

李其胜,殷小冬,董青君,等. 生物炭和微生物菌剂添加对菇渣好氧堆肥过程及其养分变化的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(11):212-218.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.11.030

生物炭和微生物菌剂添加对菇渣好氧堆肥过程及其养分变化的影响

李其胜,殷小冬,董青君,杨文飞,杜小凤,文廷刚,贾艳艳,顾大路

(江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所,江苏淮安 223001)

摘要:针对当前堆肥工艺存在养分损失严重、堆肥品质不高等问题,如何加速堆肥原料的腐殖化过程并对其实施科学控制,是提高堆肥处理产品质量的关键。以杏鲍菇菇渣为堆肥原料、生物炭和微生物菌剂为添加剂,设置无添加剂(T1)、添加5%生物炭(T2)、添加10%生物炭(T3)、添加15%生物炭(T4)、添加0.3%微生物菌剂(T5)、添加5%生物炭+0.3%微生物菌剂(T6)、添加10%生物炭+0.3%微生物菌剂(T7)、添加15%生物炭+0.3%微生物菌剂(T8)共8个处理,以探究生物炭和微生物菌剂对菇渣堆肥养分保留和腐熟程度的影响。结果表明,堆肥结束时,所有处理均能达到堆肥无害化腐熟标准。含2种添加剂处理T6、T7和T8较单一添加剂、不加添加剂处理能延长堆肥高温时间,提高小麦种子发芽指数。各处理EC值随堆肥过程逐渐下降至1.75~2.07 mS/cm,以T3、T4、T7和T8处理较低。与其他处理相比,T6、T7处理显著增加堆肥的全氮、全磷含量,速效磷、速效钾和硝态氮含量也以T7处理较高。添加生物炭和微生物菌剂处理在氮磷保留中具有良好的效果,其中T7、T8处理的堆体干物质失质量率和氮素损失率显著低于其他处理。综合来看,添加10%生物炭和0.3%微生物菌剂的T7处理在促进菇渣堆肥腐熟、改善堆肥品质方面有较好的效果,不仅能减少养分流失,还能提升堆肥产品农用效益。

关键词:菇渣;生物炭;微生物菌剂;堆肥品质;养分变化

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)11-0212-07

我国是食用菌生产大国,每年至少产生1 600万t菇渣,如不能对其合理利用,易造成农业有机资源浪费和二次环境污染^[1]。菇渣中含有丰富的多糖、蛋白质、有机质和多种酶等活性物质,是良好的

堆肥材料。好氧堆肥处理成为资源化利用菇渣最有效的方法之一^[2]。在堆肥过程中,菇渣养分含量因总干物质质量的减少产生浓缩效应而增加^[3]。过去的自然堆制发酵时间长,且因氨挥发等过程导致养分流失,显著降低了堆肥产品品质^[4]。因此,如何合理高效堆肥,改善堆肥中的氮素流失和理化特性已成为人们关注的热点^[5]。

许多研究表明,在堆肥过程中施入一定量的添加剂对提高堆肥质量、强化重金属的钝化有较好的效果^[6-8]。常见的添加剂包括具有耦合吸附作用的生物炭、沸石,某些化学物质,如过磷酸钙及外源微生物等^[9-10]。生物炭因具有疏松多孔的物理结构使其具有较强的吸附性能,近年来常作为堆肥添加

收稿日期:2022-08-22

基金项目:江苏省自然科学基金(编号:BK20200264);淮安市农业科学研究院高层次人才引进人才科研启动发展基金(编号:002201901413);淮安市农业科学研究院科研发展基金(编号:HNY202028);淮安市农业科学研究院科研发展基金(编号:HNY202130)。

作者简介:李其胜(1994—),男,河南焦作人,硕士,主要从事有机肥的应用研究。E-mail:qishengli-12300@163.com。

通信作者:贾艳艳,博士,助理研究员,主要从事微生物与土壤养分循环。E-mail:yyjia667@163.com。

[46]赵婧. 不同改良措施对红壤全程氨氧化细菌群落组成及功能的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2021.

[47]Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 44(1): 9-20.

[48]罗晓蔓,周书宇,杨雪. 植物根系分泌物的分类和作用[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(4): 37-39, 45.

[49]张欣欣,张爱华,雷锋杰,等. 人参内生细菌 F1 对人参根系分泌物的化学趋向性响应[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(24): 5358-5362.

[50]刘海,韦莉,任永胜,等. 柏木根系分泌物对栎树细根形态及 N、P 含量的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(9): 1661-1669.

[51]王璐,陈明霞,邵云,等. 作物根系分泌物对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(1): 66-71.

