

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.01.006

宋修超, 黑若楠, 姚怡, 等. 不同中药渣组合好氧堆肥产物对土壤碳矿化特性的影响. 土壤, 2023, 55(1): 45–52.

不同中药渣组合好氧堆肥产物对土壤碳矿化特性的影响^①

宋修超¹, 黑若楠¹, 姚怡¹, 郭德杰¹, 罗佳^{1,2}, 马艳^{1,2*}

(1 国家农业环境六合观测实验站, 南京 210014; 2 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要: 为研究不同配方中药渣废弃物好氧堆肥产品品质差异及其对土壤碳素矿化的影响, 设置了好氧堆肥和有机肥还田两个试验。通过工厂化条垛式好氧堆肥试验, 研究了中药渣废弃物 3 种组合, 在相同碳氮比、不同木质纤维素含量下对好氧堆肥产品品质的影响; 采用土壤呼吸瓶进行室内恒温恒湿培养模拟土壤施肥效应, 研究了 3 种有机肥施用对不同肥力土壤有机碳分解动态的影响。试验结果显示: 中药渣物料的初始木质纤维素含量显著影响堆肥产品的碳氮养分转化和腐殖质组分。与初始低木质纤维素含量处理(T1)相比, 高木质纤维素含量处理(T3)堆肥有机碳降解难, 堆肥产品中全碳含量提高 5.7%, 全氮含量降低 18.4%, 但有利于腐殖质形成, 尤其是显著增加胡敏酸组分 20.9%。3 种中药渣堆肥产品等碳量输入对不同肥力土壤的碳素矿化效果差异显著, 高肥力土壤 CO₂-C 的释放速率和累积释放量均高于低肥力土壤, 但有机碳的累积矿化率却低于低肥力土壤, 并且高肥力土壤中添加 T1 堆肥产品累积矿化率显著高于添加 T3 堆肥产品。两个肥力土壤中有肥中胡敏酸组分与土壤碳素矿化率之间呈显著负相关关系。因此, 为提高有机肥的土壤固碳效应, 可适当提高有机肥中胡敏酸组分, 但不同肥力土壤应采用不同的养分管理策略。

关键词: 中药渣组合; 好氧堆肥; 碳矿化; 不同肥力土壤

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of Compost Products of Different Chinese Medicinal Residues on Soil Carbon Mineralization

SONG Xiuchao¹, HEI Ruonan¹, YAO Yi¹, GUO Dejie¹, LUO Jia^{1,2}, MA Yan^{1,2*}

(1 National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment, Luhe, Nanjing 210014, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to provide scientific basis and theoretical guidance for rational return to field of compost products, the quality difference of aerobic compost products from different formulations of Chinese medicinal residues and its influence on soil carbon mineralization were studied. The conducted experiment included two stages of aerobic composting and organic fertilizer return to the field. Through the factory strip aerobic composting experiment, the effects of three combinations of Chinese medicine residues on the quality of aerobic composting products at the same C/N ratio and different lignocellulose contents were studied, while soil breathing bottle was used for indoor culture under the constant temperature and humidity to simulate the effect of soil fertilization, and the effects of three kinds of organic fertilizers on the dynamic changes of organic carbon decomposition and soil organic carbon mineralization were studied under different fertility levels. The results show that lignocellulose content in the combinations of traditional Chinese medicine residues significantly affect carbon and nitrogen transformation and humus components of compost products. Compared with the initial low lignocellulose content treatment (T1), organic carbon is difficult to degrade under the high lignocellulose content treatment (T3), whose total carbon and nitrogen contents of the compost product is 5.7% higher and 18.4% lower than those of T1. And T3 is beneficial to the formation of humus, especially to humic acid component which is significantly increased by 20.9% compared with T1. The effects of three corresponding organic fertilizers on carbon mineralization are significantly different for different fertility soils under the same carbon input. The release rate and cumulative release amount of CO₂-C in high fertility soils are higher than those in low fertility soils, but the cumulative mineralization rate of organic carbon is lower than that in low fertility soils. In addition, the cumulative mineralization rate of T1

①基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金 (CX(21)3098) 和江苏现代农业(葡萄)产业技术体系建设项目(JATS[2022]446)资助。

* 通讯作者(myjaas@sina.com)

作者简介: 宋修超(1987—), 男, 山东即墨人, 博士研究生, 主要从事农业废弃物处理研究。E-mail: xiuchao103@163.com

compost in high fertility soil is significantly higher than that of T3 compost. Humic acid component in organic fertilizer has a significant negative correlation with soil carbon mineralization, therefore, in order to improve soil carbon sequestration, humic acid components can be appropriately increased in organic fertilizers, however, different nutrient management strategies should be adopted for different fertility levels of soil.

