

韩相龙,吴 薇,赵鹏博,等. 不同碳氮比对烟梗与牛粪堆肥过程的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(16):303-307.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.065

# 不同碳氮比对烟梗与牛粪堆肥过程的影响

韩相龙<sup>1</sup>, 吴 薇<sup>1</sup>, 赵鹏博<sup>1</sup>, 韦成才<sup>2</sup>, 袁 帅<sup>3</sup>, 李司童<sup>1</sup>, 毛凯伦<sup>1</sup>, 牛改利<sup>1</sup>, 张立新<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省烟草科学研究所, 陕西西安 710061;

3. 陕西中烟工业有限责任公司技术中心, 陕西宝鸡 721013)

**摘要:**为寻求废弃烟梗资源化利用新途径,开发烟梗和牛粪混合堆肥生产有机肥技术,采用烟梗和牛粪为原材料进行好氧堆肥发酵试验,设置 3 个碳氮比梯度(25:1、22:1、19:1),研究其对堆肥发酵温度、含水率、pH 值、种子发芽指数(germination index,简称 GI)等理化指标和堆肥产品肥效指标的影响,探索烟梗与牛粪高温堆肥最适 C/N。结果表明,适宜的烟梗与牛粪混合比例堆肥有利于加快堆肥腐熟和提高产品矿质养分含量,碳氮比为 22:1 时,堆肥产品的种子发芽指数最高达 121.3%,全氮、全磷、全钾等营养元素含量较其他处理高,堆肥综合效果最好。

**关键词:**堆肥;牛粪;烟梗;碳氮比;有机肥;发酵

**中图分类号:** X71;S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)16-0303-05

我国畜禽粪便资源丰富,而对其无害化处理和资源化利用的技术尚未普及,资源浪费和环境污染现象严重<sup>[1]</sup>。畜禽粪便相比无机化肥来说富含有机质和有益微生物,经发酵制作的生物有机肥营养丰富,能够有效改善土壤状况,提高土壤肥力,进而提高农作物品质<sup>[2-3]</sup>。我国是卷烟生产消费大国,烟梗是卷烟生产中产生的副产物,约占烟叶总质量 20%~30%,每年产生的烟梗肥料高达数十万 t,如果不能合理利用,不仅浪费仓储资源,而且污染环境<sup>[3-4]</sup>。前人对烟梗废弃物资源化利用进行了大量研究,付兵等利用烟梗热解气化生产

生物炭<sup>[5]</sup>;肖春菊等采用介质溶液,将烟梗等烟草废弃物制成烟草薄片,提高烟草废弃物的重复利用率<sup>[6]</sup>。但目前烟草废弃物转化烟草薄片技术尚处于初级水平,生产工艺水平及产品质量相对较低,废弃物利用率仅在 50%左右<sup>[7]</sup>。

烟梗与牛粪均含有丰富有机质,且牛粪中含有大量有益微生物,烟梗中含有的烟碱对某些病虫害有防治作用<sup>[8]</sup>。纯烟梗堆肥存在原料孔隙度小、分解速度慢、发酵周期较长等问题,而烟梗牛粪混合堆肥可以提高堆肥物料的孔隙度和缩短堆肥周期<sup>[3]</sup>。牛粪孔隙度相对较大且富含有益微生物,烟梗与牛粪混合堆肥可有效增大堆肥物料孔隙度、增加微生物数量、加快物料的腐熟和缩短堆肥周期。

碳氮比(C/N)是最常用于评价腐熟度的参数,如何利用不同原料调配合适 C/N,加快堆肥腐熟和阐明增效机制,对促进畜禽粪便和烟梗等有机废弃物资源化利用具有战略意义<sup>[9]</sup>。本研究通过分析不同碳氮比下烟梗与牛粪堆肥的腐解进程,筛选出烟梗与牛粪混合堆肥的最佳碳氮比,为实现烟梗与牛粪高效堆肥和工厂化生产提供理论依据和技术支撑。

收稿日期:2018-04-25

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201303104);秦巴烟田土壤保育及化肥减施增效技术集成与示范(编号:SYXC-2016-KJ-02);秦巴烟叶品质与香气评价及影响因素研究(编号:JS-FW-2016-001)。

作者简介:韩相龙(1995—),男,河南扶沟人,硕士研究生,主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail:695519810@qq.com。

通信作者:张立新,博士,教授,博士生导师,主要从事植物营养和资源利用研究。E-mail:zhanglixin@nwsuaf.edu.cn。

值响应——以南京市为例[J]. 水土保持研究,2009,16(1):212-215,221.

