

蚯蚓肥对温室番茄植株抗氧化能力的影响

姚 澜, 关之昊, 王业迪, 杨 真, 张新宇, 杨丽娟*

(沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘 要: 研究蚯蚓肥对温室番茄植株体内抗氧化能力的调节作用, 为提高设施栽培条件下蔬菜抗病、抗逆能力提供理论依据和技术支撑。温室内盆栽试验, 设置对照 (CK)、化肥 (CF)、牛粪 (CM) 和蚯蚓肥 (EM) 4 个处理。观测植株表型性状 (株高、茎粗、SPAD 值和叶面积), 并分别于番茄定植后 25 d、50 d 和 75 d 采集植株功能叶片和根系, 测定防御酶活性 (过氧化氢酶, CAT; 过氧化物酶, POD; 多酚氧化酶, PPO 和超氧化物歧化酶, SOD)、根系活力及丙二醛含量 (MDA)。结果表明: (1) 蚯蚓肥可显著增加番茄叶面积和根系活力, 对株高、茎粗、根系鲜重和叶片 SPAD 值以及根系丙二醛含量无显著影响; 随生育期的延长, 蚯蚓肥处理的根冠比呈上升趋势。(2) 根系和叶片防御酶活性变化趋势相似, 随生育期的延长, CAT 活性呈下降趋势, POD 活性呈上升趋势, PPO 和 SOD 活性呈先升高后下降趋势。蚯蚓肥可提高番茄的 CAT 和 POD 活性, EM 处理较其它处理增加 21.63%~511.2%; EM 处理的 PPO 活性较 CM 处理增加 54.6%~163.9%, CF 处理较 CM 和 EM 处理的 SOD 活性降低 23.32%~91.67%。(3) 相关性分析表明, 番茄叶面积与根系 POD 活性呈极显著正相关, 根系活力与叶片 POD 呈极显著正相关, 根系 POD 与叶片 POD、PPO 和 SOD 呈极显著正相关。设施蔬菜生产中适量施用蚯蚓肥, 在促进作物生长发育的同时, 可提高番茄植株的抗氧化能力, 增强作物的抗逆性和抗病性, 为作物高产和病虫害绿色防治奠定基础。

关 键 词: 蚯蚓肥; 设施栽培; 番茄; 防御酶; 根系活力; 丙二醛

中图分类号: S147.34; S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)02-0361-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020073001

姚 澜, 关之昊, 王业迪, 杨 真, 张新宇, 杨丽娟. 蚯蚓肥对温室番茄植株抗氧化能力的影响 [J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 361-368

YAO Lan, GUAN Zhi-hao, WANG Ye-di, YANG Zhen, ZHANG Xin-yu, YANG Li-juan. Effect of Antioxidant Capacity of Greenhouse Tomatoes by Vermicompost[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(2): 361-368

设施栽培条件下, 由于相对封闭的环境与不合理水肥药管理措施以及大量生长调节剂的盲目使用, 严重降低了设施栽培作物的抗氧化防御能力, 从而影响作物的抗病性和抗逆性。堆肥能诱导植物产生系统抗性^[1-2]。自然界中的有机农业废弃物, 经蚯蚓肠道系统中消化菌群的作用, 转化为含有丰富养分的蚯蚓肥, 对植物的作用效果要优于传统堆肥^[3-5], 而二者在生物降解有机质的过程中有诸多相似之处。因此, 明确蚯蚓肥对番茄植株抗氧化防御能力的调节效果, 对蚯蚓肥在设施蔬菜栽培中的合理应用具有重要意义。活性氧 (ROS) 会引起脂质过氧化损伤和 DNA 修饰, 产生不可修复的代谢和结构功能障碍^[6]。研究发现, 植物已经进化出一种抗氧化防御体系, 该体系包括超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化

氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 等酶, 以清除体内过量活性氧 (ROS), 但其自身防御机制不足以完全消除 ROS 和减轻植物的氧化损伤^[7-8]。张志刚等研究表明, 蚯蚓肥可通过提高茄果类蔬菜叶片的 CAT 和 POD 等抗氧化酶活性, 降低 ROS 对膜系统的攻击和破坏, 从而缓解膜系统脂质过氧化程度^[9]。在苹果连作棕壤土中发现, 添加蚯蚓肥或灭菌蚯蚓肥后可显著提高幼苗根系的抗氧化酶活性和根系呼吸速率^[10]。而不同肥料及配比对植物抗氧化酶活性的影响也有较大差异, 80% 蚯蚓肥和 20% 沙土配比可显著提高向日葵叶片中 POD 和 SOD 的活性^[11-12]。在盆栽基质中加入蚯蚓肥后, 也可通过启动植物体内的防御酶系, 从而诱导黄瓜产生系统抗性, 控制病害的发生^[2]。抗氧

收稿日期: 2020-07-30; 修订日期: 2021-01-29

基金项目: 辽宁省特聘教授项目、辽宁省科学研究经费-服务地方项目和国家重点研发计划项目 (2016YFD0201004) 资助

作者简介: 姚 澜 (1996-), 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要从事养分管理与资源利用研究。E-mail: syau_yl@163.com

