

微生物菌剂堆肥中草药渣中试研究*

何京钟^{1,2} 黄 钧^{1**} 赵晶桃^{1,2} 田雪平^{1,2} 李连华³

¹中国科学院成都生物研究所, 中国科学院环境与应用微生物重点实验室, 四川省环境微生物重点实验室 成都 610041

²中国科学院大学 北京 100049

³中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室 广州 510640

摘要 木质纤维素降解是中草药渣堆肥的主要难点。在前期小试的基础上, 接种纤维素降解菌剂, 将1 t新鲜药渣直接进行好氧堆肥。腐熟度指标 T 值和种子发芽指数(GI)显示, 堆肥19 d左右就已经腐熟。堆肥过程中接种组(JZ)和对照组(CK)的纤维素平均降解速率分别为0.73 kg/d和0.64 kg/d, JZ比CK纤维素降解总量提高了13.39%, 木质素降解量提高118.18%。第30天时, 堆肥的含水率、pH、总养分、重金属等指标都达到有机肥料标准(NY525-2012)。接种菌剂提高了堆肥温度, 加速了水分散失, 促进了纤维素和木质的转化, 有利于堆肥腐熟和提高肥料品质。因此, 在中试规模上堆肥中草药渣生产有机肥是可行的。图3 表4 参32

关键词 中草药渣; 好氧堆肥; 微生物菌剂; 纤维素; 腐熟度

CLC S141.4 : X787

Pilot scale composting of Chinese herbal residues with inoculum of microbial agents*

HE Jingzhong^{1,2}, HUANG Jun^{1**}, ZHAO Jingtao^{1,2}, TIAN Xueping^{1,2} & LI Lianhua³

¹Key Laboratory of Environmental and Applied Microbiology, Environmental Microbiology Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract The degradation of lignocellulose is a main obstacle for composting of Chinese herbal residue. Based on the lab scale experiment, this study composted 1 ton fresh Chinese herbal residue with inoculum of microbial agents. According to the T and GI value, the composts matured on 19 d. The average cellulose decomposing rates of inoculated group (JZ) and control group (CK) were 0.73 kg/d and 0.64 kg/d, respectively. Compared with CK, JZ increased the total amount of cellulose and lignin degradation by 13.39% and 118.18% respectively. Finally, the indexes including moisture content, pH, total nutrient and heavy metal content of the mature compost met the demands of the organic fertilizer standards (NY525-2012) on 30 d. The results showed that inoculating microbial agents increases compost temperature, accelerates moisture loss, promotes the bioconversion of cellulose and lignin, and facilitates speeding up compost maturity and improving compost quality. Therefore, facilitates composting Chinese herbal residue to produce organic fertilizer is feasible in pilot scale.

Keywords Chinese herbal residue; aerobic composting; microbial agents; cellulose; maturity

中药产业作为我国特色产业, 近年来行业增长率保持在20%以上^[1], 年消耗中草药材数百万吨。中草药材中可提取的有效成分只占到5%左右, 剩下的都以药渣的形式被丢弃, 药渣年产生量超过千万吨(含水分)^[2]。同时, 在提取剩下的药渣中仍然含有多种营养成分和生物活性物质^[3]。如此大量的中药渣如果仅仅采用传统的堆置、填埋和焚烧等方式处理, 不仅会造成环境二次污染, 同时也造成了资源的极大浪费。

好氧堆肥可以借助好氧菌的生命活动降解有机固体物, 使之形成一种类似腐殖质土壤的物质, 比化肥养分齐全、肥效持久^[4]。对中草药渣进行好氧堆肥, 利用其有机质、营养元素含量丰富, 通气性好等优点生产有机肥改良土壤, 是实现资源回收、变废为宝的良好举措。但堆肥的进程一直受制于木质纤维素等难降解物的降解效率^[5]。通过在堆肥中接种纤维素降解菌强化纤维素、木质素的降解, 加快堆肥进程, 提高堆肥品质, 降低堆肥成本, 具有很好的应用前景^[6]。

目前投加微生物菌剂进行中草药渣堆肥过程的系统研究还不多。徐秀银等利用中药渣发酵生产有机基质, 接种高温纤维素菌剂后, 较常规缩短了1/3的发酵时间^[7]。梁卫驱等利用生物菌剂对中草药渣进行堆肥, 有效提高了堆肥温度和腐熟度^[8]。王茂等用不同菌剂对中药渣、鸡粪、菌渣混合物进

收稿日期 Received: 2015-03-31 接受日期 Accepted: 2015-04-16

*四川省科技支撑计划项目(2011FZ0122)和中国科学院环境与应用微生物重点实验室开放课题(KLCAS-2014-01)资助 Supported by the Key Technology R & D Program of Sichuan Province (2011FZ0122) and the Open Fund of Key Laboratory of Environmental and Applied Microbiology, Chinese Academy of Sciences (KLCAS-2014-01)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: huangjun@cib.ac.cn)

