

畜禽粪污清洁堆肥——机遇与挑战

焦敏娜, 任秀娜, 何熠锋, 王权, 李荣华, 李季, 张增强

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1138>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

云南省畜禽粪污土地消纳能力的评估及其肥料化发展前景

邓亚琴, 王宇蕴, 李兰, 赵兵, 张勇, 马丽婷, 徐智

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2419–2427 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1103>

堆肥过程中抗生素和耐药基因消减研究进展

王晓醒, 郭雪琦, 冯瑶, 冀拯宇, 刘聪, 李兆君

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2383–2394 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1119>

河北省规模肉鸭场粪污重金属和抗生素调查分析

马金智, 朱志平, 卢连水, 张万钦, 薛鹏英, 江旭东

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 421–427 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0979>

畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例

邢睿智, 艾超凡, 王梦怡, 唐荣, 杨祖沐, 秦树平, 陈志, 周顺桂

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2405–2411 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1108>

实施清洁生产源头控制畜禽养殖污染

吴银宝, 吴根义, 廖新倬

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2283–2291 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1101>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

畜禽粪污清洁堆肥——机遇与挑战

焦敏娜¹, 任秀娜¹, 何熠锋¹, 王权¹, 李荣华¹, 李季², 张增强^{1*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 好氧堆肥技术是处理畜禽粪污的有效手段, 然而传统的好氧堆肥技术存在着氨气和温室气体排放量大、重金属活性高、病原微生物和抗性基因残留高、腐殖化程度低等瓶颈问题, 因此开展畜禽粪污的清洁堆肥就显得非常必要。清洁堆肥是指从堆肥原材料选取、堆肥过程到堆肥产品使用整个过程中, 选取无害化原料、过程中严格控制污染物的排放, 并使其最终产品无害化的过程。本文围绕当今我国畜禽养殖业发展特征和畜禽粪污污染现状, 深度剖析了传统堆肥的优势及其所面临的挑战, 展望了畜禽粪污清洁堆肥的机遇与发展趋势, 以期为畜禽粪污资源的可持续利用提供理论支持。

关键词: 规模化养殖场; 畜禽粪污; 清洁堆肥; 机遇; 挑战

中图分类号: S141.4; X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)11-2361-11 doi:10.11654/jaes.2021-1138

Opportunities and challenges in a livestock manure cleaner composting process

JIAO Minna¹, REN Xiuna¹, HE Yifeng¹, WANG Quan¹, LI Ronghua¹, LI Ji², ZHANG Zengqiang^{1*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aerobic composting technology is one of the most effective tools for tackling large amounts of livestock manure; otherwise, environmental contamination may occur from releasing organic solid waste directly into habitats. However, traditional aerophilic fermentation is faced with many challenges, such as large emissions of ammonia and greenhouse gases, high heavy metal bioavailability, low humification, and pathogenic bacteria, antibiotics, and antibiotics resistance gene residuals that limit the development of aerobic fermentation industrialization. A cleaner aerobic fermentation process was established to reduce the risk and quality of organic solid wastes. The cleaner composting should pick up environmental-friendly materials, while controlling the emission of pollutants during the composting process. Therefore, free-hazardous composting products could be manufactured. This review focused on the contemporary characteristics of the livestock industry and the status of livestock manure, and the opportunities and challenges of traditional composting procedure were analyzed to provide theoretical support for the development of resourceful livestock utilization.

Keywords: intensive livestock farm; livestock manure; cleaner composting process; opportunities; challenges

近年来,随着我国经济的快速持续发展和人民生活水平的不断提高,人们对高品质蛋白质(肉、蛋、奶)的需求越来越大,为满足日益增长的对蛋白质的需

求,规模化畜禽养殖业快速发展,由此产生了数量庞大的畜禽粪污。在当今可持续发展的社会背景下,无害化、资源化、减量化处理已成为有机固体废弃物处

收稿日期: 2021-10-02 录用日期: 2021-10-18

作者简介: 焦敏娜(1995—), 女, 陕西宝鸡人, 博士研究生, 从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail: minnaji95@163.com

*通信作者: 张增强 E-mail: zhangzq58@126.com

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2021NY-190)

Project supported: The Key Research and Development Program of Shaanxi Province(2021NY-190)

理的重点和难点。我国种植业与养殖业分离经营,造成农牧业的严重脱节,畜禽粪便还田比例较低^[1]。有关数据显示,我国每年的畜禽粪便产量可达38亿t,秸秆产量可达7亿t^[2]。由此造成高密度畜禽养殖区的粪便大量累积,进而导致大气(恶臭气体、温室气体释放)、土壤(重金属、抗性基因污染)、水体(富营养化)污染,病原微生物大量滋生,对生态环境与居民身体健康造成较大的威胁。作为有机肥生产的重要原料来源,畜禽粪便具有数量大、养分含量高、利用历史悠久等特点。早在1 000 a前,在我国及其他东方国家便有将畜禽粪污进行堆肥发酵的历史,由此过程得到的腐殖化程度较高的堆肥产品被称为农家肥。堆肥产品具有培肥地力、改善土壤结构、提高作物产量及品质的作用^[3]。

现代化的好氧堆肥技术发源于20世纪初的欧洲,到20世纪中叶,现代化的大型有机废物堆肥厂在发达国家相继建立^[4]。好氧堆肥技术因其操作简便、运行成本低和处理量大等优点被广泛用于农业废弃物的资源化处理。通过堆肥化处理,畜禽粪便等农业有机固体废弃物中对环境及人类有害的病原微生物、草籽、虫卵等均能得到有效的杀灭,从而得到养分含量高且稳定的堆肥产品,以此实现粪污资源的高效循环利用。然而,由于堆肥内在微环境调控技术缺乏,传统好氧堆肥存在着氨气和温室气体排放量大、重金属活性高、病原微生物和抗性基因残留高、腐殖化程度低等瓶颈问题,因而,开展畜禽粪污的清洁堆肥就显得非常必要。本文以我国畜禽业发展特征为基础,详细阐释了畜禽粪污堆肥化处理的优点及不足,并对其在未来发展中面临的机遇与挑战进行了较为全面的剖析,旨在为畜禽粪污清洁堆肥提供理论依据。

1 我国畜禽养殖业发展特征

近年来,我国畜禽养殖行业的规模日益扩大,畜禽养殖数量日益增多,在20世纪末期,我国畜禽产品市场大规模开放,其他类型的畜禽相继被引入我国,大型牲畜的数量呈现稳步上升的趋势(图1),其中猪与羊的数量存在较为显著的增长。2007—2017年我国禽类出栏数与存栏数也呈现出与大型牲畜数量相似的趋势,随着供给侧改革的深入推进,畜牧业规模化水平、生产效率、畜禽产品安全质量显著提升,保安全、促供给、保生态协调在近10 a我国畜禽养殖业的发展中呈现出主流趋势,畜牧业在保质增量的基础上加快了转型升级^[5]。

