

不同光强梯度对番茄两段式嫁接苗愈合及生长的影响

吴帼秀, 张家梓, 李严曼, 李 阳, 崔丹丹,
何雪颖, 王 凡, 李胜利*

(1. 河南农业大学园艺学院, 郑州 450046; 2. 河南省设施园艺工程技术研究中心, 郑州 450046)

摘 要:为解决番茄两段式嫁接育苗中如何在高密度环境下快速愈合及扦插后快速生根的问题, 该研究以番茄品种‘粉都 153’为接穗、‘金钻’为砧木, 对其进行双断根嫁接, 研究嫁接苗在愈合期(1~2、3~4、5 d)不同光强梯度 30-60-90 (CK)、40-80-120 (T1)、50-100-150 (T2)、60-120-180 (T3)、70-140-210 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (T4) 下的愈合情况, 并将不同光强下的嫁接苗分别高密度愈合 1、3 和 5 d 后扦插, 判断植株生长情况。结果表明, T1、T2 处理的嫁接苗成活率较高, 且与 CK 差异不显著 ($P>0.05$); T1 处理下嫁接苗的愈合最快, 且切口处具有较高的抗氧化酶活性及光合色素含量, 较低的超氧阴离子含量; 不同光强处理 3 d 后扦插嫁接苗的成活率较高, 其中 T1 和 T2 处理的最高, 不同光强处理 1 d 后扦插各处理间无显著差异 ($P>0.05$), 处理 5 d 后扦插成活率降低; 对扦插嫁接苗的生长进行综合评价, T1 处理 1、3、5 d 后扦插, 嫁接苗的根系及地上部生长均最好, 其次为 T2、T3 在第 5 天时扦插也表现出较好的效果。综合考虑, 在番茄两段式嫁接的高密度愈合阶段, 在 1~2、3~4、5 d 愈合期采用 40-80-120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的光强管理模式对愈合最为有利, 且最好在 3 d 内进行扦插, 可更好地保证成活率及嫁接苗的质量。

关键词: 番茄; 光强; 两段式嫁接; 愈合; 生长

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408022

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-04-0230-09

吴帼秀, 张家梓, 李严曼, 等. 不同光强梯度对番茄两段式嫁接苗愈合及生长的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 230-238. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408022 <http://www.tcsae.org>

WU Guoxiu, ZHANG Jiazi, LI Yanman, et al. Effects of different light intensities on the healing and growth of grafted seedlings in two-stage grafting of tomato seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(4): 230-238. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408022 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

番茄是中国栽培最为广泛的蔬菜种类之一, 在生产中面临着多种生物与非生物胁迫。嫁接作为提高植株抗病抗逆性的绿色方法, 可有效改善蔬菜品质及提高产量, 因此, 已成为中国育苗行业的重要措施^[1-3]。集约化育苗是中国蔬菜育苗的主要形式^[4], 但育苗能耗大、投入成本高, 尤其是嫁接苗的培育, 增加了设施设备、种子、加温降温和人工管理费用的投入^[5-6], 加重了育苗场的负担。传统的嫁接育苗不去除砧木原有根系或将双断根嫁接苗扦插到基质中, 嫁接苗带基质运输到苗场中进行培育, 苗量大导致运输成本较高, 且长距离运输对幼苗也会有一定的损伤。为了降低育苗场成本, 培育高质量嫁接苗, 笔者结合前人的研究^[7-8], 提出了番茄双断根嫁接苗两段式培育的设想, 即在设施条件好或自然条件适宜、

嫁接条件完善的场所完成育苗、嫁接和集中愈合的前半段培育, 再将嫁接苗不带基质集中运输到苗场进行扦插培育, 完成后半段的培育。

番茄两段式嫁接育苗相比于传统嫁接育苗保证了嫁接苗的质量, 同时降低了嫁接苗运输成本, 但存在以下 2 个问题: 第一段如何在高密度的情况下促进嫁接苗高质量快速愈合; 第二段如何促进扦插嫁接苗生根和幼苗生长。光是植物生长发育的基本环境要素之一, 对植物的形态建成、物质代谢及基因表达均具有重要影响^[9-10]。适宜的光环境是促进嫁接愈合、提高嫁接苗质量的关键条件之一^[11]。研究表明, 砧木与接穗间维管束的形成、联通、功能的发挥及嫁接苗能否成活均离不开光的作用^[12]。在愈合前期, 接穗与砧木间输导组织尚未连接, 接穗极易失水萎蔫, 此时通常将嫁接苗放置在弱光条件下^[13], 以减弱叶片蒸腾作用, 降低水分损失。在愈合中后期, 要逐渐增加光照强度, 以提高光合效率, 积累光合产物, 从而促进愈合^[14]。砧木与接穗愈合的不同阶段对光强的需求不同, 相比于恒定光强, 阶梯式光强管理模式无疑是提高愈合效率及培育壮苗的有效手段^[11,15]。除了嫁接愈合质量, 根系的再生情况也是双断根嫁接成功与否的关键, 合理调节光照强度可有利于双断根嫁接黄瓜根系的形成^[16]。光作为重要的环境因子之一, 不仅启动叶片

收稿日期: 2024-08-03 修订日期: 2024-12-03

基金项目: 河南省大宗蔬菜产业技术体系项目 (HARS-22-07-S); 河南省中央引导地方科技发展资金项目 (Z20231811003); 河南省科技攻关项目 (242102111093)

作者简介: 吴帼秀, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为设施蔬菜逆境及嫁接机理。Email: guoxiu87@sina.com

※通信作者: 李胜利, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为设施蔬菜栽培和工厂化育苗。Email: lsllhc@yeah.net

光合作用产生能量，还可作为信号因子与激素、移动蛋白等互作诱导茎根之间的交流^[17]。因此，针对两段式双断根嫁接苗培育，如何实现愈合及扦插阶段光环境的精准调控，对嫁接技术优化及其推广具有重要意义。然而，关于番茄两段式嫁接过程中的光环境调控方面的研究较为匮乏，具体的光环境参数尚不明确。因此，本研究在由亚克力和泡沫板材质制成的容器中高密度放置番茄双断根嫁接苗，愈合期在红蓝光质配比下采用阶梯式光强处理，高密度愈合 1、3、5 d 后进行扦插，通过比较不同光强环境和扦插时间下番茄双断根嫁接苗的成活率、愈合情况、生长指标和根系表型，筛选出最适合番茄两段式嫁接育苗的光强梯度和扦插时间，最终为番茄两段式嫁接育苗体系的建立提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

番茄品种‘粉都 153’用作接穗，购自河南豫艺种业有限公司；番茄品种‘金钻’用作砧木，购自山东威尔种子有限公司。种子采用温汤浸种 5~6 h，置于恒温培养箱中 28 ℃ 催芽，种子露白后播种于 50 孔穴盘中，接穗早砧木 7 d 播种，每盘浇水 500 mL。育苗基质为长效营养型，材料为进口椰糠、东北草炭、碳化稻壳等，其 pH 值为 6.5，购自郑州金世纪育苗基质有限公司。