行堆肥证明自主优选的菌剂对缩短发酵周期效果更优^[9]。本研究是在前期小试基础上^[10], 投加实验室筛选的纤维素降解菌剂, 进行中草药渣好氧堆肥生产有机肥中试, 通过对堆肥过程环境因子监测和理化指标分析, 验证投加菌剂对腐熟度和堆肥品质的作用, 为该工艺的生产性应用提供基础。

1 材料与方法

1.1 原料和菌剂

堆肥药渣原料取自成都市某药厂某口服液生产蒸煮提取后的新鲜药渣, 主要成分包含黄芪、黄芩、白芷、桔梗、薄荷等十几种药材。原料性质如表 1。

接种微生物为13株高温细菌、放线菌和13株纤维素降解真菌, 具体组成同文献[10]。将菌株进行活化及扩大培养后按菌液与麸皮5:3混合(质量比)制成菌剂。活化与扩大培养基分别为牛肉膏蛋白胨(细菌)、PDA(真菌)和高氏一号培养基(放线菌)。

1.2 堆肥

堆肥实验设置接种组(JZ)和对照组(CK), 每组设置2个平行。实验药渣从药厂取回后不调含水率和pH值。药渣堆置呈梯形, 堆体长宽高分别为2.0 m × 0.8 m × 0.5 m, 每堆重量275 kg。药渣堆置成型后在顶部、四周设置若干直径约5 cm通气孔, 不同部位位置入温度计。每隔2-3 d翻堆一次, 翻堆均匀后利用四分法取样, 样品分两份: 一份样品烘干用于化学物理指标分析, 包括含水率、有机质、C/N、纤维素和木质素等; 另一份样品迅速密闭于-20 ℃保存, 用于pH值及种子发芽指数(GI)测定。

菌剂接种分两次进行, 每次接入量0.2%(m/m)。高温菌剂在堆肥第1天接入, 接种时将复合菌剂与接种药渣搅拌均匀, 同时CK用等量蒸馏水加麸皮代替菌剂做相同处理。中温菌剂在堆体温度下降至45 ℃以下时接入(实验中JZ从第18天, CK从第20天起), 接种方式与高温菌剂相同。

堆肥30 d结束, 将药渣堆体摊开, 进行自然风干, 测定含水率及每堆堆体总重。测定堆肥成品包括总有机质、总磷(TP)、总钾(TK)、总氮(TN)以及重金属等有机肥肥料指标。

1.3 测定方法

堆体温度测定采用0-100 ℃水银温度计于每天上午9:00读取堆体中部不同位置平均温度; 含水率、pH值、纤维素和木质素测定如文献[10]所述。TC、TN采用元素分析仪(Vario Macro Cube, Elementer, 德国)测定, $T = (\text{样品C/N}) / (\text{初始C/N})$ 。样品消解采用微波消解/萃取系统(ETHOS T C, 意大利Milestone公司); TP、TK、Pb、Cd、Cr采用电感耦合等离子体质谱仪(NEXION 300, PerkinElmer, 美国)测定; As的测定采用氢化物原子荧光光度法; Hg采用氢化物发生-冷原子吸收法。GI测定^[11]: 将20粒老麦芒草种子均匀放在铺有滤纸的9 cm平板中, 注入6 mL新鲜堆肥提取液, 空白以去离子水代

替, 25 ℃避光培养3 d, 每样3个对照, 计算GI: $GI = (\text{处理平均发芽率} \times \text{处理平均根长}) / (\text{对照平均发芽率} \times \text{对照平均根长}) \times 100\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程物理性质和温度变化

整个堆肥周期为30 d, 前期药渣略有酸味, 随后中药味渐渐消失, 颜色由最初的黄褐变为灰黑。高温期有较多白色菌块, 腐熟期可见白色菇状真菌。初始药渣中粘稠、易分解物质消失, 最终剩下易碎的枝杆状物, 每堆体体积减少50%-54%, 干重减少50%-55%。

如图1所示, 堆肥第3天进入高温期, JZ高温期持续12 d, CK持续15 d。第15天开始, JZ开始降温, CK到第18天才开始进入降温期。降温期温度出现较大波动, 是由于JZ在第18天, CK在第20天时分别接入中温菌剂带入了部分水分和麸皮, 致使次日温度突然升高, 在第21、23天经人工翻堆散热后, 温度又迅速下降。

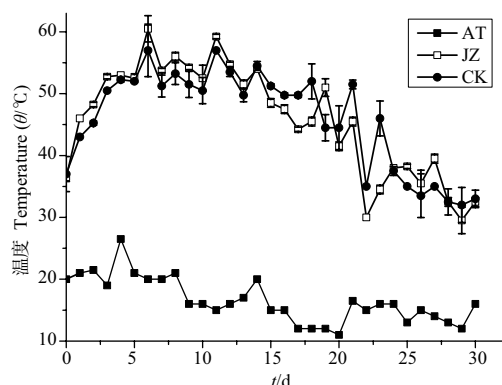


图1 堆肥过程中的温度。AT: 环境温度。

Fig. 1 Temperature dynamics during composting. AT: Ambient temperature.

