):1-29.
- [12] 张小华,郭钦,马爱军,等.猪粪便中致病性病原菌检测与耐药性分析[J].黑龙江畜牧兽医,2018(23):121-124. ZHANG X H, GUO Q, MA A J, et al. Detection and drug resistance analysis of pathogenic bacteria in pig feces[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2018(23):121-124.
- [13] 马广鹏.我国重大动物疫病流行现状及防控技术进展[J].中国预防兽医学报,2012,34(8):673-676. MA G P. Epidemic situation of major animal diseases in China and progress of prevention and control technology[J]. *Chinese Journal of Preventive Veterinary Medicine*, 2012, 34(8):673-676.
- [14] MASSÉ D, GILBERT Y, TOPP E. Pathogen removal in farm-scale psychrophilic anaerobic digesters processing swine manure[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2):641-646.
- [15] CHRISTY M L, SAMPSON M, EDSON M, et al. An overview of the control of bacterial pathogens in cattle manure[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(9):843.
- [16] 王为,王蓓蕾,胡桂学,等.空肠弯曲菌在环境压力条件下的生存机制和可培养性研究进展[J].肉类研究,2011,25(5):37-39. WANG W, WANG B L, HU G X, et al. Recent advances in research on survival mechanisms and culturability of *Campylobacter jejuni* under stress conditions[J]. *Meat Research*, 2011, 25(5):37-39.
- [17] 常华,花群义,段纲,等.非洲猪瘟的研究进展[J].中国畜牧兽医,2007,34(1):116-118. CHANG H, HUA Q Y, DUAN G, et al. The present advancement on the study of African swine fever virus[J]. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2007, 34(1):116-118.
- [18] GALE P. Risks to farm animals from pathogens in composted catering waste containing meat[J]. *Veterinary Record*, 2004, 155(3):77-82.
- [19] ELVING J, EMMOTH E, ALBIHN A, et al. Composting for avian influenza virus elimination[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78(9):3280-3285.

- [20] 马雪婷,冯雨欣,耿冰雨,等.食源性大肠杆菌危害及其检测技术研究进展[J].广东化工,2021,48(22):191-193. MA X T, FENG Y X, GENG B Y, et al. Research progress on harm and detection technology of foodborne *Escherichia coli*[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(22):191-193.
- [21] 苏琪,张萍珍,唐焯.大肠杆菌检测方法的研究[J].中小企业管理与科技,2014(4):323-324. SU Q, ZHANG P Z, TANG Y. Study on detection method of *Escherichia coli*[J]. *Management and Technology of SME*, 2014(4):323-324.
- [22] KHAN A B, SAHIR K H, AHMED M, et al. Rapid detection of *Salmonella* in food samples by polymerase chain reaction after a 10 h pre-enrichment[J]. *Journal of Food Safety*, 2014, 34(1):79-86.
- [23] ROVAI M, CAJA G, SALAMA A, et al. Identifying the major bacteria causing intramammary infections in individual milk samples of sheep and goats using traditional bacteria culturing and real-time polymerase chain reaction[J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(9):5393-5400.
- [24] MOEZI P, KARGAR M, DOOSTI A, et al. Multiplex touchdown PCR assay to enhance specificity and sensitivity for concurrent detection of four foodborne pathogens in raw milk[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2019, 127(1):262-273.
- [25] 陶然,王昕,苏志伟.食品中大肠杆菌快速检测方法的研究综述[J].食品安全导刊,2017(24):72. TAO R, WANG X, SU Z W. Research review on rapid detection methods of *Escherichia coli* in food[J]. *China Food Safety Magazine*, 2017(24):72.
- [26] 刘莹.应用基因芯片技术检测食源性腹泻致病大肠杆菌[J].食品安全质量检测学报,2020(3):915-919. LIU Y. Detection of pathogenic *Escherichia coli* in food borne diarrhea by gene chip technology[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020(3):915-919.
- [27] 白小莲,爱军.生物传感器在食源性致病菌大肠杆菌O157:H7检测中的应用进展[J].生物技术进展,2021,11(3):269-278. BAI X L, AI J. Application progress of biosensor in detection of food-borne pathogen *Escherichia coli* O157:H7[J]. *Current Biotechnology*, 2021, 11(3):269-278.
- [28] LI M, SONG G, LIU R, et al. Inactivation and risk control of pathogenic microorganisms in municipal sludge treatment: a review[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2022, 16(6):1-23.
- [29] 中华人民共和国卫生部.粪便无害化卫生要求:GB 7959—2012[S].北京:中国标准出版社,2012. Ministry of Health of the People's Republic of China. Hygienic requirements for harmless disposal of night soil: GB 7959—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [30] British Standards Institution. Specification for composted materials: PAS 100:2011[S]. London: BSI Standards Limited, 2011.
