

宋修超, 郭德杰, 马艳, 等. 腐熟堆肥回流对中药渣好氧堆肥进程及堆肥品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2844–2851.

SONG Xiu-chao, GUO De-jie, MA Yan, et al. Matured compost recycling enhances the efficiency of composting and improves the quality of end-products during composting of herb residues[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2844–2851.

腐熟堆肥回流对中药渣好氧堆肥进程及堆肥品质的影响

宋修超¹, 郭德杰¹, 马艳^{1,2*}, 罗佳¹, 王光飞¹, 刘新红¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:为明确腐熟堆肥回用对中药渣好氧堆肥腐熟效率及堆肥产品品质的影响,探讨堆肥过程中养分转化规律及腐殖质形态、组分、品质的动态变化,在工厂化条件下比较了中药渣自然堆肥与添加腐熟中药渣堆肥(质量分数10%)堆肥过程中碳氮磷硫和腐植酸类物质的动态变化特征。结果表明,添加腐熟堆肥比自然堆肥提前20 d进入高温期,且高温期平均温度高于自然堆肥5℃左右。较之自然堆肥,添加腐熟堆肥可以强化有机物降解,堆肥产品的总碳含量与C/N显著下降($P<0.05$),而全氮、全磷、全钾和全硫分别增加17.5%、17.8%、14.7%和9.4%;两个处理堆肥前后总腐植酸、游离腐植酸和水溶性腐植酸含量变化不大,但添加腐熟堆肥处理可提高腐植酸的活性,增加游离腐植酸(7.8%)及水溶性腐植酸含量(30.1%);堆肥过程胡敏酸组分不断增加,富里酸组分逐渐降低,添加腐熟堆肥处理可强化堆肥腐殖化进程,增加胡敏酸组分(15.2%),胡富比显著升高,堆肥产品的分子量、缩合度及芳构化程度提高。研究表明,腐熟堆肥回流能够显著促进中药渣堆肥腐熟效率,提高堆肥产品品质。

关键词:工厂化堆肥;腐熟堆肥回流;中药渣;堆肥品质;腐植酸

中图分类号:X705 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)12-2844-08 doi:10.11654/jaes.2019-0697

Matured compost recycling enhances the efficiency of composting and improves the quality of end-products during composting of herb residues

SONG Xiu-chao¹, GUO De-jie¹, MA Yan^{1,2*}, LUO Jia¹, WANG Guang-fei¹, LIU Xin-hong¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Matured compost recycling is widely practiced to reduce the dosage of organic bulking agents used in actual composting processes and is therefore economically advantageous. In order to ascertain the effect of matured herb residue compost backflow on maturation efficiency of composting and quality of compost, this study discussed the transformation of nutrients as well as humus (composition, content, and quality) during the composting process. Two treatments were conducted to achieve this objective. The matured herb residue compost was used in composting in the proportion of 10% of initial raw materials (based on dry weight). A control treatment (CK) was also studied without application in industrial condition. During the experiment, the content of total carbon (TC), total humus (HS), free humus (FHS), water-soluble humus (WSHS), humic acid (HA), fulvic acid (FA), and some elements such as C, N, P, and S were determined. Results showed that matured compost amendment (MCT), wherein the thermophilic phase (55℃) was entered 20 days earlier than that in CK, could significantly accelerate the degradation of organic matter. When compared with CK, application of matured compost resulted in signif-

收稿日期:2019-06-24 录用日期:2019-08-28

作者简介:宋修超(1987—),男,山东即墨人,博士,助理研究员,研究方向为农业废弃物肥料化利用。E-mail: xiuchao103@163.com

*通信作者:马艳 E-mail: myjaas@sina.com

基金项目:江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(17)2025];国家自然科学基金青年科学基金项目(41601264)

Project supported: The Funds for Independent Innovation of Agricultural Science and Technology in Jiangsu Province[CX(17)2025]; The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41601264)

icant reduction in final TOC and C/N ratio ($P<0.05$), whereas, total N, total P, total K, and total S increased by 17.5%, 17.8%, 14.7%, and 9.4%, respectively. Moreover, MCT dramatically improved the activity of humus, as indicated by the increase in the content of HS, FHS, and WSHS in compost products. During the composting process, HA content increased and FA content decreased, resulting in increased HA/FA ratio, especially in the treatment with matured compost, indicating that MCT accelerated organic matter humification and improved the humus quality. Our results suggest that matured compost recycling could magnify the nutrient and humus quality during composting of agricultural organic wastes.

Keywords: composting; matured compost recycling; herb residue; compost quality; himic acids

随着我国中医药事业逐年发展,中药生产过程产生的药渣固体废弃物也逐年增多,年产量可达3000万^[1]。但中药渣具有湿度高、异味臭、难降解、木质纤维含量高的特点,在利用中存在诸多问题,当前主要处置方法有焚烧、填埋和露天堆放等方式,这对环境造成极大污染,同时也造成了资源浪费^[2-3]。因此,如何合理有效地处理中药渣成为中药企业所要面临的严峻问题,将中药渣废弃物资源化、无害化利用对中药企业和环境保护意义重大。