温度是堆肥品质的主要影响因素^[12]。试验中环境温度偏低且起伏大, 但堆肥温度仍能迅速上升, 并维持自身温度, 受环境温度影响不大。温度的变化反应了堆体中微生物数量的变化, JZ在升温期和高温期温度均高于CK, 说明堆肥一开始, 接种菌剂就迅速在药渣堆体中定殖下来, 利用基质快速繁殖, 加快了基质代谢, 促进了升温。且JZ在高温期和腐熟期出现的高温菌块和菇状真菌都比CK提前3 d左右, 也证明接种菌剂提高了堆体菌体数量, 加快了堆肥进程。试验中CK高温期时间长于JZ, 且JZ比CK提前降温, 可能是由于JZ在高温期温度高于CK, 堆体中高温菌对易降解基质分解利用较快, 其营养枯竭时提前开始死亡使得温度降低。随着堆肥温度降低趋于稳定, 堆肥可被认为已达稳定。

翻堆对堆肥中堆体温度和湿度的均匀、通氧量、物料性状与有机质降解速率等都有极大改善作用^[13-14]。试验中每

表1 堆肥原料的性质(干基计)

Table 1 Properties of raw materials (in dry basis)

总碳 TC (w/%)	总氮 TN (w/%)	碳氮比 C/N	纤维素 Cellulose (w/%)	木质素 Lignin (w/%)	含水率 Moisture content (w/%)	pH
47.17 ± 0.03	1.81 ± 0.002	26.10 ± 0.01	41.40 ± 0.12	11.26 ± 0.31	72.62 ± 0.1	5.35 ± 0.03

隔2-3 d翻一次堆,在高温期每一次翻堆后堆体温度都出现上升,高温期翻堆对堆肥效率和堆肥质量提升都有促进作用^[15-16],而在降温期翻堆可以适当降低温度,有利于中温真菌的生长。

2.2 堆肥过程含水率、pH、C/N、T值及GI值变化

如图2a所示,初始药渣含水率为72.11%-74.22%,堆肥开始略有上升,而后迅速下降。特别是从第15天起,药渣基质表面变得干燥疏松,水分散失进一步加快。堆肥第30天时JZ和CK含水率分别为63.23%和66.01%。然后通过迅速自然风干,最终JZ和CK含水率分别为29.81%和26.16%,均达到30%以下,符合有机肥料标准(NY525-2012)^[17]。

水分是微生物生存的介质,过高或过低都会影响微生物活性。与温度相比,水分对堆肥中微生物生长影响更大^[18]。一般来说,堆肥含水率为50%-65%比较利于堆肥微生物生长和温度的上升^[19],很少有人高于70%的含水率下进行堆肥。本试验能够在高含水率条件下顺利堆肥,徐秀银等也直接发酵含水率75%左右中草药渣,能够正常升温^[7]。这可能是由于中草药渣材料本身空隙较多,比表面积大,利于通氧,堆肥微生物能够正常生长。堆肥开始含水率略有上升,一是由于堆肥初期药渣含水量变化不大;二是堆肥的第1天和第18天接入菌剂带入了水分。JZ含水率降低速率(0.69 d^{-1})明显快于CK(0.38 d^{-1}),说明接种菌剂可促进堆体温度升高,有利于加

快堆体的水分散失。

堆肥过程中pH值先由最初5.4略微下降至5.0左右,而后迅速上升,达到8.0左右并趋于稳定,如图2b。这是由于堆肥初期,药渣中易利用物质较多,微生物繁殖快,其分解大分子物质产生的有机酸导致pH值略有下降。而后随着温度升高,乙酸、丁酸等的挥发或被利用,含氮有机物产生的氨使得pH值迅速上升,最后稳定在7.7左右,符合有机肥料标准(NY525-2012),这与其他研究结果^[20-21]相一致。高温期开始,JZ的pH值高于CK,且上升速率(0.33 d^{-1})快于CK(0.30 d^{-1})。说明JZ基质转化速率明显快于CK,微生物代谢活动更强烈。