[10] 李晓文,方创琳,黄金川,等. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应——以甘肃河西地区为例[J]. 第四纪研究,2003,23(3):280-290.

[11] 张 杨,刘艳芳,顾渐萍,等. 武汉市土地利用覆被变化与生态环境效应研究[J]. 地理科学,2011,31(10):1280-1285.

[12] 吕立刚,周生路,周兵兵,等. 区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究——以江苏省为例[J]. 地理科学,2013,33(12):1442-1449.

[13] 刘耀彬,戴 璐,董明莹. 环鄱阳湖区分区土地利用景观格局变化模拟研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(10):1762-1770.

[14] 何华春,周汝佳. 基于景观格局的盐城海岸带土地利用时空变

化分析[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(8):1191-1199.

[15] 潘如玉,申丽娟,谢德体,等. 重庆旧城改造区土地覆被与景观格局变化——以北碚区为例[J]. 经济地理,2015,35(1):155-161.

[16] 张 帅,许明祥,张亚锋,等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响[J]. 环境科学,2015,36(2):661-668.

[17] 王秀兰,包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展,1999,18(1):81-87.

[18] 万 利,孙丽慧,谭 靖,等. 北京郊区土地利用变化及其生态效应研究[J]. 水土保持研究,2015,22(5):92-99.

[19] Liu Y, Gao J, Yang Y. A holistic approach to - wards assessment of severity of land degradation along the great wall in northern Shaanxi province, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2003,82(2):187-202.

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于 2016 年在陕西省杨凌示范区西北农林科技大学北校区温室中进行。牛粪由陕西省杨凌示范区良种奶牛繁育中心提供;烟梗末由陕西中烟工业有限责任公司宝鸡卷烟厂提供,粒度直径为 0.2~0.5 cm,长 0.2~2.0 cm;EM 菌剂由河南省恒隆态生物工程股份有限公司提供,有效活菌数 0.5 亿 CFU/g,用量为 0.5%。堆肥装置为笔者所在实验室自制,有效容积为 600 L,供氧装置固定通气量为 3.5 L/min。烟梗与牛粪的基本理化性质见表 1。

表 1 堆肥原料理化性质					
原料	理化性质				
	含水率 (%)	全氮含量 (%)	全碳含量 (%)	碳氮比	有机质含量 (%)
牛粪	82	1.97	34.35	17	64
烟梗	12	1.41	36.17	26	83

1.2 试验设计

试验设 3 个处理,分别为 T25(碳氮比为 25:1)、T22(碳氮比为 22:1)、T19(碳氮比为 19:1),根据原料 C、N 含量将烟梗和牛粪按比例混合均匀,每处理设 3 个重复,含水率统一调整到 60%左右。物料按比例混合时,将 EM 菌剂均匀喷洒到原料中,然后转移至发酵装置中,采用好氧发酵方式,每天通气 12 h,每 5 d 翻料 1 次,当温度稳定在室温不再变化时视为堆肥终止,最终发酵周期为 45 d。试验处理详见表 2。

表 2 试验设计				
处理	通气时间 (h/d)	碳氮比	牛粪与烟梗 质量比	实际含水率 (%)
T25	12	25	0.3:1	63.4
T22	12	22	2.6:1	57.6
T19	12	19	12.8:1	58.7

