

陈智坤, 路强强, 任英英, 等. 蘑菇渣腐熟微生物组方研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 494-501.

CHEN Zhi-kun, LU Qiang-qiang, REN Ying-ying, et al. Study on microbiological formula of spent mushroom compost[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 494-501.

蘑菇渣腐熟微生物组方研究

陈智坤^{1,2,3}, 路强强^{1,2,3}, 任英英^{1,2,3}, 张 昭^{1,2,3}, 赵 宁^{1,2,3}, 黄 标^{1,3,4*}

(1. 陕西省西安植物园/陕西省植物研究所, 西安 710061; 2. 陕西省植物资源保护与利用工程技术研究中心, 西安 710061; 3. 陕西省科学院土壤资源与生物技术应用重点实验室, 西安 710061; 4. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要:为实现蘑菇渣的资源化利用,采用7种常见腐熟微生物菌株,研究了不同微生物复配对蘑菇渣腐熟效果的影响。结果表明:处理组T₁₄(蜡状芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌、甲基营养型芽孢杆菌、多黏类芽孢杆菌、绿色木霉和黑曲霉)与其他处理组相比具有更好的腐熟效果,发酵堆体温度最高达到63℃,≥55℃持续时间长达12d,有效活菌数达0.26亿cfu·g⁻¹,均优于其他处理,pH值和色泽也达要求;腐熟后氮、磷、钾总养分均有显著提高,其中全氮含量提高了36%,达到21.1g·kg⁻¹;全磷(P₂O₅)含量提高了66%,达到10.1g·kg⁻¹;全钾(K₂O)含量提高了38%,达到25.9g·kg⁻¹;有机质降解后含量降至585.4g·kg⁻¹。植物种子萌发与生长试验表明,高羊茅和黑麦草的种子发芽指数(GI)均大于0.85,分别为1.21、1.14,高羊茅的茎长和地上鲜质量分别增加了24.4%和29.3%,黑麦草的茎长和地上鲜质量分别增加了33.3%和36.8%。蘑菇渣堆肥产品养分含量满足国家标准要求,能显著促进植物生长,是一种前景广阔的新兴有机肥产品,具有巨大的应用价值和广阔的市场前景。

关键词:蘑菇渣;微生物组方;腐熟效果

中图分类号:X712;S141.2 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2019)04-0494-08 doi: 10.13254/j.jare.2018.0188

Study on microbiological formula of spent mushroom compost

CHEN Zhi-kun^{1,2,3}, LU Qiang-qiang^{1,2,3}, REN Ying-ying^{1,2,3}, ZHANG Zhao^{1,2,3}, ZHAO Ning^{1,2,3}, HUANG Biao^{1,3,4*}

(1. Xi'an Botanical Garden of Shaanxi Province/Institute of Botany of Shaanxi Province, Xi'an 710061, China; 2. Shaanxi Engineering Research Centre for Conservation and Utilization of Botanical Resources, Xi'an 710061; 3. Key Laboratory of Soil Resources & Biotech Applications, Shaanxi Province Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 4. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to realize the recycling use of spent mushroom compost, the experiment of 7 common decomposition microorganisms mixtures on the mushroom residue maturity were conducted in this study. The results showed that the group T₁₄ which included *Bacillus cereus*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus methylotrophicus*, *Paenibacillus polymyxa*, *Trichoderma viride*, and *Aspergillus niger* had a better decomposition effect than others. There had three advantage about T₁₄: The duration over 55℃ were 12 days, the number of live bacteria could reach 2.6×10⁷ cfu·g⁻¹ and the pH value and color could be also qualified. There was a significant improvement about the nutrient contents after matured. The contents of TN, TP, TK were 21.1, 10.1 g·kg⁻¹ and 25.9 g·kg⁻¹ which increased 36%, 66%, and 38% respectively. The organic matter content reduced to 585.4 g·kg⁻¹ after degradation; The results of seed germination and growth test stated that the germination index (GI) of tall fescue seed and perennial ryegrass seed were 1.21 and 1.14, respectively (>0.85). The stem length and the fresh weight of tall fescue and the perennial ryegrass were increased 24.4%, 29.3% and 33.3%, 36.8%, respectively. The nutrient content of the spent mushroom compost met the requirements of national standards, and significantly promoted plant growth. It was a promising organic fertilizer which had great application value and broad market prospects.

Keywords: spent mushroom compost; microbial formula; decomposition effect

收稿日期: 2018-07-17 录用日期: 2018-10-11

作者简介: 陈智坤(1987—),男,助理研究员,研究方向为土壤学。E-mail: zhikunchen@ms.xab.ac.cn

*通信作者: 黄 标 E-mail: lbhuang@issas.ac.cn

基金项目: 西安市科技计划项目(2017127SF/SF021); 陕西省科技厅重点研发计划项目(2017ZDXM-NY-049); 陕西省科学院科技计划项目(2017K-15-01, 2018K-11)

Project supported: Xi'an Science and Technology Program(2017127SF/SF021); The Key Development Program of Shaanxi Science and Technology Department(2017ZDXM-NY-049); Science and Technology Program of Shaanxi Academy of Sciences(2017K-15-01, 2018K-11)

