植物营养与肥料学报 2012,18(4):990-998
Plant Nutrition and Fertilizer Science

调节 C/N 及添加菌剂与木醋液对园林绿化废弃物堆肥效果的影响

张 强[1], 孙向阳[1*], 任忠秀[1], 张 骅[1], 郝利峰[1], 魏 莎[2]
(1 北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2 中国农业大学资源与环境学院,北京 100094)

摘要: 为探究 C/N、菌剂、木醋液三因子及菌剂与木醋液交互作用对堆肥腐熟效果的影响,寻求最佳堆肥效果的因子水平组合。本研究以园林绿化废弃物为主要原料,通过 $L_9(3^4)$ 正交设计,以鸡粪为 C/N 调理剂,菌剂和木醋液为添加剂进行堆肥试验,分析比较了各处理堆肥过程中温度、总有机碳、全氮、C/N、pH 值、EC 值、堆体体积等指标的变化情况,并以种子发芽率试验测定堆肥效果。结果表明,调节 C/N 比和添加适量菌剂与木醋液均能促使堆肥初温上升,高温期提前并延长,堆肥积温提高,发酵周期缩短,总有机碳降解量和总氮相对含量增加。适当调节 C/N 和添加适量菌剂均有利于堆肥 pH 值升高,防止 EC 值过高,而添加木醋液能明显降低堆肥 pH 与 EC 值。C/N、菌剂、木醋液、菌剂与木醋液交互作用对堆肥发芽指数的影响均达极显著水平,且影响效果表现为 C/N > 菌剂 > 木醋液。因素效应的差异显著性检验结果表明,C/N 为 30 效果最好,0.4% 菌剂与稀释 500 倍木醋液的交互作用最大,稀释 50 倍的木醋液对堆肥微生物活性存在一定的抑制作用。可见,基于种子发芽指数的园林绿化废弃物堆肥适宜参数组合为 C/N 30 + 0.4% 菌剂 + 稀释 500 倍木醋液。

关键词: 园林绿化废弃物堆肥; 碳氮比; 菌剂; 木醋液; 交互作用; 种子发芽指数
中图分类号: X705; S141.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)04-0990-09

Effects of regulating of C/N ratio and adding different concentrations of microbe fungus and wood vinegar on composting of landscaping waste

ZHANG Qiang[1], SUN Xiang-yang[1*], REN Zhong-xiu[1], ZHANG Hua[1], HAO Li-feng[1], WEI Sha[2]
(*1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;*
2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: In this study, to explore the effects of regulating of C/N ratio and adding different concentrations of microbe fungus and wood vinegar on composting of landscaping wastes, a compost test with all orthogonal experimental designed $L_9(3^4)$ was conducted. Based on the germination experiment, the impacts of C/N, wood vinegar, microbe fungus and the interaction of wood vinegar and microbe fungus on maturity of the compost were studied to get the optimum conditions of factor lever for composting. The variation trends in temperature, pH, EC, TOC, TN, C/N ratio and volume during composting of different composts were analyzed and compared. The results show that the proper adjustment of C/N ratio and addition of appropriate amounts of wood vinegar and microbe fungus are beneficial to raise the initial temperature, which can advance and prolong the period of high temperature, increase the accumulated temperature, shorten the composting period, degrade the total organic carbon and accumulate the total N. The proper adjustment of C/N ratio combined with adding the appropriate amount of microbe fungus is helpful to increase pH value and to prevent the high EC value, while the addition of

收稿日期: 2011-10-25　　**接受日期:** 2012-04-19
基金项目: 北京市科技计划课题(重大)工艺应用"北京市园林绿化废弃物资源再利用生产花木基质关键技术研究及示范"(D09040903780801);北京市教育委员会共建项目专项资助。
作者简介: 张强(1985—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事园林绿化废弃物再利用研究。E-mail: zq0093@163.com
*通讯作者 E-mail: sunxy@bjfu.edu.cn

wood vinegar could reduce pH value and EC value of composting products effectively. C/N, microbe fungus, wood vinegar and the interaction between microbe fungus and wood vinegar have very significant effects on germination index ($P < 0.01$) respectively. The effects of the three factors on the composting are in the order of C/N > microbe fungus > wood vinegar. Multiple comparison of factor effects show that the optimum C/N ratio for the green waste composting is 30, and the interaction between 0.4% microbe fungus and 500 fold wood vinegar dilute solution is the best. A continuous restraint on the microbial activity could happen when spraying 50 fold wood vinegar dilute solution on the green waste compost. The optimal parameters on composting of the landscaping waste for germination index are C/N 30 + 0.4% microbe fungus content + 500 fold wood vinegar dilute solution.

Key words: landscaping waste compost; C/N ratio; microbe fungus; wood vinegar; interaction; germination index

