

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.040

# 木醋液对牛粪好氧堆肥理化特性与育苗效果的影响

徐超<sup>1,2</sup> 袁巧霞<sup>1,2</sup> 覃翠钠<sup>1,2</sup> 谢广荣<sup>1,2</sup> 何涛<sup>3</sup> 宋娜<sup>4</sup>(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;  
3. 武汉光谷蓝焰新能源股份有限公司, 武汉 430072; 4. 湖北海图园艺景观工程有限公司, 武汉 430070)

**摘要:** 传统的牛粪好氧堆肥作为育苗基质利用,其育苗效果差,加入调理剂是改善育苗效果的重要手段。为研究木醋液对牛粪好氧堆肥物料理化特性及育苗效果的影响,以牛粪、小麦秸秆为原料,木醋液添加量为0%、1%、3%、5%,在自主设计的小试堆肥反应器中进行好氧堆肥试验。选取黄瓜为指示植物,使用堆肥腐熟料进行育苗试验。结果表明:随着木醋液添加量的升高,堆肥物料的含水率、总氮含量、总磷含量、K<sup>+</sup>含量及有机质降解率呈现上升趋势,pH值、电导率呈现下降趋势;低浓度(添加量1%)木醋液可促进纤维素、半纤维素的降解,发芽指数最高,为79.17%,且1%木醋液处理组的壮苗指数最高,为0.0449g,显著高于其他3组( $P < 0.05$ )。

**关键词:** 畜禽粪便; 秸秆; 木醋液; 育苗基质

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0353-08

OSID: 

## Effect of Wood Vinegar on Physicochemical Properties and Seeding Capability of Cow Manure Aerobic Composting

XU Chao<sup>1,2</sup> YUAN Qiaoxia<sup>1,2</sup> QIN Cuina<sup>1,2</sup> XIE Guangrong<sup>1,2</sup> HE Tao<sup>3</sup> SONG Na<sup>4</sup>

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River,  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

3. Wuhan Optics Valley Bluefire New Energy Co., Ltd., Wuhan 430072, China

4. Hubei Haitu Horticultural Landscape Engineering Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Traditional aerobic composting of cow manure is not conducive to seedling raising, and adding conditioner is an important method to improve its capability of nursery. As a by-product of agricultural and forestry waste pyrolysis industry, wood vinegar was not been effectively used. In order to optimize the pretreatment process of cow manure aerobic compost for seedling substrate, cow dung and wheat straw were used as raw materials and wood vinegar as regulator, and adding 0, 1%, 3% and 5% of wood vinegar to the compost and putting the material into the small test reactor for fermentation. Based on the analysis of the composition of wood vinegar, its effect on the aerobic composting process was studied, and then the compost material was used for seedling test. The results showed that with the increase of the concentration, the content of water, TN, TP, K<sup>+</sup> and organic matter degradation rate showed an upward trend, however, the pH value and EC value showed a downward trend. The relative degradation rates of cellulose and hemicellulose can be enhanced by low concentration (1%) of wood vinegar. Cucumber was selected as the test crop, and the compost material was used as substrates for germination and seedling test. The germination index of the composting extracts of all groups were more than 50%, which basically reached the non-toxic requirement of plants. The highest germination index group was 1% wood vinegar group, which was 79.17%, and in the subsequent nursery test, the seedling index (0.0449g) of the 1% wood vinegar treatment group was significantly higher than that of the other groups ( $P < 0.05$ ). The results of this study can provide theoretical basis and reference for optimizing the pretreatment process of cow manure aerobic composting as seedling substrate.

**Key words:** livestock manure; straw; wood vinegar; seedling substrate

收稿日期: 2019-08-22 修回日期: 2019-09-24

基金项目: 湖北省重大科技创新计划项目(2019ACA153)和国家重点研发计划项目(2017YFD0800804)

作者简介: 徐超(1995—),男,博士生,主要从事农业废弃物资源化利用研究,E-mail: XC1119796177@126.com

通信作者: 袁巧霞(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事农业废弃物资源化利用技术与装备研究,E-mail: qxyuan@mail.hzau.edu.cn

## 0 引言

草炭是沼泽中死亡植物残体转化积累形成的产物,含有大量未被彻底分解的植物残体、腐殖质以及一部分矿物质,其通气透水性好,是理想的育苗基质。但草炭不可再生,大量开采对生态环境也造成了不可逆转的影响。将牛粪堆肥作为育苗基质是替代草炭、控制农业环境污染的重要方法<sup>[1]</sup>。相比于肥料利用,育苗基质对堆肥腐熟料的 pH 值和电导率具有更高的要求,优质基质的 pH 值为 5.5 ~ 7.5,电导率为 1 ~ 2.75 mS/cm<sup>[2]</sup>。牛粪作为育苗基质,其堆肥腐熟料具有较高的 pH 值和电导率,不利于幼苗的生长发育。研究表明<sup>[3-4]</sup>,堆肥的酸处理可有效降低堆体的 pH 值,促进微生物活动,加快堆肥前期有机酸的形成,进而促进堆肥腐熟。且较低 pH 值可抑制碱性有害气体 NH<sub>3</sub> 的挥发,在满足幼苗对偏酸性环境需求的同时,还能进一步保留基质育苗所需氮肥<sup>[5]</sup>。而堆肥酸处理面临的主要问题是育苗基质生产量大,所需酸量多,处理成本较高,因此迫切需要寻求一种传统酸的替代品。