高温好氧堆肥是农业废弃物无害化处理和资源化利用的重要途径,堆肥过程是由一系列微生物活动主导的复杂生物化学反应,将不稳定的有机物质逐步降解,生成稳定的腐殖质物质^[4-5]。但是,课题组前期研究发现中药渣废弃物直接进行好氧堆肥升温慢、腐熟效率低,这主要是由于中药渣前期经过高温高压蒸煮,基础含水量高、透气性差、微生物活性低、微生物很难快速增殖。因此,如何改善堆肥原料的基础理化性质是中药渣废弃物高温好氧堆肥技术的关键。

当前,为调节堆肥原料基础性状,加快堆肥腐熟进程,通过添加堆肥辅料和微生物菌剂是比较普遍、可行的处理方式^[6-7]。常见的堆肥辅料包括秸秆、木屑、花生壳、锯末等。研究者证实通过菌糠、锯末等辅料的添加能够增加堆肥孔隙度,降低含水量,创造适宜的堆肥环境,从而促进堆肥快速腐熟^[8-9]。微生物菌剂的添加同样可以强化堆肥过程中整个微生物系统的生长及活性,从而提高堆肥腐熟效率,提升堆肥品质^[10]。但是,研究者发现接种不同微生物的应用效果差异较大,徐智等^[11]比较鸡粪好氧堆肥过程中接种内、外源微生物效果,发现接种内源微生物后堆肥升温迅速,且腐熟效果明显优于接种外源微生物菌剂,这主要是由于外接菌种对堆肥环境的适应性及与内源微生物的竞争性限制了其发挥作用。因此,在实际生产中,堆肥微生物接种剂的应用必然存在菌种的优化与驯化等风险问题,而内源微生物接种具有更好的

环境适应性,应该是未来堆肥接种剂的趋势。

近年来,腐熟堆肥因其经济性和便捷性,已经被作为有机填充剂广泛地应用到工厂化管理堆肥过程中^[12]。添加腐熟堆肥不仅可以调节物料含水量,增加孔隙度,为微生物的快速繁殖提供适宜外部环境。而且曹云等^[13]还报道,腐熟堆肥含有大量土著微生物菌群,是一种非常理想的内源接种剂。较之外源微生物,内源微生物对堆肥环境有更好的适应性。因此,腐熟堆肥理论上应该是一种非常合适的堆肥辅料调节剂和微生物接种剂综合体。

关于腐熟堆肥回流的研究主要集中在其对养分损失和臭气控制上,大量研究表明腐熟堆肥添加能够降低堆肥化过程中温室气体的排放,减少氨气和H₂S等的排放^[12,14-15],但对堆肥腐熟效果和堆肥品质的系统评价研究相对缺失,尤其是关于直接影响有机肥农用效果的堆肥腐殖质类物质研究则属空白^[16-17]。腐殖质作为有机质的主要组成部分,是堆肥化过程中形成的次生产物,性质稳定、结构复杂,是评价堆肥产品质量的重要指标。主流的腐殖质形成假说是木质素的多酚学说和木质素学说,因此好氧堆肥腐殖质组分变化规律与微生物作用下的木质纤维素转化特征密切相关^[18],而中药渣原料最大特点就是富含木质纤维素。因此,系统掌握腐熟堆肥回流对中药渣好氧堆肥过程中腐殖质类物质的形态、组成等堆肥品质的影响对于进一步推广该技术具有重要意义。

基于此,本研究以新鲜中药废渣为原料,通过添加腐熟中药渣堆肥,在工厂化条件下进行高温好氧堆肥研究,通过检测堆肥过程中相关指标的动态变化,并依据理化参数和堆肥过程中养分和腐植酸的动态变化特征进行腐熟化程度评价,探究腐熟堆肥回流对堆肥腐熟效率及堆肥品质的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新鲜中药废渣取自江苏连云港康缘药业股份有

限公司中药加工车间,按照中药配方及其C/N养分含量共筛选收集4种配方中药废渣,分别为配方一:青蒿(100%),配方二:金银花(100%),配方三:茯苓:牡丹皮:桂枝:桃仁(质量比1:1:1:1),配方四:元胡:川芎:平贝:独活:牡丹皮(质量比1:1:0.7:0.7:1)。其中由于原始物料含水量较高,本研究中统一采用常规晾晒的方法,将含水量控制在65%以下,为保证晾晒过程中不进行初发酵过程,晾晒的物料高度不超过20 cm。晾晒4 d,待用。腐熟中药渣堆肥取自江苏省康缘集团下属子公司江苏省好徕斯肥业有限公司,堆制时间为4个月,基本理化性质见表1。

表1 中药渣原料及腐熟中药废渣堆肥基本性质

Table 1 Physical and chemical properties of compost feedstocks

样品 Samples	总碳 Total C/%	总氮 Total N/%	C/N	含水量 Moisture content/%
配方一 Herbal formula 1	42.82	1.22	35.10	68.16
配方二 Herbal formula 2	39.85	2.57	15.51	76.94
配方三 Herbal formula 3	33.80	2.19	15.43	67.46
配方四 Herbal formula 4	42.88	1.64	26.15	66.65
腐熟中药渣堆肥 Matured compost	35.02	3.27	10.71	40.63

