

不同原料好氧堆肥过程中碳转化特征及腐殖质组分的变化

李孟婵,张鹤,杨慧珍,张健,张春红,王友玲,邱慧珍

(甘肃农业大学资源与环境学院/甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃兰州730070)

摘要:为探讨不同畜禽粪便(牛粪和羊粪)为主料,添加不同作物秸秆(玉米秸秆和小麦秸秆)为辅料在堆肥过程中的碳转化特征及腐殖质组分的变化规律,采用条垛式好氧堆肥研究了不同原料组合(T1:牛粪+玉米秸秆;T2:牛粪+小麦秸秆;T3:羊粪+玉米秸秆;T4:羊粪+小麦秸秆)在堆肥过程中总有机碳(TOC)、可溶性有机碳(DOC)和腐殖酸含量的碳转化特征以及胡敏酸(HA)和富里酸(FA)的含量变化规律。结果表明:所有处理的TOC含量随堆肥过程的推进而下降,至堆肥结束时T1~T4处理的TOC含量分别下降了22.1%、21.5%、23.6%、23.7%;DOC含量也随堆肥过程的推进而降低,至堆肥第15天时降低至最低,T1~T4处理分别降低至6.57、5.47、4.73 g·kg⁻¹和4.93 g·kg⁻¹,但不同处理的变化规律明显不同:以牛粪为主料的T1和T2处理在第10天以前几乎无变化,而以羊粪为主料的T3和T4处理从一开始就迅速下降至最低值,至堆肥第15天时T1~T4处理的降幅分别为32.4%、36.5%、51.8%和39.3%;总腐殖酸(THA)含量的增加始于堆肥的第10天,第15天时达到最高值,最高值分别为25.5%、22.5%、29.8%和30.0%,整个堆肥过程中T3和T4处理显著高于T1和T2处理($P<0.05$)。随堆肥过程的推进,游离腐殖酸(FHA)含量逐渐降低,堆肥结束时降幅为7.6%~18.0%;HA含量逐渐增加,至堆肥结束时增幅为65.4%~197.8%,堆肥过程提高了胡敏酸态碳。T3和T4处理的FHA和HA含量在整个堆肥过程中始终高于牛粪组合T1和T2处理。FA含量随堆肥进程推进逐渐下降,至堆肥结束时降幅为44.9%~54.9%。羊粪中较高含量的纤维素、半纤维素和HA可能是堆肥产品中THA和HA含量较高的主要原因,在以牛粪为主料的堆肥配料中适当加入羊粪可以提高堆肥产品的腐殖酸含量和胡敏酸态碳。

关键词:好氧堆肥;碳转化;腐殖酸;有机碳;胡敏酸;富里酸

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A

Effects of different compost materials on carbon transformation and the change of humus during composting process

LI Meng-chan, ZHANG He, YANG Hui-zhen, ZHANG Jian, ZHANG Chun-hong,
WANG You-ling, QIU Hui-zhen

(College of Resources and Environmental Sciences/Gansu Provincial Key Lab of AridLand Crop Science,
Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The carbon transformation and change of humus during composting with different raw materials were studied under aerobic composting condition. Two kinds of excrements of livestock, cow dung, and sheep dung were combined with two types of straws, maize and wheat, as treatments. The four treatments includes: T1—cow dung+maize straw; T2—cow dung + wheat straw; T3—sheep dung + maize straw; T4—sheep dung + wheat straw. The results showed that the content of total organic carbon (TOC) of all treatments decreased throughout the composting process. The TOC content of T1 to T4 decreased by 22.1%, 21.5%, 23.6% and 23.7%, respectively. The changes in dissolved organic carbon(DOC) were consistent with TOC, and dropped to the minimum at day 15 as 6.57, 5.47, 4.73 g·kg⁻¹ and 4.93 g·kg⁻¹, respectively, but showed the different characteristics. T1 and T2 treatments of cow

收稿日期:2018-03-01

修回日期:2019-02-31

基金项目:国家重点研发计划“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”专项“农业废弃物资源化利用机制”项目(2017YFD0800200);白银市白银区科技局项目“生物有机肥的研制及其对保护地蔬菜的生物效应研究”(2014-5N)。

作者简介:李孟婵(1990-),女,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为农业废弃物资源化利用。E-mail:lime@st.gsau.edu.cn