随着国民经济的发展和生态城市的建设，园林绿化废弃物的数量日益增加。长期以来，大量的园林绿化废弃物作为燃料烧掉或被填埋废弃，其经济利用价值低，而园林绿化废弃物含有大量的木质纤维素和有机成分，作为燃料燃烧或简单的填埋处理不能适应可持续发展的要求，堆肥化处理成为一种必然趋势[1]。利用以枯枝、落叶等为主的园林绿化废弃物为骨料与粪渣进行共堆肥，既能增加孔隙率与透气性，实现全过程好氧堆肥，最终达到园内废物“零”排放和资源化利用的目的，又减少了市政绿化的化肥施用量。国内有关堆肥的研究多数集中于不同 C/N 的调节与不同菌剂添加量的单一因素或两因素对堆肥影响的研究[2-4]，有关木醋液作为堆肥发酵促进剂的研究，特别是不同浓度木醋液对堆肥的影响研究甚少。有研究表明，用作土壤添加剂的高浓度木醋液对土壤微生物的数量有一定的抑制作用，适当浓度时对土壤微生物的繁殖具有促进作用[5]；且在堆肥中，邹德乙等发现 500 倍木醋液稀释液对草炭发酵有明显的促进作用[6]。基于以上研究结果，本研究在不同 C/N 与菌剂添加量的基础上，采用稀释950 倍、500 倍、50 倍的木醋液设计了 $L_9(3^4)$ 正交堆肥试验，旨在探究 C/N、菌剂添加量、木醋液添加量三因素，及菌剂与木醋液交互作用对堆肥腐熟度的影响效果，找出适合园林绿化废弃物堆肥的最佳参数配比，为促进园林绿化废弃物的资源化利用提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

园林绿化废弃物堆肥试验于 2011 年 4 ～ 6 月在北京市香山公园堆肥厂进行，在北京林业大学水土保持重点实验室进行堆肥理化性质分析。以北京市香山公园秋季修剪的植物枯枝、败叶为主要原料，鸡粪为调理剂，主要堆肥原料的基本理化性质见表 1。所用菌剂为速腐宝有机物料腐熟菌剂，该菌剂是一种高效复合型微生物菌剂，主要成分为蛋白质、脂肪、纤维素、几丁质等，具有很强的分解能力和较快的分解速度，适用于多种不同底物的堆肥快速腐熟。所用木醋液为烧制木炭过程中木材热解所形成的淡黄色至红褐色冷凝回收液，具有特殊的烟熏气味，呈酸性，pH 值 3.4，EC 值 1400 μs/cm。

1.2　试验设计

采用 C/N、菌剂添加量、木醋液稀释倍数 3 因子及菌剂与木醋液交互作用的 $L_9(3^4)$ 正交设计（表 2）。按照试验设计要求，根据园林绿化废弃物与鸡粪的重量比调节 C/N，添加菌剂后混匀，然后再加入

表 1　主要堆肥原料的基本理化性质

Table 1　Basic physicochemical properties of main composting materials

原料 Raw material	全氮（%） Total nitrogen	总有机碳（%） Total organic carbon	C/N	水分（%） Moisture content
园林绿化废弃物 Landscaping waste	0.8	46	57.5	10
鸡粪 Chicken manure	1.1	9.5	8.6	2.2

表2 $L_9(3^4)$正交试验设计

Table 2 Orthogonal experimental design $L_9(3^4)$

处理 Treatment	因子 Factor			
	菌剂 Microbe fungus	木酢液 Wood vinegar	菌剂×木酢液 Microbe fungus × Wood vinegar	C/N
C/N20 + W/950	1 (0)	1 (稀释950倍 950 times dilution)	1	1 (20)
C/N30 + W/500	1 (0)	2 (稀释500倍 500 times dilution)	2	2 (30)
C/N40 + W/50	1 (0)	3 (稀释50倍 50 times dilution)	3	3 (40)
C/N40 + 0.2% M + W/950	2 (0.2%)	1 (稀释950倍 950 times dilution)	2	3 (40)
C/N20 + 0.2% M + W/500	2 (0.2%)	2 (稀释500倍 500 times dilution)	3	1 (20)
C/N30 + 0.2% M + W/50	2 (0.2%)	3 (稀释50倍 50 times dilution)	1	2 (30)
C/N30 + 0.4% M + W/950	3 (0.4%)	1 (稀释950倍 950 times dilution)	3	2 (30)
C/N40 + 0.4% M + W/500	3 (0.4%)	2 (稀释500倍 500 times dilution)	1	3 (40)
C/N20 + 0.4% M + W/50	3 (0.4%)	3 (稀释50倍 50 times dilution)	2	1 (20)

等体积的稀释950倍、500倍、50倍木酢液,边喷边搅拌,使堆料水分含量达65%左右,这样既达到含水量要求,又有利于木酢液混拌均匀,还节省人工,最后分别堆制成长约2 m、宽1.5 m、高1 m的堆体。

1.3 试验管理及取样

根据温度变化,堆肥开始后前2周,每3 d翻1次堆,以后每周翻堆1次,保证堆温不超过70℃。每天在9:00和16:00分别记录堆体多点温度,并以其算术平均值描述堆体温度的变化。堆肥周期为75 d,其中在堆肥过程中每5 d采样一次,共16次,采样方式为五点采样法,即在中心及四角部位采集样品共约500 g,采样点为堆体表面以下20～30 cm处。将采集的新鲜样品放于室内风干后部分用于pH、EC和种子发芽指数(germination index, GI)的测定,其余粉碎后过0.25 mm筛,用于总有机碳(TOC)和全氮(TN)的测定。

1.4 测定方法

TOC和TN的测定采用有机肥料行业标准(NY525－2002)中规定的方法,随后求出C/N。

将样水比按1∶10(W∶V)混合,震荡30 min后,离心过滤,使用PHS－25型数显pH计测定pH,DDS－307型电导率仪测定EC。

按样水比1∶10(W∶V)混合振荡2 h后离心,上清液经滤纸过滤后待测种子发芽率。将一张滤纸置于干净无菌的9 cm培养皿中,在滤纸上均匀摆放20粒小白菜种子,吸取5 mL浸提液的滤液于培养皿中,在25℃恒温箱中培养48 h,计算发芽率并测定根长,然后计算种子的GI。每个样品做3个重复,并同时用去离子水作空白对照。GI计算公式如下:

$$GI = \frac{\text{样品发芽率} \times \text{样品根长度}}{\text{对照发芽数} \times \text{对照根长数}}$$