表 3 感官指标变化				
处理	感官指标变化			
	第 0 天	第 10 天	第 20 天	第 30 天
T25	呈棕黄色,有浓烈烟梗呛鼻味和轻微臭味,有少量苍蝇	烟梗呛鼻味减弱,颜色转深,臭味变浓,有轻微氨味	颜色转灰褐色,烟梗味和氨味减弱,有土腥味和发酵香味	颜色转为黑褐色,臭味消失,有轻微烟梗味和发酵香味
T22	呈黄褐色,有较重的恶臭味和烟梗味,招来大量苍蝇	较强的恶臭和氨味,大量菌体生长,颜色转深	颜色转为黑褐色,氨味消失,恶臭消失,苍蝇消失,有发酵香味	颜色为黑褐色,有土腥味和发酵香味
T19	呈深黄褐色,有浓烈恶臭味和轻微烟梗味,招来大量苍蝇	较强的臭味和轻微的氨味,大量菌体生长繁殖,颜色转深	颜色变为深褐色,恶臭、氨味和苍蝇消失	颜色转为黑褐色,有发酵香味

2.2 堆肥过程中物料温度和含水率的变化

温度能直观反映堆肥过程中微生物活性变化、有机质分解的速度和原料的腐殖化程度<sup>[13]</sup>。由图 1 可知,堆肥物料存在升温期、高温期、降温期、稳定期等 4 个阶段。由于微生物大量繁殖和分解代谢,堆体迅速升温,而随着有机质的消耗和微生物数量的减少,温度下降最终趋于环境温度<sup>[14]</sup>。T25、T22、T19 处理升温时间都在堆肥 3d 左右,50℃以上高温存在时间分别为 8、16、12 d,60℃以上分别存在 0、7、5 d。从高温保持时间来看,T22、T19 处理达到了无害化标准,T25 处理

1.3 样品采集与分析方法

于堆肥 0、5、10、17、24、31、45 d 采用五点法取样,混匀后分为 2 份,一份风干粉碎过 1 mm 筛,用于全碳、全氮、全磷、全钾及有机质含量的测定,另一份用于含水率、pH 值、种子发芽指数的测定。

物料温度:采用水银温度计测量,每日分别测量发酵箱中物料上、中、下部的温度,取平均值,同时记录环境温度。含水率:新鲜样品称质量后,在温度为 105℃条件下烘干至恒质量,则含水率=(鲜质量-干质量)/鲜质量×100%。pH 值:采用 pH 测定仪(OHAUS STARTER 2100)测定<sup>[10]</sup>。有机质、全碳含量采用灰化法和重铬酸钾法测定<sup>[11]</sup>,全氮含量测定采用流动分析仪(德国 SEAL 公司生产,型号:AA3),全钾含量测定采用火焰原子吸收光度计(英国 Sherwood 公司生产,型号:M410);全磷含量采用钼锑抗比色法测定<sup>[10]</sup>。种子发芽指数(germination index,简称 GI)采用 Sharpley 等的方法测定<sup>[12]</sup>称取堆肥样品 3 g 按照 1 g:10 mL 加入蒸馏水中,离心后取 5 mL 上清液加入底部覆滤纸的玻璃培养皿中,取 10 粒青菜种子置于其中,摆放整齐,同时以清水作对照,在黑暗培养箱中培养 48 h 进行种子发芽率及根长测量,则 GI=(试验组种子发芽率×种子根长)/(对照组种子发芽率×种子根长)×100%。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 对试验数据进行初步整理,SPSS 23.0 进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中物料气味、颜色变化

由表 3 可知,T22 处理较 T19、T25 处理出现霉菌较早,恶臭味和氨味消失较快,颜色转为黑褐色较快,说明碳氮比为 22:1 可以加快烟梗和牛粪混合堆肥进程,对提升烟梗和牛粪混合发酵的感官品质具有明显效果。

未达到无害化标准。与 T25、T19 处理相比,T22 处理最高温度分别高 18.4%、5.6%,且高温(>50℃)存在时间最长,共 16 d,达到了无害化标准<sup>[15]</sup>,T25 处理高温存在时间最短,最高温度为 58℃,说明 22:1 的碳氮比可以明显提高堆肥中最高温度和增加高温时间,缩短发酵周期。