木醋液是农林废弃物在高温热解过程中的挥发分经冷却液化分离得到的水相物质<sup>[6]</sup>,主要成分为乙酸,pH 值较低。木醋液作为农林废弃物热解工业的副产物,其产生量大,而其利用途径却没有得到有效开发。大量的木醋液积累已成为制约生物质热解行业的关键瓶颈。有研究表明<sup>[4,7]</sup>,木醋液可用于堆肥发酵、植物生长调节,能够改善土壤的通气性和透水性,可促进土壤中热量的扩散和气-水-养分的运移。木醋液不仅可以作为液体有机肥料,还可调节植物生长和提升品质<sup>[8-9]</sup>。基于这些情况,本文以木醋液为调节剂,探讨添加木醋液对牛粪-小麦秸秆好氧堆肥过程中理化性质的影响,并进行相应的育苗试验,对木醋液作为堆肥基质化利用调理剂的可行性做出评价,为提升堆肥效率、优化堆肥基质预处理工艺提供理论和试验基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

牛粪为肉牛粪便,取自湖北省随州市弘大畜牧有限责任公司;小麦秸秆于网上购买,风干后长度切为 3 cm 左右以便与牛粪混合,堆肥原料基本性质如表 1 所示。

木醋液由武汉光谷蓝焰新能源股份有限公司提供,热解原料为杨木和松木,热解温度约为 600℃,木醋液原液 pH 值为 2.53,电导率为 1.43 mS/cm,密度为 1.04 g/cm<sup>3</sup>,木醋液成分分析如表 2 所示。

表 1 原料基本理化性质

Tab. 1 Basic properties of raw materials

参数	数值	
	牛粪	小麦秸秆
含水率/%	52.87	6.36
总氮质量比/(mg·g <sup>-1</sup> )	16.99	8.70
总磷质量比/(mg·g <sup>-1</sup> )	0.54	0.58
K <sup>+</sup> 质量比/(mg·g <sup>-1</sup> )	27.84	27.23
纤维素质量分数/%	15.90	29.94
半纤维素质量分数/%	16.82	33.75
有机质质量分数/%	69.23	92.07
碳氮比	24	61

注:含水率为湿基,其他各项指标均为干基下计算所得。

表 2 木醋液成分分析

Tab. 2 Composition of wood vinegar

物质类型	种类数量	质量分数/%
酚类	19	50.97
酮类	16	15.03
脂类	12	9.00
酸类	9	4.23
烯炔类	8	4.00
醛类	5	3.95
醇类	4	3.26
烷烃类	3	1.24
其他	2	0.33

### 1.2 试验设备

堆肥试验在自主研发的小试强制通风堆肥反应器中进行,反应器外壁安装加热带,用温控器控制反应器加热温度,由空气泵向堆体自下往上输入空气,并通过时控器和流量计控制通风量,堆肥设备如图 1 所示。每个物料仓容积为 15.25 L,加热带功率为 800 W。

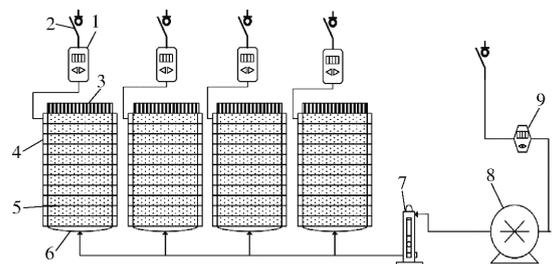


图 1 小试强制通风堆肥反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of forced ventilation compost reactor

1. 温控器 2. 电源开关 3. 有孔透气保温盖 4. 加热带 5. 堆肥物料 6. 膜片式曝气盘 7. 玻璃转子流量计 8. 空气泵 9. 时控器

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 小试堆肥反应器强制通风堆肥试验

将牛粪、小麦秸秆按照鲜质量比 4:1 的比例进行混合,参照文献<sup>[10]</sup>关于木醋液对土壤养分及育

苗效果影响的试验,设置木醋液添加量为0(对照)、1%、3%、5%。将堆体含水率调至 $(65 \pm 2)\%$ ,用温控器控制加热带温度,使得堆体环境温度为 $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。用玻璃转子流量计控制通风量,为保证好氧堆肥过程充足的氧气浓度,采用自下而上固定速率的强制性通风方式。考虑通风过程造成堆体热量损失较大,不利于堆体升温需求,故采用间歇式通风。针对小体积堆体,通风速率计算以生化需氧量为主。由于堆肥物料是复杂的混合物,堆体呈孔隙空间结构,以自由空域<sup>[11]</sup>表征堆体中气体体积占总体积百分比。计算原理为

$$\begin{cases} F = \left[ 1 - \frac{\delta_m S_m}{G_s \delta_w} - \frac{\delta_m (1 - S_m)}{\delta_w} \right] \times 100\% \\ \frac{1}{G_s} = \frac{V_s}{G_v} + \frac{1 - V_s}{G_f} \\ S_m = \frac{c}{\delta_m} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中  $F$ ——堆体的自由空域, %