*通讯作者: E-mail: syau_ylj@163.com

化酶活性与植物的抗病性和抗逆性呈正相关, 已被广泛用于指示植物的抗性能力^[13]。以往研究多关注施肥方式、施肥量、有机无机配施等方面对作物生长发育和改良土壤的作用, 而针对蚯蚓肥对植株体内防御酶活性的调节, 尚缺乏系统研究。通过分析不同时期番茄植株功能叶片和根系的抗氧化能力及植株生长表型性状, 探讨蚯蚓肥对番茄植株防御能力的调节效果, 为设施蔬菜绿色生产提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验于 2019 年 10 月在沈阳农业大学温室基地 (123°57'E, 41°83'N) 进行。共设 4 个处理, 分别为不施肥的对照 (Control, CK)、单施化肥 (Chemical fertilizer, CF)、牛粪 (Cow manure, CM) 和蚯蚓肥 (Vermicompost, EM), 随机区组设计, 每个处理 12 次重复。所有施肥处理的 N、P₂O₅、K₂O 养分总量相等, 分别为 0.23 g kg⁻¹、0.08 g kg⁻¹、

0.37 g kg⁻¹ 土壤, 牛粪和蚯蚓肥用量均为 3.91 g kg⁻¹ 土壤。为保证施肥处理间相等的 N、P₂O₅、K₂O 含量, 用化肥补充 EM 和 CM 处理中不足的养分。所有肥料均作为基肥一次性施入, 整个生长期不再追肥。定植时秧苗大小、长势基本一致。

1.2 试验材料

供试番茄品种为“安特莱斯”; 供试土壤采集于沈阳农业大学科研基地日光温室, 风干后过 2 mm 筛备用。土壤类型为棕壤, pH 为 6.60, 碱解氮 32.43 mg kg⁻¹, 有效磷 162.24 mg kg⁻¹, 速效钾 291.10 mg kg⁻¹。试验所用蚯蚓肥由本课题组提供, 经半腐熟牛粪饲养蚯蚓大平 2 号 (*Eisenia foetida*) 后过 2 mm 筛备用; 牛粪为上述喂养蚯蚓的半腐熟牛粪; 氮磷钾化肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。供试肥料养分含量见表 1。试验所用盆为聚乙烯塑料盆, 底部带孔, 上口直径 28 cm, 下口直径 20 cm, 盆高 25 cm, 按照容重约 1.30 g cm⁻² 土壤与肥料充分混匀后装盆, 每盆装土 12 kg pot⁻¹。

表 1 供试肥料基本养分
Table 1 Nutrient contents of the fertilizer used

养分含量 Nutrient content	尿素 Urea	过磷酸钙 Superphosphate	硫酸钾 Potassium sulfate	牛粪 Cow manure	蚯蚓肥 Vermicompost
N (g kg ⁻¹)	460.00	-	-	8.85	11.25
P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	-	120.00	-	21.09	19.04
K ₂ O (g kg ⁻¹)	-	-	500.00	7.23	4.13

1.3 样品采集及测定方法

1.3.1 植株生长发育指标 于定植 15 d 后至番茄第 3 穗果坐果掐尖止, 每隔 10 d 进行一次测定。利用卷尺测定植株株高; 游标卡尺测定茎粗; 选取从植株顶部数第 5~6 片外围完全展开、长势一致的功能叶, 用 SPAD-502 PLUS 叶绿素计测定叶片的 SPAD 值, 用 LI-3000C 叶面积仪测定叶片的叶面积; 分别于定植后的 25 d、50 d 和 75 d, 取植株根、茎、叶, 用自来水洗净后, 再用去离子水反复冲洗, 于 90 °C 的烘箱中杀青 30 min 后, 在 65 °C 条件下烘干至恒重, 用电子天平分别称重。

1.3.2 植株防御酶活性、根系活力及根系丙二醛含量 分别于定植后的 25 d、50 d 和 75 d 破坏性取样, 采集从植株顶部数第 5~6 片外围完全展开、长势一致的功能叶和根系, 鲜样于液氮中保存带回实验室, 存放于 -80 °C 冰箱中待测。参照王玲杰^[14] 的研究方

法测定过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD)、多酚氧化酶 (PPO) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性。采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法测定根系活力、用硫代巴比妥酸法测定根系丙二醛含量^[15]。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2013 和 Origin 9.1 进行数据处理及绘图; 用 SPSS 17.0 对数据进行差异显著性检验 (Duncan) 和 Pearson 相关性分析。