适宜的含水率是保持微生物最佳活性和物料含氧量的必要条件,对于物料的腐熟具有重要作用<sup>[16]</sup>。由图 2 可知,随发酵的进行,T22、T19 处理含水率变化趋势表现为先升高后下降再升高,而 T25 处理含水率变化相对平缓,总体趋势呈先

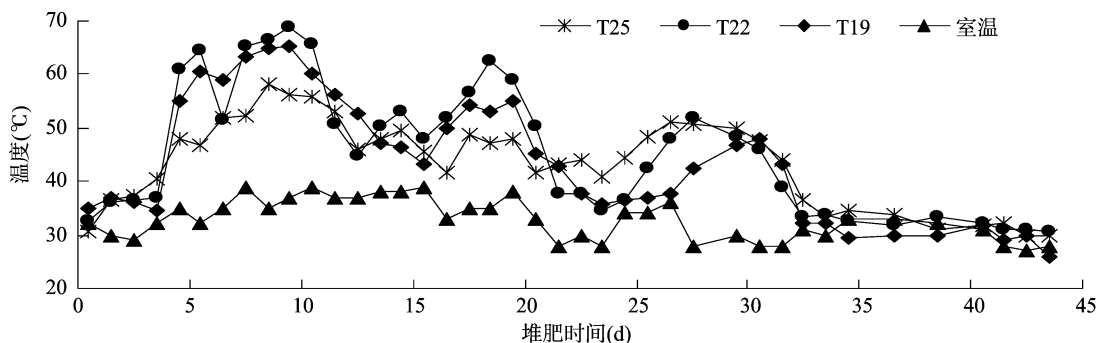


图1 不同碳氮比处理物料温度变化

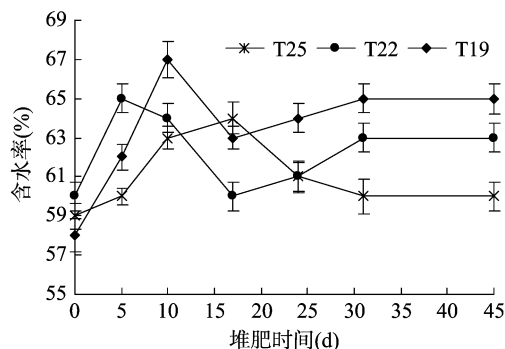


图2 不同碳氮比处理物料含水率变化

升后下降。堆肥结束时, T25 处理含水率较初始值无明显变化, 可能由于 T25 处理烟梗比例过高, 导致微生物较少, 对物料分解不彻底。T22、T19 处理的含水率分别较初始含水率上升 5.00%、12.07%, 这与前人得出的含水率随堆肥进行逐渐下降的结论<sup>[17]</sup>不同, 这可能是由于本研究采用的堆肥装置密封性较强, 能有效减少水分蒸发, 进而导致整体含水率小幅升高。

### 2.3 堆肥过程中物料 pH 值的变化

由图 3 可知, 不同处理堆肥过程 pH 值均呈先上升后稍有下降的趋势。至堆肥结束时, T25、T22、T19 处理的 pH 值分别为 8.49、8.68、8.34, 比初始 pH 值分别升高 34.44%、30.04%、19.74%, 各处理 pH 值均符合腐熟堆肥 pH 值在 8.0~9.0 的标准。

