

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0610

褪黑素与微生物菌剂配施防治番茄枯萎病的效果及其对相关抗性指标的影响

李昱腾¹, 刘金宝², 张 奥¹

(1. 陕西农业发展集团有限公司西安分公司 西安 710075; 2. 中陕高标准农田建设集团有限公司 西安 712100)

摘要:为明确褪黑素与微生物菌剂配施防治番茄枯萎病的效果及其对相关抗性指标的影响,以番茄品种金棚8号为试验材料,设置枯草芽孢杆菌(T1)、褪黑素(T2)、褪黑素与枯草芽孢杆菌配施(T3)、清水(CK)等4个处理开展防控试验,对比分析不同处理对番茄枯萎病的防治效果、番茄植株生长、相关抗性指标及番茄产量的影响。结果表明,在番茄苗期、花期、结果期和采收期,T1处理对番茄枯萎病表现出较好的防治效果,为46.27%~71.05%;T2处理为29.74%~46.61%,防治效果较差;T3处理防治效果最好,为71.49%~80.10%。3个防治处理均对番茄生长表现出不同程度的促进作用,且T3处理的促生作用最为明显,株高、茎粗、叶面积及产量均显著高于其他处理;番茄植株体内的过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、几丁质酶活性及番茄植株根际土壤的游离氨基酸含量和过氧化氢酶、脲酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性均最高。T1和T3处理均可以显著提高番茄可溶性糖、可溶性固形物、维生素C和可溶性蛋白含量,且T3处理的提质效果最好。综上,褪黑素与枯草芽孢杆菌配施对番茄枯萎病具有较好的防效,同时可以促进番茄生长发育,提高番茄植株防御酶活性和植株根际土壤酶活性,增产提质,在多个指标上表现出叠加效应。

关键词:番茄;枯萎病;褪黑素;微生物菌剂;防效;抗性指标

中图分类号:S641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)04-156-07

Effects of combined application of melatonin and microbial agents on the prevention and control of tomato *Fusarium* wilt and related resistance indicators

LI Yuteng¹, LIU Jinbao², ZHANG Ao¹

(1. Xi'an Branch of Shaanxi Agricultural Development Group Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. Zhongshan High-Standard Farmland Construction Group Co., Ltd., Xi'an 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to clarify the effect of the combined application of melatonin and microbial agents in controlling tomato *Fusarium* wilt and its influence on related resistance indicators, the tomato variety Jinpeng 8 was used as the experimental material, and four experimental treatments were set up: *Bacillus subtilis* (T1), melatonin (T2), combined application of melatonin and *Bacillus subtilis* (T3), and clear water (CK) to conduct prevention and control experiments, and compared the control effects of different treatments on tomato *Fusarium* wilt, the growth of tomato plant, related resistance indicators, and the yield and quality of tomato. The results showed that during the seedling stage, flowering stage, fruiting stage and harvest stage of tomato, the control effect of treatment T1 on tomato *Fusarium* wilt was 46.27% to 71.05%, showing a relatively good control effect. The treatment T2 was 29.74% to 46.61%, and the prevention and treatment effect was poor. The best prevention and control effect was achieved when T3 was treated at 71.49% to 80.10%. All three control treatments showed varying degrees of promoting effects on tomato growth, and the promoting effect of treatment T3 was the most obvious. The plant height, stem thickness, leaf area were all significantly higher than those of the other treatments. The activity of peroxidase, catalase, superoxide dismutase and chitinase in tomato plants treated with T3 were all the highest. The content of free amino acids in the rhizoar soil of tomato plant was the highest, and the activity of catalase,

收稿日期: 2025-08-26; 修回日期: 2025-10-13

基金项目: 创新能力支撑计划-陕西省青年科技新星(2025ZC-KJXX-137); 陕西农业发展集团有限公司集团内部科研项目(NFJC2025-05)