通信作者:邱慧珍(1961-),女,上海市人,教授,博士生导师,主要从事植物营养与有机肥料的教学和科研工作。E-mail:hqzqiu@gsau.edu.cn

sheep dung composters showed no changes until day 10 but the DOC of T3 and T4 treatments with sheep dung composts decreased at the beginning of the composting. By the 15th day of composting, the decreases of T1 ~ T4 treatments were 32.4%, 36.5%, 51.8% and 39.3%, respectively. The total humic acid (THA) in composting started increasing at day 10 and continued increasing until reached maximum at day 15. The THA in T1-T4 increased to 25.5%, 22.5%, 29.8%, and 30.0%, respectively. The THA of T3 and T4 treatments were significantly higher than that of T1 and T2 ($P < 0.05$). As the composting process progressed, the content of free humic acid (FHA) gradually decreased, and decreased by 7.6% ~ 18.0% at the end of composting. The content of HA gradually increased, and increased by 65.4% ~ 197.8% at the end of composting. The percentage carbon in HA increased during the composting process. The contents of FHA and HA in T3 and T4 treatments were higher than those in T1 and T2 treatments throughout the composting process. FA content decreased gradually with the composting process, and decreased by 44.9% ~ 54.9% at the end of composting. The high content of cellulose and hemicellulose in sheep dung may contributed to the high content of free humic acid in composting process. It may suggest that more sheep dung should be added to increase the percentage carbon in HA forms and improve the quality of compost products.

Keywords: aerobic composting; carbon transformation; humic acid; organic carbon; humus acid; fulvic acid

随着我国经济的快速发展和居民对肉类需求的日趋增加,现代农业及畜禽养殖产业迅猛发展,随之产生的农业废弃物对环境造成的影响也日趋严重^[1]。据估算,全国每年产生的畜禽粪污约 38 亿 t,综合利用率还不到 60%;每年产生的农作物秸秆近 9 亿 t,未利用的达 2 亿 t^[2],这些废弃物已成为农业面源污染的主要来源^[3]。由于未经腐熟的畜禽粪便中一般都会含有大量的病原菌、寄生虫卵和滋生的蚊蝇,因此会引起人、畜传染病的发生,当人和畜禽都患病时还会引发疫情,从而危害人民的健康^[4]。另外,我国耕地质量面临着新一轮的低肥力、高投入和高污染等问题^[5],农业废弃物肥料化利用可避免养分资源的浪费。据估算,38 亿 t 畜禽粪便可提供氮磷钾 5 323 万 t^[6],占我国目前化肥施用总量的 89%^[7]。如能将这部分养分以有机肥的形式归还土壤,可有效减少化肥用量。

好氧堆肥是由微生物分解难降解有机物(如纤维素和木质素),并转化为腐殖质的生物化学过程,可以完成不同有机物料如农作物秸秆和畜禽粪便的生物转化^[8-9],是无害化和资源化处理农牧业废弃物的最有前景的一种方式,也是实现畜禽粪便无害化和资源化处理的最有效途径^[10]。好氧堆肥产品施入农田可以促进农田的可持续利用^[6,11],可补充土壤养分,起到改良土壤环境的作用^[12-13]。

然而,目前我国堆肥产品中存在着质量参差不齐、肥效低等诸多问题^[14]。有机质含量是评价堆肥产品质量的重要指标,腐殖质作为有机质的主要组成部分^[15],是评价堆肥产品质量的重要指标^[16],可溶性有机碳是能被微生物直接利用的碳源,是有机物料中纤维素、半纤维素等组分分解的中间产

物^[17]。因此深入研究不同原料好氧堆肥过程中碳转化特征及腐殖质组分的变化规律,优化堆肥配方和工艺参数,对促进有机肥企业的发展具有十分重要的意义。

堆肥过程中会产生大量的腐殖质类物质:富里酸(Fulvic Acid, FA)、胡敏酸(Humic Acid, HA)和胡敏素(Humin, HM)。胡敏酸和富里酸的含量是决定堆肥质量及腐熟度的重要因素之一,对堆肥产品的品质具有重要意义^[18-20]。研究表明,不同堆肥原料有机质组分存在较大差异,其在堆肥过程中可溶性有机碳及腐殖质组分含量变化趋势也不尽相同^[21-22]。目前,有关好氧堆肥过程中碳转化特征及腐殖质组分变化规律的研究试验多是以单种畜禽粪便与秸秆为原料进行,而对以不同畜禽粪便与秸秆为原料的堆肥过程中碳转化及腐殖质组分变化进行比较分析的研究鲜见报道。本试验以牛粪、羊粪 2 种畜禽的粪便为主原料,以玉米秸秆和小麦秸秆为辅料,对不同原料好氧堆肥过程中总有机碳(TOC)、可溶性有机碳(DOC)和腐殖酸含量的碳转化特征以及腐殖质组分,胡敏酸(HA)和富里酸(FA)含量的变化规律进行了研究,旨在比较不同原料在堆肥过程中碳转化特征及腐殖质组分的变化规律,以期有机肥生产过程中优化配料组合提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

堆肥试验设在白银市白银区四龙镇鑫昊生物科技有限公司,试验区年平均气温约 9℃,6-7 月份平均气温 15~27℃,年均降雨量 181 mm,全年多风,

属典型的大陆性气候。堆肥采用户外堆置方式,于 2017 年 6 月 20 日开始堆肥,周期 35 d。供试原料由肥料厂提供,使用前用切碎机将玉米秸秆切为 2~5 cm 的碎料。堆肥原料的理化性状见表 1。