- [31] SAVEYN H, EDER P. End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost and digest): Technical proposals[M]. Seville: Publications Office of the European Union, 2014: 167-169.
- [32] Bundesgüte Gemeinschaft Kompost, Ed. Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., Sankt Augustin: RAL-GZ 251[S]. Köln: Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 2007.
- [33] Environmental Protection Agency. Use of composting for biosolids management: EPA 832-F-02-024[S]. Washington D C: Environmental Protection Agency, 2000.
- [34] 焦敏娜,任秀娜,何熠锋,等.畜禽粪污清洁堆肥——机遇与挑战[J].农业环境科学学报,2021,40(11):2361-2371. JIAO M N, REN X N, HE Y F, et al. Opportunities and challenges in a livestock manure cleaner composting process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11):2361-2371.
- [35] AZIM K, SOUDI B, BOUKHARI S, et al. Composting parameters and compost quality: a literature review[J]. *Organic Agriculture*, 2018, 8(2):141-158.
- [36] 李吉进.畜禽粪便高温堆肥机理与应用研究[D].北京:中国农业大学,2004:21-24. LI J J. Study on mechanism of high temperature composting of livestock manure and its application[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004:21-24.
- [37] LEPESTEUR M. Human and livestock pathogens and their control during composting[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2021, 52(10):1639-1683.
- [38] CHEUNG H, HUANG G H, YU H. Microbial-growth inhibition during composting of food waste: effects of organic acids[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(15):5925-5934.
- [39] JIANG Y, DENNEHY C, LAWLOR P G, et al. Inactivation of enteric indicator bacteria and system stability during dry co-digestion of food waste and pig manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612:293-302.
- [40] WONG J W, SELVAM A. Reduction of indicator and pathogenic microorganisms in pig manure through fly ash and lime addition during alkaline stabilization[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1/2/3):882-889.
- [41] MILLNER P, INGRAM D, MULBRY W, et al. Pathogen reduction in minimally managed composting of bovine manure[J]. *Waste Management*, 2014, 34(11):1992-1999.
- [42] CHUNG W J, CHANG S W, CHAUDHARY D K, et al. Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure[J]. *Chemosphere*, 2021, 283:131129.
- [43] HUTCHISON M, WALTERS L, AVERY S M, et al. Decline of zoonotic agents in livestock waste and bedding heaps[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 99(2):354-362.
- [44] CHEN Z, KIM J, JIANG X. Survival of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* in animal waste-based composts as influenced by compost type, storage condition and inoculum level[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2018, 124(5):1311-1323.
- [45] 卫昱君,王紫婷,徐瑗聪,等.致病性大肠杆菌现状分析及检测技术研究进展[J].生物技术通报,2016,32(11):80-92. WEI Y J, WANG Z T, XU Y C, et al. Current situation analysis and detection techniques of pathogenic *Escherichia coli*[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2016, 32(11):80-92.
- [46] XU W, REUTER T, INGLIS G D, et al. A biosecure composting system for disposal of cattle carcasses and manure following infectious disease outbreak[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(2):437-450.
- [47] LUNG A J, LIN C M, KIM J M, et al. Destruction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enteritidis* in cow manure composting[J]. *Journal of Food Protection*, 2001, 64(9):1309-1314.
- [48] GREWAL S, SREEVATSAN S, MICHEL JR F C. Persistence of *Listeria* and *Salmonella* during swine manure treatment[J]. *Compostence*

- and Utilization, 2007, 15(1):53-62.
- [49] 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: 14-15. CHANG R X. Research on ultra high temperature compost process and nitrogen loss during vegetable waste composting[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 14-15.
- [50] FARBER J M, BROWN B E. Effect of prior heat shock on heat resistance of *Listeria monocytogenes* in meat[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1990, 56(6): 1584-1587.
- [51] GURTLER J B, DOYLE M P, ERICKSON M C, et al. Composting to inactivate foodborne pathogens for crop soil application: a review[J]. *Journal of Food Protection*, 2018, 81(11): 1821-1837.
- [52] BRIANCESCO R, COCCIA M, CHIARETTI G, et al. Assessment of microbiological and parasitological quality of composted wastes: health implications and hygienic measures[J]. *Waste Management and Research*, 2008, 26(2): 196-202.
- [53] 牛俊玲, 李彦明, 陈清. 固体有机废物肥料化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 31-32. NIU J L, LI Y M, CHEN Q. Fertilizer utilization technology of solid organic waste[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 31-32.
