

高宁, 李建明, 孔政. 番茄秸秆堆肥发酵特性及对冬季大棚环境的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 172–177.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.14.040

番茄秸秆堆肥发酵特性及对冬季大棚环境的影响

高宁^{1,2}, 李建明¹, 孔政¹

(1. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 2. 榆林职业技术学院, 陕西榆林 719000)

摘要:以番茄秸秆为主要的发酵材料, 分别选取菇渣、牛粪、猪粪、菇渣+牛粪和菇渣+猪粪为调理材料, 研究不同调理剂对番茄秸秆发酵特性的影响, 探讨番茄秸秆堆肥酿热对冬季大棚环境的调控作用。结果表明, 在番茄秸秆堆肥过程中, 以猪粪为调理剂时发酵产热维持时间最长, 35℃以上维持天数可达44 d。发酵过程中, 各处理堆肥都呈碱性, 发酵结束时各处理 EC 值均高于 3.6 mS/cm, 其中以猪粪为调理剂的堆体 EC 值始终最高。发酵腐熟后, 各处理容重差异不大, 以猪粪为调理剂的堆体大小孔隙比最大, 而以菇渣为调理剂的堆体大小孔隙比最小。环境试验结果表明, 试验期间利用番茄秸秆和猪粪混合堆肥产生的热量可使冬季大棚的日平均气温提高 4.2℃, 日最低气温平均提高 4.6℃。在晴天和阴雪天酿热棚较对照棚的夜间气温和 CO₂ 浓度均有提高, 空气湿度变化不大。表明以猪粪为调理剂进行的番茄秸秆堆肥, 在调整 EC 值后可作为理想的栽培基质, 且利用其发酵产生的热量可改善大棚中的环境条件。

关键词: 番茄; 秸秆; 调理剂; 发酵; 堆肥酿热; 大棚环境

中图分类号: S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)14-0172-06

在我国北方地区, 蔬菜作物的设施栽培主要是利用日光温室和塑料大棚, 但在实际生产中日光温室和塑料大棚均存在一定的不足。日光温室保温性能较好, 但由于后墙的遮挡,

内部光照条件较差, 影响作物的生长; 塑料大棚内光照充足, 但保温性差, 在冬季无法进行蔬菜作物的栽培^[1]。为此, 王明喜等设计建造了无墙体结构的大跨度保温大棚, 但在冬季需要增加供热设施^[2]。堆肥发酵可以产生大量的热量, 冬季利用其作为供热来源可以节省生产成本。孙亚文等通过建造秸秆发酵示范蔬菜大棚发现, 利用秸秆发酵可以提高大棚温度, 促进蔬菜生长^[3]。但不同堆肥原料产热效果不同, 酿热物对大棚内环境变化有很大的影响。因此, 在冬季大棚中利用堆肥作为供热源时, 选择适宜的堆肥原料至关重要。

番茄是我国设施栽培主要的蔬菜作物之一。据统计,

收稿日期: 2018-03-26

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(编号: CARS-23-C05); 陕西省重点研发计划(编号: 2017ZDXM-NY-003)。

作者简介: 高宁(1968—), 女, 陕西西脂人, 硕士, 高级讲师, 主要从事设施园艺研究。E-mail: ylg212@sina.com。

通信作者: 李建明, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事设施园艺研究。E-mail: lijianming66@163.com。

[8] Rashid K, Wachira F N, Nyariki J N, et al. Kenyan purple tea anthocyanins and coenzyme - Q₁₀ ameliorate post treatment reactive encephalopathy associated with cerebral human African trypanosomiasis in murine model [J]. *Parasitology International*, 2014, 63(2): 417–426.

[9] 刘富知, 黄建安, 付冬和, 等. 茶树上红紫色芽叶部分生化特性的研究[J]. *湖南农业大学学报*, 2000, 26(1): 41–42, 57.

[10] 萧力争, 苏晓倩, 李勤, 等. 紫芽品种茶树芽叶多酚类物质组成特征[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 34(1): 77–79.

[11] 李燕丽, 罗琼仙, 关文玉, 等. 紫娟茶花色苷的类型、组成及其质量分数的季节性变化[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(6): 1–6.

[12] Lai Y S, Li S, Tang Q, et al. The dark - purple tea cultivar ‘Ziyan’ accumulates a large amount of delphinidin - related anthocyanins [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(13): 2719–2726.

[13] 王秋霜, 凌彩金, 刘淑媚, 等. 红紫芽茶叶花青素提取分离及 pH 稳定性初探[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(9): 291–296.

[14] 李璐, 倪婷婷, 关文玉, 等. 基于响应面法提取‘紫娟’茶花青素最佳工艺的优化研究[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(4): 1704–1709.

[15] 罗正飞, 梁名志, 王立波. “紫娟”茶花青素提取工艺研究[J]. *滇西科技师范学院学报*, 2011, 33(4): 111–114.