1.5 数据处理方法

采用SPSS软件对试验数据进行方差分析、多重比较(LSD法);采用Microsoft Office Excel 2003进行数据处理和图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同处理堆肥过程中温度的变化

温度是影响微生物生长与繁殖的最显著因子,也是堆肥过程控制中的最重要物理参数之一。高温可杀死病原菌,且在适当的温度范围内有机质降解最快,因此,堆体温度的高低决定堆肥速度的快慢。工程上要求堆肥温度控制在微生物活性的最佳范围,即50～65℃[7]。

从图1中可以看出,C/N20 + W/950、C/N30 + W/500、C/N40 + W/50、C/N40 + 0.2% M + W/950、C/N20 + 0.2% M + W/500、C/N30 + 0.2% M + W/50、C/N30 + 0.4% M + W/950、C/N40 + 0.4% M + W/500、C/N20 + 0.4% M + W/50 9个处理堆肥的温度变化趋势基本一致,整个周期经历了迅速升温阶段、高温阶段和后熟降温阶段。在迅速升温阶段,9个处理堆肥的温度依次在第5、4、7、

5、3、3、3、4、3 d 升至 50℃以上，可见，C/N40 + W/50 处理的堆肥升温最慢，这说明 C/N 越高升温越慢，适量添加菌剂与木醋液能促进堆肥初温上升。迅速增温阶段后进入高温阶段，试验温度维持在 50～65℃，9 个处理堆肥的高温期维持在 15～37 d 范围内，差异较大。9 个处理堆肥温度保持在 50℃以上的时间依次为 15、30、23、31、26、24、34、37、20 d，保持在 60℃以上的时间依次为 0、8、0、11、8、6、11、13、3 d，这说明 C/N 越高，高温期越持久，适量添加菌剂与木醋液能提前并延长高温期。

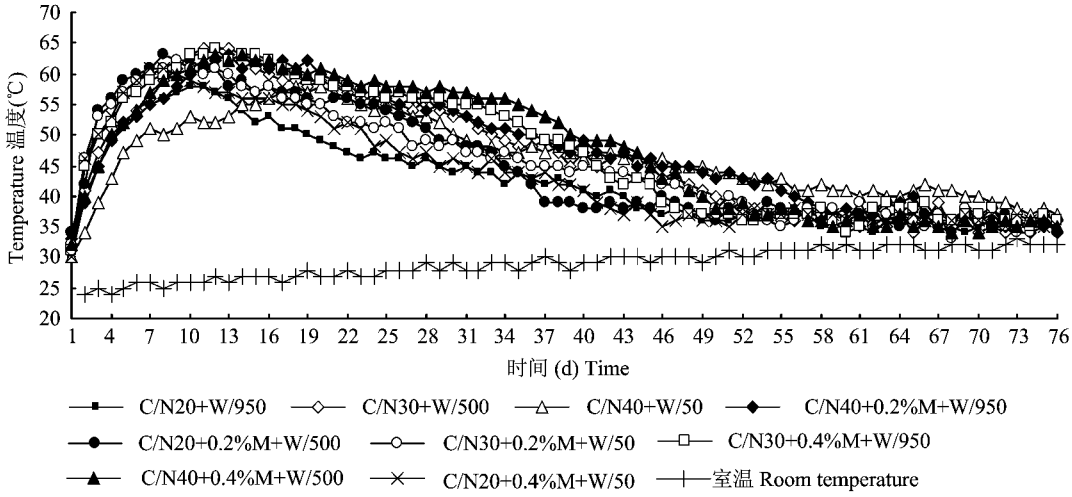

图 1　不同处理堆肥过程中温度的变化

Fig. 1　Dynamics of temperature during the composting in different treatments

有研究表明，积温可以作为堆肥过程中兼顾温度强度和保持时间的重要参数，与堆肥化进程及堆肥的腐熟度有关[8]。由图 2 可知，C/N40 + 0.4% M + W/500 处理堆肥的积温最大，C/N20 + W/950 处理堆肥的积温最小。可见，C/N 比越高堆肥积温越高，添加适量菌剂与木醋液能提高堆肥积温。在后熟降温阶段各处理堆肥温度逐渐降低，9 个处理堆肥的温度依次从第44、50、70、58、36、50、46、50、41 d 开始降至室温，维持在 35～37℃范围内。可见，C/N 越高堆肥周期越长，添加适量菌剂与木醋液可缩短堆肥发酵周期。

单从温度变化及积温表现来看，C/N30 + W/500、C/N40 + 0.2% M + W/950、C/N30 + 0.4% M + W/950、C/N40 + 0.4% M + W/500 处理堆肥的发酵效果最好，整个堆肥发酵阶段高温保持时间较长、积温较高。而 C/N40 + W/50 和 C/N20 + 0.4% M + W/50 处理堆肥的积温最低，高温持续期最短，这可能与低 C/N 条件下有效碳源不足和高 C/N 条件下有效氮源不足及添加高浓度的木醋液抑制了微生物数量有关。添加适量菌剂与木醋液能提前并延长堆肥高温期，缩短堆肥发酵周期。其原因可能是，菌剂的添加增加了堆层中微生物总数，而适量木醋液的添加为微生物提供了饵食，使堆层中的微生物迅速繁殖，并维持在相对稳定的较高水平上[9]，这使得堆肥高温期提前到来。同时，一定量的微生物可以迅速分解堆料中的有机物，从而加快堆肥腐熟，大大缩短堆肥时间。

