



王芽芽, 张帆, 石玉, 鲍恩财, 曹凯, 吴雪, 张毅. 不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗生理及光合荧光特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(03): 87-98.
WANG Yaya, ZHANG Fan, SHI Yu, BAO Encai, CAO Kai, WU Xue, ZHANG Yi. Effects of different R/FR ratios on physiological and photosynthetic fluorescence characteristics of double-root-cutting grafted watermelon seedlings[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(03): 87-98.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.03.08

不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗生理及 光合荧光特性的影响

王芽芽^{1,2} 张帆¹ 石玉¹ 鲍恩财² 曹凯² 吴雪^{2*} 张毅^{1*}

(1. 山西农业大学 园艺学院, 山西 太谷 030801;

2. 江苏省农业科学院 农业设施与装备研究所/农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室, 南京 210014)

摘要 为探究不同红光/远红光(R/FR)比值对双断根西瓜嫁接苗生理及光合荧光特性的影响,提高西瓜嫁接苗种苗品质,对双断根西瓜嫁接苗进行不同光质处理,共设置4种光质组合:黑暗(D)、白光(W)、高比值R/FR(R/FR=3, H)和低比值R/FR(R/FR=0.3, L),以黑暗为对照,分析西瓜嫁接苗幼苗形态、渗透调节物质、抗氧化酶系统和光合荧光特性。结果表明:与对照相比, L处理显著提高了西瓜嫁接苗的成活率和生长指标,显著提高接穗叶片中的抗氧化酶活性(SOD和POD)、可溶性糖和可溶性蛋白质量分数,同时显著降低了O²、H₂O₂和MDA的积累。L处理对西瓜嫁接苗光合系统也有一定影响:处理8 d时,嫁接苗光合特性指标、Fv/Fm、Fv'/Fm'和ΦPSII显著升高, NPQ显著下降;而长时间处理(20 d)会导致叶绿素质量分数以及光合特性指标降低, Fv/Fm、Fv'/Fm'、ΦPSII和qP下降, NPQ显著升高。综上,低比值R/FR处理能够通过增强西瓜嫁接苗抗氧化能力并影响光合作用的过程,最终促进双断根西瓜嫁接苗的成活及生长。

关键词 双断根嫁接; 西瓜; 红光/远红光; 抗氧化系统; 光合系统

中图分类号 S651

文章编号 1007-4333(2024)03-0087-12

文献标志码 A

Effects of different R/FR ratios on physiological and photosynthetic fluorescence characteristics of double-root- cutting grafted watermelon seedlings

WANG Yaya^{1,2}, ZHANG Fan¹, SHI Yu¹, BAO Encai², CAO Kai², WU Xue^{2*}, ZHANG Yi^{1*}

(1. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Facility Agricultural Engineering in the Middle and Lower reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract To investigate the effects of different R/FR ratios on the growth and physiological indices and improve the quality of seedlings, different lights were used to illuminate double-root-cutting grafted watermelon seedlings. Four light quality combinations were set as follows: Dark (D), White light (W), High ratio R/FR (R/FR=3, H) and Low ratio R/FR (R/FR=0.3, L). The morphology, osmoregulatory substances, antioxidant enzyme system and photosynthetic fluorescence characteristics of watermelon grafted seedlings

收稿日期: 2023-07-06

基金项目: 江苏省重点研发现代农业项目(BE2021379); 青海省重点研发与转化计划项目(2022NK121); 山西省重点研发计划项目(202102140601013); 山西省基础研究计划项目(202203021211263)

第一作者: 王芽芽(ORCID: 0009-0007-1509-1303), 硕士研究生, E-mail: z20213217@stu.sxau.edu.cn

通讯作者: 张毅(ORCID: 0000-0002-3086-6644), 教授, 主要从事设施农业研究, E-mail: harmony1228@163.com

吴雪(ORCID: 0009-0006-4548-6501), 副研究员, 主要从事蔬菜工厂化育苗研究, E-mail: 20230004@jaas.ac.cn

were analyzed using darkness as a control. The results showed that compared with the control treatment could significantly improve the survival rate and growth indicators of grafted seedlings, significantly increase the antioxidant enzyme activities (SOD and POD), soluble sugar and soluble protein mass fractions in the scion leaves, and significantly reduce the accumulation of O_2^{2-} , H_2O_2 and MDA. L treatment also had certain effects on the photosynthetic system of watermelon grafted seedlings. After 8 d of treatment, the photosynthetic characteristic indicators, F_v/F_m , F_v'/F_m' and $\Phi PSII$ of grafted seedlings were significantly increased and NPQ was significantly decreased. However, long-term treatment (20 d) can lead to a decrease in chlorophyll mass fraction and photosynthetic characteristic indicators including F_v/F_m , F_v'/F_m' , $\Phi PSII$ and qP , while NPQ was significantly increased. In summary, low ratio R/FR treatment can enhance the antioxidant capacity of watermelon grafted seedlings and affect the process of photosynthesis, ultimately promoting the survival and growth of double-root-cutting grafted watermelon seedlings.

Keywords double-root-cutting grafting; watermelon; R/FR; antioxidant system; photosystem

西瓜(*Citrulus lanatus* L.)系葫芦科西瓜属一年生蔓性草本植物^[1]。我国是世界第一西瓜生产大国,占世界西瓜总产量的比重基本维持在67%以上^[2]。育苗是西瓜生产的重要环节,幼苗的健壮程度将直接影响西瓜的生长发育,并与西瓜的产量和品质密切相关^[3]。由于我国人均耕地资源非常有限,绝大多数瓜农在固定地块栽培西瓜,因此生产中常因连作障碍和土传病害等问题造成西瓜品质和产量的下降,这些问题已成为制约西瓜产业实现可持续发展的瓶颈^[4]。采用抗性砧木嫁接可以提高西瓜对枯萎病等土传病害的抗性,提高植株对逆境的抵抗能力,增加产量^[5]。双断根(Double-root-cutting, DRC)嫁接是一种新兴的嫁接方法,即同时切除接穗和砧木的根。与其他传统嫁接相比, DRC嫁接更适宜工厂化育苗的生产,且具有更高的成活率,伤口愈合所需的时间更短,还可以增强嫁接后作物的活力和产量^[6]。

光是维持植物生长发育所必须的环境因子,越来越多研究表明,光环境是影响嫁接苗成活和幼苗质量的一个重要环境因素^[7]。与传统光源相比,发光二极管(LED)具有低散热、低耗能、使用寿命长和可调控性强等特点^[8]。目前有研究发现:适当增加光照强度并补充绿光可以通过促进砧木根系的再生,改善DRC番茄和黄瓜嫁接苗嫁接接口愈合组织的形成和嫁接幼苗品质^[9-10]。然而,关于光环境调控对DRC西瓜嫁接苗生长的影响鲜有报道。近年来,关于远红光(Far-red light, FR)对蔬菜作物生长、品质和抗逆性影响的研究日益增多。FR会导致植株增高、节间增长、叶面积增加和叶绿素含量降低^[11]。在LED白光和红蓝光中添加FR均

