

主动通风酿热产物在番茄基质栽培中的应用研究

石 苗¹, 曹晏飞^{1*}, 刘福昊¹, 郭申伯¹, 丁娟娟², 李建明¹, 孙国涛³

- (1. 西北农林科技大学园艺学院, 农业农村部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 沈阳农业大学园艺学院, 设施园艺省部共建教育部重点实验室, 辽宁省设施园艺重点实验室,
辽宁 沈阳 110866; 3. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为了探讨主动通风酿热补气系统发酵产物作为番茄栽培基质对番茄生长发育及产量、品质的影响, 以体积比为 3:1 的秸秆和牛粪为原料, 进行了为期 60 d 的主动通风式高温好氧堆肥。将好氧堆肥产品以体积比 100% (T_1)、33.3% (T_2)、0% (CK) 的比例与市面上购买的基质混合, 比较不同基质条件下番茄的生长发育情况; 探讨主动通风高温好氧堆肥作为番茄生长基质的可行性, 为主动通风式酿热的产物基质化利用提供理论支撑。结果表明: (1) T_2 复配基质培育的番茄株高、茎粗显著优于 CK 和 T_1 ; (2) T_1 的光合作用高于 T_2 , 但 T_2 的净光合速率显著高于 T_1 , 为 $28.25 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; (3) T_2 栽种番茄的产量达 $4.78 \text{ kg}/\text{株}$, 比 CK 显著增产了 43.3%, 比 T_1 高出 13.7%。综合分析以上指标, 主动通风式酿热条件下的堆肥产物可以作为栽培基质。其中主动通风式酿热产物以 33.3% 的体积比混合市面上购买的基质形成的复配基质作为栽培基质得到的番茄植株生长效果最佳。

关键词: 秸秆; 牛粪; 好氧堆肥; 基质栽培

目前常用的育苗基质多为草炭、蛭石等无机基质, 其有机质和纤维素含量丰富, 也是良好的作物栽培基质^[1]。但由于其不可再生性, 过度开采会破坏湿地环境, 温室效应加剧^[2]。因此国内外研究人员^[3-6]研究农业废弃物的处理以代替无机基质, 被广泛应用于农作物育苗和栽培的基质原料。秸秆和牛粪含有丰富的纤维素、木质素以及营养元素, 将其堆肥腐熟后作为基质使用可增加其有效利用率。

近年来我国农业产业结构朝着现代化、集约化的方向调整^[7], 农业废弃物量逐年增加。每年都会有 38 亿 t 的畜禽粪污产出, 综合利用率却不到 60%, 具有广阔的利用空间^[8-9]; 以秸秆为代表的农业废弃物产量也在此调整方向下激增, 我国每年秸秆产量可达到 9.8 亿 t^[10]。堆肥是针对有机固体废物被国内外长期广泛应用研究使其无害化、资源化的一种手段^[11], 也是提高经济和环境效益的有效管理手段^[12-13]。高温好氧堆肥在发酵过程中可

以杀灭大量病原菌、灭活草籽、降解农药、抗生素和重金属^[14-16]。基于发酵基质的优点, 设施内无土基质栽培大多都采用了农业废弃物堆肥作为栽培基质, 且研究人员认为^[17-19]腐熟后的发酵基质占合适比例与其它物质如园土、无机基质等的混配基质更有利于作物的生长, 改善农产品的风味和品质。

堆肥材料的种类^[20]和堆肥条件如 C/N^[21]、含水率^[22]、通风^[23]等都是影响堆体温度和腐熟度的重要因素。堆体温度不足会影响堆肥腐熟效率和毒性, 堆肥产品质量甚至达不到国家规定的无害化标准^[24]。目前大体量堆肥以室外静态堆肥为主^[25-26], 在露天环境下仅通过翻堆或自然通风进行好氧发酵, 氧气供应不足条件下极易形成厌氧发酵, 影响堆肥质量^[27]。

本试验利用主动通风式酿热的产物, 探究在主动通风式好氧发酵条件下秸秆和牛粪混合物堆肥作为番茄栽培基质的可行性, 通过观察测定番茄的生长发育情况, 判断室内主动通风堆肥方式下的发酵产物是否有利于番茄的生长发育, 从而为农业废弃物在室内资源化循环利用提供依据。