[16] 孙建霞, 张燕, 孙志健, 等. 花色苷的资源分布以及定性定量分析方法研究进展[J]. *食品科学*, 2009, 30(5): 263–268.

[17] 陈琼, 陆瑞琼. 茶树芽叶花色苷含量测定方法的研究[J]. *北京工商大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(2): 41–44.

[18] 黄意欢. 茶学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 125–126.

[19] Holton T A, Cornish E C. Genetics and biochemistry of anthocyanin biosynthesis[J]. *The Plant Cell*, 1995, 7(7): 1071–1083.

[20] Wei K, Zhang Y Z, Wu L Y, et al. Gene expression analysis of bud and leaf color in tea[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 107: 310–318.

[21] 张佩佩, 张亮, 郑风霞, 等. 植物叶片中花青素的积累规律及生物学作用[J]. *北方园艺*, 2014(20): 188–192.

[22] 周琼琼, 孙威江. 茶树芽叶紫化的生理生化分析及其关键酶基因的表达[J]. *生物技术通报*, 2015, 31(1): 86–91.

[23] 金琦芳, 孙威江, 陈志丹. 光照对紫色芽叶茶花青素合成的调控机理[J]. *生物技术通报*, 2015, 31(6): 20–27.

[24] 李智. 不同环境因子调控茶树紫色芽叶形成的分子机制研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014: 54–58.

2014 年番茄设施栽培面积已达 101.7 万 hm^2 , 年秸秆产生量为 3.4 亿 t ^[4-5]。这些秸秆大部分被直接焚烧, 不仅对环境造成了污染, 而且还造成了资源的浪费。番茄秸秆中含有大量的有机物, 通过微生物高温好氧发酵可以将这些有机物分解为植物能够直接吸收利用的成分^[6-7]。可见, 发酵堆肥可以作为处理秸秆的有效手段之一, 也可以为大棚生产提供量, 实现秸秆的资源化利用^[8-9]。研究发现, 调理剂作为调控堆肥碳氮比的物质, 对堆肥发酵进程有重要的影响^[10]。农业废弃物中含有大量的碳氮等元素, 可作为堆肥发酵的调理剂。张建华等研究认为, 以猪粪为堆肥原料时, 添加木屑的堆体升温最快, 且高温持续时间最长, 添加砗糠灰的堆体高温持续时间最短^[11]。胡伟桐等以生物沥浸污泥为堆肥原料, 发现以麦糠作为调理剂能够提高堆肥温度, 延长高温阶段持续时间^[12]。但未有研究报道以番茄秸秆为堆肥原料时的适宜调理剂。

本试验选取番茄秸秆为主要的发酵材料, 以常见的农业废弃物为调理剂, 进行堆肥发酵, 研究不同调节剂对堆体发酵过程中温度及理化性质的影响, 并筛选出产热效果最好的堆肥原料组合, 利用其发酵的产热过程, 研究堆肥酿热大棚与普通大棚的性能差异, 皆在为堆肥酿热在大棚内的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

试验于 2015 年 9 月至 2016 年 1 月在西北农林科技大学试验基地内进行, 试验地位于 34°20'N, 108°07'E, 属暖温带季风半湿润气候区, 年降水量 635.1 ~ 663.9 mm, 年均气温 12.9℃。所用堆肥原料菇渣、牛粪、猪粪和番茄秸秆均取自当地周边农户。各堆肥原料基本性质见表 1。

表 1 堆肥原料基本性质

堆肥原料	全碳含量 (mg/g)	全氮含量 (mg/g)	碳氮比	含水率 (%)
菇渣	657.17	34.49	19.05	22.2
牛粪	530.64	28.52	18.61	24.8
猪粪	426.05	24.67	17.27	58.4
番茄秸秆	542.24	24.61	22.03	5.5

1.2 堆肥试验

堆肥试验于 2015 年 9 月 1 日开始, 在遮雨棚中进行。分别以菇渣、牛粪、猪粪、菇渣 + 牛粪和菇渣 + 猪粪为调理剂, 每个处理 10 kg 番茄秸秆, 按调节堆料碳氮比至 20 : 1 的量将调理剂加入到番茄秸秆中进行混合堆肥, 添加量如表 2 所示, 每个处理 3 次重复。添加调理剂后, 加入发酵物总质量 3% 的 EM 菌剂, 将相对含水量调至 60% 左右, 混合均匀, 采用静态高温堆腐。为保证堆体充分进行好氧发酵, 每 15 d 进行 1 次翻堆, 堆肥周期为 75 d。

表 2 不同处理堆肥原料使用量

处理	堆肥原料使用量(kg)			
	番茄秸秆	菇渣	牛粪	猪粪
T1	10.00	17.77	0	0
T2	10.00	0	29.62	0
T3	10.00	0	0	9.52
T4	10.00	8.89	14.81	0
T5	10.00	8.89	0	4.76

