

刘向东,杨吉龙,尹陈茜,等.不同菌种对园林植物废弃物堆制过程理化特性的影响[J].江苏农业科学,2019,47(22):310-314.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.22.071

不同菌种对园林植物废弃物堆制过程理化特性的影响

刘向东,杨吉龙,尹陈茜,冯 焱,于晓英

(湖南农业大学园艺园林学院/湖南省中亚热带优质花木繁育与利用工程技术中心,湖南长沙 410128)

摘要:为了促进园林绿化植物废弃物的基质化利用,探索不同菌种对园林绿化植物废弃物堆制效果的影响,以园林废弃物香樟(*Cinnamomum camphora*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、垂柳(*Salix babylonica*)、柿树(*Diospyros kaki*)的凋落叶为材料,比较不添加任何菌种(CK)与添加了0.5%枯草芽孢杆菌(T1)、0.5%康宁木霉(T2)、0.5%EM菌(T3)共4个处理的堆制过程理化特性变化。结果表明,添加枯草芽孢杆菌、康宁木霉、EM菌能明显促进园林植物废弃物堆制的进程,在堆制3 d时堆体温度就达到最高值,高温期维持5 d。堆制结束后,4个处理的堆体pH值上升至8.2~8.4,EC值上升至2.10~2.40 mS/cm;堆制70 d时4个处理的C/N分别下降了78.61%、78.51%、63.56%、76.70%;堆制过程中硝态氮含量在初期变化不大,在45 d时大幅度上升,氨态氮含量先上升后下降再小幅上升;在堆制70 d时T1处理的腐殖质含量下降了5.39%,T2处理、T3处理、CK的腐殖质含量分别上升了64.45%、60.99%、37.19%,T1处理、T2处理、T3处理、CK的富里酸含量分别上升了46.91%、169.26%、128.67%、58.87%,胡敏酸含量则分别下降了77.91%、73.37%、58.64%、23.35%。在堆制的不同阶段点播瓜叶菊(*Pericallis hybrida*)种子,堆制45 d的T1、T2、T3处理的种子发芽指数均达到83%以上,堆制结束后T3处理种子发芽指数最高,为100%。

关键词:园林植物废弃物;菌种;堆制;发酵;基质

中图分类号: S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)22-0310-05

随着城市对园林绿化需求的提高,绿化植物种植量不断增加,园林养护过程中产生的枯枝、落叶、杂草等废弃物的量也在逐年增加。传统的园林植物废弃物的处理方式是填埋和焚烧^[1],但这类处理方式不仅占用土地,而且会对大气造成严重污染。随着国家环境保护(环保)力度的加大和人们环保意识的提高,城市园林绿化植物废弃物资源化利用成为人们非常关注的热点问题,为促进城市节能减排和改善生态环境提供了很大的帮助。

随着无土栽培技术的飞跃发展和都市园艺的兴起,基质栽培越来越受到欢迎和普及,市场对栽培基质的需求逐年加大,因此园林绿化植物废弃物的基质化利用具有广阔的市场应用前景,同时对缓解城市环境压力及人们对可耕种土地渴求的增加与耕地资源逐年减少的矛盾有着非常重要的意义。

将园林绿化植物废弃物进行基质化利用的关键环节之一是对园林绿化废弃物进行无害化高温堆制发酵^[2]。一般园林废弃物堆肥系统按有无发酵装置可分为开放式堆肥系统和发酵仓堆肥系统^[3],堆肥过程可分为干预过程和非干预过程。常见的堆肥方法有功能膜覆盖式堆肥、高温堆肥、好氧堆肥^[4-5]、微生物技术堆肥^[6]等。堆肥时一般通过添加微生物接种剂、营养调节剂、特定目的调节剂等来推进堆肥进程。外

