

牛粪与秸秆类废弃物配比好氧发酵 新工艺对堆肥效果的影响

周喜荣,张丽萍,蒋鹏,孙权,王锐,刘少泉,刘智

(宁夏大学农学院,宁夏银川 750021)

摘要:以牛粪为主料,玉米秸秆、枸杞枝条及葡萄枝条为辅料进行碳氮配比,添加微生物菌剂,通过自制式全封闭旋转通气加氧装置进行有机物料好氧发酵,比较不同有机辅料与牛粪配比腐熟发酵新工艺对堆肥腐熟效果的影响。试验共设置3个处理:T1(牛粪+玉米秸秆)、T2(牛粪+枸杞枝条)、T3(牛粪+葡萄枝条),以物理、化学、生物指标为考核标准进行各项指标的评价。结果表明:利用植物秸秆替代风化煤与糠醛渣进行好氧腐熟发酵完成后,T1、T2及T3处理有机质含量在45.47%~47.80%,且60℃以上温度维持均超过14 d,首先达标;含水率为28.21%~30.75%,pH值在8.29~8.49,粪大肠杆菌菌群数均小于3.60 MPN·g⁻¹,蛔虫死亡率97.04%~98.34%,重金属Cd、Cr、As及Pb含量分别在0.809~0.842、5.34~17.37、4.26~4.72、1.64~2.15 mg·kg⁻¹,轻易达标;N+P₂O₅+K₂O在3.94%~4.70%,接近NY525-2012有机肥标准;纤维素、半纤维素及木质素降解明显。腐熟完成后,T1、T2及T3处理指标间优势明显。T1处理发酵所需时间最短,为21 d,T2与T3处理均为25 d腐熟完成。玉米秸秆配比最佳,葡萄枝条配比次之,枸杞枝条配比发酵最慢。综合考虑好氧腐熟发酵进程、理化指标与生物指标变化及发酵成本,建议在实际生产中采用玉米秸秆与牛粪配比发酵,能够有效促进腐熟进程,提升产品品质,节约成本。

关键词:牛粪;秸秆类废弃物;好氧发酵;堆肥效果

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A

Effect of new process of aerobic fermentation of cow manure and straw waste on composting

ZHOU Xirong, ZHANG Liping, JIANG Peng, SUN Quan, WANG Rui, LIU Shaoquan, LIU Zhi

(Agriculture College of Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Using cow dung as the main material, corn stalks, wolfberry branches, and grape branches as auxiliary materials for carbon and nitrogen ratios, adding microbial inoculants, aerobic fermentation of organic materials through a self-made fully enclosed rotary ventilation oxygenation device, we compared different organic auxiliary materials with the effect of the new technology of cow manure mixture rot fermentation on compost rot effect. A total of three treatments were setup in the experiment: T1 (cow dung + corn stalk), T2 (cow dung + medlar branch), T3 (cow dung + grape branch), and physical, chemical, and biological indicators were measured as the assessment criteria for each index evaluation. The results showed that after using plant straw instead of weathered coal and furfural residue for aerobic rot fermentation, the organic content of T1, T2, and T3 treatment was 45.47%~47.80%, and the temperature was maintained above 60℃ for more than 14 days. Water content was 28.21%~30.75%, pH value was between 8.29 to 8.49, fecal coliforms were less than 3.60 MPN·g⁻¹, roundworm mortality 97.04%~98.34%, heavy metal Cd, Cr, As, and Pb contents were 0.809~0.842, 5.34~17.37, 4.26~4.72 mg·kg⁻¹, and 1.64~2.15 mg·kg⁻¹, respectively, within the standards; The N+P₂O₅+K₂O was close to NY525-2012 of Organic Fertilizer Standard at 3.94%~4.70%; cellulose, hemicellulose, and lignin degraded significantly. After the rot was completed, the advantages among T1, T2, and T3 treatment indicators were obvious.

收稿日期:2020-02-19

修回日期:2020-07-09

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2019BCF01001,2018BBF02004,2017BN05)

作者简介:周喜荣(1994-),男,甘肃临潭人,硕士研究生,研究方向为植物营养与农业资源利用。E-mail:1637613677@qq.com

通信作者:孙权(1965-),男,博士,教授,主要从事干旱区土肥水高效利用研究。E-mail:sqnxu@sina.com

T1 treatment required the shortest fermentation time, which was 21 days while T2 and T3 treatments were both completed after 25 days. Corn straw had the best ratio, followed by grape branches, and wolfberry branches had the slowest fermentation ratio. Considering comprehensively the aerobic rot fermentation process, physical and chemical index properties and biological index changes and fermentation cost, it is recommended to use the ratio of corn stalk and cow dung fermentation in actual production, which can effectively promote the decomposing process, improve product quality, and save costs.

Keywords: cow manure; straw waste; aerobic fermentation; compost effect

随着我国农业迅速发展,每年产生的有机废弃物数量不断攀升,秸秆类约有 8.3 亿 t,畜禽粪便约有 38 亿 t^[1],且有机废弃物富含作物生长发育所需的氮、磷、钾及有机质等营养物质,肆意堆放不仅严重影响人类生活 and 环境净化循环,而且造成绿色资源的大量流失与浪费,在可持续绿色发展的大背景下,有机废弃物资源化、无害化处理正是当今的研究热点。

肥料化利用是有机废弃物还田最为经济、绿色的利用方式^[2],有机肥施入土壤既可以有效增加土壤有机质,改善土壤结构,提高土壤生态活力,又能促进土壤养分充分释放,减轻土壤污染,但肥料化处理弊端屡见不鲜。宁夏、西藏、青海及甘肃南部等西北地区目前对畜禽粪污肥料化利用普遍为传统发酵,再者,由于高海拔地区温度低,堆体温度难以维持,不能有效杀死病原菌及其虫卵,这种发酵方式耗时长且养分流失严重,致使有机肥品质低劣,养分有效性低;而秸秆类废弃物则大多作为燃料或直接废弃,造成能源浪费与环境污染。传统有机肥生产为达到商业标准,添加含非活性有机碳比例很高的风化煤或糠醛渣,对改良土壤与促进作物生长方面效果甚微,长期施用易造成土壤污染,降低养分利用率。