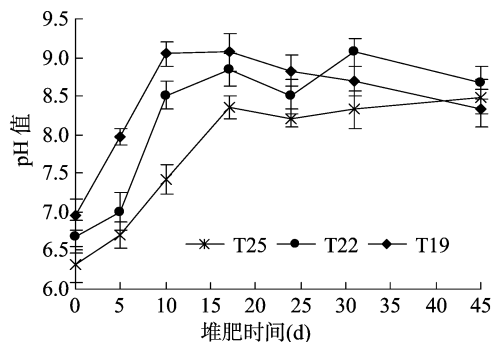


图3 不同碳氮比处理物料 pH 值变化

### 2.4 堆肥过程中物料全碳、全氮含量及碳氮比变化

**2.4.1 全碳含量变化** 碳素为微生物提供能量和碳源, 全碳含量的变化能反映堆肥进程, 可作为堆肥腐熟度的指标<sup>[18-19]</sup>。由图 4 可知, 3 个处理的全碳含量均呈下降趋势,

其中 T22 处理下降速率较快, 表明 T22 处理微生物代谢较旺盛, 物料腐解较快。堆肥结束时, T25、T22、T19 处理的全碳含量分别较初始值下降 11.3、17.8、11.8 百分点, 其中 T22 处理下降幅度最高, 腐解程度最高。

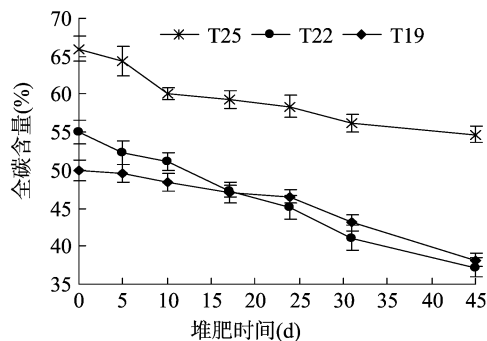


图4 不同碳氮比处理物料全碳含量的变化

**2.4.2 全氮含量变化** 研究表明, 随着发酵的进行, 氮素会被微生物利用而减少, 堆肥后期有机质大量分解转化为  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  挥发损失相对较小, 因此, 堆肥全氮含量呈上升趋势<sup>[17]</sup>。由图 5 可知, 各处理全氮含量均总体呈先迅速上升后缓慢上升趋势。堆肥结束时, T25、T22、T19 处理的全氮含量分别上升 0.41、1.34、1.57 百分点, 说明 T19、T22 处理对堆肥固氮作用较 T25 好。

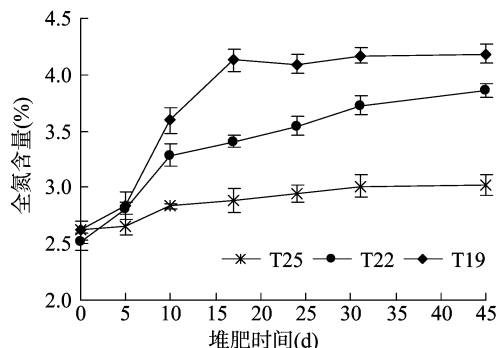


图5 不同碳氮比处理物料全氮含量变化

### 2.5 堆肥过程中物料碳氮比变化

碳氮比影响微生物生长代谢, 从而影响堆肥进程, 因此常被作为堆肥腐熟度的参数<sup>[20]</sup>。由图 6 可知, 堆肥过程中由于微生物大量消耗碳源使全碳含量下降, 3 个处理的 C/N 均随发酵的进行而下降。在堆肥结束时, T25、T22、T19 处理的碳氮比分别较初始值下降 28.26%、55.83% 和 52.22%。

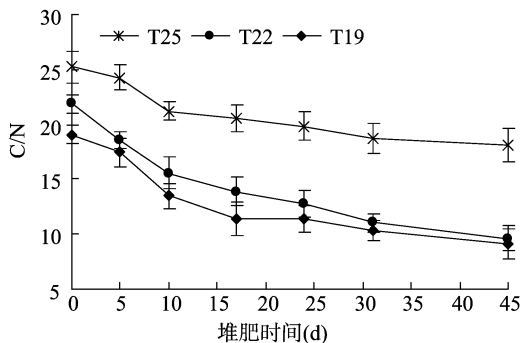


图6 不同碳氮比处理物料 C/N 变化

## 2.6 堆肥过程中物料有机质含量变化

由图 7 可知,T25、T22、T19 处理初始有机质含量差异较大,有机质含量随时间的延长而逐渐下降。其中,T22 处理有机质含量变化最大,T25、T19 处理在整个堆肥阶段,有机质含量一直保持平稳下降。堆肥结束时,T25、T22、T19 处理的有机质含量下降幅度分别为 13、15、3 个百分点。