源添加剂不仅可通过影响堆肥物质的分解程度来影响堆肥产品品质,同时可以通过影响堆肥前期物质转化推动堆肥进程^[7]。微生物对推进整个堆制发酵进程的速率有着非常重要的影响,研究表明,枯草芽孢杆菌、EM菌、康宁木霉对农田废弃物秸秆堆肥发酵有很好的促进作用^[8-9],对于富含纤维素、木质素及复杂次生代谢产物的各种园林废弃物的堆制发酵是否有相同的或更好的效果,相关的研究还相对较少。本试验以园林废弃物香樟(*Cinnamomum camphora*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、垂柳(*Salix babylonica*)、柿树(*Diospyros kaki*)的凋落叶为材料,比较不添加任何菌种与添加相同浓度的不同菌种处理堆肥过程中理化特性的变化,以期为促进园林绿化植物废弃物快速基质化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于湖南农业大学观赏园艺研究所(113°04'35.90"E,28°10'46.99"N),海拔34 m,属于亚热带季风气候。

1.2 试验材料

供试材料为在2017年10—12月收集于湖南农业大学花卉基地的园林废弃物,包括香樟、杜仲、垂柳、柿树的枯枝落叶。收集自然凋落到地表未分解、干净的枯枝落叶,在晴朗天气晾干,将4种材料均等混匀,用粉碎机粉碎后过3目筛。试验用枯草芽孢杆菌和康宁木霉购买于湖南省微生物研究院,EM菌来源于河南中广集团,尿素购买于江苏晋煤恒盛化工股份有限公司。

1.3 试验设计

本试验以园林废弃物为主要材料,每个处理以3 kg园林废弃物作为堆肥的基本添加物。李国学等研究发现,添加

收稿日期:2018-09-26

基金项目:湖南省科技计划(编号:2018TP2007);湖南省科技厅重点研发计划(编号:2016NK2100);长沙市城市管理和行政执法局项目(编号:17191)。

作者简介:刘向东(1995—),女,湖南汨罗人,硕士研究生,主要从事观赏植物资源与应用研究。E-mail:1125275210@qq.com。

通信作者:于晓英,博士,教授,主要从事观赏植物资源应用研究。

E-mail:475705701@qq.com。

0.5% 快速发酵菌剂能加快稻壳堆肥的发酵, 缩短发酵时间^[10]。本试验每个处理的菌种添加量为 0.5%, 所加菌剂分别为枯草芽孢杆菌 (T1 处理)、康宁木霉 (T2 处理)、EM 菌 (T3 处理), 以不添加任何菌种为对照 (CK), 每个处理重复 3 次, 共计 12 个处理。对每个处理添加 1% 尿素作为发酵氮源, 将每个处理含水量调至 60%。将所有处理堆肥装入 8 L 带盖发酵盒里, 堆体宽度为 35 cm, 高度为 20 cm, 放置于恒温培养箱里在 28 ℃ 下进行堆腐发酵。

1.4 指标测定

每天于 09:00 定时测量堆体温度。当堆体温度上升到 45 ℃ 时开始翻堆, 每隔 2 d 翻堆 1 次, 当温度下降到 35 ℃ 以后每 15 d 翻堆 1 次, 试验周期为 70 d。将堆制当日作为 0 d, 分别在堆肥 0、3、5、45、70 d 时采用分对角线 5 点法取样后混合均匀, 避光风干测堆肥发酵过程中堆体 pH 值、电导率 (EC 值)、碳氮比 (C/N)、硝态氮含量、铵氮含量、腐殖质含量、富里酸含量、胡敏酸含量等理化指标。种子发芽试验是采用文献^[11]中的方法点播瓜叶菊 (*Pericallis hybrida*) 种子, 在堆肥发酵不同阶段, 取新鲜堆体样品用蒸馏水按土水比 (体积比) 1:10 浸提 1 h 后, 3 000 r/min 离心 30 min, 其上清液即为浸提液。取 5 mL 浸提液加入铺有 2 层滤纸的培养皿中, 每个培养皿播种 20 粒种子, 以蒸馏水作对照, 重复 3 次, 在 25 ℃ 恒温培养箱中培养, 在播种后第 5 天观察其发芽情况, 种子发芽指数 = (处理平均发芽率 × 处理平均根长) / (对照平均发芽率 × 对照平均根长) × 100%。