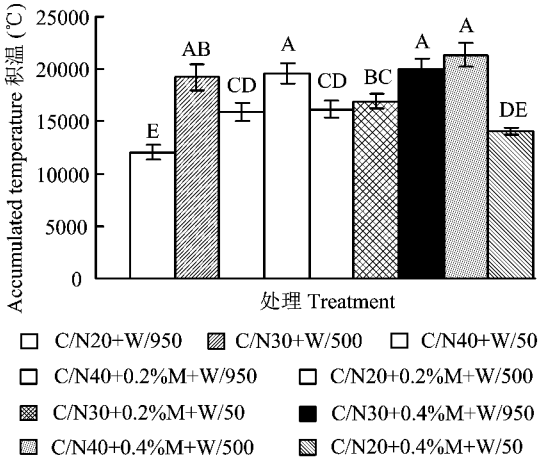

图 2　不同处理的堆肥积温

Fig. 2　Cumulative temperatures of composts with different treatments

[注(Note)：方柱上不同大写字母表示差异达 1% 显著水平 Different capital letters above the bars mean significant difference at the 1% level.]

2.2 不同处理堆肥过程中 TOC、TN 和 C/N 的变化

在整个堆肥过程中,碳作为堆料中各种微生物优先利用的能源物质,被微生物不断分解利用并以 CO_2 和 H_2O 的形式挥发,堆肥前期 TOC 含量迅速降低,随后缓慢减小并趋于平稳[10]。由图3A 可知,本试验各处理堆肥的 TOC 起始含量不同,9 个处理的堆肥在初始 10 d 内有机物的降解较剧烈,TOC 含量大幅度下降,随后 5 d,C/N30 + W/500、C/N40 + 0.2% M + W/950、C/N30 + 0.4% M + W/950、C/N40 +0.4% M + W/500 处理的堆肥由于高温期持续时间长,仍保持较高的有机碳降解速率,35 ~ 45 d 后各处理堆肥 TOC 含量逐渐趋于平衡,到堆肥结束时,9 个处理的堆肥 TOC 的降解率依次为 27.76%、40.74%、32.98%、44.12%、38.20%、39.68%、44.70%、46.32%、32.74%。可见,添加适量菌剂与木酢液的高 C/N 堆肥的碳物质损失量较多,这主要是 C/N 高有机物降解强烈,添加菌剂和木酢液使微生物活性加强的原因。