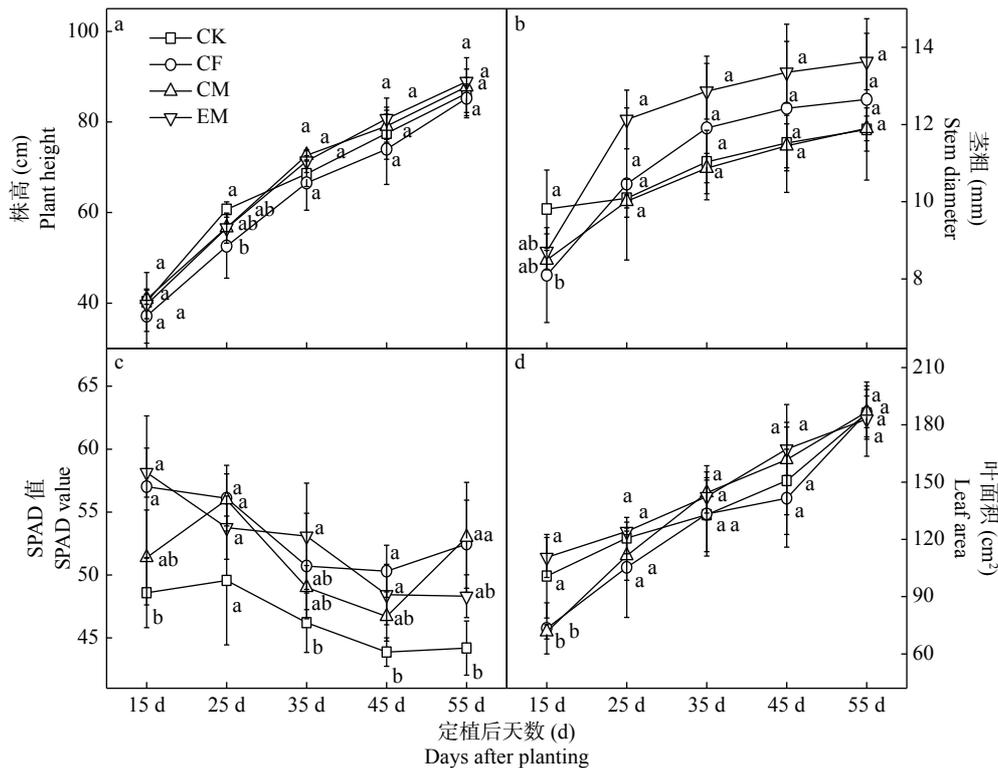
2 结果与分析

2.1 蚯蚓肥对番茄植株生长发育的影响

由图 1 中的 (a, b, d) 可以看出, 所有处理的株高、茎粗和叶面积变化趋势一致, 随着定植时间的延长, 株高、茎粗和叶面积均呈升高趋势。在定植后 15~25 d 时, 植株的株高和茎粗除 CF 与 CK 外, 其它处理间无显著性差异; EM 和 CK 处理的叶面积

显著高于 CM 和 CF 处理, 但其它处理间无明显差异。定植后 45~55 d 时, EM 处理的株高、茎粗和叶面积均高于其它处理, 但各处理间无显著差异。图 1 中的 (c) 可知, 在整个生育期内, CF 和 CK 处理的 SPAD 值呈先升高后下降的变化规律; EM 处理逐渐下降, 最后趋于平稳; CM 处理呈先升高后下降再

升高的变化规律。除定植后 25~45 d, EM 处理的 SPAD 值均显著高于 CK, 而其它处理间无明显差异。表明蚯蚓肥对番茄植株的 SPAD 值和叶面积均有显著的促进作用, 且蚯蚓肥对叶面积的作用效果显著高于牛粪。



注: 不同字母表示同一时间、不同处理的样本间差异达 5% 显著水平。下同。

图 1 不同生育期番茄植株生长发育状况

Fig. 1 Growth and development of tomato plants at different growth stages

2.2 蚯蚓肥对番茄植株根系表型性状及生理特性的影响

根系表型性状由图 2 中的 (a, b) 可知, 在定植 25 d~75 d 时, EM 处理的根系鲜重高于 CM 处理, 但无显著差异。观测期的根冠比在 0.02~0.08 范围内, 在定植后 50 d 时, CF、CM 和 EM 处理显著低于 CK 处理; 在生长发育中后期, CF、CM 和 EM 处理根冠比明显升高, 且与 CK 无明显差异。说明蚯蚓肥对番茄根系有促进作用, 但无显著差异。

根系活力由图 2 中的 (c) 可知, 随定植时间的延长, CM 和 CK 处理的根系活力呈逐渐升高的变化规律, EM 处理呈先下降后升高趋势, 且 EM、CM 和 CK 处理均在定植后 75 d 时达到最高; CF 处理的根系活力几乎不随番茄生育时期而变化。在整个生

育期内, EM 处理的根系活力高于其它处理, 且在定植 25 d 时差异均达 0.05 显著水平; 在定植 50 d 时, EM 和 CF 处理分别与 CK 有显著差异, 而其它处理间无明显差异。说明蚯蚓肥对于番茄根系活力的提高有明显的促进作用, 但牛粪和蚯蚓肥在中后期的作用效果没有较大差异。

根系 MDA 含量由图 2 中的 (d) 可知, 根系 MDA 含量 5.68~19.14 mmol g⁻¹, 各处理随定植时间的延长呈现先下降后增加的变化规律, 在定植 75 d 时达到最高。在整个生育期内, CK 处理的丙二醛含量显著高于其它处理, 但 EM、CM 和 CF 处理间无明显差异; 在定植后 75 d 时, CK 与 EM 和 CM 处理均有显著差异, 而其它处理间无显著性差异。说明蚯蚓肥处理对降低番茄根系的 MDA 含量有显著效