剂使用^[11]。有研究认为,将生物炭应用在堆肥上可显著加快堆体腐熟进程,利于氮素的保持,增加微生物量^[12]。也有学者认为,生物炭还可为微生物生长提供多种养分及适宜的生态位,强化微生物介导的生化反应,促进堆肥有机质降解和腐殖化^[13]。如 Tu 等研究发现,生物炭与微生物菌剂复合体显著提高猪粪堆肥细菌群落的丰度和多样性,并显著增加拟杆菌门和软壁菌门群落丰度^[14]。Zhao 等在关于鸡粪堆肥研究中发现,添加外源菌剂可加速堆肥物料中的纤维素、半纤维素降解,促进堆肥腐熟^[15]。因此,在堆肥过程中同时添加生物炭和复合菌剂,有望进一步提高堆肥效率^[16-17]。当前有关添加生物炭或微生物菌剂对有机废弃物堆肥的研究较多,但关于同时添加复合菌剂和生物炭对食用菌菇渣堆肥过程的联合效应仍不明确,有关其对堆肥养分固持和品质提升等方面的机制有待研究^[18]。

为探明生物炭联合微生物菌剂对菇渣堆肥品质的调控作用,本研究以杏鲍菇菇渣为原料,添加不同比例生物炭和微生物菌剂进行堆肥发酵,通过堆体温度、pH 值、含水率、电导率、种子发芽指数及菇渣养分等指标,确定添加生物炭和微生物菌剂适宜比例,以期能科学评估外源炭载微生物菌剂对食用菌菇渣堆肥腐殖化进程的影响,为菇渣的资源化利用和炭载微生物菌剂在农业废弃物堆肥方面的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试菇渣来自江苏淮香食用菌有限公司,为杏鲍菇栽培废料,其成分主要是木屑、玉米芯和甘薯渣等;供试微生物菌剂购自淮安市大华生物科技有限公司,主要包括:枯草芽孢杆菌、米根霉、粉状毕赤酵母和戊糖片球菌,有效活菌数总量为 2×10^8 CFU/g 以上;生物炭购自市售。供试材料的基本性质见表 1。

表 1 堆肥原料的初始性质

物料	pH 值	含水率 (%)	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)
菇渣	6.46	40.20	380.85	19.62	3.54	11.53
生物炭	8.54	7.00	750.00	17.00	7.10	5.30

1.2 菇渣堆肥试验设计

于 2022 年 3 月在淮安市农业科学研究院科研

创新基地进行堆肥,试验共设置 8 个处理,分别为 T1(菇渣),T2(菇渣+5%生物炭),T3(菇渣+10%生物炭),T4(菇渣+15%生物炭),T5(菇渣+0.3%菌剂),T6(菇渣+5%生物炭+0.3%菌剂),T7(菇渣+10%生物炭+0.3%菌剂),T8(菇渣+15%生物炭+0.3%菌剂)。生物炭和微生物菌剂均按照质量百分比添加。每个处理设置 3 个重复,在加水前堆肥原料总质量均为 30 kg,与添加剂混匀后放入长 90 cm×宽 70 cm×高 50 cm 的泡沫箱中,然后加水至堆体含水率为 60% 左右进行发酵。每天 14:00 测定堆体中心的温度,然后人工翻堆,每隔 2 d 翻堆 1 次。

1.3 堆肥样品采集与测定

在堆肥进行到 0、3、7、14、21 d 时,混匀原料翻堆,从堆体不同部位采集等量样品并混匀,样品一份进行风干、研磨后过 100 目筛,用于全量养分的测定,另一份保存于 -20 ℃ 冰箱待测。

堆体温度使用电子温度计插入堆体中部测得;含水率采用恒质量法测定;pH 值采用 pH 计测定;EC 值用电导率仪测得;全氮用硫酸和过氧化氢酸消煮后,半微量凯氏定氮法测定;有机碳采用重铬酸钾容量法测定;速效钾采用火焰光度计法测定;铵硝含量用流动分析仪^[19]测定。

种子发芽指数方法:将堆肥样品(5.0 g)置于锥形瓶中,采用蒸馏水按照 1:10(质量体积比)比例于摇床上振荡浸提,在含滤纸的培养皿内加入 10 mL 滤液,其上均匀放入 10 粒大小基本一致、颗粒饱满的小麦种子,盖上培养皿盖,在培养箱中避光条件下培养 48 h,计算发芽率并测定主根长。以蒸馏水作对照,共计 3 次重复。计算公式为: $GI = (A_1 \times A_2) / (C_1 \times C_2) \times 100\%$ 。其中, A_1 和 C_1 分别为堆肥浸提液和对照的种子发芽率,%; A_2 和 C_2 为堆肥浸提液和对照培养种子的平均根长,mm。

干物质损失与氮素损失均参考张文明等的方法^[20],计算公式如下:

$$W_i = (D_i - D_0) / D_0 \times 100\%; \quad (1)$$

$$N_i = (D_i \times E_i - D_0 \times E_0) / (D_0 \times E_0) \times 100\%。 \quad (2)$$