- [54] BERGERSEN O, BOEN A S, SORHEIM R. Strategies to reduce short-chain organic acids and synchronously establish high-rate composting in acidic household waste[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 99(2): 521-526.
- [55] ERICKSON M C, LIAO J, MA L, et al. Thermal and nonthermal factors affecting survival of *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* in animal manure-based compost mixtures[J]. *Journal of Food Protection*, 2014, 77(9): 1512-1518.
- [56] LIU T, AWASTHI M K, AWASTHI S K, et al. Influence of fine coal gasification slag on greenhouse gases emission and volatile fatty acids during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 316: 123915.
- [57] SOLANO M L, IRIARTE F, CIRIA P, et al. Performance characteristics of three aeration systems in the composting of sheep manure and straw[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research (SE: Structure and Environment)*, 2001, 79(3): 317-329.
- [58] SINGH R, KIM J, JIANG X. Heat inactivation of *Salmonella* spp. in fresh poultry compost by simulating early phase of composting process [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2012, 112(5): 927-935.
- [59] HIMATHONGKHAM S, RIEMANN H. Destruction of *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in chicken manure by drying and/or gassing with ammonia[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1999, 171(2): 179-182.
- [60] 杨燕, 尹子铭, 袁京, 等. 双氰胺和氢醌添加对堆肥温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2439-2447. YANG Y, YIN Z M, YUAN J, et al. Effects of dicyandiamide and hydroquinone on greenhouse gas emissions during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2439-2447.
- [61] CHEN Z, KIM J, JIANG X. Survival of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* in animal waste-based composts as influenced by compost type, storage condition and inoculum level[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2018, 124(5): 1311-1323.
- [62] ERICKSON M C, LIAO J, MA L, et al. Inactivation of *Salmonella* spp. in cow manure composts formulated to different initial C:N ratios[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(23): 5898-5903.
- [63] LAFOND S, PARÉ T, DINEL H, et al. Composting duck excreta enriched wood shavings: C and N transformations and bacterial pathogen reductions[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2002, 37(2): 173-186.
- [64] 何国庆, 贾英民, 丁立孝. 食品微生物学[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 322-325. HE G Q, JIA Y M, DING L X. Food microbiology[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 322-325.
- [65] STRINGFELLOW K, CALDWELL D, LEE J, et al. Pasteurization of chicken litter with steam and quicklime to reduce *Salmonella Typhimurium*[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2010, 19(4): 380-386.
- [66] WONG J W C, SELVAM A. Reduction of indicator and pathogenic microorganisms in pig manure through fly ash and lime addition during alkaline stabilization[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1/2/3): 882-889.
- [67] CRONJE A L, BARKER A J, GUY S, et al. Ammonia emissions and pathogen inactivation during composting[C]//Proceedings of the 2002 International Symposium Composting and Compost Utilization. Emmaus: JG Press, 2002: 845-856.
- [68] 曹玉博, 张陆, 王选, 等. 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 Y B, ZHANG L, WANG X, et al. Synergistic mitigation of ammonia and greenhouse gas emissions during livestock waste composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 923-932.
- [69] 曹哲统, 冷治涛, 杨远文, 等. 好氧堆肥技术在畜禽粪污资源化利用中的研究进展[J]. 中国乳业, 2021(11): 65-72. CAO Z T, LENG Z T, YANG Y W, et al. The research progress of aerobic composting technology in the resource utilization of livestock and poultry manure[J]. *China Dairy*, 2021(11): 65-72.
- [70] GONG C, INOUE K, INANAGA S, et al. Survival of pathogenic bacteria in compost with special reference to *Escherichia coli*[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(5): 770-774.
- [71] PIETRONAVE S, FRACCHIA L, RINALDI M, et al. Influence of biotic and abiotic factors on human pathogens in a finished compost[J]. *Water Research*, 2004, 38(8): 1963-1970.
- [72] ERICKSON M C, LIAO J, JIANG X, et al. Inactivation of pathogens during aerobic composting of fresh and aged dairy manure and different carbon amendments[J]. *Journal of Food Protection*, 2014, 77(11): 1911-1918.
- [73] WU H, LAI C, ZENG G, et al. The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: a review[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, 37(6): 754-764.
- [74] NEHER D A, CUTLER A J, WEICHT T R, et al. Composts of poultry litter or dairy manure differentially affect survival of enteric bacteria in fields with spinach[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2019, 126(6): 1910-1922.
- [75] BRINTON JR W F, STORMS P, BLEWETT T C. Occurrence and levels of fecal indicators and pathogenic bacteria in market-ready recycled organic matter composts[J]. *Journal of Food Protection*, 2009, 72(2): 332-339.