1.2 堆肥试验设计

堆肥试验在江苏省好徕斯肥业有限公司堆肥生产车间内进行。试验共设2个处理,分别为自然堆制(对照CK)和添加腐熟中药渣堆肥(MCT),前期筛选出4种配方中药废渣堆肥原料,初始复混比例按2:1:1:1(配方一:配方二:配方三:配方四,干质量比)进行混匀,添加腐熟中药渣堆肥处理在自然堆制的基础上再额外添加10%(干质量比)的腐熟中药渣堆肥,充分搅拌均匀。采用条垛式好氧堆肥,每个处理堆肥初始原料干物质3 t(添加腐熟中药渣量为300 kg),堆制成长宽高为18 m×1.5 m×1.5 m的堆体,根据堆体温度变化,堆肥过程中每隔10~15 d用翻抛机适时翻抛,整个发酵时间维持4个月左右。在堆肥第0、7、14、21、28、35、42、52、62、72、87、102、117、132 d取样,将整个条垛平均分成3段,每段每次选择6个采样点,每个点从堆肥外层、中层、里层各取约200 g样品,混匀;将样品风干磨细过100目筛,用于理化性质测定。

1.3 试验方法

堆肥温度测定:将水银温度计从堆体四周垂直插入,在堆体上(距离地面80 cm)、中(距离地面50 cm)、下层(距离地面20 cm)分别插入温度计,每日

上午和下午记录堆温和气温,所得平均值为最终堆体温度。

含水率采用105℃烘干称质量法。总碳(Total carbon, TC)、总氮(Total nitrogen, TN)、总硫(Total sulfur, TS)采用元素分析仪(vario MACRO cube)测定;总磷(Total phosphorus, TP),总钾(Total potassium, TK)采用有机肥料NY 525—2012的标准方法测定;C/N计算方法为TC与TN的比例。

腐植酸组分[总腐植酸(Total humus, HS)、胡敏酸(Humic acid, HA)、富里酸(Fulvic acid, FA)]分析^[19]:取2 g干样,浸提液为50 mL 0.2 mol·L⁻¹ Na₄P₂O₇和50 mL 0.2 mol·L⁻¹ NaOH, 37℃机械振动48 h, 2200 g离心过滤。准确取20 mL的提取液用H₂SO₄酸化至pH=1,让胡敏酸组分沉淀,然后2200 g离心过滤,提取液即是富里酸组分,各腐植酸含量均以碳含量计,总腐植酸组分碳(HSC)和富里酸组分碳(FAC)测定分别采用重铬酸氧化与硫酸亚铁铵滴定测定,胡敏酸组分碳(HAC)=HSC-FAC。水溶性腐植酸采用蒸馏水浸提, K₂Cr₂O₇容量法;游离腐植酸采用1%NaOH浸提, K₂Cr₂O₇容量法;腐殖化系数(HR%)=HSC/TOC×100%, 胡富比(HA/FA)=HAC/FAC。

1.4 数据分析

试验数据经Excel 2010处理后应用SPSS 22.0软件进行统计分析,同一堆肥处理不同采样时间采用单因素方差分析比较差异的显著性水平,相同采样时间不同堆肥处理间差异采用成对T检验分析比较差异的显著性水平。用Origin 9.0进行作图。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中主要理化指标的变化特征

堆肥温度反映堆肥进程,高温期是堆肥过程中微生物活动最剧烈阶段,图1a温度变化显示,堆肥前期两个处理升温均比较缓慢,添加腐熟堆肥可大幅缩短堆肥升温时间,达到高温期(超过55℃)需要20 d左右,而常规堆肥(CK)需要40 d才能达55℃,并且高温阶段温度要显著高于CK处理5℃。

堆肥过程中水分对腐熟度影响较大,CK处理和添加腐熟堆肥(MCT)处理含水率变化如图1b所示,各处理初始含水率在65%左右,随着堆肥的进行,各处理含水率因蒸发而很快下降,由于MCT处理升温速率较高,其含水率下降幅度也大于CK,但随着堆体温度的上升,两组堆肥含水率均迅速下降,至试验结束,含水率均下降至44%左右。