1.3 冬季大棚环境试验

供试大棚为 2 个结构相同的非对称塑料大棚。主要结构参数为跨度 17 m(南屋面跨度 10 m, 北屋面跨度 7 m), 长度 30 m, 脊高 5.1 m, 镀锌钢桁架结构; 覆盖材料为聚乙烯(PE)膜和保温被。其中, 以酿热大棚(T - G)作为试验棚, 在棚内北侧建有长 30 m、宽 1 m、深 1 m 的酿热槽, 以无酿热槽的普通非对称塑料大棚为对照棚(CK - G)。酿热大棚中酿热槽内所加堆肥原料为堆肥试验选出的产热效果最好的组合, 填充高度为 0.8 m, 酿热槽表面覆薄膜。

1.4 测定项目和方法

堆肥试验中在堆制 0、15、30、45、60、75 d 时取样测定电导率(EC)值和 pH 值。EC 值和 pH 值分别用电导率仪和 pH 计测定^[13]。堆肥结束后参照郭世荣的方法^[14]测定容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度。堆体温度和大棚环境数据的测定采用哈尔滨物格环境记录仪, 其中, 堆体温度取堆体中心温度, 大棚环境数据取自大棚中心距地面 1.5 m 处。

1.5 数据处理

利用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 进行数据处理分析, 采用 Excel 2013 绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同调理剂对番茄秸秆堆肥过程中堆体温度的影响

堆肥发酵过程主要是微生物通过新陈代谢对有机物进行降解的过程, 因此, 堆体温度的变化可反映微生物新陈代谢的强度和有机物的分解进程^[12]。由图 1 可知, 番茄秸秆添加不同调理剂后, 各堆体温度均呈先上升后下降的变化趋势, 即均经历了升温期、高温期和降温腐熟期, 说明添加的 5 种不同调理剂均可使番茄秸秆进行有效的发酵分解。在初期, 好氧微生物迅速分解有机物, 并释放大量热量, 堆体温度快速升高。有研究表明, 发酵温度在 40 ~ 65℃之间为最佳发酵温度, 当温度高于 55℃时, 可以使一些病原微生物死亡^[15]。本研究中各堆体温度在堆制第 2 天时均达到 50℃以上, T1、T2、T3、T4、T5 处理高于 50℃的堆体温度分别持续 4、6、12、8、6 d, 其中, T3 处理可达到的最高温度为 63.9℃。根据中国粪便无害化卫生要求^[16], 在发酵过程中温度能够在 50℃以上维持 5 ~ 7 d, 即可达到无害化标准, 说明添加不同调理剂后的番茄秸秆堆肥均达到了这一标准。此外, 冬季大棚内温度较低且持续时间较长, 为保证作物生长要求, 堆肥要维持较长时间的热量供应。T1、T2、T3、T4、T5 处理高于 35℃的天数分别可维持 28、21、44、22、41 d。表明番茄秸秆添加猪粪发酵酿热效果最好, 其次为菇渣 + 猪粪。

2.2 不同调理剂对番茄秸秆堆肥过程中 pH 值的影响

pH 值在发酵过程中是影响微生物活动的重要因素, 也是评价发酵物是否腐熟的重要指标之一^[11]。在发酵过程中, 中性或者弱碱性的环境适宜微生物的生活, pH 值一般在 6.7 ~ 8.5 之间。从图 2 可知, 在整个发酵过程中, 堆肥都呈碱性, 这与前人研究结果^[5, 17]一致。堆肥过程中 pH 值的变化主要由有机氮矿化形成的铵态氮含量、乙酸和丁酸等有机酸的分解以及氨气的挥发决定^[18-19]。在番茄秸秆堆制过程中, T1、T2、T3 处理的 pH 值均呈现出先上升后下降的趋势。堆肥前期, 加入微生物分解有机氮形成铵态氮, 导致 pH 值升高, 而