好氧发酵是一种利用物料自身固有菌群或借助外源菌剂进行有机质的生物降解,使其达到稳定的腐殖状态,再应用于土壤改良剂和有机肥的过程^[3]。好氧发酵因腐熟效果好、产物肥料化应用性强等优势^[4-5],成为有机废弃物发酵首选;物料初始条件作为发酵过程中最关键的因素对物料发酵快慢与有机肥品质高低起决定性作用。相关研究表明,有机废弃物发酵时,物料粒径在 2 mm 左右,C/N 比值在 25~30,初始含水率维持在 55%左右,添加适宜的外源菌剂能够增强微生物活性,加快纤维素降解,提升堆体温度,减少升温时间,延长高温发酵期,有效缩短腐熟周期,提高腐熟效率,提升产品品质^[6-9]。牛粪与秸秆类废弃物均含有丰富的氮、磷、钾、有机质等营养成分,但牛粪含水量较高,且质地

细密,内部空隙率小,通气性差,腐熟效率低下,不易直接好氧发酵,而秸秆类废弃物是一种良好碳源,粉碎后具有特殊的结构特性,与牛粪配比发酵,不仅有效调节物料水分与 C/N 比,而且明显增加物料粒径与堆体内部空隙,使得外界氧气源源不断向物料内部供给,好氧微生物活性显著提升,腐熟效率进一步加快,有效缩短发酵时间^[3,10-12]。玉米秸秆、枸杞枝条及葡萄枝条是宁夏地区主要秸秆类废弃物,具有可再生、分布广泛、营养成分齐全、利用潜力大、结构组成特殊的特点,因此,与牛粪配比发酵时,对物料腐熟发酵效果影响各异。

针对传统发酵弊端、单纯牛粪发酵缺陷及秸秆类有机废弃物自身特点,本研究利用 3 种秸秆类废弃物分别与牛粪配比,并接种多元高效发酵菌、纤维素降解酶及黑曲霉,在自主设计全封闭旋转通气加氧装置中进行好氧发酵,以发酵过程中物理、化学及生物指标为考核标准,研究玉米秸秆、枸杞枝条及葡萄枝条与牛粪配比腐熟发酵新工艺对堆肥效果的影响,以期为好氧腐熟发酵及其工艺提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2019 年 3 月初至 2019 年 8 月初在宁夏大学试验农场(38°13'50.34"N, 106°14'22.19"E)(南厂)进行,年平均气温 9℃左右,试验环境为农场实际生产场地,即露天,雨时塑料布遮盖。

1.2 供试材料

1.2.1 试验材料 牛粪购于青铜峡市国庞奶牛养殖专业合作社;玉米秸秆、葡萄枝条购于宁夏卿龙生物质能源开发有限公司;枸杞枝条均购于宁夏枸杞所;多元高效发酵菌剂、纤维素酶、黑曲霉均为实验室自行提取繁殖筛选所得。

1.2.2 材料初始指标 根据物料特性与试验研究需要进行初始指标测定,如表 1 所示。

1.3 试验设计

1.3.1 试验设置 试验采用自制式全封闭旋转通气

加氧装置进行好氧发酵,装置可自动控制曝气时间、加水、搅拌方向及进出料,试验共设置 3 个处理,分别为:(牛粪+玉米秸秆)T1;(牛粪+枸杞枝条)T2;(牛粪+葡萄枝条)T3,装置原理图与具体配比如图 1 和表 2。

1.3.2 试验步骤 (1) 多元高效发酵菌剂的活化:根据发酵物料总量将相应量多元高效发酵菌剂、麸皮按一定比例搅拌均匀,再将相应量红糖溶于适量水中,调节其含水率在 35% 左右,放置于恒温光照培养箱,至有大量菌丝长出;(2) 物料加工及配比:将有机物料加工适当尺寸,根据发酵总量计算农业物料需要量,并与牛粪配比使 C/N 为 28 : 1,再根据各自物料含水率计算总需水量及计算调节物料 C/N 为 25 : 1 的尿素需要量;(3) 物料传送及接菌:通过

物料传送管将配比后的物料传送到发酵罐中,将尿素、黑曲酶及纤维素酶溶于水,边传送物料边搅拌加水,并把活化的多元高效发酵菌剂均匀撒施在传送物料上;(4) 管理与采样:按时曝气搅拌、测定罐外室温、罐内堆体温度与含水率及采集样品,具体调配指标如表 3 所示。

1.4 试验相关计算

1.4.1 物料配比计算

$$a: AX + BY = 28; b: CX + DY = 1; a : b = 28 : 1$$

式中, a :总碳; b :总氮; A :农业物料有机碳含量; B :牛粪有机碳含量; C :农业物料全氮含量; D :牛粪全氮含量; X :农业物料理论需要量; Y :牛粪理论需要量;各物理单位均为常数 1。

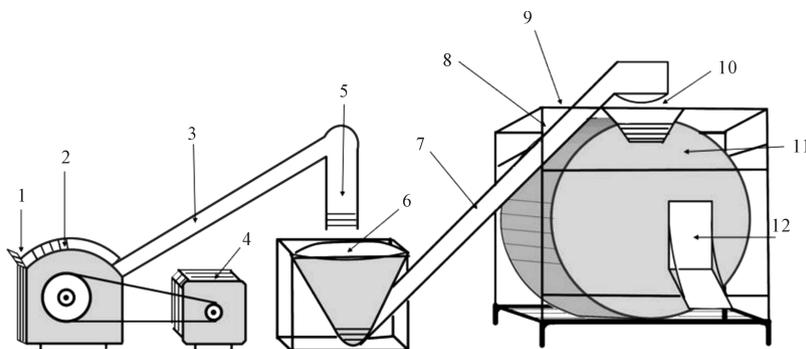
表 1 各类有机废弃物初始指标

Table 1 Initial indicators of various types of organic waste

初始指标 Initial indicator	全氮 Total N/%	有机质 Organic matter/%	C/N	pH	含水率 Moisture content/%	纤维素 Cellulose /%	半纤维素 Hemicellulose /%	木质素 Lignin /%	粪大肠杆菌数 Fecal <i>E. coli</i> / (MPN · g ⁻¹)	蛔虫死亡率 Aphid mortality/%	Cd (mg · kg ⁻¹)	Cr (mg · kg ⁻¹)	As (mg · kg ⁻¹)	Pb (mg · kg ⁻¹)
牛粪 Cow dung	1.38	63.56	26.72	8.72	10.18	37.88	11.82	8.44	150	28.54	0.79	14.07	3.41	1.19
玉米秸秆 Corn stalks	1.04	78.73	43.91		6.18	54.56	24.18	50.48						
枸杞枝条 Wolfberry branches	1.69	66.22	32.28		5.75	62.93	20.9	63.22						
葡萄枝条 Grape branches	1.78	69.77	31.62		4.94	45.3	16.22	40.75						

注:牛粪为奶牛粪新旧混合物,玉米秸秆为收割 1 a 的陈年秸秆,枸杞枝条为修剪 2 a 的陈年枝条,葡萄枝条为修剪 2 a 的陈年枝条。

Note: Cow dung was a mixture of old and new cow dung, corn stalks were one year old straw, wolfberry branches were two years old pruning, grape branches were two years old pruning.