1.2 试验设计

堆肥试验设置 4 个处理:T1:牛粪+玉米秸秆(C+M);T2:牛粪+小麦秸秆(C+W);T3:羊粪+玉米秸秆(S+M);T4:羊粪+小麦秸秆(S+W)。

各处理的畜禽粪便与秸秆添加量干基相同,用尿素调节 C/N 为 27 ± 0.5 ,堆体初始含水率控制在 $60\% \pm 1\%$,混匀后堆成长 2.5 m,高 1.2 m,宽 2 m 的条堆。堆肥以自然发酵的方式进行,不添加发酵菌剂。人工翻堆,升温 and 高温阶段每 2 d 翻堆一次,降温阶段每 4 d 翻堆一次。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 采样时间与方法 每隔 5 d 采集一次样品,方法为按长度将堆体分为 4 个等距截面,于各截面的 3 个不同深度:表面(0~20 cm),中间(50~70 cm),底部(100~120 cm)进行取样,每层等量取样约 300 g,混匀,每个处理 4 次重复。样品自然风干用于理化性状的测定。

1.3.2 测定项目及方法 总有机碳(TOC)的测定采用重铬酸钾容量法^[23];可溶性有机碳(DOC)的测

定采用重铬酸钾氧化-外加热法^[24];总腐殖酸(THA)的测定采用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾容量法^[25],游离腐殖酸(FHA)的测定采用 1% 氢氧化钠浸提-重铬酸钾容量法^[25];富里酸(FA)、胡敏酸(HA)含量的测定采用焦磷酸钠-氢氧化钠提取重铬酸钾氧化容量法^[26];纤维素的测定采用酸性洗涤硫酸-重铬酸钾氧化法^[27],半纤维素的测定采用 2 mol·L⁻¹ 盐酸水解法^[27];木质素的测定采用醋酸分离硫酸-重铬酸钾氧化法^[27]。

温度测定:每天于 8:00, 12:00, 16:00 分别取样测定 3 次,取 3 次温度的平均值。测温层次与取样层次一致,每层均匀测温 4 次,取其平均值。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行图表绘制和 Spass 23 进行统计分析。

2 结果与分析

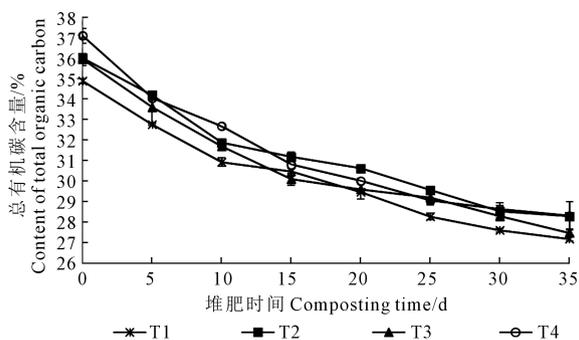
2.1 不同原料堆肥过程中有机碳含量的变化

2.1.1 总有机碳(TOC)含量的变化 碳变化是堆肥过程中最基本的特征,碳作为微生物的能源物质和细胞的主要组成物质,在堆肥过程中被微生物分解利用,转化为气体散失,同时合成腐殖质^[28]。不同处理堆肥过程中 TOC 的变化见图 1。

表 1 不同堆肥原料的理化性质

Table 1 Physical and chemical characters of different compost materials

原料 Raw material	含水率/% Moisture content	总有机碳/% Total organic carbon	全氮/% Total nitrogen	胡敏酸/% Humus acid	富里酸/% Fulvic acid	纤维素/% Cellulose	半纤维素/% Hemicellulose	木质素/% Lignin
羊粪 Sheep dung	62.7	47.91	2.36	2.83	2.74	22.32	21.76	10.62
牛粪 Cow dung	70.5	44.26	2.44	2.02	3.67	20.82	19.49	10.45
小麦秸秆 Wheat straw	6.4	50.32	0.94	1.61	3.15	31.33	20.90	13.10
玉米秸秆 Maize straw	8.2	49.76	1.01	1.35	3.62	30.36	19.18	13.20



注: T1—牛粪+玉米秸秆; T2—牛粪+小麦秸秆; T3—羊粪+玉米秸秆; T4—羊粪+小麦秸秆。下同。

Note: T1—cow dung + maize straw; T2—cow dung + wheat straw; T3—sheep dung + maize straw; T4—sheep dung + wheat straw. The same below.