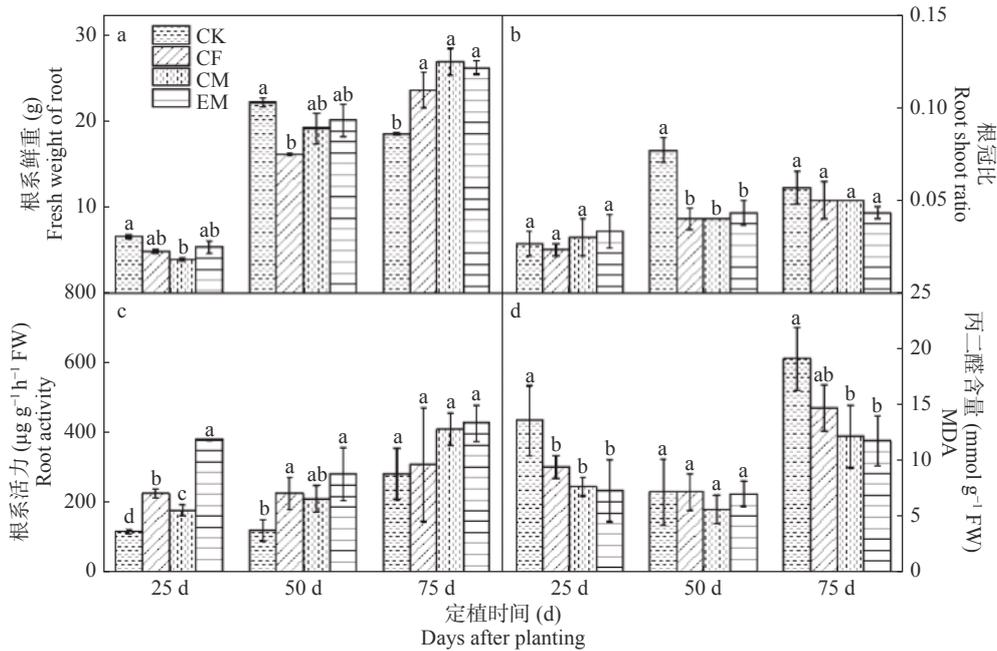


图 2 不同生育期番茄根系表型性状与根系活力及根系丙二醛含量

Fig.2 Phenotypic traits, root activity and root malondialdehyde content of tomato at different growth stages

果，但化肥和牛粪与蚯蚓肥间的作用效果无明显差异。

2.3 蚯蚓肥对番茄植株防御酶活性的影响

过氧化氢酶活性由图 3 中的 (A, a) 可知，随着定植时间的延长，除 EM 处理的叶片外，其它处理的根系和叶片 CAT 活性呈下降趋势；EM 处理的叶片呈现出先增加后下降的变化规律，在定植后 50 d 达到最高。在整个生育期内，叶片 CAT 活性除定植后 25 d 时，CM 与 EM 处理无显著差异外，均显著低于其它处理；定植后 25~50 d 时，EM 处理的根系 CAT 活性均高于其它处理，与 CM 和 CK 处理达 0.05 水平差异，但与 CF 处理无显著差异。

过氧化物酶活性从图 3 中的 (B, b) 可以看出，各处理的叶片和 CK、CM、EM 处理的根系 POD 活性呈现出一致的变化趋势。其中，定植后 25 d 的各处理叶片 POD 活性最低，为 17.46~67.36 U g⁻¹ min⁻¹ FW。随着定植时间的延长，叶片对 POD 的需求急剧增加，且在定植后 75 d，各处理之间叶片 POD 活性存在显著差异。而 EM 处理的根系 POD 活性增加趋势明显大于其它处理，在定植后 50~75 d 与其它处理有显著性差异。

多酚氧化酶活性由图 3 中的 (C, c) 可以看出，定植后 75 d，不同施肥处理间的叶片和根系 PPO 活性均有显著性差异，且各处理的根系 PPO 活性比叶片中分别高 115.32 U g⁻¹ min⁻¹ FW (CF)、108.77 U g⁻¹ min⁻¹