1:粉样口;2:粉碎机;3:物料传送管;4:电机;5:装样袋;6:进料口;7:传送管;
8:爆气和加水装置;9:操作箱;10:物料入罐口;11:发酵罐;12:出料口

1: Powder port; 2: Grinder; 3: Material transfer tube; 4: Motor; 5: Sample bag; 6: Inlet; 7: Delivery tube; 8: Gas explosion and water adding device; 9: Operation box; 10: Material into the tank; 11: Fermenter; 12: Outlet

图 1 腐熟发酵装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of rot fermentation device

表 2 物料配比用量

Table 2 Material matching scale

处理 Treatment	牛粪 Cow dung/kg	玉米秸秆 Corn stalks/kg	枸杞枝条 Wolfberry branches/kg	葡萄枝条 Grape branches/kg	尿素 Urea/kg	配比 Ratio
T1	1122.81	877.19			0.01	1.28 : 1
T2	1406.53		593.47		0.82	3.37 : 1
T3	1176.96			823.05	0.92	1.43 : 1

表 3 试验调配指标标准

Table 3 Test allocation indicator standard

指标 Indicator	标准 Standard
物料粒径 Material particle size/mm	0.1~0.5
含水率 Moisture content/%	55~60
发酵总量 Total fermentation/t	2
MEFB/(g·t ⁻¹)	500
MEFB:BDW	1:10
红糖 Brown sugar	多元高效发酵菌剂干重的 0.3% 0.3% of dry weight of MEFB
黑曲霉 Niger/(g·t ⁻¹)	100
纤维素酶 Cellulase/(g·t ⁻¹)	100
搅拌曝气时间间隔 Stirring and aeration time interval	6 h
温度 Temperature	每天 16:00
含水率测定 Determination of moisture content	每 2 天 10:00
样品采集 Sample collection	每 4 天 16:00

注:(1)当温度低于 60℃时,不再向物料中补充水分;每次采样 500 g 左右;每次搅拌曝气时间持续 5 min;(2)MEFB:多元高效发酵菌剂;(3)MEFB:BDW=多元高效发酵菌剂:麸皮干重。

Note:(1)When the temperature is lower than 60℃, no more water is added to the material; each sample is about 500 g; each stirring and aeration time lasts 5 min;(2)MEFB: Multiple efficient fermentation bacteria;(3)MEFB:BDW=Multiple efficient fermentation bacteria: Bran dry weight.

1.4.2 物料 C/N 比值调节

(1)补充氮量=((配比物料总碳重/碳氮比-配比物料总氮重)/25)/尿素含氮量;(2)配比物料总碳重=(添加农业物料总干重×农业物料有机碳含量+牛粪总干重×牛粪有机碳含量);(3)配比物料总氮重=(添加农业物料总干重×农业物料全氮含量+牛粪总干重×牛粪有机碳含量)。

1.4.3 物料需水量计算

(1)总需水量=总发酵物料干重×60%-(配比农业物料总干重×农业物料含水率+配比牛粪总干重×牛粪含水率);(2)配比农业物料总干重=总发酵物料干重×X/(X+Y);(3)配比牛粪总干重=总发酵物料干重×Y/(X+Y)。

1.5 指标测定方法

1.5.1 物理指标的测定 (1)温度:采用 ST 数字温度计;(2)含水率:采用烘干法测定。

1.5.2 化学指标的测定 (1)全氮、全磷、全钾、有机质:采用 NY525-2012 测定^[13];(2)pH(1:10):采用 pH 计(PHS-3E)测定。

1.5.3 生物指标的测定 (1)纤维测定:采用 Van soest 法测定(ANKOM 2000i 全自动纤维分析仪);(2)粪大肠菌群数:采用 GB/T 19524.1 测定^[14];

(3)蛔虫死亡率:采用 GB/T 19524.2 测定^[15];(4)重金属:石墨炉原子吸收光谱法;(5)腐熟度测定:腐熟发酵肥料与高压灭菌水以 1:10 质量比浸提 24 h,以获取浸提液,在直径为 90 mm 培养皿中铺一张直径为 90 cm 的无菌圆滤纸,加入腐熟发酵肥料浸提液 6 mL,并放入 10 粒油菜种子,28℃恒温培养 72 h,统计种子发芽率,并用 0.01 mm 游标卡尺测定发芽种子根长,计算种子发芽指数(GI),根据如下公式^[16]:

种子发芽率(%)=发芽种子数/种子总数×100%

$GI(\%) = (\text{腐熟发酵肥料浸提液的种子发芽率} \times \text{种子根长}) / (\text{蒸馏水的种子发芽率} \times \text{种子根长}) \times 100\%$ 。

1.6 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2012 软件和 SPSS 17.0 软件处理与分析,并进行显著性检验,显著性水平为($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 好氧腐熟发酵有机肥温度和水分变化

好氧腐熟发酵过程是在微生物的作用下持续分解有机质,并产生大量热量的过程,此过程可通过温度直观反应。温度升高,表明微生物活性增大,分解加快,反之,温度降低,微生物活性减弱,分解缓慢。由图 2a 可知,各处理腐熟发酵均经过升温期、高温期及降温期 3 个过程,且 60℃以上温度均超过 14 d,符合牲畜粪便无害化处理 GB/T 7959-2012 卫生标准^[17]。T1 处理升温迅速,第 2 天温度为 66℃,第 7 天达到最高温,为 77℃,高温发酵保持 6~15 d,T3 处理次之,第 2 天温度为 64℃,第 8 天达到温度峰值,为 75.5℃,高温发酵保持 10~19 d,T2 处理升温最慢,第 2 天温度为 62℃,第 9 天温度最高,为 75.5℃,高温发酵保持 8~19 d;整个发酵过程中 T1 处理发酵进程最快,T2 与 T3 处理相当,主要原因可能是玉米秸秆结构疏松多空,质地较松软,通气性强,木质纤维降解较快,而葡萄与枸杞枝条结构紧实,木质化程度高,质地紧密,导致大分子物质降解缓慢。