试验育苗期在河南农业大学科教新园区日光温室内进行，嫁接愈合期在河南农业大学实验室人工气候培养箱内进行。LED 灯置于每层顶部，高度可调，外部用黑色遮光帘覆盖，保证 LED 灯为试验唯一光源，LED 灯购自河南智圣普电子科技有限公司，光质、光强和光周期可调，由 APP 蓝牙控制。

1.2 试验设计

1.2.1 光强对番茄两段式嫁接砧穗愈合及其根系再生的影响

砧木和接穗长至两叶一心时进行双断根嫁接，将砧木从茎基部切断，砧木在子叶上方 1 cm 处呈 45°角斜切，接穗真叶下方 1 cm 呈 45°角斜切，使用嫁接套管固定（规格 3 mm，购自寿光欣欣然园艺有限公司），将嫁接苗集中放置在自制容器中用 Hoagland 营养液进行水培。自制容器在使用前提前酒精消毒，营养液每 2 d 更换一次，光周期固定 12 h/12 h，控制日夜温度 22 ℃/18 ℃（昼/夜），控制相对湿度 1~2 d 为 99% 及以上，3~4 d 为 95%~98%，5 d 为 90%~94%，在红蓝光 7:3 的基础上，以绿光代替部分红蓝光，占总光强的 30%^[18]，并设置 5 个光强梯度（表 1），以 30-60-90 μmol/(m²·s) 为对照 CK，每个处理 50 株，随机选取长势一致的幼苗 5 株于嫁接后第 1、3、5 天取样，3 次重复取平均值，研究不同光强管理对番茄双断根嫁接砧穗愈合及其根系再生的影响。

1.2.2 光强对番茄两段式嫁接扦插培育的影响

将嫁接苗分别在不同光强下高密度愈合 1、3、5 d 后进行扦插，先在保湿育苗托盘内保湿 7 d，每日通风炼

苗，在嫁接后第 12 天移栽到日光温室内统一管理。每个处理 50 株，于扦插后第 14 天随机选取长势一致的幼苗 5 株，3 次重复取平均值，研究不同光强处理不同时间后对扦插番茄嫁接苗形态指标的影响。

表 1 不同愈合阶段光照强度
Table 1 Light intensity in different healing stages (μmol·m⁻²·s⁻¹)

处理 Treatments	1~2 d	3~4 d	5 d
CK	30	60	90
T1	40	80	120
T2	50	100	150
T3	60	120	180
T4	70	140	210

1.3 测定项目与方法

1.3.1 形态指标测定

株高：使用钢尺测量嫁接苗扦插基部到生长点的距离。
茎粗：用游标卡尺测定嫁接口的直径。
叶面积：用叶面积仪测量。

根冠比：将植株从茎基部剪断，分为地上部与地下部，分别在烘箱中烘干后用电子天平测定地上部干质量与地下部干质量，然后计算两者的比值。

根系形态指标：植株根系清洗干净后，用根系扫描仪进行扫描，同时使用 Win RHIZO 软件分析根系长度、表面积、平均直径和体积。

1.3.2 成活率测定

成活率：在嫁接后第 5 天统计苗子成活株数，然后计算其占嫁接苗总数的百分比。

扦插成活率：在扦插后第 12 天统计苗子成活株数，然后计算其占扦插嫁接苗总数的百分比。

1.3.3 嫁接接合处解剖显微结构

在高密度愈合期第 1、3、5 天，截取嫁接接合处 2 cm 左右茎段，以 70% 甲醛-乙酸-乙醇固定液（formaldehyde-acetic acid-ethanol fixative, FAA）固定，再经过脱水、浸蜡、染色等操作后，用光学显微镜观察并拍照。

1.3.4 超氧阴离子自由基的含量测定

超氧阴离子（O₂⁻）含量的测定参照李忠光等^[19]的方法，根据标准曲线计算 O₂⁻ 的含量。

1.3.5 抗氧化酶活性测定

将 0.2 g 的新鲜番茄叶片放于 2 mL 离心管中，加入 1.7 mL 预冷的磷酸缓冲液（0.05 mol/L，pH 值为 7.8），用研磨仪（净信 JXFST）磨成匀浆，在 4 ℃ 条件下，按照 12 000 r/min 的速度离心 15 min，取上清液用于抗氧化酶活性的测定。氮蓝四唑（nitroblue tetrazolium, NBT）还原法测定超氧化物歧化酶（superoxide dismutase, SOD）活性，愈创木酚法测定过氧化物酶（peroxidase, POD）活性，过氧化氢分解量法测定过氧化氢酶（catalase, CAT）活性，紫外吸收法测定抗坏血酸过氧化酶（ascorbate peroxidase, APX）活性^[20]。