Key words: Chinese medicinal residues; Composting; Carbon mineralization; Different soil fertility

据统计, 2017 年我国中药材种植面积近 $4.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 中药加工过程产生药渣固体废弃物每年可高达 5 500 余万 $\text{t}^{[1]}$ 。中药渣中含有多种营养物质, 包括粗纤维、粗蛋白、粗脂肪、淀粉、氨基酸、维生素及中药有效活性成分等^[2]。目前, 中药渣的主要处理方式是堆积、焚烧和填埋, 由此导致的资源浪费和环境污染问题非常严重。因此, 如何将中药渣变废为宝, 不仅可以有效促进中药产业发展, 而且有助于解决环境问题。

高温好氧堆肥是实现农业废弃物资源化和无害化的有效方式, 将中药渣废弃物进行好氧堆肥制备有机肥产品是重要的处理技术^[3-4]。但是由于中成药原料复杂、配方不一的区别, 导致各批次中药残渣成分存在巨大差异, 增加了中药渣再利用的难度。黎智华等^[5]比较了几种中药渣原料营养成分差异, 发现植物类中药渣中粗蛋白质、粗灰分和纤维等均有差异, 但纤维含量的差异最大, 不同药渣组合间差异甚至可达 4 倍。同时, Kaiser^[6]报道好氧堆肥过程中原料木质纤维素含量对堆肥的腐熟过程起到限速作用, 这也验证了堆肥原料的木质纤维素含量差异可以显著影响堆肥进程, 进而影响堆肥产品的养分和品质。而当前关于此方面的研究严重缺失^[7]。因此, 本研究解析不同药渣组合中木质纤维素含量对堆肥产品养分及品质的影响, 这对进一步发展中药渣好氧堆肥技术具有重要意义。

另一方面, 有机肥施入土壤后, 在土壤微生物和温湿度等因素调控下, 经机械粉碎、矿化、合成等作用发生物质转化。其中, 矿化过程指微生物分解有机碳释放碳的过程, 此过程土壤有机碳转变成无机碳 ($\text{CO}_2\text{-C}$), 养分得到释放, 进而供植物吸收利用。因此, 有机肥施入土壤后的矿化数量和强度决定了其对植物养分的供应能力^[8]。土壤有机碳的矿化过程非常复杂, 受外部环境、土壤性质及有机肥种类等多种因素的影响^[9]。迄今为止, 关于环境中 CO_2 浓度、温度和水分^[10-12]、土壤种植模式^[13-14]、施用方式^[8]等对有机肥施用土壤中碳素矿化的影响已有报道。此外, 关于猪粪、秸秆、泥炭等不同种类有机肥的碳、氮矿化特性的研究也有不少^[15]。但是, 针对相同原料的有

机肥, 由于堆肥工艺引起的堆肥品质差异而影响其土壤碳素矿化的研究则很少。并且因中成药配方很多, 产生的中药渣原料性质差异较大。因此, 基于不同中药渣组合堆肥产物, 研究其在土壤中矿化特征, 这对于指导中药渣有机肥生产与施用具有重要作用。

基于此, 本研究通过中药渣好氧堆肥和有机肥矿化培养两个试验, 研究不同中药渣组合下堆肥的木质纤维素含量对堆肥产品养分和品质的影响, 以及不同堆肥产品施入土壤后土壤有机碳的矿化特性, 探讨堆肥品质与有机碳矿化特性的关系, 以为实现中药渣废弃物的资源化利用与中药渣有机肥的合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用中药渣均取自江苏康缘药业公司, 按照中药配方及其木质纤维素含量共筛选收集 4 种中药配方废渣作为基础堆肥组合, 分别为含单味中药的青蒿废渣(A)、金银花废渣(B), 含多味中药包括茯苓、红景天、牡丹皮、桂枝、桃仁等的废渣(C)和含有元胡、葛根、川芎、姜黄、平贝、独活、牡丹皮等的废渣(D)。将收集来的中药渣统一采用常规晾晒的方法, 将含水量控制在 65% 左右, 待用。为尽量避免晾晒过程中药渣腐烂发酵, 晾晒的物料高度不超过 20 cm。

1.2 试验设计

1) 不同中药渣原料堆肥试验。该试验在江苏省好徕斯肥业有限公司堆肥生产车间内进行。试验根据 4 种中药配方残渣的性质, 通过不同物料组合获得 C/N 比为 23 左右、木质纤维素总量分别为 453.4 (低), 502.8 (中), 550.4 g/kg (高) 三个梯度的好氧堆肥原料组合, 分别为: T1, A+B (干重比 1 : 1); T2, A+C (干重比 1 : 1); T3, A+C+D (干重比 1 : 1 : 1)。3 种堆肥组合基本性质见表 1。将 4 种物料按照以上比例充分混匀备用。