能显著提高水培生菜的株高、叶面积、根系长度与干鲜质量^[12-13],可见FR对植物幼苗的生长及形态均有显著影响。此外,FR还可以影响植物的生理及代谢活动。研究发现降低红光(R)与FR比值,可显著增加番茄叶片和根中渗透调节物质的含量和抗氧化酶活性,并显著降低叶片和根系中活性氧含量,增强番茄的抗氧化能力^[14]。窦海杰等^[15]研究发现,FR处理显著提高了罗勒叶片和整株的花青素、总酚和类黄酮的含量;在辣椒中,补充6%FR可减轻干旱胁迫引起的PSII光抑制和膜脂过氧化,提高辣椒幼苗的耐旱性^[16]。目前,尽管已有研究揭示FR对植株的生物量、生理和代谢活动的调控作用,但FR对DRC西瓜嫁接苗生长及生理的影响尚未有研究报道。因此,阐明光环境调控对DRC嫁接苗生长发育的影响,将有助于嫁接苗苗期管理的集约化和高效化,提高嫁接苗存活率及品质,为嫁接苗后期的生长及高产奠定基础。

本研究以DRC西瓜嫁接苗为试验材料,采用LED灯精确调制光谱波长和光照强度,研究不同R/FR比值对DRC西瓜嫁接苗生理及光合荧光特性的影响,筛选出适宜的光照模式,以期为提高西瓜嫁接苗成活率、育苗质量以及工厂化育苗领域光环境调控技术的选择提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

本试验开展时间为2021年7月—2023年4月,试验地点为江苏省农业科学院农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室。人工气候室为南京恒裕仪器-智能型人工气候室,采用计算机控制系

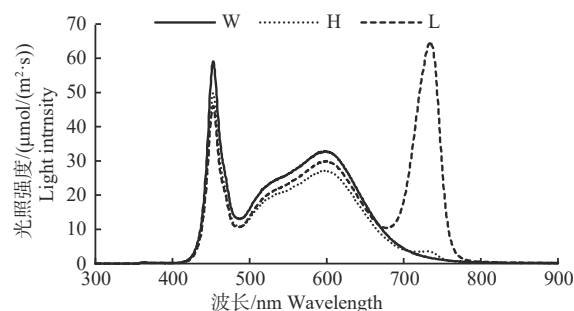
统对设施环境进行精确控制。栽培架共3组,每组尺寸为140 cm×240 cm(长×高)。栽培架分为4层,每层高度为60 cm。采用LED顶光模组智能全光谱植物生长灯,灯珠矩阵分布均匀,无极调节。以‘早佳8424’西瓜(*Citrulus lanatus* L. cv. ‘8424’)为接穗材料,‘抗病先锋’南瓜(*Cucurbita moschata* L. cv. ‘Kangbingxianfeng’)为砧木材料。种子均由江苏省农业科学院农业设施与装备研究所设施种植环境工程及装备创新团队提供。

1.2 试验处理

挑选籽粒饱满、大小均一的接穗和砧木种子,消毒后置25℃黑暗环境下浸泡5 h,然后用纱布包裹在恒温培养箱中催芽,西瓜接穗较砧木催芽晚2 d。种子露白后将接穗和砧木种子分别播种于装有瓜果类专用型育苗基质(柴河米)的72孔塑料穴盘中(54 cm×28 cm),放置于人工气候室中常规管理。育苗期间光照强度为300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,昼夜温度均为25℃,光周期为12 h/12 h,相对湿度保持在60%。当砧木的第1片真叶长至硬币大小,西瓜接穗子叶展平时进行嫁接。采用双断根嫁接法,将砧木根在距子叶下方4~6 cm处斜切断。为避免相互遮阴去除砧木生长点基部和子叶的一半,用刀片在接穗子叶节基部以下1~2 cm处斜切“V”字形切面,用嫁接针将砧木上方切口处刺0.5~1.0 cm深的孔将接穗插入,并用塑料嫁接夹固定在一起。将嫁接苗扦插于72孔塑料穴盘基质中,为避免嫁接苗之间相互遮阴采取隔行扦插。每个穴盘共36株嫁接苗,并立即用配套的托盘盖覆盖,用保鲜膜密封以保持湿度。愈合期间的昼夜温度为27℃/18℃,光周期为12 h/12 h。为防止叶片脱水,在嫁接后0~3、4~6和7~10 d,相对湿度分别保持在90%、80%和70%。嫁接后第11天将幼苗在气候室内进行常规管理,每隔2 d浇灌1/2 Hoagland 营养液。

为使嫁接苗在适宜的光照环境下生长,本研究采用逐渐增加光照强度的模式。在试验0~3 d应用50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的相对低光强,在4~6和7~10 d光强分别增加到100和200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。共设置4个光质处理,以黑暗(D)作为对照,D处理在双断根嫁接3 d后转移到正常的白光下保持生长。在白光(W)处理中添加不同强度的远红光设置成高比值红光/远红光(R/FR=3, H)和低比值红光/远红光(R/FR=0.3, L)。每个处理6盘嫁接苗,共使用

864株DRC西瓜嫁接苗。栽培架四周使用锡纸及遮光布遮光,LED灯光高度控制在40 cm,采用光谱辐射计(PS-300, Apogee Instruments Inc., Logan, UT, USA)检测波普分布(图1)。



W: 白光; H: 高比值R/FR(R/FR=3); L: 低比值R/FR(R/FR=0.3)。

W: White light; H: High ratio R/FR (R/FR=3); L: Low ratio R/FR (R/FR=0.3)。

图1 光处理的光谱分布图

Fig. 1 Spectral distribution of light processing

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标测定

光质处理10 d时,测定嫁接苗成活率。成活率=光处理后嫁接苗成活数/嫁接苗总数×100%。每处理3次重复,每次重复24株嫁接苗。光质处理8和20 d时测定生长指标。处理8 d时每个处理4次重复,每次重复取5株嫁接苗;处理20 d时每个处理3次重复,每次重复5株嫁接苗。将光质处理8和20 d嫁接苗清洗干净吸干水分,用直尺(精确度1 mm)和游标卡尺(精确度0.02 mm)测定株高、茎粗和根长;用剪刀分割接穗、砧木和根三部分,使用电子天平(精确度0.0001 g)测定鲜重后,将样品放入烘箱,105℃杀青15 min,于60℃烘干48 h后测定干重。

1.3.2 生理指标测定

光质处理8和20 d时,叶绿素质量分数采用96%乙醇提取法^[17]。光质处理后0、2、4、6、8、10和20 d对嫁接苗接穗进行取样测定生理指标。过氧化氢(H_2O_2)含量测定采用索莱宝试剂盒,超氧阴离子(O_2^-)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性分别用羟胺氧化法、氮蓝四唑(NBT)法和愈创木酚法测定^[18],丙二醛(MDA)、可溶性糖和可溶性蛋白质含量分别采用硫代巴比妥酸(TBA)法、蒽酮-硫酸法和G-250法测定^[17],每处理3次重