式中: W_i 为第 i 天堆肥干物质失质量率; D_0 、 D_i 分别为各处理堆肥原料 0 d 和 i d 干物质质量,kg; N_i 为第 i 天堆肥氮素损失率; E_0 、 E_i 分别为各处理堆肥原料 0 d 和 i d 全氮含量,g/kg。

1.4 数据处理

试验数据采用 Duncan's 法检验各处理间差异性($\alpha=0.05$)。采用 Excel 2016 和 Origin 2022b 进行制表和作图。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度和含水率的变化

堆肥的第 1 天各处理均进入高温阶段($>50\text{ }^{\circ}\text{C}$),并在 $50\sim65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内保持约 10~12 d 后逐渐降低至室温。添加生物炭和复合菌剂处理(T6、T7、T8)较其他处理高温期延长 2~3 d,其中,

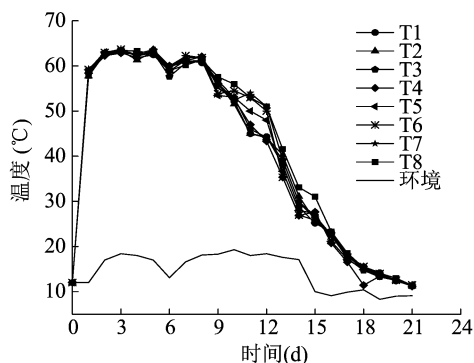
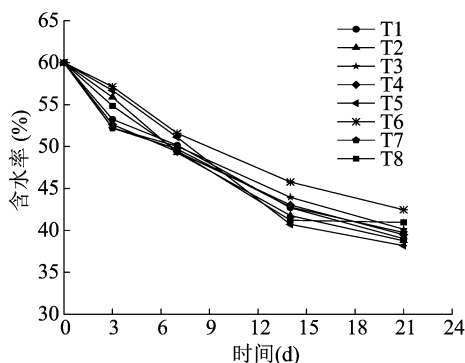


图1 不同处理堆肥过程中的温度和含水率变化



2.2 堆肥过程中 pH 值、电导率和发芽指数的变化

由图 2 可知,各处理的堆体 pH 值整体呈先上升后趋于平稳。在堆肥前期,各处理平均 pH 值从 6.9 迅速上升至 7.6。堆肥后期,各处理 pH 值稳定在 7.6~7.9。各处理的电导率(EC)随着堆肥时间的延长均呈下降趋势,仅 T6、T8 处理在堆肥后期呈波动上升趋势。与 T1 处理相比,T3、T4 和 T7 显著

降低堆体电导率。整体观察,T1~T8 处理堆体电导率在 $1.75\sim2.03\text{ mS/cm}$,均低于 4 mS/cm 的腐熟堆肥标准。在堆肥初期由于小分子有机酸和 NH_3 等的大量产生,GI 值相对较低,均在 60% 以下。随着堆体中氨排放逐渐减少,GI 值逐渐增加。在堆肥 21 d,各堆体的 GI 值在 90% 以上,其中 T7 处理的 GI 值(140%)显著高于其他处理。

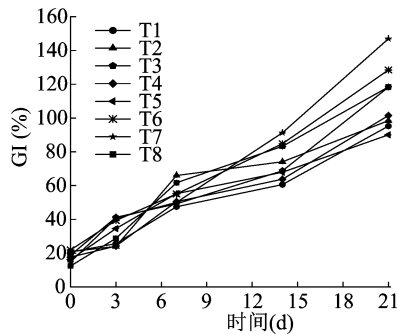
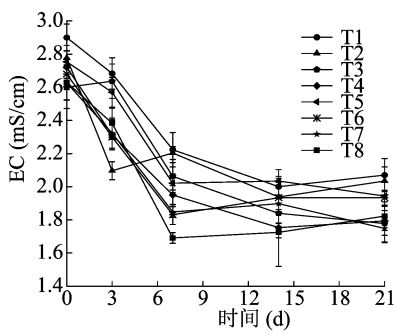
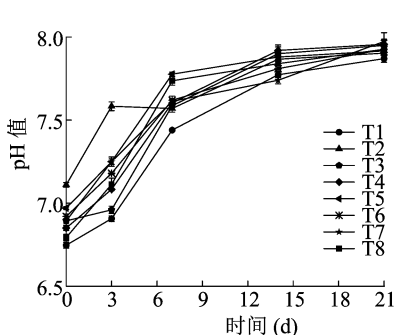


图2 不同处理堆肥过程中 pH 值、电导率(EC)和发芽指数(GI)变化

2.3 堆肥过程中有机碳和各养分含量的变化

经过 21 d 的堆肥发酵,各堆体中有机碳含量显著下降,而全氮含量呈明显增加趋势。由表 2 可知,堆肥初始各处理有机碳含量为 $374.73\sim427.65\text{ g/kg}$,