堆体温度用水银温度计测定; 用水浸提堆体样品, 水土体积比为 2.5:1, 充分混合均匀后静置 24 h 取浸提液, 使用 PB-10 酸度计测定浸提液 pH 值^[12]; 用水浸提堆体样品, 水土体积比为 5:1, 充分混合均匀后静置 24 h 取浸提液, 使用 DDS-11D 电导率仪测定浸提液电导率; 堆体样品氨态氮、硝态氮含量用 1 mol/L 的氯化钾浸提, 流动注射分析仪测定 (FIAstar 5000 Analyzer, Foss Tecator, Denmark); 腐殖质、富里酸、胡敏酸含量采用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾氧化法, 用产地为日本的总有机碳分析仪测定。

1.5 数据分析

用 Excel 2010 整理数据, 用 Origin Pro 2018 作图, 用 SPSS 17.0 进行方差分析, 采用 Duncan's 法进行多重比较, 以 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中堆体温度、pH 值及 EC 值变化

堆肥过程中物料的理化性质变化是堆肥腐熟度的重要参考依据^[13], 温度是影响堆肥过程的重要因素之一^[14], 在堆肥过程中微生物分解有机物释放出热量, 使堆体温度上升, 高温期时间的长短直接影响堆腐基质中有害病原菌的存活率。由图 1 可知, 枯枝落叶发酵过程经过了 3 个阶段, 即升温阶段、高温阶段、腐熟阶段, 其中堆制的 0~3 d 内都是升温期, 堆制 3 d 时, T1、T2、T3 处理和 CK 均达到最高温, 其中 T2 处理的温度最高, 为 54 ℃, T1 处理次之, 为 48 ℃, CK 最低, 为 46 ℃。5 d 后迅速降温, 至 14 d 左右恒定至室温。有研究表明添加菌种能够加速园林废弃物堆体升温, 缩短堆肥腐熟时间^[15]。

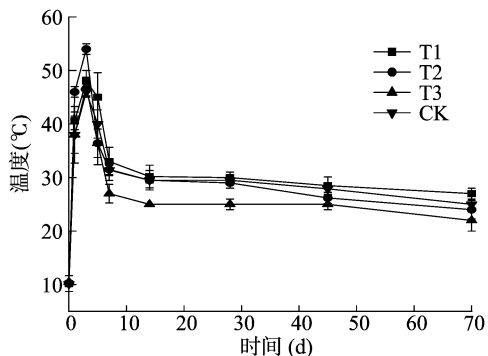


图1 堆制过程中温度变化

由图 2 可知, 在枯枝落叶发酵过程中 pH 值呈缓慢上升趋势, 后期上升平稳, T1、T2、T3 处理、CK 的 pH 值分别从 7.19、7.04、7.44、7.37 上升到 8.28、8.22、8.34、8.28, 发酵结束时的 pH 值都在 8.2~8.4 范围内, 符合腐熟的标准^[16], 且符合花卉对栽培基质的理化指标要求^[17], 也达到农业应用要求 (pH 值为 7.0~8.5)^[18]。

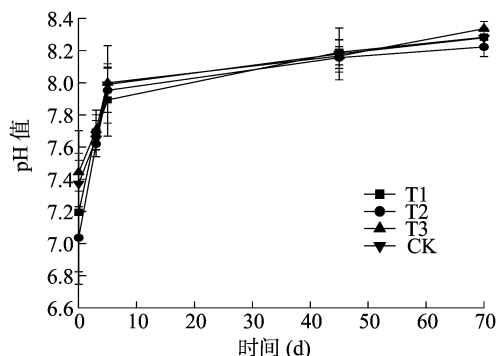


图2 堆制过程中 pH 值变化

堆肥过程中可溶性盐含量主要通过电导率 (EC 值) 大小来反应, EC 值过高则构成渗透逆境, 会导致植物盐害, EC 值过低则营养不足以维持植物正常生长^[19]。有研究认为, 作物生长安全电导率范围为 0.75~2.60 mS/cm^[20]。从图 3 可知, 堆肥过程中堆体 EC 值呈缓慢上升趋势, T1、T2、T3 处理、CK 分别上升了 95.01%、87.65%、89.04%、101.06%, 堆肥结束后的 EC 值分别为 2.23、2.34、2.11、2.33 mS/cm, 均达到植物生长安全范围。