1.4 数据分析

试验采用 Excel 2019 进行数据处理和作图，使用 SPSS 软件 23.0 版进行方差分析、相关性分析。

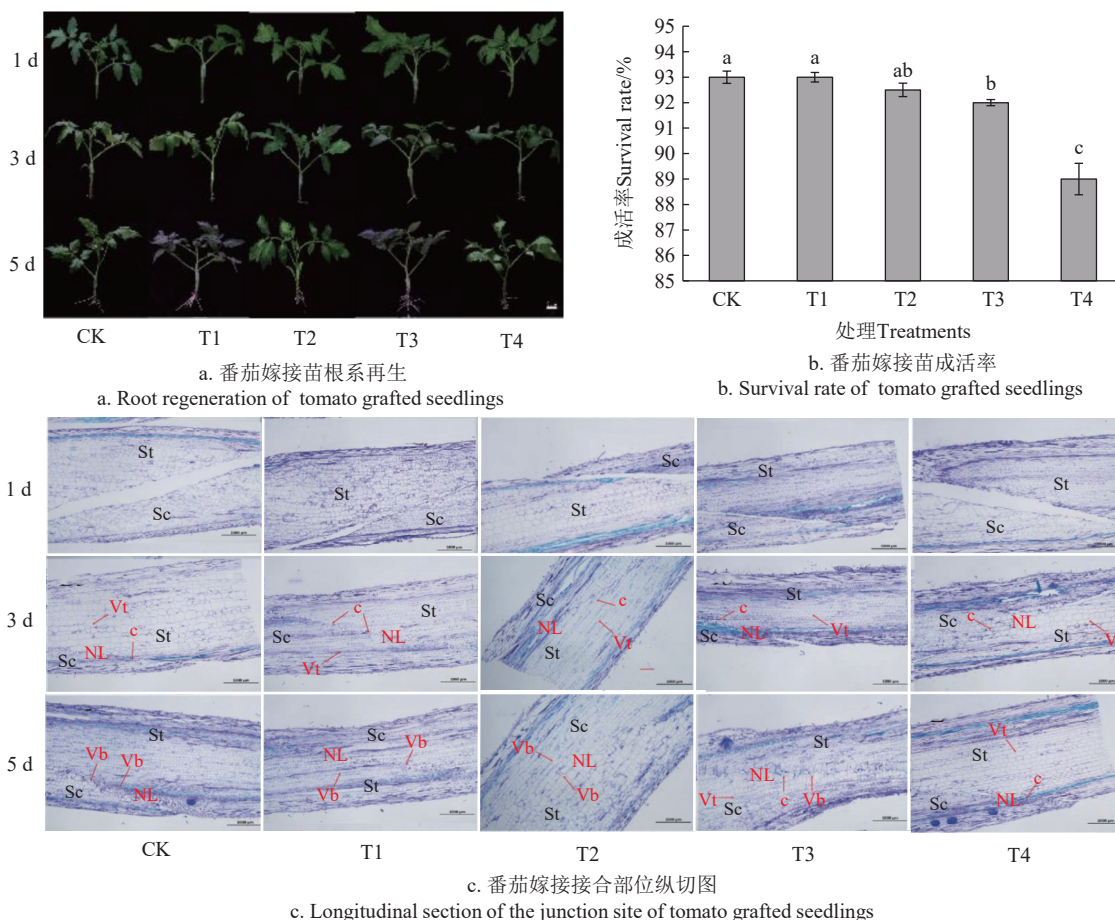
2 结果与分析

2.1 光强对番茄两段式嫁接砧穗愈合及其根系再生的影响

2.1.1 不同光强处理对番茄嫁接苗愈合及成活率的影响

通过不同光强梯度对番茄双断根嫁接苗处理, 嫁接苗的新生根系随着愈合天数的增加而增多 (图 1a)。愈

合第 1 天, T1 处理砧木下胚轴出现了明显的新生根系凸起。愈合第 3 天, 所有处理开始出现新生根系, 随着光强的增大叶片出现轻微萎焉。愈合第 5 天, T1、T2 和 T3 处理的嫁接苗新生根系较多, T4 处理的新生根系较少, 且叶片出现明显的萎焉。



注: St 为砧木; Sc 为接穗; c 为愈伤组织; NL 为隔离层; Vt 为维管组织; Vb 为维管束桥。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。
Note: St is rootstock; Sc is scion; c is callus cell; NL is separation layer; Vt is vascular tissue; Vb is vascular bridge. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$), same as below.

图 1 不同愈合期光强处理对番茄嫁接苗生根、愈合及成活率的影响

Fig.1 Effects of light intensities on the root regeneration, healing and survival rate of tomato grafted seedlings in different healing time

嫁接第 5 天统计成活率 (图 1b), 不同光强处理下番茄双断根嫁接苗的成活率均较高, 其中 T1、T2 与 CK 差异不显著。T3 处理的成活率显著低于 T1、CK, 与 T2 差异不显著。T4 处理的成活率显著低于其他处理。

观察对砧穗接合处显微结构 (图 1c), 愈合第 1 天, T1、T3 处理中砧木和接穗发生粘连, 隔离层开始形成, 其他处理砧木和接穗之间尚未发生明显粘连。愈合第 3 天, 所有处理嫁接接口可见隔离层, 愈伤组织开始增殖来填充结合处的间隙。与 T3 和 T4 处理相比, CK 和 T2 处理隔离层已基本形成, 愈伤组织增殖分化, 嫁接接口间隙较小。T1 处理隔离层已经形成, 愈伤组织大量增殖分化填充嫁接接口间隙。愈合第 5 天, 所有处理的隔离层已经形成, 相对于 T3 和 T4 处理, CK、T1 和 T2 处理嫁接接口间隙已经被愈伤组织填满, 分化形成的维管束桥开始突破隔离层, 与原来的维管束组织进行连接, T1 处理的隔离层开始消失, 愈合效果最好。

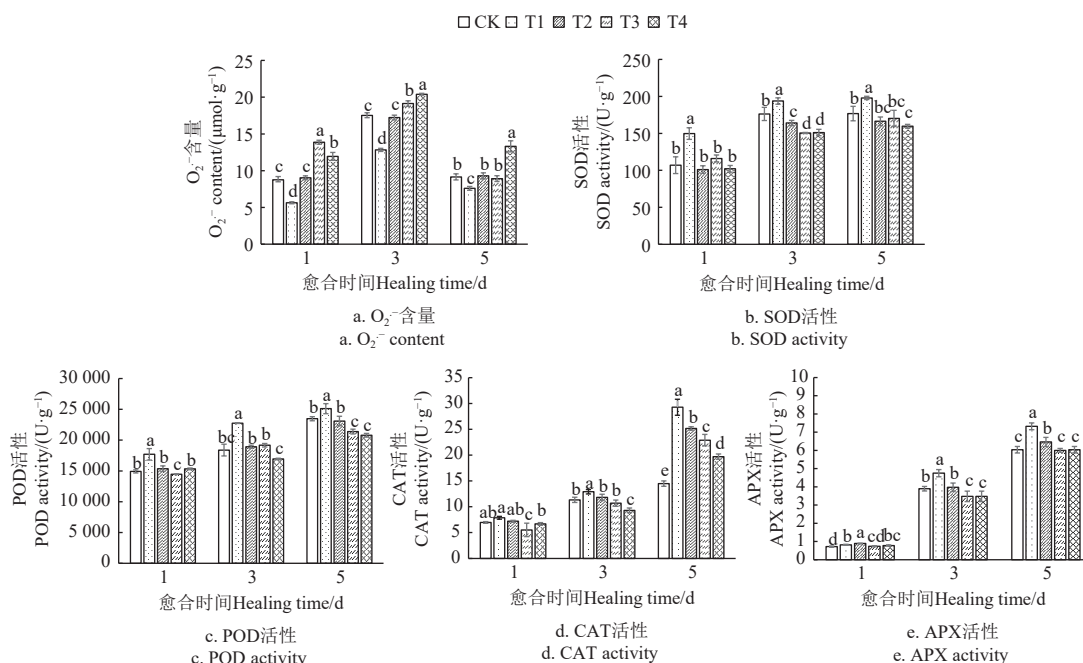
2.1.2 不同光强处理对番茄嫁接苗接合处活性氧及抗氧化酶的影响

由图 2a 可知, 随着愈合时间的延长, 嫁接苗接合处的 O_2^- 含量呈现先升高后降低的趋势, 其中 T1 处理的 O_2^- 含量在愈合期间一直最低, T2 与 CK 无显著差异。嫁接第 1 天, T1 处理的 O_2^- 含量较 CK、T2、T3 和 T4 处理的分别降低了 35.7%、37.6%、59.7% 和 52.8%。嫁接第 3 天, T1 处理的 O_2^- 含量较 CK、T2、T3 和 T4 处理的分别降低了 26.8%、25.5%、32.9%、37.1%。嫁接第 5 天, 所有处理的 O_2^- 含量降低, T2、T3 与 CK 差异不显著, T4 处理的 O_2^- 含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。

