

不同 LED 红、蓝光质组合对番茄灰霉病防御机制的影响

陈彦杞¹, 张涛², 刘勇鹏³, 任子君⁴, 闫颖捷⁵

(1. 河南省农业技术推广总站 郑州 450002; 2. 河南农业大学 郑州 450002; 3. 漯河市农业科学院 河南漯河 462000; 4. 河南省农业科学院 郑州 450002; 5. 河南睢县农业科学研究所 河南睢县 476900)

摘要: 为了研究不同 LED 红、蓝光照比例对番茄灰霉病菌丝生长及侵染力的影响, 确定抑制灰霉病发展的最佳红蓝光质配比, 设置 5 个不同的红、蓝光谱比例组合照射灰霉病菌及接种灰霉病的番茄叶片, 对灰霉病菌丝生长、病菌侵染、抗氧化保护酶活性、脯氨酸含量、丙二醛含量等相关指标进行测定。结果表明, 不同红、蓝光质对比对番茄灰霉病的侵染均有一定的抑制作用, 以 C(红、蓝 5:1) 处理下病斑抑制率最高。离体番茄叶片中 SOD、POD、CAT 活性随着红光比例的增加逐渐增强, 以 C(红、蓝 5:1) 活性最强。PAL 活性、脯氨酸含量也以 C(红、蓝 5:1) 处理最高, 相比对照差异显著。丙二醛含量在 C(红、蓝 5:1) 处理的降低, 效果最为明显。综上可知, LED 红、蓝(5:1) 是对设施番茄灰霉病防治最为有利的光配比。

关键词: 番茄; LED 红蓝光; 灰霉病; 抗氧化保护酶

中图分类号: S641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-2871(2023)04-089-07

Effects of different light quality combinations of red and blue LED on tomato mold defense

CHEN Yanqi¹, ZHANG Tao², LIU Yongpeng³, REN Zijun⁴, YAN Yingjie⁵

(1. Henan Agricultural Technology Popularize Overall Department, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China; 3. Luohe Academy of Agricultural Sciences, Luohe 462000, Henan, China; 4. Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China; 5. Henan Suixian Agricultural Science Research Institute, Suixian 476900, Henan, China)

Abstract: In this experiment, different combinations of red and blue spectra were used to irradiate *Botrytis cinerea* and tomato leaves inoculated with *B. cinerea*. The effects of different light conditions on the mycelial growth and infectivity of *B. cinerea* were studied, and the best red and blue light quality ratio to inhibit the development of *B. cinerea* were determined. SOD, POD, CAT, proline content etc, and preliminarily explore the physiological defense mechanism of different light quality ratio of red and blue led to inhibit the development of gray mold. The experiment set up 5 different treatments to measure the above relevant indexes. The results showed that different ratios of red and blue light had certain inhibitory effects on tomato gray mold infection, and the treatment with C (red and blue 5:1) had the highest inhibition rate of lesions. The activities of SOD, POD and CAT in isolated tomato leaves increased with the increase of the ratio of red light, and the activity of C (red and blue 5:1) was the strongest. PAL activity and proline content also showed the greatest difference between C (red and blue 5:1) treatment compared with the control. The content of malondialdehyde in C (red and blue 5:1) treatment had a better reduction effect, and the effect was the most obvious. In conclusion, LED (red and blue 5:1) is the most favorable light quality ratio for the prevention and control of *B. cinerea* in facilities.

Key words: Tomato; LED red and blue light; *Botrytis cinerea*; Antioxidant protective enzymes