食用菌作为我国农业生产的第五大经济作物,为促进我国农业发展、农民增收和改善人民生活做出了重要贡献。食用菌的种植原料一般为农林废弃物,如木屑、秸秆、棉籽壳、玉米芯等富含营养的有机物^[1]。生产实践表明,每100 kg种植原料,在收获100 kg鲜菇后,还会产生60 kg蘑菇渣,蘑菇渣仍含有大量的粗纤维、多糖、蛋白质,以及丰富的营养元素(N、P、K、Ca、Mg、Zn等)^[2]。

堆肥化处理蘑菇渣存在堆肥发酵慢、腐熟时间长、堆肥质量低等问题,在堆肥中应用菌糠高效降解菌剂,可以促进堆肥发酵、缩短腐熟时间、提高堆肥质量^[3]。腐熟是处理有机废弃物进行无害化和资源化利用的有效途径,其中有机物的高效腐熟依赖高效微生物菌剂的引入^[4]。通过高效腐熟微生物,可提高有机废弃物的酶促反应速率、加快有机物降解转化速率^[5-6]。研究表明,腐熟过程是微生物群落形成和多样性演化的动态过程,多种微生物的协同作用,可将复杂的有机物降解为植物细胞可以直接吸收利用的小分子物质及腐殖质^[7-8],其中常见的腐熟微生物菌株有蜡状芽孢杆菌^[9]、胶冻样芽孢杆菌^[10]、巨大芽孢杆菌^[11]、甲基营养型芽孢杆菌^[12]、多黏类芽孢杆菌^[13]、绿色木霉^[14]和黑曲霉^[15]等。

目前,关于蘑菇渣高效腐熟微生物的筛选及评价研究相对较少,本研究通过对腐熟进程各理化指标的追踪、对腐熟终产物相关标准和植物生长试验的评价,探究不同外源微生物复配对蘑菇渣堆肥腐熟效果的影响,以期筛选和构建周期短、降解效率高的蘑菇

渣腐熟微生物菌群。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试菌株

蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)、胶冻样芽孢杆菌(*Paenibacillus mucilaginosus*)、巨大芽孢杆菌(*Bacillus megatrium*)、甲基营养型芽孢杆菌(*Bacillus methylotrophicus*)、多黏类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)、绿色木霉(*Trichoderma viride*)和黑曲霉(*Asprgillus niger*)由中国普通微生物菌种保藏管理中心和陕西省微生物研究所提供并鉴定。菌种信息见表1。

1.1.2 试验材料

蘑菇渣由西安欣苗食用菌生态开发专业合作社提供,主要组成为秸秆、棉籽壳、玉米芯等,具体理化性质见表2,风干压碎处理备用。高羊茅(*Festuca elata*)、黑麦草(*Lolium perenne*)种子由陕西省植物研究所提供并鉴定。

1.1.3 菌株培养发酵条件

细菌培养发酵用营养肉汤(NA)培养基:牛肉膏3 g,蛋白胨10 g,氯化钠5 g,蒸馏水1000 mL,pH 7.0~7.2;真菌培养发酵用马铃薯(PDA)培养基:马铃薯200 g,葡萄糖20 g,蒸馏水1000 mL,pH自然;以上培养基制备斜面和平板时,每1000 mL加琼脂15~20 g溶解冷却即可。

1.2 试验设计

根据各菌种的功能类型差异,试验设计原则为每

表1 菌种基本信息

Table 1 The basic information of bacteria

编号 Number	名称 Name	功能 Function	菌种收录号 Strains abstracting number
A1	蜡状芽孢杆菌 <i>Bacillus cereus</i>	解磷、解钾	1.8589
A2	胶冻样芽孢杆菌 <i>Paenibacillus mucilaginosus</i>	分解无机磷	A1.122
A3	巨大芽孢杆菌 <i>Bacillus megatrium</i>	分解有机磷	A1.231
A4	甲基营养型芽孢杆菌 <i>Bacillus methylotrophicus</i>	促生、发酵	A1.117
A5	多黏类芽孢杆菌 <i>Paenibacillus polymyxa</i>	促生、肥药	1.10711
B1	绿色木霉 <i>Trichoderma viride</i>	分解纤维素	3.2942
B2	黑曲霉 <i>Asprgillus niger</i>	降解无机物	3.3928

注:A、B表示菌属类型,A为细菌,B为真菌。下同。

Note:A,B is bacterial type,A is bacteria,B is fungus. The same below.

表2 蘑菇渣理化性质

Table 2 The physicochemical properties of compost

有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 TN/g·kg ⁻¹	全磷 TP(P ₂ O ₅)/g·kg ⁻¹	全钾 TK(K ₂ O)/g·kg ⁻¹	碳氮比 C/N	pH值 pH value
785.22	8.23	8.36	12.54	55.57	8.8

处理组至少包含解磷解钾型细菌、分解无机/有机磷型细菌、促生型细菌和降解纤维型真菌各一种,设计复配组合23组,以不添加任何菌的处理组为空白对照(CK)。细菌筛选培养基为牛肉膏蛋白胨,接种量4%,培养温度28℃,摇床转速160 r·min⁻¹,250 mL三角瓶装液量为50 mL,培养时间24 h;真菌筛选培养基为马铃薯葡萄糖琼脂培养基,接种量4%,培养温度26℃,摇床转速160 r·min⁻¹,250 mL三角瓶装液量为50 mL,培养时间72 h。各处理组组合信息见表3。