堆肥试验采用工厂化条垛式好氧堆肥方式进行。每个处理堆肥初始原料干物重 3 t, 堆制成长 \times 宽 \times 高分别为 18 m \times 1.5 m \times 1.5 m 的条垛。堆肥过程中, 根

据堆体温度变化,每隔 10 d 左右用翻抛机翻堆 1 次,整个发酵时间维持 120 d。在堆肥结束后采集堆肥样品,分析堆肥养分和腐殖酸组分指标。采样时将整个条垛平均分成 3 段,每段每次采样选择 6 个点,每个点从堆肥外层、中层、里层各取约 200 g 样品,混匀,然后将样品风干磨细用于理化性质测定。同时,堆肥结束后收集 3 种堆肥产品(TC1、TC2、TC3)分别包装,取部分产品风干后用小型粉碎机粉碎,过 2 mm 筛后

备用。

2)有机肥碳素矿化培养试验。供试土壤选择高肥力和低肥力两种土壤,其中高肥力土壤取自江苏省南京市六合区龙袍农业产业园多年设施栽培的菜田 0~20 cm 表层;低肥力土壤取自设施大棚周边闲置露地 0~20 cm 表层。将土壤中石块、农膜、植物根等杂物拣出后,过 2 mm 筛,充分混合均匀于室温保存备用。供试土壤基本理化性质见表 2。

表 1 中药渣组合堆肥试验设计及基本性质

Table 1 Experimental design and basic properties of composts of Chinese medicinal residues

| 处理 | 药渣组合 | 全碳 (g/kg) | 全氮 (g/kg) | 全磷 (g/kg) | 全钾 (g/kg) | C/N | 含水量 (g/kg) | 木质纤维素 (g/kg) |
|----|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|---------------|-----------------|
| T1 | A+B | 467.62 | 20.01 | 6.94 | 11.67 | 23.36 | 652.6 | 453.4 |
| T2 | A+C | 471.51 | 20.12 | 6.51 | 10.82 | 23.45 | 643.6 | 502.8 |
| T3 | A+C+D | 468.89 | 19.83 | 6.59 | 11.21 | 23.71 | 645.1 | 550.4 |

表 2 供试土壤的基本性状

Table 2 Physiochemical properties of tested soil

| 土壤肥力 | 全碳 (g/kg) | 全氮 (g/kg) | 全磷 (g/kg) | 全钾 (g/kg) | 硝态氮 (mg/kg) | 铵态氮 (mg/kg) | 有效磷 (mg/kg) | 速效钾 (mg/kg) |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 高肥力 | 18.78 | 2.15 | 2.06 | 5.02 | 125.86 | 6.84 | 101.26 | 277.73 |
| 低肥力 | 9.52 | 1.26 | 0.75 | 1.54 | 7.14 | 0.43 | 26.62 | 77.37 |

试验时 3 种有机肥以等碳量添加到土壤中,添加量为 1% 肥/土质量比(以 3 种有机肥中全碳含量最低的 TC1 为标准,TC2 和 TC3 按等碳量换算质量),并不加有有机肥土壤为对照。将土壤与有机肥充分混匀装入体积为 250 mL 的广口瓶,装土量 260 g。用去离子水调节土壤湿度为田间持水量的 60%,将盛有 20 mL 0.4 mol/L NaOH 溶液的烧杯放到广口瓶内,吸收培养过程中释放出的 CO₂,加盖密闭后将塑料瓶置于(25±2)℃的恒温恒湿培养箱内进行为期 42 d 的培养。培养期间每 5 d 通过称重法保持土壤含水量,并于第 1、3、5、7、9、12、14、17、21、24、28、31、35、38 和 42 天取出吸收瓶,测定土壤 CO₂ 释放量,同时重新放置吸收瓶后密封培养,每次 3 个重复。培养期结束后取 80 g 鲜土储藏在 4℃冰箱内备用。

1.3 测定项目与方法

堆肥的 pH 用电位法测定,含水率采用 105℃烘干称重法测定,全碳(TC)、全氮(TN)采用元素分析仪(vario MACRO cube)测定,全磷(TP)、全钾(TK)采用有机肥料 NY525—2012 中标准方法测定^[16],C/N 比计算方法为全碳含量与全氮含量的比值。总腐殖酸(THA)的测定用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾容量法,富里酸(FA)、胡敏酸(HA)含量的测定用焦磷酸钠-氢氧化钠提取重铬酸钾氧化容量法^[17],胡富比(HA/FA)为

胡敏酸和富里酸含量的比值。堆肥各时期样品纤维素、木质素和半纤维素的测定按照范氏(VanSoest)的洗涤纤维分析法^[18],采用 ANKOM220 型纤维分析仪测定中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)和酸性洗涤木质素(acid detergent lignin, ADL)的含量,并通过计算获得半纤维素和纤维素的含量。