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-08-23

作者简介: 陈彦杞, 女, 农艺师, 研究方向为农作物栽培与推广。E-mail: 410171465@qq.com

并列第一作者: 刘勇鹏, 男, 研究实习员, 研究方向为园艺作物育种与栽培。E-mail: 1592340472@qq.com

通信作者: 张涛, 男, 副教授, 主要从事设施园艺工程与栽培技术研究。E-mail: zhangtao3375@163.com

番茄灰霉病菌是设施番茄栽培生产中发生较为普遍的一种病原真菌,是当前日光温室越冬、塑料大棚早春番茄生产上最重要的病害之一,一般发病较轻时能造成的经济损失在 25%左右,发病严重时可达 70%^[1],甚至绝收,目前防治方法还是以化学农药防治为主。但是随着人们生活质量的提高,对蔬菜需求更多为高品质、无污染的绿色有机蔬菜。所以近年来通过对温室内光、温、水、气体等环境因素的调控来达到防治病害的目的已成为温室生产研究的热点课题^[2]。其中随着半导体产业的快速发展,LED 人工可见光作为一种无污染的新型物理防治技术措施,也开始在防治植物重要病害上得到应用^[3]。Shirasawa 等^[4]通过试验研究发现,红光能很好地抑制水稻稻瘟病细胞的菌丝生长,从而减少水稻稻瘟病病原菌对水稻的侵染和伤害。Yu 等^[5]研究表明,相比蓝光处理条件下,红、蓝光处理下辣椒炭疽病菌丝生长相对较为缓慢,分生孢子和芽管与其他处理条件下差异也比较大。Liao 等^[6]研究也发现,柑橘绿霉、青霉及酸梅病菌在低光照度($40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)处理下,病原菌菌丝生长与黑暗处理条件下无明显差异,而当光照度增加到 $120 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,才能够有效抑制菌丝生长。Parada 等^[7]研究显示,红光光照 12 h 的处理,水稻褐斑病菌的感染面积明显少于对照处理,红光处理 48 h 的处理,病斑侵染面积也基本没有再扩大。付雁南^[8]研究发现,光周期 10~12 h·d⁻¹ 的紫光和红光处理组比其他时长的抑菌效果更为明显,番茄灰霉病病斑扩展的面积也相对比较小。

当前 LED 光源作为新型节能光源,具有光谱广泛、耗能少、发热少和寿命长等优点,被越来越多地应用于温室作物生产中^[9-11]。但由于 LED 在农业上的应用刚刚开始,对 LED 在植物抗病性方面的作用研究较少且主要集中于单一光质和光周期上,在组合光质研究上并不深入,抗病现象产生的具体机制研究比较少。因此,笔者以番茄灰霉病菌为研究对象,在前人研究的基础上^[6-8],在 LED 光照度为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、光周期为 12 h·d⁻¹ 的情况下,研究了不同红蓝光质配比的光环境条件对番茄灰霉病侵染的影响,并通过检测抗氧化酶活性及脯氨酸、丙二醛含量的变化了解光环境对番茄叶片防御机制的影响,探究 LED 影响番茄灰霉病致病性的生理机制,为在温室番茄生产中通过红蓝组合光环境条件抑制灰霉病发生和发展提供重要理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料采用常见栽培番茄品种 Money Maker。供试灰霉病菌株由河南农业大学植物保护学院提供,从当地温室内感染灰霉病的番茄植株上分离鉴定得到,在 PDA 培养基上 25 °C 条件下继代培养,待用。试验照明设备采用广东三雄极光股份有限公司生产的 LED 灯。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 8 月至 2021 年 1 月在河南省郑州市河南农业大学 2 号楼人工气候室中进行。通过设置全 LED 光照人工气候箱,调节不同的 LED 红、蓝光质配比(由红色与蓝色 LED 光按照不同比例组合获取),分别为红光:蓝光(R:B)=1:1、红光:蓝光(R:B)=3:1、红光:蓝光(R:B)=5:1 和白光,分别简写为 A、B、C 和 D,同时以黑暗条件作为对照(CK)处理,共 5 个处理。分别调节人工气候箱的温、湿度做菌丝生长试验和离体番茄叶片灰霉病菌接种侵染试验。

1.3 方法

1.3.1 灰霉菌丝生长试验 选取致病性较强的菌株,从原始菌落中转移到 PDA 培养基上培养,待菌落长至 50~60 mm 时从菌落边缘打取 $d=5 \text{ mm}$ 的菌片接种到新的 PDA 培养基中央。培养基放置到人工培养箱内,分别调节 4 种光质 LED 灯进行照射,同时以黑暗条件下培养的菌落为对照(CK)。通过调节 LED 光源与 PDA 平板距离及电流光强控制器,使其表面处的光照度稳定为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光周期设置为 12 h·d⁻¹。人工气候室温度和相对湿度分别为 $(23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 和 90%。按照随机区组设计,每个处理接种 60 株,每个处理 3 次重复,接种 1 d 后,每 12 h 测量菌落直径,每个重复取样 20 株,共记录 5 d。