1.3 试验方法

本研究采用箱体堆肥方式,箱体规格为35 cm×45 cm×55 cm,每箱添加蘑菇渣干料25 kg,堆体高度50 cm。堆肥初始条件:堆体含水率调节至60%,添加尿素调节C/N值至25,以蘑菇渣干料质量的5%添加菌剂,总体积1.25 L,每组各菌种等比例添加。升温期每5 d翻堆一次,超过50℃的高温期每3 d翻堆一次,降温期每5 d翻堆一次,以堆体温度达到室温界定为堆肥结束。每次翻堆时,补水至堆体含水率为60%,每3 d取一次样品进行理化指标追踪测试,以堆肥第45 d采集的样品作为堆肥终产品,以商品有机肥作为阳性对照组。

1.4 指标测定方法与标准

1.4.1 物理指标

堆体温度、有效活菌数和pH值的测定和堆肥产品色泽的评判,采用《生物有机肥》(NY 884—2012)、《有机肥料》(NY 525—2012)和《微生物肥料产品检

验规程》(NY/T 2321—2013)中各指标测定方法。

1.4.2 化学指标

物理指标筛选所得的堆肥产品进行有机质、全氮、全磷(P₂O₅)、全钾(K₂O)的测定。其中,有机质采用重铬酸钾法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷(P₂O₅)采用H₂SO₄-HClO₄消煮钼锑抗分光光度法测定,全钾(K₂O)采用H₂SO₄-HClO₄消煮火焰光度法测定。筛选指标符合《生物有机肥》(NY 884—2012)、《有机肥料》(NY 525—2012)和《复合微生物肥》(NY/T 798—2015)各项指标相关参数要求。

1.4.3 种子萌发指标

化学指标筛选所得的堆肥产品进行植物种子发芽势(GE)、发芽率(GR)和发芽指数(GI)的测定,以蒸馏水作为空白对照,测定方法参照《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)和参考文献[16]。数据统计与计算公式^[17]为:

$$\text{发芽势(GE)} = \frac{\text{第48 h种子发芽数}}{\text{种子总数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽率(GR)} = \frac{\text{第96 h种子发芽数}}{\text{种子总数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽指数(GI)} = \frac{\text{处理组种子发芽率} \times \text{处理组种子根长}}{\text{空白对照组种子发芽率} \times \text{空白对照组种子根长}}$$

1.4.4 植物生长指标

由理化指标、种子萌发指标筛选所得的堆肥产品进行植物生长试验,测定植物茎长和地上鲜质量,以商品有机肥作为阳性对照,最终筛选堆肥产品对应的最优菌种组合。

1.4.5 植物种植基质配比与幼苗生长期预试验

以堆肥产品与田园土的体积配比作为高羊茅、黑麦草的种植基质,设计6组配比,分别为0:1、0.125:1、0.25:1、0.5:1、0.75:1和1:0(V/V)。选用45孔营养盘进行种植试验,每一营养盘为一组种植梯度,每孔种植10粒种子,在同一种植环境下,分别取不同生长期(第5、10、15、20 d和25 d)的9孔幼苗进行茎长和地上鲜质量测定,每组重复3次。研究不同配比和不同生长期条件下堆肥产品对植物生长的影响。

1.5 数据处理

试验数据采用DPS 7.05软件进行方差分析和多重比较(α=0.05),所有数据均以平均值±标准差表示,采用Microsoft Office Excel 2007进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同复配组合对堆肥产品物理指标的影响

当有机废弃物腐熟最高温度超过55℃方可高效

表3 不同微生物复配组合

Table 3 The treatments of different microorganism compound combinations

处理组 Treatment groups	分类组合 Classification combinations	处理组 Treatment groups	分类组合 Classification combinations
T ₁	A1+A2+A4+B1	T ₁₃	A1+A3+A4+A5+B2
T ₂	A1+A2+A4+B2	T ₁₄	A1+A3+A4+A5+B1+B2
T ₃	A1+A2+A5+B1	T ₁₅	A1+A2+A3+A4+B1
T ₄	A1+A2+A5+B2	T ₁₆	A1+A2+A3+A4+B2
T ₅	A1+A2+A4+A5+B1	T ₁₇	A1+A2+A3+A4+B1+B2
T ₆	A1+A2+ A4+A5+B2	T ₁₈	A1+A2+A3+A5+B1
T ₇	A1+A2+ A4+A5+B1+B2	T ₁₉	A1+A2+A3+A5+B2
T ₈	A1+A3+A4+B1	T ₂₀	A1+A2+A3+A5+B1+B2
T ₉	A1+A3+A4+B2	T ₂₁	A1+A2+A3+A4+A5+B1
T ₁₀	A1+A3+A5+B1	T ₂₂	A1+A2+A3+A4+A5+B2
T ₁₁	A1+A3+A5+B2	T ₂₃	A1+A2+A3+A4+A5+ B1+B2
T ₁₂	A1+A3+A4+A5+B1	CK	空白对照(不添加菌)