复,每次重复6株嫁接苗。

1.3.3 光合特性及叶绿素荧光参数的测定

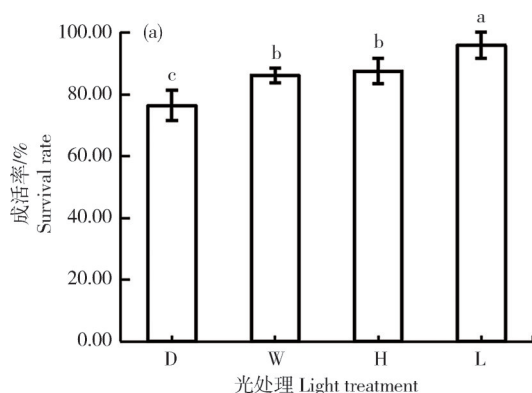
光质处理8和20 d时,使用 Li-6800 便携式光合仪(LI-COR Inc., Lincoln, USA)测定嫁接苗植株叶片净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)。从每个处理中随机选择5个植物样本,参数设置为压力0.1 kPa、空气流速500 $\mu\text{mol/s}$ 、湿度60%、温度25 $^{\circ}\text{C}$ 、风扇速度10 000 r/min和 CO_2 浓度400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,照射光强在8和20 d时分别设定为200和300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。测定叶绿素荧光参数时,先将嫁接苗置于黑暗条件30 min,充分适应光环境变化后,检测在暗适应下每个处理叶片的最大荧光(F_m)和初始荧光(F_o)。随后将嫁接苗置于光下,活化1 h后检测叶片在目标光强下的最小荧光(F_o')、最大荧光(F_m')和稳态荧光(F_s)。计算出不同处理下西瓜接穗叶片的各项荧光参数,包括:PSII反应中心实际光化学效率(Φ_{PSII})、实际光化学量子产量(F_v'/F_m')、PSII最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(q_P)和非光化学淬灭系数(NPQ)^[19]。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2019 软件对数据进行整理与作图,采用 SPSS 20.0 统计软件进行方差和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗成活率及生长的影响



D: 黑暗; W: 白光; H: 高比值 R/FR ($R/FR=3$); L: 低比值 R/FR ($R/FR=0.3$)。同列数据不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

D: Dark; W: White light; H: High ratio R/FR ($R/FR=3$); L: Low ratio R/FR ($R/FR=0.3$). Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$). The same below.

图2 不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗成活率(a)和生长情况(b)的影响

Fig. 2 Effect of different R/FR ratios on the survival (a) and growth (b) of grafted watermelon seedlings

对嫁接苗进行10 d光质处理,W、H和L处理西瓜嫁接苗成活率要显著高于对照(D)处理。其中,L处理下嫁接苗的成活率较高,为95.83%,W和H处理下西瓜嫁接苗的成活率分别为86.11%和87.50%(图2(a))。为进一步确定不同比值R/FR对双断根西瓜嫁接苗生长情况的影响,对光质处理8和20 d的西瓜嫁接苗生长指标进行测定,结果表明:与对照相比,在L处理下,光质处理8 d时,显著增加了DRC嫁接苗的株高和根系生长指标,且显著诱导了DRC嫁接苗不定根的形成(图2(b));光质处理20 d时,西瓜嫁接苗株高、接穗干鲜质量、砧木茎粗、根长和根干鲜质量显著增加67.51%、383.49%、273.73%、22.36%、35.78%、107.69%和56.25%(表1)。综上,L处理能够显著促进DRC西瓜嫁接苗幼苗的生长及诱导嫁接苗不定根的形成。

2.2 不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗接穗活性氧含量的影响

不同R/FR比值对西瓜嫁接苗接穗活性氧含量的影响见图3。在L处理下,光质处理2~20 d时嫁接苗接穗叶片中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 H_2O_2 含量始终低于D、W和H处理。其中,在L处理0~8 d时,嫁接苗接穗叶片中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率呈现出降-升-降的变化趋势,而 H_2O_2 含量则呈现出快速下降趋势;但接穗叶片中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 H_2O_2 含量均在L处理8 d时达到较低水平,比对照分别显著降低29.68%和43.80%。综上,L处理可降低DRC西瓜嫁接苗接穗因嫁接损伤而产生的活性氧(ROS)含量,促进嫁接苗的生长发育。

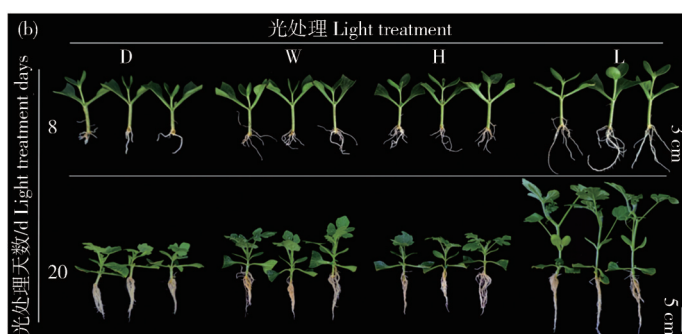


表 1 不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗生长指标的影响

Table 1 Effect of different R/FR ratios on the growth index of grafted watermelon seedlings

光处理天数/d Light treatment days	部位 Parts	指标 Index	处理 Treatment			
			D	W	H	L
8	接穗	株高/cm	10.18±0.73 b	10.60±1.16 b	10.32±0.65 b	11.47±0.66 a
		茎粗/mm	1.45±0.08 a	1.44±0.03 a	1.47±0.06 a	1.48±0.06 a
		鲜质量/g	1.16±0.16 a	1.19±0.16 a	1.23±0.09 a	1.39±0.12 a
		干质量/g	0.101±0.009 a	0.101±0.007 a	0.100±0.009 a	0.102±0.009 a
	砧木	茎粗/mm	2.38±0.26 a	2.53±0.34 a	2.33±0.47 a	2.62±0.76 a
		鲜质量/g	5.77±0.15 a	5.73±0.12 a	5.79±0.20 a	5.86±0.09 a
		干质量/g	0.244±0.015 a	0.246±0.017 a	0.231±0.022 a	0.237±0.013 a
	根	根长/cm	2.09±0.53 c	4.06±0.68 b	3.87±0.56 b	4.64±0.60 a
		鲜质量/g	0.51±0.03 c	0.72±0.06 ab	0.69±0.07 b	0.79±0.01 a
		干质量/g	0.018±0.001 b	0.019±0.001 b	0.020±0.001 b	0.026±0.002 a
	20	株高/cm	25.83±1.75 c	32.41±4.57 b	27.30±5.28 c	43.27±5.56 a
		茎粗/mm	2.38±0.47 b	3.31±0.33 a	3.34±0.25 a	3.47±0.49 a
		鲜质量/g	1.03±0.37 c	3.49±0.26 b	3.06±0.76 b	4.98±0.91 a
		干质量/g	0.099±0.036 c	0.249±0.054 b	0.249±0.067 b	0.371±0.064 a
20	接穗	茎粗/mm	4.27±0.47 b	4.58±0.47 b	4.51±0.58 b	5.50±0.72 a
		鲜质量/g	2.24±0.26 a	2.48±0.37 a	2.28±0.31 a	2.52±0.31 a
		干质量/g	0.151±0.030 a	0.159±0.032 a	0.140±0.021 a	0.165±0.024 a
	砧木	根长/cm	14.31±1.49 c	17.23±3.36 ab	15.63±2.60 b	19.43±3.60 a
		鲜质量/g	0.65±0.21 c	1.09±0.21 b	0.94±0.25 b	1.35±0.38 a
		干质量/g	0.028±0.010 c	0.049±0.008 b	0.045±0.010 b	0.064±0.012 a
	根	根长/cm	14.31±1.49 c	17.23±3.36 ab	15.63±2.60 b	19.43±3.60 a
		鲜质量/g	0.65±0.21 c	1.09±0.21 b	0.94±0.25 b	1.35±0.38 a
		干质量/g	0.028±0.010 c	0.049±0.008 b	0.045±0.010 b	0.064±0.012 a
	20	株高/cm	25.83±1.75 c	32.41±4.57 b	27.30±5.28 c	43.27±5.56 a
		茎粗/mm	2.38±0.47 b	3.31±0.33 a	3.34±0.25 a	3.47±0.49 a
		鲜质量/g	1.03±0.37 c	3.49±0.26 b	3.06±0.76 b	4.98±0.91 a
		干质量/g	0.099±0.036 c	0.249±0.054 b	0.249±0.067 b	0.371±0.064 a