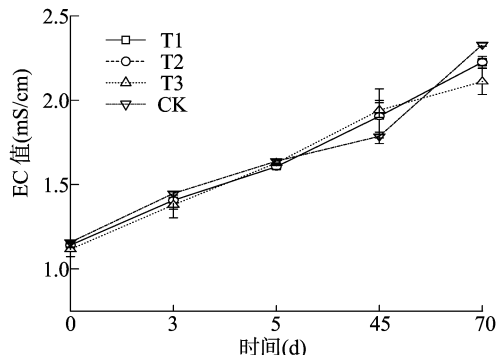


图3 堆制过程中 EC 值的变化

2.2 堆肥过程中 C/N 的变化

在农林废弃物堆肥过程中有机质在微生物作用下被分解, 但同时也有微生物的硝化作用。微生物呼吸消耗碳和氮, 其中氮以氨气形式消失或被微生物转变、消散为硝酸盐和亚

硝酸,因此堆肥中 C/N 的变化可以反映出微生物活性的强弱,可通过 C/N 判断堆料的稳定性,所以 C/N 是评价和判断堆料腐熟程度的一项重要指标^[21]。由图 4 可知,试验材料在堆制过程中 C/N 呈下降趋势,从 47~55 下降为 10~20,说明各处理堆肥都达到了稳定的腐熟程度。从不同处理中可以看出,添加 EM 菌的 T3 处理初始 C/N 最高,为 54.23,堆肥进行

5 d 以后 C/N 迅速下降,后期下降平稳。不添加任何菌种的 CK 的 C/N 比在堆肥进行 5 d 后下降迅速,后期平稳。添加枯草芽孢杆菌的 T1 处理和添加康宁木霉的 T2 处理在堆肥中 C/N 比下降速度相比较 T3 处理缓慢,但都是在堆肥 5 d 后增速下降。

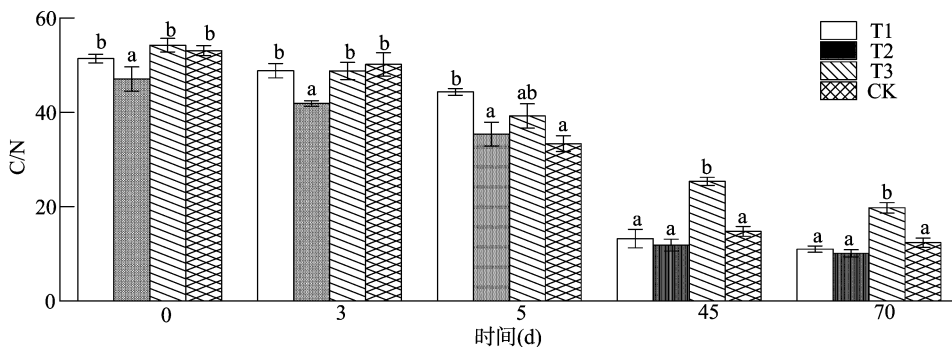


图4 堆制过程中 C/N 变化

2.3 堆肥过程中氨态氮、硝态氮含量的变化

氨态氮、硝态氮含量可以反映堆肥发酵过程中通气状况和微生物分解利用氮的情况。硝态氮主要通过硝化细菌的硝化作用来形成初期发酵。从整体上看,氨态氮含量在堆肥过程中呈先上升后下降再小幅上升趋势,与魏平等^[22]的研究结果相同。从图 5-A 可知,在发酵 3 d 时,堆肥中氨态氮含量大幅度上升,随后急速下降,后期处于平稳。从图 5-B 可知,T1、T2、T3 处理,CK 的硝态氮含量在发酵 5 d 后迅速增加,堆肥 45 d 时分别为 0.957、1.442、1.096、0.422 g/kg,45 d

后下降,堆肥结束时分别为 0.436、0.307、0.566、0.146 g/kg。CK 硝态氮含量在整个发酵过程中无明显上升趋势,说明其不利于氮素的固定且硝态氮含量总体低于其他 3 个处理。