C/N是影响堆肥品质最重要的指标之一,一般堆肥原料C/N 25-30最利于堆肥进行^[22-23]。如图2c所示,本试验堆肥过程中C/N下降呈对数曲线趋势,特别在升温期和高温期下降迅速,最终C/N比降至14以下,低于堆肥腐熟(C/N小于20)要求^[22]。T值达到0.6以下表示堆肥已经腐熟^[24]。堆肥第30天时,JZ和CK的T值分别为 0.52 ± 0.002 、 0.53 ± 0.015 ,如图2c所示。结合T值变化趋势看,JZ在第16天、CK在第17天左右就已经腐熟。在高温期,C/N降低最大速率JZ为 0.695 d^{-1} ,CK为 0.548 d^{-1} ,JZ比CK提高26.82%。表明接种的高温菌剂明显加速了基质降解,促进了腐熟,加快了堆肥进程。

植物生长试验是评价堆肥腐熟度的最终和最具说服力

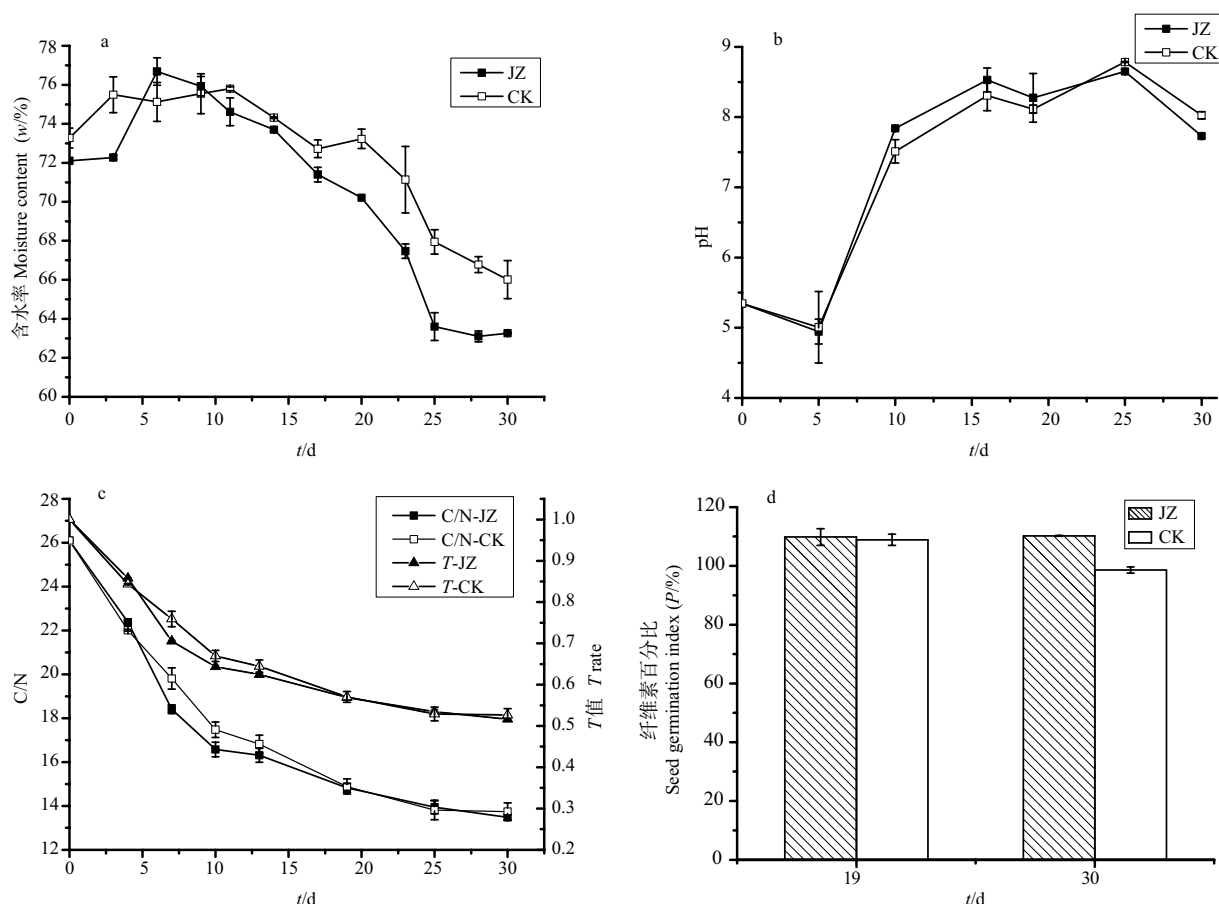


图2 堆肥过程中含水率(a)、pH(b)、C/N、T值(c)及GI值(d)。

Fig. 2 Moisture content (a), pH (b), C/N, T rate (c) and GI (d) during composting.