2.2 堆肥过程中主要养分指标的变化特征

如图2所示,随着堆肥的进行,两个处理TC(图

2a)和TN(图2b)的总体变化趋势相似,TC浓度逐渐降低,而TN浓度逐渐升高,但与CK处理相比,MCT

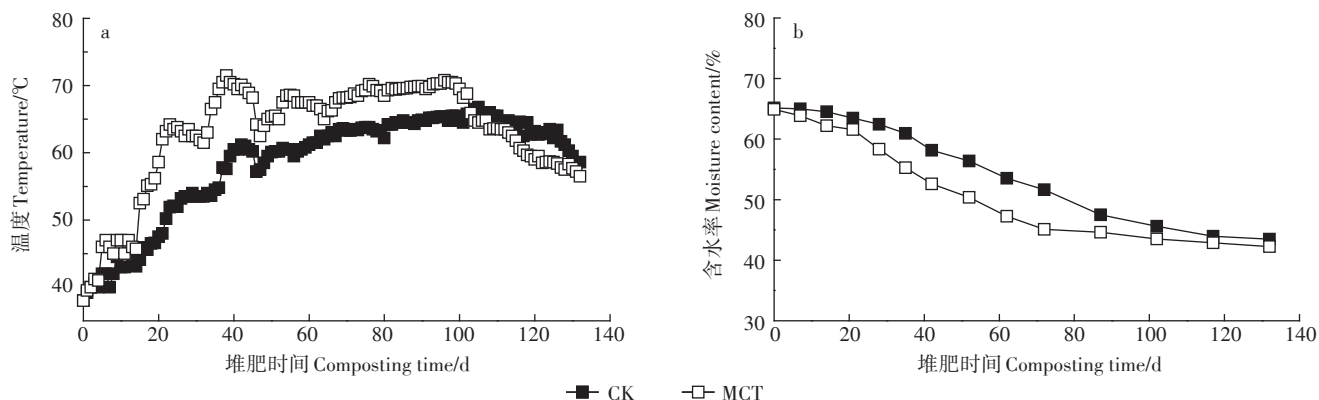


图1 堆肥过程中温度和水分的变化

Figure 1 Change of temperature and moisture content variation during composting

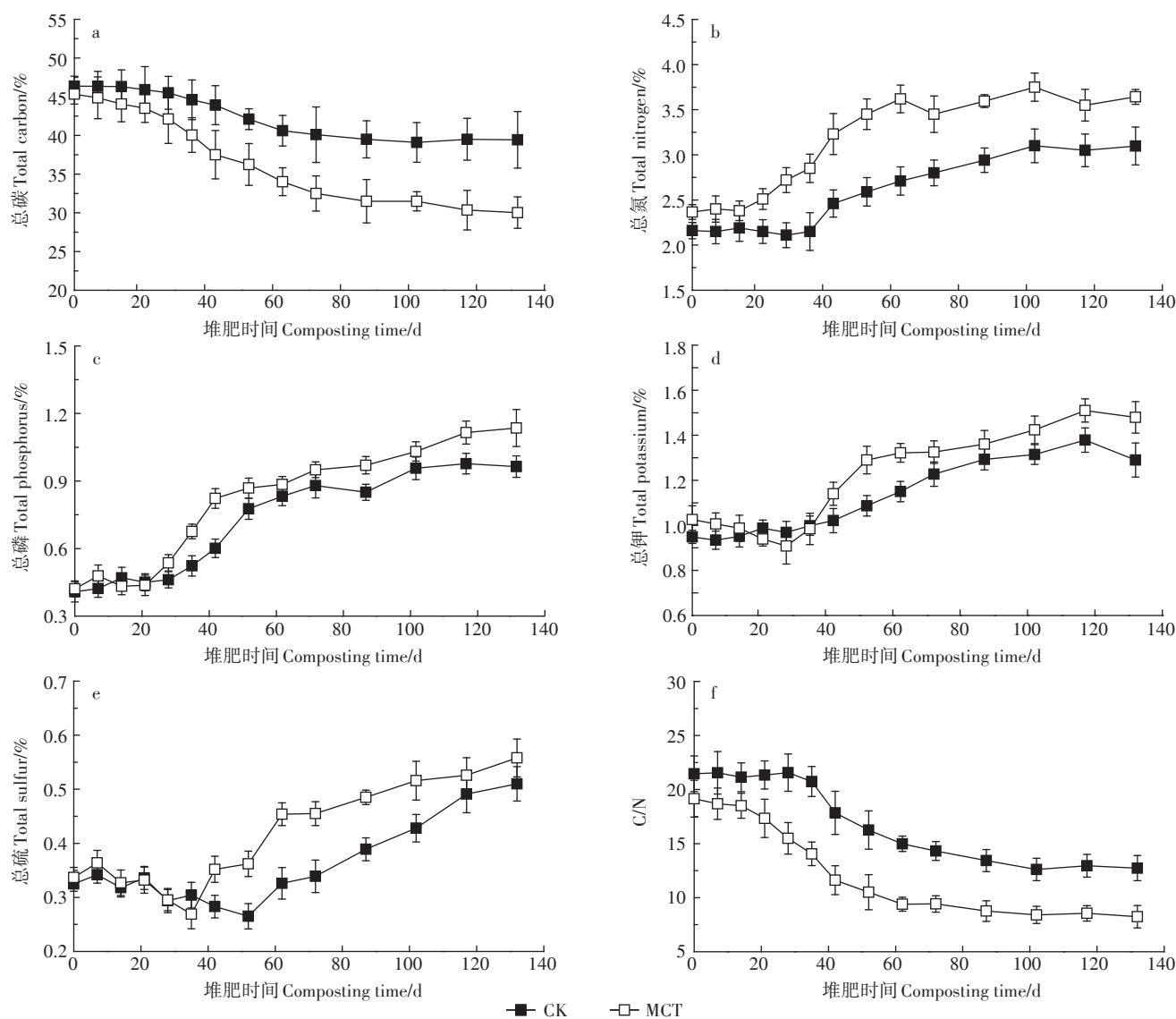


图2 堆肥过程中TC、TN、TP、TK、TS及C/N的动态变化

Figure 2 Change of total organic carbon, total nitrogen, total phosphorous, total potassium, total sulfur and C/N ratio during composting

可以强化TC的分解和TN的增加。至堆肥结束,MCT处理TC含量显著低于CK处理($P<0.05$),两个处理碳素损失量分别为15.0%和33.7%,TN含量显著高于CK($P<0.05$),分别提高43.4%和53.9%。TC的降低,TN的升高,必然导致C/N(图2f)的下降,与CK相比,MCT处理能够显著降低C/N。