在堆肥发酵初期造成氨态氮含量上升的原因一方面是由于尿素中的氮素逐渐溶解造成堆料中氨态氮含量增加,另一方面是堆料中的有机氮逐渐被分解为氨态氮。后期氨态氮含量慢慢下降是因为随着温度的降低,硝化细菌的硝化作用增强,大量的氨态氮转化为硝态氮^[23],因此发酵初期硝态氮含量变化不大,而在堆肥 45 d 时硝态氮含量大幅度上升。

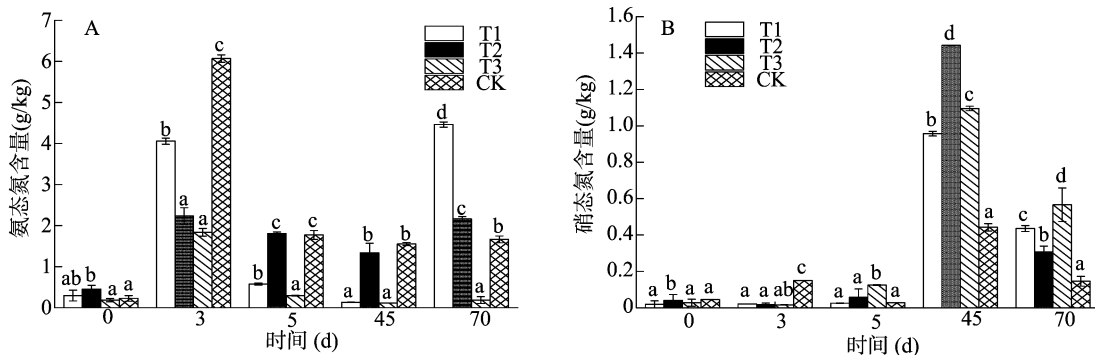


图5 堆肥过程中氨态氮、硝态氮含量变化

2.4 堆肥过程中总腐殖酸含量变化

有研究证明,向堆肥中添加菌剂有利于木质素类物质分解与腐殖质的形成^[24-25]。菌种的选择是决定相关有机废弃物发酵速度和产品质量的重要因素。从表 1 可知,T2 处理的腐殖质含量在堆肥过程中呈先下降后上升的趋势,T1 处理的腐殖质含量总体呈先上升后下降的趋势。造成这一现象的原因是各处理中原腐殖酸矿化程度低,腐殖质材料中木质素、纤维素含量高,微生物首先降解木质素和纤维素,因此腐殖酸含量没有下降反而先上升,上升后微生物开始分解有机物,到了堆肥后期微生物对腐殖酸含量的形成有明显促进作用。在发酵后期 T3 处理腐殖质含量达到 26.29%,高于其他处理,其次为 T2 处理,为 22.71%,T1 处理最低,仅 13.17%,说明 T3 处理更有利于腐殖质的形成。另外,从表 1 中也可得知,堆肥

70 d 时富里酸含量达最大值,其中 T3 处理含量最高,达 23.85%,T2 处理含量为 21.11%,CK 含量为 18.81,T1 处理的含量最低,仅为 11.87%,说明在堆肥中添加 EM 菌对富里酸的形成为显著促进作用,枯草芽孢杆菌对富里酸形成有显著抑制作用。堆肥发酵当天,T1 处理、T2 处理、T3 处理、CK 的胡敏酸含量分别为 5.84%、5.97%、5.90%、4.24%,堆肥 70 d 时分别为 1.29%、1.59%、2.44%、3.25%,分别下降了 77.91%、73.37%、58.64%、23.35%。

2.5 堆肥过程中瓜叶菊种子发芽指数的变化

种子发芽指数被认为是最能反映植物毒性大小的腐熟度指标^[26-27],未腐熟堆肥的毒性主要来自于小分子的有机酸和大量的氨态氮、多酚等物质,这些物质会对种子产生毒害作用,影响发芽指数,随着发酵的进行,堆料的毒性逐渐降