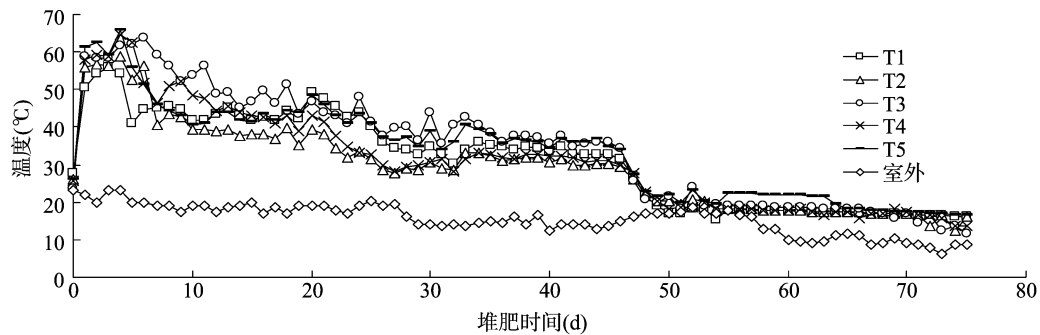


图1 不同调理剂对番茄秸秆堆肥过程中温度的变化

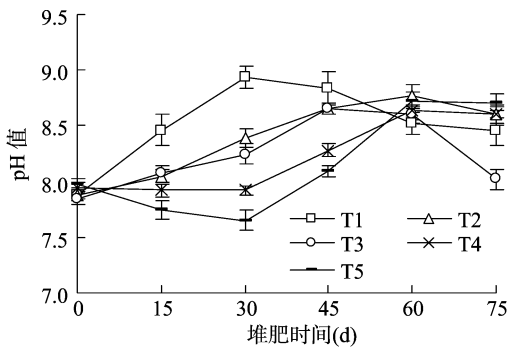


图2 不同调理剂对番茄秸秆堆肥过程中 pH 值的影响

调理剂的堆体 EC 值过高,而菇渣作为食用菌栽培基质,主要成分为粗蛋白、粗脂肪和纤维素等不溶性有机物^[11],随着微生物的分解利用其 EC 值变高。

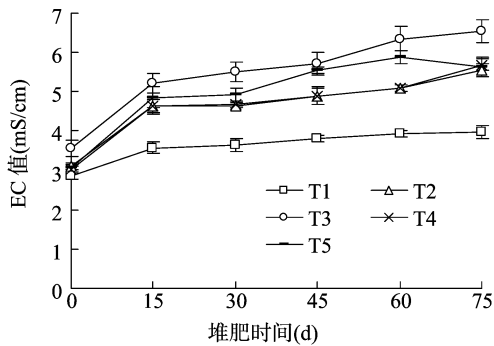


图3 不同调理剂对番茄秸秆堆肥过程中 EC 值的影响

在中后期微生物的矿化作用减弱,硝化细菌开始活跃,将铵态氮通过硝化作用转变为硝态氮,pH 值降低。T4、T5 处理的 pH 值在前期变化不明显,中后期升高后又有所下降,同时 T4、T5 处理在堆肥的中后期也可维持较高的温度,表明番茄秸秆堆肥过程中添加菇渣+猪粪和菇渣+牛粪有助于有机物后期的分解。

2.3 不同调理剂对番茄秸秆堆肥过程中 EC 值的影响

EC 值的高低可表征可溶性盐含量的多少,适宜植株生长的 EC 值应低于 2.0 mS/cm,若高于 3.5 mS/cm,则会抑制植株的正常生长^[20-21]。不同调理剂对番茄秸秆堆制过程中 EC 值的影响相似,均在发酵 0~60 d 内,EC 值总体呈现出上升趋势,之后相对稳定(图 3)。T3 处理的 EC 值一直最高,T1 处理的 EC 值最小。发酵完成后各处理 EC 值均大于 3.6 mS/cm,T3 处理的 EC 值最大,为 6.5 mS/cm,T1 处理最小,为 4.0 mS/cm,其他处理在 5.5~5.7 mS/cm 之间。这可能是由于猪粪自身含有较多的可溶性盐^[22-23],导致以其作为

2.4 不同调理剂对番茄秸秆堆肥物理性质的影响

堆肥发酵腐熟后可用作作物生长栽培基质,其物理性质对作物生长有很大的影响。研究认为,适宜作物生长的基质容重为 0.1~0.8 g/cm³,总孔隙度为 54%~96%^[24]。由表 3 可知,添加不同调理剂的番茄秸秆腐熟后容重和总孔隙度差异不显著,容重在 0.35~0.45 g/cm³ 之间,总孔隙度在 85%左右,与耿风展等的结果^[5]相一致。这表明腐熟后的基质均适宜作为作物栽培基质。基质总孔隙度由大孔隙和小孔隙构成,大孔隙反映了基质的通气性,而小孔隙反映了基质的持水性。腐熟后的堆肥大小孔隙比由大到小为 T3 处理>T2 处理>T5 处理>T4 处理>T1 处理,可见添加菇渣可增加番茄秸秆腐熟后的持水性。

表 3 不同调理剂对番茄秸秆堆肥物理性质的影响

处理	容重 (g/cm ³)	总孔隙度 (%)	大孔隙度 (%)	小孔隙度 (%)	大小孔隙比
T1	0.384±0.029a	87.17±6.12a	14.35±0.92b	72.82±3.72a	1:5.07
T2	0.399±0.019a	86.12±7.67a	20.32±1.31a	65.80±5.93ab	1:3.23
T3	0.431±0.036a	85.38±5.31a	22.56±1.98a	62.82±4.02b	1:2.78
T4	0.394±0.028a	86.35±6.92a	16.41±0.83ab	69.94±6.92a	1:4.26
T5	0.413±0.041a	85.06±3.34a	18.74±1.25a	66.32±4.92ab	1:3.54