由图 2b~2e 可知, 随着愈合时间的延长, 各处理的 SOD、POD、CAT 及 APX 活性均呈现上升趋势, 其中 T1 处理的酶活性在多数愈合阶段显著高于其他处理。相对于 CK 处理, T1 处理的 SOD 活性在嫁接后 1、3、

5 d 分别提高了 39.9%、9.9%、12.0%，POD 活性提高了 18.7%、23.8%、7.0%，APX 活性高了 13.8%、22.0% 和 21.3%；在嫁接后 3、5 d CAT 活性提高了 13.9%、102.1%。T2 处理的 POD 活性与 CK 差异不显著，CAT

和 APX 活性在嫁接第 5 天显著高于 CK，在嫁接第 1 天和第 3 天与 CK 无显著差异。在愈合第 5 天时，T3、T4 处理的 POD 活性显著低于 CK，而 CAT 活性显著高于 CK，APX 活性与 CK 差异不显著。



注：不同小写字母表示相同愈合时间下处理间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same healing time ($P<0.05$), same as below.

图2 不同光强处理后番茄嫁接苗愈合处 O_2^- 含量及抗氧化酶活性的变化

Fig.2 Changes of O_2^- content and antioxidant enzymes at the junction of tomato grafted seedlings with different light intensities

2.1.3 光强对番茄嫁接苗光合色素含量的影响

由图3可知，不同光强梯度对番茄嫁接苗处理，可不同程度影响各愈合阶段嫁接苗的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、色素总量。

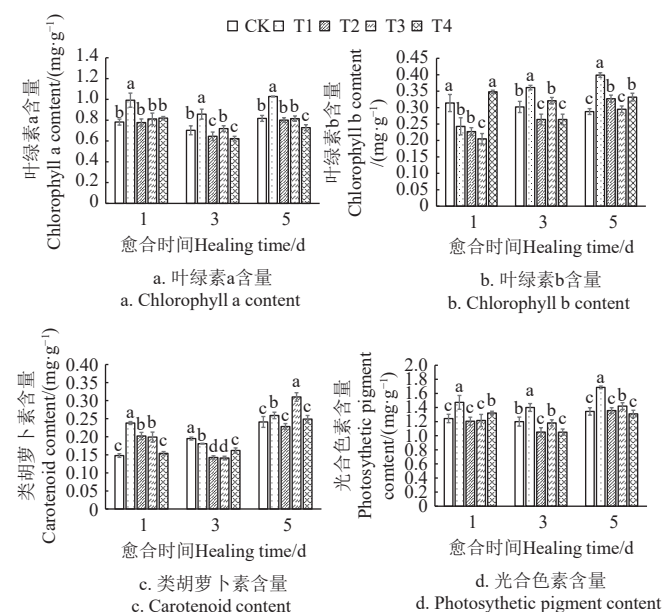


图3 不同光强对番茄嫁接苗叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和光合色素总量的影响

Fig.3 Effects of different light intensities on the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid and photosynthetic pigment content at the junction of tomato grafted seedlings

相对于 CK 处理，T1 处理的叶绿素 a 和光合色素含量均处于较高水平，其中在愈合 1、3、5 d 叶绿素 a 含量分别提高 26.9%、22.0%、25.8%，光合色素含量分别提高 18.4%、16.7%、25.4%。T2 处理的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、光合色素含量在愈合第 3 天时均显著低于 CK ($P<0.05$)。愈合第 1 天时，与 CK 相比，T3 处理的叶绿素 b 显著降低，其他愈合时间，T3 处理的叶绿素 a 和 b 与 CK 无显著差异。

2.2 光强对番茄两段式嫁接扦插培育的影响

2.2.1 光强对番茄嫁接苗扦插成活率的影响

将嫁接后的苗子在不同光强下高密度愈合 1、3、5 d 后进行扦插，14 d 后观察，发现植株均生长健壮，叶色浓绿，根系发达 (图 4a)，成活率均处在较高水平 (图 4b)。愈合 1 d 后扦插，所有处理的嫁接苗成活率无显著差异。愈合 3 d 后扦插，T3 处理的成活率与 CK 差异不显著，T1 和 T2 间差异不显著，但高于 CK ($P<0.05$)，T4 处理扦插的成活率最低为 96.3%。愈合 5 d 后，所有处理的扦插成活率降低，T1 和 T2 间无显著差异，T3、T4 处理的成活率显著低于 CK ($P<0.05$)，其中 T4 的最低。

2.2.2 光强对扦插番茄嫁接苗植株生长的影响

观察不同的光强下嫁接苗愈合不同的时间后，扦插苗的生长情况。从表 2 中可发现，不同光强下高密度愈合 1 d 后扦插，CK 的株高最高，T1 处理的茎粗、根冠

比显著高于其他处理, 叶面积与 T2 差异不显著, T3 的根冠比显著高于 T4, 但其他指标与 T4 差异不明显。不同光强下高密度愈合 3 d 后扦插, T1 的株高最低, 茎粗、叶面积显著高于其他处理, 根冠比与 CK 和 T2 差异不显著, 但是显著高于 T3、T4 处理。不同光强下高密度愈合 5 d 后扦插, T1 与 T2 处理的株高显著低于其他处理, 茎粗显著高于 T3、T4, T2 处理的叶面积最高, 其次为 T1 处理的。T1 与 T2 的根冠比差异不显著, 但显著高于其他处理。T3 处理除了叶面积显著高于 T4, 其他指标间两者均差异不显著。

由表 2 可看出, 不同光强下高密度愈合 1 d 后扦插, T2 处理的总根长和根面积显著高于其他处理, 根体积与根直径与 CK、T1 差异不显著, 但显著高于 T3、T4 处理的。不同光强下高密度愈合 3 d 后扦插时, T1、T2 处理的总根长显著高于其他处理, 根体积、根直径较大但与 CK 差异不显著, T3、T4 间的根系生长无显著差异。不同光强下高密度愈合 5 d 后扦插, T3、T2 处理的总根

长、根面积、根体积均处于较高水平, 其次是 T1 处理, T4 处理的根面积显著高于 CK, 其他根系指标均与 CK 差异不显著。不同光强梯度、愈合时间对植株地上部及根系生长均具有显著影响, 且两者的交互作用也表现出了显著性。