水分对于好氧腐熟发酵过程中微生物活动、温度维持与调节及氧气供应至关重要。有关文献指出,初始含水率在 55%~65% 时,好氧腐熟发酵中微生物的活性最好,腐熟效果最佳^[18]。由图 2b 知,T1、T2 及 T3 处理初始含水率分别为 64.94%、63.39%、56.70%,符合好氧腐熟发酵的最优条件。整个发酵过程中各处理水分含量均呈下降趋势,且

各处理间差异不显著,水分下降是由于发酵过程中有机物料持续分解产生水分与热量,在高温发酵和曝气通风时蒸发损失,而较低的水分则不利于堆体发酵,因此,当堆体温度高于 60℃ 时,应适当调节堆体水分在 60% 左右,以满足微生物分解需要。直至腐熟完成, T1、T2 及 T3 处理含水率呈现 T2>T1>T3, 分别为 28.21%、29.58%、30.75%,符合 NY525-2012 有机肥标准^[13]。

2.2 好氧腐熟发酵有机肥化学指标的变化

2.2.1 好氧腐熟发酵有机肥有机质变化

有机质含量反映微生物对纤维素、半纤维素的分解能力。由图 3 可知,各处理有机质含量整体呈现下降趋势,这是由于好氧腐熟发酵过程中,有机质作为微生物活动及代谢所依赖的碳源与能源,一部分被分解生

成 H₂O 和 CO₂,随之挥发损失,释放出的能量被微生物所吸收,而另一部分则以稳定的有机质形式存在^[19]。在整个发酵过程中 T2 处理有机质含量基本高于 T1、T3 处理;腐熟完成后, T1、T2 及 T3 处理有机质含量呈现 T2>T1>T3,其含量分别为 47.80%、46.07%、45.47%,符合 NY525-2012 有机肥标准^[13];与第 1 天相比, T1、T2 及 T3 处理分别降低 37.81%、41.74%、31.07%,各处理均有显著性降低。

2.2.2 好氧腐熟发酵有机肥全氮、全磷、全钾的变化

全氮含量既是衡量有机废弃物腐熟发酵有机肥的参考标准,也是影响发酵过程中微生物活动的重要因素之一。由图 4a 可知, T1、T2、T3 处理全氮含量在试验期间整体呈现先下降后上升的趋势。随着微生物活动加快,有机大分子降解迅速,物料温度逐渐上升,降解形成的有机酸、NH₃、CO₂ 及 H₂O 随之挥发,造成氮含量的下降,后期由于堆体质量持续下降,温度逐渐降低,降解转化形成的含氮物质以铵态氮等不易挥发形态存在,挥发减少,堆体浓缩效应导致氮含量呈上升趋势。腐熟完成后, T1、

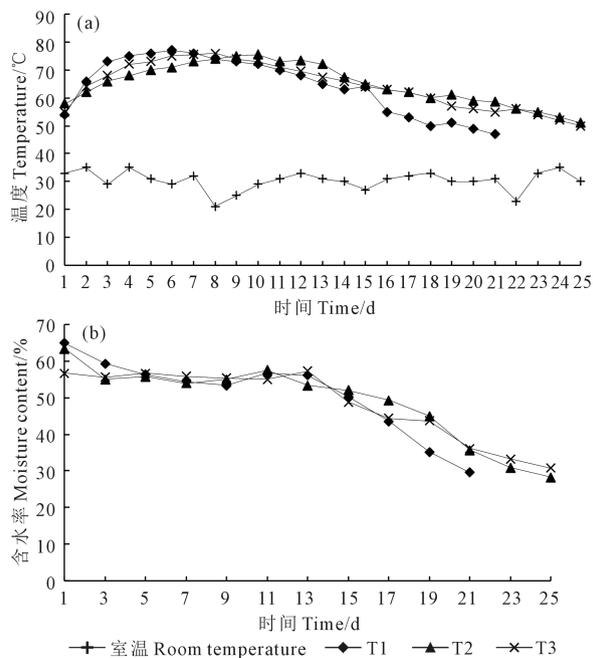


图 2 腐熟发酵有机肥温度和含水率变化

Fig.2 Fermentation temperature and water content change

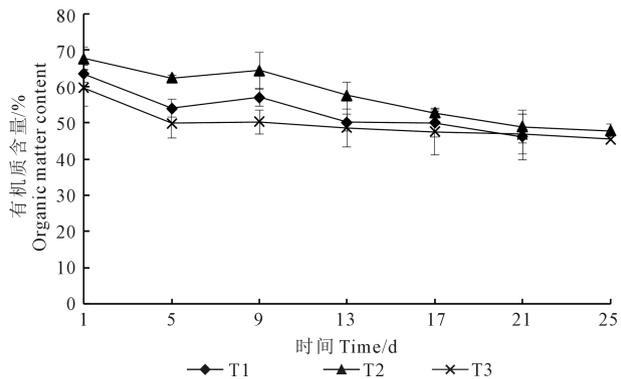


图 3 腐熟发酵有机肥有机质含量变化

Fig.3 Changes of organic matter in decomposed and fermented organic fertilizer

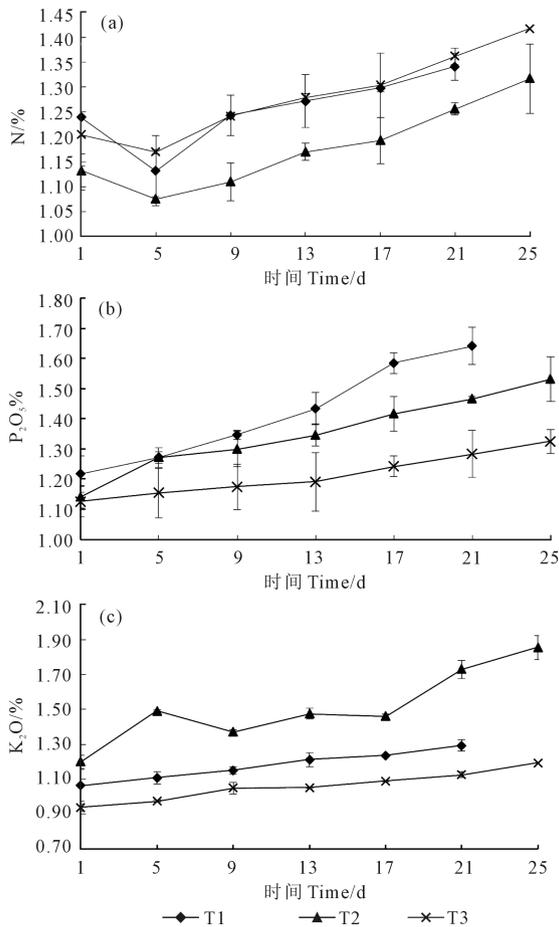


图 4 腐熟发酵有机肥全氮、全磷、全钾含量变化

Fig.4 Changes of total nitrogen, total phosphorus and total potassium content of decomposed and fermented organic fertilizer