注：D：黑暗；W：白光；H：高比值 R/FR (R/FR=3)；L：低比值 R/FR (R/FR=0.3)。同列数据不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: D: Dark; W: White light; H: High ratio R/FR (R/FR=3); L: Low ratio R/FR (R/FR=0.3). Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$). The same below.

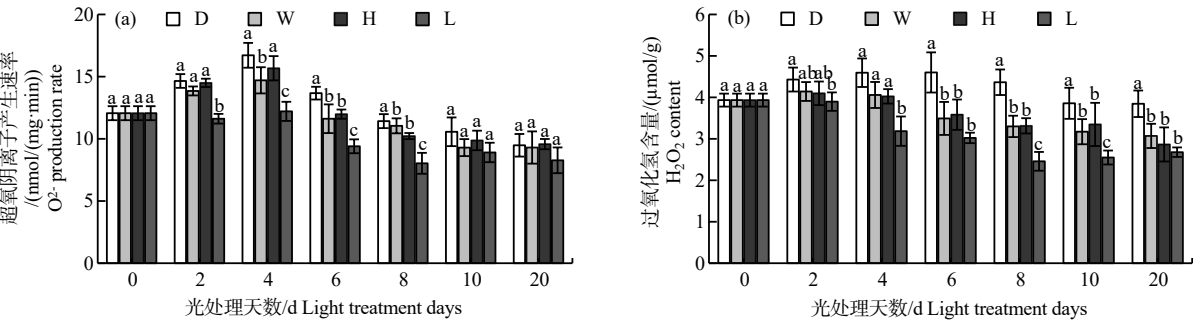


图 3 不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗接穗 O²⁻产生速率 (a) 和 H₂O₂ 含量 (b) 的影响

Fig. 3 Effect of different R/FR ratios on O²⁻ production rate (a) and H₂O₂ contents (b) of grafted watermelon seedlings

2.3 不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗接穗丙二醛(MDA)质量摩尔浓度的影响

不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗接穗 MDA 质量摩尔浓度的影响见图 4。在 L 处理下,光质处理 2~20 d 时,嫁接苗接穗叶片中 MDA 质量摩尔浓度始终低于 D、W 和 H 处理。其中,在 L 处理 4~10 d 时,嫁接苗接穗叶片中 MDA 质量摩尔浓度呈逐渐下降趋势,并且在 L 处理 10 d 时,嫁接苗接穗叶片中 MDA 质量摩尔浓度达到较低水平,比对照显著降低 37.20%。综上,L 处理可显著降低接穗叶片中 MDA 质量摩尔浓度,从而减轻 DRC 西瓜嫁接苗在嫁接过程中所产生的机械损伤,促进嫁接苗生长发育。

2.4 不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗接穗抗氧化酶活性的影响

不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗接穗抗氧化酶活性影响的结果见图 5。在 L 处理下,光质处理 2~20 d 时嫁接苗接穗叶片中 SOD 和 POD 酶活性始终高于 D、W 和 H 处理。在 L 处理 8 d 时,嫁接苗接穗叶片中 SOD 和 POD 酶活性均达到峰值,比对照分

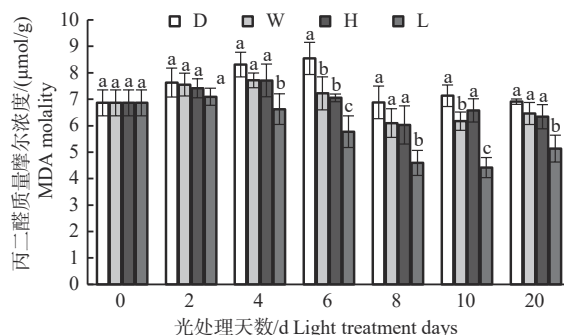


图 4 不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗接穗丙二醛质量摩尔浓度的影响

Fig. 4 Effect of different R/FR ratios on the malondialdehyde molality of grafted watermelon seedling scions

别显著提高了 44.68% 和 62.00%。光质处理 20 d 时,L 处理下嫁接苗接穗叶片中 SOD 和 POD 酶活性仍高于同时期 D、W 和 H 处理。综上,L 处理可显著促进嫁接苗接穗叶片中 SOD 和 POD 活性的增加,加快活性氧的清除并减轻嫁接给植株膜结构和功能带来的破坏。

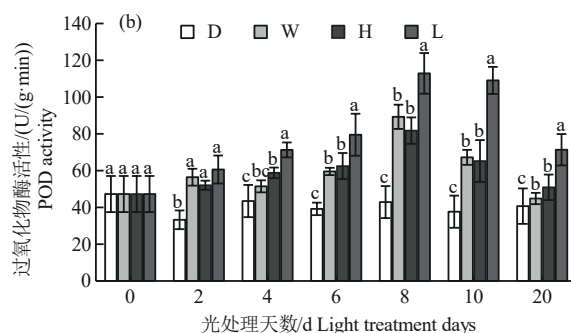
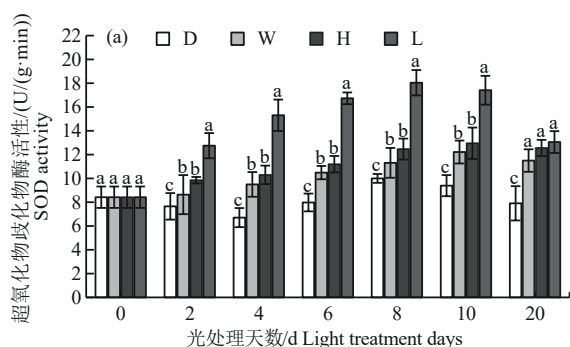


图 5 不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗接穗 SOD(a) 和 POD(b) 活性的影响

Fig. 5 Effect of different R/FR ratios on SOD (a) and POD (b) activities of grafted watermelon seedling scions

2.5 不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗接穗渗透调节物质含量的影响

不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗接穗叶片渗透调节物质含量的影响见图 6。在 L 处理下,光质处理 2~20 d 时,嫁接苗接穗叶片中可溶性糖和可溶性蛋白质量分数的积累始终显著高于 D、W 和 H 处理。在 L 处理 8 d 时,嫁接苗接穗叶片中可溶性糖和可溶性蛋白质量分数达到较高水平,比对照分别显著提高了 35.65% 和 48.36%。综上,L 处理可以显著促进西瓜嫁接苗接穗叶片可溶性糖和可溶性蛋白的积累,进而缓解 DRC 嫁接过程对植株造成的损伤。