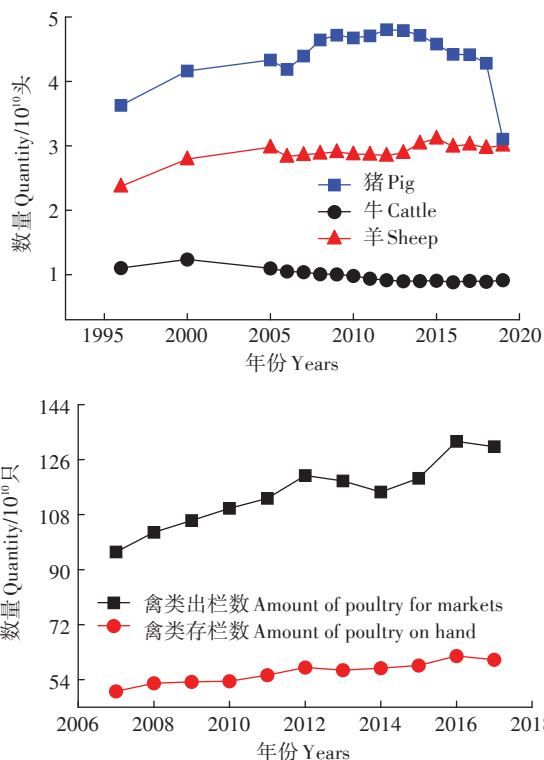


图1 近年来我国畜禽养殖数量变化

Figure 1 The quantity changes of domestic animals and poultry in recent decades

世界人口迅猛增长带来对高蛋白产品的需求日益增大,造成居民饮食结构与偏好发生了变化,我国人均畜产品消耗量也呈现持续增加的趋势。为满足居民对畜禽产品的大量需求,我国畜牧业生产正在由农户个体松散养殖向大范围的规模化养殖转型。通常规模化养殖使用工业生产饲料、谷物等作为饲料,因此依靠外部饲料、能源及其他投入而供应生产的城郊“工业”畜禽养殖系统越来越接近城市,从而造成我国畜禽养殖行业种养分离的弊端与缺陷^[6-7]。

大范围的规模化养殖势必会产生较多的畜禽粪便,这些粪便每年带来的300万~400万t的粪便氮亟待得到有效处置与利用^[8]。据国际应用系统分析研究所2009年的报告显示,预计2030年的粪污中氮、磷、钾的总养分含量较2000年将增长60%~65%,这将对生态环境、人类健康等造成长期及广泛的影响。贾伟等^[9]的研究也表明,到2030年北京地区产生的粪污磷的含量将比2010年增长1.4倍,由于日益增长的畜牧产品需求而产生大量的磷,这势必会对区域内安全处理及利用粪肥磷产生极其显著的影响。

目前,我国规模化养殖行业面临的挑战主要包括:如何进一步规划、管理、扩大大规模畜禽养殖场

粪污收集与处置场地;如何利用可持续方式对养殖场的有机垃圾进行资源化处理,使其得到有效利用;如何在有限的土地利用面积的基础上扩大畜禽粪污的资源化处理规模;当前应对我国规模化养殖场弊端的有效方式是加强循环区域内的养分利用,结合当前先进的处理设施,使畜禽粪污中的养分得到有效利用。

2 我国畜禽粪污养分特征及污染现状

据《中国统计年鉴》^[10]显示,自2009—2019年以来,我国大型牲畜的数量累计为112 000.6万头,大规模的集中养殖造成大量畜禽粪污的产生堆积,导致土壤中氮、磷等元素的负荷过重,进而造成了日益严重的环境污染问题。随着近年来深入贯彻习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”的理念,畜禽粪污资源化利用越来越受到关注与重视。

2.1 畜禽粪污组成

通常认为,畜禽粪污的化学组成与饲喂畜禽的饲料、集中化养殖的饲养条件及畜禽个体对饲料的同化与异化效率等多方面影响因素密切相关。畜禽粪污中含有大量的以C、H、O、S元素为主的有机物质(表1),其还含有较为丰富的氨基酸、蛋白质及丰富的N、P、K等植物生长所需的大量营养元素,这些均可以起到促进植物生长及新陈代谢的作用。此外,畜禽粪污中含有的Na、Ca、Fe、Cu、Zn等金属元素,也是植物生长所需的中微量元素。腐熟的畜禽粪便堆肥产品中含有大量稳定的有机碳,畜禽粪污直接还田或经过堆肥处理后施用于农田土壤不仅可以改善土壤肥力及地力,提高植株产量及养分含量,促进植株生长;同时还能提高土壤中碱性磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶等微生物酶活性^[11],改善农田土壤的微生物学性质。

2.2 由规模日益扩大的畜禽养殖业导致的环境问题

我国当前大范围推行规模化养殖造成的大量以

畜禽粪污为主的有机废弃物已经成为限制我国畜牧业、种植业可持续发展,威胁居民生命健康的重要污染源污染因素。污染形式主要有如下几个方面:

(1)高密度、规模化畜禽养殖区产生的过量畜禽粪污造成的高农田氮、磷累积,严重超过了农田土壤的养分载荷。城镇化的快速发展推动了畜牧业向城镇周边快速集中,城镇周边畜禽养殖业的发展,使得粪污的排放量呈现出显著增长的趋势。由于粪污的产量巨大,水冲式清粪方式造成畜禽粪污的处理成本增大,故大范围规模化的养殖场通常采用直接还田的方式处理积粪^[9]。不合理且过量的畜禽粪污农田施用,会造成氮、磷元素的大量累积和土壤中硝酸盐与磷酸盐的累积;过量的粪污中的氮素主要通过氨挥发^[13]、氧化亚氮排放^[14]、形成的硝酸盐通过雨水作用在土壤中淋溶^[15]的形式流失到环境中。粪污中的氮素以氨气的形式挥发到大气中,过量的氨气通过沉降作用会造成土壤或水生生态系统的酸化和富营养化,从而产生一系列的环境污染问题;过量的氮素也会通过硝酸盐、磷酸盐经降水向地下淋溶,一部分硝态氮也可通过微生物的反硝化作用转化成温室气体N₂O而排入大气。畜禽粪污中的氮素通过转化、淋溶、流失等途径形成级联效应,从而在一定程度上影响某省份、地区、国家甚至全世界尺度上的生态环境安全^[16-17]。有研究表明,在农田土壤中施加畜禽粪污造成的土壤活性磷的增量超过直接施用化肥(磷肥),增量高达3倍之多^[18];MACDONALD等^[19]对全球农田的磷含量进行统计分析发现,我国是目前世界上环境磷素盈余较严重的国家之一。在我国,由于种植业受到投入成本限制的原因,农场或农民将大量畜禽养殖场的有机废弃物施用于农田、果园、蔬菜等种植土壤中。据统计显示,农田土壤中超过一半的磷投入来源于畜禽粪肥^[20]。在农田土壤中,磷素的损失主要包括向下层土壤或地下水淋滤与地表损失(地表径流和土壤侵

表1 集约化养殖场畜禽粪污中各养分含量^[12]

Table 1 The nutrient quantity of livestock manure^[12]

畜禽粪便 Domestic animal and poultry manure	N/(g·kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ /(g·kg ⁻¹)	K ₂ O/(g·kg ⁻¹)	有机物 Organic matters/%
鸡粪 Chicken manure	25.0±13.9	35.9±17.7	21.7±8.1	42.1±13.5
猪粪 Swine manure	21.6±6.6	47.4±21.1	15.4±5.9	54.4±12.4
羊粪 Goat manure	17.2±5.2	13.1±7.3	20.6±13.6	54.5±13.3
牛粪 Dairy manure	14.6±4.2	16.1±12.2	13.9±9.6	57.4±12.6
其他有机固体废弃物 Other organic solid wastes	19.0±28.2	20.2±20.6	20.6±15.6	36.5±20.9

注:其他有机固体废弃物包括马粪、驴粪、鸽粪、沼渣、堆肥、兔粪等。

Note: Other organic solid wastes include horse manure, donkey manure, pigeon manure, digestate, mature composting products, rabbit manure, etc.