堆肥结束时为 $333.02\sim365.73\text{ g/kg}$,各处理间有机碳含量无显著差异。T7 处理堆肥结束全氮含量显著高于 T1、T3 和 T4 处理。各处理 C/N 在堆肥 21 d 较堆体初期显著下降,数值范围在 $16.36\sim19.72$ 。

适宜的 C/N 是堆肥成功的关键因子,若堆肥结束时 C/N 下降至 15 ~ 20 之间就可认定为堆肥已腐熟^[21]。

堆体物料随堆肥过程中有机磷分解,总磷和速效磷的含量显著增加。由表 3 可知,在堆肥 21 d,各处理堆体全磷含量较初期增幅 32.3% ~ 107.8%,其中,T1 处理全磷含量显著低于其他各处理。而速效磷含量较初期增幅为 53.7% ~ 104.3%,其中,尤

以 T7 处理显著高于其他 7 个处理。堆肥结束时,仅 T1 处理降低速效磷在全磷中所占比例,而其他处理均增加这一比例,这说明添加生物炭或微生物菌剂可以提高磷的活化作用,使得速效磷相对含量增加。

由表 4 可知,与磷素变化相似,堆肥结束时各处理全钾和速效钾呈明显增加趋势。与其他处理相比,T6、T7 和 T8 处理显著提高了速效钾含量和速效钾/全钾。

表 2 不同处理下有机碳、全氮和碳氮比的变化

处理	有机碳(g/kg)		全氮(g/kg)		C/N	
	0 d	21 d	0 d	21 d	0 d	21 d
T1	380.85 ± 6.82c	333.02 ± 19.87a	16.15 ± 1.82a	18.68 ± 0.85bcd	22.31 ± 0.85b	16.36 ± 1.34a
T2	374.73 ± 6.28c	336.90 ± 9.82a	15.51 ± 1.32a	19.28 ± 0.89abc	24.33 ± 1.93ab	17.49 ± 0.52a
T3	389.16 ± 2.99bc	341.31 ± 7.03a	15.53 ± 0.70a	17.40 ± 1.25d	25.1 ± 1.17ab	19.72 ± 1.48a
T4	427.65 ± 30.07ab	351.14 ± 5.72a	15.63 ± 0.99a	18.31 ± 0.56cd	27.52 ± 3.15a	19.19 ± 0.76a
T5	371.62 ± 7.01c	341.77 ± 10.66a	16.70 ± 1.79a	18.93 ± 0.56abc	22.45 ± 1.92b	17.34 ± 0.36a
T6	387.06 ± 8.35bc	338.59 ± 23.08a	17.11 ± 0.98a	20.40 ± 0.50ab	24.37 ± 3.49ab	18.12 ± 0.75a
T7	402.25 ± 37.02abc	365.73 ± 43.97a	16.06 ± 0.95a	20.60 ± 0.38a	25.12 ± 2.75ab	17.76 ± 2.16a
T8	434.89 ± 21.76a	371.16 ± 68.19a	18.39 ± 0.73a	19.94 ± 0.98abc	23.65 ± 0.98ab	18.56 ± 2.86a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

表 3 不同处理下全磷、速效磷含量变化

处理	全磷(g/kg)		速效磷(mg/kg)		速效磷占全磷比(%)	
	0 d	21 d	0 d	21 d	0 d	21 d
T1	3.33 ± 0.26a	4.67 ± 0.27d	318.24 ± 8.27ab	497.36 ± 70.40b	9.61 ± 0.75a	7.39 ± 1.37c
T2	3.39 ± 0.10a	5.03 ± 0.56cd	331.87 ± 10.46ab	510.03 ± 23.46b	9.81 ± 0.33a	10.32 ± 1.55abc
T3	3.53 ± 0.21a	5.78 ± 0.27abcd	345.18 ± 8.94a	539.58 ± 58.29b	9.83 ± 0.71a	11.66 ± 1.92a
T4	3.74 ± 0.09a	5.17 ± 0.44bcd	320.28 ± 15.84ab	526.21 ± 11.70b	8.58 ± 0.49a	10.24 ± 0.65abc
T5	3.49 ± 0.06a	5.64 ± 0.40abcd	335.61 ± 16.03ab	588.49 ± 59.52ab	9.62 ± 0.58a	10.53 ± 1.62abc
T6	3.47 ± 0.29a	6.92 ± 1.37a	312.61 ± 14.20b	552.60 ± 26.06b	9.09 ± 1.11a	9.57 ± 0.12abc
T7	3.62 ± 0.14a	6.28 ± 0.56abc	325.64 ± 20.80ab	665.27 ± 67.56a	8.99 ± 0.24a	10.72 ± 1.68ab
T8	3.37 ± 0.26a	6.66 ± 0.56ab	327.74 ± 14.40ab	516.53 ± 37.80b	9.80 ± 1.21a	7.85 ± 1.19bc