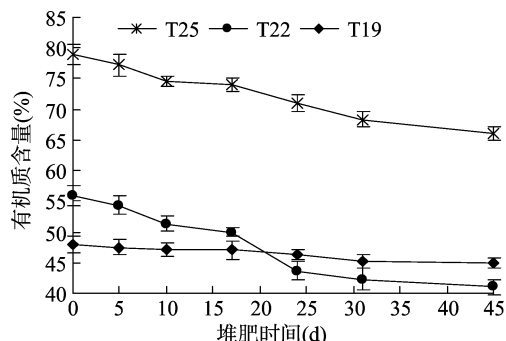


图7 不同碳氮比处理物料有机质含量变化

## 2.7 堆肥过程中物料全磷、全钾含量变化

**2.7.1 全磷含量变化** 由图 8 可知,3 个处理全磷含量的总体变化趋势为先下降后上升。在整个堆肥阶段, T25 处理全磷含量表现为先下降后稍有上升,整体呈下降趋势。堆肥结束时,T25、T22、T19 处理全磷含量分别为 0.27%、0.65%、0.73%,其中 T25、T19 处理较初始全磷含量分别下降 0.07、0.21 百分点,T22 处理较初始全磷含量上升 0.17。堆肥结束时表现为 T19、T22 处理全磷含量较高,T25 处理含量最低。

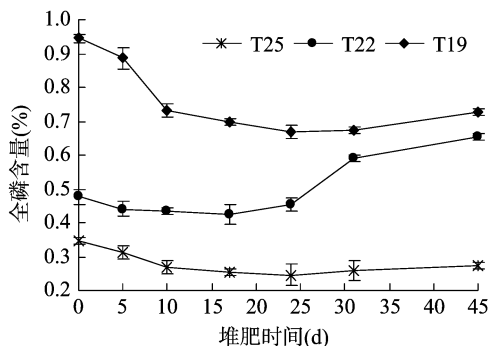


图8 不同碳氮比处理物料全磷含量变化

**2.7.2 全钾含量变化** 由图 9 可知,烟梗含量较高的 T25 处理全钾含量较高,3 个处理均总体表现出上升的趋势,其中 T22 处理表现为升高后下降趋势。堆肥结束时,T25、T22、T19 处理全钾含量分别上升 0.57、0.26、0.23 百分点。综合比较,

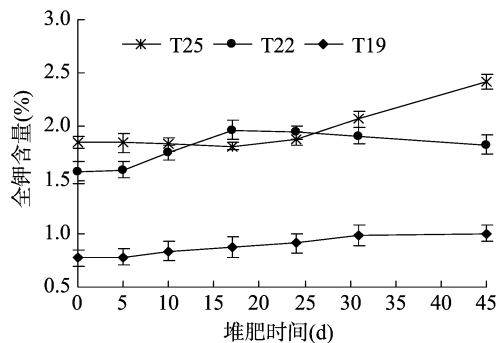


图9 不同碳氮比处理物料全钾含量变化

T25 处理上升幅度最大,T22 处理次之,T19 处理最小。

## 2.8 堆肥过程中物料种子发芽指数变化

种子发芽指数常作为堆肥产品安全性指标,未腐熟物料的浸提液中含有高浓度  $\text{NH}_4^+$ 、有机酸以及重金属等毒性物质,会抑制种子发芽<sup>[21]</sup>。由图 10 可知,在整个堆肥过程中,种子发芽指数均呈上升趋势,规律表现烟梗含量较高时 GI 指数较低,而烟梗含量较少时 GI 差异不显著。T22、T19 处理在堆肥 24 d 时 GI 均达到 80% 左右,而 T25 处理最高未能达到 80%。至堆肥结束时,T22、T19 处理种子发芽指数分别达到了 121.3%、118.5%,已达到无害化标准。高温时间 (>50℃) 超过 10 d 的处理 T22 和 T19 腐熟度较高,堆肥基本无毒性,而 T25 处理未完全腐熟。