图 1 堆肥过程中总有机碳(TOC)含量的变化

Fig.1 Changes of total organic carbon during composting

由图 1 可知,在整个堆肥过程中,所有处理的 TOC 含量均呈下降趋势,至堆肥结束时, T1~T4 处理的 TOC 下降幅度分别为 22.1%、21.5%、23.6% 和 23.7%,以小麦秸秆为辅料的处理在堆肥过程中 TOC 含量始终高于玉米秸秆的处理,这可能与不同秸秆的理化性质不同有关。

2.1.2 可溶性有机碳(DOC)含量的变化 DOC 是总碳中最活跃的成分,是微生物在分解有机物料中半纤维素、纤维素等组分的产物^[17],同时它又是微生物所依赖的碳源与能源^[29],为此,我们在测定 TOC 含量变化的同时,测定了不同处理在堆肥过程中 DOC 含量的变化,结果见图 2。

如图 2 所示,各处理 DOC 含量在堆肥过程中呈波动式降低趋势,至堆肥第 15 天时,各处理的 DOC

降至最低值,但不同处理的变化情况明显不同。以牛粪为主料的 T1 和 T2 处理的 DOC 在第 10 天之前几乎无变化,其后迅速下降,而以羊粪为主料的 T3 和 T4 处理的 DOC 则从堆肥一开始就下降,至第 15 天时达最低值,T1~T4 处理至堆肥第 15 天时 DOC 的下降幅度分别为 32.4%、36.5%、51.8%、39.3%,以羊粪+玉米秸秆的 T3 下降幅度最大,这可能与牛羊粪中纤维素和半纤维素的含量不同有关。

从图 2 结果还可以看出,随堆肥过程的推进,不同处理的 DOC 都在下降,但是 T1 的 DOC 始终高于其它处理,至堆肥结束时,T1~T4 处理 DOC 的含量较堆肥开始时分别降低了 31.3%、30.6%、38.1%、33.5%,相较于第 15 天时的最低值,T1 的降幅最小,T3 的降幅最大。

2.2 不同原料堆肥过程中腐殖酸含量的变化

2.2.1 总腐殖酸 (THA) 含量的变化

堆肥过程是一个矿化和腐殖化作用交替进行的过程,堆肥中的腐殖酸由物料中新生成及原有腐殖酸转化而来,原料成分、堆肥时间、堆置工艺、环境条件等都是影响堆肥中腐殖酸含量高低的因素^[30-31]。为此,我们测定了不同处理堆肥过程中腐殖酸含量的变化,结果见图 3。

由图 3 可以看出,堆肥中 THA 含量的增加始于第 10 天,至第 15 天时增大到最高值,随后缓慢下降,至第 30 天降到最低值后趋于稳定。

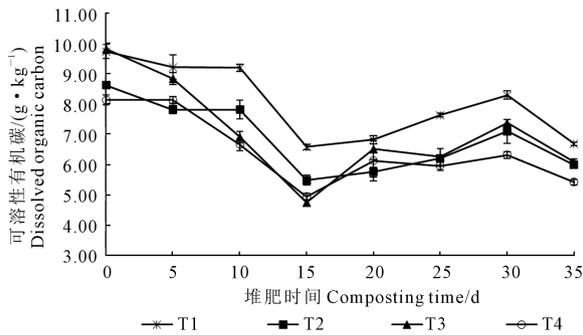


图 2 堆肥过程中可溶性有机碳 (DOC) 含量的变化
Fig.2 Changes of DOC content during composting

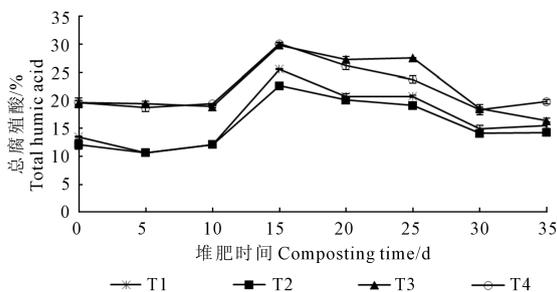


图 3 堆肥过程中总腐殖酸 (THA) 含量的变化
Fig.3 Changes of total content of humic acid (THA) during composting

各处理的 THA 含量从一开始就表现不同,以羊粪为主料的 T3、T4 处理在整个堆肥过程中 THA 含量始终高于牛粪组合的 T1 和 T2 处理。堆肥结束时,与堆肥初期相比,牛粪组合的 T1 和 T2 处理的 THA 含量增加了 14.8% 和 17.0%,羊粪组合的 T3 处理较堆肥开始时降低了 16.4%,T4 处理增加了 1.1%。

2.2.2 游离腐殖酸 (FHA) 含量的变化

不同处理堆肥过程中 FHA 含量的变化情况见图 4。从图 4 可以看出,不同处理的 FHA 含量的变化情况与 THA 类似,从一开始就表现不同,以羊粪为主料的 T3、T4 处理在整个堆肥过程中显著高于牛粪组合的 T1 和 T2 处理 ($P < 0.05$),这是因为 FHA 是腐殖酸的主要组成部分。4 个处理 FHA 含量的变化趋势基本相同,在第 15 天之前持续下降后表现上升,这是因为堆肥初期形成的 THA 不稳定,极易被分解成 FHA。

2.2.3 总腐殖酸/总有机碳 (THA/TOC) 值的变化

好氧堆肥的结果是物料中的有机物向稳定程度较高的腐殖质方向转化,腐殖质在形成的同时也在微生物的作用下进行着分解^[30-31]。为此,本试验在测定腐殖酸含量的基础上分析了 THA/TOC 值的变化,结果见图 5。