2.6 不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗叶绿素质量分数的影响

不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗叶绿素质量分数的影响见表 2。不同光质处理 8 d 时,各处理间叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素与类胡萝卜素质量分数无显著性差异。但在光质处理 20 d 时,H 和 L 处理均使得嫁接苗叶绿素质量分数降低,其中,在 L 处理下叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素与类胡萝卜素质量分数分别较对照显著降低了 25.31%、28.45%、25.88% 和 41.63%。综上,远红光处理时间过长会导致嫁接苗接穗叶片叶绿素质量分数显著下降。

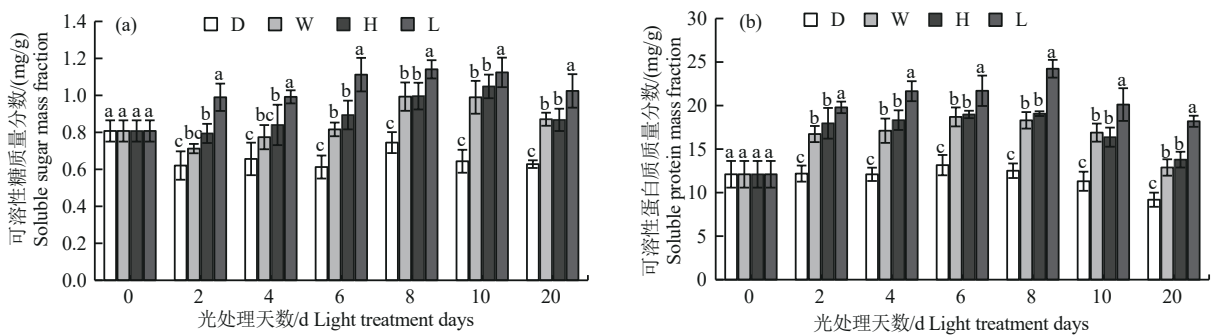


图 6 不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗接穗可溶性糖(a)和可溶性蛋白(b)质量分数的影响

Fig. 6 Effect of different R/FR ratios on soluble sugar (a) and soluble protein (b) mass fraction of grafted watermelon seedling scions

表 2 不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗叶绿素质量分数的影响

Table 2 Effect of different R/FR ratios on the Chlorophyll mass fraction of grafted watermelon seedling mg/g

光处理天数/d Light treatment days	处理 Treatment	叶绿素 a 质量分数 Chlorophyll a mass fraction	叶绿素 b 质量分数 Chlorophyll b mass fraction	总叶绿素质量分数 Chlorophyll mass fraction	类胡萝卜素质量分数 Carotenoid mass fraction
8	D	1.124±0.003 a	0.607±0.095 a	1.731±0.096 a	0.101±0.019 a
	W	1.164±0.179 a	0.576±0.075 a	1.740±0.115 a	0.101±0.010 a
	H	1.082±0.082 a	0.551±0.052 a	1.633±0.048 a	0.108±0.014 a
	L	1.103±0.088 a	0.597±0.060 a	1.701±0.027 a	0.101±0.015 a
20	D	1.205±0.102 a	0.239±0.019 a	1.445±0.083 a	0.233±0.010 a
	W	1.130±0.039 a	0.223±0.048 ab	1.353±0.029 a	0.216±0.067 ab
	H	0.987±0.016 b	0.217±0.008 ab	1.205±0.022 b	0.158±0.016 bc
	L	0.900±0.030 b	0.171±0.018 c	1.071±0.048 c	0.136±0.012 c

2.7 不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗光合特性和叶绿素荧光的影响

不同光质处理 8 d 时,与对照相比,L 处理使得嫁接苗接穗叶片的 Pn、Tr、Ci 和 Gs 分别显著提高了 18.68%、48.71%、15.44% 和 42.35%。但在光质处理 20 d 时,与对照相比,H 和 L 处理使得 Pn、Tr、Ci 和 Gs 均显著降低,其中 L 处理较对照分别显著降低 27.92%、27.91%、6.51% 和 28.36%(表 3)。

不同光质处理 8 d 时,与对照相比,L 处理使得 Fv/Fm、ΦPSII 和 qP 分别显著升高 2.59%、20.81% 和 16.72%,NPQ 显著降低 17.23%,Fv'/Fm' 与对照差异不显著。但在光质处理 20 d 时,与对照相比,L 处理使得 Fv/Fm、Fv'/Fm'、ΦPSII 和 qP 参数分别降低 3.21%、5.15%、2.48% 和 0.92%,NPQ

显著升高 38.24%(表 4)。综上,L 处理 8 d 时,提高了嫁接苗光合特性指标、Fv/Fm、ΦPSII 和 qP 参数,提高了光能利用率;但光质处理 20 d 时会导致光合特性及 PSII 反应中心光化学效率降低,而非光化学猝灭系数的升高保护了嫁接苗叶片正常进行光合。

3 讨论

3.1 不同 R/FR 比值对双断根西瓜嫁接苗成活率及生长的影响

近年来,关于添加远红光从而改变红光与远红光比值对蔬菜作物生长、品质和抗逆性产生影响的研究日益增多。FR 能够促进西瓜嫁接苗的茎粗、叶片数及产量^[20];FR 可以通过促进茎的伸长和改

表3 不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗光合特性的影响

Table 3 Effect of different R/FR ratios on photosynthetic characteristics of grafted watermelon seedling

光处理天数/d Light treatment days	处理 Treatment	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Pn	蒸腾速率/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Tr	胞间 CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) Ci	气孔导度/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Gs
8	D	5.691±0.936 b	0.004 0±0.000 4 d	317.577±24.624 b	0.399±0.045 d
	W	6.123±0.367 b	0.006 1±0.000 7 b	330.602±29.143 b	0.475±0.036 c
	H	5.914±0.790 b	0.004 9±0.000 7 c	367.223±16.567 a	0.521±0.050 b
	L	6.998±0.228 a	0.007 8±0.000 4 a	375.567±19.022 a	0.568±0.258 a
20	D	14.477±1.125 a	0.008 6±0.000 2 a	353.606±3.841 a	0.678±0.021 a
	W	13.978±0.713 a	0.007 0±0.000 4 b	345.344±4.056 a	0.532±0.039 b
	H	10.798±0.676 b	0.006 8±0.001 4 bc	331.776±3.237 b	0.502±0.102 b
	L	10.431±1.356 b	0.006 2±0.001 3 c	330.036±7.225 b	0.456±0.138 c

表4 不同 R/FR 比值对西瓜嫁接苗叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effect of different R/FR ratios on chlorophyllII fluorescence parameters of grafted watermelon seedling