作者简介: 李昱腾,男,高级工程师,研究方向为土地整治、智慧农业相关领域。E-mail: 642759716@qq.com

通信作者: 刘金宝,男,高级工程师,研究方向为土地工程、耕地保护与质量提升等领域。E-mail: jinbaoliu@xaut.edu.cn

urease and *N*-acetyl- β -*D*-glucosidase were also the highest. The yield of T3 treatment was the highest and significantly higher than that of other treatments. Both T1 and T3 treatments could significantly increase the content of soluble sugar, soluble solids, vitamin C and soluble protein in tomato, and the quality improvement effect of T3 treatment was better. Overall, the combined application of melatonin and *Bacillus subtilis* has good control effect on tomato *Fusarium* wilt. At the same time, it can promote the growth and development of tomato, increase the activity of defense enzymes in tomato plant and the activity of soil enzyme in the rhizoplasm of plant, increase yield and improve quality, and show a superimposed effect in multiple indicators.

Key words: Tomato; *Fusarium* wilt; Melatonin; Microbial agent; Control effect; Resistance indicator

番茄是世界设施栽培面积最大的蔬菜作物,富含维生素、番茄红素等营养物质,具有较高的食用价值和经济效益^[1]。随着集约化种植程度的提高,以及化肥和化学药剂的大量使用,土壤酸化、养分失衡等问题明显加重,由此引发的番茄枯萎病等土传病害频发,严重影响了番茄的产量和品质,制约了番茄产业的健康发展^[2]。目前,主要采用化学杀菌剂防治番茄枯萎病,但是长期施用化学杀菌剂会导致防效降低、易造成环境污染等问题,而选育抗病品种所需时间长、成本高且无法保证质量。因此,利用外源物质诱导植株产生抗性是一种提高作物病害防效、降低化学农药施用量和减轻环境污染的有效措施,对番茄产业的持续健康发展意义重大。

褪黑素是一种在动植物体内广泛分布的小分子化合物,具有促生长、抑菌、抗氧化等作用^[3]。蒋希瑶等^[4]研究表明,喷施褪黑素可以显著提升番茄幼苗株高和地下部鲜干质量,增强光合作用,缓解碱胁迫。Liu等^[5]研究表明,褪黑素可以通过抑制番茄腐烂病菌丝的生长,表现出对病害的抗性。孙子荀等^[6]研究表明,外源褪黑素可以激活草莓调控相关抗病基因的表达,并提升体内抗氧化酶、防御酶活性,最终表现出对草莓黑斑病的抗性。此外,褪黑素还对马铃薯晚疫病^[7]、柑橘黄龙病^[8]、黄瓜霜霉病^[9]等病害表现出一定的抗性。但是,褪黑素对番茄枯萎病的防效尚未见报道。

目前,关于微生物菌剂对番茄促生和防控病害方面的研究较多。张心青等^[10]利用常压室温等离子体诱变技术获得对番茄枯萎病具有较高拮抗作用的枯草芽孢杆菌。冯中红等^[11]分离筛选到1株对番茄叶斑病具有较强拮抗能力的解淀粉芽孢杆菌。敖远等^[12]研究表明,枯草芽孢杆菌262XY2可以提高番茄防御酶活性,改善根际土壤的生化性能,提高番茄植株对枯萎病的抗性。然而,关于褪黑素与微生物菌剂配施在番茄生产中的应用研究尚未见报道,其组合对番茄枯萎病的防效及相关抗性指标的影响尚不明确。鉴于此,笔者在前人研究成果的

基础上,研究褪黑素与微生物菌剂配施对番茄枯萎病防效及相关抗性指标的影响,以期有效利用褪黑素和微生物菌剂开展番茄枯萎病绿色防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西省西安市周至县集贤镇金凤村试验基地,该地常年存在番茄病害问题,尤其是枯萎病严重发生。供试土壤理化性质:pH 5.72,有机质含量(w,后同)11.22 g·kg⁻¹,铵态氮含量33.46 mg·kg⁻¹,有效磷含量50.08 mg·kg⁻¹,速效钾含量132.17 mg·kg⁻¹。

1.2 材料

供试番茄品种为金棚8号,购自陕西金棚种业;供试微生物菌剂枯草芽孢杆菌有效活菌数10亿·g⁻¹,购自云南星耀生物制品有限公司;供试褪黑素购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.3 试验设计