蚀)。通过淋滤作用损失的磷素通常为可溶态磷,该形态的磷素进入水体更易被水生植物吸收利用,从而引起水体富营养化^[21],严重威胁水生生态系统的环境与安全。农田土壤中直接施加规模化养殖场的有机粪污,不仅会造成土壤中硝酸盐与磷酸盐的累积,造成土壤可溶性盐含量剧增,破坏土壤胶体的电荷平衡,降低土壤中微生物的活性,延长作物的生长周期,严重时则会抑制作物的生长发育^[22]。

(2)规模化畜禽养殖场的快速且聚集发展,造成畜禽粪污的大量产生。鉴于高密度的养殖规模与数量庞大的粪污产量,养殖场通常采用水冲粪的方式对畜禽养殖场内的粪污进行清理。该种清粪方式造成规模化养殖场得到的厩肥体积庞大且养分含量较干清粪方式低,还田成本大幅增加;此外,粪污中的部分养分及污染物随着水冲的方式进入土壤及水体,造成土壤及水体(地下水、河流)的污染。有研究表明,进入养殖场流域的水泡粪使得水体中氮、磷等养分含量增加,这将加剧地表径流及地下水的富营养化程度,其贡献率可达到15%~40%^[23]。随意堆置的大量畜禽粪污经过雨水的冲刷,其中含有的部分硝酸盐、亚硝酸盐也会进入水体。流域居民长期饮用硝酸盐超标的饮用水,将会影响自身健康,严重的还有可能诱发癌症^[24]。此外,畜禽粪污中的重金属元素也会随着雨水及地表径流的作用进入水体,并在动植物体内进行富集,从而对水生生态系统造成严重的污染。

(3)大量畜禽粪污在规模化养殖场的随意堆放下,容易滋生致病微生物、蝇虫,产生恶臭气体,不仅严重影响养殖场及周边居民的生活环境,而且还会造成大气污染。研究表明,在粪污堆放过程中,由于原料中含有C、N、S等元素,因此极易产生具有恶臭气味的含氮化合物(例如:氨气、氮氧化合物、吡啶类物质、甲胺、二甲胺、三甲胺等),含硫化合物(包括硫化氢、二氧化硫等无机化合物和甲硫醇、乙硫醇、二甲基硫醚、二甲基二硫醚等有机含硫化合物)及少量有机化合物(芳香烃、挥发性脂肪酸、醛、酮类物质等)^[25-27]。由畜禽粪便产生的气体污染物不仅会造成大气环境污染,还降低了使用粪肥的农田环境质量^[28],这些气体污染物的阈值较低,吸入少量的气体即会刺激并腐蚀人体上呼吸道,使结膜、呼吸道、鼻咽部黏膜充血、水肿;吸收大量高浓度的恶臭气体则会对人体器官产生严重损伤^[28]。这些恶臭气体给有机肥用量大的地区带来了许多环境问题,甚至影响了有机肥工艺的改进与发展^[29]。我国人口众多,有机肥的需求量与使用

量日益增大,由畜禽粪便带来的恶臭污染问题目前亟待治理解决。

(4)在规模化畜禽养殖过程中,为了增强畜禽的抗病能力,缩短畜禽的生长周期,含有大量重金属元素Cu、Zn、As、Cr、Pb的添加剂被添加至畜禽饲料中^[30-31]。调查结果显示,我国11个省、市的规模化养猪场的饲料中重金属Cu的含量超标率高达100%,重金属Zn的超标率为60%~100%^[32]。据估算,我国每年约有18万t的微量元素被添加进畜禽饲料中^[33]。但畜禽对这些重金属元素的吸收利用率较低,添加的元素量远超出畜禽本身的吸收能力^[34],大部分重金属随着粪污的排放进入生态系统,并通过有机肥的形式进入农田土壤和流域水体中,从而对环境造成污染。含有重金属的畜禽粪污长期被施入土壤,虽可以改变土壤的理化性状、增强土壤微生物活性、提高作物产量,但长期施用含有重金属元素的堆肥,会使这些元素通过食物链富集,从而对人体健康及生态环境造成较为严重的负面影响。

(5)在规模化、集约化畜禽养殖过程中常添加亚治疗剂量的抗生素作为饲料添加剂,用以达到有效防治畜禽养殖过程中出现的各类因肠道中病原微生物大量增殖而引起的疾病,减少肠道内微生物对机体养分的消耗,起到促进畜禽健康生长的作用^[35]。随着近年来我国规模化畜禽养殖行业的快速、大规模发展,养殖业对抗生素的用量日益增大。有数据显示,我国兽用抗生素产量据估计可达85 000 t·a⁻¹^[36-37],同饲料中的重金属添加剂相似,畜禽对抗生素的吸收利用率较低,难以完全吸收利用所添加的剂量。盈余的抗生素及其代谢产物随着粪污排泄的方式进入生态系统^[38]。据不完全估计,我国每年约有超过50 000 t的抗生素随着畜禽粪污的排放进入水土环境中^[39]。进入环境的残留抗生素能够吸附并长期固定在土壤胶体上^[40-41]。研究显示,四环素类、磺胺类、大环内酯类抗生素可在土壤中残留8个月以上^[42]。进入土壤的抗生素还可诱导生态系统中的微生物产生抗性基因,该类抗性基因可通过环境微生物转移至病原微生物体内,导致病原菌的耐药性增强,最终使得抗生素的治疗效果下降,从而危害人类的身体健康^[43-44]。有研究表明,土壤中的抗生素可影响植物合成某些促生长的有机物质,从而影响植物的生长,最终造成作物产量的降低。BOXALL等^[45]的研究表明,土壤残留的美沙磺胺能够抑制植物合成叶酸,从而阻碍植物体内DNA的合成,抑制植物的生长。另有研究表明,抗生

素恩氟沙星对莴苣和胡萝卜的生长也存在显著的抑制效果。目前已知的研究表明,牛、鸡、猪粪便中已检测出的主要抗生素类型有四环素类(Tetracyclines, TCs)、磺胺类(Sulfonamides, SAs)、氟喹诺酮类(Fluoroquinolones, FQs)。我国各地畜禽粪污的抗生素含量调查显示,各地区的粪污中抗生素的检出率较高,规模化程度高的大型畜禽养殖场的粪污中抗生素的检出率更为显著。