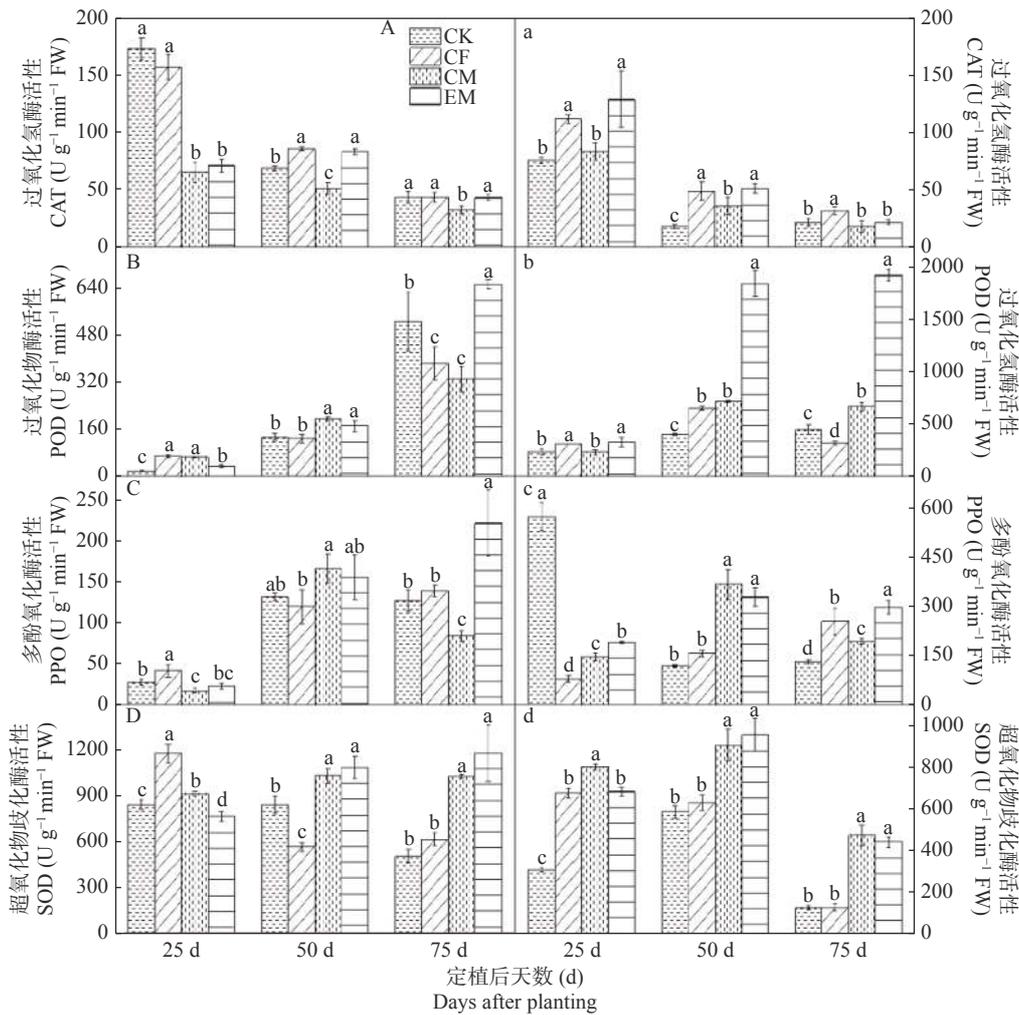
FW (CM) 和 76.04 U g⁻¹ min⁻¹ FW (EM)。定植 25 d，CK 的 PPO 活性最高，但随着生育期的延长，其活性显著低于其它处理。

超氧化物歧化酶活性由图 3 中的 (D, d) 可知，各处理叶片的 SOD 活性呈现出不同的变化趋势。CK 处理在定植 25~50 d 时 SOD 活性保持稳定，在定植 50~75 d 呈现下降趋势；CF 处理呈先升高后降低趋势；CM 和 EM 处理均呈升高趋势，EM 处理的升高幅度高于 CM 处理，二者在定植后 25 d 有显著性差异。在定植后 50~75 d，各处理番茄根系 SOD 活性均逐渐降低，CM 和 EM 处理均显著高于 CK 和 CF 处理，但 CK 与 CF、CM 与 EM 处理间无显著性差异。

表明蚯蚓肥能明显增强番茄植株的防御酶活性，而化肥处理的番茄叶片 CAT 和 SOD 活性，虽在番茄生育前期活性高，但在生育中后期其作用效果低于蚯蚓肥和牛粪处理，且蚯蚓肥对番茄根系 CAT、POD 和 PPO 活性的提高明显好于牛粪。

2.4 番茄植株表型性状和植株防御酶等指标间相关性分析

由表 2 可看出，叶片的 SPAD 值与植株株高、根系 CAT 分别呈极显著负相关或正相关。叶面积与株高、茎粗根系 POD 呈极显著正相关；与根系 CAT 呈极显著负相关。叶片 CAT 与株高、茎粗、根系活力呈极显著负相关；与根系 CAT 呈极显著正相关。叶片 POD 与株高、茎粗、根系活力、MDA、根



注: 大写字母表示番茄功能叶片防御酶活性, 小写字母表示番茄根系防御酶活性。

图 3 不同生育期番茄植株防御酶活性

Fig.3 Defense enzyme activities of tomato plants at different growth stages

表 2 番茄植株表型性状和植株防御酶活性等指标间相关性分析

Table 2 Correlation analysis between phenotypic traits and plant defense enzyme activities in tomato plants

	叶片 Leaf					
	SPAD值 SPAD value	叶面积 Leaf area	过氧化氢酶 CAT	过氧化物酶 POD	多酚氧化酶 PPO	超氧化物歧化酶 SOD
株高	-0.474..	0.914**	-0.673**	0.635**	0.834**	-0.078
茎粗	-0.304	0.812**	-0.499**	0.597**	0.814**	-0.073
根鲜重	-0.266	0.748**	-0.659**	0.709**	0.799**	0.044
根冠比	-0.255	0.448**	-0.490**	0.350*	0.430**	-0.229
根系活力	0.106	0.293	-0.494**	0.537**	0.253	0.122
丙二醛	-0.181	0.142	-0.089	0.558**	0.078	-0.371*
过氧化氢酶	0.651**	-0.810**	0.585**	-0.671**	-0.724**	0.110
过氧化物酶	-0.061	0.449**	-0.268	0.491**	0.708**	0.485**
多酚氧化酶	-0.154	0.021	0.307	-0.064	0.094	0.161
超氧化物歧化酶	0.233	-0.202	0.088	-0.521**	-0.048	0.521**