试验共设4个处理,分别为:CK,清水灌根;T1,枯草芽孢杆菌稀释500倍每株灌根0.2 mL;T2:100 μ mol·L⁻¹褪黑素每株灌根5 mL;T3:枯草芽孢杆菌稀释500倍每株灌根0.2 mL后,再用100 μ mol·L⁻¹褪黑素每株灌根5 mL。试验在温室大棚内进行,2023年10月14日定植并进行首次灌根,定植后每15 d进行1次枯草芽孢杆菌或褪黑素灌根,共5次。试验采用随机区组设计,株行距分别为40、60 cm,各处理均100株,3次重复。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 番茄枯萎病防效测定 分别于番茄苗期、花期、结果期和采收期调查病情指数和防治效果。

番茄枯萎病分为5个等级:0级(叶片健康无症状);1级(1~2片真叶萎蔫下垂或变黄);2级(3~4片真叶变黄,叶片萎蔫下垂);3级(5~6片真叶萎蔫下垂或严重变黄,生长受到抑制);4级(植株严重萎蔫枯死)^[13]。

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{相对病级数})}{\text{调查株数} \times \text{最高病级值}} \times 100;$$

防治效果/%=(对照区病情指数-处理区病情指数)/对照区病情指数×100。

1.4.2 番茄生长指标测定 于采收期各小区随机选取5株番茄,用卷尺测定株高,用游标卡尺测定茎粗,用叶面积测定仪(型号YMJ-CH)测定叶面积,用叶绿素测定仪(型号TYS-4N)测定叶片SPAD值。

1.4.3 番茄相关抗性指标测定 分别于番茄植株定植后10、20、30 d取样,参照李合生^[14]的方法测定番茄植株过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、几丁质酶活性;采用周礼恺^[15]的方法测定番茄植株根际土壤游离氨基酸含量、*N*-乙酰-β-*D*-葡萄糖苷酶活性,采用关松萌^[16]的方法测定番茄植株根际土壤过氧化氢酶活性,采用王玉功等^[17]的方法测定番茄植株根际土壤脲酶活性。

1.4.4 番茄产量测定 于番茄收获期各小区选取第1、2穗果称质量,测定单株产量。

1.4.5 番茄品质测定 各小区随机选取5个大小

均匀、成熟度一致的番茄果实进行品质测定,采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,采用手持折光仪测定可溶性固形物含量,采用分光光度法测定维生素C含量,采用考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含量,采用酸碱滴定法测定有机酸含量^[14]。

1.5 数据分析

采用 Excel 2010 整理试验数据,采用 SPSS 23.0 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄枯萎病的防治效果

由表1可知,在4个生长期各处理对番茄枯萎病的防治效果均为 T3>T1>T2,且各处理间均呈显著差异。在4个生长期,T1处理的病情指数为7.77~39.31,对番茄枯萎病的防治效果为46.27%~71.05%;T2处理的病情指数为14.33~51.41,对番茄枯萎病的防治效果为29.74%~46.61%;T3处理的病情指数为5.34~20.86,对番茄枯萎病的防治效果为71.49%~80.10%。由此可见,单独施用枯草芽孢杆菌对番茄枯萎病具有较好的防治效果,单独施用褪

表1 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄枯萎病的防治效果

Table 1 The control effect of melatonin combined with microbial agents on tomato *Fusarium wilt*

处理 Treatment	苗期 Seedling stage		花期 Flower stage		结果期 Fruit stage		采收期 Harvest stage	
	病情指数 Disease index	防治效果 Control effect/%	病情指数 Disease index	防治效果 Control effect/%	病情指数 Disease index	防治效果 Control effect/%	病情指数 Disease index	防治效果 Control effect/%
T1	7.77±2.42	71.05±3.11 b	17.82±1.44	65.28±1.85 b	27.40±1.95	55.26±3.82 b	39.31±3.52	46.27±3.05 b
T2	14.33±2.38	46.61±2.04 c	31.04±3.18	39.52±2.33 c	37.58±2.78	38.63±2.44 c	51.41±3.74	29.74±2.73 c
T3	5.34±1.06	80.10±2.66 a	11.77±2.36	77.06±2.27 a	16.04±2.03	73.81±3.12 a	20.86±2.58	71.49±2.55 a
CK	26.84±3.55		51.32±4.43		61.24±5.72		73.17±5.96	