与TN的变化趋势相近,整个堆肥过程中TP(图2c)、TK(图2d)和TS(图2e)的含量变化也是逐渐增加,且MCT能够强化TP、TK的增加,堆肥结束后TP和TK含量显著高于CK处理($P<0.05$),分别增加了17.8%和14.7%。

2.3 堆肥过程中腐植酸及其组分的变化

2.3.1 不同形态腐植酸的变化

如图3a所示,堆肥过程中,总腐植酸整体趋势是先下降后升高,但堆肥前后差异不显著。MCT处理能够促使其快速下降,在40 d达到最低值,较CK处理提前20 d,这表明MCT能够显著加速堆肥腐殖化过程。

游离腐植酸是植物吸收利用的主要部分,是可溶于弱碱的腐植酸组分。游离腐植酸含量(图3b)整体趋势与总腐植酸变化趋势相反,表现为先升高后降低,最终稳定。较之CK,MCT处理能够显著增加堆肥终产物中游离腐植酸含量($P<0.05$),提高7.8%。水溶性腐植酸(图3c)整体趋势表现为先下降后升高,最终维持稳定。MCT处理能够在前期促进水溶性腐植酸的快速降低,提早进入升高的阶段,最终产物中水溶性腐植酸含量显著高于CK处理($P<0.05$)。

2.3.2 不同腐植酸组分的变化

如图4所示,整个堆肥过程中胡敏酸(图4a)含量一直在增加,MCT处理从堆肥升温阶段开始胡敏酸含量快速升高,直至最后堆肥结束始终高于CK处理($P<0.05$),堆肥终产物显著增加15.2%。而富里酸(图4b)含量是腐植酸中分子量较小、活性较大、氧化程度较高的组分,堆肥过程中富里酸组分逐渐下降,直至最终处理稳定状态。结合总腐植酸的变化趋势,前期腐植酸降低主要是富里酸组分降低,而后期总腐植酸升高主要是胡敏酸组分升高。而MCT处理总腐植酸增加部分也主要是增加了胡敏酸组分。

2.4 堆肥过程中腐殖化程度变化

堆肥腐殖化系数(HR)能够很好地反映堆肥腐殖化程度,也是评价堆肥产品品质的重要指标。如图5a所示,两个处理HR变化差异显著,CK处理在前期变化缓慢,60 d后HR开始逐渐增加,而MCT处理能

够加快堆肥进程,从堆肥35 d左右开始呈不断增加的趋势。堆肥结束后CK和MCT处理的HR值分别为38.9%和55.4%。

胡富比(HA/FA)是反应堆肥过程中胡敏酸、富里酸组分间变化。由图5b可知,从堆肥20 d左右开始,MCT处理胡富比呈不断上升趋势,胡敏酸占比逐渐增多,而CK处理胡富比升高的堆肥时间延迟,堆肥结束后两个处理的胡富比分别为1.60和1.87,这表明MCT能够加快堆肥进程,促进了胡敏酸的合成及堆肥的腐熟,提高堆肥产品的品质。

3 讨论

本研究中所用堆肥原料取自新鲜中药渣,前期经过高温蒸煮水浸提,微生物活性低,药渣中水溶性养分基本淋洗干净,并且堆肥原料为纯植物源中药渣,木质纤维素含量较高。这就决定了新鲜中药渣在好氧堆肥过程中存在以下几个问题:首先,含水量超高,导致堆体内自由空间少,通气性差,微生物发酵易造成局部厌氧状态,减慢有机质的降解速度,延长堆肥时间。其次,微生物活性低,活性养分含量低,缺少微生物可利用活性碳、氮能源,微生物不能快速爆发式增长。通过添加腐熟中药渣堆肥能够促进堆肥升温效果,与前人研究结果一致^[20],一方面将内源土著微生物直接带入到堆肥内,土著微生物具有较好的环境适应性,在堆肥内快速地定殖和繁殖,另一方面腐熟堆肥中活性养分能够为微生物的快速繁殖提供碳氮源,从而促进功能微生物快速增殖。本试验中整个堆肥高温期维持100 d左右,这主要是因为植物源中药渣中纤维素、半纤维素和木质素等难降解的物质较多,堆肥腐解时间较长。

好氧堆肥过程实质为有机物质的矿化和腐殖化过程,在此过程中微生物利用有机物质作为主要碳源和能源,产生CO₂和水,这也是导致有机碳损失的主因^[4]。添加腐熟中药渣促使堆肥提前进入高温期,且高温期温度始终高于CK处理,从而加快和强化了堆肥有机物质的微生物矿化作用。堆肥后期微生物只能利用半纤维素、纤维素和木质素等较难分解利用的物质,碳素物质的分解转化速率降低,有机碳含量下降平缓。值得注意的是,好氧堆肥的生物转化过程中,碳源和氮源都会被微生物利用,并且会以气体形式散失,但氮的散失率明显比较低,这相当于有机物总干物质的下降幅度明显大于全氮下降幅度,最终使得干物质中全氮含量相对增加,也就是氮素的生物放