$V_s$ ——堆肥物料可挥发部分质量分数,取 70%

$G_s$ ——堆体的相对密度

$G_v$ ——堆体可挥发部分的相对密度,取 1.0

$G_f$ ——堆肥物料灰分的相对密度,取 2.5

$S_m$ ——堆肥总固体质量分数, %

$\delta_m$ ——堆肥物料的单位体积湿质量,  $\text{g}/\text{cm}^3$

$\delta_w$ ——水的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$

$c$ ——堆肥物料的单位体积干质量,  $\text{g}/\text{cm}^3$

反应初始,气体充满孔隙空间,氧气体积分数为 21%,当反应进行一段时间,微生物消耗氧气使氧气体积占比减少。相关研究表明<sup>[12]</sup>,当氧气体积分数为 8%时,微生物活动受阻,有机质降解速率减小,可进行通风提升氧气浓度。若以葡萄糖表征堆肥底物,查阅相关资料,取好氧堆肥过程有机质降解速率为  $0.001 \text{ kg}/\text{h}$ <sup>[13]</sup>。则通风时间为 1 min,通风速率为  $0.25 \text{ m}^3/\text{min}$ ,间隔时间为 8 h。堆肥过程中每 2 d 取一次样,取样时在堆体不同位置取 3 次样,进行指标测定,直至堆肥温度稳定为止。

### 1.3.2 堆肥基质毒性及育苗试验

堆肥基质毒性采用发芽指数进行评价。种子发芽指数综合反映了堆肥的植物毒性,被认为是最敏感、最可靠的堆肥腐熟度评价指标。将堆肥基质按照质量比 1:10 与去离子水混合,搅拌振荡,静置过滤,取浸种后的黄瓜种子 20 粒放入垫有纱布的培养皿中,吸取 5 mL 浸提液均匀喷洒后将培养皿放置于  $25^\circ\text{C}$  恒温培养箱中进行培养,测定种子发芽率、根长,计算发芽指数。

黄瓜种子温汤浸种催芽后,放入烧杯,加入适量自来水浸泡,放入  $55^\circ\text{C}$  水浴锅恒温水浴 20 min。浸种后将种子表面洗净,放入底层垫有纱布的培养皿中,加入适量水使纱布保持湿润。将培养皿放入  $25^\circ\text{C}$  恒温培养箱中,每隔 12 h 对其补充适量水分,选取长势相近的种子进行育苗试验。将基质装于塑料穴盘中,每种处理播种 30 粒,播种后用水浇透基质,之后每天浇水一次,不额外施肥,自播种后育苗试验为 15 d。

### 1.4 测定方法与数据处理

(1) 含水率的测定<sup>[3]</sup>:取 10 g 左右的鲜样品在  $105^\circ\text{C}$  干燥箱中干燥 8 h 直至质量恒定。

(2) pH 值、电导率的测定<sup>[3]</sup>:采用 1:10 浸提法,称取风干样品 5 g,加 50 mL 去离子水,然后在摇床上振荡 30 min,用滤纸过滤得浸提液。用瑞士 METTLER TOLEDO 公司生产的 pH 计、上海雷磁 DDS-307A 型电导率计进行 pH 值、电导率的测定,使用前进行校准。

(3) 总氮、总磷、全钾含量的测定:参照文献<sup>[14]</sup>的消解方法,使用得到的消化液在法国 Alliance 公司 SmartChem 全自动间断化学分析仪中测定总氮、总磷含量,在日本津岛 AA-6880 型原子吸收分光光度计中测定全钾含量。

(4) 纤维素、半纤维素、木质素含量的测定:采用纤维素含量范氏测定法,称取 0.5 g 的干样放入纤维素样品袋,使用美国 ANKOM A2000i 型全自动纤维分析仪进行测定。

(5) 有机质含量的测定<sup>[15]</sup>:采用灼烧法进行有机质含量测定,称取 1 g 左右干燥样品在马弗炉  $600^\circ\text{C}$  下灼烧 2 h。

(6) 发芽指数测定:按照 GB/T 23486—2009<sup>[16]</sup>,根据种子发芽率、种子根长计算发芽指数,即

$$G = \frac{R_1 L_1}{R_2 L_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $G$ ——发芽指数, %