注:同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

黑素对番茄枯萎病的防治效果不理想,而褪黑素与枯草芽孢杆菌配施则可以提高对番茄枯萎病的防治效果,表现出较好的增效作用。

2.2 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄生长指标的影响

由表2可知,T1、T2、T3处理的株高、茎粗、叶

面积和SPAD均高于CK。其中,T3处理的株高、茎粗、叶面积均显著高于其他处理,较CK分别显著增加28.04%、38.32%、53.31%。T1处理的株高显著高于T2处理和CK,较CK显著增加13.16%;T1处理的茎粗和叶面积均高于T2处理,两者间差异均不显著,但均显著高于CK,茎粗较CK分别增加

表2 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄生长指标的影响

Table 2 Effects of combined application of melatonin and microbial agents on the growth indicators of tomato

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem thickness/mm	叶面积 Leaf area/cm ²	SPAD
T1	145.37±4.35 b	13.63±0.77 b	28.64±2.01 b	51.28±1.22 a
T2	133.83±8.77 c	13.25±0.65 b	26.71±2.23 b	45.46±0.92 b
T3	164.48±6.33 a	15.81±0.85 a	34.28±1.58 a	54.48±2.77 a
CK	128.46±5.25 c	11.43±0.78 c	22.36±1.66 c	45.11±1.26 b

19.25%和 15.92%,叶面积较 CK 分别增加 28.09% 和 19.45%。T1 和 T3 处理的 SPAD 差异不显著,但均显著高于 T2 处理和 CK,分别较 CK 提高 13.68%、20.77%,T2 处理高于 CK,但与 CK 差异不显著。由此可见,单独施用枯草芽孢杆菌或褪黑素均对番茄生长起到一定的促进作用,而褪黑素与枯草芽孢杆菌配施的促生效果更好。

表 3 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄植株相关抗性指标的影响

Table 3 Effects of combined application of melatonin and microbial agents on related resistance indicators of tomato plants

处理 Treatment	过氧化物酶活性 POD activity/(U·g ⁻¹)			过氧化氢酶活性 CAT activity/(μmol·g ⁻¹ ·min ⁻¹)		
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d
T1	102.30±3.78 a	110.52±6.23 c	139.65±9.75 b	197.22±9.65 b	221.11±13.04 b	245.23±13.55 b
T2	98.65±3.76 b	116.04±5.74 b	131.47±10.33 b	190.13±10.02 c	200.02±13.12 c	210.14±11.38 c
T3	108.61±4.22 a	133.25±6.98 a	155.26±8.74 a	211.30±10.74 a	246.50±11.66 a	272.58±14.71 a
CK	91.43±4.35 c	101.22±8.53 d	108.23±10.58 c	177.23±8.63 d	194.66±12.42 d	178.83±14.32 d
处理 Treatment	超氧化物歧化酶活性 SOD activity/(U·g ⁻¹)			几丁质酶活性 Chitinase activity/(U·g ⁻¹)		
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d
T1	135.63±9.04 b	141.24±9.55 b	149.32±10.59 b	8.65±0.65 b	10.87±1.14 a	11.16±1.22 b
T2	119.87±8.75 c	127.46±7.55 c	133.16±9.88 c	7.66±0.75 c	8.11±0.94 b	9.48±1.03 c
T3	148.77±7.93 a	160.11±8.66 a	170.41±11.24 a	10.04±0.96 a	11.23±0.88 a	13.55±1.57 a
CK	104.29±8.55 d	118.33±6.52 d	118.05±8.31 d	5.77±0.48 d	6.02±0.66 c	5.66±0.86 d

时间内与 T1、T2 处理及 CK 均呈显著差异。由此可见,单独施用枯草芽孢杆菌或褪黑素均可以提高番茄植株过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、几丁质酶活性,而褪黑素与枯草芽孢杆菌配施的效果最显著。