土壤有机碳矿化速率(CO₂-C, mg/(kg·d))=培养时间内有机碳矿化量(CO₂-C, mg/kg)/培养天数(d)。土壤有机碳累积矿化量指从培养开始至某一时间点土壤 CO₂-C 总释放量;土壤有机碳累积矿化率(%)=至某一时间点的土壤有机碳累积矿化量(g/kg)/土壤总有机碳(g/kg)×100。

1.4 数据分析

试验数据经 Excel 2010 处理后应用 SPSS 22.0 软件进行方差分析,比较不同处理间在 P<0.05 水平的显著性差异,用 Origin 9.0 进行作图。

2 结果分析

2.1 不同中药渣组合下堆肥产品的基本理化性质

3 种中药渣废弃物组合好氧堆肥产物的主要性质见表 3。3 种堆肥产品的 pH 为 6.90~7.25,全氮、磷和钾养分总量高于 50 g/kg,有机质含量高于 550 g/kg,

表 3 不同物料组合堆肥产品养分的变化

Table 3 Changes of total organic carbon, nitrogen, phosphorous, potassium and C/N of composts with different material combinations

| 处理 | pH | 电导率 (mS/cm) | 有机质 (g/kg) | 全氮 (g/kg) | 全磷 (g/kg) | 全钾 (g/kg) | C/N | 总养分 (g/kg) |
|----|---------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------|---------------|
| T1 | 6.90 ± 0.21 b | 2.82 ± 0.32 a | 589.61 ± 43.3 b | 28.31 ± 2.12 a | 11.60 ± 0.93 a | 14.12 ± 1.02 a | 12.08 | 54.03 |
| T2 | 7.25 ± 0.13 a | 1.96 ± 0.21 b | 628.93 ± 5.38 a | 26.20 ± 1.73 ab | 10.31 ± 0.82 b | 15.13 ± 0.93 a | 13.92 | 51.64 |
| T3 | 6.91 ± 0.11 b | 2.02 ± 0.30 a | 623.21 ± 2.21 a | 23.12 ± 1.24 b | 12.52 ± 0.61 a | 14.80 ± 1.14 a | 14.59 | 50.44 |

注：表中小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

均达到我国商品有机肥料(NY525—2012)的标准^[16]。但由于堆肥原料的初始木质素、纤维素和半纤维素等化学组成不同,导致堆肥产物的基本理化性质差异较大。其中有机质含量与堆肥初始的木质纤维素含量成反比,初始木质纤维素含量越低,有机质分解越容易,堆肥产品有机质含量越低,而全氮含量与之相反。由于氮素“浓缩作用”,T1 处理氮含量显著高于 T3 处理 18.4%($P < 0.05$)。堆肥产品全磷和全钾的含量差异不大,主要受堆肥初始原料本底含量影响。

2.2 不同中药渣组合下堆肥产品的腐殖酸及其组分

堆肥产品中腐殖酸及其组分含量是影响有机肥农用效果的重要因素,因此,堆肥中腐殖质类物质的含量与组成是评价有机肥品质的重要指标。如表 4 所示,堆肥产品的总腐殖酸含量差异不显著,表明堆肥原料的初始木质纤维素含量对腐殖酸总量影响不大。但腐殖酸的组成差异显著($P < 0.05$),木质纤维素含量高的 T3 处理胡敏酸含量最高,即显著高于 T1 处理 17.3% 和 T2 处理 15.0%;富里酸含量与之相反,初始木质纤维素含量越高,堆肥产品的富里酸含量越低,T1 处理富里酸含量显著高于 T3 处理 17.9%;胡富比也是 T3 处理最高。