$R_1$ ——堆肥浸提液种子发芽率, %

$L_1$ ——堆肥浸提液种子根长, mm

$R_2$ ——蒸馏水种子发芽率, %

$L_2$ ——蒸馏水种子根长, mm

(7) 幼苗生长生理形态指标的测定<sup>[17]</sup>:根据幼苗的株高、茎粗、地上部干质量、地下部干质量等,算出壮苗指数,公式为

$$R = \left( \frac{S}{H} + \frac{M}{N} \right) (M + N) \quad (3)$$

式中  $R$ ——壮苗指数, g

$S$ ——茎粗, mm  
 $H$ ——株高, mm  
 $M$ ——根干质量, g  
 $N$ ——茎叶干质量, g

## 2 结果与分析

### 2.1 含水率

水分作为堆肥过程中各种有机物的溶剂,利于传质,且由于比热容较大<sup>[18]</sup>,有利于维持温度的稳定,是影响堆肥的一个非常重要的因素。试验初始各组含水率均在65%左右,随着发酵的进行,各试验组含水率均呈现下降趋势(图2),表明生化反应的产水量低于通风和蒸发所散失的水量。对照处理组和1%木醋液处理组变化趋势相似,前3 d的含水率下降幅度较大,约1.67%/d,后期降幅减小。主要是由于堆体前期孔隙度较大,物料与空气接触的蒸发面较大,通风较易带走水分,随着发酵的进行,堆体孔隙度逐渐减少,导致蒸发面减少,内部水分逸散通道封闭,水分散失较为困难;较高添加量(3%、5%)木醋液处理组含水率降幅一直较为稳定且偏低(0.27%/d)。整个堆肥过程中,含水率随着木醋液添加量的增加而升高,说明木醋液会增加堆肥的保水能力,可能是由于添加木醋液可增强堆肥物料对于水分的吸附力。整个试验过程各试验组的含水率均在55%以上,满足微生物活动需要的条件<sup>[3]</sup>。

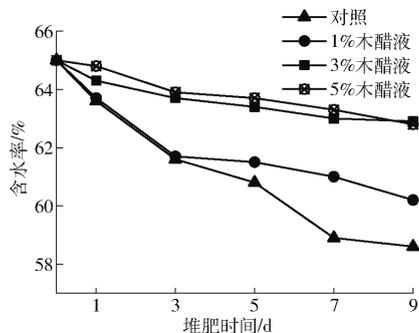


图2 堆肥过程中含水率变化曲线

Fig. 2 Water content during composting

### 2.2 pH值、电导率

各处理组堆肥pH值变化趋势均相似,前3 d均呈下降趋势,后期逐渐上升(图3)。前期pH值下降是由于堆肥局部供氧不足,厌氧发酵产生有机酸以及生成大量二氧化碳<sup>[19]</sup>。后期发酵产生的氨不断积累,微生物活动剧烈程度减弱,故pH值逐渐上升。在试验结束时,前3组的pH值均为8.5左右,5%木醋液处理组的pH值为8.33,表明高浓度木醋液可在一定程度上酸化堆体,有利于满足幼苗对于基质偏酸性环境的需求。而较低浓度(添加量3%以内)木醋液对堆体酸化效果不明显。这是由于木

醋液中起酸化作用的主要成分为乙酸,乙酸作为弱酸,其电离程度较低,若乙酸浓度过低,则电离出的 $H^+$ 不足以产生有效的酸化作用。整个发酵过程的pH值在7.9~8.5之间,变化幅度不大,均处于最适宜微生物生长的pH值范围内(6.5~8.5)。

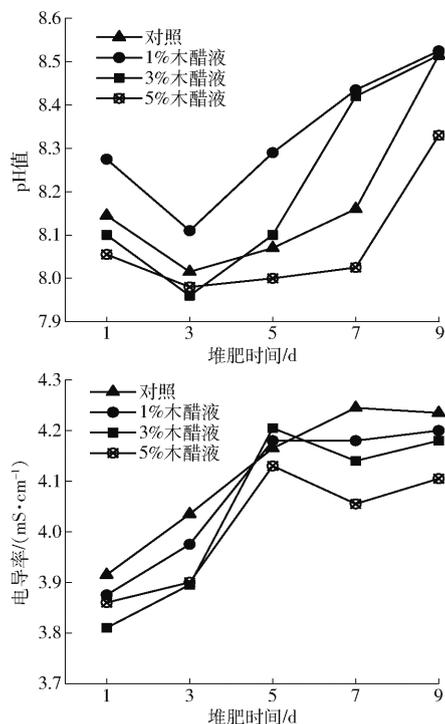


图3 堆肥过程中pH值、电导率变化曲线

Fig. 3 Changing of pH value and electronic conductivity during composting

电导率可反映育苗基质的可溶性盐含量,过高的可溶性盐含量是对作物产生毒害作用的重要因素之一,一般应以小于2.6 mS/cm为宜<sup>[20]</sup>。随着堆肥反应的进行,各处理组电导率在前5 d呈上升趋势,后期趋于稳定,增幅在0.4 mS/cm以内(图3)。前期电导率升高是因为堆肥初期发酵反应剧烈,微生物新陈代谢产生有机酸、氨气,有机酸的溶解作用及氨气以铵盐形式存在等使电导率上升<sup>[3]</sup>。随着堆肥高峰期的结束,有机质含量降低,微生物新陈代谢速度减缓,腐殖质、胡敏酸等物质含量升高,氨气挥发,电导率稍有降低并趋于稳定。而电导率的变化和铵根离子的变化趋势相似<sup>[21]</sup>,可推测铵根离子也是先增加后趋于平稳。在试验结束时,各处理组的电导率随着木醋液浓度的升高而降低,表明添加木醋液可不同程度上降低基质可溶性盐含量。木醋液本身含有部分有机酸,理论上作为外源导电离子引入,会增加物料的电导率,而电导率的减少证明了木醋液可有效促进腐殖质、胡敏酸等难溶性物质的生成。针对具有高电导率的牛粪好氧堆肥腐熟料基质,应在前期进行多次微喷灌溉<sup>[22]</sup>。本试验中各试验组均未超过9.0 mS/cm,理论上对种子发芽基本