2.4 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄植株根际土壤相关抗性指标的影响

由表 4 可知,定植后 10、20、30 d,T1、T2、T3 处理的游离氨基酸含量和过氧化氢酶、脲酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性均呈逐渐升高的趋势,且

2.3 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄植株相关抗性指标的影响

由表 3 可知,定植后 10、20、30 d,T1、T2、T3 处理的过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、几丁质酶活性均呈现出不同程度的升高趋势,且均显著高于 CK。其中 T3 处理在不同时间的上述酶活性均最高,且过氧化氢酶、超氧化物歧化酶在不同

均不同程度高于 CK。其中,T3 处理在不同时间的上述指标均最高,且均显著高于 CK,其中过氧化氢酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性均显著高于 T1、T2 处理。由此可见,单独施用枯草芽孢杆菌或褪黑素均可以提高番茄植株根际土壤的游离氨基酸含量及过氧化氢酶、脲酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性,而褪黑素与枯草芽孢杆菌配施的效果最显著。

2.5 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄产量的影响

由图 1 可知,T1、T2、T3 处理的单株产量均显著高于 CK,其中 T3 处理的单株产量最高,且与 T1

表 4 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄植株根际土壤相关抗性指标的影响

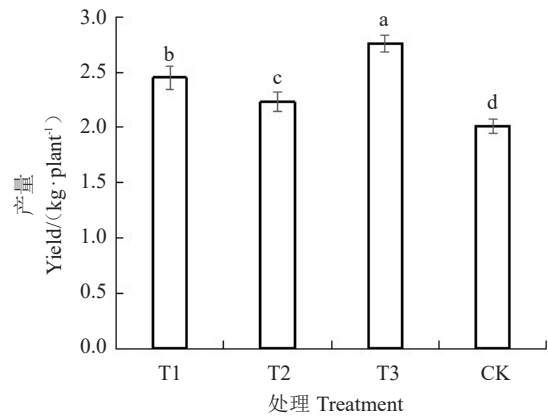
Table 4 Effects of combined application of melatonin and microbial agents on the related resistance indicators of rhizosphere soil of tomato plants

处理 Treatment	b(游离氨基酸)FAA content/(μmol·g ⁻¹)			过氧化氢酶活性 CAT activity/(mL·g ⁻¹)		
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d
T1	13.52±2.04 a	15.83±1.27 b	18.37±1.35 b	2.27±0.28 b	2.85±0.60 b	3.41±0.33 b
T2	12.24±1.82 b	14.76±1.55 c	15.72±1.36 c	2.32±0.43 b	2.77±0.25 b	3.28±0.41 b
T3	13.77±1.24 a	16.44±1.06 a	21.36±1.03 a	2.88±0.45 a	3.17±0.27 a	3.84±0.37 a
CK	12.18±1.29 b	14.23±1.36 c	14.38±1.22 d	2.24±0.63 b	2.62±0.40 c	2.79±0.39 c
处理 Treatment	脲酶活性 UE activity/(U·g ⁻¹)			N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性 NAG activity/(U·g ⁻¹)		
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d
T1	746.55±37.45 a	788.65±31.49 b	818.45±62.45 b	2.54±0.46 b	3.11±0.18 b	3.50±0.35 b
T2	721.81±33.67 b	734.59±51.33 c	782.13±45.28 c	2.42±0.33 b	3.03±0.29 b	3.11±0.27 c
T3	752.33±36.62 a	811.46±28.74 a	854.36±30.55 a	2.86±0.44 a	3.25±0.38 a	3.85±0.33 a
CK	712.85±34.44 c	726.54±53.79 c	721.45±42.10 d	1.88±0.25 c	1.90±0.34 c	1.92±0.36 d

和 T2 处理均呈显著差异;T1 处理的单株产量显著高于 T2 处理。由此可见,单独施用枯草芽孢杆菌或褪黑素均可以提高番茄产量,而褪黑素与枯草芽孢杆菌配施的增产效果最显著。

2.6 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄品质的影响

由表 5 可知,T3 处理的可溶性糖、可溶性固形物、维生素 C、可溶性蛋白含量均显著高于其他处理,较 CK 分别显著提高 23.87%、33.64%、25.82%、40.91%,有机酸含量显著低于其他处理,较 CK 显著降低 14.95%;T1 处理的可溶性糖含量显著高于 T2 处理,可溶性固形物、维生素 C、有机酸含量略高于 T2 处理,可溶性蛋白含量略低于 T2 处理,但差异均不显著。由此可见,单独施用枯草芽孢杆菌或褪黑素对番茄品质均具有一定的改善作用,而褪黑素与枯草芽孢杆菌配施的提质作用最显著。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level.