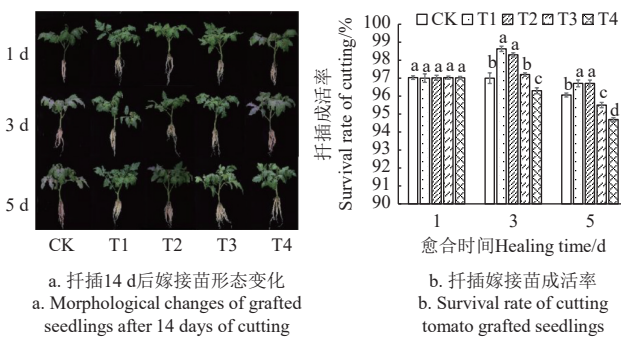


图 4 高密度愈合后不同光强对番茄嫁接苗扦插成活率的影响
Fig.4 Effects of different light intensities on survival rate of cutting tomato grafted seedlings after high density healing

表 2 不同光强下高密度愈合 1、3、5 d 后扦插两段式培育番茄嫁接苗的形态指标

Table 2 Morphologic indices of two-stage grafted tomato seedlings after high density healing with different light intensities treating for 1, 3, 5 d

愈合时间 Healing time/d	处理 Treatments	株高 Plant height/ cm	茎粗 Stem diameter/ mm	叶面积 Leaf area/ cm ²	根冠比 Root shoot ratio	总根长 Total root length/cm	根面积 Root surface area/cm ²	根体积 Root volume/ cm ³	根直径 Root diameter/cm
1	CK	14.37±1.27a	4.97±0.11b	179.33±2.48b	0.19±0.012c	167.21±4.29b	42.06±0.26b	0.83±0.05a	3.36±0.14a
	T1	10.87±0.32c	5.52±0.35a	194.06±0.16a	0.28±0.004a	162.54±1.85c	43.37±1.51b	0.84±0.02a	3.47±0.09a
	T2	12.93±0.84b	5.07±0.16b	193.82±180a	0.21±0.004b	187.75±0.14a	47.76±1.36a	0.85±0.05a	3.47±0.14a
	T3	11.57±0.06c	4.99±0.09b	173.99±1.59c	0.20±0.008bc	146.94±0.12 d	33.59±0.74c	0.71±0.02b	3.47±0.10a
	T4	11.90±0.17bc	4.95±0.19b	175.96±2.13c	0.17±0.006 d	147.95±0.13 d	33.65±1.59c	0.69±0.02b	3.34±0.06a
3	CK	13.20±0.31a	5.51±0.05b	229.92±1.66c	0.14±0.003a	223.47±3.52b	50.36±0.56b	0.96±0.05a	3.53±0.18a
	T1	11.60±0.08b	5.82±0.03a	240.66±1.64a	0.14±0.005a	235.31±1.85a	50.98±0.93ab	0.95±0.03a	3.45±0.10a
	T2	12.93±0.84a	5.53±0.02b	237.77±2.14b	0.14±0.008a	236.18±0.93a	51.80±0.16a	0.98±0.07a	3.56±0.02a
	T3	13.50±0.38a	5.52±0.19b	200.46±0.99d	0.13±0.009b	200.79±0.98c	42.32±0.38c	0.84±0.03b	2.71±0.12b
	T4	13.00±0.42a	5.57±0.19b	211.17±0.57c	0.13±0.0021b	200.98±3.39c	42.36±0.26c	0.86±0.02b	2.70±0.01b
5	CK	15.00±0.14b	5.51±0.05ab	209.87±1.53d	0.15±0.008b	209.80±3.95c	42.49±0.48d	0.72±0.06b	3.72±0.07c
	T1	13.50±0.19c	5.82±0.03a	222.05±1.64b	0.20±0.005a	221.96±2.95b	49.58±2.19b	0.85±0.02a	4.45±0.40a
	T2	13.66±0.20c	4.96±0.17b	234.39±0.34a	0.18±0.016a	232.20±3.29a	53.99±0.35a	0.87±0.08a	3.76±0.04c
	T3	15.60±0.39a	4.45±0.13c	215.36±2.19c	0.15±0.007b	231.72±1.21a	52.30±2.67ab	0.85±0.08a	4.38±0.06ab
	T4	15.60±0.03a	4.33±0.12c	181.09±0.26e	0.15±0.011b	214.77±4.16c	46.46±0.86c	0.72±0.06b	4.05±0.10bc
F 值 F-value									
愈合时间 Healing time (T)		89.31**	63.08**	2 590.96**	314.54**	2 429.31**	4 699.07**	34.47**	160.18**
光强处理 Light intensity treatments (T _i)		23.29**	38.14**	697.07**	74.94**	186.15**	250.28**	13.43**	10.76**
T×T _i		8.67**	13.22**	121.81**	21.72**	54.4**	33.85**	3.77**	18.69**

注: 表中数据为平均值±标准差。不同小写字母表示不同处理间差异显著性 ($P<0.05$)。**, $P<0.01$ 。下同。
Note: Data in the table are average ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). **, $P<0.01$. Same as below.

2.2.3 光强对扦插番茄嫁接苗植株生长影响的综合评价

综合扦插嫁接苗的各项生长指标, 由图 5 可看出, 扦插前集中愈合时长不同时, 各处理的隶属函数值表现出一定的差异性。不同光强下高密度愈合 1、3 d 时, T2 处理的隶属函数值最高, 其次为 T1 与 CK, T3 和 T4 的隶属函数值最小。不同光强下高密度愈合 5 d 后扦插, T1、T2、T3 的隶属函数值均较高, CK 与 T4 则处于较低水平, 说明长时间处于较弱或较强的光照环境下不利于扦插嫁接苗的生长。不同光强下高密度愈合 3、5 d 后的扦插嫁接苗的成活率分别与地上形态指标、根系指标进行相关性分析 (表 3), 发现愈合 5 d 时, 扦插成活率与株高呈显著负相关 ($P<0.05$), 与叶面积呈显著正相

关性 ($P<0.05$), 与其他生长指标无相关性。

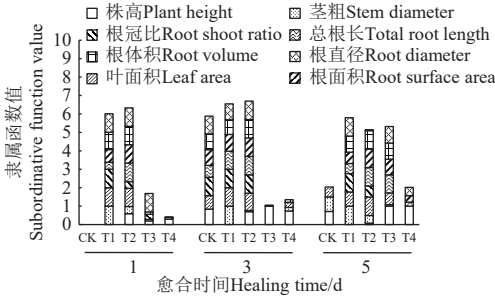


图 5 不同光强下高密度愈合后扦插番茄嫁接苗各生长指标的隶属函数值
Fig.5 Subordinative function value of cutting tomato grafted seedlings in different light intensities after high density healing

表 3 高密度愈合不同时间后扦插番茄嫁接苗成活率与植株生长指标间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between survival rate and growth indexes of cutting tomato grafted seedlings under different time of high density healing

愈合时间 Healing time/d	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	叶面积 Leaf area	根冠比 Root shoot ratio	总根长 Total root length	根面积 Root surface area	根体积 Root volume	根直径 Root diameter
3	-0.669	0.583	0.734	0.700	0.845	0.743	0.649	0.675
5	-0.902*	0.789	0.904*	0.774	0.307	0.311	0.605	-0.099

注：*显著相关（ $P<0.05$ ）。
Note: * significant correlation ($P<0.05$).