无抑制作用<sup>[23]</sup>。

### 2.3 总氮、总磷、总钾含量

在降解植物残体的过程中,氮被认为是影响微生物生长及活性的限制因素<sup>[24]</sup>。各处理组总氮含量的变化趋势为“上升-下降-稳定”,如图4所示。前期总氮上升是微生物剧烈活动产生铵态氮和硝态氮累积所致,虽有部分铵态氮挥发损失,但微生物活动产生的氮素大于损失的氮素。到达峰值后,由于堆体温度较高,硝化细菌活动减弱,抑制了铵态氮向硝态氮的转化,而铵态氮挥发性较强,导致总氮含量

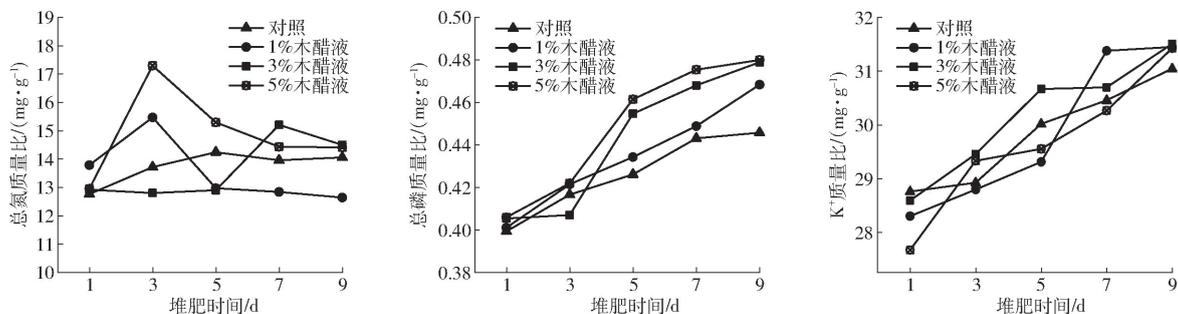


图4 堆肥过程中养分含量变化曲线

Fig. 4 Changing of nutrient content during composting

随着堆肥进行,各试验组总磷和K<sup>+</sup>含量均呈现逐渐上升的趋势,如图4所示。其原因是磷和钾在堆肥过程中虽有形态上的转换,但无挥发和淋洗损失,其总质量没有发生变化。而堆体在发酵过程中会有挥发性物质的损失,堆体总干物质含量会逐渐下降,故总磷和K<sup>+</sup>含量呈现逐渐上升的趋势。在堆肥结束时,总磷和K<sup>+</sup>的含量随着木醋液浓度的增加而增加,而木醋液本身不含磷和钾,表明添加木醋液可增加堆肥质量损失,有利于堆肥的减量化。

综上,较高浓度(添加量3%、5%)木醋液处理组可缩短堆肥周期,节省基质生产时间,且能够有效保留堆肥养分,降低育苗期施肥成本。

### 2.4 有机质含量

减量化是有机固体废弃物堆肥化的主要目的之一,堆肥的有机质降解率可以直观地反映堆肥过程中微生物的活性和废弃物的减量化效果<sup>[25]</sup>。堆肥前3 d,各试验组的有机质迅速降解,降解率最高为5%木醋液处理组(3.73%),最低为对照处理(1.09%),前者降解速率约为后者的3.4倍,后期有机质降解速率趋于平缓(图5)。在整个发酵过程中,各试验组有机质降解率随着木醋液浓度的升高而降低,且5%木醋液处理组5 d时趋于平稳,表明添加木醋液有利于加快堆肥腐熟进程,与上述各指标观测的结果一致。在堆肥结束时,有机质降解率最高为5%处理组(4.84%),最低为对照处理组

下降。后期进入稳定阶段表明产生的氮素和损失的氮素达到了平衡。试验结束时,3%、5%木醋液处理组总氮质量比最高且较为接近(14.5 mg/g),不仅是由于木醋液可减少堆体氮损失,也是由于木醋液本身含有氮素,引入木醋液向堆体加入了外源氮。各处理组到达峰值的时间不一致,1%、5%木醋液处理组到达峰值的时间最早(3 d),而对照处理组未达峰值,推测其峰值出现在9 d之后。这说明添加木醋液不仅能减少堆体氮损失,还可加快堆肥腐熟进程,缩短堆肥周期。

(3.29%),说明添加木醋液不仅可以加快腐熟的进程,还能一定程度上加深腐熟的深度,使堆肥腐熟进行得更彻底。有机质含量与总磷、K<sup>+</sup>含量呈负相关,共同表明木醋液可有效提升堆肥的减量化效果。