表 4 不同处理下全钾、速效钾含量变化

处理	全钾(g/kg)		速效钾(mg/kg)		速效钾占全钾比(%)	
	0 d	21 d	0 d	21 d	0 d	21 d
T1	11.53 ± 0.05f	16.38 ± 0.53ab	1 473.33 ± 258.37abc	4 340.00 ± 58.88bc	10.10 ± 1.81b	26.52 ± 1.05c
T2	13.59 ± 0.81b	17.01 ± 1.06a	1 586.67 ± 154.34ab	4 146.67 ± 520.85c	11.69 ± 1.04ab	24.36 ± 2.39c
T3	12.65 ± 0.19cde	16.09 ± 0.16abc	1 160.00 ± 142.36c	4 000.00 ± 587.88c	9.18 ± 1.14b	24.84 ± 3.46c
T4	12.25 ± 0.29ef	15.12 ± 0.58bc	1 253.33 ± 135.97bc	4 586.67 ± 408.36bc	10.21 ± 0.86b	30.29 ± 1.69bc
T5	13.34 ± 0.28bcd	17.23 ± 0.71a	1 600.00 ± 86.41ab	4 626.67 ± 413.55bc	12.01 ± 0.83ab	26.86 ± 2.33c
T6	13.47 ± 0.31bc	16.29 ± 1.07ab	1 413.33 ± 82.19abc	5 400.00 ± 594.19ab	10.48 ± 0.37b	33.06 ± 1.87ab
T7	12.60 ± 0.32de	17.34 ± 0.65a	1 386.67 ± 67.99abc	6 133.33 ± 303.46a	11.03 ± 0.83b	35.36 ± 0.76ab
T8	14.60 ± 0.28a	15.08 ± 0.42c	1 733.33 ± 393.73a	5 520.00 ± 898.00ab	15.05 ± 3.48a	38.12 ± 5.34a

2.4 堆肥过程中干重损失和氮素损失率的变化

由图 3 可知,所有处理的铵态氮迅速升高,并在堆肥 3 d 达最大值,数值范围在 2.00 ~ 3.12 g/kg,具体表现为 T1 > T2 > T8 > T3 > T6 > T7 > T5 > T4。堆肥结束后,所有处理铵态氮含量均保持在较低值,数值范围在 0.47 ~ 0.59 g/kg,具体大小顺序为 T1 > T5 > T6 > T2 > T4 > T8 > T3 > T7,与堆体初始相比降幅为 73.1% ~ 83.6%。由于堆肥过程的硝化作用,各处理硝态氮含量随堆肥过程呈上升趋势。硝态氮在堆肥升温期(0 ~ 14 d)过程中变化幅度不大,在 14 ~ 21 d 硝态氮含量迅速上升。堆肥结束后

硝态氮含量数值范围在 0.70 ~ 1.16 g/kg,具体呈现 T7 > T6 > T8 > T3 > T5 > T4 > T2 > T1。

由图 4 可知,随堆肥过程进行,所有处理物料干物质损失和氮素损失率明显增加。在堆肥 0 ~ 14 d 为堆肥物料干物质损失升高阶段,14 ~ 21 d 为干物质损失变缓阶段。从整个堆肥周期观察,T1 处理干物质损失率最高,T7 和 T8 处理损失率最低。堆肥结束,各堆肥处理氮素损失率在 16.8% ~ 29.72%,具体损失率顺序为 T2 > T3 > T1 > T4 > T6 > T5 > T8 > T7,显然添加生物炭和微生物菌剂处理组具有更低的氮素损失。