T2 及 T3 处理全氮含量呈现 $T3 > T1 > T2$, 且与第 1 天相比, T1、T2 及 T3 处理全氮含量分别提高 8.23%、16.34%、17.59%, 各处理增加不显著。

由图 4b 和图 4c 可知, 各处理试验期间全磷和全钾含量均呈现逐渐上升的趋势。在发酵过程中, 磷素形态会发生相应变化, 但磷酸盐等性质稳定, 难以挥发与移动, 并且堆体浓缩效益使得磷含量总体呈现上升趋势。腐熟完成后, T1、T2 及 T3 处理全磷含量呈现 $T1 > T2 > T3$, 与第 1 天相比, T1、T2 及 T3 处理全磷含量分别提高 34.43%、34.21%、17.86%, 其中, T1、T2 处理增加显著, 而 T3 处理增加不显著; 整个过程中各处理全钾含量表现为 $T2 > T1 > T3$, 钾素与磷素性质一致, 在整个发酵过程中, 不会因为温度提升、形态转换挥发损失, 其含量的提升与堆体质量减少所引起的浓缩效应密切相关。腐熟完成后, T1、T2 及 T3 处理全钾含量呈现 $T2 > T1 > T3$, 与第 1 天相比, T1、T2 及 T3 处理全钾含量分别显著提高 21.70%、54.17%、26.60%。

2.2.3 好氧腐熟发酵有机肥 pH 值的变化 pH 值的变化主要是由好氧腐熟发酵过程中物料发酵所产生的有机酸、氨类成分及其蛋白质所共同引起的^[20]。由图 5 可知, 各处理 pH 值的变化基本呈现为先升高后降低的趋势。pH 值上升是由于发酵前期物料分解加快, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 产生相对较多, 导致 pH 值上升; pH 值下降是由于发酵后期有机大分子降解产生有机酸与无机酸, 同时硝化细菌活性增强, 铵态氮转变为硝态氮, 引起 pH 值下降。腐熟完成后, T1、T2 及 T3 处理 pH 值呈现 $T3 > T2 > T1$, 与第 1 天相比, T1、T2 及 T3 处理 pH 值分别降低 6.63%、14.34%、9.78%, 但降低均不显著, 各处理 pH 值均低于 8.5, 符合 NY525-2012 有机肥标准^[13]。

2.3 好氧腐熟发酵有机肥生物指标的变化

2.3.1 好氧腐熟发酵有机肥纤维素含量变化 各处理好氧腐熟发酵过程中纤维素、半纤维素及木质素含量的变化反映出微生物对其的分解程度, 也进一步反映出好氧发酵有机肥过程中秸秆类物料的降

解及腐熟程度。由图 6 可知, 经过好氧腐熟发酵, 各处理纤维素、半纤维素及木质素均有一定降低。与第 1 天相比, 腐熟完成后, 各处理纤维素降解程度呈现 $T3 > T1 > T2$, 分别降低 27.71%、9.79%、7.41%, 其中, T3 处理降低显著, 而 T1、T2 处理降低不显著; 各处理半纤维素降解程度呈现 $T1 > T2 > T3$, 分别降低 47.70%、42.81%、5.83%, T1、T2 处理降低显著, T3 处理降低不显著; 各处理木质素降解程度呈现 $T2 > T3 > T1$, 分别显著降低 41.28%、20.39%、19.39%。上述结果表明, 纤维素降解菌与霉菌的接入, 促进了有机物料表面蜡质层的破坏与分解, 木质纤维降解迅速, 极大加快了腐熟发酵进程。

2.3.2 好氧腐熟发酵有机肥粪大肠杆菌群数与蛔虫死亡率变化 由表 4 可知, 腐熟完成后, T1、T2 及 T3 处理粪大肠杆菌群数均显著降低, 且 $T3 > T2 > T1$, 与第 1 天相比, T2 及 T3 处理分别降低 3000.00%、1983.33%, 而 T1 处理未检测出具体菌群数, 但各处理均低于有机肥中粪大肠杆菌群数限定值, 符合腐熟发酵有机肥标准。T1、T2 及 T3 处理腐熟后蛔虫死亡率均显著提高, 且 $T3 > T1 > T2$, 与第 1 天相比, 分别提高 72.16%、90.39%、108.48%, 符合 NY525-2012 有机肥标准^[13]。