3 畜禽粪便肥料化处理优势及挑战

大量的畜禽粪便随意排放及处置不仅会对生态环境造成严重的污染,对人类生命健康造成严重的威胁;又因其蕴含较为丰富的植物所需的营养元素,是优质的商品有机肥原料,不合理处置势必还会在一定程度上造成资源的浪费。目前畜禽粪便的有效处理处置方法主要包括无害化处理与资源化处理两种,其中无害化处理(传统处理法)包括卫生填埋法和焚烧法,资源化处理包括厌氧消化和好氧堆肥等方法。传统处理法虽可以较大程度上解决诸如畜禽粪污之类的有机垃圾数量庞大的问题,但在传统技术处理的同时也会因二次污染而对环境卫生造成较大的影响。由于我国近年来对环境整治的力度日益增大,同时土地资源日益稀缺,传统处理方式已无法满足产量逐年增大的有机废物排放量,随着资源化处理的深入人心,该法已逐渐被中国、日本及欧美国家所摒弃,而有较高资源利用效率的肥料化处理方法已被广泛用于

处理畜禽粪污。

有数据显示,随着规模化养殖场大范围建成,2015年我国畜禽粪污产生总量高达24亿t,其中所含的总养分含量约占粪污总量的1.1%,植物生长所需的大量元素氮、磷、钾元素含量分别占所含总养分含量的38.31%、14.40%、36.19%,相当于同年我国种植业化肥使用量的43%^[46]。因此,无害化、资源化处理畜禽粪污不仅可以促进农业资源、农业环境以及人与自然和谐友好发展,还能带来一定的经济与环境收益,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,也为有机废物的减量化、无害化、资源化处理在我国的实施与推进提供了强有力的保障。

3.1 畜禽粪污好氧堆肥处理的优点

厌氧发酵法作为一种有机垃圾资源化的处理方式,虽然在生产中可得到清洁能源沼气,但在实施中却因投资大、成本高、沼气产率较低、对专业技术要求较好氧堆肥高、资金回收较困难、厌氧发酵剩余物(沼液、沼渣)处理困难等问题而难以大范围推广应用^[47]。

好氧堆肥法(图2)是在有氧条件下,通过一系列好氧微生物的生物氧化作用,使畜禽粪污中的易降解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。好氧堆肥过程中产生的高温能够杀死畜禽粪污中的杂草种子、蝇虫卵及病原微生物,从而获得高品质有机肥。综合考虑环境友好、减量化程度与资源利用效率,堆肥处理技术的应用范围日益扩大。

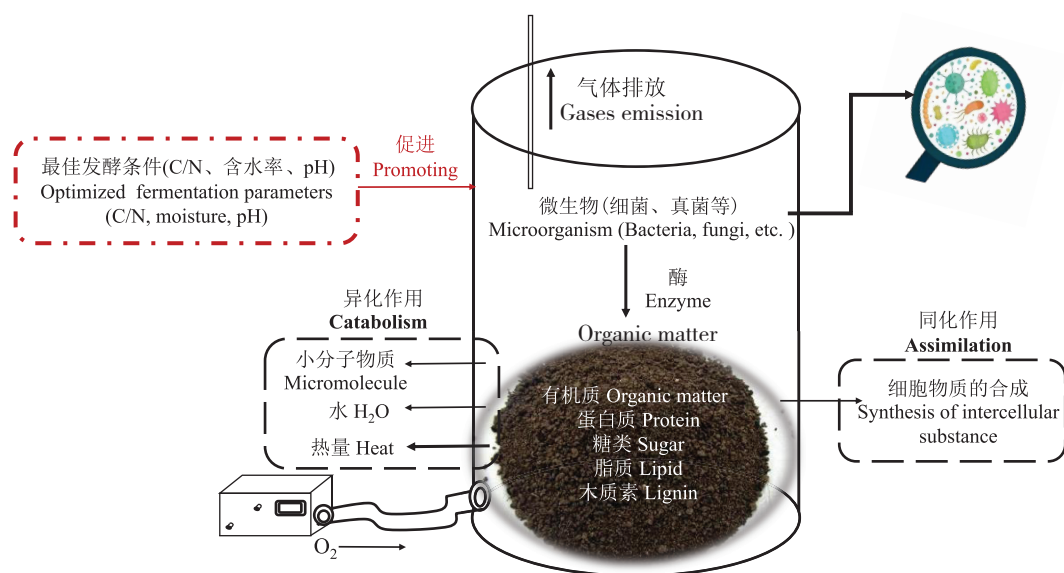


图2 好氧堆肥技术原理图

Figure 2 The principle of aerobic fermentation

目前好氧堆肥工艺主要包括条垛式堆肥、静态堆垛堆肥、槽式堆肥与反应器堆肥4类。好氧堆肥因处理量大、易操作、资源化程度高、资金投入少和运行成本低等特点,而被广泛用于易腐有机垃圾的处理^[48]。经堆肥后得到的有机肥产品施入土壤,不仅能为植物生长提供养分,还可显著改善土壤的物理、化学及生物学性质,提高土壤保水保肥能力,保障农产品安全,最大程度提高畜禽粪污资源化利用率。

3.2 畜禽粪污好氧堆肥处理面临的挑战

据估计,我国有机肥生产规模以每年5%的速率增长,未来有机肥将成为农业农村施用肥料的新常态。因此,好氧堆肥法资源化处理畜禽粪污是较为绿色环保的途径,也是处理规模化养殖场产生的大量粪污的主流方式之一^[49]。然而传统好氧堆肥处理技术存在的诸多障碍(温室气体及恶臭气体排放量大、腐殖化程度低、养分损失严重),严重阻碍了好氧堆肥产业的发展^[50-51]。

(1)由于微生物的异化作用,好氧堆肥过程容易产生大量的温室气体(甲烷、氧化亚氮),这是造成全球气温升高、出现温室效应的原因之一^[52]。有调查显示,在好氧发酵过程中,畜禽粪污中的总有机碳有25%~50%可转化成二氧化碳、0.5%~8%可转化为甲烷,0.1%~5%的氮素转化为氧化亚氮。由于在生态系统中,绿色植物可通过自身光合作用消耗产生的二氧化碳,且在堆肥过程中使用的原料均为植物源,因此在堆肥过程中整个周期呈现闭合状态,因此二氧化碳的释放量不影响堆肥过程中温室效应的变化^[53]。有调查显示,氧化亚氮与甲烷引起的温室效应分别是

二氧化碳的298倍与25倍,且氧化亚氮在大气中发生光化学反应,消耗大气中的臭氧,从而造成臭氧空洞,进一步加剧了全球变暖的进程^[54]。

(2)好氧堆肥过程中普遍存在养分损失的现象,且其中以氮素损失最为常见。氮素损失不仅会造成生态环境的污染,还由于肥效的降低造成了堆肥产品农用价值的损失,因此如何在好氧堆肥过程中增加氮素的保留已然成为了国内外的研究重点与热点之一。在堆肥过程中,畜禽粪污中的各类有机氮通过微生物的氨化作用分解成氨气并溶解于堆体中形成铵态氮(NH_4^+-N)^[55]。铵态氮在堆体中微生物的作用下,一部分可通过微生物的同化作用提供其生长繁殖所需的氮源;另一部分在硝化细菌的硝化作用下转变为硝态氮(NO_3^--N)^[56]。随着堆体条件的改变和微生物反硝化作用的发生,铵态氮会转变为氮气或氮氧化物,从而造成氮素损失。此外,好氧堆肥过程中产生的高温及碱性环境也会造成铵态氮在堆体中的溶解度减小,从而使氮素以氨气的形式损失(图3)^[57]。