1.3.2 离体番茄叶片灰霉病菌接种侵染试验 选取生长期间长势相同的番茄叶片,用蒸馏水清洗干净。筛选出最适病菌孢子悬浮液浓度($106 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$),在番茄叶上进行针刺接种灰霉病菌孢子悬浮液($106 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, $5 \mu\text{L} \cdot \text{伤口}^{-1}$, 3 个伤口·颗⁻¹),做灰霉病侵染的试验。将接种了灰霉病菌的番茄叶片置于调好温度 $(23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 和湿度(90%)的人工气候箱中,人工气候箱中安装 4 种红、蓝光质配比的 LED 灯,光周期设置为 12 h·d⁻¹。按照随机区组设计,每个处理接种 60 片,每个处理 3 次重复,接种 1 d 后,每 12 h

测量1次,每个重复取样20片叶片,测病斑直径,共记录3d。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 菌丝生长抑制率和病斑扩展抑制率测定方法 使用游标卡尺测量菌落生长直径,并用下列公式计算菌丝生长抑制率和病斑扩展抑制率。

$$\text{菌丝生长抑制率}/\% = \frac{\text{对照菌落生长直径} - \text{处理菌落生长直径}}{\text{对照菌落直径}} \times 100; \quad (1)$$

$$\text{病斑扩展抑制率}/\% = \frac{\text{对照病斑生长直径} - \text{处理病斑生长直径}}{\text{对照病斑直径}} \times 100. \quad (2)$$

1.4.2 番茄叶片酶活性指标的测定 在对番茄叶片接种灰霉病后,在不同LED光质处理下,每隔12h开始取叶片样品,样品均为接种成功并已经侵染的叶片,共记录3d,取3次。然后对不同处理下的叶片样品进行保护酶活性等及MDA、脯氨酸含量的测定。根据Huo等^[12]方法测定SOD、POD和CAT活性;参照《植物生理生化实验原理与技术》^[13]测定PAL酶活性、脯氨酸和MDA含量。试验随机取样,所有指标测定均3次重复。

1.5 数据处理

采用WPS 2021软件进行数据统计整理,采用SPSS20.0软件进行方差分析,采用Sigmaplot14.5软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同LED组合光质对番茄灰霉菌丝生长的影响

由图1可知,不同LED红蓝组合光质处理后番茄灰霉菌丝直径均与对照存在显著差异。其中前2d,不同红、蓝光质配比的菌落直径之间均存在显著差异,以C光质配比处理下菌丝生长直径最小,其菌丝抑制率分别为49.06%和61.37%,其次是B处理,菌丝抑制率分别为45.66%和56.27%;第

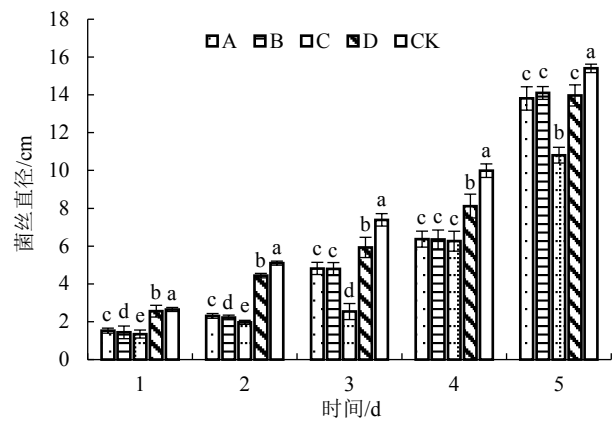


图1 不同LED红蓝组合光质对番茄灰霉菌丝生长的影响

3天时,A光质处理与B处理间菌落直径无显著差异,仍以C处理菌丝抑制率最高,为65.63%;第4天时,A、B、C处理之间菌落直径差异不显著,但均与D(白光)处理及对照之间差异显著,A、B、C和D处理菌丝抑制率分别为36.24%、36.44%、37.34%和18.72%;第5天时,A、B、D(白光)光质处理之间菌落直径差异不显著,但与C(红、蓝5:1)处理存在显著性差异,其中C(红、蓝5:1)处理菌丝抑制率最高,为29.81%。综上可知,不同红蓝光质配比对番茄灰霉菌丝的生长均有一定的抑制作用,但随着培养时间的延长,抑制作用越来越弱。此外随着红光比例的增加,抑制作用也越来越强,C处理下抑制作用最强。

2.2 不同LED组合光质对离体番茄叶片灰霉病侵染的影响

由表1可知,在离体番茄叶片接种灰霉菌后,的前2d内,4种不同红、蓝光质配比下,番茄灰霉病病斑直径与对照均存在显著差异。在接种1d后,以C光质配比处理下病斑最小,病斑抑制率为79.88%,其次是B(红、蓝3:1)处理,病斑抑制率为52.77%,A、D处理病斑抑制率分别为31.29%和51.80%。在接种2d时,各处理病斑抑制率分别为17.65%、35.69%、56.98%、15.23%;在接种3d后,各处理病斑抑制率分别为5.54%、9.93%、20.78%、