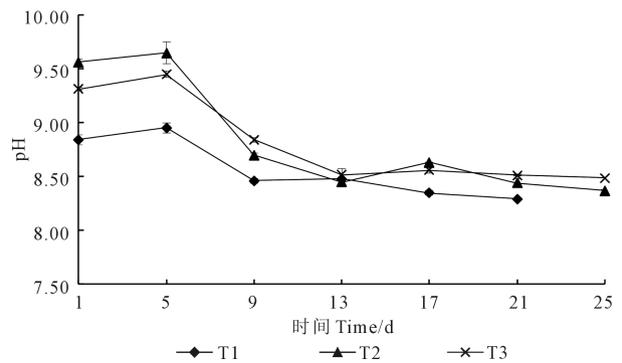


图 5 腐熟发酵有机肥的 pH 值变化

Fig.5 Changes of pH value of decomposed and fermented organic fertilizer

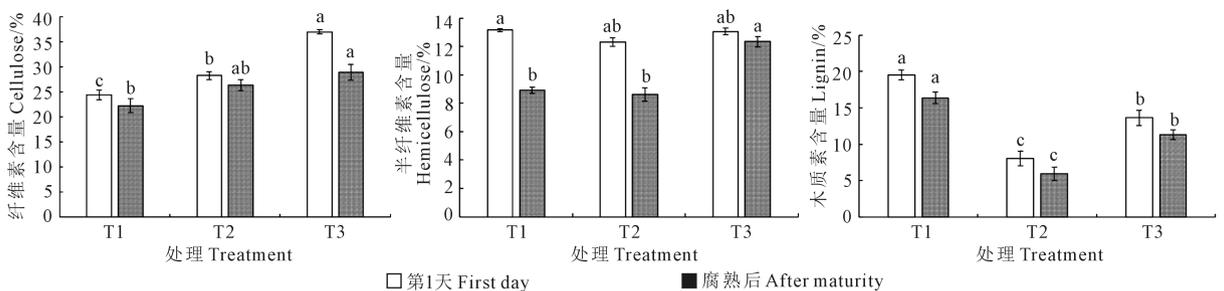


图 6 腐熟发酵有机肥的纤维素含量变化

Fig.6 Variation of cellulose content in fermented organic fertilizer

2.3.3 好氧腐熟发酵有机肥重金属含量变化 由表5可知,好氧发酵腐熟后有机物料中 Cd、Cr、As、Pb 含量均呈上升趋势,且均符合 NY525-2012 有机肥标准^[13]。腐熟后,Cd、Cr、As、Pb 含量呈现 T2>T3>T1,与第1天相比,T1、T2、T3 处理 Cd 含量分别增加 4.93%、7.54%、4.89%,增加不显著;Cr 含量分别增加 8.41%、13.68%、17.66%,T2、T3 处理增加显著,而 T1 处理增加不显著;As 含量腐熟第1天,T2 处理含量最高,为 3.36 mg·kg⁻¹,T1、T3 处理次之,腐熟后,T1、T2、T3 处理 As 含量较第1天分别增加 35.24%、40.48%、38.30%,增加显著;腐熟完成后,T1、T2、T3 处理 Pb 含量分别为 0.982 mg·kg⁻¹、1.041 mg·kg⁻¹、0.993 mg·kg⁻¹,与第1天相比,依次增加 67.01%、106.53%、82.28%,增加显著。

表5 腐熟发酵有机肥重金属变化

Table 5 Changes of heavy metals in rotten fermentation organic fertilizer

处理 Treatment	Cd/(mg·kg ⁻¹)		Cr/(mg·kg ⁻¹)		As/(mg·kg ⁻¹)		Pb/(mg·kg ⁻¹)	
	第1天 First day	腐熟后 After maturity						
T1	0.771	0.809	14.15	15.34	3.15	4.26	0.982	1.64
T2	0.783	0.842	15.28	17.37	3.36	4.72	1.041	2.15
T3	0.779	0.817	14.27	16.79	3.29	4.55	0.993	1.81
有机肥料标准 (NY 525-2012)	≤3		≤150		≤15		≤50	
Organic fertilizer standard								

2.3.4 好氧腐熟发酵有机肥浸提后油菜发芽指数变化 油菜种子发芽指数(GI)可直接反映堆体物料的腐熟程度,当 GI>50%,认为物料达基本腐熟,当 GI 达 80%~85%,认为物料完全腐熟,对植物没有毒害^[21]。图7是腐熟过程中各处理物料浸提后的油菜发芽指数。结果表明,随腐熟进程的推进,各处理物料浸提液发芽指数呈现逐步上升趋势。1~5 d 时,各处理发酵缓慢,发芽指数变化不显著,此后,各处理发酵迅速,发芽指数有显著性上升,且整个发酵过程中各处理发芽指数高低表现为 T1>T3>T2。好氧腐熟发酵后 T1、T2 及 T3 处理发芽指数分别为 85.22%、80.19%、80.25%,均超过 80.00%,达到完全腐熟标准,对植物无害,但种子发芽指数不高。这可能与腐熟发酵后盐分含量较高、引起种子毒害有关。

3 讨论

3.1 好氧腐熟发酵有机肥物理性状的变化

温度是好氧腐熟发酵最直接和敏感的指标^[22],也是影响腐熟发酵工艺过程及微生物活动的关键因素^[23],温度过低,有机大分子分解缓慢,腐熟不完

表4 腐熟发酵粪大肠菌群与蛔虫死亡率变化

Table 4 Changes in the mortality of fermented fecal coliforms and aphids in decomposed fermented

时间 Time	粪大肠菌群数 Number of fecal coliforms (MPN·g ⁻¹)			蛔虫死亡率 Aphid mortality/%		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
第1天 First day	64.00	93.00	75.00	56.42±0.03b	50.97±0.02a	47.17±0.09c
腐熟后 After maturity	<3.00	3.00	3.60	97.13±0.01a	97.04±0.06bc	98.34±0.07ab

注:同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05);数值为平均数±标准差。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between treatments (P<0.05); the value was mean ± standard error.

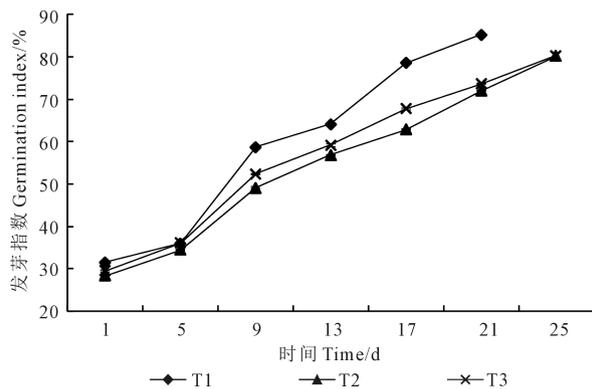


图7 有机肥发芽指数变化

Fig.7 Organic fertilizer germination index change

全,过高则会抑制或杀死部分有益微生物,使得腐熟进程推迟或停止^[12]。根据 GB/T 7959-2012 粪便无害化卫生标准,机械堆肥时,堆体温度≥50℃至少持续 2 d 以上^[17],本试验中各处理堆体温度≥50℃,时间保持 19~25 d,均达到 GB/T 7959-2012 无害化处理要求^[17]。不同温度阶段对堆体腐熟发酵影响各不相同,有研究者发现,当温度在 55℃~60℃时,堆体内部微生物数量、种类及活跃程度最大,而温度在 65℃~70℃时,固体废物腐熟处理最佳^[24-25];黄国锋等^[26]、李国学等^[27]研究表明,当腐