注: **表示在1%水平相关性显著, *表示在5%水平相关性显著。

系 POD 呈极显著正相关; 与根系 CAT、根系 SOD 呈极显著负相关, 且相关系数达 0.520 以上。叶片 PPO 与株高、茎粗、根系 POD 呈极显著正相关, 且

相关系数达 0.700 以上; 与根系 CAT 呈极显著负相关。叶片 SOD 与根系 POD、根系 SOD 呈极显著正相关, 与 MDA 呈显著负相关。

3 讨论

3.1 蚯蚓肥对番茄植株表型性状的影响

植株表型性状是植物抗病、抗逆能力高低的最直接表现,抗性较弱的植株表现出株高下降、茎粗减小和生物量降低等特点^[16]。而蚯蚓肥是一种环境友好型的生态有机肥^[17-20],可与土壤和植物根系组成特定的生态位^[21],提高植株的农学参数。前人研究表明,蚯蚓肥比牛粪显著增加葫芦单株叶片和花朵数,且降低了重金属含量;刺激温室绿豆的发芽率、枝条长度和根干重的增加^[22-23]。在设施番茄栽培中发现,蚯蚓肥对番茄的株高和茎粗有一定的促进作用^[24-26]。而在本试验中,蚯蚓肥比牛粪增大番茄苗期叶面积的效果显著,但对番茄株高、茎粗和 SPAD 值的作用效果不突出。结合蚯蚓肥也显著提高了番茄苗期根系活力水平分析,苗期是番茄根和叶等器官代谢能力活跃的关键期,加上蚯蚓肥作为基肥一次性施用,带入了丰富的微量元素及腐植酸、植物激素等活性物质,以及充足的水肥条件更利于番茄根系和叶片的生长;在番茄发育中后期开始出现生殖生长,番茄植株地上部的生理代谢活动增强,而地下部的生理代谢活动减弱,使发育中后期各处理间的表型性状及根系活力差异不显著。另外,也可能是因为本研究采用盆栽试验,土壤与植物生长环境受限,使蚯蚓肥的作用效应未完全释放。

蚯蚓肥用量也是影响设施蔬菜植株表型性状的因素之一。有研究表明,30% 蚯蚓肥比常规堆肥或其它用量的蚯蚓肥对番茄根生物量和根尖数的增加效果显著^[27]。PAPATHANASIOU^[28]等研究发现,冬茬 10% 蚯蚓肥处理的生菜叶片数最高,20% 蚯蚓肥处理的冬春两茬生菜叶干重最大(冬:11.67 g;春:15.35 g)。本研究使用 16% 的蚯蚓肥,对冬茬番茄苗期叶面积和根系活力的增加效果明显。对根系鲜重和根冠比的促进作用不显著,可能是由于本试验的蚯蚓肥施用量较低。冬茬番茄还受温室内环境条件的影响。由于北方冬季多降雪天气,日光温室内温度低、湿度大,且降雪天无光照时间多等原因,也会影响蚯蚓肥对番茄植株表型性状的作用。本研究只选择了植株表型性状中的 4 种,初步探讨了设施番茄植株表型性状对蚯蚓肥的响应,而蚯蚓肥对不同季节、不同类型设施蔬菜表型性状的影响还有待进一步研究,以便更好地指导设施蔬菜生产。

3.2 蚯蚓肥对番茄植株防御酶体系的影响

蚯蚓肥可以通过激活植物体内抗氧化防御系统(酶抗氧化剂和非酶抗氧化剂)来减轻环境因素诱导产生的氧化作用^[27]。氧化反应会产生大量的 H_2O_2 ,其会被过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)和超氧化物歧化酶(SOD)等防御酶作用下进一步转化。在本研究中,随着番茄生育时间的延长,根系和叶片的 CAT 活性均呈下降趋势,而蚯蚓肥可显著增加 CAT 活性。CAT 活性被认为是将 H_2O_2 转化为 H_2O 和 O_2 来清除活性氧的初始成分^[29]。相关研究表明,植物抗病品种或经诱导产生抗性的植株体内防御酶活性增强,这些酶类的活性与植物抗病性呈显著正相关^[30-31]。蚯蚓肥还可促进番茄植株体内 POD 和 PPO 活性的提高,与这些防御酶活性相比,CAT 的活性较低。在番茄生长发育中后期,CAT 的作用效果下降,而其它酶的作用能力升高,这些酶相互协同以减轻氧自由基对细胞膜系统的伤害,促进细胞清洁,这与 MEIRE^[32]等的研究结果一致。蚯蚓肥增加了番茄植株体内的 POD 和 PPO 活性,降低根系中丙二醛含量,且叶片中的 POD 和 PPO 活性与株高、茎粗和叶面积呈极显著正相关关系。这两种抗氧化酶均负责将二元以上的酚类物质氧化为木质素和醌类化合物,增强细胞结构,构成保护性屏蔽来促进防御屏障的形成,提高植物抗逆性^[33-34]。ARIENA^[35]等研究表明,堆肥诱导植物产生系统抗性的能力也取决于堆肥的种类。在本试验中,蚯蚓肥对番茄植株功能叶片和根系防御酶的诱导功能要强于牛粪。BALASUBRAMANI^[36]等研究发现,蚯蚓肥在堆肥的过程中产生了三种重要的植物激素(吲哚 3-乙酸、赤霉素、激动素),植物激素参与植物生长、发育和免疫的调节^[37],这可能是蚯蚓肥对番茄植株抗氧化防御酶的诱导作用强于牛粪的原因之一。