光处理天数/d Light treatment days	处理 Treatment	PSII 最大光化学 量子产量 Fv/Fm	PSII 有效光化学 量子产量 Fv'/Fm'	实际光化学 量子产量 ΦPSII	非光化学 淬灭系数 NPQ	光化学 淬灭系数 qP
8	D	0.789±0.006 b	0.677±0.028 a	0.448±0.085 b	0.795±0.034 a	0.605±0.101 b
	W	0.790±0.006 b	0.682±0.052 a	0.469±0.055 ab	0.689±0.078 ab	0.624±0.112 b
	H	0.802±0.010 a	0.642±0.020 a	0.387±0.086 ab	0.599±0.119 b	0.790±0.086 a
	L	0.810±0.010 a	0.681±0.031 a	0.538±0.032 a	0.658±0.117 b	0.764±0.110 a
20	D	0.809±0.006 a	0.777±0.042 a	0.649±0.010 a	0.197±0.052 b	0.867±0.013 a
	W	0.799±0.010 b	0.748±0.102 a	0.628±0.022 a	0.257±0.111 ab	0.818±0.094 a
	H	0.792±0.007 ab	0.735±0.015 a	0.632±0.025 a	0.298±0.058 a	0.859±0.199 a
	L	0.783±0.012 b	0.737±0.023 a	0.633±0.029 a	0.319±0.059 a	0.859±0.013 a

变叶片形态,使番茄叶片的长宽比及叶面积显著提高,从而促进番茄的生长^[21];Tan等^[22]指出,降低R/FR比值会引发植物的庇荫反应,加速茎中的细胞分裂和细胞伸长从而增加株高。本试验中,与对照相比,在R/FR比值为0.3处理8 d时显著促进了DRC西瓜嫁接苗不定根的形成及生长;处理20 d时,DRC嫁接苗株高、接穗干鲜重、砧木茎粗、根长及根干鲜重等形态指标显著升高。说明低比值R/

FR能够显著提高DRC西瓜嫁接苗的成活率及幼苗形态指标,诱导不定根的再生,这与前人研究结果类似^[23-24]。相关研究表明,R/FR比值为0.1时可通过诱导光敏色素互作因子(Phytochrome interacting factors, PIFs)与下游生长素生物合成等基因相结合,调节拟南芥根系发育的相关机制,促进不定根的形成^[25]。但关于FR诱导DRC西瓜嫁接苗不定根的再生相关机制却鲜有研究报道。

3.2 不同R/FR比值对双断根西瓜嫁接苗抗氧化酶系统及渗透调节物质的影响

植物在嫁接时受到机械损伤会诱导 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 的释放,从而导致细胞膜脂过氧化,导致生物膜一系列的氧化伤害^[26]。丙二醛是膜脂过氧化的产物,其含量的高低能够直接反映植物细胞膜脂过氧化程度^[27]。研究表明,低比值R/FR能降低嫁接番茄叶片和根中ROS和MDA含量,促进植株的生长^[14]。本试验中,与对照相比,在R/FR比值为0.3时,西瓜嫁接苗接穗叶片中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率、 H_2O_2 含量和MDA质量摩尔浓度显著降低,这与Gavassi等^[28]的研究结果一致。说明低比值R/FR可以有效抑制DRC西瓜嫁接苗愈合期间接穗叶片中活性氧和MDA含量的积累,促使嫁接苗能够进行正常的生理活动。

SOD和POD作为植株抗氧化保护酶类,是植物抗氧化防御系统的一部分,能有效地清除因嫁接损害而产生的ROS等有害物质^[29]。相关研究表明,R/FR比值为0.8时提高了番茄根系中SOD、POD和CAT等抗氧化酶活性,促进ROS的清除^[30]。本试验中,在R/FR比值为0.3处理下,SOD和POD酶活性在光质处理2~20 d均显著高于对照,且与同时期其他光质处理相比始终保持在较高水平。说明低比值R/FR可以有效的激活嫁接愈合期接穗叶片中的氧化应激反应,显著提高植株SOD和POD抗氧化酶活性,有效阻止ROS积累和MDA含量升高^[18],从而缓解DRC对西瓜嫁接苗机械损伤,促进嫁接苗的愈合及生长发育。另外,本研究发现R/FR比值为0.3处理20 d时POD和SOD酶活性仍高于其它光质处理,这可能是低比值R/FR诱导光敏色素和抗坏血酸-谷胱甘肽循环酶(ASA-GSH)参与嫁接苗接穗损伤产生的应激反应,进而调节抗氧化酶活性的积累^[26,30]。

He等^[31]指出,FR能够显著增加生菜可溶性蛋白、可溶性糖和花青素的含量。相关研究表明,可溶性糖和可溶性蛋白是植物细胞内的一个重要渗透调节物质,其含量不仅反映了植株的代谢能力,还可以促进嫁接后细胞分裂及愈伤组织的形成^[29,32]。在本研究中,R/FR比值为0.3处理下可溶性糖和可溶性蛋白质量分数在光质处理2~20 d均显著高于对照,说明低比值R/FR在嫁接愈合期能够提高嫁接苗接穗叶片的可溶性糖与可溶性蛋白的积累量,促进嫁接苗嫁接接口愈合及生长发育。这

可能是因为低比值R/FR可引起光敏色素构型发生变化,通过光信号转导途径诱导渗透调节物质积累,最终缓解嫁接过程对幼苗造成的机械损伤^[33]。

3.3 不同R/FR比值对双断根西瓜嫁接苗接穗叶绿素质量分数和光合荧光特性的影响

叶绿素含量与植物叶片光合能力密切相关,在光能捕获、能量转化和电子传递等方面均具有重要作用,因此叶绿素的含量与组成直接影响植物叶片的光合能力^[34-35]。Lee等^[36]研究发现,与对照相比,低比值R/FR处理显著降低了生菜叶片中的叶绿素质量分数和光合速率。本研究中,R/FR比值为0.3处理8 d时,与对照相比,叶绿素质量分数无显著性差异,光合特性指标显著升高,这可能是因为FR对嫁接苗产生爱默生增益效应^[37],促进了光合效率的显著增加;在光质处理20 d时,显著降低了嫁接苗叶片叶绿素质量分数与光合特性,这可能由于FR对嫁接苗产生的庇荫作用^[22],造成光环境减弱的假象,嫁接苗感受到环境中低比值R/FR后将叶绿素和光合特性调整为适应状态,以实现对光能最大限度的捕获和利用。这与孟力等^[24]补充FR对冰草光合特性的影响中的研究结果类似。

植物叶绿素主要通过叶绿素荧光、光合电子传递和热耗散3个途径吸收耗散光能,而叶绿素荧光变化可以反映光合作用和热耗散的情况^[38]。相关研究表明,增加FR可以有效提高生菜PSII反应中心光化学效率,从而提高生菜产量^[39]。马宁等^[40]研究发现,嫁接可增强黄瓜叶片的Fv/Fm和NPQ,从而提高植株的光保护能力及原初光能转换效率。本研究中,与对照相比,在R/FR比值为0.3处理8 d时,嫁接苗叶片的Fv/Fm、ΦPSII和qP参数显著升高,NPQ显著降低。在适宜的范围内,低比值R/FR能够显著提高西瓜嫁接苗PSII反应中心的光化学效率,而ΦPSII增加和NPQ减少可能是由于远红光对PSI的优先激发,这有利于PSII反应中心重新开放,使嫁接苗光质处理前期能更有效的提高光能利用率,这可能也是嫁接苗净光合速率增加的原因^[39]。在光质处理20 d时,Fv/Fm、Fv'/Fm'、ΦPSII和qP下降,NPQ显著升高,表明西瓜嫁接苗叶片主要是通过增加热耗散形式来消耗过多的光能,避免低比值R/FR及嫁接苗机械损伤对光合机构造成损害,确保嫁接苗的正常生长。