据估算,好氧堆肥过程中的氮素损失约占40%,而因氨气挥发造成的氮素损失占总氮损失的80%~95%^[58]。因此,好氧发酵过程对氮素的留存是当前堆肥工艺亟待解决的问题。

(3)腐殖化过程本质上是堆体中水溶态有机碳在多种微生物及其分泌的酶的共同作用下发生矿化作用,并转变为组成、结构、性质具有差异及其性的复杂有机化合物(腐殖类物质)的过程^[59]。堆肥过程中,在升温 and 高温阶段形成堆肥前体物,在降温和腐熟阶段形成腐殖质类物质^[60],具体途径如图4所示。研究表

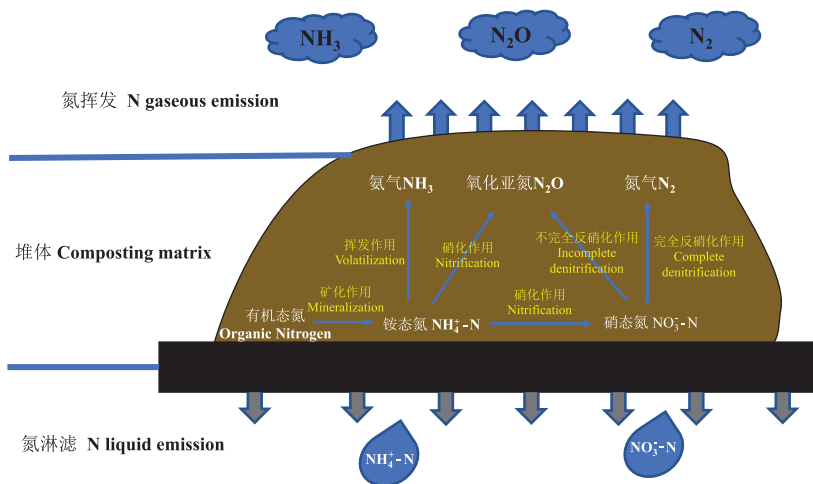


图3 堆肥过程中氮素转化和氨气及氧化亚氮释放规律^[57]

Figure 3 Nitrogen transformation, ammonia and nitrous oxide release in composting process^[57]

明,腐殖质形成的途径之一是堆肥原料中木质素的侧链在微生物的作用下氧化为木质素类衍生物,该物质构成了腐殖质的核心及骨架^[61]。然而,在传统好氧堆肥过程中,木质素极难被降解,影响了发酵过程中腐殖质骨架的形成,使得堆肥中腐殖化程度存在较大差异,在降低堆肥产品稳定性的同时也降低了其农作价值。

4 畜禽粪污清洁堆肥的机遇

随着社会的发展,传统好氧堆肥生产暴露出很多问题,如氨气和温室气体排放量大、重金属生物有效性较高、抗生素和抗性基因残留、腐殖化程度较低、养分含量低等,这些问题限制了好氧堆肥技术的推广应用。清洁堆肥理念的提出,顺应了当代社会的发展趋势及市场需求,体现了高效化、资源化、清洁化、环境友好的特点。因此,清洁堆肥应从清洁原材料的选择出发,在控制发酵过程中可能存在的环境污染的同时提高最终堆肥产品的质量和安全。

(1)堆肥过程中重要参数的优化

原料的选择作为堆肥的首要因素之一,对最终堆肥产品的质量和安全性有着至关重要的影响。堆肥原料是绝大多数堆肥污染物产生的源头,因此对原材料进行筛选一方面可以有效去除污染潜力较大、不适宜堆肥的原料;另一方面可以更好地了解堆肥原料的性状,有助于调整、改善堆肥物料的配比。在堆肥过程中适当调整含水率、温度、曝气条件和碳氮比等参数,这与在堆肥过程中添加化学、矿物或生物添加剂及不同的调理剂具有相同的作用^[63]。通过优化堆肥参数可以影响堆体中微生物群落结构及活性,进而影

响好氧堆肥进程。翻堆频率会影响堆体中氧气的分布,改善堆体的曝气情况,进而影响微生物活性,改变堆肥进程^[64]。温度是评价及监控好氧堆肥技术的另一个重要因素。RAUT等^[65]的研究结果进一步证实,有机物的降解与堆体温度有关,随着堆体温度的升高,堆体中微生物对可溶性有机物的降解速率增大。元素氮、碳是维持生命体生长最重要的营养物质,可以提供微生物及细胞新陈代谢所需的能量,并且也是构成细胞结构的主要骨架^[66]。因此,碳氮比是反映好氧堆肥中有机质分解程度的重要指标。在堆肥开始时调整堆体的最适碳氮比至25:1~30:1,此时的堆体环境最适宜微生物生长繁殖。有研究表明,在好氧堆肥技术中采用不同的技术手段改善与发酵相关的关键参数,可以显著提高产品质量,降低堆肥过程中存在的潜在环境风险^[67]。

(2)调理剂及添加剂在好氧堆肥工程中的广泛应用

为了获得清洁的堆肥产品,提高堆肥的无害化程度,大量的规模化好氧堆肥厂倾向于选择高效、经济的堆肥技术和方法。BERNAL等^[68]证实,在畜禽粪污好氧发酵的堆体中加入富碳材料(调理剂),可以有效减少以氨气排放为主的氮损失。为了提供形成腐殖质的木质素,木屑、麦秸、玉米秸秆等含有木质素、纤维素较多的调理剂被广泛应用于好氧堆肥工程,用以促进堆肥产品腐殖化程度的提高。有研究表明,在牛粪堆肥中添加的水稻秸秆可为堆体中的微生物提供充足且平衡的碳、氮养分,有利于促进微生物发生同化、异化作用,提高最终堆肥产品的品质^[69]。MAULI-