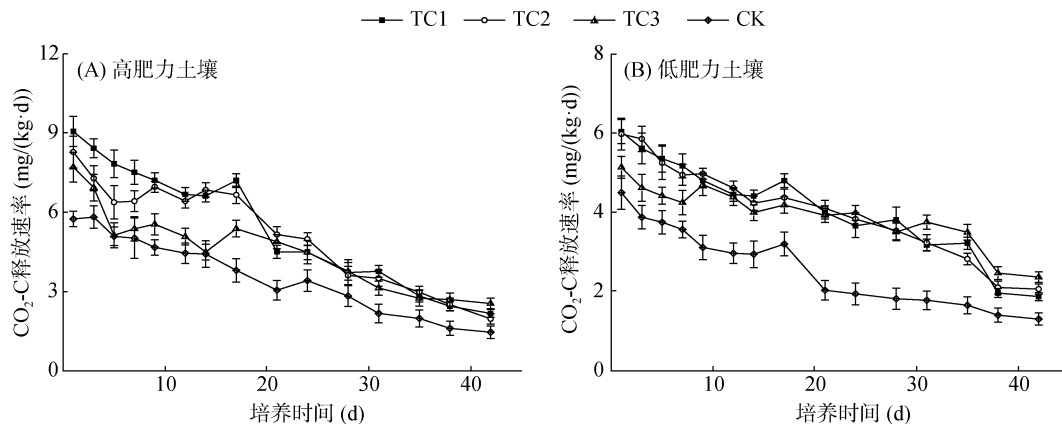
2.3 堆肥产品对不同肥力土壤有机碳矿化速率的影响

如图 1 所示,在两种肥力土壤中有有机碳的释放速率随培养时间延长而降低,表现为前快、后慢,整体在高肥力土壤中 $\text{CO}_2\text{-C}$ 释放速率高于低肥力土壤。与 CK 处理相比,添加 3 种堆肥产品均能够提高 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的释放速率,培养 38 d 左右两种土壤有机碳矿化速率均趋于稳定。在高肥力土壤中,培养后期各堆肥处理 $\text{CO}_2\text{-C}$ 释放速率与对照差异不大,堆肥处理间在培养前 20 d,TC1 与 TC2 处理要高于 TC3 处理;而在低肥力土壤中,前 7 d 的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 释放速率 TC1 和 TC2 处理要高于 TC3 处理,之后 3 个堆肥处理间差异不大,但直至培养后期仍然显著高于 CK 处理($P < 0.05$)。

表 4 不同物料组合堆肥产品品质的变化

Table 4 Quality changes of composts with different material combinations

| 处理 | 总腐殖酸 (g/kg) | 胡敏酸 (g/kg) | 富里酸 (g/kg) | 胡富比 |
|----|------------------|----------------|----------------|------|
| T1 | 148.90 ± 12.36 a | 80.27 ± 5.23 b | 68.63 ± 3.86 a | 1.18 |
| T2 | 147.36 ± 14.54 a | 82.53 ± 4.66 b | 64.83 ± 2.63 a | 1.27 |
| T3 | 155.29 ± 10.58 a | 97.06 ± 6.5 a | 58.23 ± 2.55 b | 1.67 |

图 1 两种肥力土壤条件下 $\text{CO}_2\text{-C}$ 释放速率动态变化Fig. 1 Emission rates of $\text{CO}_2\text{-C}$ under two soil fertility levels

2.4 堆肥产品对不同肥力土壤有机碳矿化量的影响

如图 2 显示, 在两种肥力土壤中, 与 $\text{CO}_2\text{-C}$ 释放速率对应, 3 个堆肥处理的有机碳累积矿化量 ($\text{CO}_2\text{-C}$) 显著高于 CK 处理, 且有机碳累积矿化量与土壤肥力成正比。在高肥力土壤中, TC1 与 TC2 处理间有机碳累积矿化量差异不大, 但显著高于 TC3 处理; 与 CK 处理相比 3 个堆肥处理有机碳累积矿化量分别增加 41%、38% 和 24%。而在低肥力土壤中, 3 个堆肥处理间有机碳累积矿化量差异均不大, 但显著高于 CK 处理, 分别增加 61%、60% 和 56%。

2.5 堆肥产品对不同肥力土壤有机碳矿化率的影响

有机碳的累积矿化量 ($\text{CO}_2\text{-C}$) 占培养开始之前土壤有机碳含量的比例, 即土壤有机碳矿化率。如图 3 所示, 在高肥力土壤中, 3 种堆肥产品均显著提高有机碳的矿化率, 且 TC1 和 TC2 处理显著高于

TC3 处理 ($P < 0.05$), 分别提高 13% 和 11%。与高肥力土壤中不同, 低肥力土壤中虽然与 CK 处理相比, 添加 3 种堆肥产品均能够提高有机碳的矿化率, 且提高的幅度要大于高肥力土壤, 但 3 种堆肥产品间差异均不大。

如图 4 所示, 分析 3 种堆肥中腐殖酸及其组分与土壤有机碳矿化率间的关系发现, 在等碳量输入的情况下, 堆肥中胡敏酸的含量对土壤有机碳矿化率的影响达显著水平 ($P < 0.05$), 并且在低肥力土壤和高肥力土壤中胡敏酸与有机碳矿化率均呈显著的负相关关系。

3 讨论

农业废弃物好氧堆肥转化过程是在指细菌、真菌、放线菌等微生物及其分泌酶的作用下, 经矿化和腐殖化, 将废弃物转化为稳定的腐殖质类物质, 同时通过有机物降解产生的高温, 达到杀灭病原菌效果的