表2 接种菌剂降解堆肥中纤维素的试验比较
Table 2 Composting tests of cellulose degradation by inoculating microbial agents

堆肥原料 Raw material	纤维素含量 Cellulose content (w%)	规模 Scale (V or w/pile)	接种物 Inoculum	接种量 Inoculation	堆肥时间 Composting time (t/d)	纤维素降解量 Degradation percentage (w%)	文献 Literature
牛粪+稻草 Cow dung + straw	24.37	1.2 m ³	木质纤维素降解菌 Lignocellulose degrading microorganisms	1.0 (m/m)	46	15.25	[21]
醋渣 Vinegar dregs	26.70	1.5 m ³	纤维素分解菌+固氮菌 Cellulose decomposing bacteria + Nitrogen fixation bacteria	0.5 (V/V)	56	10.47	[30]
香蕉茎秆 Banana stalks	27.60	4.5 m ³	纤维素降解菌 Cellulolytic bacteria	0.2 (-)	35	9.30	[31]
中药渣 Chinese herbal residue	41.40	275 kg	纤维素降解菌 Cellulose degrading microorganisms	0.4 (m/m)	30	13.58	本试验 This test

JZ: 接种组; CK: 对照组. -: 文献中未注明.
JZ: inoculated group; CK: control group. -: not specified in literature.

表3 堆肥过程中总有机质和总养分的变化(干基计)
Table 3 TOM and total nutrient during composting (in dry basis)

项目 Item	总有机质 TOM (w%)		TN (w%)		TP (w%)		TK (w%)		总养分 Total nutrient (w%)	
	0 d	30 d	0 d	30 d	0d	30 d	0 d	30 d	0 d	30 d
JZ	81.32	75.62 ± 0.50	1.81	3.52 ± 0.00	0.25	0.58 ± 0.006	0.55	1.17 ± 0.003	3.04	6.26 ± 0.01
CK	81.32	75.83 ± 0.34	1.81	3.46 ± 0.09	0.25	0.57 ± 0.008	0.55	1.13 ± 0.006	3.04	6.12 ± 0.05

表4 药渣原料和堆肥中重金属含量(干基计)
Table 4 Heavy metals in herbal residue and compost (in dry basis)

重金属 Heavy metal (w/mg kg ⁻¹)	Hg		Pb		Cr		Cd		As	
0 d	0.27		9.98		22.95		0.40		0.38	
JZ, 30 d	0.07 ± 0.016		11.95 ± 2.00		123.68 ± 10.60		0.80 ± 0.20		0.73 ± 0.015	
CK, 30 d	0.04 ± 0.017		8.96 ± 0.10		89.87 ± 10.42		1.19 ± 0.10		0.71 ± 0.025	
有机肥料标准 (NY525-2012) Standard of organic fertilizer (NY525-2012) [17]	≤ 2		≤ 50		≤ 150		≤ 3		≤ 15	

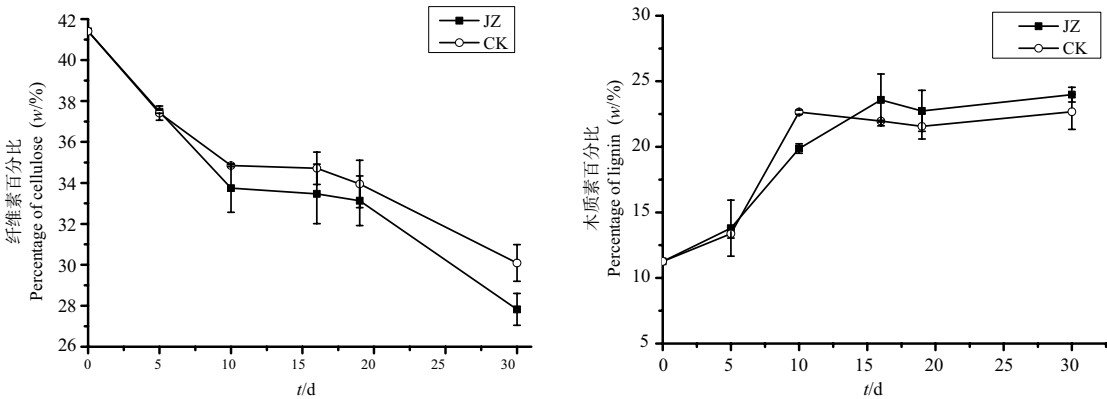


图3 堆肥过程中纤维素与木质素的含量.
Fig. 3 Percentages of cellulose and lignin during composting.