熟发酵堆体温度高于 55℃ 并维持 3 d 以上时,堆体中绝大多数病原菌可被杀死,而在本研究中,3 个处理 55℃ 以上温度维持在 15~23 d,发酵温度均在 60℃~70℃,与前人研究结果一致,实现了废弃物的无害化处理。在腐熟发酵过程中,水分在菌群移动、发酵微生物代谢活动及腐熟过程中发挥重要作用^[28]。Macgregor 等^[29]研究认为,发酵最佳含水率为 50%~60%,对微生物分解代谢最有利。本研究中,温度高于 60℃ 时,含水率均在 55%~60%,后期由于微生物降解接近结束,当温度低于 60℃ 时,停止罐内水分调节,水分含量逐渐降低,且含水率均低于 30%,符合 NY525-2012 有机肥标准^[13]。

3.2 好氧腐熟发酵有机肥化学性状的变化

微生物活动主要以有机质为能源动力,在持续高温发酵过程中微生物活动剧烈,代谢消耗大量碳水化合物,有机质含量逐渐降低^[30]。在本研究中,各处理有机质含量均呈下降趋势,降幅为 31.07%~41.74%,下降显著,与已有研究结果一致^[5,10,12,21]。有机废弃物好氧腐熟发酵有机肥的目的是在达到无害化处理前提下,确保养分不被损失,进一步提高有机肥品质。大量研究表明,有机废弃物发酵能提高氮、磷、钾含量且形态有一定变化^[10,12,18,31-34]。本研究结果显示,与初始含量相比,腐熟完成后各处理全氮含量增加 6.01%~17.59%,全磷含量增加 17.86%~34.43%,全钾含量增加 21.70%~54.17%,与前人研究趋势一致,这是由于发酵前期氮素形态转变,大分子物质降解生成 CO₂、水及氨气,温度逐渐升高,主要以氨气形式挥发损失,导致全氮含量降低,后期由于硝化细菌活性增强,产生的硝酸盐类与铵盐类物质得到有效储存,并且堆体质量浓缩,全氮含量整体呈上升趋势,而全磷、全钾在整个发酵过程中虽有形态转换,但不会挥发损失,浓缩效益促进了磷、钾含量的持续上升^[32-33]。整个腐熟发酵过程中,pH 值变化基本趋势为先上升后下降,上升可能是由于随着温度的升高,微生物加快分解蛋白质类有机物产生了氨类物质引起;下降可能是由于发酵后期氨的挥发及蛋白类物质的降解所导致的,这与曹云^[32],刘忠华^[20],鲍艳宇等^[37]研究结果一致。

3.3 好氧腐熟发酵有机肥生物性状的变化

木质纤维素是一种分布极广且含量最为丰富的可再生高能聚合物,据统计,每年可再生木质纤维素折算成能量与人类年消耗能量的 20 倍相当^[39-40]。纤维主要存在于木材和秸秆中,数量巨大但自然降解缓慢,利用率虽低,因此,适宜的 C/N

比、纤维降解菌与霉菌的接入可加快好氧腐熟发酵进程,加速高能聚合物降解,腐熟更完全。在试验期间,木质纤维的变化直接反映了纤维素降解效率与发酵有效性^[38,40]。与此同时,木质纤维能够有效减少全氮损失,并增加腐熟产品中腐殖酸含量。本研究发现,通过接种菌剂与 C/N 比调节,在自制全封闭旋转通气加氧装置中进行好氧腐熟发酵,腐熟完成后各处理纤维素降解率为 7.41%~27.71%,半纤维素降解率为 5.83%~47.70%,木质素降解率为 19.39%~41.28%。这与李帆^[38],尹静等^[40]研究结果一致。粪大肠菌群数、蛔虫死亡率作为腐熟发酵成品有机肥的重要参考标准,李国学等^[27]研究发现,发酵温度持续 3 d 以上时,能够杀死多数病原菌,在本研究中,好氧腐熟完成后,各处理粪大肠菌群数均小于 100 MPN·g⁻¹,蛔虫死亡率均大于 95%,符合有机肥标准。韩建东等^[41]研究发现,堆体发酵过程中物料重金属含量相比腐熟前增加 1.6~22 倍。本研究中,好氧腐熟后 Cd、Cr、As、Pb 含量增加 4.89%~106.53%,但均未超标,与前人研究结果一致^[41-43]。这是由于好氧发酵过程中在微生物作用下有机质大量分解与矿化,C、H、S 等的有机物进而降解损失,腐熟后水分降低,肥料体积变小,导致重金属在肥料中浓缩,重金属含量增加^[41]。

4 结 论

本研究用植物秸秆替代风化煤与糠醛渣进行好氧发酵,腐熟完成后,T1、T2 及 T3 处理有机质与温度首先达标,水分、pH、粪大肠杆菌群数、蛔虫死亡率及重金属含量轻易达标,N+P₂O₅+K₂O 在 3.94%~4.70%,接近 NY525-2012 有机肥标准,纤维素、半纤维素及木质素降解明显;腐熟完成后,含水率、全氮含量、pH 值、纤维素降解率及蛔虫死亡率均以 T3 处理最优,而有机质含量、全钾含量、木质素降解率则以 T2 处理最优,全磷含量、半纤维素降解率、粪大肠菌群数、种子发芽率及重金属含量以 T1 处理最优。综上所述,玉米秸秆配比最佳、葡萄枝条配比次之,枸杞枝条配比发酵最慢。

参 考 文 献:

- [1] 国家发展和改革委员会.中国资源综合利用年度报告(2014)[J].再生资源与循环经济,2014,7(10):3-8.
- [2] 薛智勇,王卫平,朱凤香,等.复合菌剂和不同调理剂对猪粪发酵温度及腐熟度的影响[J].浙江农业学报,2005,17(6):354-358.
- [3] 田智辉,王亚妮,邹超,等.牛粪和秸秆好氧发酵堆肥的初始条件研究[J].中国土壤与肥料,2018,278(6):198-203.
- [4] Fukumoto Y, Inubushi K. Effect of nitrite accumulation on nitrous oxide emission and total nitrogen loss during swine manure composting