由图 5 可以看出,堆肥中 THA/TOC 值的变化与 THA 含量的变化趋势相似。THA/TOC 值的增加同样始于第 10 天,至第 15 天时增大到最高值,随后

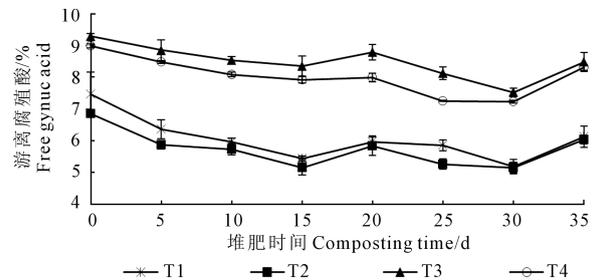


图 4 堆肥过程中游离腐殖酸 (FHA) 含量的变化
Fig.4 Changes of the content of free humic acid (FHA) during composting

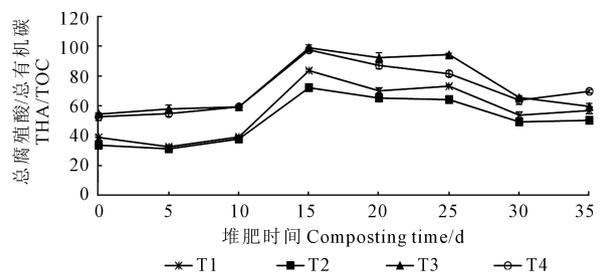


图 5 堆肥过程中总腐殖酸/总有机碳比值的变化
Fig.5 Changes of THA/TOC ratio during composting

缓慢下降,至第 30 天降到最低值后趋于稳定。各处理的 THA/TOC 值从一开始就表现不同,以羊粪为主料的 T3、T4 处理在整个堆肥过程中 THA/TOC 值显著高于牛粪组合的 T1 和 T2 处理($P<0.05$)。堆肥结束时,与堆肥初期相比,牛粪组合的 T1 和 T2 处理的 THA/TOC 值增加了 47.3% 和 49.1%,羊粪组合的 T3 和 T4 处理较堆肥开始时增加了 9.4% 和 32.3%。

2.3 不同原料堆肥过程中腐殖质主要组分含量的变化

堆肥过程是一个腐殖质不断积累的过程,我们对腐殖质的重要组分 HA 和 FA 含量在堆肥过程中的变化进行了测定。

2.3.1 胡敏酸(HA)含量的变化 HA 是一类能溶于碱溶液而被酸溶液所沉淀的腐殖质物质,对土壤养分保持及土壤结构形成具有重要意义^[32],不同处理堆肥过程中 HA 含量的变化见图 6。

从图 6 可以看出,各处理的 HA 含量从一开始就明显分为 2 组,羊粪由于其 HA 的含量高于牛粪,所以其组合 T3 和 T4 处理的 HA 含量整个堆肥过程中始终高于牛粪组合的 T1 和 T2 处理,但是随堆肥进程的延续,处理之间的差异在堆肥 25 d 后变小,在堆肥结束时,T3、T4 处理 HA 含量显著高于 T1、T2 处理($P<0.05$)。T1~T4 处理较堆肥开始时的增幅分别为 197.8%、140.9%、70.4% 和 65.4%。

2.3.2 富里酸(FA)含量的变化 FA 是一类既能溶于碱溶液又溶于酸溶液的腐殖质物质,其酸性和移动性均大于 HA,但是其吸收性比 HA 低,对促进矿物的分解和养分的释放具有重要作用^[32]。不同处理堆肥过程中 FA 含量的变化见图 7。

从图 7 可以看出,堆肥期间各处理 FA 含量整体呈下降趋势。堆肥前 5 d FA 含量均迅速下降,可能是由于 FA 分子量相对较小,结构简单,随着微生物的大量繁殖,原料中的 FA 被微生物大量分解;之后各处理 FA 含量呈波动式变化,下降幅度变小,可

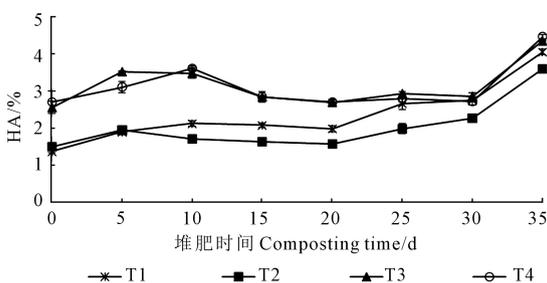


图 6 堆肥过程中胡敏酸(HA)含量的变化

Fig.6 Changes of humic acid content during composting

能是由于物料在微生物作用下分解合成 FA 的速率与 FA 矿化或聚合成 HA 的速率在动态变化;堆肥结束时,T1~T4 处理 FA 含量分别为 1.19%、1.15%、1.33%、1.49%,T4 处理显著高于 T1、T2 处理,其它处理间差异不显著($P<0.5$),可能与 T4 处理高温持续时间长有关。各处理 FA 相比堆肥开始阶段降低幅度不同,T1~T4 分别为 54.9%、59.4%、55.5%、44.9%。