3 讨 论

光作为植物生长、光合作用和嫁接愈合等过程的重要能量来源，对提高嫁接苗质量具有关键作用^[14, 21]。适宜的光质和光强调节可促进砧穗愈合、缩短愈合进程，本团队前期研究表明，适宜比例的红、蓝、绿光组合可促进番茄双断根嫁接苗的愈合及根系再生，从而提高嫁接苗成活率及质量^[18]。本研究在此基础上，选用优化了的光质配比，设置不同的光强梯度，研究其对两段式双断根嫁接苗愈合及生长的影响，从而确定出最优的阶梯式光强管理模式。

嫁接初期，砧木和接穗间首先形成隔离层，以防止切口处感染及物质外渗，随后愈伤组织开始增殖分化，隔离层逐渐消失，最后，在接穗与砧木间形成新的维管组织，最终完成愈合。而在不同愈合期对光强的需求是不同的，完成各阶段所需要的时间也会呈现出一定的差异性^[22-23]。赵渊源^[15]研究发现，在番茄、辣椒等茄果类蔬菜嫁接愈合过程中进行梯度式光强管理有利于促进愈伤组织形成，缩短愈合进程，其中番茄最适的条件是 1~3 d 光强为 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，4~5 d 光强为 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。在本研究中，将番茄愈合过程分为嫁接后 1~2 d、3~4 d、5 d 三个阶段，并分别设置了不同的光强梯度，最终发现 T1 处理 (40-80-120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 的光强梯度下，番茄双断根嫁接苗的愈合效果最好，同时根系再生能力最强（图 1）。愈合各阶段光强稍大的 T4 处理，其成活率明显降低且根系生长较差。由此看出，光强增大反而不利于嫁接苗生长，可能是由于光强的增加加速了叶片的蒸腾速率，对尚未与砧木形成输导组织的接穗增加了负担，而弱光条件下可以减少气孔开放，降低蒸腾速率，从而利于嫁接愈合，但是光强太低又会导致愈合前期愈伤组织生长过慢及愈合后期光合速率太低^[13, 24]。

作为植物抗氧化系统的关键酶，SOD、POD、CAT、APX 在嫁接结合处发挥着举足轻重的作用^[25]。在愈合初期，切口处活性氧（reactive oxygen species, ROS）迅速积累，膜脂过氧化程度加重，此时植物体会启动抗氧化系统减轻 ROS 对细胞膜的伤害，随着嫁接苗的逐渐愈合，ROS 含量降低，切口处细胞的氧化还原水平恢复平衡。研究表明，在黄瓜嫁接接口处，亲和性高的嫁接黄瓜在切口处有着比非亲和性嫁接更高的 SOD、POD、APX 活性^[26]。本研究中 SOD、POD、CAT、APX 作为清除 O_2^- 等 ROS 的主力，同时 POD 又起着合成木质部及连接细胞壁多糖的关键作用^[27]，在愈合期 5 d 内，4 种酶活性一

直持续增加，且 T1 处理的嫁接苗接口处抗氧化酶活性较高，说明 40-80-120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的光强梯度可激活切口处的抗氧化酶活性以促进愈合。在嫁接后的前两天，嫁接苗基本不进行光合作用，直到接穗与砧木间愈伤组织桥形成，以便植株可以进行水分运输时，光合作用开始启动^[28]。因此，此时较低的光强不仅可满足嫁接苗需求，还可提高光能利用率。在光合作用中光合色素用于吸收和传递光能，它的积累与分配反映了植物的生理状态^[29]。在强光条件下，叶绿素容易合成，但也容易被破坏，而弱光可以减轻色素的光氧化损伤^[30]，植物具有通过增加叶绿素含量来吸收更多的光能以适应弱光环境的能力^[31-32]。随着光照强度的增加，叶绿素含量显著降低，但叶绿素 a/b 显著升高^[33]。本研究中，T1 处理的嫁接苗可显著提高叶绿素含量，以吸收光能适应弱光环境。在愈合前期，嫁接苗的叶绿素 a、类胡萝卜素、光合色素总量总体呈现出下降的趋势，可能是由于此时光强较弱且营养元素和水运输不畅导致的^[34]，在愈合第 5 天，光合色素含量有所增加，其中 T1 处理具有显著的促进光合色素合成的效果，这也为进一步提高光合效率奠定了基础。

在两段式嫁接中，扦插生根阶段也是嫁接苗成活及优质的关键。随着高密度愈合的时间增加，番茄双断根嫁接苗叶片开始出现萎蔫，说明番茄双断根嫁接苗高密度愈合的时间不适宜过长。由于随着嫁接愈合的进行和光照强度的增加，光合作用增强，提高了高密度环境中的 CO_2 浓度，诱导了气孔的关闭^[35]，与高光强引导气孔开放形成拮抗作用，嫁接苗新生根系增多也开始争夺营养液的养分加剧了嫁接苗的萎蔫。光照对植物光合作用、嫁接愈合和生长发育等多方面产生了影响，既促进了高密度番茄双断根嫁接苗的愈合，也影响了嫁接苗的扦插培育，可能延长了嫁接苗的最佳扦插时间^[36]。本研究结果表明，光强、愈合时间及其交互作用均显著影响嫁接扦插苗的生长及根系发育，嫁接到扦插的时间最好不超过 3 d，第一阶段的集中愈合可在苗场或运输车中完成，但是要保证 3 d 之内能在下一个苗场完成扦插。在嫁接愈合的过程中，根系也在同时生长，因此如果高密度愈合时间过长，嫁接苗在取出愈合装置或进行扦插时均将会伤害新生根系，降低植株成活率。在设施条件好或者自然条件适宜的高山及海南等地区通过集中愈合 3 d 完成部分愈合过程，然后去异地育苗基地完成扦插同时进行后期愈合，嫁接苗成活率达到了 98.6%（图 4b），且具有较高的商品苗质量，说明两地两段式嫁接育苗在技术上是可行的。嫁接前期的集中愈合降低了苗场的管理规模及成本，减少了能源消耗，同时也避免了穴盘苗的

运输压力。对于后半段管理来说,主要针对的是扦插生根及后期愈合部分,降低了管理难度及成本支出。

本文研究发现愈合期采用阶梯式光强管理可促进番茄愈合,但这种管理模式对双断根嫁接苗愈合前期的光能利用率及后期的光合效率有何影响、愈合期糖等能量物质如何变化则需进一步深入研究。另外本研究采用的