低^[28]。因此检查在发酵物上的种子发芽指数,也可以间接、直观地判断园林废弃物的发酵程度。当种子发芽指数达到 50% 时,表示堆肥已达腐熟程度,其毒性降至植物可承受范围;当种子发芽指数达到 80% 时,其毒性基本消失^[29]。从表 2 可知,随着堆制时间的延长,种子的发芽指数不断提高。在播种第 5 天,堆制发酵 5 d 时的 T3 处理发芽指数最高,为

23.33%,T1 处理次之,为 21.11%,CK 最低,为 3.33%;堆肥 45 d 的 T1、T2、T3 处理发芽指数均达到了 83% 以上,CK 仅 61.11%,说明 T1、T2、T3 处理的发酵基本完成,CK 发酵速度稍慢。堆肥 70 d 时 CK 的发酵基本完成,种子发芽指数为 84.03%,此时 T1、T2、T3 处理的发芽指数均超过了 95%,其中 T3 处理的最高,为 100%。

表 1 堆肥过程中腐殖质、富里酸和胡敏酸含量的变化

堆肥时间 (d)	处理	腐殖质含量 (%)	富里酸含量 (%)	胡敏酸含量 (%)
0	T1	13.92 ± 0.32a	8.08 ± 0.11a	5.84 ± 0.32b
	T2	13.81 ± 0.43a	7.84 ± 0.58a	5.97 ± 0.70b
	T3	16.33 ± 0.45b	10.43 ± 0.22b	5.90 ± 0.49b
	CK	16.08 ± 0.22b	11.84 ± 0.58c	4.24 ± 0.36a
3	T1	17.53 ± 0.11b	15.14 ± 0.13b	2.39 ± 0.13a
	T2	12.44 ± 0.92a	10.18 ± 0.87a	2.26 ± 0.95a
	T3	11.51 ± 0.51a	10.13 ± 0.10a	1.39 ± 0.60a
	CK	10.42 ± 0.90a	8.53 ± 1.14a	1.89 ± 0.31a
5	T1	14.04 ± 0.28b	12.28 ± 0.40c	1.76 ± 0.21a
	T2	9.79 ± 0.21a	7.87 ± 0.22a	1.92 ± 20.03a
	T3	19.18 ± 0.89c	17.58 ± 0.87d	1.60 ± 0.15a
	CK	13.13 ± 0.45b	10.38 ± 0.45b	2.76 ± 0.29b
45	T1	12.11 ± 0.16b	11.22 ± 0.21b	0.88 ± 0.98a
	T2	19.13 ± 0.29c	18.06 ± 0.08c	1.07 ± 0.29a
	T3	9.39 ± 0.25a	8.13 ± 0.25a	1.26 ± 0.045a
	CK	9.77 ± 0.83a	8.14 ± 0.94a	1.63 ± 0.12a
70	T1	13.17 ± 0.35a	11.87 ± 0.11a	1.29 ± 0.25a
	T2	22.71 ± 0.21b	21.11 ± 0.29bc	1.59 ± 0.99ab
	T3	26.29 ± 0.39c	23.85 ± 0.23c	2.44 ± 0.23bc
	CK	22.06 ± 1.95b	18.81 ± 2.39b	3.25 ± 0.44c

表 2 堆肥过程中瓜叶菊种子发芽指数的变化

处理	种子播种后第 5 天的发芽指数(%)					
	堆肥 0 d	堆肥 3 d	堆肥 5 d	堆肥 15 d	堆肥 45 d	堆肥 70 d
T1	0.00a	0.14 ± 0.01a	21.11 ± 0.02b	50.00 ± 0.08b	92.64 ± 0.12b	95.83 ± 0.07a
T2	0.21 ± 0.01a	0.56 ± 0.03a	15.28 ± 0.03a	43.68 ± 0.11b	87.85 ± 0.13b	95.83 ± 0.07a
T3	0.14 ± 0.01a	1.04 ± 0.02a	23.33 ± 0.14b	51.25 ± 0.02b	83.13 ± 0.03a	100.00 ± 0.00a
CK	0.00a	0.00a	3.33 ± 0.03a	25.28 ± 0.07a	61.11 ± 0.13a	84.03 ± 0.14a