- [J].*Soil Science & Plant Nutrition*,2010,55(3):428-434.
- [5] 吴伟祥,李丽劫,吕豪豪,等.畜禽粪便好氧堆肥过程氧化亚氮排放机制[J].*应用生态学报*,2012,23(6):1704-1712.
- [6] 孟国欣,查同刚,巩潇,等.污泥添加园林废弃物堆肥过程参数变化及腐熟度综合评价[J].*生态环境学报*,2018,27(8):1538-1546.
- [7] 赵洪颜,李杰,刘晶晶,等.沼液堆肥化与牛粪堆肥化的发酵特性及腐熟进程[J].*农业环境科学学报*,2012,31(11):2272-2276.
- [8] Gajalakshmi S, Abbasi S A. Solid waste management by composting: state of the art [J].*Critical Reviews in Environmental Science and Technology*,2008,38(5):311-400.
- [9] 李文玉,栾亚宁,孙向阳,等.接种外源微生物菌剂对园林废弃物堆肥腐熟的影响[J].*生态学杂志*,2014,33(10):2670-2677.
- [10] 张玉凤,田慎重,边文范,等.牛粪和玉米秸秆混合堆肥好氧发酵菌剂筛选[J].*中国土壤与肥料*,2019,(3):172-178.
- [11] 孙旭,汝超杰,苏良湖,等.3种秸秆腐熟剂微生物组成及其腐熟效果[J].*江苏农业科学*,2018,46(3):212-215.
- [12] 曲继松,张丽娟,朱倩楠,等.微生物菌剂对枸杞枝条粉发酵堆体腐熟效果的影响[J].*环境科学研究*,2019,32(2):332-339.
- [13] 中华人民共和国农业部.中华人民共和国农业行业标准 NY525-2012 有机肥料[S],2011.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 19524.1-2004,肥料中粪大肠菌群的测定[S],2004.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 19524.2-2004,肥料中蛔虫卵死亡率的测定[S],2004.
- [16] 张亚宁.堆肥腐熟度快速测定指标和方法的建立[D].北京:中国农业大学,2004.
- [17] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会.GB/T 7959-2012 粪便无害化卫生要求[S],2012.
- [18] Abbasi S A. Solid waste management by composting: state of the art [J].*Critical Reviews in Environmental Science & Technology*,2008,38(5):311-400.
- [19] 张建华,田光明,姚静华,等.不同调理剂对猪粪好氧堆肥效果的影响[J].*水土保持学报*,2012,26(3):131-135.
- [20] 刘忠华,赵帅翔,刘会芳,等.条垛堆肥-蚯蚓堆肥联合处理对堆肥产品性状的影响[J].*中国土壤与肥料*,2019,(4):200-207.
- [21] 牛俊玲,李彦明,陈清.固体有机废弃物肥料化利用技术[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [22] 李季,彭生平.堆肥工程使用手册[M].北京:化学工业出版社,2011.
- [23] 冯海萍,曲继松,杨冬艳,等.C/N 比对枸杞枝条基质化发酵堆体腐熟效果的影响[J].*新疆农业科学*,2014,51(6):1112-1118.
- [24] Storey S, Chualain D N, Doyle O, et al. Comparison of bacterial succession in green waste composts amended with inorganic fertiliser and waste water treatment plant sludge[J].*Bioresource Technology*,2015,179:71-77.
- [25] Petric I, Helic A, Avdic E A. Evolution of process parameters and determination of kinetics for co-composting of organic fraction of municipal solid waste with poultry manure[J].*Bioresource Technology*,2012,117:107-116.
- [26] 黄国锋,钟流举,张振铨,等.有机固体废弃物堆肥的物质变化及腐熟度评价[J].*应用生态学报*,2003,14(5):813-818.
- [27] 李国学,李玉春,李彦富.固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J].*农业环境科学学报*,2003,22(2):252-256.
- [28] Rynk R. Monitoring moisture in composting systems [J].*Biocycle*,2000,1(10):53-57.
- [29] Macgregor S T, Miller F C, Psarianos K M, et al. Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature.[J].*Applied and Environmental Microbiology*,1981,41:1321-1330.
- [30] 赵建荣,高德才,汪建飞,等.不同 C/N 下鸡粪麦秸高温堆肥腐熟过程研究[J].*农业环境科学学报*,2011,30(5):1014-1020.
- [31] 黄晓凤,杨旭生,王启贵,等.碳氮比对鹅粪渣-玉米秸秆混合堆肥效果的影响[J].*西南农业学报*,2019,32(5):1127-1132.
- [32] 曹云,常志州,黄红英,等.畜禽粪便堆肥前期理化及微生物性状研究[J].*农业环境科学学报*,2015,34(11):2198-2207.
- [33] 竹江良,刘晓琳,李少明,等.两种微生物菌剂对烟草废弃物高温堆肥腐熟进程的影响[J].*农业环境科学学报*,2010,29(1):194-199.
- [34] 刘超,王若斐,操一凡,等.不同碳氮比下牛粪高温堆肥腐熟进程研究[J].*土壤通报*,2017,48(3):662-668.
- [35] 牛俊玲,梁丽珍,兰彦平.板栗壳和牛粪混合堆肥的物质变化特性研究[J].*农业环境科学学报*,2009,28(4):824-827.
- [36] 赵玉娇,贺萌,呼世斌,等.牛粪和红薯秸秆静态高温堆肥研究[J].*农机化研究*,2012,34(12):218-222.
- [37] 鲍艳宇,周启星,颜丽,等.畜禽粪便堆肥过程中各种氮化化合物的动态变化及腐熟度评价指标[J].*应用生态学报*,2008,19(2):374-380.
- [38] 李帆,王静,武际,等.尿素硝酸铵调节碳氮比促进小麦秸秆堆肥腐熟[J].*植物营养与肥料学报*,2019,25(5):832-840.
- [39] Himmel M E, Ding S Y, Johnson D K, et al. Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production[J].*Science*,2007,315(5813):804-807.
- [40] 尹静,刘悦秋,于峰,等.一株木质素降解菌的筛选鉴定及其在堆肥中的应用[J].*中国土壤与肥料*,2019,(3):179-185.
- [41] 韩建东,万鲁长,杨鹏,等.猪粪渣发酵床垫料堆肥的肥效[J].*中国土壤与肥料*,2017,(2):126-129.
- [42] 尹晓明,王荣江,徐潇潇,等.猪粪堆肥过程中养分和重金属含量的动态变化[J].*植物营养与肥料学报*,2019,25(2):254-263.
- [43] 鲍艳宇,娄翼来,颜丽,等.不同畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 的变化特征及其影响因素分析[J].*农业环境科学学报*,2010,29(9):1820-1826.
- [44] 李冉,赵立欣,孟海波,等.有机废弃物堆肥过程重金属钝化研究进展[J].*中国农业科技导报*,2018,20(1):121-129.