TN 相对含量的变化规律与 TOC 的变化规律不同,氮素转化主要包括氨化、硝化、反硝化、挥发和生物固氮等。氮素的变化对臭气的释放、养分的流

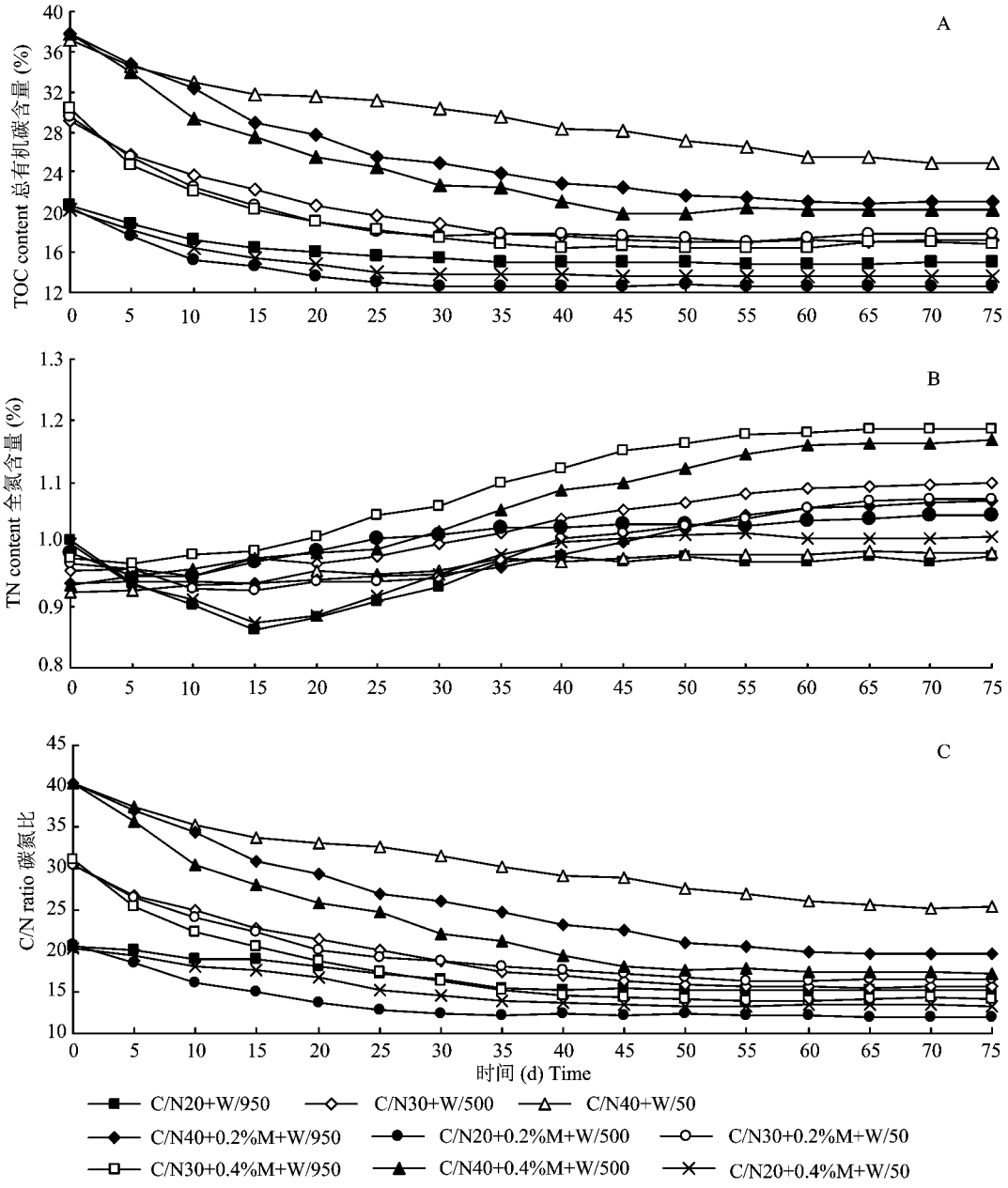

图3 不同处理堆肥过程中总有机碳、全氮和碳氮比的动态变化

Fig.3 Dynamics of total carbon (TOC), total nitrogen (TN) and C/N ratio during the composting in different treatments

失以及堆肥的腐熟有重要的影响。各处理堆肥的初始 C/N 不同，TN 含量的变化趋势不同（图 3B）。C/N20 + W/950处理和 C/N 20 + 0.4% M + W/50 处理堆肥的 TN 含量在初始 10 d 内较大幅度下降，随后随着堆肥的进行 TN 含量又逐渐回升，C/N30 + W/500、C/N40 + 0.2% M + W/950、C/N30 + 0.4% M + W/950、C/N40 + 0.4% M + W/500 处理堆肥的 TN 含量则在整个堆肥过程中呈现不断上升的趋势，C/N40 + W/50、C/N20 + 0.2% M + W/500、C/N30 + 0.2% M + W/50 处理的堆肥 TN 含量在整个堆肥过程中基本保持不变或呈小幅度上升趋势。原因可能是 C/N 20 + W/950 和 C/N 20 + 0.4% M + W/50 处理堆肥的 C/N 较低，碳源的不足限制了微生物对有机质的分解，大量富裕的氮素在堆肥初期随着温度、pH 值的升高而出现损失，随后随着碳物质的损失，氮被浓缩，TN 含量逐渐回升。而 C/N30 + 0.4% M + W/950 和 C/N40 + 0.4% M + W/500 处理的堆肥添加了适量菌剂与木醋液，这使得堆肥有机质降解强度大，碳物质损失多，对氮的浓缩作用较强，因此 TN 含量呈不断上升趋势。到堆肥结束，9 个处理堆肥的 TN 含量较堆肥初始依次增加了 - 2.63%、14.95%、6.99%、14.49%、5.96%、10.29%、21.17%、25.2%、1.38%（图 3B）。可见，C/N 的调节、适量菌剂与木醋液的添加有利于 TN 相对含量的增加。

一般认为，当 T（终点 C/N/初始 C/N）值小于 0.6 时，表示堆肥已达腐熟[11-13]。本试验堆肥腐熟过程中，9 个处理堆肥的 C/N 均呈下降趋势，这是因为在堆腐过程中碳的损失远大于氮的损失。从图 3C 可以看出，9 个处理堆肥的 C/N 下降幅度在前 10 d 较显著，这说明在堆肥初期，微生物代谢活动旺盛，有机物质分解剧烈。随后 C/N20 + W/950、C/N40 + W/50、C/N20 + 0.4% M + W/50 处理堆肥的 C/N 下降速度逐渐转为缓慢平稳，C/N30 + W/500、C/N40 + 0.2% M + W/950、C/N30 + 0.4% M + W/950、C/N40 + 0.4% M + W/500 处理堆肥的 C/N 仍保持急剧下降趋势，这是因为 C/N20 + W/950、C/N40 + W/50、C/N20 + 0.4% M + W/50 处理的堆肥高温期短，随着温度的降低，微生物活动减弱，有机质降解速率减慢，而 C/N30 + W/500、C/N40 + 0.2% M + W/950、C/N30 + 0.4% M + W/950、C/N40 + 0.4% M + W/500 处理的堆肥高温期持续时间长，微生物代谢活动旺盛，有机质降解率高，因此 C/N 保持急剧下降趋势的时间长。但各处理堆肥随着全碳含量变化趋于稳定，C/N 最终趋于平稳（图 3A、C）。到堆肥结束后，9 个处理堆肥的 T 值依次为 0.74、0.52、0.63、0.49、0.58、0.54、0.46、0.43、0.66，这表明除 C/N20 + W/950、C/N40 + W/50、C/N20 + 0.4% M + W/50 处理的堆肥未腐熟外，其余 6 个处理堆肥均已腐熟。