注:同列数值后不同小写字母表示处理间 0.05 水平上差异显著。

2.5 堆肥酿热对冬季塑料大棚气温的影响

选取杨凌地区最冷时节(12 月份和 1 月份)为代表时期,对普通大棚和添加堆肥酿热设施的大棚环境进行比较,结果见图 4。堆肥制作于 2015 年 11 月 25 日,原料为番茄秸秆,添

加酿热效果最好的猪粪为调理剂。在 2015 年 12 月至 2016 年 1 月期间,堆体温度均维持在 35℃ 以上,较秋季堆肥维持时间长,而最高温度较秋季堆肥低,说明低温影响了微生物活性,延长了堆肥发酵时间。2 试验大棚室内日平均气温变化

趋势基本一致,但酿热棚日平均气温始终高于对照棚。酿热棚、对照棚和室外 2015 年 12 月 1 日至 2016 年 1 月 25 日平均气温均值分别为 13.1、8.9、1.6 °C,酿热棚内日平均气温比对照棚平均高 4.2 °C。该时间段内酿热棚共有 6 d 室内平均

气温低于 10 °C;有 9 d 室内平均气温高于 15 °C;其他时间室内平均气温均在 10~15 °C 范围内。对照棚共有 17 d 室内平均气温高于 10 °C;其他时间室内平均气温均在 0~10 °C 范围内。这表明堆肥酿热可提高冬季大棚内的环境温度。

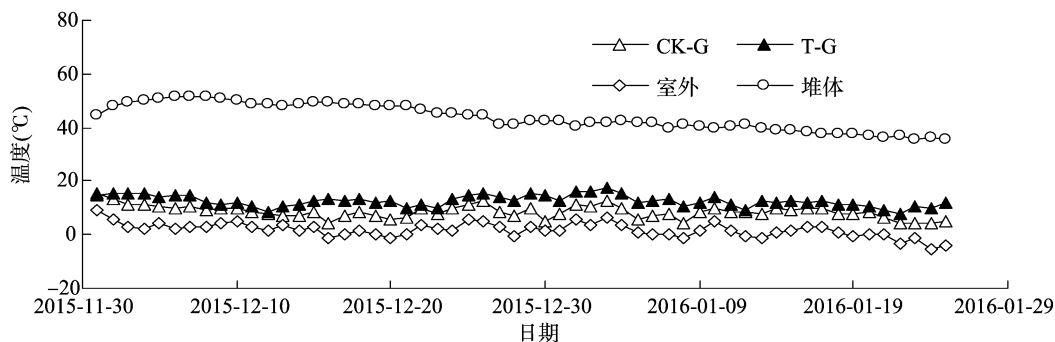


图4 堆体及大棚内外日平均气温变化

冬季对作物生长影响最大的是最低温度以及最低温度持续的时间。通过对比酿热棚和对照棚内最低气温发现,酿热棚内日最低气温较对照棚平均高 4.6 °C (图 5)。在 2015 年 12 月 1 日至 2016 年 1 月 25 日期间,酿热棚中日最低气温低于 10 °C 的有 46 d,其中仅有 4 d 低于 5 °C;而对照棚除 12 月 1 日外均低于 10 °C,其中有 41 d 低于 5 °C。植物生长要求气

温不能低于最低温度,半耐寒性植物如甘蓝类通常要求冬季温度在 0 °C 以上,喜温性植物如番茄在低于 10 °C 时生长不良,长时间低于 5 °C 能引起冻害^[25],说明在本试验条件下,通过堆肥酿热完全可满足冬季大棚中半耐寒性植物的生长温度需求,也可满足喜温性植物的生长最低温度需求,但为防止发生冻害在低温天需采取临时加温措施。