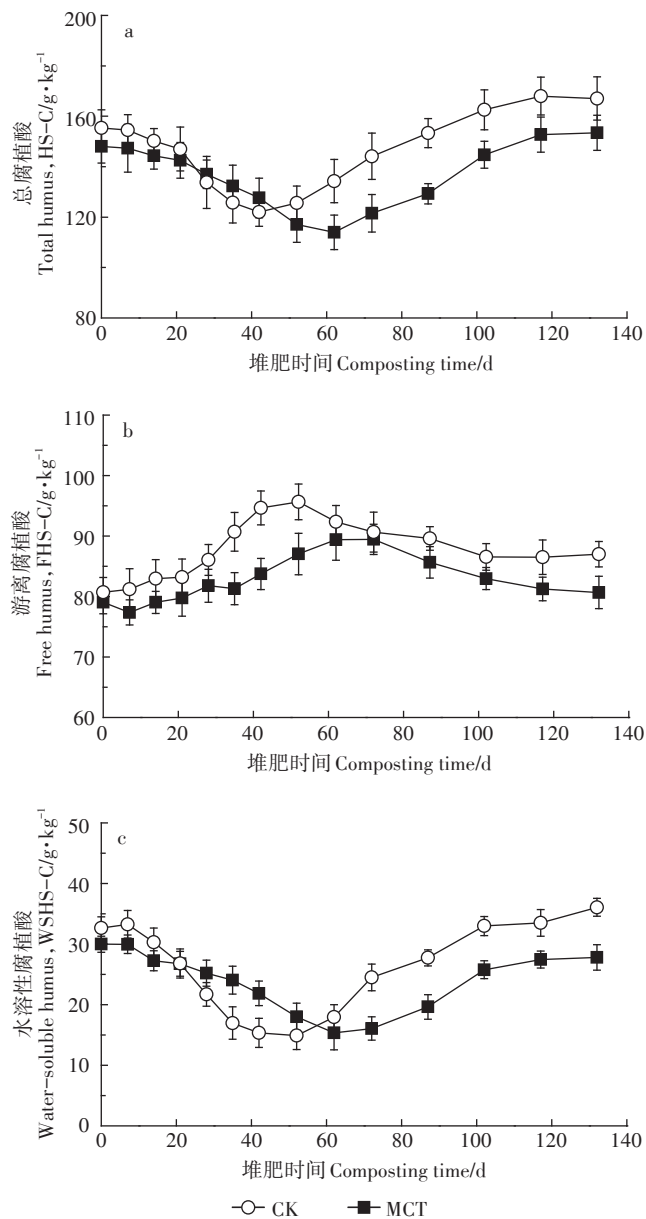


图3 堆肥过程中不同形态腐植酸动态变化

Figure 3 Change of humus in different forms during composting

大作用^[21]。Padmavathiamma等^[22]提出,C/N小于15代表堆肥产物腐熟度是较优的产物。本试验中堆肥最终产物C/N均低于15,且MCT处理相比CK更低,表明添加腐熟堆肥能够促使废弃物达到最佳的腐熟度。P和K在整个堆肥过程中并没有损失,除被微生物少量利用外,均保留在堆肥内,因此,有机质的减少,对P和K的含量有显著的浓缩作用,导致TP和TK的浓度显著高于堆肥前。这与他人的研究结果基本相同^[23]。添加腐熟中药渣堆肥能够在高温期提高TS含量,但堆肥结束后二者差异不显著。这可能是由于硫元素以H₂S的形式损失掉^[24]。