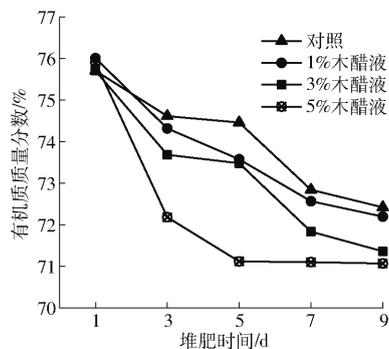


图5 堆肥过程中有机质含量变化曲线

Fig. 5 Changing of organic matter content during composting

### 2.5 纤维素、半纤维素、木质素含量

由于微生物的降解作用<sup>[26]</sup>,各组堆肥前后纤维素和半纤维素含量均呈下降趋势(图6),且降解规律一致,降解率从大到小依次为1%木醋液处理组、对照处理组、3%木醋液处理组、5%木醋液处理组。各组纤维素的相对降解率明显高于半纤维素的相对降解率,说明纤维素是发酵过程中微生物活动的首选碳源。由于木质素在发酵过程中降解率极低,其绝对含量变化不大,而发酵后堆体总质量减少,故木质素的相对含量增加。堆肥的纤维素降解率越高,木质素的相对含量增加率越低。

堆肥有机质的主要组成成分为纤维素、半纤维素、木质素及腐殖质等其他有机物质。纤维素、半纤维素的降解规律和有机质降解规律不一致,说明高浓度(添加量3%、5%)木醋液无法加快纤维素、半纤维素的降解,但可以加快腐殖质等其他有机质的

降解。而低浓度(添加量1%)木醋液可加快纤维素等降解,表明低浓度木醋液可促进纤维素降解菌活动,高浓度则表现出抑制作用。纤维素、半纤维素有利于生物质成型,提升成型基质的抗破坏能力,因此添加木醋液有助于提高牛粪堆肥基质块成型强度。

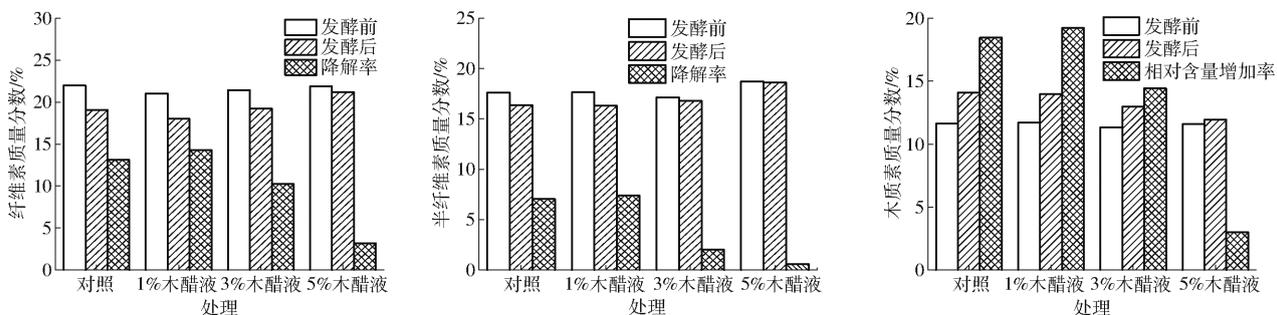


图6 堆肥前后纤维素、半纤维素、木质素含量

Fig. 6 Changing of contents of cellulose, hemicellulose and lignin before and after composting

## 2.6 堆肥基质毒性及育苗试验

堆肥浸提液的发芽指数如表3所示。发芽指数可作为对堆肥毒性的评价指标<sup>[27]</sup>,种子发芽指数越高,则表示生物毒性越小。若发芽指数大于50%,则可认为堆肥基本无毒,当发芽指数达到80%以上时,可认为对植物没有毒性<sup>[28-29]</sup>。各试验组浸提液种子发芽率均为35%,显著低于去离子水培养组的发芽率( $P < 0.05$ )。对照处理组、1%木醋液处理组、3%木醋液处理组的根长显著高于去离子组,主要是由于浸提液中含有少量养分,加快种子根部发育。各组发芽指数均高于50%,说明均已基本无毒。1%木醋液处理组的发芽指数达79.17%,接近80%,显著高于5%木醋液处理组( $P < 0.05$ )。

表3 堆肥浸提液发芽指数

Tab. 3 Germination index of composting extract

处理	发芽率/%	根长/mm	发芽指数/%
水	60.00 <sup>a</sup>	14 <sup>b</sup>	
对照	35.00 <sup>b</sup>	18 <sup>a</sup>	75.00 <sup>a</sup>
1%木醋液	35.00 <sup>b</sup>	19 <sup>a</sup>	79.17 <sup>a</sup>
3%木醋液	35.00 <sup>b</sup>	18 <sup>a</sup>	75.00 <sup>a</sup>
5%木醋液	35.00 <sup>b</sup>	16 <sup>ab</sup>	66.67 <sup>b</sup>

注:不同小写字母表示在LSD法多重比较下差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

表5 不同处理下幼苗生长生理形态指标

Tab. 5 Physiological and morphological indexes of seedling growth under different treatments