3 结论与讨论

菌种的选择是决定相关有机废弃物发酵速度和产品质量的重要因素。近年来我国学者在相关领域进行了广泛接种效应研究。田鹤等的研究表明,添加史氏芽孢杆菌可使堆肥腐熟时间缩短,加速屠宰废弃物转化速度^[30]。王守红等在研究中表示,霉菌和酵母菌在促进堆肥成熟和氮素保存过程中起着重要的作用^[31]。本试验的结果显示,添加了 EM 菌的堆肥发酵效果最好,发酵所用周期较短,腐熟最完全,添加其余菌种的理化性质侧重点各不相同。

腐殖酸在改良土壤、提高土壤肥力和环保等方面具有广泛的用途。腐殖酸是经过微生物降解产生的,是一种天然的有机大分子化合物的混合物,其结构复杂且含多种功能基团,因此具有吸附、络合属性,也具有氧化还原活性^[32]。腐殖酸能与环境中金属离子、有毒活性有机污染物等发生作用,从而

影响污染物质在地球环境中的降解、迁移和转化。腐殖酸是绿色化工中极具代表的产业之一,是地球碳循环的重要一环^[33]。腐殖酸来源于土壤,腐殖酸肥料是不可多得的绿色环保产品。前人研究发现,堆肥对腐殖酸的形有促进作用,有研究表明,在药渣堆肥中腐殖酸的变化规律是先下降后升^[34],本试验中 T2 处理腐殖质含量呈先下降后上升的趋势,T1 处理的腐殖质含量总体呈先上升后下降的趋势。堆肥结束时 T2 处理、T3 处理、CK 的腐殖质含量均增加。添加枯草芽孢杆菌的处理不利于腐殖质的形成,添加 EM 菌和康宁木霉的处理能促进堆肥中腐殖质的形成,增加其稳定性及活性,增大其内在价值。

本研究认为,添加枯草芽孢杆菌、康宁木霉、EM 菌能明显促进园林植物废弃物的堆制进程,在堆制 3 d 时堆体温度就达到最高值。堆制结束时,4 个处理的堆体 pH 值上升至 8.2 ~ 8.4,EC 值上升至 2.10 ~ 2.40 mS/cm;这些理化指标都

达到了花卉对栽培基质和农业应用要求的范围^[18-19]。堆制结束后,4个处理的堆体C/N下降了63%~79%;硝态氮、氨态氮含量均增加。以当年收获的瓜叶菊种子为材料,播种后第5天统计发芽指数,结果显示,在堆制当天的CK和T1处理发芽指数为0;堆制45 d的T1、T2、T3处理发芽指数都达到了83%以上,CK仅61.11%;堆制70 d时CK的发酵基本完成,种子发芽指数为84.03%,T1、T2、T3处理的发芽指数均超过了95%,其中T3处理的最高,为100%。

参考文献:

- [1] 吕子文,顾兵,方海兰,等. 绿化植物废弃物和污泥的堆肥特性研究[J]. 中国土壤与肥料,2010(1):57-64.
- [2] 李森,罗雪梅,涂卫国,等. 保氮剂对水葫芦堆肥进程及氮素损失的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(4):1197-1203.
- [3] 余群,董红敏,张肇鲲. 国内外堆肥技术研究进展(综述)[J]. 安徽农业大学学报,2003,30(1):109-112.
- [4] 时红蕾,王晓昌,李倩,等. 四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响[J]. 环境科学,2018,39(6):2810-2818.
- [5] 蔡琳琳,李素艳,龚小强,等. 好氧堆肥-蚯蚓堆肥结合法处理绿化废弃物与牛粪[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(2):261-267.
- [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.
- [7] 徐玉坤,孙向阳,栾亚宁,等. 园林废弃物堆肥红外光谱特性分析[J]. 土壤通报,2014,45(5):1071-1076.
- [8] Fang M, Wong J W C. Changes in thermophilic bacteria population and diversity during composting of coal fly ash and sewage sludge[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2000, 124(3/4):333-343.
- [9] 谭显东,王向东,杨平,等. 康宁木霉固态发酵中药渣制备蛋白饲料[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40(4):71-76.
- [10] 李国学,黄懿梅,姜华. 不同堆肥材料及引入外源微生物对高温堆肥腐熟度影响的研究[J]. 应用与环境生物学报,1999,5(增刊1):139-142.
- [11] 住房和城乡建设部给排水产品标准化技术委员会. 城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质:GB/T 23486—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [13] 候月卿,赵立欣,孟海波,等. 生物炭和腐殖酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. 农业工程学报,2014,30(11):205-215.
- [14] 时红蕾,王晓昌,李倩. 四环素对人粪便好氧堆肥过程中酶活性及腐熟的影响[J]. 环境化学,2018,37(2):209-215.
- [15] 李文玉,栾亚宁,孙向阳,等. 接种外源微生物菌剂对园林废弃物堆肥腐熟的影响[J]. 生态学杂志,2014,33(10):2670-2677.
- [16] Eklin Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. I: carbon turnover