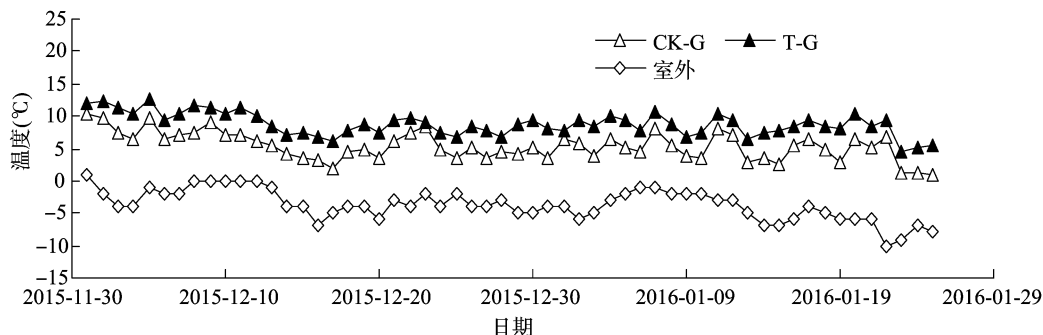


图5 大棚内日最低气温的变化

2.6 晴天堆肥酿热对大棚环境的影响

典型晴天(2015 年 12 月 16 日)酿热棚和普通棚内气温、湿度及 CO₂ 浓度变化如图 6 所示。当天揭保温被时间为 09:00,盖保温被时间为 17:30。酿热棚全天平均气温为 17.7 °C,较普通大棚高 3.0 °C。在 09:00—17:30 时间段内,酿热棚和对照棚平均气温分别为 24.6 °C 和 24.1 °C,而在非采光时间段内酿热棚和对照棚气温分别为 13.6 °C 和 9.2 °C,这说明堆肥酿热有效地提高了冬季大棚夜间温度。在酿热棚内采用热流计测得的夜间酿热槽表面薄膜与空气的平均热流密度为 46.2 J/(m²·s),通过计算可得堆肥酿热向空气释放的总热量为 7.5 × 10⁷ J,平均释放热量为 5.0 × 10⁶ J/h。此外,酿热棚最大温差为 19.6 °C,对照棚最大温差为 26.3 °C,表明酿热棚较对照棚气温变化波动小。

酿热棚和对照棚中空气湿度差异不大且变化趋势大体一致,夜间较为平稳,白天随着气温升高而降低,中午达到最低,下午随着气温降低而升高。酿热棚的 CO₂ 浓度远远高于对照棚和室外 CO₂ 浓度。大棚内的 CO₂ 浓度在白天会逐渐降低,对照棚的 CO₂ 浓度在 13:00—17:00 时间段内低于室外。酿热棚和对照棚 09:00—17:00 平均 CO₂ 浓度分别为

1 883.6、483.7 mg/mL,酿热棚的 CO₂ 浓度比对照棚高 289.4%。植物光合作用的 CO₂ 饱和点一般为 1 000 mg/mL 左右^[26],说明对照棚 CO₂ 浓度远远不能满足植物光合作用的需求,在酿热棚中微生物通过新陈代谢分解有机物产生的 CO₂ 可以为植物光合作用提供充足的原料。

2.7 阴雪天堆肥酿热对大棚环境的影响

典型阴雪天(2015 年 12 月 12 日)酿热棚和对照棚环境变化如图 7 所示。该日是降雪后第 2 天,当天未揭保温被。酿热棚、对照棚、室外空气平均温度分别为 8.8、5.5、-1.2 °C,酿热棚内平均气温比对照棚高 3.3 °C。酿热棚、对照棚、室外最高气温均出现在 12:00 左右,分别为 11.7、8.0、1.5 °C;酿热棚和对照棚最低气温均出现在 24:00 左右,分别为 4.9 °C 和 2.9 °C,室外最低气温出现在 07:00 左右,为 -2.6 °C。可见,阴雪天酿热棚和对照棚内最大温差分别为 6.8 °C 和 5.1 °C。

在酿热棚和对照棚中,由于未揭保温被空气湿度和 CO₂ 浓度变化幅度不大。酿热棚和对照棚中全天平均空气湿度分别为 94% 和 96%,且最低空气湿度均保持在 80% 以上,说明添加酿热物对阴雪天大棚内空气湿度影响不大。酿热棚中