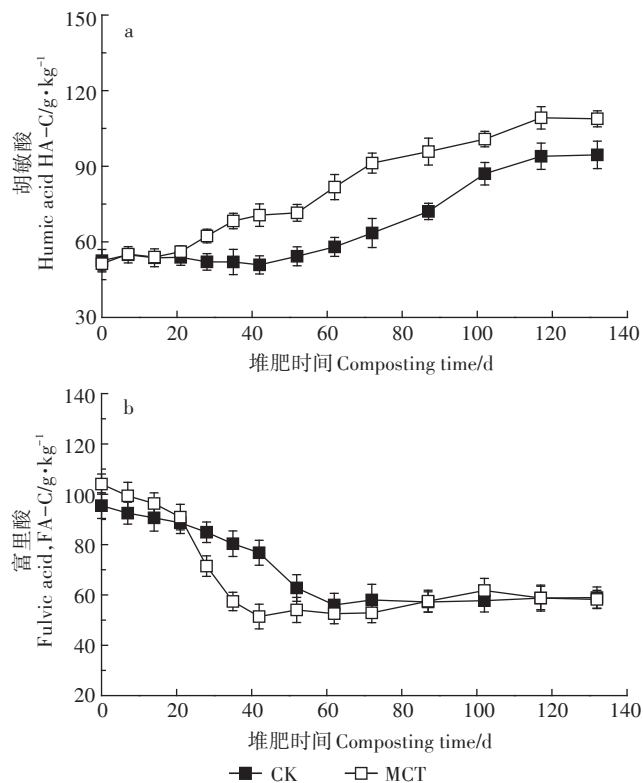


图4 堆肥过程中腐植酸组分的动态变化

Figure 4 Change of humus in different compositions during composting

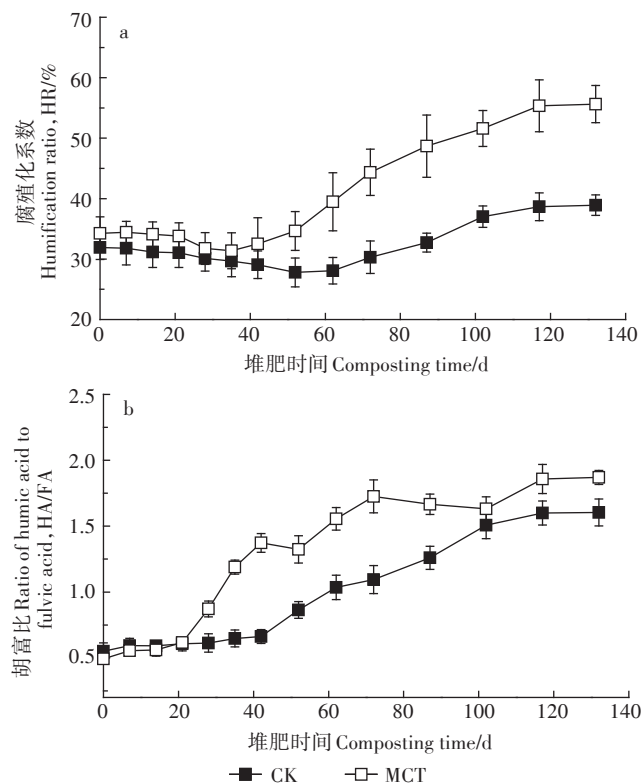


图5 堆肥过程中腐殖化系数及胡富比变化

Figure 5 Change of humification ratio and ratio of humic acid to fulvic acid during composting

添加腐熟堆肥促进堆肥腐殖化过程,这主要是由于内源微生物的带入调节了堆肥微生物群落分解与转化的平衡,使总腐植酸的转化大于分解,从而提高堆肥腐殖化程度^[25]。水溶性腐植酸是活性最高的腐植酸组分,受微生物活动影响最大,MCT处理中的堆肥前期矿质化作用强于腐殖化作用,腐熟堆肥带入的微生物活动利用腐植酸中部分易降解组分,腐植酸降解量大于合成量,使得前期结构最简单的水溶性腐植酸含量不断下降,而后期腐殖化程度逐渐增高,而其在腐殖化过程中也逐渐增加^[26]。

胡敏酸是腐植酸中分子量大、稳定性高的物质,且含有多种功能基,如羧基、酚羟基等,也是对土壤团粒结构形成和养分固持最有利的物质^[27]。富里酸组分结构简单,不够稳定,容易被微生物利用,在堆肥过程中会被分解,而新形成的富里酸在腐殖化过程中进一步缩合成结构稳定的胡敏酸,使胡敏酸含量迅速增加^[28-29]。MCT处理的高温期温度始终高于CK处理,这可以促使微生物充分利用难降解的木质素、纤维素等作为碳源,强化堆肥的矿质化和腐殖化过程,使结构稳定的胡敏酸组分显著高于CK处理;同时,木质素降解产生的酚类物质又是腐殖质合成的前体物质,多酚及苯丙烷与氨基酸等的共合作用能形成更多的高分子质量胡敏酸类混合物^[18]。此外,腐熟物料均取自堆肥后熟阶段的物料,而对于整个堆肥过程来讲,腐殖化过程主要是在此阶段内完成,因此,腐熟物料中参与腐殖化过程的功能微生物类群占比更高^[30]。由此可见,大量腐植酸合成的前体物质结合腐熟物料中功能性微生物可以协同强化中药渣堆肥的腐殖化进程,减少有机物质矿质化损失,提高堆肥产品品质。

4 结论

(1)中药渣好氧堆肥中添加腐熟堆肥可提前20 d进入高温阶段,且高温期温度显著高于CK,这在一定程度上可以强化有机物的降解;与CK处理相比,堆肥产品的TC含量与C/N显著下降,而TN、TP、TK和TS分别增加17.5%、17.8%、14.7%和9.4%。

(2)堆肥前后总腐植酸及其不同形态(游离腐植酸和水溶性腐植酸)变化不大,但MCT处理提高了腐植酸的活性,尤其是游离腐植酸及水溶性腐植酸含量显著增加。

(3)堆肥过程胡敏酸组分呈不断增加趋势,富里酸组分逐渐降低,MCT处理可强化堆肥腐殖化进程,增加胡敏酸组分,而富里酸组分两个处理间无差异,

导致腐殖化系数和胡富比显著升高,堆肥产品的分子量、缩合度及芳构化程度提高。

参考文献:

- [1] 李静娟,周波,张池,等. 中药渣蚓粪对玉米生长及土壤肥力特性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2651-2657.
LI Jing-juan, ZHOU Bo, ZHANG Chi, et al. Effects of herb residue vermicompost on maize growth and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2651-2657.
- [2] 王攀,于宏兵,薛旭方,等. 废弃植物中药渣的热解特性及动力学研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9): 2115-2119.
WANG Pan, YU Hong-bing, XUE Xu-fang, et al. Study on characteristics and kinetics of pyrolysis of herb residue[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(9): 2115-2119.
- [3] 郭飞强,董玉平,董磊,等. 三种中药渣的热解气化特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 125-128.
GUO Fei-qiang, DONG Yu-ping, DONG Lei, et al. Gasification characteristics of three herb residues[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(Suppl1): 125-128.
- [4] 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.
- [5] Shao B, Liu Z, Zhong H, et al. Effects of rhamnolipids on microorganism characteristics and applications in composting: A review[J]. *Microbiological Research*, 2017, 200: 33-44.
- [6] 任静,郁继华,颜建明,等. 接种外源生物菌剂后牛粪堆肥腐植酸变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 1277-1283.
REN Jing, YU Ji-hua, XIE Jian-ming, et al. Variation of humic acids during cow manure composting after exogenous microbial agents inoculation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 1277-1283.
- [7] Park K. Composting of food waste and mixed poultry manure inoculated with effective microorganisms[J]. *Engineering in Agriculture Environment & Food*, 2011, 4(4): 106-111.
- [8] Wu S, Shen Z, Yang C, et al. Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 429-436.
- [9] 刘媛媛,徐智,陈卓君,等. 外源添加磷石膏对堆肥碳组分及腐殖品质品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2483-2490.
LI Yuan-yuan, XU Zhi, CHEN Zhuo-jun, et al. Effects of phosphogypsum addition on carbon fractions and humus quality during composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2483-2490.
- [10] 李恕艳,李吉进,张邦喜,等. 菌剂对鸡粪堆肥腐殖质含量品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 268-274.
LI Shu-yan, LI Ji-jin, ZHANG Bang-xi, et al. Influence of inoculants on content and quality of humus during chicken manure composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl2): 268-274.
- [11] 徐智,张陇利,张发宝,等. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果

- 的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(8):856-860.
- XU Zhi, ZHANG Long-li, ZHANG Fa-bao, et al. Effects of indigenous and exogenous microbial inocula on composting in a bioreactor [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(8):856-860.
- [12] Luo W H, Yuan J, Luo Y M, et al. Effects of mixing and covering with mature compost on gaseous emissions during composting[J]. *Chemosphere*, 2014, 117:14-19.
- [13] 曹云, 常志州, 黄红英, 等. 添加腐熟猪粪对猪粪好氧堆肥效果的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):220-226.
- CAO Yun, CHANG Zhi-zhou, HUANG Hong-ying, et al. Effect of compost inoculation on pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21):220-226.
- [14] Wang K, Wu Y, Li W, et al. Insight into effects of mature compost recycling on N₂O emission and denitrification genes in sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 251:320-326.
- [15] Yang F, Li Y, Han Y, et al. Performance of mature compost to control gaseous emissions in kitchen waste composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657:262-269.
- [16] Julie F, Boval M, Sierra J, et al. End-product quality of composts produced undertropical and temperate climates using different raw materials: A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183(3):909-916.
- [17] Yuan Y, Xi B, He X, et al. Compost-derived humic acids as regulators for reductive degradation of nitrobenzene[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 339:378-384.
- [18] 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.
- [19] Senesi N. Composted materials as organic fertilizers[J]. *Science of the Total Environment*, 1989, 81/82:521-542.
- [20] Liu J, Xu X H, Li H T, et al. Effect of microbiological inocula on chemical and physical properties and microbial community of cow manure compost[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2011, 35(8):3433-3439.
- [21] Lazcano, C, Maria G B, Jorge D. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(7):1013-1019.
- [22] Padmavathiamma P K, Li L Y, Kumari U R. An experimental study of vermi-biowaste composting for agricultural soil improvement[J]. *Biore-source Technology*, 2008, 99(6):1672-1681.
- [23] Sharma D, Yadav K D, Kumar S. Role of sawdust and cow dung on compost maturity during rotary drum composting of flower waste[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 264:285-289.
- [24] 江滔, 李国学, 唐琼, 等. 腐熟堆肥筛上粗颗粒对堆肥化过程中温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7):1363-1370.
- JIANG Tao, LI Guo-xue, TANG Qiong, et al. Effect of adding coarse materials from matured compost on greenhouse gas emissions from organic wastes during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7):1363-1370.
- [25] Zhang Z, Zhao Y, Wang R X, et al. Effect of the addition of exogenous precursors on humic substance formation during composting[J]. *Waste Management*, 2018, 79:462-471.
- [26] Zhao X L, Bi Qiong L, Jiu-Pai N I, et al. Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1):232-240.
- [27] Shan Y N, Chen J H, Wang L, et al. Influences of adding easily degradable organic waste on the minimization and humification of organic matter during straw composting[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2013, 48(5):384-392.
- [28] 朱青藤, 申连玉, 钱黎慧, 等. 有机物料对白土土壤胡敏酸结构特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2):396-403.
- ZHU Qing-teng, SHEN Lian-yu, QIAN Li-hui, et al. Effects of organic material application on the structures of humic acids in low yield paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2):396-403.
- [29] 国洪艳, 徐凤花, 万书名, 等. 牛粪接种复合发酵剂堆肥对腐植酸变化特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1231-1234.
- GUO Hong-yan, XU Feng-hua, WAN Shu-ming, et al. Effects of inoculating complex microbial inoculants to cattle manure compost on dynamic characteristics of humic carbon[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1231-1234.
- [30] 曹云, 黄红英, 孙金金, 等. 超高温预处理对猪粪堆肥过程碳氮素转化与损失的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(5):1792-1800.
- CAO Yun, HUANG Hong-ying, SUN Jin-jin, et al. Effect of hyperthermophilic pretreatment on transformation and losses of C and N during pig manure composting[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5):1792-1800.