处理	株高/mm	茎粗/mm	根长/mm	地上部	地下部	地上部	地下部	壮苗指数/g
				鲜质量/g	鲜质量/g	干质量/g	干质量/g	
对照	43.65 <sup>c</sup>	2.11 <sup>c</sup>	180.49 <sup>b</sup>	0.564 <sup>c</sup>	0.116 <sup>b</sup>	0.052 <sup>a</sup>	0.024 <sup>a</sup>	0.0402 <sup>b</sup>
1%木醋液	49.23 <sup>b</sup>	2.16 <sup>b</sup>	260.98 <sup>a</sup>	0.677 <sup>a</sup>	0.137 <sup>b</sup>	0.050 <sup>ab</sup>	0.027 <sup>a</sup>	0.0449 <sup>a</sup>
3%木醋液	54.41 <sup>a</sup>	2.20 <sup>b</sup>	195.87 <sup>b</sup>	0.630 <sup>ab</sup>	0.197 <sup>a</sup>	0.050 <sup>ab</sup>	0.025 <sup>a</sup>	0.0408 <sup>b</sup>
5%木醋液	51.06 <sup>b</sup>	2.42 <sup>a</sup>	188.92 <sup>b</sup>	0.623 <sup>b</sup>	0.167 <sup>ab</sup>	0.047 <sup>b</sup>	0.020 <sup>b</sup>	0.0319 <sup>c</sup>

累积出苗率对于评价幼苗生长整齐度具有一定意义。在播种3d时各试验组开始大量出苗,累积出苗率随着木醋液浓度的升高而降低,对照处理组和1%木醋液处理组分别在5d和8d出苗率达100%,5%木醋液处理组出苗率最低,仅为88%(表4),说明含有较高浓度木醋液的堆肥基质对于黄瓜幼苗具有一定毒性。

表4 累积出苗率

Tab. 4 Cumulative seedling rate %

处理	时间/d					
	3	4	5	6	7	8
对照	76	96	100	100	100	100
1%木醋液	64	84	92	96	96	100
3%木醋液	56	88	92	92	92	96
5%木醋液	44	64	76	76	80	88

育苗试验的幼苗生长生理形态指标如表5所示。壮苗指数最高值为1%木醋液处理组(0.0449g),显著高于其他3组( $P < 0.05$ ),最低值为5%木醋液处理组(0.0319g),说明低浓度木醋液处理组可促进幼苗生长,而高浓度木醋液处理组对植物有一定的毒害作用。主要是因为木醋液酚类物质含量较多,植物在高浓度酚环境下生长发育会受到抑制,干物质积累量降低。

### 3 结论

(1)在小试堆肥反应器恒温加热条件下,木醋液处理牛粪-小麦秸秆好氧堆肥可增强堆体的保水能力,添加木醋液可使堆体养分(总氮、总磷、 $K^+$ )含量增加和有机质降解率增大,促进堆肥腐熟,降低堆体 pH 值和电导率,改善堆肥基质的理化性质。且木醋液浓度越高,效果越好;较高浓度(添加量 3%、5%)木醋液处理堆肥对纤维素、半纤维素的降解有一定抑制作用,有利于基质后续的压缩成型。因此,对于促进堆肥腐熟和改善育苗基

质化学特性而言,高浓度(添加量 5%)的木醋液效果更好。

(2)本试验中各组堆肥浸提液发芽指数均大于 50%,说明所制堆肥对植物基本无毒,1%木醋液处理组发芽指数最高,为 79.17%,接近 80%的无毒害水平;黄瓜的育苗试验表明,1%木醋液处理组壮苗指数最高,为 0.044 9 g,显著高于其他 3 组( $P < 0.05$ ),说明最适合育苗的木醋液添加量在 1%左右,浓度较高(添加量 3%以上)会因酚类物质过多对幼苗产生一定毒害作用。

### 参 考 文 献

- [1] 曹红亮,杨龙元,袁巧霞,等. 稻草、玉米芯调理牛粪堆肥成型育苗基质试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(3):197-202. CAO Hongliang, YANG Longyuan, YUAN Qiaoxia, et al. Experimental research of seedling substrate compressed of cattle manures [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 197-202. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150328&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150328&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.028. (in Chinese)
- [2] 刘聪. 基于农业有机物料生态利用的蔬菜育苗基质配方研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016. LIU Cong. Selection of substrate formula for vegetable seedling based on ecological uses of agricultural organic materials [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [3] 王磊元,刘飞,秦翠兰,等. 木醋液对牛粪堆肥理化性质的影响[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 296-300. WANG Lei yuan, LIU Fei, QIN Cuilan, et al. Influence of wood vinegar on the physicochemical properties of cow manure composting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 296-300. (in Chinese)
- [4] LIU L, GUO X, WANG S, et al. Effects of wood vinegar on properties and mechanism of heavy metal competitive adsorption on secondary fermentation based composts[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 150: 270-279.
- [5] WANG Q, AWASTHI M K, REN X, et al. Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: the effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation[J]. Waste Management, 2018, 74: 221-230.
- [6] 王宏燕,陈琳,马晓伟,等. 低温胁迫下木醋液对水稻幼苗抗寒性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(2): 1-8. WANG Hongyan, CHEN Lin, MA Xiaowei, et al. Effect of wood vinegar on cold resistance of rice seedlings under low temperature stress[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(2): 1-8. (in Chinese)
- [7] 秦翠兰,王磊元,刘飞,等. 木醋液添加对牛粪堆肥传热性能的影响[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(6): 259-263. QIN Cuilan, WANG Lei yuan, LIU Fei, et al. Impact of adding wood vinegar on heat transfer performance of cow dung compost [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 259-263. (in Chinese)
- [8] 平安. 木醋液在农业上的应用及作用机理研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2010. PING An. Research on the agriculture application of pyroigneous acid and mechanism [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010. (in Chinese)
- [9] MUNGKUNKAMCHAO T, KESMALA T, PIMRATCH S, et al. Wood vinegar and fermented bioextracts: natural products to enhance growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 154: 66-72.
- [10] 张丽华,韩浩章. 木醋液对猴樟幼苗土壤养分有效性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(3): 99-106. ZHANG Lihua, HAN Haozhang. Effect of wood vinegar on soil nutrient availability of *Cinnamomu bodinieri* seedlings [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 2019, 39(3): 99-106. (in Chinese)
- [11] HAUG R T. The practical handbook of compost engineering[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.
- [12] 曾剑飞. 间歇供氧对畜禽粪便好氧堆肥氧气供需和主要气体产排的影响及机制研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018. ZENG Jianfei. Effect and mechanism of intermittent aeration on oxygen supply/consumption and main gaseous emissions during livestock manure composting [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [13] WANG Y, QIN C, WITARSA F. Clarifying configurations of reaction rate constant for first-order and Monod-type kinetics: a comparative manner and a pursuit of parametric definition[J]. Waste Management, 2018, 77: 22-29.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [15] 袁巧霞,田纯焱,陈钢,等. 调理料对猪粪好氧堆肥特性的影响试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 108-114. YUAN Qiaoxia, TIAN Chunyan, CHEN Gang, et al. Effects of different materials addition on the aerobic composting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 108-114. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120120&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120120&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.