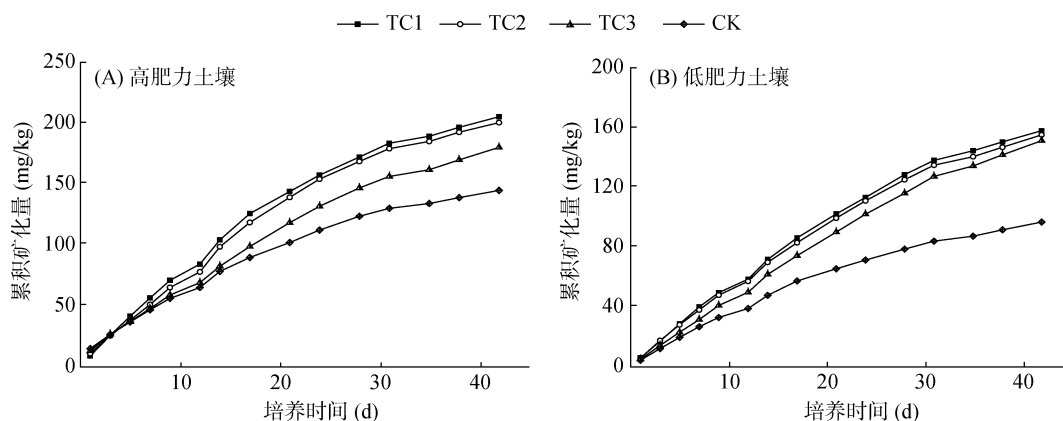
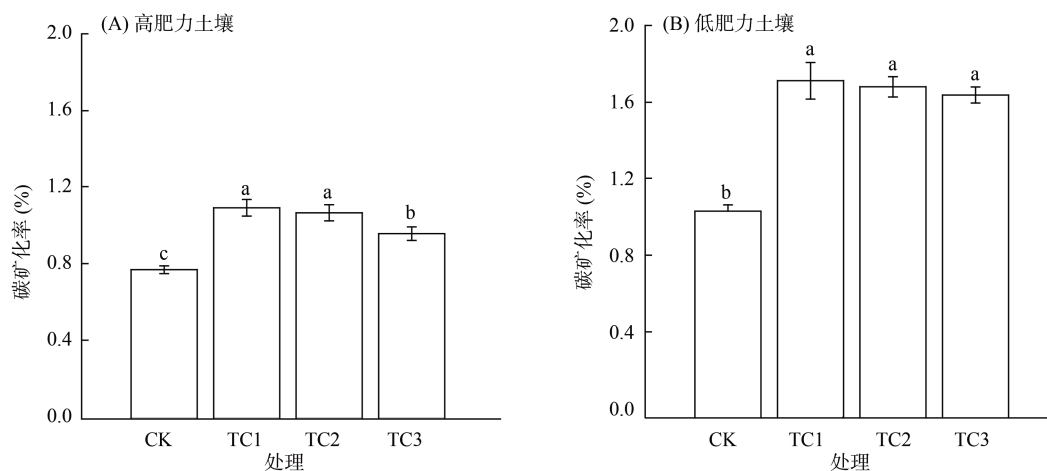


图 2 两种肥力土壤条件下有机碳累积矿化量

Fig. 2 Cumulative mineralization of soil organic carbon under two soil fertility levels



(图中不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 3 各处理土壤有机碳矿化率

Fig. 3 Cumulative mineralization rates of soil organic carbon under two soil fertility levels

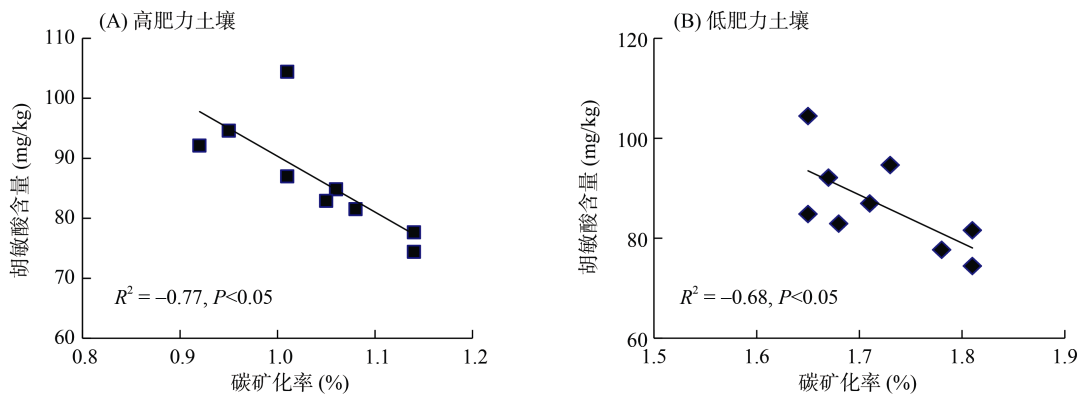


图 4 堆肥中胡敏酸含量与土壤有机碳矿化率的相关性

Fig. 4 Correlation between humic acid content of compost and mineralization rate of soil organic carbon