表1 不同LED组合光质对离体番茄叶片灰霉病侵染的影响

处理	1 d		2 d		3 d	
	病斑直径/mm	病斑抑制率/%	病斑直径/mm	病斑抑制率/%	病斑直径/mm	病斑抑制率/%
A	7.07±0.15 b	31.29	12.92±0.27 b	17.65	31.19±0.85 a	5.54
B	4.86±0.27 c	52.77	10.09±0.12 c	35.69	29.74±0.26 bc	9.93
C	2.07±0.17 d	79.88	6.75±0.19 d	56.98	26.16±0.45 d	20.78
D	4.96±0.29 c	51.80	13.30±0.38 b	15.23	30.23±0.57 b	8.44
CK	10.29±0.29 a		15.69±0.15 a		33.02±0.47 a	

8.44%，其中A(红、蓝1:1)处理与对照相比差异不显著，仍以C(红、蓝5:1)处理下病斑抑制率最高。综上可知，不同红、蓝光质比对番茄灰霉病的侵染均有一定的抑制作用，其中随着红光比例的增加，抑制作用整体表现也越来越强，说明在LED红、蓝组合配比光质中，适当的增加红光比例有利于抑制番茄灰霉病菌的侵染。

2.3 不同LED组合光质对离体番茄叶片接种灰霉病后SOD活性的影响

由图2可知，在离体番茄叶片接种灰霉病菌1d后，4种不同红、蓝光质配比处理下，B、C、D处理下番茄叶片中SOD活性与对照相比差异显著，以C光质配比处理下SOD活性最高，比对照提高54.10%，其次是D(白光)处理，比对照高51.95%，A、B处理分别比CK高6.45%和29.83%。在接种2d后，4种不同红蓝光质配比处理下，SOD活性与对照相比均有一定增强作用，其中C、D处理之间无显著性差异但均与其他处理存在显著性差异，各处理比CK分别高22.86%、46.42%、69.48%、68.79%；在接种3d后，各处理以B、C、D处理与CK相比存在显著差异，但仍以C光质配比处理下SOD活性最高，比CK高23.31%，也显著高于其他处理。综上可知，不同红、蓝光质配比下，离体番茄叶片中SOD活性随着红光比例的增加，越来越高，说明在LED组合配比光质中，适当地增加红光比例有利于抑制番茄灰霉病菌的侵染，整体以红、蓝为5:1情况下最能提高番茄叶片中SOD活性。

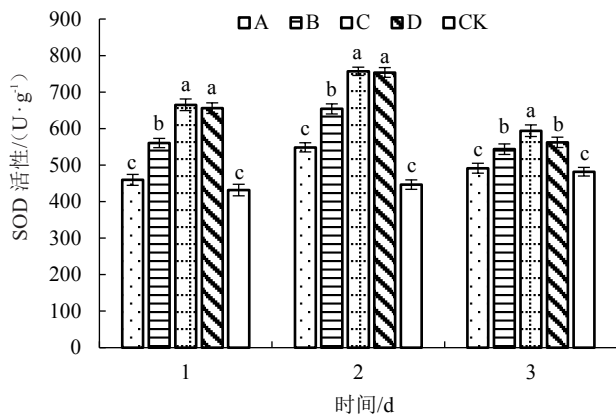


图2 不同LED组合光质对离体番茄接种灰霉病后SOD活性的影响

2.4 不同LED组合光质对离体番茄叶片接种灰霉病后POD活性的影响

由图3可知，在离体番茄叶片接种灰霉病菌1d后，与对照相比，4个不同红、蓝LED光质配比

处理下番茄叶片过氧化物酶活性均有所升高。其中，A、B处理番茄叶片过氧化物酶活性均与对照差异不显著，C处理下叶片过氧化物酶活性最高，比对照显著提高69.35%；其次是D处理，比对照显著提高33.79%。在离体番茄叶片接种灰霉病菌2d后，仍以C处理番茄叶片过氧化物酶活性最强，比对照显著提高76.86%；其次是D处理，比对照显著提高36.09%。在离体番茄叶片接种灰霉病菌3d后，4个处理番茄叶片过氧化物酶活性均与对照存在显著差异，表现最好的依然是C光质处理，比对照提高47.25%；其次是D处理，亦与对照存在显著差异，但与A和B处理之间均不存在显著性差异，比对照提高24.28%；A、B处理分别比对照提高22.72%、23.53%。综上可知，在离体番茄叶片接种灰霉病菌1、2、3d后试验数据的统计中，不同光质配比处理下，番茄叶片中过氧化物酶活性以C(红、蓝5:1)处理最高。