2.3.3 胡敏酸/富里酸(HA/FA)比值的变化 HA/FA 是表征堆化腐殖化过程的重要参数^[33],不同堆肥处理的 HA/FA 的变化见图 8。

由图 8 可知,各处理 HA/FA 比值均逐渐升高,这主要是因为堆肥过程中 HA 含量的不断增加和 FA 含量的持续下降。堆肥初期各处理含有较低含量的 HA 和较高含量的 FA,T1、T2 处理 HA/FA 分别为 0.51 和 0.53,显著低于 T3(0.88) 和 T4(1.01) 处理($P<0.05$);随着堆肥化的进行,HA 含量逐渐增加,FA 含量则迅速降低,使各处理 HA/FA 呈上升趋势;堆肥第 15 天时,T1、T2 处理 HA/FA 显著低于 T3、T4 处理($P<0.05$);堆肥结束时,T1~T4 处理的 HA/FA 较初期增幅分别达 566.9%、497.4%、271.7%、199.9%,T1、T2 处理增幅大于 T3、T4 处理。

2.4 不同原料好氧堆肥过程中温度的变化

温度是堆肥过程中重要的工艺参数之一,它影响着堆体中微生物的活性及有机物料的分解速率,也影响着堆肥产品的腐殖化程度^[34-35]。不同处理堆肥过程中温度的变化见图 9。

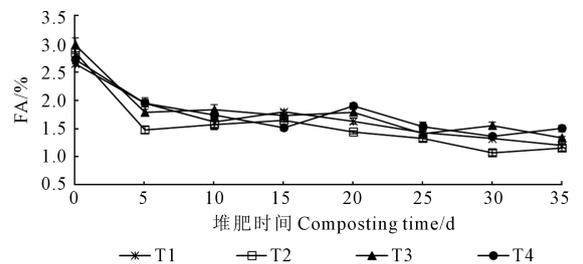


图 7 堆肥过程中富里酸(FA)含量的变化

Fig.7 Changes of fulvic acid during composting

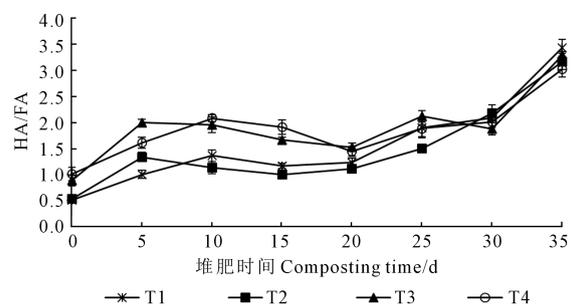


图 8 堆肥过程中 HA/FA 比值的变化

Fig.8 Changes of HA/FA ratio during composting

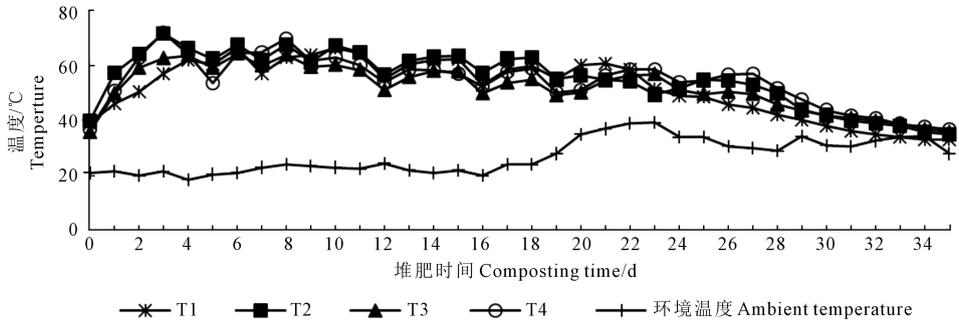


图 9 堆肥过程中温度的变化

Fig.9 Changes of temperature during composting

由图 9 可知,4 个处理中,T1 在第 3 天进入高温期(55℃),T2 在第 1 天就进入高温期,其它 2 个处理都在第 2 天进入高温期。T1~T4 处理高温维持时间分别为 20、21、22、27 d,T3、T4 处理高温期持续时间长于 T1、T2。各处理达 60℃ 以上天数分别为 13、15、6 d 和 9 d,T1、T2 处理达 60℃ 以上高温时间多于 T3、T4 处理。4 个处理在高温期达到的最高温度分别为 66.7℃、71.8℃、64.5℃、72.2℃,T2、T4 处理在堆肥过程中达到的最高温度高于 T1、T3,这可能与原材料性质有关。4 个处理分别于堆肥第 22、21、23、28 天后进入降温期,至堆肥结束各处理堆温接近环境温度。