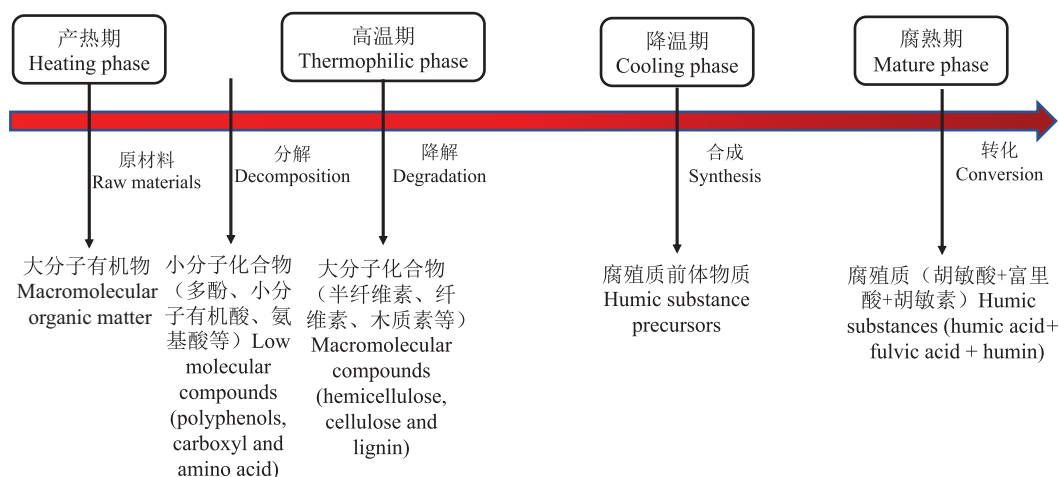


图4 堆肥过程中腐殖质的形成过程^[62]

Figure 4 The generation of humic substances during composting process^[62]

NI-DUEAN 等^[70]在污泥好氧堆肥中也发现了相似的结果,在好氧堆肥堆体中加入厌氧消化的干沼渣可以有效降低污泥的含水率,增大堆体的孔隙度,为微生物提供合适的通气条件,从而增加了堆体中微生物的相对丰度,促进了污泥堆肥的腐殖化程度。一些调理剂改善好氧堆肥过程的案例如表2所示,为有机固废好氧堆肥工艺的改善提供了理论与实际指导。

表2 好氧堆肥中调理剂的应用

Table 2 The application of bulking agent in composting procedure

基质 Substrate	调理剂 Bulking agent	参考文献 Reference
羊粪 Goat manure	水稻秸秆 Rice straw	[71]
牛粪 Dairy manure	水稻秸秆 Rice straw	[69]
猪粪 Swine manure	木屑、秸秆 Sawdust and straw	[72]
餐厨垃圾 Food waste	菌渣 Mushroom dreg	[73]

添加的微生物菌剂有白腐真菌、链霉菌和芽孢杆菌等,其中如白腐真菌可以通过产生如木质素过氧化物酶、漆酶等酶直接促进堆肥的腐质化进程。化学添加剂如氨基酸可促进堆肥过程中腐植酸类物质的形成,提高堆肥最终产品的腐质化程度;稀硫酸的加入促进了微生物对堆肥原材料中如纤维素等有机物质的降解,加速了大分子腐殖质的形成;过磷酸钙等的加入不仅增加了堆肥物料中的养分含量,而且对氮素的保留也有促进作用。添加矿物添加剂(膨润土、麦饭石、沸石、粉煤灰和石灰等)可以调节堆体孔隙结构、促进微生物生命活动、提高堆体对养分的保留、降低堆体中抗生素和抗性基因的含量与丰度^[74-75]。与其他方法相比,添加矿物添加剂具有廉价易得、操作性强、时效长和经济成本低等特点,因而被广泛使用。但是,矿物添加剂在好氧堆肥的应用中仍存在以下难题需攻克:①矿物添加剂在某些地区有机固体废物资源化、无害化利用过程中发挥了重要的作用,但是对于不同地区好氧堆肥厂,尤其是在气温较低的东北和高寒缺氧的西北地区存在升温困难,难以有效杀灭其中病原微生物等问题,还应因地制宜地研发其他添加剂;②目前研发出的一系列对好氧堆肥过程有良好工程应用效果的添加剂,存在成本较高、添加作业复杂等问题,在实际生产中还难以大面积推广应用。因此,设计并研发高效廉价且因地制宜的矿物添加剂仍是推进好氧堆肥技术的关键,这在环境材料技术发展日新月异的今天更是如此。

(3) 统计学方法在好氧堆肥技术中的应用

近年来,人们提出了大量的模型和统计方法,并对好氧堆肥过程及终产品进行了大量的数理预测^[76]。统计方法可以从数理统计学的角度反映堆肥过程中影响好氧堆肥进程的各项物理指标(孔隙度、含水率、通气条件、温度等)与堆体生物、化学特性之间的联系,可用于调节好氧堆肥堆体环境,为其中微生物的生长繁殖代谢提供合适的栖息地^[77]。通过数理统计的方法,有助于深入了解规模化好氧堆肥厂中生产工艺的缺陷,降低好氧发酵工业的成本,从而实现高效、清洁的堆肥工业的发展,提高畜禽粪便资源化利用效率^[77]。好氧堆肥工艺运用的数理统计是根据一定的技术,以影响堆肥过程及最终产品质量的相关因素作为变量,通过改变这些变量即可观察到其对堆肥过程及结果的综合影响。进一步的研究表明,堆肥优化模型与统计方法(因子设计、模糊逻辑模型、马尔科夫链近似值、动力学建模技术等)可定量改良堆肥操作工艺,从而提高最终堆肥产品的品质,使其具有更高的农艺价值^[78]。

根据《中华人民共和国清洁生产促进法》中相关规定得知,清洁生产就是在生产中不断改进生产工艺:使用清洁原料及能源、引进先进的工艺技术与设备、改善管理措施,极大程度地提高资源化程度,减少生产过程中污染物的产生与排放,从源头上削减污染,旨在降低工农业生产对生态环境与人类健康的危害。清洁堆肥技术为有机固体废弃物的“三化”处理提供了一条绿色健康和可持续发展之路,清洁堆肥技术不仅极大程度降低了生产工艺中相关的环境污染问题,还缓解了日益紧张的自然资源问题与不断增大的人口基数之间的矛盾,创造了相当的农用价值与经济利用价值,符合当今的可持续发展战略。

5 结论

由于我国规模化畜禽养殖业的大范围推广,大量畜禽粪污的不合理堆放及处置不仅对生态环境造成了严重的影响,还很大程度上造成了资源浪费。这在自然资源日益紧缺的当今社会严重违背了可持续发展的理念。畜禽粪污作为一种“放错位置的资源”,采用清洁堆肥技术对畜禽粪污进行无害化处理,不仅可以显著改善养殖场周边的环境卫生状况,而且实现了集约化养殖场粪污的资源化,赋予了其较高的经济价值,为有机废弃物的高值化利用提供了理论与技术依据。本文通过分析当前我国畜禽养殖业及畜禽粪污排放现状,对传统好氧堆肥处理畜禽粪污的优缺点进

行了分析。通过展望清洁堆肥的发展机遇,旨在为畜禽粪污肥料化工艺的改良与完善提供新方法、新思路。随着经济的发展、技术的进步和人们环保意识的提高,以畜禽粪污为主要组成成分的有机固废处理会趋于合理化、无害化和资源化,畜禽粪污将成为人类的另一种宝贵资源。

参考文献:

- [1] 王凯军. 畜禽养殖污染防治技术与政策[M]. 北京:化学工业出版社, 2004. WANG K J. Pollution prevention technology and policy of livestock and poultry breeding process[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [2] 孙振钧, 孙永明. 我国农业废弃物资源化与农村生物质能源利用的现状与发展[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(1): 6-13. SUN Z J, SUN Y M. Situation and development of agricultural residues as energy resource utilization in rural areas in China[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2006, 8(1): 6-13.
- [3] 沈玉君, 王健, 李冉, 等. 国内外堆肥标准分析及其对中国的借鉴启示[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 265-271. SHEN Y J, WANG J, LI R, et al. Analysis of composting standards at home and abroad and its enlightenment to China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(12): 265-271.
- [4] 张增强. 堆肥清洁生产与使用手册[M]. 北京:中国农业出版社, 2019. ZHANG Z Q. The guide for cleaner composting process and utilization of composting products[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [5] 中国畜牧兽医年鉴编辑委员会. 中国畜牧兽医年鉴(2018)[M]. 北京:中国农业出版社, 2018. Editorial Committee of Chinese Animal Husbandry and Veterinary Yearbook. Chinese animal husbandry and veterinary yearbook(2018)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018.
- [6] 中国畜牧兽医年鉴编辑委员会. 中国畜牧兽医年鉴(2007)[M]. 北京:中国农业出版社, 2007. Editorial Committee of Chinese Animal Husbandry and Veterinary Yearbook. Chinese animal husbandry and veterinary yearbook(2007)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [7] JU X, ZHANG F, BAO X, et al. Utilization and management of organic wastes in Chinese agriculture: Past, present and perspectives[J]. *Science in China*, 2005, 48: 965-979.
- [8] PETERSEN S O, BLANCHARD M, D CHADWICK, et al. Manure management for greenhouse gas mitigation[J]. *Animal*, 2013, 7(Suppl 2): 266-282.
- [9] 贾伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京:中国农业大学, 2014. JIA W. Study on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [10] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2020)[M]. 中国统计出版社, 2020. National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistical Press, 2020.
- [11] SHAO X, ZHENG J. Soil organic carbon, black carbon, and enzyme activity under long-term fertilization[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3): 517-524.
- [12] 黄绍文, 唐继伟, 李春花. 我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J]. 植物营养与肥科学报, 2017, 23(1): 162-173. HUANG S W, TANG J W, LI C H. Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 162-173.
- [13] WEBB J, MENZI H, PAIN B, et al. Managing ammonia emissions from livestock production in Europe[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 135(3): 399-406.
- [14] CHADWICK D, SOMMER S, THORMAN R, et al. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions[J]. *Animal Feed Science & Technology*, 2011, 166/167: 514-531.
- [15] CHAMBERS B J, SMITH K A, PAIN B F. Strategies to encourage better use of nitrogen in animal manures[J]. *Soil Use and Management*, 2000, 16(Suppl 1): 157-166.
- [16] GALLOWAY J N, ABER J D, WILLEM E J, et al. The nitrogen cascade[J]. *Bioscience*, 2003, 53(4): 341-356.
- [17] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [18] LI H, HUANG G, MENG Q, et al. Erratum to: Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China: A review[J]. *Plant & Soil*, 2013, 373(1): 1011.
- [19] MACDONALD G K, BENNETT E M, PPTTER P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of the Science of the United States of America*, 2011, 108(7): 3086-3091.
- [20] YAN Z, LIU P P, LI Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 982-989.
- [21] ANDERSSON H, BERGSTROM L, DIODJIC F, et al. Topsoil and subsoil properties influence phosphorus leaching from four agricultural soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(2): 455-463.
- [22] 朱佳伟, 王丽斌, 张林源. 畜禽粪便的环境污染与资源化利用[J]. 当代畜禽养殖业, 2013(11): 61-63. ZHU J W, WANG L B, ZHANG L Y. Environmental pollution and resource utilization of livestock and poultry manure[J]. *Modern Animal Husbandry*, 2013(11): 61-63.
- [23] 张冬梅. 猪场废水氮磷MAP回收工艺及其对传统厌氧-好氧处理系统的影响研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013. ZHANG D M. Study on MAP recovery process of nitrogen and phosphorus from pig farm wastewater and its influence on traditional anaerobic-aerobic treatment system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [24] 佟影影. 畜禽粪便堆肥过程溶解性有机质组成与重金属变化研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2020. TONG Y Y. Study on composition of dissolved organic matter and change of heavy metals during livestock manure composting process[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.
- [25] LI H, HUANG S B, WEI Z D, et al. Performance of a new suspended filler biofilter for removal of nitrogen oxides under thermophilic condi-

- tions and microbial community analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 562(1):533–541.
- [26] SHAMMAY A, SIVRETE C, LE-MINH N, et al. Review of odor abatement in sewer networks[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4(4):3866–3881.
- [27] XUE N T, WANG Q H, WANG J, et al. Odorous composting gas abatement and microbial community diversity in a biotrickling filter [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 82(1): 73–80.
- [28] CARO J, GALLEGO M. Environmental and biological monitoring of volatile organic compounds in the workplace[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(3):426–433.
- [29] 王晓伟. 餐厨垃圾饲料化工艺恶臭污染物排放特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013. WANG X W. Study on emission characteristics of malodorous pollutants from food waste in feed process[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.
- [30] YUAN J, YANG Q Y, ZHANG Z Y, et al. Use of additive and pretreatment to control odors in municipal kitchen waste during aerobic composting[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 37:83–90.
- [31] 王飞, 邱凌, 沈玉君, 等. 华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5):261–267. WANG F, QIU L, SHEN Y J, et al. Investigation and analysis of heavy metal contents from livestock feed and manure in north China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 261–267.
- [32] SHI Y P, HUANG J F, NI X W, et al. Sources and accumulation risk of heavy metal in major animal manure[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2016, 8(6):318–322, 326.
- [33] 薄录吉, 李彦, LUO J F, 等. 我国规模化养猪场粪便重金属污染特征与农用风险评价[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1):258–267. BO L J, LI Y, LUO J F, et al. Characteristics of heavy metals pollution in pig manures and environmental risks evaluation in intensive pig farming areas in China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1):258–267.
- [34] 王权. 添加剂对猪粪好氧堆肥过程的影响及其机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. WANG Q. Effect of additive on aerobic composting of pig manure and its mechanism[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [35] KUMAR K, THOMPSON A, Singh A K, et al. Enzyme-linked immunosorbent assay for ultratrace determination of antibiotics in aqueous samples[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(1):250–256.
- [36] QIAO M, YING G G, SINGER A C, et al. Review of antibiotic resistance in China and its environment[J]. *Environment International*, 2018, 110(1):160–172.
- [37] 朱宁, 马骥. 中国畜禽粪便产生量的变动特征及未来发展展望[J]. 农业展望, 2014, 10(1):46–48. ZHU N, MA J. Changes and outlook about production amounts of livestock and poultry manure in China[J]. *Agricultural Outlook*, 2014, 10(1):46–48.
- [38] ZHANG Q Q, YING G G, PAN C G, et al. Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: Source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(11):6772–6782.
- [39] 梁忠. 中国抗生素 52% 为兽用[J]. 中国禽业导刊, 2015(12):75. LIANG Z. 52% of antibiotics in China are for animal use[J]. *Guide to Chinese Poultry*, 2015(12):75.
- [40] DORETTO K M, RATH S. Sorption of sulfadiazine on Brazilian soils [J]. *Chemosphere*, 2013, 90(6):2027–2034.
- [41] 吴银宝, 汪植三, 廖新伟, 等. 土壤对恩诺沙星的吸附和解吸特性研究[J]. 生态环境学报, 2005, 14(5):645–649. WU Y B, WANG Z S, LIAO X D, et al. Study on the absorption and desorption of soil to enrofloxacin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(5): 645–649.
- [42] 刘伟, 王慧, 陈小军, 等. 抗生素在环境中降解的研究进展[J]. 动物医学进展, 2009, 30(3):89–94. LIU W, WANG H, CHEN X J, et al. Progress on ovine theileriosis and genetically engineered vaccine in China[J]. *Progress in Veterinary Medicine*, 2009, 30(3):89–94.
- [43] O' BRIEN T F. Emergence, spread, and environmental effect of antimicrobial resistance: How use of an antimicrobial anywhere can increase resistance to any antimicrobial anywhere else[J]. *Clinical Infectious Diseases*, 2002(Suppl3):78–84.
- [44] TASHO R P, CHO J Y. Veterinary antibiotics in animal waste, its distribution in soil and uptake by plants: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 563/564:366–376.
- [45] BOXALL A B A, JOHNSON P, SMITH E J, et al. Uptake of veterinary medicines from soils into plants[J]. *Journal Agricultural Food Chemistry*, 2006, 54(6):2288–2297.
- [46] 王志国, 李辉信, 岳明灿, 等. 中国畜禽粪尿资源及其替代化肥潜力分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(26):121–128. WANG Z G, LI H X, YUE M C, et al. Livestock manure resources and their replace potential fertilizer in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(26):121–128.
- [47] KOSSEVA M R. Management and processing of food wastes[M]//Comprehensive biotechnology. 2nd Edition. 2011:557–593.
- [48] 曲芳京. 生物炭强化堆肥对猪粪重金属 Cu、Zn 钝化效果研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018. QU F J. Passivating effect of biochar on heavy metal Cu and Zn during pig manure composting[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [49] BONG C P C B, LIM Y, HO W S, et al. A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 146:149–157.
- [50] REN X N, WANG Q, AWASTHI M K, et al. Improvement of cleaner composting production by adding diatomite: From the nitrogen conservation and greenhouse gas emission[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 286:121377.
- [51] REYES-TORRES M, OVIEDO-OCAÑA E R, DOMINGGUEZ I, et al. A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies[J]. *Waste Management*, 2018, 77: 486–499.
- [52] 朱新梦. 洱河流域奶牛粪便堆肥过程中氮素转化和温室气体排放研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017. ZHU X M. Study on nitrogen conversion and greenhouse gas emission of dairy manure composting in Erhai River basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural

- Sciences, 2017.
- [53] IPCC, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change[M]. UK: Cambridge University Press, 2015.
- [54] 殷亚楠. 铜对畜禽粪便堆肥过程中微生物群落及抗性基因影响机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018. YIN Y N. Effect of copper on microbial community and resistance genes in livestock manure composting[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [55] ALBURQUERQUE J A, GONZÁLEZ J, GARCÍA D, et al. Effects of bulking agent on the composting of "alperujo", the solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(1): 127-132.
- [56] MEUNCHANG S, PANICHSAKPATANA S, WEARVER R W. Co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(4): 437-442.
- [57] PANGANS E, BARRENA R, FONT X, et al. Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature[J]. *Chemosphere*, 2006, 62(9): 1534-1542.
- [58] 王友玲, 邱慧珍, PHILIP G, 等. 通风方式对牛粪堆肥氨气排放与氮素转化的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 313-320. WANG Y L, QIU H Z, PHILIP G, et al. Influence of ventilation modes on ammonia emission and nitrogen conversion in cattle manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 313-320.
- [59] KOMILIS O, KONTOU I, NTOUGIAS S, et al. A modified static respiration assay and its relationship with an enzymatic test to assess compost stability and maturity[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(10): 5863-5872.
- [60] WU J Q, ZHAO Y, ZHAO W, et al. Effect of precursors combined with bacteria communities on the formation of humic substances during different materials composting[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 226: 191-199.
- [61] AMIR S, JOURAIPHY A, MEDDICH A, et al. Structural study of humic acids during composting of activated sludge-green waste: Elemental analysis, FTIR and ^{13}C NMR[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177(1/2/3): 524-529.
- [62] GUO X X, LIU H T, WU S B. Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 501-510.
- [63] WONG J, WANG X, SELVAM A. Improving compost quality by controlling nitrogen loss during composting[J]. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 2017: 59-82.
- [64] KALAMDHAD A S, KAZMI A A. Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(10): 1327-1334.
- [65] RAUT M P, WILLIAM S, BHATTACHARYYA J K, et al. Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste: A compost maturity analysis perspective[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(14): 6512-6519.
- [66] IQUBAL M K, NADEEM A, F SHERAZI, et al. Optimization of process parameters for kitchen waste composting by response surface methodology[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(5): 1759-1768.
- [67] WANG S, YANG Z. Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 248: 13-19.
- [68] BERNAL M P, ALBURQUERQUE J A, MORAL R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5444-5453.
- [69] ZHOU C, LIU Z, HUANG Z L, et al. A new strategy for co-composting dairy manure with rice straw: Addition of different inocula at three stages of composting[J]. *Waste Management*, 2015, 40: 38-43.
- [70] MAULINI-DURAN C, ARTOLA A, FONT X, et al. A systematic study of the gaseous emissions from biosolids composting: Raw sludge versus anaerobically digested sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 147: 43-51.
- [71] MOHAMMAD HARIZ A R, ONG H K, NURUL AIN A B, et al. Application of agro-waste compositional data to predict composting efficiency[J]. *Journal of Tropical Agriculture & Food Science*, 2013, 41(2): 329-339.
- [72] CHIUMENTI A. Complete nitrification-denitrification of swine manure in a full-scale, non-conventional composting system[J]. *Waste Management*, 2015, 46: 577-587.
- [73] WU C, WANG Q, SHI S, et al. Effective utilization of trickling liquid discharged from a bio-trickling filter as a moisture conditioning agent for composting[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129: 378-387.
- [74] ZHANG J, CHEN M, SUI Q, et al. Impacts of addition of natural zeolite or a nitrification inhibitor on antibiotic resistance genes during sludge composting[J]. *Water Research*, 2016, 91: 339-349.
- [75] PENG S, LI H, SONG D, et al. Influence of zeolite and superphosphate as additives on antibiotic resistance genes and bacterial communities during factory-scale chicken manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018: 263, 393-401.
- [76] MASON I G. An evaluation of substrate degradation patterns in the composting process. Part 2: Temperature-corrected profiles[J]. *Waste Management*, 2008, 28(9): 1598-1608.
- [77] OUDART D, ROBIN P, PAILLAT J M, et al. Modelling nitrogen and carbon interactions in composting of animal manure in naturally aerated piles[J]. *Waste Management*, 2015, 46(45): 588-598.
- [78] ONWOSI C O, IGBOKWE V C, ODIMBA J N, et al. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190: 140-157.