高密度愈合装置较为简易,需要进一步改良,以维持较好的株型,并减少取出嫁接苗时对新生根系的伤害。文中初步总结了番茄两段式嫁接苗培育方法(图6),但由于本研究结果是在条件相对稳定的试验基地及实验室获得的,与复杂多变的生环境及运输条件存在差异,所以相关技术参数需要在生产实践的过程中继续完善。

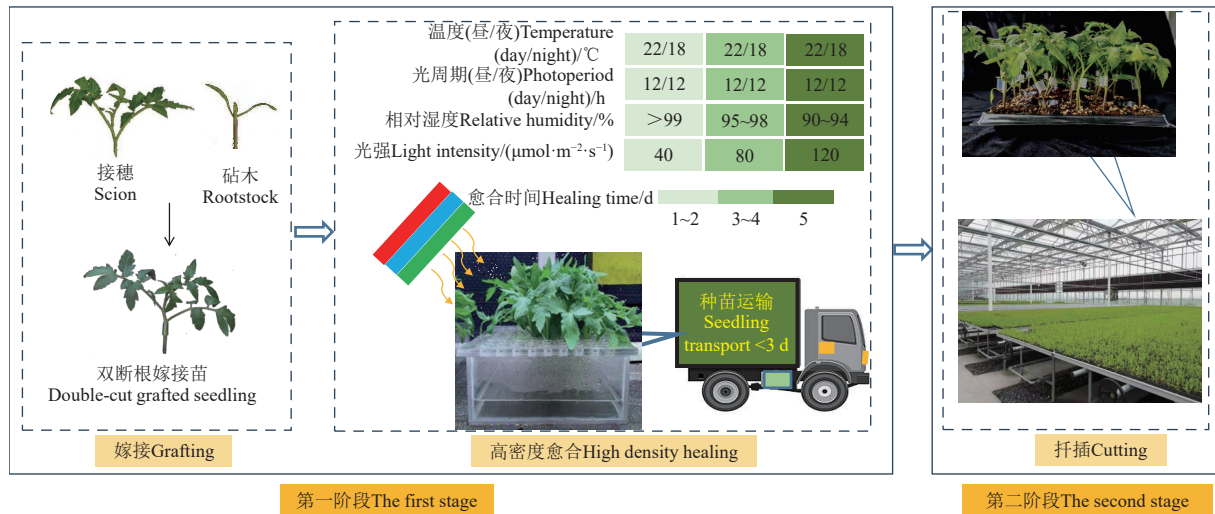


图6 番茄两段式嫁接苗培育方法

Fig.6 The cultivation method of two-stage grafted tomato seedlings

4 结论

在番茄两段式嫁接苗培育过程中,以适宜比例的红光、蓝光、绿光为光质条件,光强设置1~2 d为40 μmol/(m²·s), 3~4 d为80 μmol/(m²·s), 5 d为120 μmol/(m²·s),在此光照条件下集中愈合,嫁接苗愈合得最快,切口处的抗氧化酶活性及光合色素含量较高,超氧阴离子含量较低,在此光强条件下集中愈合3 d后扦插,番茄两段式嫁接苗愈合及根系发育较好,成活率高。

【参考文献】

- [1] 周杰,师恺,夏晓剑,等.中国蔬菜栽培科技60年回顾与展望[J].园艺学报,2022,49(10): 2131-2142.
ZHOU Jie, SHI Kai, XIA Xiaojian, et al. Vegetable cultivation technology in China: A sixty-year review and prospect[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(10): 2131-2142. (in Chinese with English abstract)
- [2] 周杰,夏晓剑,胡璋健,等.“十三五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J].中国蔬菜,2021(10): 20-34.
ZHOU Jie, XIA Xiaojian, HU Zhangjian, et al. Technological development and production of protected vegetable in China during ‘The Thirteenth Five-year Plan’ and future prospect[J]. China Vegetables, 2021(10): 20-34. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李天来.设施蔬菜产业发展(一)我国设施蔬菜产业发展现状及展望[J].中国蔬菜,2023(9): 1-6.
LI Tianlai. Development status of China’s facility vegetable industry and outlook[J]. China Vegetables, 2023(9): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [4] 孙小武,武占会,冯一新,等.“十三五”我国蔬菜育苗技术研究进展[J].中国蔬菜,2021(8): 18-26.
SUN Xiaowu, WU Zhanhui, FENG Yixin, et al. Research progress on vegetables seedling culture technique during ‘The Thirteenth Five-year Plan’ in China[J]. China Vegetables, 2021(8): 18-26. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李胜利,吴帼秀.河南省蔬菜集约化育苗企业现状、存在问题及建议[J].中国蔬菜,2023(6): 1-5.
LI Shengli, WU Guoxiu. Current situation, existing problems and suggestions for intensive vegetable seedling culture enterprises in Henan Province[J]. China Vegetables, 2023(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李胜利,李阳,周利杰,等.豫西高山夏季番茄育苗温度适宜度定量评价[J].农业工程学报,2019,35(4): 194-202.
LI Shengli, LI Yang, ZHOU Lijie, et al. Quantitative assessment of temperature suitability of alpine summer tomato seedling in west of Henan province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 194-202. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈同强,陈奎,田永强,等.贮藏时间和温度对黄瓜双断根嫁接苗质量的影响[J].江苏农业科学,2018,46(15): 90-93.
- [8] 陈同强,李娟起,田永强,等.贮藏时间对黄瓜双断根嫁接苗质量的影响[J].中国蔬菜,2015(9): 39-43.
CHEN Tongqiang, LI Juanqi, TIAN Yongqiang, et al. Effects of storage time on quality of root-cutting grafted cucumber seedling[J]. China Vegetables, 2015(9): 39-43. (in Chinese with English abstract)
- [9] 喻景权,周杰.“十二五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J].中国蔬菜,2016(9): 18-30.