的方法^[25]. 一般来说, 堆肥过程中的GI值会先处于较低水平, 而后在高温阶段迅速上升, 最后缓慢上升至稳定阶段, 高达90%以上. GI值大于80%就认为堆肥到达腐熟^[12]. 从图 2 d中可以看出, 第19天和30天各组药渣堆肥的GI基本都超过100%, 说明堆肥19 d时就已经腐熟. 目前国内外还没有一种公认的堆肥腐熟指标, 根据本试验堆肥原料的特点, 我们选择T值和GI值作为腐熟指标来综合判断腐熟度, 这两个指标均表明堆肥在第19天时已经完全腐熟. GI值高于100%可能是堆肥产生了某种有利于芽根生长的物质使得处理组优于

空白. 第30天时, CK的GI值有所下降, 具体原因还有待进一步研究. 张永涛等利用中国大白菜和雪里蕻种子做堆肥GI测定, 也在堆肥后期发现了堆肥浸提液处理种子比去离子水发芽状况好, 后期的GI值有增减波动的情况^[26].

2.3 堆肥过程中纤维素与木质素降解

由图 3可以看出, 堆肥过程中纤维素百分含量明显降低. 在高温前期(0-10 d)降低较快, 高温后期(10-16 d)趋于短暂的稳定后, 腐熟期降解速率又开始加快. JZ和CK在0-10 d纤维素百分比降低速率分别为0.766 d⁻¹、0.656 d⁻¹, JZ比CK提

高了16.73%; 16-30 d纤维素百分比降低速率分别为 0.403 d^{-1} 、 0.331 d^{-1} , JZ比CK提高了21.75%。JZ平均降低速率为 0.453 d^{-1} , 大于CK的 0.377 d^{-1} , JZ比CK的纤维素百分比平均降低速率提高20.16%, 表明接种的菌剂加快了纤维素的降解。堆肥第30天时, JZ和CK纤维素分别从41.4%降低到27.82%和30.09%。与干基质减少量相结合可以计算出, 整个堆肥过程中JZ纤维素平均降解了21.94 kg, CK平均降解了19.35kg, 纤维素总量分别减量了69.31%和64.26%。JZ比CK纤维素降解量提高13.39%, JZ降解效果优于CK, 说明接种菌剂促进了纤维素的降解。

由于堆肥初期易降解的有机物首先降解, 木质素不易降解, 所以JZ和CK在堆肥中的相对含量由最初的11.26%分别升高至最终的23.99%和22.67%。堆肥后期物质降解比较缓慢, 木质素含量下降不明显。与干基质减少量相结合计算出, 整个堆肥过程中JZ每堆木质素降解0.24 kg, CK降解0.11 kg, JZ比CK提高了118.18%。木质素总量分别减量了2.72%和1.23%, 表明接种菌剂对木质素降解也有一定的促进作用。

在堆肥初期微生物大多利用易降解物, 纤维素、木质素的降解主要在高温期和腐熟期, 经过复杂的降解形成稳定的腐殖质类终产物^[27]。试验从升温期一开始, 纤维素就被迅速降解, 表明堆体中微生物数量多, 代谢活性高。JZ对纤维素降解速率明显优于CK, 推测接种菌剂可能很快就在基质中定殖下来, 并形成了新的微生物群落结构, 对纤维素等基质有较好的利用效果。研究堆肥过程群落结构演变能够为堆肥过程优化提供理论依据^[28-29], 应对此开展进一步的研究。

对木质纤维素降解效果与其它研究结果相比较, 如表2所示。本试验的堆肥原料中纤维素含量较高, 降解难度也更大。菌剂接种量相对较低, 堆肥时间短, 表明该菌剂活性好, 对纤维素降解能力强。

2.4 堆肥品质分析

由表3可以看出, 堆肥前后总有机质、总磷、总钾以及总养分(氮+五氧化二磷+氧化钾)都发生了很大变化。与原料相比, 整个过程中总有机质降低了6%左右, JZ和CK的总养分分别提高了106%和104%, 总磷增加了132%和128%, 总钾增加了113%和105%。堆肥结束时JZ和CK的总有机质和总养分都达到了有机肥料标准(NY525-2012)。同时随着药渣总干量的减少, TN相对含量会随之升高。堆肥结束, JZ组与CK组的TN分别增加94.5%和91.2%, 证明微生物菌剂促进了堆肥肥力的提高。堆肥过程磷钾的变化主要是基质中难溶性磷、钾化合物转化为可溶性的磷、钾化合物^[32], 而总磷总钾在整个过程中总量变化不大。随着堆肥药渣干重的减少, TP、TK浓度会不断累积, 有益于堆肥营养提升。总养分变化也显示, 接种菌剂对增加中草药渣堆肥肥力有一定促进作用。