1 材料与方 法

本试验在杨凌现代农业融合体验园 (34.31°N , 107.97°E) 的双拱双膜非对称大跨度保温塑料大棚

收稿日期: 2022-02-20; 录用日期: 2022-05-20

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2019TSLNY01-03); 陕西省技术创新引导专项 (基金) 项目 (2021QFY08-02); 现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目 (CARS-23-C05)。

作者简介: 石苗 (1996-), 硕士研究生, 研究方向为生物质能源发酵利用。E-mail: 18846829645@139.com。

通讯作者: 曹晏飞, E-mail: caoyanfei@nwsuaf.edu.cn。

内进行。该大棚坐北朝南, 跨度为 18 m, 南屋面水平投影宽度 12 m, 北屋面水平投影宽度 6 m, 东西延长 70 m, 脊高 6 m。所用试验材料为大跨度大棚里主动通风发酵池内发酵所得的产物, 发酵池长 7 m, 宽 2 m, 深 2 m (其中地下深 1.2 m, 地上高 0.8 m)。所述发酵池如图 1 所示。

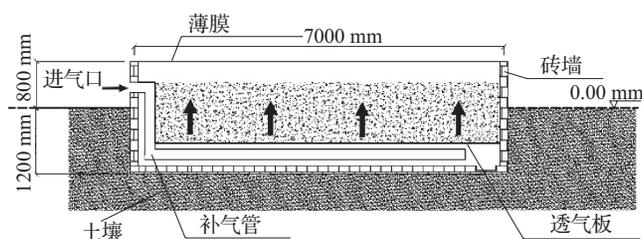


图 1 发酵池剖面图

1.1 试验材料与设计

试验所利用的供试基质采用的是秸秆(番茄秸秆、玉米秸秆):牛粪以 3:1 的体积比进行为期 60 d 的主动通风发酵腐熟后形成的发酵产物。栽培作物是番茄, 供试品种为“普罗旺斯”, 栽培方式为基质袋栽培, 七叶一心定植, 定植时间为 2020 年 1 月 19 日。试验设两个试验组和 1 个对照组, 均位于大棚南端相邻位置。试验组 1 (T_1) 是完全采用主动通风条件下发酵好的堆肥产物作为基质进行作物栽培, 试验组 2 (T_2) 采用的基质是由市面上购买的发酵基质与本系统发酵的基质以 3:1 的体积比混合而成, 对照组 (CK) 采用的是市面上购买的发酵基质(室外大体量静态堆肥产物, 堆肥原料为牛粪和秸秆)。番茄留 5 穗果摘心。其余管理一致, 包括浇水和追肥。定植前浇透定植水, 开花前尽量不浇水。可根据叶片光泽、皱缩表现或基质的松散程度判断浇水时间, 坐果前期一般 10 ~ 14 d 浇一次水, 坐果后适当增加浇水频率, 保持基质见干见湿(以湿为主), 5 ~ 7 d 浇一次水。选择晴天上午浇水, 阴天少浇或不浇。从开花期开始增施均衡肥料(N-P-K), 结果期改施高钾肥, 一穗果施一次肥, 施肥量为 100 kg/hm²。另外, 定期补充叶面肥, 如: 硼肥、钙肥等。

1.2 测定指标与方法

定植后每处理选取 10 株生长正常且长势一致的植株开始测量其株高、茎粗, 并在植株成熟结果后计算产量。

1.2.1 番茄植株生长指标的测定方法

株高: 用卷尺测定茎基部到生长点的高度

(cm); 茎粗: 利用游标卡尺测定子叶下方茎的直径(mm); 果形指数: 利用游标卡尺分别测定果实的纵径和横径, 纵横径比即为果形指数。

1.2.2 番茄叶片生理指标的测定方法

光合参数: 选取定植后第 36 d 的晴天上午(9:00 ~ 11:30), 使用 LI-6400 型光合仪(LI-COR, 美国)测定植株光合参数, 包括净光合速率(P_n)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)以及蒸腾速率(T_r)。

1.2.3 番茄果实产量的测定方法

采用单株记产, 使用电子天平(量程范围: 0 ~ 30 kg、精度 ± 10 g, 华鹰衡器有限公司, 中国)称重, 并计算平均单株产量。

1.3 数据处理与分析

数据采用 GraphPad Prism 8 绘图, 数据的单因素方差分析采用 DPS v7.05, 差异显著性检验($P < 0.05$)采用 Duncan 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 不同基质处理对番茄形态指标的影响