降解大分子有机物,有效灭杀虫卵、杂菌等。根据高温期持续时间越长腐熟越彻底、堆体色泽越黑、总养分含量越高的堆肥工艺条件^[18-19],参照《生物有机肥》(NY 884—2012)有效活菌数 ≥ 0.2 亿 $\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 pH 5.5~8.5 的指标要求,由表 4 可见,堆体最高温度未超过 55 $^{\circ}\text{C}$ 的试验组有 8 组(T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_{15} 和 T_{16}),终产物有效活菌数未达到要求的有 7 组(T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 和 T_{15})。造成堆体温度及有效活菌差异的主要原因可能是添加腐熟微生物的种类不同。 T_1 ~ T_4 与 T_8 ~ T_{11} 均由 4 个菌系组成, T_5 、 T_6 、 T_{15} 与 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{16} 、 T_{18} 、 T_{19} 均由 5 个菌系组成,前者(T_1 ~ T_4 和 T_5 、 T_6 、 T_{15})组合中均添加了胶冻样芽孢杆菌发酵液,后者(T_8 ~ T_{11} 和 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{16} 、 T_{18} 、 T_{19})组合中均添加了巨大芽孢杆菌发酵液,由于胶冻样芽孢杆菌种子液活性效果优于巨大芽孢杆菌,因而造成表 4 结果,这与王小敏等^[20]研究结果一致;也可能是胶冻样芽孢杆菌适应环境能力优于巨大芽孢杆菌,具体作用机理还待进一步研究。

综上所述,处理组 T_7 、 T_8 、 T_9 、 T_{10} 、 T_{11} 、 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{14} 、

T_{17} 、 T_{18} 、 T_{19} 、 T_{20} 、 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 的堆肥产品有效活菌数、 pH 值及堆体最高温度可达到生物有机肥标准。

2.2 不同复配组合对堆肥产品化学指标的影响

通过物理指标的筛选,对符合相关指标的处理组进行化学指标测定,进一步优选对应堆肥产品有机质 $\geq 40\%$ 、总养分 $\geq 5.0\%$ 的菌种复配组合。表 5 结果表明,处理组 T_7 、 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{14} 、 T_{17} 、 T_{20} 和 T_{23} 的有机质相对 CK 组均有不同程度的降低,但仍大于 400 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且总养分均大于 50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中处理组 T_{13} 、 T_{14} 和 T_{23} 的总养分较 CK 分别提高了 37%、41%和 38%,全氮分别提高了 34%、36%和 36%,全磷(P_2O_5)分别提高了 56%、66%和 57%,全钾(K_2O)分别提高了 32%、38%和 33%。

2.3 不同复配组合对应堆肥产品对植物种子萌发的影响

通过理化指标的测定与筛选,对符合相关指标的处理组进行植物种子萌发试验,进一步根据高羊茅、黑麦草种子的发芽势、发芽率和发芽指数检验对应堆

表 4 不同处理对堆肥产品物理指标的影响

Table 4 Effects of different treatments on physical index of compost products

处理 Treatment groups	有效活菌数/ $10^8\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ Effective bacteria number/ $10^8\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$	色泽 Color	pH 值 pH value	最高温度 Maximum temperature/ $^{\circ}\text{C}$	$\geq 55^{\circ}\text{C}$ 持续时间 Duration $\geq 55^{\circ}\text{C}/\text{d}$
T_1	0.18 \pm 0.006	褐色	8.6 \pm 0.37	45	0
T_2	0.12 \pm 0.052	褐色	8.5 \pm 0.38	46	0
T_3	0.17 \pm 0.007	褐色	8.6 \pm 0.38	46	0
T_4	0.16 \pm 0.007	深褐色	8.6 \pm 0.35	44	0
T_5	0.18 \pm 0.007	深褐色	8.6 \pm 0.37	48	0
T_6	0.17 \pm 0.007	深褐色	8.3 \pm 0.36	47	0
T_7	0.28 \pm 0.011	黑褐色	8.1 \pm 0.35	57	2
T_8	0.24 \pm 0.010	深褐色	8.3 \pm 0.35	57	3
T_9	0.21 \pm 0.008	深褐色	8.4 \pm 0.38	58	3
T_{10}	0.26 \pm 0.010	深褐色	8.3 \pm 0.33	59	5
T_{11}	0.23 \pm 0.009	深褐色	8.3 \pm 0.31	59	4
T_{12}	0.25 \pm 0.011	黑褐色	8.0 \pm 0.32	58	6
T_{13}	0.28 \pm 0.012	黑褐色	8.1 \pm 0.37	57	5
T_{14}	0.26 \pm 0.011	黑褐色	7.6 \pm 0.30	63	12
T_{15}	0.16 \pm 0.007	深褐色	8.6 \pm 0.35	49	0
T_{16}	0.20 \pm 0.008	深褐色	8.5 \pm 0.40	48	0
T_{17}	0.25 \pm 0.010	黑褐色	7.9 \pm 0.37	56	8
T_{18}	0.24 \pm 0.011	黑褐色	8.3 \pm 0.38	56	2
T_{19}	0.21 \pm 0.080	深褐色	8.4 \pm 0.32	56	3
T_{20}	0.32 \pm 0.013	黑褐色	7.8 \pm 0.32	59	3
T_{21}	0.28 \pm 0.013	黑褐色	8.1 \pm 0.36	59	4
T_{22}	0.31 \pm 0.013	黑褐色	8.0 \pm 0.34	58	4
T_{23}	0.29 \pm 0.014	黑褐色	7.8 \pm 0.36	59	7
CK	0	浅褐色	8.7 \pm 0.36	45	0