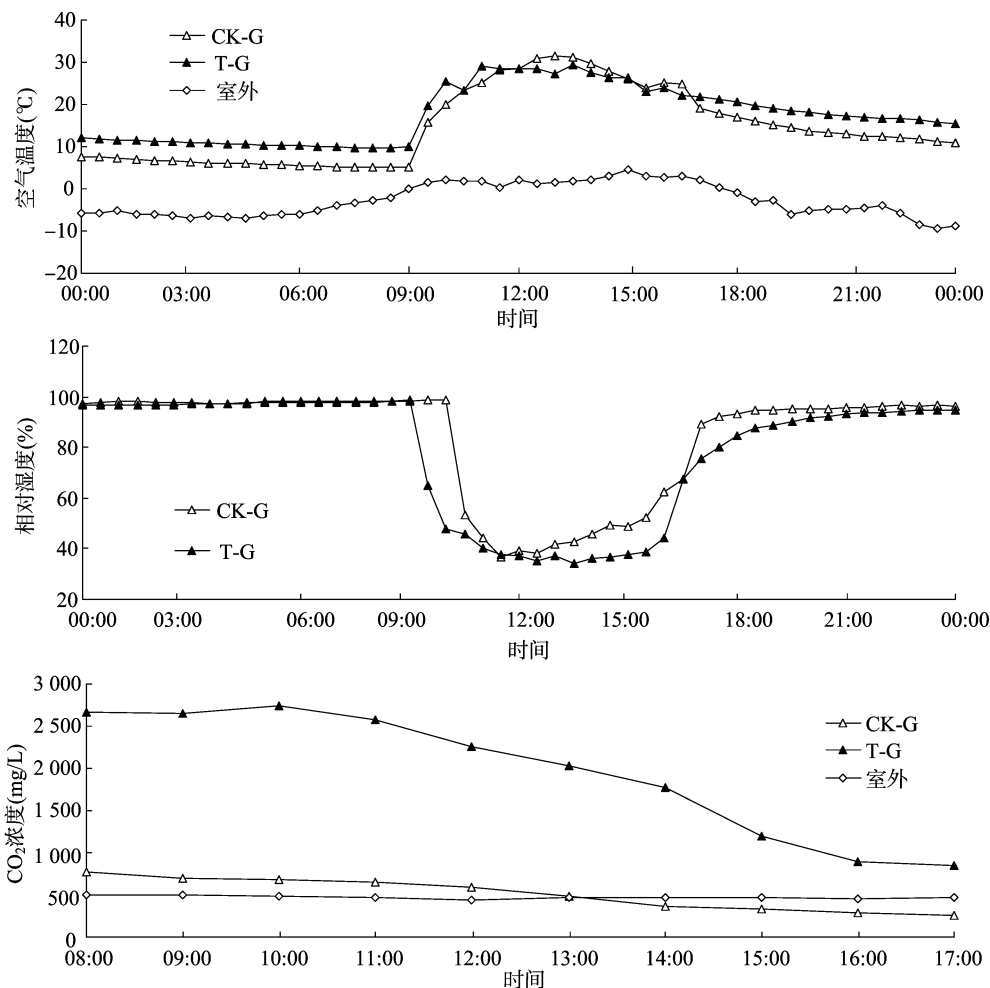


图6 晴天堆肥酿热对大棚环境的影响

CO₂ 浓度远远高于对照棚,09:00—17:00 平均 CO₂ 浓度达到了 2 298.3 mg/L,是对照棚的 4.1 倍。

3 结论

番茄秸秆堆肥采用猪粪为调理剂时有较高的发酵温度且持续时间较长,发酵腐熟后除 EC 值偏高外,pH 值、总孔隙度及大小孔隙度比例均适宜,所以调整 EC 值后可作为理想的栽培基质。

利用番茄秸秆堆肥产生的热量,可改善冬季大棚内的环境条件。通过堆肥酿热可使冬季大棚内平日均气温提高 4.2 ℃,日最低气温平均提高 4.6 ℃。酿热棚中低于 10 ℃的天数明显减少,这主要是由于堆肥酿热有效地提高了冬季大棚夜间温度。此外,通过堆肥还可提高大棚内 CO₂ 浓度,而对大棚内空气湿度变化影响不大。

参考文献:

- [1] 崔世茂,陈源闽,霍秀文,等. 大棚型日光温室设计及光效应初探[J]. 农业工程学报,2005,21(2):214-217.
- [2] 王明喜,崔世茂,王红彬,等. 大棚型日光温室光照、温度及湿度等性能的初步研究[J]. 农业工程技术(温室园艺),2008(5):19-21.
- [3] 孙亚文,彭贵喜. 秸秆发酵技术在蔬菜大棚中的应用[J]. 农业

- 科技与装备,2010(12):50-51.
- [4] 霍建勇. 中国番茄产业现状及安全防范[J]. 蔬菜,2016(6):1-4.
- [5] 耿凤展,李荣华,高波,等. 番茄秸秆高温堆肥作为番茄育苗基质的循环利用研究[J]. 中国土壤与肥料,2016(1):102-106.
- [6] 李丹阳,李恕艳,李国学,等. 添加剂对猪粪秸秆堆肥的氮素损失控制效果[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):260-267.
- [7] Dobeic M, Ocepek M, Kozuh - Erzen N, et al. Doramectin degradation and bacterial community during sheep manure composting [J]. Slovenian Veterinary Research, 2013, 50(4):173-182.
- [8] Bernai M P, Paredes C, Sánchez - Monedero M A, et al. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes[J]. Bioresource Technology, 1998, 63(1):91-99.
- [9] Wakjira M, Berecha G, Tulu S. Allelopathic effects of an invasive alien weed *Parthenium hysterophorus* L. compost on lettuce germination and growth [J]. African Journal of Agricultural Research, 2009, 4(11):1325-1330.
- [10] 倪姆姊,陈志银,程绍明. 不同填充料对猪粪好氧堆肥效果的影响[J]. 农业环境科学学报,2005,24(增刊1):204-208.
- [11] 张建华,田光明,姚静华,等. 不同调理剂对猪粪好氧堆肥效果的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(3):131-135.
- [12] 胡伟桐,余雅琳,李喆,等. 不同调理剂对生物沥浸污泥堆肥氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(12):2379-2385.