如图 2a 所示, 2020 年 1 月 20 日和 1 月 29 日各处理番茄株高差异不显著, 定植中后期即 2 月 21 日之后处理 T_2 的株高均显著高于 T_1 和 CK, T_1 与 CK 之间差异不显著。从图 2b 可知, 1 月 20 日 T_1 与 T_2 茎粗之间存在显著差异, T_1 显著大于 T_2 , CK 与 T_1 和 T_2 之间无显著性差异; 1 月 29 日, T_1 显著大于 T_2 、CK, T_2 与 CK 之间无显著性差异。2 月 21 日和 3 月 6 日, 除 T_2 显著粗于 T_1 和 CK 外, 其余各处理间均无显著性差异; 3 月 19 日, 处理 T_2 和 CK 的茎粗均显著粗于处理 T_1 , 且两处理间无显著性差异。总体来看, T_2 的营养生长(株高、茎粗)优于处理 T_1 和 CK。

2.2 不同基质处理对番茄叶片光合参数的影响

表 1 表明不同基质处理下植株的光合指标。 T_1 、 T_2 、CK 间的净光合速率变化差异不显著; T_2 的气孔导度显著大于 T_1 和 CK, 且 T_1 与 CK 之间无显著性差异; 胞间 CO₂ 浓度 T_1 与 T_2 、CK 之间均无显著性差异, 但 T_2 显著大于 CK; T_2 的蒸腾速率显著高于 T_1 和 CK, 且 T_1 与 CK 之间无显著性差异。总体上, T_2 的光合参数优于 T_1 和 CK, 其中净光合速率高出 T_1 15.0%, 高出 CK 2.1%; 胞间 CO₂ 浓度较 T_1 和 CK 分别增加了 3.7% 和 4.7%; 气孔导度较 T_1 和 CK 均增加了 38.9%, 蒸腾速率较 T_1 和 CK 分别增加了 16.0% 和 24.6%。

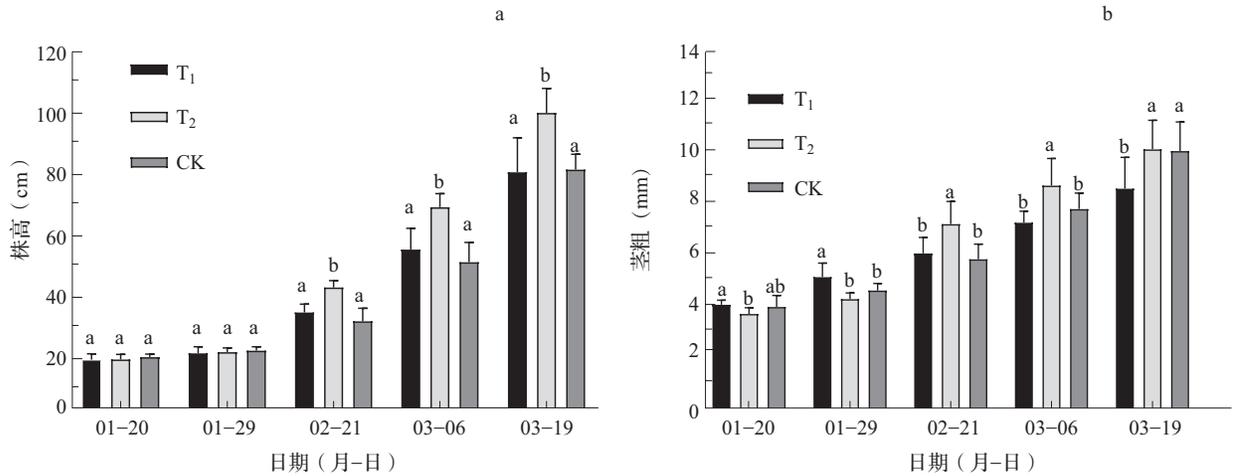


图2 不同基质处理对番茄株高、茎粗的影响

注: 不同小写字母表示相同日期不同处理之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

表1 不同基质处理番茄的光合特性

处理	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	气孔导度 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
T ₁	24.57 ± 1.06a	323.99 ± 5.65ab	0.72 ± 0.05b	7.96 ± 0.26b
T ₂	28.25 ± 0.65a	335.84 ± 3.45a	1.00 ± 0.06a	9.23 ± 0.32a
CK	27.67 ± 1.67a	320.65 ± 4.29b	0.72 ± 0.06b	7.41 ± 0.45b