表5 不同处理对堆肥产品化学指标的影响

Table 5 Effects of different treatments on chemical index of compost products

处理组 Treatment groups	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 TN/g·kg ⁻¹	全磷 TP(P ₂ O ₅)/g·kg ⁻¹	全钾 TK(K ₂ O)/g·kg ⁻¹	总养分 Total nutrient/g·kg ⁻¹
T ₇	609.3	19.8±0.68abc	9.0±0.85de	23.8±0.93bc	52.6±1.89bc
T ₈	619.5	17.5±0.72de	9.1±0.69d	21.8±0.78de	48.4±1.63d
T ₉	621.5	17.5±0.59de	8.9±0.74e	23.2±0.88bcde	49.6±2.20cd
T ₁₀	616.3	17.4±0.87e	8.7±0.68f	23.4±0.89bcd	49.5±2.00cd
T ₁₁	613.1	17.6±0.62de	9.0±0.73de	23.2±0.78bcde	49.8±1.90cd
T ₁₂	616.8	20.1±0.93abc	9.3±0.84c	24.9±0.82ab	54.3±2.21ab
T ₁₃	609.2	20.8±0.88a	9.5±0.89b	24.9±0.85ab	55.2±2.35ab
T ₁₄	585.4	21.1±0.84a	10.1±0.90a	25.9±1.11a	57.1±2.31a
T ₁₇	603.2	20.6±0.90ab	8.7±0.85f	24.7±1.06ab	54.0±2.11ab
T ₁₈	619.2	18.9±0.84cd	8.3±0.82g	21.8±0.84de	49.0±2.48cd
T ₁₉	622.5	19.6±0.81abc	8.6±0.76f	21.5±0.94e	49.7±2.17cd
T ₂₀	602.6	20.3±0.94abc	9.1±0.93d	23.5±0.99bcd	52.9±2.3bc
T ₂₁	618.1	19.2±0.98bc	7.3±0.81i	22.8±0.96cde	49.3±2.09cd
T ₂₂	614.3	18.9±0.94cd	7.5±0.73fh	22.5±1.08cde	48.9±1.96cd
T ₂₃	591.5	21.1±0.77a	9.6±0.80b	25.0±1.17ab	55.7±2.26ab
CK	723.6	15.5±0.70f	6.1±0.62j	18.8±0.82f	40.4±1.36e

注:同列不同字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference among treatment groups ($P<0.05$). The same below.

肥产品的生物毒性。表6结果表明,处理组T₇、T₁₂、T₁₃、T₁₄、T₁₇、T₂₀和T₂₃的发芽指数均大于0.85,符合生物有机肥相关产品标准^[21-22],与商品有机肥处理组高羊茅和黑麦草种子发芽指数(GI=1.28、1.22)相比较,处理组T₁₄的发芽指数(GI=1.21、1.14)最接近,其次为T₂₃(GI=1.07、1.04)和T₁₃(GI=1.01、1.00)。

2.4 不同复配组合对应堆肥产品对植物生长的影响

对处理组T₁₃、T₁₄和T₂₃进一步开展植物生长试验,筛选对蘑菇渣具有高效降解、彻底腐熟作用的最

优菌种组合。图1结果表明,处理组T₁₄对应堆肥产品对高羊茅和黑麦草具有显著的促生长作用,与CK组相比,高羊茅的茎长和地上鲜质量分别增加了24.4%和29.3%,黑麦草的茎长和地上鲜质量分别增加了33.3%和36.8%。综上,最终确定处理组T₁₄对蘑菇渣具有良好的降解、腐熟作用,即蜡状芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌、甲基营养型芽孢杆菌、多黏类芽孢杆菌、绿色木霉和黑曲霉的菌种组合。图2和图3结果表明,适宜选用0.25:1的基质比例和第15d的幼苗生长期来

表6 不同处理组对应堆肥产品对植物种子发芽的影响

Table 6 Effects of composting products on germination of plant seed in different treatments