过程^[19-21]。中药渣废弃物富含纤维素、半纤维素和木质素等高分子聚合物^[4]，结构复杂，难以被微生物利用，这是限制物料分解速度的重要因素，也是导致堆肥品质不高、肥效较差的重要原因。

本研究中，初始木质纤维素含量对于堆肥产物中碳氮养分和腐殖酸及其组分影响较大，堆肥原料中高木质纤维素含量处理的堆肥产品碳含量最高，氮含量则最低。这主要是由于中药渣物料中的难降解有机质组分木质纤维素含量对堆肥的腐熟过程起限速作用，木质纤维素的分子结构复杂限制了微生物分解^[6]。同时，木质素中的一些酚类化合物能够抑制微生物活性，加剧物料的分解难度^[22]，这也导致堆肥内有机碳分解较少，而保留在堆肥内较多。堆体内氮素的浓度差异，主要是因为堆肥初始原料的分解难易程度不同，木质纤维含量高，减量化少，氮素浓度相对小。此外，常瑞雪等^[23]报道，堆肥初始原料中易降解有机质的含量可显著影响堆肥的起爆效应，易降解有机质含量高，易实现高温，由此更易导致氮素损失，而木质纤维素类物质等难降解有机质含量较高，则可有效减少堆肥中氮素的损失。

堆肥腐殖质是堆肥化过程中生成的次生产物。在堆肥化过程中，腐殖质的含量处于不断变化的状态。木质纤维素含量能够显著影响堆肥产品中腐殖酸及其组分^[24]。Bikovens 等^[25]发现，木质纤维素和堆肥腐殖质形成具有促进作用，尤其是丁香基和愈创木基比例与腐殖酸组分相同，能够促进腐殖酸合成。本研究结果与之相似。值得注意的是，堆肥过程中腐殖质的合成和木质素的降解均集中在高温期和腐熟期完成，木质纤维素被微生物降解后转化为具有良好生物降解性能的小分子化合物，如多糖、多酚等，此类小分子化合物与氨基化合物聚合形成腐殖质的前体物质，在堆肥微生物调控下，直接实现木质素向腐殖质

的转化^[26]。

施肥对土壤有机碳矿化的影响一般表现为施肥高于不施肥，施有机肥高于施化肥，这主要是因为有机肥可输入更多有机碳，提高土壤功能微生物的代谢活性和碳氮可利用性，进而影响土壤碳库的稳定性和温室气体的排放^[27-28]。并且外源有机碳输入，会导致土壤原有有机碳分解的激发效应^[29]。

本研究中，等碳量的有机肥输入情况下，有机肥中胡敏酸含量与土壤有机碳矿化率呈显著的负相关关系。通常情况下，土壤有机碳矿化率与土壤固碳能力成反比，有机碳矿化率越高，土壤的固碳能力越弱，反之，则固碳能力越强。这主要是因为胡敏酸组分是腐殖酸中分子量高、稳定性高的物质，且含有多种功能基，如羧基、酚羟基等，可以有效促进土壤团粒结构形成，而团聚体的包裹作用可以保护颗粒有机碳，避免被微生物降解，从而导致土壤有机碳矿化速率下降^[24,30]。

土壤本底肥力水平可以显著影响土壤碳素可矿化潜力，本研究结果显示，高肥力土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的释放速率和累积释放量均高于低肥力土壤，这主要由于高肥力土壤本底有机质含量高，微生物的生物活性高，能够加速外源输入有机碳和本底有机碳分解^[31]。李顺姬等^[32]报道，土壤本底有机碳含量与碳素矿化率成正比，尤其是颗粒有机碳作为土壤有机碳的活性组分，与土壤碳素矿化动态密切相关。值得注意的是，本研究结果发现，虽然高肥力土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的释放速率和累积释放量高于低肥力土壤，但有机碳的累积矿化率却低于低肥力土壤，这表明高肥力土壤在增加土壤有机碳矿化速率的同时并不会增加有机碳的损失率，因此，土壤有机碳矿化率反而低于团粒结构差的低肥力土壤。

4 结论

1)堆肥初始木质纤维素含量主要影响堆肥产品碳氮养分的损失和腐殖质组分。初始有机物料木质纤维素含量高,堆肥过程中碳素分解难,堆肥产品中全碳含量较高,氮素含量相对较低,但有利于腐殖质形成尤其是胡敏酸组分的形成。