注: 同一列不同小写字母表示不同处理之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

2.3 不同基质处理番茄叶片的光响应曲线

光合光响应曲线反映的是植物对光能吸收的能力, 能够综合全面反映植株的光合能力。图3是2020年4月26日(约定植后3个月)测得的光响应曲线, 可以看出, 3种不同基质处理番茄植株叶片的光合作用趋势一致。在一定范围内, 番茄叶片净光合速率随光强的增强而逐渐上升, 当达到饱和光强后, 净光合速率不再升高。在同一光强下, 净光合速率的大小为 $T_1 > T_2 > \text{CK}$ 。

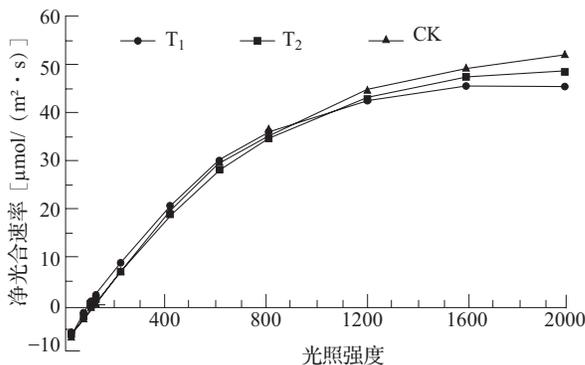


图3 光强对番茄叶片光响应参数的影响

2.4 不同基质处理对番茄产量的影响

不同基质处理的番茄单株产量、平均单果质量及平均单株果数测试结果如表2所示。由表2可知, T₁平均单株产量与T₂、CK之间差异不显著, T₂的平均单株产量显著高于处理CK。T₁的平均单株产量高出CK 26.1%, T₂的平均单株产量高出T₁ 13.7%、高出CK 43.3%。T₁、T₂的平均单果质量和平均单株果数显著大于CK的番茄平均单果质量和平均单株果数。其中T₁的平均单果质量和平均单株果数分别比CK增加10.07%和18.00%, T₂的平均单果质量和平均单株果数分别比CK增加18.1%和25.8%, T₂的平均单果质量和平均单株果数分别比T₁增加7.3%和6.6%。

表2 不同基质处理番茄平均单果重及单株果数

处理	平均单株产量 (g)	平均单果质量 (g)	平均单株果数 (个)
T ₁	4204 ± 229.15ab	164 ± 5.61ab	25.6 ± 1.03a
T ₂	4780 ± 292.75a	176 ± 10.09a	27.3 ± 1.00a
CK	3335 ± 437.20b	149 ± 9.36b	21.7 ± 1.73b

2.5 不同基质处理对番茄果实的影响

如图4所示, T_1 栽培的番茄果形指数显著优于 T_2 和 CK, T_2 与 CK 之间差异不显著。糖酸比的大小为 T_2 (10.00) > T_1 (9.54) > CK (9.51)。

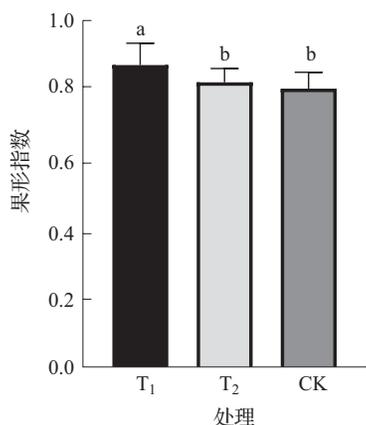


图4 不同基质处理对番茄果形指数的影响

3 讨论

本试验中 T_1 (100% 好氧发酵基质) 番茄的生长和生理指标不低于对照, 产量和品质显著优于对照, 表明以 100% 主动通风式好氧发酵得到的堆肥产物作为栽培基质可以满足番茄的生长需求。这与耿凤展^[28]、吴东升^[29]的研究结果一致。 T_1 与 CK 存在差异的原因可能是本试验所用的市面基质为农村合作社采用传统静态堆肥方式生产的发酵产物, 其内部易产生厌氧发酵, 影响了堆肥质量。