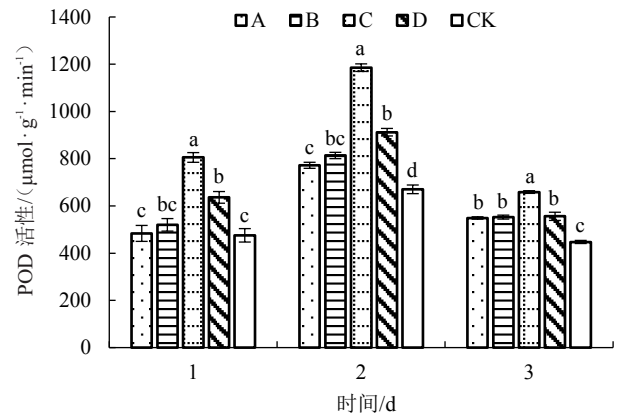


图3 不同LED组合光质对番茄接种灰霉病后POD活性的影响

2.5 不同LED组合光质对离体番茄叶片接种灰霉病后CAT活性的影响

由图4可知，在离体番茄叶片接种灰霉病菌

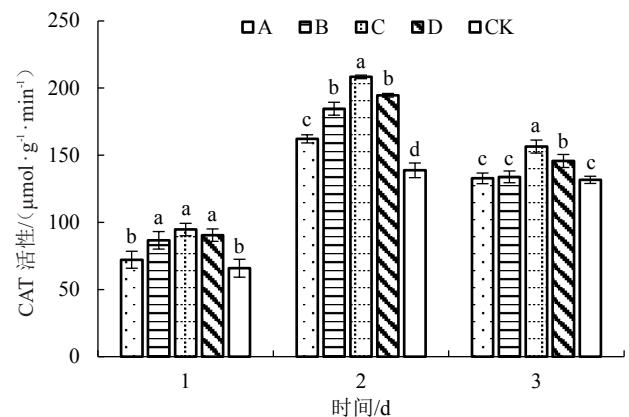


图4 不同LED组合光质对番茄接种灰霉病后CAT活性的影响

1 d后,4个光质配比处理下B、C、D处理CAT活性与对照有显著差异,分别比对照提高31.55%、43.76%、37.43%;仅A处理与对照相比差异不显著,比对照提高9.60%。在离体番茄叶片接种灰霉病菌2 d后,各个处理CAT活性均与对照存在显著差异,以C处理下CAT活性最高,比对照提高50.14%;其次是B、D处理,分别比对照高33.06%、40.29%;其中B、D处理之间无显著差异,但均与A处理存在显著差异。在离体番茄叶片接种灰霉病菌3 d后,以C处理效果最显著。A、B处理与对照相比差异不显著。综上所述,在番茄生长期叶片中保护酶过氧化氢酶活性,以C光质处理最高,增效最好,其次是D处理。整体表明适当地增加红光比例有利于提高番茄叶片中CAT活性。

2.6 不同LED组合光质对离体番茄叶片接种灰霉病后PAL活性的影响

由图5可知,在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌1 d后,不同LED光质配比处理下番茄离体叶片中PAL活性与对照相比均存在显著差异,其中C、D处理与A、B处理之间也存在显著差异,但C、D处理之间及A、B处理之间无显著性差异;各处理中以C处理下PAL活性最强,比对照提高61.87%,其次是D处理,比对照提高60.91%。在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌2 d后,各处理PAL活性分别比对照提高12.88%、17.75%、76.53%、47.34%;其中A处理与对照相比差异不显著,其他处理之间均存在显著性差异,且与对照也存在显著差异。在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌3 d后,以C、D处理相比对照差异显著,分别比对照提高128.71%、120.06%;其次是B处理,相比对照提高61.27%。综上分析可得,在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌3 d内,不同红蓝LED光质配比处理中PAL活性