图 1 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄产量的影响

Fig. 1 Effects of combined application of melatonin and microbial agents on tomato yield

表 5 褪黑素与微生物菌剂配施对番茄品质的影响

Table 5 Effects of combined application of melatonin and microbial agents on tomato quality

处理 Treatment	w(可溶性糖) Soluble sugar content/(mg·kg ⁻¹)	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·100 g ⁻¹)	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)	w(有机酸) Organic acid content/(g·kg ⁻¹)
T1	26.55±2.18 b	6.44±0.57 b	35.04±1.66 b	0.53±0.02 b	7.83±0.44 b
T2	24.15±2.05 c	6.32±0.62 b	34.66±2.07 b	0.54±0.05 b	7.76±0.38 b
T3	29.32±2.24 a	7.27±0.65 a	38.59±1.21 a	0.62±0.04 a	7.11±0.58 c
CK	23.67±1.69 c	5.44±0.47 c	30.67±1.83 c	0.44±0.06 c	8.36±0.35 a

3 讨论与结论

微生物菌剂可以调节土壤养分,提高作物自身的抗逆性,主要作用机制是通过提高土壤养分含量及土壤酶活性,从而激活作物体内防御酶活性和抗病基因来抵御逆境^[18]。张萧萧等^[19]研究了枯草芽孢杆菌对多种作物病原菌的抑制效果,发现对番茄枯萎病的防效高达 75.43%。王静等^[20]研究表明,解淀粉芽孢杆菌 B6 可以在番茄根部定殖,对番茄枯萎病表现出较好的防治效果。本研究结果表明,枯草芽孢杆菌在苗期、花期、结果期和采收期,对番茄枯萎病的防治效果达到 46.27%~71.05%,表现出较好的防治作用,与上述研究结果较为一致。褪黑素是一种植物获得抗病性的诱导因子,具有调控植物体内次生代谢和抗逆反应的作用,可以诱导植物体内相关病程蛋白表达,并诱导抗病次生代谢物合成,从而激活植物体内的抗病基因以抵抗病菌侵染^[21]。本研究结果表明,褪黑素在苗期、花期、结果期和采收期,对番茄枯萎病的防治效果为 29.74%~

46.61%,可以在一定程度上提高番茄对枯萎病的抗性,但是效果不明显,与 Zhang 等^[22]、生吉萍等^[23]的研究结果相似,但与赵同淑等^[24]研究得出的褪黑素对西瓜枯萎病的防效可达 84.44%的结论有所不同,这可能是由于褪黑素对不同作物病害的抗性具有较强的浓度依赖性^[25]。本试验同时研究了褪黑素配施枯草芽孢杆菌对番茄枯萎病的防治效果,结果表明,在苗期、花期、结果期和采收期,对番茄枯萎病的防治效果分别达到 80.10%、77.06%、73.81%、71.49%,均显著高于单施枯草芽孢杆菌处理,表明褪黑素配施枯草芽孢杆菌对番茄枯萎病表现出较好的防治效果。

农作物生长指标是反映生长状况最直接的指标。微生物菌剂可以平衡土壤中微生物种群,改善土壤生态环境,促进植株分泌抑菌物质,并促进植株生长发育^[26]。本研究结果表明,枯草芽孢杆菌可以显著增加番茄植株的株高、茎粗、叶面积和 SPAD 值,对番茄生长具有明显的促进作用,与 Liu 等^[27]、Zhou 等^[28]的研究结果较为一致。外源褪黑素可以