本试验中复配基质 T_2 (100% 好氧发酵基质 / 市面上购买的发酵基质 =1/3) 栽培条件下番茄的生长发育效果最好, 尤其是产量显著高出 T_1 和 CK。杨巍^[30]研究发现, 茶渣蚯蚓堆肥与其它无机质基质混合的复配基质处理下小白菜幼苗产量最佳。胡晓婷等^[31]研究得出将堆肥按一定比例混合园土作为栽培基质有效增强番茄的生长, 提升番茄果实的产量和风味。这与本试验复配基质对番茄生长发育影响表现最佳的结果一致。 T_1 、 T_2 的差异表现可能是由于主动通风式酿热所得产物养分过剩, 氮、磷、钾等元素含量超过番茄生长所需最适含量, 因此与市面上购买的基质混合后降低了养分含量, 达到最适要求, 栽培效果要好。

综上所述, 100% 主动通风式好氧发酵得到的堆肥作为栽培基质可以正常用于番茄的生长, 不会因为自毒作用对番茄生长发育造成显著影响, 且栽培

产量相较于用市面上购买的基质栽培的平均单株产量高出 26.1%。考虑主动通风酿热补气系统运行得到的好氧堆肥产物对番茄生长、产量和品质的影响, 以纯基质与市面上购买的基质混合以 1:3 (V/V) 的混配比例形成的复配基质种植番茄效果最佳, 栽培产量相较于纯堆肥基质栽培的平均单株产量高出 13.7%。

4 结论

本研究结果表明了主动通风式酿热所得的发酵产物基质化利用的可行性, 试验表明室内大体量主动通风式酿热的发酵产物可用于作物栽培, 且在一定程度上对番茄产量的提升具有促进作用, 为主动通风好氧堆肥条件下农业废弃物的循环利用提供了理论和实践依据。

参考文献:

- [1] 孟宪民. 我国泥炭资源的储量、特征与保护利用对策 [J]. 自然资源学报, 2006 (4): 567-574.
- [2] Gerald S, Hartmut F, 刘永和. 泥炭栽培基质是欧洲可持续园艺业的前提 [J]. 腐植酸, 2002 (4): 38-42.
- [3] 路杨, 任金平, 张金花, 等. 玉米秸秆堆肥对番茄产量和品质的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38 (5): 587-589.
- [4] Mira M A, Blazo L B, Jelenap J B, et al. Biopotential of compost and compost products derived from horticultural waste—Effect on plant growth and plant pathogens' suppression [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 121: 299-306.
- [5] 赵自超, 姚利, 付龙云, 等. 蔬菜废弃物堆肥对小油菜产量和品质的影响 [J]. 中国沼气, 2020, 38 (2): 71-74.
- [6] Fathie A Z, Xuan L H, Zaman N, et al. Growth performance and mineral analysis of *Pleurotus ostreatus* from various agricultural wastes mixed with rubber tree sawdust in Malaysia [J]. Bioresource Technology Reports, 2022, 17:100873.
- [7] 秦翠兰, 王磊元, 刘飞. 畜禽粪便生物质资源利用的现状与展望 [J]. 农机化研究, 2015, 37 (6): 234-238.
- [8] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (5): 1131-1148.
- [9] 中国物质再生协会. 《关于推进农业废弃物资源化利用试点的方案》解读 [J]. 中国资源综合利用, 2016, 34 (10): 15-16.
- [10] 钟磊, 栗高源, 陈冠益. 我国农作物秸秆分布特征与秸秆炭基肥制备应用研究进展 [J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39 (3): 575-585.
- [11] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [12] Cassandra P C B, Li Y L, Wai S H, et al. A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation

- strategies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 146: 149–157.
- [13] Mônica S S M C, Francieli H B, Luiz A M C. Composting as a cleaner strategy to broiler agroindustrial wastes: Selecting carbon source to optimize the process and improve the quality of the final compost [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2084–2092.
- [14] 刘子乐, 白林, 胡红文. 超高温堆肥及其资源化与无害化研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23 (1): 119–127.
- [15] 余震, 周顺桂. 超高温好氧发酵技术: 堆肥快速腐熟与污染控制机制 [J]. *南京农业大学学报*, 2020, 43 (5): 781–789.
- [16] Chen X, Zhao Y, Zeng C, et al. Assessment contributions of physicochemical properties and bacterial community to mitigate the bioavailability of heavy metals during composting based on structural equation models [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 289: 121657.
- [17] 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.
- [18] 韩庆典, 李宝庆, 谢宝东, 等. 不同栽培基质对设施水果黄瓜生长发育及品质的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (13): 140–143.
- [19] 胡晓婷, 陈丹艳, 牛博宇, 等. 番茄秸秆堆肥提高番茄果实风味的适宜添加比例研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (4): 611–619.
- [20] 张陆, 曹玉博, 王惟帅, 等. 鸡粪添加对蔬菜废弃物堆肥腐殖化过程的影响 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2022, 30 (2): 258–267.
- [21] 尹瑞, 张鹤, 邱慧珍, 等. 不同碳氮比牛粪玉米秸秆堆肥的碳素转化规律 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54 (5): 68–78.
- [22] 徐鹏翔, 沈玉君, 周海宾, 等. 原料含水率对筒仓式反应器堆肥氮素转化的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26 (11): 180–188.
- [23] 苟久兰, 罗文海, 袁京, 等. 通风速率对鸡粪-烟末联合堆肥腐熟度和污染气体排放的影响 [J]. *西南农业学报*, 2021, 34 (4): 872–879.
- [24] GB 7959–2012, 粪便无害化卫生要求 [S].
- [25] 山楠. 畜禽养殖固体废弃物不同堆置条件下碳氮气体排放规律研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [26] 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.
- [27] 孔建松, 郑玉琪, 陈同斌. 好氧堆肥过程中的氧气变化及其监测 [J]. *生态环境*, 2003 (2): 232–236.
- [28] 耿凤展. 番茄秸秆高温堆肥基质对番茄生长影响的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [29] 吴东升. 蔬菜秸秆堆肥对设施番茄生长、品质及产量的影响 [J]. *宁夏农林科技*, 2019, 60 (8): 1–4.
- [30] 杨巍. 不同有机物料的蚯蚓堆肥及其作为蔬菜育苗基质的研发 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [31] 胡晓婷, 陈丹艳, 牛博宇, 等. 番茄秸秆堆肥对番茄生长发育、产量及品质的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (1): 108–111.

Study on the application of active ventilation brewing heat products in tomato substrate cultivation

SHI Miao¹, CAO Yan-fei^{1*}, LIU Fu-hao¹, GUO Shen-bo¹, DING Juan-juan², LI Jian-ming¹, SUN Guo-tao³ (1. College of Horticulture, Northwest Agricultural & Forest University, Key Laboratory of Protected Horticulture Engineering in Northwest, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling Shaanxi 712100; 2. College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Key Laboratory of Protected Horticulture of Ministry of Education, Key Laboratory of Protected Horticulture of Liaoning Province, Shenyang Liaoning 110866; 3. College Mechanical and Electronic Engineering, Northwest Agricultural & Forest University, Yangling Shaanxi 712100)

Abstract: In order to prove that the function of the brewing heat products of the active ventilation brewing heat supplementing system as the substrate material is not lower than that of the fermentation substrate purchased in the market, straw and cow dung with a volume ratio of 3 : 1 were used as raw materials to carry out active ventilation high-temperature aerobic composting for a period of 60 days in this experiment. The aerobic composting products were mixed with the purchased substrates at a volume ratio of 100% (T₁), 33.3% (T₂) and 0% (CK), and the growth and development of tomatoes under different substrates were compared. This study aimed to explore the feasibility of active ventilation high temperature aerobic compost as tomato growth substrate, and provide theoretical support for the matrix utilization of the products of active ventilation brewing heat. The results showed as follows: (1) The plant height and stem diameter of tomato cultured with T₂ compound matrix were significantly better than those of CK and T₁; (2) The photosynthetic rate of T₁ was higher than that of T₂, but the net photosynthetic rate of T₂ was significantly higher than that of T₁, which was 28.25 μmol / (m² · s); (3) The yield of T₂ tomato was 4.78 kg/plant, 43.3% higher than CK and 13.7% higher than T₁. Based on the comprehensive analysis of the above indexes, compost products under the condition of active ventilation brewing heat can be used as the cultivation substrate. Among them, active ventilation brewing heat products with volume ratio of 33.3% mixed with the market purchased matrix as the compound matrix had the best effect on growth of tomato plants.

Key words: straw; cow dung; aerobic composting; substrate