4 结 论

本研究探讨了不同R/FR比值对DRC西瓜嫁接苗生理及光合荧光特性的影响,结果表明R/FR比值为0.3时显著促进DRC西瓜嫁接苗的生长发育,通过调节抗氧化酶活性和渗透调节物质的含量,增强清除活性氧的能力,从而促进了嫁接苗的生长发育。另外,本研究发现R/FR比值为0.3时对嫁接苗进行短时(8 d)处理,会提高嫁接苗的光能利用率,而处理时间过长(20 d)会对西瓜嫁接苗接穗叶片产生庇荫作用,进而影响嫁接苗叶绿素含量及光合荧光特性,因此需要进一步探究适宜的FR光照天数。

参考文献 References

- [1] 刘子记,朱婕,詹园凤,党选民. 小型西瓜核心种质遗传多样性及亲缘关系分析[J]. 西南农业学报, 2015, 28(6): 2686-2690
Liu Z J, Zhu J, Zhan Y F, Dang X M. Genetic diversity and genetic relationship analysis of mini-watermelon core collection [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(6): 2686-2690 (in Chinese)
- [2] 王娟娟,李莉,尚怀国. 我国西瓜甜瓜产业现状与对策建议[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(5): 69-73
Wang J J, Li L, Shang H G. Present situation and countermeasures of watermelon and melon industry in China [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020, 33(5): 69-73 (in Chinese)
- [3] 陆瑾,吴骥飞. 设施西瓜绿色优质高效栽培技术[J]. 上海蔬菜, 2022(2): 69-71
Lu J, Wu J F. Green, high-quality and efficient cultivation techniques of protected watermelon [J]. *Shanghai Vegetables*, 2022(2): 69-71 (in Chinese)
- [4] 赵加欣. 愈合期环境与西瓜接穗对嫁接苗根系生长和糖代谢的调控[D]. 北京:中国农业科学院, 2020
Zhao J X. Effects of healing environment and watermelon scion on root growth and sugar metabolism of grafted seedlings [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020 (in Chinese)
- [5] 别之龙. 西瓜甜瓜嫁接育苗安全生产技术规程[J]. 中国瓜菜, 2012, 25(1): 49-52, 78
Bie Z L. Technical specification for safe production of grafted seedlings of watermelon and melon [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2012, 25(1): 49-52, 78 (in Chinese)
- [6] Miceli A, Sabatino L, Moncada A, Vetrano F, D'Anna F. Nursery and field evaluation of eggplant grafted onto unrooted cuttings of *Solanum torvum* Sw [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 178: 203-210
- [7] Yavari N, Tripathi R, Wu B S, MacPherson S, Singh J, Lefsrud M. The effect of light quality on plant physiology, photosynthetic, and stress response in *Arabidopsis thaliana* leaves [J]. *PLoS One*, 2021, 16(3): e0247380
- [8] Wu B S, Hitti Y, MacPherson S, Orsat V, Lefsrud M G. Comparison and perspective of conventional and LED lighting for photobiology and industry applications [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 171: 103953
- [9] Sun F Q, Ma S, Gao L H, Qu M, Tian Y Q. Enhancing root regeneration and nutrient absorption in double-rootcutting grafted seedlings by regulating light intensity and photoperiod [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 264: 109192
- [10] Li F H, Li Y, Li S L, Wu G X, Niu X X, Shen A M. Green light promotes healing and root regeneration in double-root-cutting grafted tomato seedlings [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 289: 110503
- [11] Cagnola J I, Ploschuk E, Benech-Arnold T, Finlayson S A, Casal J J. Stem transcriptome reveals mechanisms to reduce the energetic cost of shade-avoidance responses in tomato [J]. *Plant Physiology*, 2012, 160(2): 1110-1119
- [12] 孟力力,宋江峰,柏宗春,曹凯,张义,杨其长. 远红光对生菜光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 181-189
Meng L L, Song J F, Bai Z C, Cao K, Zhang Y, Yang Q C. Effects of far-red light on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of lettuce [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 38(1): 181-189 (in Chinese)
- [13] 李列, 仝宇欣, 李锦, 杨其长. 不同光质组合对生菜生长和能量利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2020, 48(9): 114-120
Li L, Tong Y X, Li J, Yang Q C. Effect of different combinations of light wavelengths on growth and energy use efficiency of lettuce [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2020, 48(9): 114-120 (in Chinese)
- [14] 于捷,艾楷棋,何雅倩,杨俊伟,曹凯,王云龙,邹志荣. 红光与远红光比值对盐胁迫下番茄幼苗抗氧化能力的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(8): 1487-1497
Yu J, Ai K Q, He Y Q, Yang J W, Cao K, Wang Y L, Zou Z R. Effects of different red to far-red light ratios on oxidation resistance ability of tomato seedling under salt stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(8): 1487-1497 (in Chinese)
- [15] 窦海杰, Genhua Niu, Mengmeng Gu, Joseph Masabni. 远红光有效促进罗勒植株的生物量和叶片花青素、总酚及类黄酮的积累[J]. 中国蔬菜, 2022(5): 81-88
Dou H J, Niu G H, Gu M M, Masabni J. Far-red light effectively accelerates the accumulation of biomass, leaf blade anthocyanin, total phenolics, and flavonoids in basil plant [J]. *China Vegetables*, 2022(5): 81-88 (in Chinese)
- [16] 董桑婕,姜小春,王羚羽,林锐,齐振宇,喻景权,周艳虹. 远红光补光对辣椒幼苗生长和非生物胁迫抗性的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(6): 1189-1198
Dong S J, Jiang X C, Wang L Y, Lin R, Qi Z Y, Yu J Q, Zhou Y H. Effects of supplemental far-red light on growth and abiotic stress tolerance of pepper seedlings [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(6): 1189-1198 (in Chinese)
- [17] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006
Gao J F. *Experimental Guidance for Plant Physiology* [M]. Beijing:

- Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [18] 白雪. 薄皮甜瓜嫁接体砧穗愈合过程中的亲和生理机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019
- Bai X. Study on affinity physiological mechanism of grafted muskmelon during rootstock and scion healing [D]. Nanning: Guangxi University, 2019 (in Chinese)
- [19] Ádám É, Hussong A, Bindics J, Wüst F, Viczián A, Essing M, Medzihradszky M, Kircher S, Schäfer E, Nagy F. Altered dark-and photoconversion of phytochrome B mediate extreme light sensitivity and loss of photoreversibility of the phyB-401 mutant[J]. *PLoS One*, 2011, 6 (11): e27250
- [20] Bantis F, Gkotsamani A, Dangitsis C, Koukounaras A. A light recipe including far-red wavelength during healing of grafted watermelon seedlings enhances the floral development and yield earliness [J]. *Agriculture*, 2022, 12(7): 982
- [21] Zhang Y T, Zhang Y Q, Yang Q C, Li T. Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under intra-canopy lighting with LEDs [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(1): 62-69
- [22] Tan T T, Li S L, Fan Y F, Wang Z L, Ali Raza M, Shafiq I, Wang B B, Wu X L, Yong T W, Wang X C, Wu Y S, Yang F, Yang W Y. Far-red light: A regulator of plant morphology and photosynthetic capacity [J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(2): 300-309
- [23] 李文龙. 远红光对黄瓜幼苗光能转化及物质累积的调控效应[D]. 保定: 河北农业大学, 2019
- Li W L. Effect of far red light on light energy conversion and matter accumulation of cucumber seedlings [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [24] 孟力力, 曹凯, 孙倩, 柏宗春, 张义. 不同红光远红光配比对冰草生长发育、光合特性及品质的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(1): 226-235
- Meng L L, Cao K, Sun Q, Bai Z C, Zhang Y. Effects of different ratios of red light and far red light on growth, photosynthetic characteristics and quality of *Mesembryanthemum crystallinum* L [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(1): 226-235 (in Chinese)
- [25] van Gelderen K, Kang C, Paalman R, Keuskamp D, Hayes S, Pierik R. Far-red light detection in the shoot regulates lateral root development through the HY5 transcription factor[J]. *The Plant Cell*, 2018, 30(1): 101-116
- [26] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 373-399
- [27] 徐博娅. LED光源对番茄嫁接成活率及幼苗生理响应的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2020
- Xu B Y. Effects of LED light source on survival rate of tomato grafting and physiological response of seedlings [D]. Nanning: Guangxi University, 2020 (in Chinese)
- [28] Gavassi M A, Monteiro C C, Campos M L, Melo H C, Carvalho R F. Phytochromes are key regulators of abiotic stress responses in tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 222: 126-135
- [29] 马攀. 不同砧木嫁接甜柿亲和性生理机制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015
- Ma P. Study on physiological mechanism of compatibility of sweet persimmon grafted with different rootstocks [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015 (in Chinese)
- [30] Wang Y L, Bian Z H, Pan T H, Cao K, Zou Z R. Improvement of tomato salt tolerance by the regulation of photosynthetic performance and antioxidant enzyme capacity under a low red to far-red light ratio [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 167: 806-815
- [31] He R, Zhang Y T, Song S W, Su W, Hao Y W, Liu H C. UV-A and FR irradiation improves growth and nutritional properties of lettuce grown in an artificial light plant factory[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128727
- [32] 李凤华, 介元芬, 吴帼秀, 徐巧巧, 李严曼, 李阳, 张家梓, 李胜利. 红蓝绿LED不同光质对西瓜和甜瓜幼苗质量的影响[J]. 中国蔬菜, 2022(8): 49-56
- Li F H, Jie Y F, Wu G X, Xu Q Q, Li Y M, Li Y, Zhang J Z, Li S L. Effects of different light quality of red, blue and green LED on quality of watermelon and muskmelon seedlings [J]. *China Vegetables*, 2022(8): 49-56 (in Chinese)
- [33] 艾楷棋, 苏华, 周海将, 周冰, 曹凯, 邹志荣. 不同红光与远红光对盐胁迫下番茄叶绿素合成的影响[J]. 北方园艺, 2019(1): 14-22
- Ai K Q, Su H, Zhou H J, Zhou B, Cao K, Zou Z R. Effects of different R:FR ratio on chlorophyll biosynthesis in tomato leaves under salt stress [J]. *Northern Horticulture*, 2019(1): 14-22 (in Chinese)
- [34] Izzo L G, Hay Mele B, Vitale L, Vitale E, Arena C. The role of monochromatic red and blue light in tomato early photomorphogenesis and photosynthetic traits[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 179: 104195
- [35] 高登国, 于捷, 邹志荣, 曹凯, 鲍恩财, 孟力力, 李士照, 叶林. 不同红光与远红光比值对盐胁迫下番茄光合能力的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(4): 578-583
- Gao D G, Yu J, Zou Z R, Cao K, Bao E C, Meng L L, Li S Z, Ye L. Effects of different red to far-red light ratios on tomato photosynthesis ability under salt stress [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2021, 48(4): 578-583 (in Chinese)
- [36] Lee M J, Park S Y, Oh M M. Growth and cell division of lettuce plants under various ratios of red to far-red light-emitting diodes [J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2015, 56(2): 186-194
- [37] Zhen S Y, van Iersel M W, Bugbee B. Photosynthesis in Sun and shade: The surprising importance of far-red photons [J]. *New Phytologist*, 2022, 236(2): 538-546
- [38] 梅延豪, 刘齐, 李琦, 虞慧彬, 白雅晖, 徐晓东, 武永军, 杨振超. LED脉冲光对生菜叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9): 101-109
- Mei Y H, Liu Q, Li Q, Yu H B, Bai Y H, Xu X D, Wu Y J, Yang Z C. Effect of LED pulsed light on chlorophyll fluorescence parameters of lettuce[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(9): 101-109 (in Chinese)
- [39] Zhen S Y, van Iersel M W. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2017, 209: 115-122
- [40] 马宁, 陈碧, 杨华, 刘威, 黄兴昌, 肖雪梅, 颜建明. 黄瓜实生苗与嫁接苗生长发育及光合荧光特性对自毒胁迫的响应差异[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(6): 17-23

Ma N, Chen B, Yang H, Liu W, Huang X C, Xiao X M, Xie J M.
Different response of growth, development and photosynthetic
fluorescence characteristics of non-grafted and rootstock grafted

cucumber seedling to autotoxic stress [J]. *China Cucurbits and
Vegetables*, 2020, 33(6): 17-23 (in Chinese)

责任编辑:董金波



第一作者简介:王芽芽,山西农业大学园艺学院硕士研究生,主要从事设施蔬菜栽培生理及调控研究。本科期间曾多次获得“校一等奖学金”“国家励志奖学金”,曾获得“2021届安徽省省级优秀毕业生”等荣誉称号。研究生就读期间先后参与江苏省政策引导类计划项目(苏北科技专项 SZ-SQ2021009)、江苏省重点研发现代农业项目(BE2021379)、山西省重点研发计划项目(202102140601013)等课题研究。



通讯作者简介:张毅,教授,博士生导师,主要从事设施农业研究,包括设施果菜逆境生理与轻简化栽培、温室结构设计与环境调控等。兼任国家自然科学基金函评专家、山西省蔬菜产业体系岗位专家、山西省农村创新创业导师, *Scientia Horticulturae*、《中国农业科学》、《核农学报》等10余本学术期刊审稿人。主持国家自然科学基金、中国博士后基金、国家重点研发计划子课题等省级以上课题8项。以第一或通讯作者在 *Antioxidants*、*Frontiers in plant science* 等SCI源刊发表论文13篇,在《中国生态农业学报》《浙江大学学报(农业与生命科学版)》等核心期刊发表论文26篇。申请发明专利4项,授权实用新型专利6项;以第一起草人获批山西省地方标准3项,其中1项入选山西省农业农村领域主推标准。



通讯作者简介:吴雪,博士,副研究员,江苏省农业科学院农业设施与装备研究所。近年来主要从事工厂化育苗环控技术、设施高效栽培技术、园艺作物逆境生理研究。主持江苏省自主创新子课题1项、江苏省博士后科研基金1项、软件著作权1项,以第一作者发表SCI论文7篇和中文核心1篇。