调控叶黄素的循环基因,调节植株光合作用,促进有机物积累,从而增加植株的株高和茎粗^[29]。本研究结果表明,褪黑素可以在一定程度上增加番茄植株的株高、茎粗、叶面积和 SPAD 值,与党建成等^[30]研究得出的褪黑素处理可以增加南瓜幼苗的株高、茎粗和叶绿素含量的结论一致。本研究同时还发现,褪黑素配施枯草芽孢杆菌对番茄的促生作用最为明显,株高、茎粗、叶面积均显著高于其他处理,说明褪黑素在枯草芽孢杆菌促生方面具有良好的促进效果,在番茄生产中的应用前景较好。

过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶在生物抗氧化系统中具有清除活性氧的重要作用,几丁质酶可以通过催化几丁质水解,从而达到抵御病菌侵染的作用。本研究结果表明,单独施用褪黑素或枯草芽孢杆菌都可以不同程度地提高番茄植株过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、几丁质酶活性,与葛红莲等^[31]、吴秀红等^[32]的研究结果较为一致。本研究同时还发现,褪黑素配施枯草芽孢杆菌的番茄植株过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、几丁质酶活性最高。游离氨基酸含量和脲酶活性对土壤微生物结构、数量以及有机质和全氮含量有直接影响,可以有效反映土壤中氮素含量;过氧化氢酶在清除 H₂O₂ 过程中发挥重要作用;N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶属于酸性水解酶,涉及几丁质的降解过程,与机体病理状态具有密切关联。本研究结果表明,单独施用褪黑素或枯草芽孢杆菌都可以提高番茄植株根际土壤过氧化氢酶、脲酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性,与张明等^[33]、沙天珍等^[34]的研究结果相似。本研究同时还发现,褪黑素配施枯草芽孢杆菌的番茄植株根际土壤过氧化氢酶、脲酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性最高。

综上所述,褪黑素配施枯草芽孢杆菌可以有效提升对番茄枯萎病的防效,促进番茄生长发育,提高番茄植株防御酶活性和植株根际土壤酶活性,增产提质,在多个指标上表现出叠加效应。本研究结果为番茄枯萎病的防治提供了新思路,也为褪黑素在番茄生产中的应用提供了理论依据。

参考文献

- [1] 宋炫钰,汪晶晶.全球番茄制品贸易网络特征及其动态演化分析[J].中国蔬菜,2024(7):16-25.
- [2] 李金刚,何平如,陈菁,等.追肥减施下加气对番茄生长及土壤酶活性的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):345-355.
- [3] 曾春涛,张舒悦,仇学文,等.褪黑素浸种对低温胁迫下豇豆种子萌发和生理指标的影响[J].北方园艺,2024(20):8-15.
- [4] 蒋希瑶,黄俊杰,周英杰,等.不同浓度外源褪黑素对 NaHCO₃胁迫下番茄幼苗生长和生理指标的影响[J].北方园艺,2022(9):1-9.
- [5] LIU C X, CHEN L L, ZHAO R R, et al. Melatonin induces disease resistance to *Botrytis cinerea* in tomato fruit by activating jasmonic acid signaling pathway[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(22):6116-6124.
- [6] 孙子荀,倪照君,高志红,等.外源褪黑素提高草莓黑斑病抗性的效果和作用机制初探[J].西北植物学报,2020,40(10):1679-1687.
- [7] ZHANG S M, ZHENG X Z, REITER R J, et al. Melatonin attenuates potato late blight by disrupting cell growth, stress tolerance, fungicide susceptibility and homeostasis of gene expression in phytophthora infestans[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8:1993.
- [8] NEHELA Y, KILLINY N. Melatonin is involved in citrus response to the pathogen huanglongbing via modulation of phytohormonal biosynthesis[J]. Plant Physiology, 2020, 184(4):2216-2239.
- [9] SUN Y P, MA C, KANG X, et al. Hydrogen sulfide and nitric oxide are involved in melatonin-induced salt tolerance in cucumber[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 167:101-112.
- [10] 张心青,张萧萧,杨传伦,等.一株对番茄枯萎病有拮抗作用的枯草芽孢杆菌的 ARTP 诱变与筛选[J].中国农学通报,2020,36(26):44-49.
- [11] 冯中红,王玉琴,杨成德,等.番茄细菌性叶斑病菌的拮抗菌筛选、鉴定及其拮抗性评价[J].草业学报,2015,24(8):166-173.
- [12] 敖远,杨成德,郭庄园,等.枯草芽孢杆菌 262XY2'菌剂对番茄枯萎病的预防效果及其对相关抗性生化指标的影响[J].生物安全学报(中英文),2024,33(4):402-407.
- [13] 刘琴,徐健,祁建杭,等.娄彻氏链霉菌 SR-1102 对番茄枯萎病的防效及根际微生物的影响[J].江苏农业学报,2020,36(5):1133-1138.
- [14] 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.
- [15] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987.
- [16] 关松萌.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [17] 王玉功,刘婧晶,刘貽熙,等.苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性影响因素的研究[J].土壤通报,2019,50(5):1166-1170.
- [18] PARRAY J A, JAN S, KAMILI A N, et al. Current perspectives on plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(3):877-902.
- [19] 张萧萧,张心青,杨传伦,等.枯草芽孢杆菌突变株 YJY19-01 抑菌效果及对番茄枯萎病防效的初步研究[J].山东农业科学,2021,53(6):84-88.
- [20] 王静,宁燕夏,李黄维,等.解淀粉芽孢杆菌 B6 在番茄根部定殖及对番茄枯萎病盆栽防效初步研究[J].中国植保导刊,2018,38(3):19-22.
- [21] MOUSTAFA-FARAG M, ALMONEAFY A, MAHMOUD A, et al. Melatonin and its protective role against biotic stress impacts