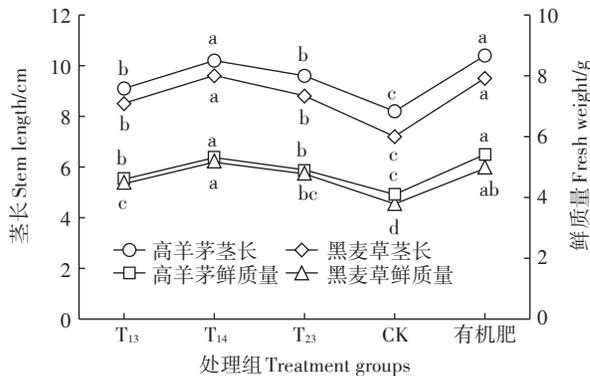
处理组 Treatment groups	高羊茅 <i>Festuca elata</i>			黑麦草 <i>Lolium perenne</i>		
	发芽势 GE/%	发芽率 GR/%	发芽指数 GI	发芽势 GE/%	发芽率 GR/%	发芽指数 GI
T ₇	73.3±2.5d	82.2±2.8d	0.86±0.03e	60.0±2.0cd	77.8±2.5de	0.85±0.03f
T ₁₂	84.4±2.7bc	86.7±3.4cd	0.99±0.03d	68.9±2.3b	80.0±2.8c	0.91±0.03e
T ₁₃	86.7±2.8b	93.3±3.1ab	1.01±0.04cd	75.6±2.6a	80.0±2.7c	1.00±0.04cd
T ₁₄	93.3±3.0a	97.8±3.2a	1.21±0.05b	80.0±2.7a	86.7±3.0ab	1.14±0.04b
T ₁₇	80.0±2.9c	86.7±3.1cd	0.99±0.03d	66.7±2.3b	82.2±2.8bc	0.98±0.03cd
T ₂₀	73.3±2.9d	88.9±3.0bc	0.96±0.04d	68.9±2.4b	82.2±3.0bc	0.97±0.03d
T ₂₃	86.7±3.3b	93.3±3.4ab	1.07±0.04c	75.6±2.7a	80.0±2.8c	1.04±0.04c
CK	64.4±2.4e	71.1±2.5e	0.74±0.03f	62.2±2.1c	64.4±2.3d	0.65±0.02g
蒸馏水	60.0±2.3e	91.1±2.9bc	1.00±0.03d	57.8±2.1d	88.9±3.3a	1.00±0.03cd
有机肥	95.6±3.6a	97.8±3.4a	1.28±0.04a	77.8±2.7a	88.9±3.3a	1.22±0.04a

研究菌种复配组合对应堆肥产品对植物生长指标的影响。

3 讨论

3.1 腐熟微生物组方菌株之间的关系

蘑菇渣堆肥过程中,有益外源微生物的类型、数量和复配组方在很大程度上影响腐熟效果并决定堆肥产品品质。堆肥初期,土著微生物与外源添加微生物形成竞争,细菌定殖生存能力强,占据主导优势;随着细菌代谢的增强和堆体温度的升高,微生物的群落结构发生改变,外源添加的菌剂渡过竞争期并大量定殖生长,嗜热型微生物和降解型真菌成为优势菌,大分子难溶有机物(木质素、纤维素等)开始降解,并伴有热量和二氧化碳产生;降温腐熟阶段,微生物总量



同一指标不同字母表示处理组间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different letters for the same index indicate significant differences among treatment groups ($P < 0.05$). The same below

图1 不同处理组对应堆肥产品对植物茎长与鲜质量的影响
Figure 1 Effects of composting products on stem length and fresh weight

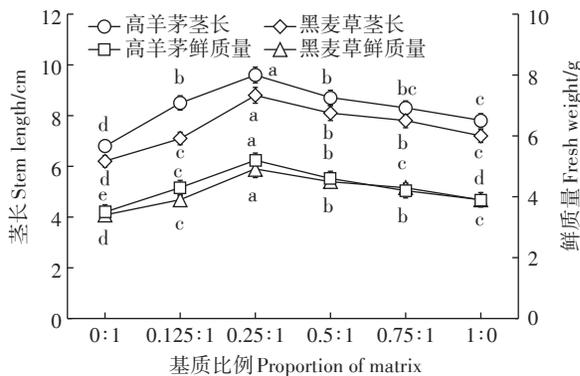


图2 不同配比基质(堆肥产品/田园土)对植物茎长与鲜质量的影响

Figure 2 Effects of different ratios of compost products to garden soil on the stem length and fresh weight

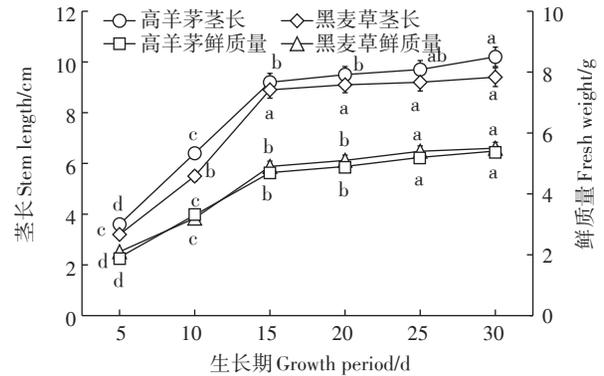


图3 不同生长期植物的茎长与鲜质量

Figure 3 The stem length and fresh weight at different growth period

快速减少,真菌数量下降最为明显,主要菌群为细菌和放线菌^[23-25]。本研究中,添加微生物复配组合的处理组堆肥腐熟效果均优于空白对照组,表明接种外源微生物能够改变堆肥过程微生物结构,而不同处理组之间堆肥产品理化性质又表现出差异,这可能与不同微生物的功能及菌间竞争关系有关^[26]。

3.2 微生物组方对腐熟产品指标的影响

试验数据分析发现,含有蜡状芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌、甲基营养型芽孢杆菌、多黏类芽孢杆菌、绿色木霉和黑曲霉的复配组合具有较好的堆肥效果。复配组合中含有两种真菌的处理组(T₇、T₁₄、T₁₇、T₂₀和T₂₃)有机质含量下降明显,其中T₁₄的有机质含量下降最为明显,相对空白对照组下降了19.1%,这可能与两种真菌的协同作用有关,纤维素酶产量大、活性显著^[27],对蘑菇渣具有较好的降解作用,但每种菌的酶活特性(总酶、外切酶、内切酶)以及菌间酶活协同作用有待进一步分析。