3 讨论

堆肥过程中有机物料中的有机碳含量会因矿化分解作用而逐渐减少。研究表明,不同堆肥条件下,有机碳减少幅度不同^[36-37]。本试验中以羊粪为主料的处理(T3、T4)在堆肥结束时 TOC 下降幅度比以牛粪为主料的处理(T1、T2)高,可能是由于 T3、T4 处理高温期长于 T1、T2 处理,有机碳被微生物分解利用的程度也较高。DOC 可以为微生物的生长繁殖提供碳源来促进微生物的活动,而微生物在活动过程中又会通过分解堆体中的有机物料及通过本身的一些新陈代谢或死亡来增加堆料中 DOC 的含量^[17,38]。大量研究表明,在不同的堆肥物料和堆肥条件下,堆体中 DOC 的动态变化规律也不尽相同^[9,39],有的研究发现堆肥结束时 DOC 相比堆肥开始呈降低趋势^[37,39],也有在堆肥结束时较堆肥开始呈增加趋势的研究报道^[33]。本试验中,各处理 DOC 呈波动式下降趋势,堆肥结束时 T3、T4 处理下降幅度大于 T1、T2 处理,可能是由于羊粪中纤维素、半纤维素含量高于牛粪,使得微生物利用其在降解过程中产生的 DOC 的量就多,从而使得堆体 DOC 含量降幅较大。

堆肥过程中会产生大量的腐殖质类物质^[17-19],腐殖质在形成的同时也进行着分解。FA 与 HA 作为腐殖质的重要组成部分,它们在很大程度上决定着堆肥产品的质量^[20]。相关研究表明,腐殖质及其各组分含量变化与原材料的性质有关^[20,32]。本试验中,4 个处理 THA 含量的增加始于第 10 天,在第 15 天时增大到最高值。说明腐殖酸在堆肥 10 d 后大量形成,在堆肥结束时 T1、T2 处理的 THA 含量较堆肥开始时的增幅显著大于 T4 处理,而 T3 处理 THA 含量较堆肥开始时低,可能是由于堆肥开始时羊粪处理中 THA 含量较高,而这部分腐殖酸不稳定,在堆肥期间进行了矿化分解。FHA 含量是影响腐殖酸类肥料肥效的重要指标,很多提高肥料腐殖酸活性的研究都是通过提高 FHA 含量来实现的^[40],各处理 FHA 含量在堆肥结束时均较堆肥开始时低,其变化情况与 THA 相似,因为 FHA 是腐殖酸总量的主要组成部分,它的数量变化直接影响了腐殖酸总量的变化^[16]。有研究认为堆肥过程中 FA 和 HA 均呈下降趋势^[41],也有呈增加趋势的研究报道^[42]。本试验表明,堆肥过程中各处理 HA 含量呈增加趋势,FA 含量呈下降趋势,因为 FA 可能会通过微生物活动转化成 HA^[39,43]。随着堆肥过程的进行,物料中有机物迅速分解,腐殖质组分中不稳定的成分逐渐向稳定成分转化,导致 HA/FA 比值也随之发生相应的变化^[33],本试验中 T1、T2 处理在堆肥结束时 HA/FA 增幅大于 T3、T4 处理,说明 T1、T2 处理腐殖化程度高于 T3、T4 处理。

温度是影响堆肥效率以及保证堆肥产品质量的重要因素。李国学等^[44]认为在堆肥刚开始时,堆料的温度通常会接近周围的环境温度,随着堆料中中温性微生物的作用,堆体通常能够在 1~2 d 的时间达到高温微生物活动的理想温度 50℃~65℃,而在这样的高温条件下,一般只需要 5 d 左右的时间

便可以保证堆肥产品达到无害化的相关要求。如果堆肥时堆体的温度上升太慢、温度一直较低就会大大地延长堆体能够达到腐熟条件所需的天数,而太高的堆温(高于70℃)则会抑制大部分微生物的活性。本试验中以羊粪为主料的2个堆肥处理高温持续时间长于以牛粪为主料的2个处理,以小麦秸秆为辅料的堆肥处理在堆肥过程中达到的最高温度高于以玉米秸秆为辅料的处理,这可能与原材料性质有关。

4 结 论

1)不同原料在堆肥过程中总有机碳和可溶性碳含量随堆肥过程的推进而降低,添加羊粪的处理在堆肥结束时总有机碳和可溶性碳含量的下降幅度大于添加牛粪的处理,羊粪中高含量的纤维素、半纤维素可能是其变化幅度较大的主要原因。

2)不同原料在堆肥过程中总腐殖酸含量总体呈先上升后下降趋势,游离腐殖酸及富里酸含量逐渐降低,胡敏酸含量逐渐增加,堆肥过程显著提高了胡敏酸态碳。整个堆肥过程添加羊粪的处理总腐殖酸、游离腐殖酸及胡敏酸含量均高于添加牛粪的处理,添加不同秸秆的处理间差异不大。

3)羊粪中较高含量的纤维素、半纤维素和胡敏酸可能是堆肥产品中总腐殖酸和胡敏酸含量较高的主要原因,建议企业在以牛粪为主料的堆肥配料中适当加入羊粪以提高堆肥产品的腐殖酸含量和胡敏酸态碳。

参 考 文 献:

[1] 罗一鸣,李国学, Frank Schuchardt,等.过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J].农业工程学报,2012,28(22):235-242.