2.3　不同处理堆肥前后堆体体积、pH 及 EC 值的变化

随着堆肥的进行，堆料之间的空隙越来越小，堆体体积逐渐减小。到堆肥结束时 C/N 40 + 0.4% M + W/500 处理的堆肥体积较堆前缩小比例最大，C/N 20 + W/950 处理堆肥的变化最小。pH 值的大小不仅影响有机物质分解、矿物质的氧化还原及微生物活动强度，而且直接影响酶参与的生化反应速度，是评价堆肥腐熟程度的重要指标之一[14]。本次堆肥中各处理的 pH 值从堆制开始到结束均有所升高。pH 值的升高，是由于有机质在微生物的强烈作用下大量分解产生大量 NH_3 引起的。如表 3 所示，堆制前后各处理堆肥 pH 值的上升幅度不同，堆制前后 C/N40 + 0.2% M + W/950、C/N30 + 0.4% M + W/950 处理堆肥的 pH 变化最大，这是因为这两个处理堆肥的 C/N 较高，足够的碳源为微生物的生长和繁殖提供了必要的营养物质，有机质降解的程度较高，而外源菌剂的添加使得堆肥过程中有机质分解更加剧烈，挥发的部分 NH_3 充满堆体，使堆体 pH 不断升高。由表 3 可以看出：在堆肥 C/N 一定的条件下添加木醋液能降低堆肥 pH，这一现象可能是由于木醋液呈酸性，添加木醋液为堆肥提供了大量的 H^+，与 NH_3 反应形成 NH_4^+ 溶于水，使 pH 降低。可见合适的 C/N 调节和菌剂的添加均有利于堆肥 pH 的升高，而木醋液使堆肥产品 pH 降低。有机肥料标准规定的 pH 值为 5.5 ～ 8.0[15]，本次堆肥中各处理的 pH 未达到有机肥料标准。可见堆肥成品的使用还需要根据实际情况添加其它添加物，降低 pH。

EC 的大小与堆肥的含盐量有关，用作土壤调理剂的堆肥，其 EC 不宜过大，否则会影响作物的正常生长。由表 3 的数据分析发现，各处理堆肥成品的 EC 值较原材料的 EC 值均有所升高，且 C/N 越低的处理，EC 值越高，添加适量菌剂与木醋液的处理 EC 值偏低，这与郑瑞生[16]与田赟等[17]的研究结果一致。堆肥产品 EC 值的升高是由堆腐过程中堆体产生大量的铵离子和矿质盐分及堆体体积逐渐减小引起的[18-19]。而添加适量菌剂与木醋液的堆肥 EC 值偏低是由于菌种与木醋液的添加加速了对堆肥原

表3 不同处理堆肥前后堆体体积、pH及EC的变化

Table 3 Variations of volume, pH value and EC value of the composting at the start and the end of different treatments

处理 Treatment	体积 Volume			pH			EC		
	始 Start (m^3)	末 End (m^3)	减少 Decrease (%)	始 Start	末 End	增加 Increase (%)	始 Start (μS/cm)	末 End (μS/cm)	增加 Increase (%)
C/N20 + W/950	0.56	0.51	8.97	7.2	8.0	11.1	1152	2330	102
C/N30 + W/500	0.56	0.34	39.24	6.8	8.5	25.0	1090	1536	41
C/N40 + W/50	0.55	0.41	25.97	6.4	7.3	14.1	1031	1306	27
C/N40 + 0.2% M + W/950	0.56	0.31	44.87	6.5	8.6	32.3	1040	1214	17
C/N20 + 0.2% M + W/500	0.56	0.41	27.85	7.1	8.5	19.7	1129	1960	74
C/N30 + 0.2% M + W/50	0.54	0.38	30.26	6.7	8.3	23.9	1072	1451	35
C/N30 + 0.4% M + W/950	0.57	0.33	42.50	6.7	8.9	32.8	1103	1271	15
C/N40 + 0.4% M + W/500	0.57	0.29	50.00	6.4	8.2	28.1	1036	1116	8
C/N20 + 0.4% M + W/50	0.58	0.47	18.52	7.2	7.7	6.9	1147	2216	93

料的分解,生成较多腐殖质,从而降低EC值。可见,C/N的调节及适量菌剂与木醋液的添加能防止堆肥产品EC值过高,提高堆肥成品质量。

2.5 各处理堆肥的种子发芽指数(GI)

种子发芽指数(GI)被认为是评价堆肥腐熟度的最可靠指标之一。一般来讲,当GI>60%则可认为堆肥基本无毒性,当GI达到80%~85%时,这种堆肥就可以认为是对植物没有毒性[2]。

由方差分析(表4)可知,各处理重复间的GI差异不显著,处理间、C/N、菌剂、木醋液、菌剂与木醋液交互作用均为极显著,说明C/N、菌剂、木醋液、菌剂与木醋液交互作用都是影响GI的重要因素。由表5可以看出,C/N的极差最大,说明C/N对堆肥GI的影响最大,木醋液在三因素中的影响作用最小,这与堆肥中有机质的降解速率主要取决于C/N,而并非微生物种类或数量的多少有关[20-21]。堆肥处理间及各因素效应的多重比较结果(表5)表明,C/N为30处理效果最好,菌剂添加量为0.4%效果最好;稀释500倍木醋液效果最好,分别与其他水平差异显著。C/N为40、稀释50倍木醋液的效果反而差,这可能与高C/N条件下有效氮源不足抑制微生物活动,高浓度木醋液对微生物活性也有一定的抑制作用有关。*F*检验表明菌剂与木醋液的交互效应为极显著,0.4%菌剂与稀释500倍木醋液的互作值最大,与其他水平的互作值差异极显著;各菌剂添加量与稀释50倍木醋液的互作值均为负值,说明稀释50倍的木醋液对菌剂的效果存在一定的抑制作用。