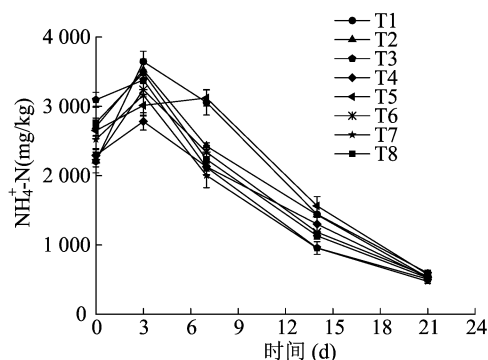


图3 不同处理堆肥过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量变化

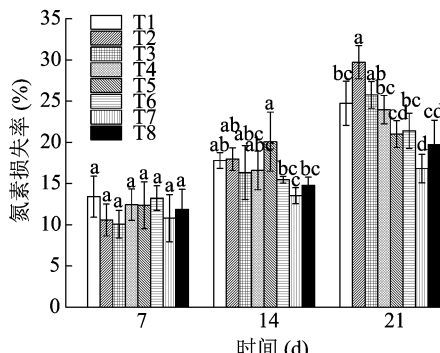
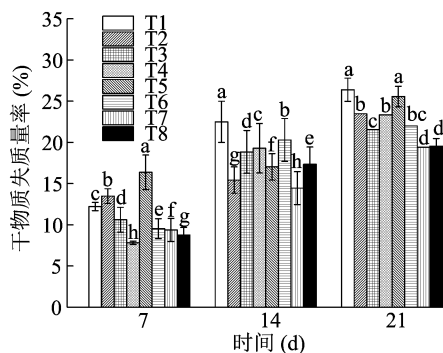
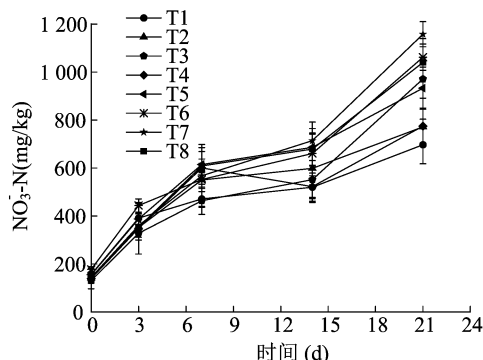


图4 不同处理堆肥过程中干物质失重率和氮素损失率的变化

3 讨论

3.1 添加生物炭和微生物菌剂对菇渣堆肥腐熟指标的影响

温度是衡量高温堆肥腐熟是否完全的重要指标,堆肥微生物分解有机物产生大量热量导致堆体温度快速升高^[22]。高温好氧堆肥技术中堆体升温快,高温时间长,则腐熟进程加快,腐熟时间缩短。相比 T1 处理,本试验中 T6、T7、T8 由于生物炭和复合菌剂的添加,其堆体高温持续时间更长,堆体温度更高,这与涂志能的研究^[18]相一致,其结果表明

添加菌剂和生物炭均能加速堆体物料中有机质降解,促进堆体温度增加。pH 值能够影响堆体内微生物活性和生化反应速度,常用作评价堆肥腐熟程度^[23]。试验中,所有堆肥处理的初始 pH 值为 6.75 ~ 7.11,随着堆肥的进行,堆体 pH 值迅速升高后逐渐稳定在 7.87 ~ 7.97 之间。田伟等也在香菇菌渣堆肥中添加微生物菌剂的试验中发现了相似的结果^[24]。电导率(EC)的大小与堆肥的含盐量有关,用作育苗基质的堆肥,其 EC 值不宜 > 2.6 mS/cm,否则会对幼苗产生毒害作用^[25]。本研究表明,各堆肥处理的 EC 值较初始菇渣的 EC 值均大幅下降至

1.75 ~ 2.03 mS/cm, 其中添加生物炭的处理 EC 值较低, 这与付祥峰等的研究结果^[12]一致。堆肥产品 EC 值的降低是由于生物炭和菌剂的添加促进有机物质腐殖化过程, 降低了有机酸盐、磷酸盐和铵盐等含量。可见, 添加适量的生物炭与菌剂能有效降低堆肥产品 EC 值, 改善堆肥产品品质。发芽指数 (GI) 也是常用于发映堆体是否腐熟完全的重要指标^[12]。本研究结果发现, 由于堆肥初期氨挥发和酚类物质积聚, 各堆体的 GI 值较低。随着堆肥发酵的进行 (堆肥 14 ~ 21 d) 后, 各堆体的 GI 值 > 80%, 并且 T6、T7 和 T8 处理的 GI 值明显高于其他处理, 产生这种现象的原因可能是堆肥过程中有机物经降解产生大量的刺激性物质, 如低分子量的酚类、有机酸类会抑制小麦的生长^[27], 而这些物质随着堆肥过程会不断减少, 这说明添加生物炭和微生物菌剂不但能够促进堆体中有机物进一步转化, 也有助于种子的萌发生长。这与 Mao 等在猪粪堆肥添加生物炭的研究结果^[28]相类似。