4 结论

蚯蚓肥可以增强温室番茄植株体内防御酶活性,提高根系活力,降低根系中丙二醛含量;蚯蚓肥主要通过调节番茄体内的过氧化氢酶、过氧化物酶和多酚氧化酶等抗氧化酶活性,促进植株的生长发育。蚯蚓肥作为一种优质的有机肥,在设施蔬菜生产中合理施用,有利于增强植株的抗逆性和抗病性,为作物绿色生产和高产稳产奠定基础。

参考文献:

- [1] Zhang W, Han D Y, Dick W A, et al. Compost and compost water extract-induced systemic acquired resistance in cucumber and Arabidopsis[J]. *Phytopathology*, 1998, 88(5): 450 – 455.
- [2] 胡艳霞, 孙振钧, 孙永明, 等. 蚯蚓粪对黄瓜炭疽病的系统诱导抗性作用[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1358 – 1362.
- [3] Yang L J, Zhao F Y, Chang Q, et al. Effects of vermicomposts on tomato yield and quality and soil fertility in greenhouse under different soil water regimes[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 160: 98 – 105.
- [4] 赵凤艳, 张勇勇, 张明琦, 等. 有机物料对设施番茄长期连作土壤细菌群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(6): 1732 – 1740.
- [5] 李天来, 杨丽娟. 作物连作障碍的克服——难解的问题[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(5): 916 – 918.
- [6] Kaur H, Sirhindi G, Bhardwaj R, et al. 28-homobrassinolide regulates antioxidant enzyme activities and gene expression in response to salt- and temperature-induced oxidative stress in *Brassica juncea*[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1 – 13.
- [7] Tang J, Wang S Q, Hu K D, et al. Antioxidative capacity is highly associated with the storage property of tuberous roots in different sweetpotato cultivars[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1 – 10.
- [8] Li X Z, Sun P, Zhang Y N, et al. A novel PGPR strain *Kocuria rhizophila* Y1 enhances salt stress tolerance in maize by regulating phytohormone levels, nutrient acquisition, redox potential, ion homeostasis, photosynthetic capacity and stress-responsive genes expression[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 174: 1 – 18.
- [9] 张志刚, 尚庆茂. 蚯蚓粪基质对茄果类蔬菜穴盘苗耐热性的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, (3): 404 – 408.
- [10] 潘凤兵, 王海燕, 王晓芳, 等. 蚓粪减轻苹果砧木平邑甜茶幼苗连作障碍的土壤生物学机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(6): 925 – 932.
- [11] Zohreh E B, Seyed A S, Abdolmehdi B A G P, et al. Application of combined fertilizers improves biomass, essential oil yield, aroma profile, and antioxidant properties of *Thymus daenensis* Celak[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 121: 434 – 440.
- [12] 刘 磊. 不同配比蚯蚓粪栽培基质对盆栽观赏向日葵形态与生理指标的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [13] 刘佳斌. 蚯蚓粪基质对番茄枯萎病的抑制作用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [14] 王玲杰. 柑橘褐斑病菌毒素提取、产毒特性及对寄主防御酶的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 184-185.
- [16] 李少杰, 孙晓丽, 曹云娥. 不同蚯蚓粪施用量对设施甜瓜生长及品质的影响[J]. *农业科学研究*, 2018, 39(2): 37 – 42.
- [17] 孙喜军, 吕 爽, 高 莹, 等. 蚯蚓粪对作物连作障碍抑制作用研究进展[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 1 – 9.
- [18] Mupambwa H A, Mnkeni P N S. Optimizing the vermicomposting of organic wastes amended with inorganic materials for production of nutrient-rich organic fertilizers: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 10577 – 10595.
- [19] 吴军虎, 邵凡凡, 刘 侠. 蚯蚓粪对土壤团聚体组成和入渗过程水分运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 81 – 87.
- [20] Shi Z M, Wen M, Zhang J, et al. Effect of phenanthrene on the biological characteristics of earthworm casts and their relationships with digestive and anti-oxidative systems[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 193: 1 – 8.
- [21] Manuel B, Julien B, Nicolas M, et al. Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2019, 39(34): 2 – 15.
- [22] Sifolo S C, Flavien E E, Kouadio I K, et al. Vermicompost utilization: A way to food security in rural area[J]. *Heliyon*, 2018, 4(12): 1 – 24.
- [23] Nuhaa S, Romeela M, Vinod K G. A comparative analysis of composts and vermicomposts derived from municipal solid waste for the growth and yield of green bean (*Phaseolus vulgaris*)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(12): 11228 – 11239.
- [24] 常 青, 杨丽娟, 周丹丹, 等. 施用蚓粪对茄子产量、品质及土壤养分的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(1): 94 – 97.
- [25] 张国显, 范永怀, 赵凤艳, 等. 化肥减量配施有机物料对设施番茄生长、光合特性、产量及品质的影响[J]. *中国科技论文*, 2018, 13(6): 698 – 703.
- [26] 路迎奇, 杨丽娟, 史津玮, 等. 蚓粪用量对温室番茄生长发育与产量和品质的调节[J]. *北方园艺*, 2019, (6): 77 – 82.
- [27] Rakesh, Joshi, Jaswinder, et al. Vermicompost as an effective organic fertilizer and biocontrol agent: effect on growth, yield and quality of plants[J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2014, 14: 137 – 159.
- [28] Papathanasiou F, Papadopoulos I, Tsakiris I, et al. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.)[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2012, 10(2): 677 – 682.
- [29] Mohsin S M, Hasanuzzaman M, Parvin K, et al. Pretreatment of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings with 2, 4-D improves tolerance to salinity-induced oxidative stress and methylglyoxal toxicity by modulating ion homeostasis, antioxidant defenses, and glyoxalase systems[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 152: 221 – 231.
- [30] 张志忠, 奚玉培, 韩晓云, 等. 自毒胁迫对甜瓜种子萌发与幼苗保护酶活性和转录组的影响[J]. *西北植物学报*, 2019, 39(12): 2197 – 2206.
- [31] 冯海华. 不同肥料组合对紫叶锦带叶片色素含量和保护酶活性的影响[J]. *陕西林业科技*, 2019, 47(6): 10 – 13+24.
- [32] Meire P D S F, Mayara D S Q, Matheus M D A, et al. Substrate-associated mycorrhizal fungi promote changes in terpene composition, antioxidant activity, and enzymes in *Curcuma longa* L. acclimatized plants[J]. *Rhizosphere*, 2020, 13: 1 – 11.
- [33] 麦提艾力热合曼, 海利力库尔班, 郭立华, 等. 灰霉菌激活蛋