- on plants[J]. *Biomolecules*, 2019, 10(1):54.
- [22] ZHANG Z K, WANG T, LIU G, et al. Inhibition of downy blight and enhancement of resistance in litchi fruit by postharvest application of melatonin[J]. *Food Chemistry*, 2021, 347: 129009.
- [23] 生吉萍, 赵瑞瑞, 陈玲玲, 等. 褪黑素采前喷施对采后番茄果实抗病性和贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(9): 188-193.
- [24] 赵同淑, 刘青, 马建祥, 等. 褪黑素与茉莉酸甲酯在西瓜枯萎病防治中的应用[J]. *北方园艺*, 2025(12): 89-99.
- [25] 石淼, 张珍珍, 高琛瑜, 等. 褪黑素处理对采后赤霞珠葡萄黑曲霉病抗性的影响[J]. *植物生理学报*, 2024, 60(3): 461-470.
- [26] 邵雪凤. 防控土传病害的绿农林®41号菌肥田间激活技术研究与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [27] LIU J, LI H, YUAN Z Y, et al. Effects of microbial fertilizer and irrigation amount on growth, physiology and water use efficiency of tomato in greenhouse[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 323: 10.
- [28] ZHOU Y, YANG L Y, WANG J, et al. Synergistic effect between *Trichoderma virens* and *Bacillus velezensis* on the control of tomato bacterial wilt disease[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(11): 439.
- [29] 周丹, 李海燕, 王秀军, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下银杏幼苗渗透调节和抗氧化能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(2): 431-438.
- [30] 党建成, 姜艳芳, 张红磊, 等. 叶面喷施褪黑素对 NaCl 胁迫下南瓜幼苗生长和生理的调控作用[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(12): 3656-3665.
- [31] 葛红莲, 刘中华. 复合菌剂 PS21 对氧乐果胁迫下小麦幼苗生长及抗氧化酶的影响[J]. *植物保护*, 2014, 40(5): 55-61.
- [32] 吴秀红, 戚厚芸, 孙婷, 等. 内生菌根菌剂对水稻秧苗生长及生理特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(21): 65-68.
- [33] 张明, 李明, 杨龙伟, 等. 生物有机肥配施枯草芽孢杆菌对穿心莲品质及土壤性质的影响[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(8): 101-109.
- [34] 沙天珍, 刘莹, 海梅荣. 外源褪黑素对干旱胁迫下植物生理及根际土壤影响的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(15): 8-15.