3.2 添加生物炭和微生物菌剂对菇渣堆肥养分指标的影响

增加堆肥过程中碳素和氮素固持对于提升堆肥品质和减少环境污染至关重要^[29-30]。本试验中, 堆肥结束各处理有机质含量较初始降低了 8.03% ~ 17.90%, 具体表现为 T4 > T8 > T1 > T6 > T3 > T2 > T7 > T5。T4、T8 处理较其他处理有机质降解速率较快。武晓桐在以秸秆和牛粪为原料的堆肥研究中表明, 生物炭通过影响堆肥中固氮类细菌和反硝化细菌等微生物群落多样性及其功能代谢途径, 从而减少碳氮损失^[31]。堆肥过程中氮素转化主要包括硝化、氨化、反硝化以及生物吸收固持等^[32]。前人研究表明, 堆肥前期温度升高, 有机物料在矿化作用和氨化作用下使得铵态氮含量增加^[33], 其中一部分经硝化作用转化为硝态氮, 另一部分被微生物用于维持自身生命活动利用转化成腐殖质, 铵态氮含量表现出先升高后降低, 而硝态氮含量总体呈增加趋势。本研究中, 堆肥结束 T1 ~ T8 处理的全氮含量较初始值平均增加 17.30%, 其中 T7 处理显著高于 T1、T3、T4 处理。从铵态氮含量来看, 含添加剂的 T2 ~ T8 处理显著低于没有添加剂的 T1 处理, 硝态氮含量则相反, 尤以添加 10% 生物炭和 0.3% 微生物菌剂的 T7 处理硝态氮含量最高。这与堆肥结束时干物质失质量率和氮素损失率变化相一致, 即相比于其他处理, T7 和 T8 具有较低的干物质失质

量率和氮素损失率。这说明在堆肥中添加复合菌剂和生物炭有利于氮素的固持, 这可能与生物炭对氨气的吸附保留以及微生物的固氮作用有关^[34]。

堆体中存在的各形态磷素随着堆肥进行不断相互转化^[35]。本研究发现, 堆肥结束各处理全磷含量较初始有明显的增加, 全磷表现为 T6 > T8 > T7 > T3 > T5 > T4 > T2 > T1, 而速效磷为 T7 > T5 > T6 > T3 > T4 > T8 > T2 > T1, 这可能是由于在堆体中添加生物炭复合菌剂帮助微生物分解有机酸, 更加有效活化磷素, 促进菇渣堆肥的磷素有效性。李宇航等的研究^[36-37]均表明, 在鸡粪堆肥中添加生物炭处理较对照组显著增加堆体全磷含量。钾素与磷素的变化趋势基本一致, 至堆肥结束, 各处理全钾含量表现为 T7 > T5 > T2 > T1 > T6 > T3 > T4 > T8, 速效钾含量表现为 T7 > T8 > T6 > T5 > T4 > T1 > T2 > T3。前人研究表明, 堆肥中添加生物炭有利于提高速效钾占全钾含量的比例^[38], 可能是由于生物炭对速效钾的吸附固化作用。

4 结论

以杏鲍菇菇渣为原料, 添加不同比例生物炭和微生物菌剂进行高温好氧堆肥, 21 d 后各处理可达腐熟要求。

与其他处理相比, 添加生物炭和微生物菌剂的 T6、T7 和 T8 处理能延长堆肥高温时间, 提高小麦种子发芽指数, 腐熟最彻底。T6、T7 处理较其他处理显著增加堆肥的全氮含量和全磷含量, T7 处理的速效养分含量也明显高于其他处理。

添加生物炭和微生物菌剂处理在减少氮磷损失方面也具有良好的效果, 其中 T7、T8 处理的堆体干物质失质量率和氮素损失率显著低于其他处理。综合来看, 添加 10% 生物炭和 0.3% 微生物菌剂的 T7 处理在促进有机物转化和改善堆肥质量有最好的效果。

参考文献:

- [1] 黄武强, 周 红. 提高环境效益的食用菌菌渣循环再利用方式[J]. 中国食用菌, 2019, 38(1): 104 - 106.
- [2] 王 炎, 翁 洵, 张玉平, 等. 添加不同形态化学氮肥对杏鲍菇菌渣堆肥的影响[J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2018, 44(2): 183 - 187.
- [3] 夏 璇. 生物炭对鸡粪好氧堆肥中养分含量及腐殖化的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [4] 冯雯雯, 董永华, 蔡涵冰, 等. 微生物菌剂对畜禽粪便与秸秆混合