3.3 微生物组方对腐熟产品应用的影响

植物种子萌发和生长试验表明,处理组T₁₄和T₂₃对应堆肥产品对高羊茅和黑麦草具有显著的促生长作用,与商品有机肥相当^[28],其中T₂₃的发芽率、发芽指数、植物茎长和鲜质量略低于T₁₄,这可能是由于处理组T₂₃含有的胶冻样芽孢杆菌对其他菌种代谢具有拮抗作用,造成堆肥产物的营养成分偏低,从而影响植物吸收与生长。

4 结论

(1)处理组T₁₄(蜡状芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌、甲基营养型芽孢杆菌、多黏类芽孢杆菌、绿色木霉和黑曲霉)的等比例微生物组方对蘑菇渣堆肥具有促进作

用,可加快腐熟进程(第6 d进入高温期)、延长高温期持续时间($\geq 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持12 d),堆体最高温度达到 $63\text{ }^{\circ}\text{C}$,堆肥产品pH值降至7.6,总养分提高至 $57.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,符合国标要求。

(2)处理组 T_{14} 对高羊茅和黑麦草具有显著的促生长作用,与商品有机肥作用相当,可以认为是一种前景广阔的新兴有机肥产品,具有巨大的应用价值和广阔的市场前景。

然而,关于不同腐熟微生物间比例关系对堆肥进程、腐熟效果、产品质量、重金属限量及腐殖质含量的影响,本试验尚未涉及,有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 张金霞,陈强,黄晨阳,等.食用菌产业发展历史、现状与趋势[J].菌物学报,2015,34(4):524-540.
ZHANG Jin-xia, CHEN Qiang, HUANG Chen-yang, et al. History, current situation and trend of edible mushroom industry development [J]. *Mycosystema*, 2015, 34(4):524-540.
- [2] 张亭,韩建东,李瑾,等.食用菌菌渣综合利用与研究现状[J].山东农业科学,2016,48(7):146-150.
ZHANG Ting, HAN Jian-dong, LI Jin, et al. Comprehensive utilization and research status of edible fungi residues[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(7):146-150.
- [3] 诸葛诚祥.菌糠高效降解菌剂的研发及其在堆肥中的应用[D].杭州:浙江大学,2017:1-6.
ZHUGE Cheng-xiang. Research on high efficiency degrading microbial inoculum of spent mushroom substrate and its application in composting [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017:1-6.
- [4] 刘晓梅,邹亚杰,胡清秀,等.菌渣纤维素降解菌的筛选与鉴定[J].农业环境科学学报,2015,34(7):1384-1391.
LIU Xiao-mei, ZOU Ya-jie, HU Qing-xiu, et al. Screening and identification of cellulose-degrading bacteria from spent substrate of edible mushroom[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7):1384-1391.
- [5] Lou Z M, Zhu J, Wang Z X, et al. Release characteristics and control of nitrogen, phosphate, organic matter from spent mushroom compost amended soil in a column experiment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 98:417-423.
- [6] 王伟东,刘建斌,牛俊玲,等.堆肥化过程中微生物群落的动态及菌剂的应用效果[J].农业工程学报,2006,22(4):148-152.
WANG Wei-dong, LIU Jian-bin, NIU Jun-ling, et al. Dynamics of microbial community and the effect of inoculum on the composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(4):148-152.
- [7] 李自刚.农业有机固体废物堆肥过程中微生物多样性与物质转化关系研究[D].南京:南京农业大学,2006:30-39.
LI Zi-gang. The relationship of microbial diversity and the transformation of material in the composting process of agricultural organic solid wastes[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006:30-39.
- [8] 张园,耿春女,何承文,等.堆肥过程中有机质和微生物群落的动态变化[J].生态环境学报,2011,20(11):1745-1752.
ZHANG Yuan, GENG Chun-nü, HE Cheng-wen, et al. Dynamics of organic matters and microbial population during aerobic composting process[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(11):1745-1752.
- [9] 白变霞,陈艳彬,任嘉红.蜡状芽孢杆菌CLY07菌株的解有机磷特性研究[J].西南林业大学学报,2016,36(4):75-81.
BAI Bian-xia, CHEN Yan-bin, REN Jia-hong. Study on organophosphate solubilizing characteristics of *Bacillus cereus* CLY07[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2016, 36(4):75-81.
- [10] 田稼,吴小杰,孙超,等.胶质芽孢杆菌的研究进展[J].中国土壤与肥料,2017(6):15-22.
TIAN Jia, WU Xiao-jie, SUN Chao, et al. Research progress on *Bacillus mucilaginosus*[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(6):15-22.
- [11] 刘露,李丽,闫洪雪,等.巨大芽孢杆菌的应用研究进展[J].北方农业学报,2016,44(4):117-120.
LIU Lu, LI Li, YAN Hong-xue, et al. Research progress of *Bacillus megatrium*[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2016, 44(4):117-120.
- [12] 张妙宜,云天艳,周登博,等.甲基营养型芽孢杆菌的研究进展[J].热带农业科学,2017,37(9):66-71.
ZHANG Miao-yi, YUN Tian-yan, ZHOU Deng-bo, et al. Research advances on *Bacillus methylotrophicus*[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2017, 37(9):66-71.
- [13] 王刘庆,王秋影,廖美德.多黏类芽孢杆菌生物特性及其机理研究进展[J].中国农学通报,2013,29(11):158-163.
WANG Liu-qing, WANG Qiu-ying, LIAO Mei-de. The progress of biological properties and mechanisms of *Paenibacillus polymyxa*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(11):158-163.
- [14] 王晓明,孙玉辉,张欢,等.绿色木霉固态发酵生产纤维素酶条件优化与酶的固定化[J].浙江农业学报,2014,26(1):186-193.
WANG Xiao-ming, SUN Yu-hui, ZHANG Huan, et al. Studies on the conditions of solid-state fermentation for cellulase production by *Trichoderma viride* and cellulase immobilization[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, 26(1):186-193.
- [15] 陈仕伟.黑曲霉、绿色木霉的诱变选育及其在秸秆腐熟剂中的应用初探[D].武汉:华中农业大学,2013:12-51.
CHEN Shi-wei. Mutation breeding of *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride* and its application in straw decomposing inoculant[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013:12-51.
- [16] 冯海萍,曲继松,杨冬艳,等.接种微生物菌剂对枸杞枝条基质化发酵品质的影响[J].环境科学学报,2015,35(5):1457-1463.
FENG Hai-ping, QU Ji-song, YANG Dong-yan, et al. Effects of inoculation microbial agent on fermentation quality of wolfberry branches for substrate production[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5):1457-1463.
- [17] 陈智坤,邓娟,王峰伟,等.蘑菇渣堆肥滤液对盐胁迫下黄芩种子萌发和幼苗生长的影响[J].北方园艺,2016(18):149-153.
CHEN Zhi-kun, DENG Juan, WANG Feng-wei, et al. Effect of spent mushroom compost leachate on seed germination and seedling growth of *Scutellaria baicalensis* Georgi under salt stress[J]. *Northern Horticulture*, 2016(18):149-153.