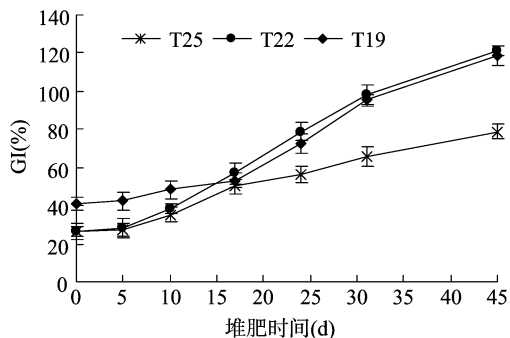


图10 不同碳氮比处理 GI 变化

## 3 结论与讨论

堆肥是利用大量微生物对有机物进行快速分解的过程,碳素是微生物的基本能量来源,是构成细胞的基本材料,氮素是构成蛋白质、核酸、氨基酸、酶、辅酶的重要成分,因此微生物的生命活动与原料的碳氮比密切相关,在堆肥中对于碳氮比的调控至关重要<sup>[18,21]</sup>。调节碳氮比的主要方法有添加无机氮素、菌剂、填充料或调理剂等。郑丹等在牛粪堆肥中添加尿素等无机氮调节原料 C/N,可显著提高堆肥温度,增强有机质降解,但同时使堆肥氮素损失加重<sup>[22]</sup>;刘志平等在蘑菇土堆肥中添加 3 种不同微生物菌剂,显著影响堆肥中水溶性铵态氮、硝态氮的含量,加速微生物分解利用氮,影响硝态氮和铵态氮之间的转换,减少氮损失<sup>[23]</sup>;更多的则是通过向堆肥中添加不同调理剂或填充剂来改变堆肥物料 C/N,田纯焱等在猪粪中分别添加木屑、玉米秸秆和小麦秸秆进行好氧堆肥试验,结果表明,不同填充剂显著影响物料总氮含量,加快原料腐熟,其中玉米秸秆效果最好<sup>[24]</sup>。本试验研究了不同 C/N

下烟梗和牛粪混合堆肥,结果表明,3个处理C/N均随发酵的进行而下降,其中,以T22处理降幅最大。堆肥中由于微生物生长繁殖消耗大量碳水化合物,使总碳含量大幅下降,氮素由于物料中氨化细菌和硝化细菌的分解而转为铵态氮和硝态氮,虽然铵态氮有部分转化为氨气,硝态氮部分经反硝化细菌分解为 $N_2$ 或 $N_2O$ 挥发,但总氮含量与总碳含量相比损失相对较低,因此C/N呈下降趋势<sup>[9]</sup>。以 $T$ 值 $[T \text{ 值} = (\text{终点 C/N}) / (\text{初始 C/N})]$ 为腐熟参考指标,堆肥结束时3个处理的 $T$ 值分别为0.72、0.44、0.48,若以 $T$ 值 $< 0.6$ 为腐熟标准,则碳氮比25:1处理未达到腐熟标准,以T22处理腐熟度最好<sup>[25]</sup>。

从其他堆肥指标来看,3个处理堆体温度均能达到50℃以上,T22、T19处理较T25处理升温快、高温时间长,呈低碳氮比进入高温期快的趋势,这与Huang等的研究结果<sup>[26]</sup>相同;T22、T19处理发芽指数均达到80%的腐熟标准;从肥效指标来说,各处理全磷含量总体随发酵的进行表现为先下降后上升趋势,其中T19、T22处理明显高于T25处理。堆肥前期物料含有机酸较少,对全磷的溶解能力有限,随后有机酸含量上升,物料溶磷能力增强,堆肥后期微生物大量死亡,菌体内磷素大量释放,全磷含量增加<sup>[27]</sup>;全钾含量总体随酵的进行呈上升趋势,各处理中T25全钾含量上升最多,这可能是由于烟草中含钾较多,所以含烟梗较多的处理全钾含量增幅较大。制约有机肥发展的重要因素之一含量是有机肥较无机化肥所含营养元素少,但有机肥含有的促进植物生长的腐殖酸和有益根际微生物却是无机化肥缺少的,如若能解决有机肥中氮、磷、钾等元素欠缺的问题,将会大大促进有机肥的应用和普及。