020. (in Chinese)
- [16] GB/T 23486—2009 城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质[S]. 2009.
- [17] 刘洋,毛罕平,徐静云,等. 机械移栽黄瓜穴盘苗育苗品质评价与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 82-89, 170.  
LIU Yang, MAO Hanping, XU Jingyun, et al. Seedling quality evaluation and experiments of cucumber plug seedlings for mechanical transplantation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 82-89, 170. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s011&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s011&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.011. (in Chinese)
- [18] 刘皓,商靠定.  $K_2C_2O_4$ 溶液抑制甲烷-空气扩散火焰试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(8):46-51.  
LIU Hao, SHANG Kaoding. Experimental research on suppression of methane-air diffusion flame by water mist with potassium oxalate[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(8): 46-51. (in Chinese)
- [19] ZORPAS A A, LOIZIDO M. Sawdust and natural zeolite as a bulking agent for improving quality of a composting product from anaerobically stabilized sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(16): 7545-7552.
- [20] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [21] 时连辉. 几种农业废弃物堆腐基理质特性及在园林覆盖和栽培上的应用[D]. 泰安:山东农业大学, 2008.  
SHI Lianhui. Physical and chemical properties of several agriculture waste compost substrates and utilization in landscape mulch and culture[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [22] 杨龙元,袁巧霞,刘志刚,等. 牛粪堆肥成型基质块蔬菜育苗灌溉方式[J]. 农业工程学报,2018,34(5):98-106.  
YANG Longyuan, YUAN Qiaoxia, LIU Zhigang, et al. Irrigation method for vegetable seedling using cow dung compressed substrates[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 98-106. (in Chinese)
- [23] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京:化学工业出版社,1988.
- [24] 李荣华,张广杰,秦睿,等. 粉煤灰和猪粪好氧混合堆肥过程中养分转化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 100-105.  
LI Ronghua, ZHANG Guangjie, QIN Rui, et al. Nutrient transformation during swine manure co-composting with flyash under aerobic conditions [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 100-105. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120420&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120420&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.020. (in Chinese)
- [25] 李旭,路明艺,师晓爽,等. 多孔填充剂促进牛粪秸秆高温恒温堆肥有机质降解减少氮损失[J]. 农业工程学报,2018, 34(增刊):132-137.  
LI Xu, LU Mingyi, SHI Xiaoshuang, et al. Accelerating organic matter degradation and reducing  $NH_3$  emission during constant high temperature composting of cattle manure and corn straw with addition of porous material [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(Supp.): 132-137. (in Chinese)
- [26] 朱琳,曾椿淋,高凤,等. 水稻秸秆堆肥发酵粗制肥料中微生物多样性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 228-234.  
ZHU Lin, ZENG Chunlin, GAO Feng, et al. Characteristic analysis of microbial diversity in crud fertilizer from compost of rice straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 228-234. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180727&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180727&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.027. (in Chinese)
- [27] 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 177-182.  
HUANG Guangqun, HUANG Jing, ZHANG Yang, et al. Feasibility analysis of rapid prediction of seed germination index during digestate aerobic composting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 177-182. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160524&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160524&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.024. (in Chinese)
- [28] 卢妙. 调理剂对污泥堆肥的影响研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.  
LU Miao. Research on the effect of additives on the performance of municipal sludge composting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [29] ZUCCONI F, DE BERTOLDI M. Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste[A]//DE BERTOLDI M, FERRANTI M P, HERMITE P L. Compost: production, quality and use. London: Elsevier Applied Science, 1987: 305.