由表4可以看出, 堆肥结束时JZ和CK样品的重金属含量也均符合有机肥料标准(NY525-2012)的要求。

3 结论

本研究对约1 t新鲜药渣未经预处理直接堆肥, 通过投加纤维素降解菌剂, 翻堆控制通氧, 堆肥30 d转化为优质腐熟的有机肥。JZ和CK堆肥药渣干重分别减量54.32%和50.82%, C/N降至14以下, pH值在8.0左右, 含水率降至30%以

下, 总养分达到6.0%以上, 重金属含量未超标, 达到有机肥料标准(NY525-2012)。根据T值和GI值显示, 各组堆肥19 d都已腐熟。JZ与CK相比, 纤维素降解量提高13.39%, 木质素降解量提高了118.18%。同时接入菌剂对堆肥温度上升、水分散失、C/N比降低及总养分提升等有明显促进作用, JZ堆肥腐熟时间和腐熟度也优于CK, 说明微生物菌剂对促进纤维素降解、提高堆肥腐熟度以及提升堆肥肥料品质有较好效果。本研究表明堆肥中草药渣生产有机肥在中试规模上是可行的, 为中药渣堆肥有机肥的工业化生产提供了理论依据。

参考文献 [References]

- 1 陈珞珈, 郑格琳. 我国中药产业的大势与前景[N]. 中国中医药报, 2015-01-15 (17)
- 2 党雄英. 中药药渣与生物有机肥料[J]. 甘肃高师学报, 2014 (2): 27-29 [Dang XY. Residue of Chinese herbs and biological organic fertilizer [J]. *J Gansu Norm Coll*, 2014 (2): 27-29]
- 3 张玉蓉, 杨加寿. 中药渣变废为宝畜牧业增效有望[J]. 中国农村卫生, 2014 (14): 36
- 4 Yang ZC, Zhao N, Huang F, Lü YZ. Long-term effects of different organic and inorganic fertilizer treatments on soil organic carbon sequestration and crop yields on the North China Plain [J]. *Soil Tillage Res*, 2015, **146**: 47-52
- 5 邓辉, 王成, 吕豪豪, 王飞儿, 屠巧萍, 吴伟祥. 堆肥过程放线菌演替及其木质纤维素降解研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (4): 581-586 [Deng H, Wang C, Lü H, Wang FE, Tu QP, Wu WX. Research progress in succession of actinomycetal communities and their capacity of degrading lignocellulose during composting process [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (4): 581-586]
- 6 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 [Li GX, Li YC, Li YF. Advance on composting of solid waste and utilization of additives [J]. *J Agro-enviro Sci*, 2003, **22** (2): 252-256]
- 7 徐秀银, 陈学祥, 杨静. 利用中药渣生产有机基质发酵条件研究[J]. 江苏农业科学, 2010 (3): 348-350 [Xu XY, Cheng XX, Yang J. Study on the fermentation conditions of using Chinese medicine residues to produce organic matrix [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2010 (3): 348-350]
- 8 梁卫驱, 郑芝波, 温洁明, 陈仕丽, 李巧红. 复合菌剂在中草药渣堆肥中的应用研究[J]. 广东农业科学, 2009 (5): 150-152 [Liang WQ, Zheng ZB, Wen JM, Cheng SL, Li QH. Applied research of using microbial agents on the compostion of Chinese herbal medicine residues [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2009, **5**: 150-152]
- 9 王茂, 郭鑫, 韩峰, 曾莉, 刘然, 曾永清. 不同菌剂对中药渣发酵过程的影响[J]. 绿色科技, 2015 (1): 159-161 [Wang M, Guo X, Han F, Zeng L, Liu R, Zeng YQ. The influence of different microbial inoculants on the fermentation process of Chinese herb residues. *Green Sci Technol*, 2015 (1): 159-161]
- 10 毕京芳, 黄钧, 关梦龙, 何京钟. 微生物菌剂发酵中草药渣生产有机肥的研究[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (5): 840-845 [Bi J, Huang J, Guan M, He J. Composting Chinese herbal residues with inoculum of microbial agents to produce organic fertilizer [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (5): 840-845]
- 11 汤江武, 朱利中. 不同堆肥条件对种子发芽指数影响的研究[J]. 浙江农业科学, 2008, **1** (5): 583-586 [Tang JW, Zhu LZ. Research of the