- [J]. Bioresource Technology, 2000, 74(2):115-124.
- [17] 北京市园林绿化局. 花卉栽培基质:DB11/T 770—2010[S]. 北京:北京市质量技术监督局,2010.
- [18] Aulinas - Maso M, Bonmati - Blasi A. Evaluation of composting as a strategy for managing organic wastes from a municipal market in Nicaragua[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(11):5120-5124.
- [19] 胡亚利,孙向阳,龚小强,等. 混合改良剂改善园林废弃物堆肥基质品质提高育苗效果[J]. 农业工程学报,2014,30(18):198-204.
- [20] 刘方春,马海林,马丙尧,等. 菇渣用作无纺布容器育苗成型机配套基质的研究[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(5):477-481.
- [21] 任连海,何亮,宁娜,等. 餐厨垃圾高效好氧堆肥过程参数的影响因素研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版),2010,28(5):40-44.
- [22] 魏平,滚双宝,张强龙,等. 不同菌种对猪用发酵床的应用效果[J]. 甘肃农业大学学报,2015,50(6):18-24.
- [23] 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.
- [24] 王帅,王楠,窦森,等. 真菌及混合菌对锯木屑类腐殖质形成和转化的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(1):227-231.
- [25] 魏自民,王世平,席北斗,等. 生活垃圾堆肥过程中腐殖质及有机态氮组分的变化[J]. 环境科学学报,2007,27(2):235-240.
- [26] 黄光群,黄晶,张阳,等. 沼渣好氧堆肥种子发芽指数快速预测可行性分析[J]. 农业机械学报,2016,47(5):177-182.
- [27] Gu W J, Zhang F B, Xu P Z, et al. Effects of sulphur and *Thiobacillus thioiparus* on cow manure aerobic composting[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(11):6529-6535.
- [28] 孙佳,郭江帆,魏朔南. 植物种子萌发抑制物研究概述[J]. 种子,2012,31(4):57-61.
- [29] 严兴,侯毛宇,李碧清,等. 微生物发酵菌和生物质炭及蘑菇渣对污泥堆肥效果的影响[J]. 环境科学研究,2018,31(1):136-142.
- [30] 田鹤,罗学刚,王亚超. 不同浓度史氏芽孢杆菌对屠宰废弃物高温快速堆肥效果的影响[J]. 中国农学通报,2018,34(1):98-102.
- [31] 王守红,徐荣,朱凌云,等. 不同菌种组合对发酵残余物好氧堆肥进程及氮素变化的影响[J]. 环境工程学报,2017,11(12):6429-6436.
- [32] Hori M, Shozugawa K, Matsuo M. Reduction process of Cr(VI) by Fe(II) and humic acid analyzed using high time resolution XAFS analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 285(3):140-147.
- [33] 李杰颖. 腐殖酸在农业生态环境中的重要性[J]. 环境保护与循环经济,2013,33(10):51-53.
- [34] 陈迪,赵洪颜,葛长明,等. 中药渣堆肥化过程中腐殖酸的动态变化研究[J]. 延边大学农学学报,2015,37(4):292-295.