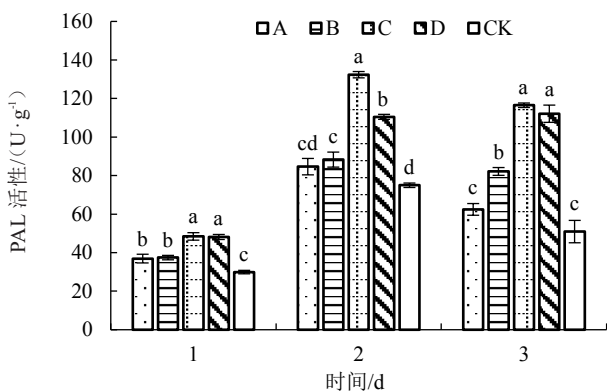


图5 不同LED组合光质对番茄接种灰霉病后PAL活性的影响

以C处理相比对照最高,效果表现最好,其次是D处理。

2.7 不同LED组合光质对离体番茄叶片接种灰霉病后脯氨酸(Pro)含量的影响

由图6可知,在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌1 d后,不同光质配比处理下离体番茄叶片中脯氨酸含量与对照相比均有显著提高,以C处理最高,比对照增加29.10%;其次是B、D处理,其中C、B处理之间差异不显著,B、D处理之间差异不显著。在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌2 d后,不同LED红、蓝光质配比处理之间仍以C处理效果最好,相比对照增加35.13%;其次是D处理,相比对照增加32.61%,其中,A处理与对照之间差异不显著,其他处理与对照均存在显著差异,C、D处理之间差异不显著。而在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌3 d后,各个处理相比对照分别增加1.61%、11.16%、30.29%、21.00%。整体分析而言,在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌3 d内,不同LED红、蓝光质配比处理中C处理相比其他处理脯氨酸含量增加最显著,其次是D处理。此外A处理除在第1 d时与对照存在差异外,其他时间与对照差异均不显著,说明增加一定的红光比例有利于提高番茄叶片中脯氨酸的含量。

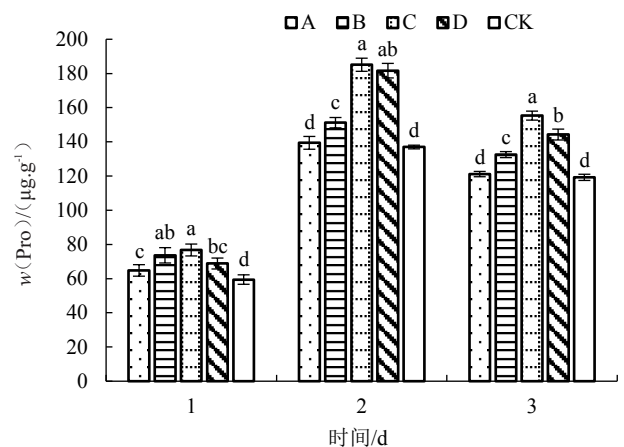


图6 不同LED组合光质对番茄接种灰霉病后脯氨酸含量的影响

2.8 不同LED组合光质处理对离体番茄叶片接种灰霉病后丙二醛含量的影响

由图7可知,在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌1 d后,不同光质设置的4个处理丙二醛含量均与对照存在显著差异,分别比对照降低13.90%、33.39%、35.21%、34.40%,其中B、C、D处理之间差异不显著。在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌2 d

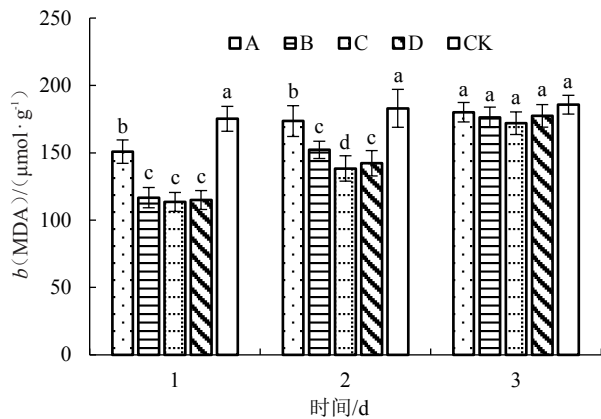


图7 不同LED组合光质对番茄接种灰霉病后MDA含量的影响

后,4个处理丙二醛含量相比对照分别显著降低5.17%、16.85%、24.39%、22.29%。在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌3d后,4个处理丙二醛含量均与对照相比差异不显著,分别比对照降低3.01%、5.03%、7.41%、4.47%。整体分析可知,在离体番茄叶片接种番茄灰霉病菌3d内,不同LED红、蓝光质配比处理中对番茄叶片中丙二醛含量均有一定的降低效果,其中随着时间的延长,降低效果越来越弱,但整体仍以C处理的降低作用较好,效果最为明显。