- influence of difference composting conditions on the seed germination index [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2008, **5**: 583-586]
- 12 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 31 [Li GX, Zhang FS. Production of the solid waste composting and organic compound fertilizer [M]. Beijing: Chem Industry Press, 2000: 31]
- 13 赵晨阳, 李洪枚, 魏源送, 钟佳, 郑嘉熹, 韩圣慧, 万合锋. 翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35** (2): 533-540 [Zhao CY, LI HM, Wei YS, Zhong J, Zheng JX, Han SH, Wan HF. Effects of turning frequency on emission of greenhouse gas and ammonia during swine manure windrow composting [J]. *Environ Sci*, 2014, **35** (2): 533-540]
- 14 Larney FJ, Olson AF, Carcamo AA, Chang C. Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer [J]. *Bioresour Technol*, 2000, **75** (2): 139-148
- 15 Hong N, Chen J, Gao D, Chen TB, Zhang XH, Cai L. Enhanced water reduction by turning during sewage sludge composting [J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 2014, **89** (5): 756-762
- 16 Kuok F, Mimoto H, Nakasaki K. Effects of turning on the microbial consortia and the in situ temperature preferences of microorganisms in a laboratory-scale swine manure composting [J]. *Bioresour Technol*, 2012, **116**: 421-427
- 17 农业部. 有机肥料NY525427.2 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- 18 Liang C, Das K, McClendon R. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend [J]. *Bioresour Technol*, 2003, **86** (2): 131-137
- 19 Kumar M, Ou YL, Lin JG. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio [J]. *Waste Manage*, 2010, **30** (4): 602-609
- 20 牛明芬, 于海娇, 武肖媛, 邹桂芝, 王思博, 梁文娟. 猪粪秸秆高温堆肥过程中物质变化的研究[J]. 江苏农业科学, 2014, **42** (9): 291-293 [Niu MF, Yu HJ, Wu XY, Zhou GZ, Wang SB, Liang WJ. Study on material changes during process of pig manure and straw composting [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2014, **42** (9): 291-293]
- 21 刘月, 许修宏, 徐杰, 孙瑜. 功能菌剂对堆肥中木质纤维素降解的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014 (4): 81-86 [Liu Y, Xu XH, Xu J, Sun Y. Effects of adding functional inoculum on lignocellulose degradation in composting [J]. *Soil Fertil Sci Chin*, 2014 (4): 81-86]
- 22 Golueke CG. Biological reclamation of solid wastes [M]. Emmaus: Rodale Press, 1977: 249
- 23 Michel Jr FC, Forney LJ, Huang AJ-F, Drew S, Czuprenski M, Lindeberg J, Reddy CA. Effects of turning frequency, leaves to grass mix ratio and windrow vs. pile configuration on the composting of yard trimmings [J]. *Compost Sci Utilization*, 1996, **4** (1): 26-43
- 24 Morel TL, Colin F, Germon JC, Godin P, Juste C. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost [C]//Grasser JKR. Composting of Agricultural and Other Wastes. London and New York: Elsevier Applied Science Publisher, 1985: 56-72
- 25 Zucchini F, Monaco A, Debertoldi M. Biological evaluation of compost maturity [J]. *Biocycle*, 1981, **22** (4): 27-29
- 26 张永涛. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007 [Zhang Y. Evaluation of the maturity of organic solid waste compost [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007]
- 27 Diaz LF, De Bertoldi M, Bidlingmaier W. Compost science and technology [M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2011: 364
- 28 Storey S, Chualain DN, Doyle O, Clipson N, Doyle E. Comparison of bacterial succession in green waste composts amended with inorganic fertiliser and wastewater treatment plant sludge [J]. *Bioresour Technol*, 2015, **179**: 71-77
- 29 Lopez-Gonzalez JA, Suarez-Estrella F, Vargas-Garcia MC, Lopez MJ, Jurado MM, Moreno J. Dynamics of bacterial microbiota during lignocellulosic waste composting: Studies upon its structure, functionality and biodiversity [J]. *Bioresour Technol*, 2015, **175**: 406-416
- 30 周万海, 魏琴, 王涛, 冯瑞章, 杜永华, 庞建义. 微生物菌剂在醋渣堆肥中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2014 (10): 11-15 [Zhou WH, Wei Q, Wang T, Feng RZ, Du YH, Pang JY. Effect of inoculating microbes on composting of vinegar dregs. *Food Ferment Ind*, 2014 (10): 11-15]
- 31 匡石滋, 李春雨, 田世尧, 易干军. 高效纤维素分解菌在香蕉茎秆堆肥中的应用研究[J]. 中国农学通报, 2013 (25): 194-198 [Kuang SZ, Li CY, Tian SY, Yi GJ. The Research of applying high efficient cellulolytic bacteria in banana stalks composting. *Chin Agric Sci Bull*, 2013 (25): 194-198]
- 32 刘微, 张津, 李博文, 王树涛. 不同微生物菌剂对番茄秸秆好氧堆肥中氮磷钾元素的转化规律的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014 (3): 88-92 [Liu W, Zhang J, Li BW, Wang ST. Effect of microorganism agents on tomato straw compost and changes of the NPK element forms [J]. *Soil Fertil Sci Chin*, 2014 (3): 88-92]