- 白诱导抗病相关的酶活性提高番茄抗病性[J]. 中国生物防治学报, 2014, 30(6): 780 – 786.
- [34] 周东兴, 王恩泽, 刘 多, 等. 番茄枯萎病生防细菌的筛选及对植株防御酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1753 – 1760.
- [35] Ariena H V B, Abraham G, Maria R F. Plant disease management in organic farming systems[J]. *Pest Management Science*, 2016, 72(1): 30 – 44.
- [36] Balasubramani R, Jonathan W W, Ammaiyappan S, et al. Influence of microbial diversity and plant growth hormones in compost and vermicompost from fermented tannery waste[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 200 – 204.
- [37] Qiao L L, Zheng L Y, Sheng C, et al. Rice siR109944 suppresses plant immunity to sheath blight and impacts multiple agronomic traits by affecting auxin homeostasis[J]. *The Plant Journal*, 2020, 102(5): 948 – 964.

Effect of Antioxidant Capacity of Greenhouse Tomatoes by Vermicompost

YAO Lan, GUAN Zhi-hao, WANG Ye-di, YANG Zhen, ZHANG Xin-yu, YANG Li-juan*
(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The study on the regulation of antioxidant enzymes of greenhouse tomato by earthworm fertilizer would provide a theoretical and technical support for improving disease and stress resistance of vegetables under facility cultivation conditions. In a greenhouse pot experiment, four treatments were set up: control (CK), chemical fertilizer (CF), cow manure (CM) and earthworm fertilizer (EM). Phenotypic traits (plant height, stem diameter, SPAD value, and leaf area) were observed, and functional leaves and roots were collected at 25, 50, and 75 d after planting to determine defense enzyme activities (catalase, CAT; peroxidase, POD; polyphenol oxidase, PPO, and superoxide dismutase, SOD), root activity, and malondialdehyde content (MDA). The results showed that (1) Earthworm fertilizer significantly increased the leaf area and root activity of tomato plants, but had no significant effect on plant height, stem diameter, root fresh weight, leaf SPAD values, and root malondialdehyde content. The ratio of root to shoot in the vermicompost treatment showed an increasing trend with the tomato reproductive period. (2) Similar trends were observed between root and leaf defensive enzyme activities with reproductive period of tomato, with a downward trend in CAT, PPO and SOD activities, and an upward trend in POD activities. Earthworm fertilizer increased the CAT and POD activities during the reproductive period of tomato. The PPO activities in the EM treatment were increased by 21.63%-511.2% and by 54.6%-163.9% compared with the other treatments and CM treatment, respectively. The SOD activities in the CF treatment were decreased by 23.32%-91.67% compared with the CM and EM treatments. (3) Correlation analysis showed that leaf area was highly significantly positively correlated with root POD activities, root vigor was highly positively correlated with leaf POD, and root POD was highly positively correlated with leaf POD, PPO and SOD. The application of earthworm fertilizer at an appropriate rate in facility vegetable production can improve the plant's antioxidant defense ability, enhance crop resistance and disease resistance, and promote crop growth and development, which would lay a foundation for high yield and green pest control.

Key words: Vermicompost; Facility cultivation; Tomato; Defensive enzyme; Root activity; MDA

[责任编辑: 孙福军]