3 讨论与结论

光是植物成长发育过程中非常重要的环境因素之一,不但影响植物的生长发育,对病原菌生长也至关重要。近年来,随着半导体技术快速发展,LED灯具有节能、简易、高效、环保、稳定、按需补光、按需组合等优点,使其在温室作物上的应用也成了国内外研究者的关注热点,尤其在补光栽培和提高植物逆境胁迫抗性方面^[14]。

前人研究发现,可见光对病原菌真菌的形态形成具有重要的影响,可直接影响病原菌的分生孢子、分生孢子生殖管、菌核、子实体等的发育^[3]。Sánchez-Murillo等^[15]研究表明,蓝光照射条件下能够促进 *Paecilomyces fumosoroseus* 和 *Trichoderma atroviride* 孢子的形成。Yu等^[5]研究表明,相比蓝光、白光和黑暗处理,红光和绿光条件处理更能显著抑制辣椒炭疽病菌丝直径的生长。也有研究结果表明,相比红光和黄光,紫光和蓝光能够更好地抑制灰霉病菌丝生长^[8]。Ondrusch等^[16]研究发现,可见光可以抑制引起新鲜果蔬腐烂污染的 *Listeria monocytogenes* 真菌的生长;Rahman等^[17]研究发现,红光

能够抑制蚕豆的叶斑病和水稻的胡麻斑病菌丝的生长等。笔者通过研究不同LED红、蓝光质对比对番茄灰霉病菌丝生长的影响,发现不同LED红、蓝光质对比对番茄灰霉病菌丝的生长均有一定的抑制作用,随着红光比例的增加,抑制作用越来越强。Liao等^[6]的研究也表明,蓝光能有效抑制柑橘指状青霉和意大利青霉菌丝生长。Casas等^[18]发现红光照射下,木霉菌(*Trichoderma atroviride*)菌丝生长受到抑制等。本文结果与这些研究结果相近。

研究表明,不同LED红、蓝光质对植物的抗病性均有不同的影响^[19]。Kim等^[20]研究发现,在蓝光下,番茄灰霉病受到抑制。杨哲^[21]研究发现,红光也能提高番茄叶片对灰霉病的抗性,抑制番茄灰霉病的发展。也有研究结果表明,红光能够抑制植物蚕豆灰霉病、黄瓜褐斑病等多种真菌病害的侵染。笔者研究发现,不同红、蓝光质对比对番茄灰霉病的侵染均有一定的抑制作用,适当地增加红光比例有利于抑制番茄灰霉病菌的侵染,这与前人^[21]的研究结果相一致。在生理防御方面,前人研究发现,红光处理能显著提高番茄叶片的SOD(超氧化物歧化酶)、CAT(过氧化氢酶)和POD(过氧化物酶)这3种抗氧化保护酶的活性,其中红、蓝组合光下SOD活性相对最高^[17]。宁宇^[22]研究表明,在红光或蓝光条件下,韭菜的SOD活性显著高于白光。张晓梅等^[23]研究发现,黄瓜幼苗在红光处理下抗氧化酶活性高于其他处理。笔者研究发现,适当地增加红光比例有利于提高植物的抗氧化酶活性和脯氨酸含量,其中以红、蓝为5:1情况下最能提高番茄叶片中SOD、POD、CAT、PAL活性和脯氨酸含量,这与前人的研究结果一致。

综上所述,在不同LED红、蓝光质配比中,不同红蓝光质对比对番茄灰霉病菌丝的生长和侵染均有一定的抑制作用,但随着培养时间的延长,抑制作用越来越弱,而随着红光比例的增加,抑制作用却越来越强,整体以C(红、蓝5:1)处理下菌丝生长抑制作用最强,病斑抑制率最高。在生理防御上,不同红、蓝光质配比下,离体番茄叶片中SOD、POD、CAT、PAL活性随着红光比例的增加,表现越来越强,相比对照差异显著,效果表现最好。而不同LED红、蓝光质对比处理对番茄叶片中丙二醛含量均有一定的降低效果,仍以C(红、蓝5:1)处理的降低效果较好,效果最为明显。整体可知,LED红、蓝为5:1光质是对设施番茄灰霉病防治最为有利的光配比。

笔者试验只开展了离体叶片接种灰霉病菌后在不同LED光质配比下的研究,后续还需要做进一步的活体接种试验,加以论证和研究。伴随着LED光照技术在设施蔬菜产业上的快速应用,明确不同组合光配比对提高植物抗病性的作用机制,推广绿色、生态、高效等不同光机制组合的病害防治技术,将会成未来研究的重要内容。