适量烟梗和牛粪混合高温好氧堆肥可以有效资源化利用烟梗废弃物和奶牛养殖粪污,减少其对环境的污染。本研究比较C/N为19:1、22:1、25:1等3个不同处理的烟梗与牛粪高温堆肥过程中温度、含水率、pH值、全氮含量、全磷含量、全钾含量、全碳含量的变化差异以及堆肥结束时各处理种子发芽指数的差异。结果表明,烟梗和牛粪配比使C/N为22:1时堆肥效果最佳。研究结果能够为烟梗及牛粪的资源化利用、工厂化生产有机肥料提供依据。

#### 参考文献:

- [1] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614–617.
- [2] 沈德龙, 李俊, 姜昕. 我国生物有机肥的发展现状及展望[J]. 中国农技推广, 2007, 23(9): 35–37.
- [3] 高明, 郭灵燕, 席宇, 等. 烟梗生物发酵制造有机肥[J]. 烟草科技, 2010(12): 57–60, 65.
- [4] 赵高岭, 杜雷, 高明, 等. 程中酶活性的变化[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(1): 43–47.
- [5] 付兵, 杨兵, 朱鹏飞, 等. 烟梗热解气化制取生物炭方法探索[J]. 再生资源与循环经济, 2016, 9(10): 41–44.
- [6] 肖春菊, 王青海, 徐海涛, 等. 辊压法薄片加纤工艺研究[J]. 烟

- 草科技, 2001(11): 6–7.
- [7] 李增华. 烟草废弃物与烟草薄片化学成分比较研究[D]. 开封: 河南大学, 2015.
- [8] 胡尚勤. 烟草提取物杀菌作用的研究[J]. 生物技术, 2009, 19(5): 73–75.
- [9] 刘超, 王若斐, 操一凡, 等. 不同碳氮比下牛粪高温堆肥腐熟进程研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 662–668.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] 张勇, 庞学勇, 包维楷, 等. 土壤有机质及其研究方法综述[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(5): 72–78.
- [12] Sharpley A, Daniel T C, Sims J T, et al. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(2): 160–166.
- [13] 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.
- [14] 张亚宁. 堆肥腐熟度快速测定指标和方法的建立[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [15] 中华人民共和国卫生部. 粪便无害化卫生标准: GB 7959—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- [16] 吴银宝, 汪植三, 廖新伟, 等. 猪粪堆肥腐熟指标的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 189–193.
- [17] 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]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 718–725.
- [18] Murwira H K, Kirchmann H, Swift M J. The effect of moisture on the decomposition rate of cattle manure[J]. Plant and Soil, 1990, 122(2): 197–199.
- [19] Chefetz B, Hatcher P G, Hadar Y, et al. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(4): 776–785.
- [20] 钱恺. 牛粪好氧堆肥曝气特性分析与腐熟度评价方法的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [21] 田伟. 牛粪高温堆肥过程中的物质变化、微生物多样性以及腐熟度评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [22] 郑丹, 阎静, 陶光灿, 等. 添加无机肥料对高温堆肥化及磷素有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1631–1635.
- [23] 刘志平, 王煌平, 张青, 等. 不同微生物菌剂对农业废弃物堆肥发酵效果的影响[J]. 福建农业科技, 2011(5): 87–90, 117.
- [24] 田纯姝, 袁巧霞, 程长菊. 不同调理料好氧堆肥效果的综合评价[C]// 中国农业工程学会学术年会, 2011.
- [25] Morel J L, Colin F, Germon J C, et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost[J]. Composting of Agricultural and Other Wastes, 1985.
- [26] Huang G F, Wong J W C, Wu Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. Waste Management, 2004, 24(8): 805–813.
- [27] 胡清秀, 卫智涛, 王洪媛. 双孢蘑菇菌渣堆肥及其肥效的研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1902–1909.