本试验中,C/N30 + 0.4% M + W/950处理的堆肥的GI值比C/N40 + 0.4% M + W/500处理的大,且差异显著,这说明0.4%菌剂与稀释500倍木醋液的交互作用虽大,但C/N为30比C/N为40对堆肥GI的影响远大于0.4%菌剂与稀释500倍木醋液的互作效应对GI的影响效果。处理C/N20 + W/950、C/N40 + W/5、C/N20 + 0.4% M + W/50的GI最小且之间的差异不显著,均未达到对植物无毒害的标准,这说明C/N过高或过低都不利于堆肥腐熟度的提高,这可能与低C/N会使EC过高,过高的盐分抑制了种子的正常发芽,而高C/N使堆肥养分含量低有关。C/N20 + 0.2% M + W/500处理分别与C/N20 + W/950和C/N20 + 0.4% M + W/50处理的GI值差异均达极显著水平,这说明适量菌剂与木醋液的添加能有效提高堆肥腐熟度。因此,确定C/N、菌剂、木醋液三因素的最优组合为C/N30 + 0.4% M + W/500,即C/N30 + 0.4%菌剂 + 稀释500倍木醋液。

表 4　$L_9(3^4)$ 正交试验方差分析

Table 4　Variance analysis of orthogonal experimental designed $L_9(3^4)$

变异来源 Source of variation	*df*	*SS*	*MS*	*F*	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	极差 Range
处理间 Treatment	8	8858.21	1107.28	59.63**	2.59	3.89	
重复间 Repeat	2	78.59	39.29	2.12	3.23	6.23	
菌剂 Microbe fungus (M)	2	2551.20	1275.60	68.69**			23.63
木酢液 Wood vinegar(W)	2	2224.85	1112.42	59.90**			21.62
C/N	2	3629.71	1814.86	97.73**			28.24
菌剂×木酢液 M×W	4	452.45	113.11	6.09**	3.01	4.77	
误差 Error	16	297.12	18.57				
总计 Total	26	9233.92					

注(Note)：*—<5%；**—<1%

表 5　不同处理间及因素效应的差异显著性检验

Table 5　Multiple comparisons between different treatments and factor effects

处理间的多重比较 Multiple comparison of treatment				各因素多重比较 Multiple comparison of factor effect							
处理 Treatment	GI (%)	显著性 Significance		水平 Level	GI (%)	显著性 Significance		水平 Level	GI (%)	显著性 Significance	
C/N20+W/950	68.79	e	D	菌剂 Microbe fungus(M)				木酢液 Wood vinegar(W)			
C/N30+W/500	98.57	c	BC	1	79.19	c	C	1	94.85	b	A
C/N40+W/50	70.22	e	D	2	93.53	b	B	2	101.16	a	A
C/N40+0.2%M+W/950	89.85	d	C	3	102.82	a	A	3	79.54	c	B
C/N20+0.2%M+W/500	94.69	cd	C	C/N				菌剂与木酢液互作值 Interactive value of M and W			
C/N30+0.2%M+W/50	96.06	cd	BC								
C/N30+0.4%M+W/950	125.91	a	A	1	78.61	c	C	M_2W_2	6.28	b	B
C/N40+0.4%M+W/500	110.22	b	AB	2	106.85	a	A	M_2W_3	-22.13	d	D
C/N20+0.4%M+W/50	72.34	e	D	3	90.10	b	B	M_3W_2	44.04	a	A
								M_3W_3	-8.10	c	C

注(Note)：表中大、小写字母分别表示在 1% 和 5% 水平上差异显著 Different capital and small letters in the table indicate significant difference at the 1% and 5% levels, respectively.

3　结论

C/N 的调节，菌剂与木酢液的添加对堆肥发酵周期及堆温影响较大。C/N 低，有机质降解强度小，微生物分解速度快，温度上升迅速，高温期及堆肥周期短，积温低；C/N 高，有机质降解强度大，微生物分解速度缓慢，温度上升慢，高温期及堆肥周期长，积温高。适量添加菌剂与木酢液能促使堆肥初温上升，高温期提前并延长，积温提高，发酵堆肥周期缩短。

在合适的 C/N 范围内添加菌剂与木酢液，C/N 越大堆肥全碳的降解率越高，全氮相对含量越高，堆肥腐熟度越好。适当的 C/N 调节及适量菌剂的添加均能促使堆肥 pH 升高，防止 EC 值过高，而木酢液的添加使 pH 与 EC 值降低。

F 检验结果(表 4)表明，C/N、菌剂、木酢液、菌剂与木酢液交互作用对堆肥发芽指数的影响均达极显著水平，3 个因素对堆肥影响顺序为 C/N > 菌

剂 > 木醋液；因素效应的差异显著性检验结果(表5)表明，对堆肥效果而言，C/N 为 30 的效果最好，C/N 过高或过低的堆肥对植物的毒害作用较强，0.4%菌剂与稀释500倍的木醋液的交互作用最大，稀释50倍的木醋液对堆肥微生物活性存在一定的抑制作用，可见 C/N30 +0.4%菌剂 + 稀释500倍木醋液为堆肥最优组合。

参考文献：

[1] 苏贤明. 北京园林绿化废弃物资源化利用与选址布局研究[D]. 北京：北京林业大学硕士论文，2010.
Su X M. Research of resource utilization and sitting layout of Beijing landscaping residues [D]. Beijing: Ms thesis, Beijing Forestry University, 2010.

[2] 秦莉，沈玉君，李国学，郭瑞. 不同C/N比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. 农业环境科学学报，2009，28(12)：2668-2673.
Qin L, Shen Y J, Li G X, Guo R. The impact of composting with different C/N on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2009, 28(12): 2668-2673.