[2] 农业部.关于印发《关于推进农业废弃物资源化利用试点的方案》的通知[EB/OL].(2016-08-11)[2018-01-01].<http://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/201609/t20160919-5277846.htm>.

[3] 高云才.农村养殖可以告别脏乱差[N].人民日报,2017-01-04(10).

[4] 张媛媛,司倩倩,王述柏.我国规模化养殖场污水处理现状[J].山东畜牧兽医,2015,36(1):61-65.

[5] 农业部.关于印发《耕地质量保护与提升行动方案》的通知[EB/OL].(2015-10-28)[2017-12-02],http://www.moa.gov.cn/nybg/2015/shiyiqi/201712/t20171219_6103894.htm.

[6] 李书田,刘荣乐,陕红.我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J].农业环境科学学报,2009,28(1):179-184.

[7] 国家统计局.中国统计年鉴2017[M].北京:中国统计出版社,2017:388.

[8] 李国学,孙英,丁雪梅,等.不同堆肥及其制成低浓度复混肥的环境和蔬菜效应的研究[J].农业环境保护,2000,19(4):200-203.

[9] 徐路魏.蔬菜废弃物堆肥化过程中碳氮转化规律[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.

[10] 张丽丽.整合宏组学方法揭示天然木质纤维素堆肥中的关键功能微生物群落[D].济南:山东大学,2016.

[11] 姜继韶,黄懿梅,黄华,等.猪粪秸秆高温堆肥过程中碳氮转化特征与堆肥周期探讨[J].环境科学学报,2011,31(11):2511-2517.

[12] Awasthi M K, Quan W, Hui H, et al. Influence of zeolite and lime as additives on greenhouse gas emissions and maturity evolution during sewage sludge composting[J]. Bio-resource Technology, 2016, 216(21):172.

[13] 张国,逯非,赵红,等.我国农作物秸秆资源化利用现状及农户对秸秆还田的认知态度[J].农业环境科学学报,2017,36(5):981-988.

[14] 马力通,李珺.商品有机肥利用存在的问题与生产新模式[J].内蒙古石油化工,2014,40(7):25-27.

[15] Fernandez J M, Senesi N, Plaza C, et al. Effects of composted and thermally dried sewage sludge on soil and soil humic acid properties[J]. Pedosphere, 2009, 19(3):281-291.

[16] 马怀良,许修宏.不同C/N对堆肥腐殖酸的影响[J].中国土壤与肥料,2009,44(6):64-66,73.

[17] 李文圣.不同组群奶牛粪堆肥过程中温室气体排放及碳氮转化规律[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.

[18] 杨天学,席北斗,魏自民,等.生活垃圾与畜禽粪便联合好氧堆肥[J].环境科学研究,2009,22(10):1187-1192.

[19] 姚丽晶,张晋京,窦森.几种胡敏酸和富里酸分子结构模型的三维可视化与特性研究[J].土壤通报,2008,39(1):57-61.

[20] 赵伟,席北斗,魏自民,等.不同原料堆肥胡敏酸的荧光特性[J].环境科学研究,2011,24(9):1042-1046.

[21] 石奥,刘岩,李鹏.畜禽粪便中有机碳和有机质的含量分析[J].畜牧与饲料科学,2016,37(2):14-17.

[22] 唐璐,曹晓晓,和苗苗.好氧堆肥过程中含碳有机物演化特征研究进展[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2015,14(2):217-224.

[23] 中华人民共和国农业行业标准.NY525-2012 有机肥料行业标准[S].北京:中国农业出版社,2012.

[24] 范芳.有机肥料中水溶性碳的测定方法[J].中国测试技术,2007(4):63-64,141.

[25] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1989:438-440.

[26] 中华人民共和国农业行业标准.NY/T1867-2010 土壤腐殖质组成的测定.焦磷酸钠-氢氧化钠提取重铬酸钾氧化容量法[S].北京:中国农业出版社,2010.

[27] 王金主,王元秀,李峰,等.玉米秸秆中纤维素、半纤维素和木质素的测定[J].山东食品发酵,2010,(3):44-47.

[28] 杨毓峰,薛澄泽,唐新保.畜禽废弃物堆肥的腐熟指标[J].西北农业大学学报,1999,27(4):62-66.

[29] 代静玉,周江敏,秦淑平.几种有机物料分解过程中溶解性有机物质化学成分的变化[J].土壤通报,2004,35(6):724-727.