- 发酵过程参数影响及腐熟度综合评价[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6): 265–271.
- [5] 刘艳婷, 郑莉, 宁寻安, 等. 微生物菌剂对畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属钝化与氮转化的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 2157–2167.
- [6] 李太魁, 王小非, 郭战玲, 等. 添加生物炭对猪粪好氧堆肥过程氮素转化与氨挥发的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(4): 874–879.
- [7] 李思敏, 张义竞, 唐锋兵, 等. 生物炭对污泥–菌渣堆肥腐殖化与重金属钝化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1565–1574.
- [8] 胡雨彤, 时连辉, 刘登民, 等. 添加硫酸对牛粪堆肥过程及其养分变化的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(3): 718–725.
- [9] 李昌宁, 苏明, 姚拓, 等. 微生物菌剂对猪粪堆肥过程中堆肥理化性质和优势细菌群落的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26(9): 1600–1611.
- [10] 王旭杰, 张文明, 常馨怡, 等. 堆肥添加剂降低碳氮损失的微生物学机制研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 4116–4127.
- [11] 吴晓东, 邢泽炳, 何远灵, 等. 添加生物炭对鸡粪好氧堆肥过程中养分转化的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5): 141–146.
- [12] 付祥峰, 刘琪琪, 李恋卿, 等. 生物炭对猪粪堆肥过程中氮素转化及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1893–1900.
- [13] 王权. 添加剂对猪粪好氧堆肥过程的影响及其机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [14] Tu Z N, Ren X N, Zhao J C, et al. Synergistic effects of biochar/microbial inoculation on the enhancement of pig manure composting[J]. Biochar, 2019, 1(1): 127–137.
- [15] Zhao Y, Lu Q, Wei Y Q, et al. Effect of actinobacteria agent inoculation methods on cellulose degradation during composting based on redundancy analysis[J]. Bioresource Technology, 2016, 219: 196–203.
- [16] 李舒清, 张镜丹, 纪程, 等. 接种复合菌剂对牛粪好氧堆肥进程及温室气体(CH_4 和 N_2O)排放的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(6): 1041–1050.
- [17] 李荣华, 涂志能, Ali Amjad, 等. 生物炭复合菌剂促进堆肥腐熟及氮磷保留[J]. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3449–3457.
- [18] 涂志能. 炭载生物复合菌剂对猪粪好氧堆肥过程的调控[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [19] 李其胜, 杨凯, 汪志鹏, 等. 稻–油轮作下有机替代对土壤胞外酶活性及多功能性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 345–352, 360.
- [20] 张文明, 王旭杰, 尹思倩, 等. C/N 驱动优势细菌菌群变化影响堆肥碳氮损失和腐殖质合成[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 4119–4128.
- [21] 李帆, 钱坤, 武际, 等. 过磷酸钙用量对猪粪堆肥过程及磷形态变化的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2017, 23(4): 1037–1044.
- [22] Li R H, Wang J J, Zhang Z Q, et al. Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite[J]. Bioresource Technology, 2012, 121: 362–368.
- [23] 荣荣, 郑育声, 杨林生, 等. 生物炭对鸡粪堆肥过程中氨气排放的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 236–240.
- [24] 田伟, 刘明庆, 席运官. 微生物菌剂对以猪粪和香菇菌渣为原料的快速堆肥过程的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6): 301–304.
- [25] 浩折霞, 黄大鹏, 顾少华, 等. 酒糟–牛粪堆肥复配瓜果类蔬菜育苗基质配方筛选[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(3): 457–463.
- [26] 王海候, 程月琴, 金梅娟, 等. 添加生物炭对羊粪堆肥腐殖化的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 766–774.
- [27] Nakasaki K, Araya S, Mimoto H. Inoculation of *Pichia kudriavzevii* RB1 degrades the organic acids present in raw compost material and accelerates composting[J]. Bioresource Technology, 2013, 144: 521–528.
- [28] Mao H, Lv Z Y, Sun H D, et al. Improvement of biochar and bacterial powder addition on gaseous emission and bacterial community in pig manure compost[J]. Bioresource Technology, 2018, 258: 195–202.
- [29] Li C N, Li H Y, Yao T, et al. Microbial inoculation influences bacterial community succession and physicochemical characteristics during pig manure composting with corn straw[J]. Bioresource Technology, 2019, 289: 121653.
- [30] 赵欧亚, 侯利敏, 孙世友, 等. 不同商品发酵菌剂对牛粪堆肥微生物群落的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(14): 239–244.
- [31] 武晓桐. 生物炭对牛粪堆肥中固氮微生物多样性及功能的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [32] 徐路魏, 王旭东. 生物炭对蔬菜废弃物堆肥化过程氮素转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1160–1166.
- [33] 孙桂阳, 张国言, 董元杰. 不同来源农业废弃物堆肥进程与产品肥效研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 349–360.
- [34] Xiao R, Awasthi M K, Li R H, et al. Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: a review[J]. Bioresource Technology, 2017, 246: 203–213.
- [35] Wei Y Q, Zhao Y, Wang H, et al. An optimized regulating method for composting phosphorus fractions transformation based on biochar addition and phosphate–solubilizing bacteria inoculation[J]. Bioresource Technology, 2016, 221: 139–146.
- [36] 李宇航, 邢泽炳, 马玮键, 等. 生物炭对鸡粪好氧堆肥过程的影响[J]. 农业工程, 2021, 11(8): 53–58.
- [37] 刘宁, 周嘉良, 马双双, 等. 生物炭对鸡粪好氧堆肥主要氮素形态含量影响与保氮机制[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 233–239.
- [38] 刘微, 霍荣, 张津, 等. 生物炭对番茄秸秆和鸡粪好氧堆肥氮磷钾元素变化的影响及其机理[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 289–294.