参考文献

- [1] 徐明,李海涛,张子君,等.番茄灰霉病病原菌生物学特性的研究[J].贵州农业科学,2009,37(3):68-71.
- [2] 侯红英.人工调光环境下蔬菜生长的研究[D].山东青岛:中国海洋大学,2006.
- [3] 孙建城.单色可见光抑制柑橘酸腐病菌的生长研究[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [4] SHIRASAWA H, UENO M, KIHARA J, et al. Protective effect of red light against blast disease caused by *Magnaporthe oryzae* in rice[J]. Crop Protection, 2012, 39:41-44.
- [5] YU S M, RAMKUMAR G, LEE Y H. Light quality influences the virulence and physiological responses of *Colletotrichum acutatum* causing anthracnose in pepper plants[J]. Journal of Applied Microbiology, 2013, 115(2):509-516.
- [6] LIAO H L, BURNS J K. Light controls *phospholipase A:α* and *β* gene expression in *Citrus sinensis*[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(9):2469-2478.
- [7] PARADA RY, MON-NAI W, UENO M, et al. Red-light-induced resistance to brown spot disease caused by *Bipolaris oryzae* in rice[J]. Journal of Phytopathology, 2015, 163(2):116-123.
- [8] 付雁南.LED光照对番茄灰霉病侵染及叶片防御系统的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [9] 张谨薇,孟清波,马万成,等.LED光源对辣椒幼苗生长和光合特性的影响[J].中国瓜菜,2021,34(6):60-63.
- [10] 陈军.不同种类的樱桃番茄营养成分分析及其耐弱光效应研究[D].南京:南京农业大学,2016.
- [11] 陈艳丽,刘娅,曾丽萍,等.不同光质LED暗期补光对水培切割再生生菜生长和生理的影响[J].中国瓜菜,2019,32(10):55-59.
- [12] HUO Y J, WANG M P, WEI Y Y, et al. Overexpression of the maize *psbA* gene enhances drought tolerance through regulating antioxidant system, photosynthetic capability, and stress defense gene expression in tobacco[J]. Frontiers in Plant Science 2016, 7(1):1223.
- [13] 王学奎,黄见良.植物生理生化实验原理与技术[M].2版.北京:高等教育出版社,2006.
- [14] 钱创建,宿飞飞,王绍鹏,等.LED补光对日光温室脱毒马铃薯微型薯结薯特性的影响[J].中国瓜菜,2021,34(7):54-57.
- [15] SANCHEZ-MURILLO R I, DE LA TORRE-MARTINEZ M, AGUIRRE-LINARES J, et al. Light-regulated asexual reproduction in *Paecilomyces fumosoroseus*[J]. Microbiology, 2004, 150(2):311-319.
- [16] ONDRUSCH NICOLAI, KREFT JÜRGEN. Blue and red light modulates SigB-dependent gene transcription, swimming motility and invasiveness in *Listeria monocytogenes*[J]. PLoS One, 2011, 6(1):e16151.
- [17] RAHMAN M Z, KIHARA J, HONDA Y, et al. Effect of heat shock on red light-induced resistance of broad bean against *Botrytis cinerea*[J]. Bulletin of the Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, 2003, 8:23-27.
- [18] CASAS-FLORES S, RIOS-MOMBERG M, BIBBINS M, et al. BLR-1 and BLR-2, key regulatory elements of photoconidiation and mycelial growth in *Trichoderma atroviride*[J]. Microbiology, 2004, 150(11):3561-3569.
- [19] 吴波,胡广齐,王聪,等.不同LED光质对丝瓜枯萎病菌及枯萎病发生的影响[J].照明工程学报,2017,28(6):87-91.
- [20] KIM K M, KOOK H S, JANG Y J, et al. The Effect of blue-light-emitting diodes on antioxidant properties and resistance to *Botrytis cinerea* in tomato[J]. Journal of Plant Pathology and Microbiology, 2013, 4:1-5.
- [21] 杨哲.四种LED光谱组合对叶用莴苣生理特性、品质及抗病性的初步探究[D].郑州:河南农业大学,2019.
- [22] 宁宇.光质对韭菜碳氮代谢、产量及品质的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2015.
- [23] 张晓梅,胡超轶,刘涛,等.不同光质对黄瓜幼苗抗旱性的影响[J].浙江农业学报,2017,29(1):58-63.