2)在不同肥力土壤中,有机肥的输入对高肥力土壤 CO₂-C 的释放速率和累积释放量高于低肥力土壤,但有机碳的累积矿化率却低于低肥力土壤。

3)等量碳源输入的情况,在不同肥力土壤中,有机肥中胡敏酸组分含量与土壤碳素矿化率呈显著负相关关系,胡敏酸组分含量越高有机肥的碳素矿化率越低,土壤固碳能力增强。

参考文献:

- [1] 段金庵,郭盛,唐志书,等. 中药资源循环利用模式构建及产业化示范[J]. 江苏中医药, 2019, 51(3): 1-5.
- [2] 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(S1): 125-128.
- [3] 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.
- [4] 贺超,王文全,侯俊玲. 中药药渣生物有机肥的研究进展[J]. 中草药, 2017, 48(24): 5286-5292.
- [5] 黎智华,祝倩,姬玉娇,等. 六种中药渣的营养成分[J]. 天然产物研究与开发, 2017, 29(1): 91-95.
- [6] Kaiser J. Modelling composting as a microbial ecosystem: A simulation approach[J]. Ecological Modelling, 1996, 91(1/2/3): 25-37.
- [7] Faverial J, Boval M, Sierra J, et al. End-product quality of composts produced under tropical and temperate climates using different raw materials: A meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 183: 909-916.
- [8] 任凤玲,张旭博,孙楠,等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 119-128.
- [9] Lamparter A, Bachmann J, Goebel M O, et al. Carbon mineralization in soil: Impact of wetting-drying, aggregation and water repellency[J]. Geoderma, 2009, 150(3/4): 324-333.
- [10] Zang H D, Blagodatskaya E, Wen Y, et al. Temperature sensitivity of soil organic matter mineralization decreases with long-term N fertilization: Evidence from four Q₁₀ estimation approaches[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(6): 683-693.
- [11] 董星丰,陈强,臧淑英,等. 温度和水分对大兴安岭多年冻土区森林土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4269-4275.
- [12] Marhan S, Demin D, Erbs M, et al. Soil organic matter

mineralization and residue decomposition of spring wheat grown under elevated CO₂ atmosphere[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 123(1/2/3): 63-68.

- [13] Bagheri Novair S, Mirseyed Hosseini H, Etesami H, et al. Rice straw and composted azolla alter carbon and nitrogen mineralization and microbial activity of a paddy soil under drying-rewetting cycles[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 154: 103638.
- [14] Mary B, Clivot H, Blaszczyk N, et al. Soil carbon storage and mineralization rates are affected by carbon inputs rather than physical disturbance: Evidence from a 47-year tillage experiment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 299: 106972.
- [15] 周博,高佳佳,周建斌. 不同种类有机肥碳、氮矿化特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 366-373.
- [16] 中华人民共和国农业部. 有机肥料: NY 525—2012[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [17] Senesi N. Composted materials as organic fertilizers[J]. Science of the Total Environment, 1989, 81(82): 521-542.
- [18] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10): 3583-3597.
- [19] Yañez R, Bueno P, Rivera A, et al. Selective organic compounds degradation under controlling composting conditions[J]. Waste Management, 2010, 30(5): 755-763.
- [20] Shao B B, Liu Z F, Zhong H, et al. Effects of rhamnolipids on microorganism characteristics and applications in composting: A review[J]. Microbiological Research, 2017, 200: 33-44.
- [21] 高华,谷洁,秦清军,等. 加入外源菌剂后脱氢酶活性在农业废弃物静态高温堆腐过程的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 786-791.
- [22] Aira M, Monroy F, Domínguez J. *Eisenia fetida* (*Oligochaeta*, Lumbricidae) activates fungal growth, triggering cellulose decomposition during vermicomposting[J]. Microbial Ecology, 2006, 52(4): 738-747.
- [23] 常瑞雪,王骞,甘晶晶,等. 易降解有机质含量对黄瓜秧堆肥腐熟和氮损失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 231-237.
- [24] 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.
- [25] Bikovens O, Dizhbite T, Telysheva G. Characterisation of humic substances formed during co-composting of grass and wood wastes with animal grease[J]. Environmental Technology, 2012, 33(12): 1427-1433.
- [26] 李怨艳,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(S2): 268-274.
- [27] 王朔林,王改兰,赵旭,等. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015,

- 21(1): 104–111.
- [28] 吕真真, 刘秀梅, 仲金凤, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(15): 2636–2645.
- [29] 吕殿青, 张树兰, 杨学云. 外加碳、氮对黄绵土有机质矿化与激发效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 423–429.
- [30] 李伟, 代镇, 张光鑫, 等. 生物炭和氮肥配施提高土壤团聚体稳定性及作物产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 782–791.
- [31] 林清美, 廖超林, 谢丽华, 等. 地下水位和长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化特征的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1414–1424.
- [32] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1217–1226.