[3] 王川，何小莉. EM菌剂在牛粪堆肥中的应用[J]. 现代农业科技，2011，(6)：47-49.
Wang C, He X L. Application of EM microorganism on cow dung compost[J]. Mod. Agric. Sci. Technol., 2011, (6): 47-49.

[4] 郑卫聪，李胜华，丁少江，等. 不同处理措施对园林废弃物堆肥理化性状的影响[J]. 仲恺农业工程学院学报，2011，24(2)：32-36.
Zheng W C, Li S H, Ding S J *et al*. Effect of different treatment measures on physico-chemical properties of green wastes compost [J]. J. Zhongkai Univ. Agric. Technol., 2011, 24(2): 32-36.

[5] 杜相革，史咏竹. 木醋液及其主要成分对土壤微生物数量影响的研究[J]. 中国农学通报，2004，20(2)：59-62.
Du X G, Shi Y Z. Effects wood vinegar and its mainly component on quantity of soil microorganism[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2004, 20(2): 59-62.

[6] 邹德乙，马军，邹丹，等. 不同微生物发酵剂及木醋液在草炭发酵中应用效果研究[J]. 腐植酸，2005，(5)：11-15.
Zou D Y, Ma J. Zou D *et al*. Study on the effect of microbial ferments and wood vinegar in peat fermentation[J]. Hum. Acid, 2005, (5): 11-15.

[7] 席北斗，李英军，刘鸿亮，郭荣宗. 温度对生活垃圾堆肥效率的影响[J]. 环境工程学报，2005，6(7)：33-36.
Xi B D, Li Y J, Liu H L, Guo R Z. Effects of temperature on composting process of municipal solid waste [J]. Chin. J. Environ. Eng., 2005, 6(7): 33-36.

[8] 陈同斌，黄启飞，高定，等. 城市污泥好氧堆肥过程中积温规律的探讨[J]. 生态学报，2002，22(6)：911-915.
Chen T B, Huang Q F, Gao D *et al*. Accumulated temperature as an indicator to predict the stabilizing process in sewage sludge composting[J]. Acta Ecol. Sin., 2002, 22(6): 911-915.

[9] Fauci M F, Dick R P. Soil microbial dynamics: short and long-term effects of inorganic and organic nitrogen[J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 1944, 58: 801-806.

[10] Sharon Z N, Omer M, Jorge T *et al*. Dissolved organic carbon as a parameter of compost maturity [J]. Soil Biol. Biochem., 2005, 37: 2109-2116.

[11] Sweeten J M. Composting manure and sludge[A]. Proceedings of the national poultry waste management symposium [C]. Columbus: Ohio State University, 1998. 38-44.

[12] Chen Y, Inbar Y. Chemical and spectroscopical analyses of organic matter transformation during composting in relation to compost maturity[A]. Hoitink H A J, Keener H M (Eds.). Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects [M]. Worthington, Ohio: Renaissance Publications, 1993. 551-600.

[13] Hue N, Liu J. Predicting compost stability[J]. Compost Sci. Utiliz., 1995, 3(2): 8-18.

[14] 李艳霞，王敏健，王菊思. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标[J]. 环境科学，1999，20(2)：98-103.
Li Y X, Wang M J, Wang J S. The maturity indexes and standards of organic solid waste composting[J]. Environ. Sci., 1999, 20(2): 98-103.

[15] 陈祥，易吉林，包兵，胡艳燕. 园林植物废弃物堆肥的理化性状及参数研究[J]. 北方园艺，2010，(12)：225-228.
Chen X, Yi J L, Bao B, Hu Y Y. The physicochemical characteristics and technics on composting of the green waste[J]. North. Hortic., 2010, (12): 225-228.

[16] 郑瑞生，封辉，戴聪杰，李延. 碳氮比对堆肥过程 NH_3 挥发和腐熟度的影响[J]. 环境污染与防治，2009，31(9)：59-63.
Zheng R S, Feng H, Dai C J, Li Y. The influence of C/N ratio on NH_3 emission and compost maturity[J]. Environ. Poll. Control, 2009, 31(9): 59-63.

[17] 田赟，王海燕，孙向阳，等. 添加竹酢液和菌剂对园林废弃物堆肥理化性质的影响[J]. 农业工程学报，2010，26(8)：272-277.
Tian Y, Wang H Y, Sun X Y *et al*. Effects of bamboo vinegar and bacterial reagent addition on physico-chemical properties of green wastes compost [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2010, 26(8): 272-277.

[18] 江定钦，徐志平，阮琳. 园林垃圾堆肥化过程中理化性质的变化及堆肥对几种园林植物生长的影响[J]. 中国园林，2004，(8)：63-65.
Jiang D Q, Xu Z P, Ruan L. The physicochemical characteristics changes of green waste during its composting and the effect of compost on the growth of some trees[J]. Chin. Landsc. Arch., 2004, (8): 63-65.

[19] Smars S, Gustafsson L, Bech-Friis B *et al*. Improvement of the composting time for household waste during all initial low pH phase by mesophilic temperature control [J]. Bioresour Technol., 2002, 84(3): 237-241.

[20] Shinya H, Naoyuki F. Biodegradability of fecal nitrogen in composting process[J]. Bioresour. Technol., 2007, 98(17): 3412-3414.

[21] Jean-Marie P, Paul R, Melynda H *et al*. Predicting ammonia and nitrogen biodegradability during animal wast composting [J]. Atmos. Environ., 2005, 39(36): 6833-6842.