- [18] 辛世杰. 微生物菌剂在有机废弃物堆肥中的作用及其机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 2-12.
XIN Shi-jie. The research of microbial agents organic waste composting and their mechanisms[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 2-12.
- [19] Zhang L, Sun X. Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171(1): 274-284.
- [20] 王小敏, 刘文菊, 李博文, 等. 巨大芽孢杆菌与胶冻样类芽孢杆菌对土壤镉的活化效果研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 83-88.
WANG Xiao-min, LIU Wen-ju, LI Bo-wen, et al. Effect of *Bacillus megaterium* and *Paenillus kribbensis* on availability of soil Cd[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6): 83-88.
- [21] 黄国锋, 钟流举, 张振铤, 等. 有机固体废弃物堆肥的物质变化及腐熟度评价[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 813-818.
HUANG Guo-feng, ZHONG Liu-ju, ZHANG Zhen-tian, et al. Physicochemical changes and maturity evaluation of solid organic waste compost[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 813-818.
- [22] 刘卫星, 顾金刚, 姜瑞波, 等. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度评价指标[J]. 土壤肥料, 2005(3): 3-7.
LIU Wei-xing, GU Jin-gang, JIANG Rui-bo, et al. The maturity evaluating indexes of organic solid waste compost[J]. *Soils and Fertilizers*, 2005(3): 3-7.
- [23] Hassen A, Belguith K, Jedidi N, et al. Microbial characterization during composting of municipal solid waste[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 80: 217-225.
- [24] 朴哲, 崔宗均, 苏宝林. 高温堆肥的生物化学变化特征及植物抑制物质的降解规律[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 206-209.
PIAO Zhe, CUI Zong-jun, SU Bao-lin. Characterization of biochemistry and degradation of plant-inhibited materials during high-temperature composting[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(4): 206-209.
- [25] 唐景春, 周启星, 张冠辉. 不同来源生物质废弃物高温堆肥过程的物理化学及微生物性质研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1158-1164.
TANG Jing-chun, ZHOU Qi-xing, ZHANG Guan-hui. Physicochemical and microbial properties in thermophilic composting processes of different biological solid wastes[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5): 1158-1164.
- [26] 黄丹莲. 堆肥微生物群落演替及木质素降解功能微生物强化堆肥机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
HUANG Dan-lian. Microbial community succession and the mechanisms of solid waste composting by ligninolytic microorganism[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [27] 姜伯玲, 王曙阳, 李文建, 等. 绿色木霉与黑曲霉混合发酵产纤维素酶的研究[J]. 中国酿造, 2015, 34(7): 28-31.
JIANG Bo-ling, WANG Shu-yang, LI Wen-jian, et al. Cellulase production with mixed-culture fermentation of *Trichoderma viride* and *Aspergillus niger*[J]. *China Brewing*, 2015, 34(7): 28-31.
- [28] Paula F S, Tatti E, Abram F. et al. Stabilisation of spent mushroom substrate for application as a plant growth-promoting organic amendment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 476-486.