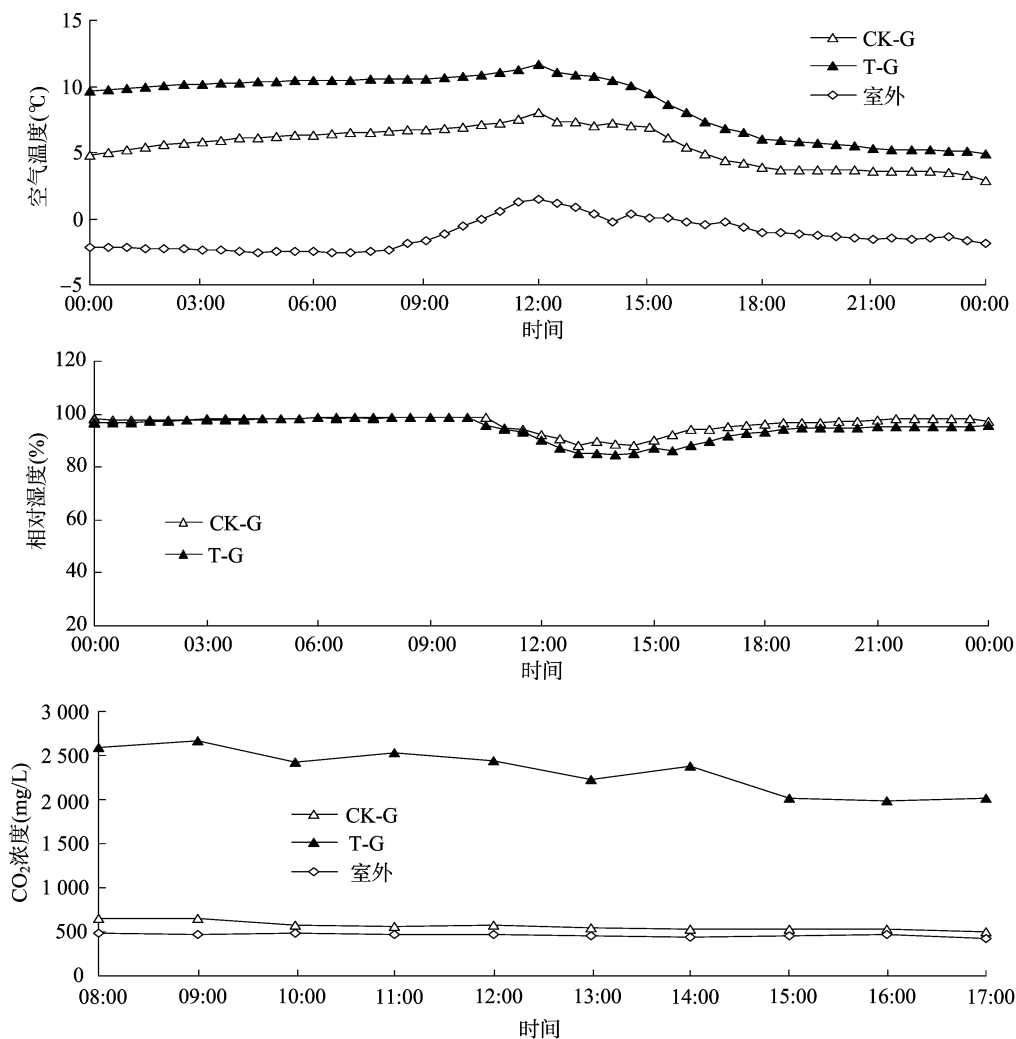


图7 阴雪天堆肥酿热对大棚环境的影响

- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000:183-187.
- [14] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003:135-137.
- [15] 宋彩红, 贾璇, 李鸣晓, 等. 沼渣与畜禽粪便混合堆肥发酵效果的综合评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 227-234.
- [16] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 粪便无害化卫生要求: GB 7959—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- [17] 李光义, 李勤奋, 张晶元. 木薯茎秆基质化的堆肥工艺及评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 320-325.
- [18] 李霞, 严永路, 尹崧, 等. 鸭粪与芦苇皮、水草高温好氧堆肥试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 620-625.
- [19] Barrington S, Choinière D, Triguí M, et al. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses[J]. Bioresource Technology, 2002, 83(3): 189-194.
- [20] 朱维琴, 贾秀英, 王玉洁, 等. 农业有机废弃物蚯蚓堆制因素优化及堆制产物主要性状变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 77-82.
- [21] Garcia C, Hernández T, Costa F. Study on water extract of sewage sludge composts[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1991, 37(3): 399-408.
- [22] 朱建春, 李荣华, 张增强, 等. 陕西规模化猪场猪粪与饲料重金属含量研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 98-104.
- [23] 晏红梅. 猪粪成分分析与热值模型的构建[D]. 武汉:华中农业大学, 2013:16-18.
- [24] 焦永刚, 石琳琪, 董灵迪, 等. 蔬菜无土栽培基质初步筛选研究[J]. 河北农业科学, 2010, 14(9): 26-28.
- [25] 朱立新, 李光晨. 园艺通论[M]. 4 版. 北京:中国农业大学出版社, 2015:23.
- [26] 叶子飘, 于强. 光合作用对胞间和大气 CO₂ 响应曲线的比较[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2233-2238.