- YU Jingquan, ZHOU Jie. Progress in protected vegetable production and research during 'China's 12th Five-Year Plan'[J]. *China Vegetables*, 2016(9): 18-30. (in Chinese with English abstract)
- [10] 闵腾辉, 杨中敏, 玛依热·麦图隼, 等. LED 光质对比对香菇菌丝生长及转色期生理活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(9): 219-226.
- MEN Tenghui, YANG Zhongmin, MAYIRE·MAITUSUN, et al. Influence of LED light quality ratios on the physiological regulation of *Lentinula edodes* mycelial growth and color conversion stage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(9): 219-226. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘新颖, 郑胤建, 李清明, 等. 嫁接苗愈合人工光环境调控策略研究进展[J]. *照明工程学报*, 2022, 33(5): 192-199.
- LIU Xinying, ZHENG Yinjian, LI Qingming, et al. Research progress of artificial light environment regulation strategies during graft healing[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2022, 33(5): 192-199. (in Chinese with English abstract)
- [12] LEE K M, LIM C S, MNEER S, et al. Functional vascular connections and light quality effects on tomato grafted unions[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 201: 306-317.
- [13] MIAO L, LI S Z, BAI L Q, et al. Effect of grafting methods on physiological change of graft union formation in cucumber grafted onto bottle gourd rootstock[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 244: 249-256.
- [14] MIAO L, LI Q, SUN T S, et al. Sugars promote graft union development in the heterograft of cucumber onto pumpkin[J]. *Horticulture Research*, 2021, 8(1): 146.
- [15] 赵渊渊. 温光环境因子对茄果类蔬菜套管嫁接苗愈合的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- ZHAO Yuanyuan. Effects of Temperature and Light on Healing of Tube Grafted Solanaceous Vegetable Seedlings[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [16] SUN F Q, MA S, GAO L H, et al. Enhancing root regeneration and nutrient absorption in double-rootcutting grafted seedlings by regulating light intensity and photoperiod[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 264: 109192.
- [17] VAN G K, KANG C, PIERIK R. Light signaling, root development, and plasticity[J]. *Plant Physiology*, 2018, 176: 1049-1060.
- [18] LI F, LI Y, LI S, et al. Green light promotes healing and root regeneration in double-root-cutting grafted tomato seedlings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 289: 110503.
- [19] 李忠光, 龚明. 植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进[J]. *云南植物研究*, 2005(2): 211-216.
- LI Zhongguang, GONG Ming. Improvement of measurement method for superoxide anion radical in plant[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2005(2): 211-216. (in Chinese with English abstract)
- [20] 施海涛. 植物逆境生理学实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [21] MUNEER S, KO C H, SOUNDARARAJAN P, et al. Proteomic study related to vascular connections in watermelon scions grafted onto bottle-gourd rootstock under different light intensities[J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): 1-19.
- [22] 刘方园. 西瓜和甜瓜嫁接苗高效愈合环境参数优化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- LIU Fangyuan. Optimizing Efficient Healing Environmental Parameters of Watermelon and Melon Grafted Seedlings[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [23] 储玉凡, 翟挺楷, 林碧英, 等. 愈合期不同光照强度对黄瓜嫁接苗的影响[J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(1): 49-54.
- CHU Yufan, ZHAI Tingkai, LIN Biying, et al. Effects of different light intensity on cucumber grafted seedling in the healing stage[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34(1): 49-54. (in Chinese with English abstract)
- [24] JANG Y, CHO Y, RHEE H, et al. Effects of rootstock and night temperature on the growth and yield of grafted pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 2008, 49(2): 63-71.
- [25] CHEN Z, ZHAO J, QIN Y, et al. Study on the graft compatibility between 'Jingganghongnuo' and other litchi cultivars[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 199: 56-62.
- [26] XU Q, GUO S R, LI H, et al. Physiological aspects of compatibility and incompatibility in grafted cucumber seedlings[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2015, 140(4): 299-307.
- [27] IRISARRI P, BINCZYCKI P, ERREA P, et al. Oxidative stress associated with rootstock-scion interactions in pear/quince combinations during early stages of graft development[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 176: 25-35.
- [28] MUN B, JANG Y, GOTO E, et al. Measurement system of whole-canopy carbon dioxide exchange rates in grafted cucumber transplants in which scions were exposed to different water regimes using a semi-open multi-chamber[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 130(3): 607-614.
- [29] STRASSER R J, TSIMILLI-MICHAEL M, QIANG S, et al. Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis*[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2010, 1797: 1313-1326.
- [30] 刘柿良, 马明东, 潘远智, 等. 不同光环境对桉木幼苗生长和光合特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 351-358.
- LIU Shiliang, MA Mingdong, PAN Yuanzhi, et al. Effects of light regime on growth and photosynthetic characteristics of *Alnus formosana* and *A. cremastogyne* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 351-358. (in Chinese with English abstract)
- [31] HE Z S, TANG R, LI M J, et al. Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Castanopsis kawakamii* seedlings to forest gaps[J]. *Forests*, 2019, 11(1): 21.
- [32] WEI C, LUO G, JIN Z, et al. Physiological and structural changes in leaves of *Platycodon arguta* seedlings exposed to increasing light intensities[J]. *Plants*, 2024, 13(9): 1263.
- [33] XU Y F, CHEN S Y, ZHAO S Y, et al. Effects of light intensity on the photosynthetic characteristics of *Hosta* genotypes differing in the glaucousness of leaf surface[J].

Scientia Horticulturae, 2024, 327: 112834.

- [34] 谭佐军, 蔡霞, 阿克拜尔江·卡德尔, 等. 高光谱荧光示踪无损检测瓜类作物嫁接苗愈合状态[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 276-282.

TAN Zuojun, CAI Xia, AKEBAIERJIANG·KADEER, et al. Nondestructive detection of healing melon crops by hyperspectral fluorescence tracer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 276-282. (in Chinese with English abstract)

- [35] 崔晓晗, 潘璐, 崔世茂, 等. 高温、CO₂ 加富对黄瓜光合作用

及气孔运动日变化的影响[J]. 北方园艺, 2022(24): 11-17.

CUI Xiaohan, PAN Lu, CUI Shimao, et al. Effects of high temperature and CO₂ enrichment on diurnal variation of photosynthesis and stomatal movement in cucumber[J]. Northern Horticulture, 2022(24): 11-17. (in Chinese with English abstract)

- [36] CAMERON R W F, HARRISON-MURRAY R S, JUDD H L, et al. The effects of photoperiod and light spectrum on stock plant growth and rooting of cuttings of *Cotinus coggygia* 'Royal Purple'[J]. Journal of Pomology & Horticultural Science, 2005, 80(2): 245-253.

Effects of different light intensities on the healing and growth of grafted seedlings in two-stage grafting of tomato seedlings

WU Guoxiu, ZHANG Jiazi, LI Yanman, LI Yang, CUI Dandan, HE Xueying,
WANG Fan, LI Shengli[✉]

(1. College of Horticulture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Research Center of Protected Horticulture Engineering Technology, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Tomato is one of the most popular vegetable crops with the largest facility cultivation in China. Succession barriers, soil-borne diseases, and environmental stresses can often occur in actual production, leading to decreasing quality and yield. Fortunately, grafting has been one of the most effective operations to control the major diseases for the high resistance in recent years. Among them, two-stage grafting of tomatoes can be expected to cultivate high-quality seedling resistance. It is of great significance to precise control the light environment for better grafting during the healing and cutting stages. However, it is unclear on the specific parameters of the light environment during two-stage grafting. This study aims to explore the effects of different light intensities on the healing and growth of grafted seedlings in the two-stage grafting of tomatoes. The double-cut grafted seedlings rapidly healed and then took root after cutting under a high-density environment. The strong seedlings were cultivated after optimization. The grafted seedlings were then placed in a self-developed container made of acrylic and high-density foam board. The light intensity was selected to regulate the light environment at the ratio of red, blue, and green light during the healing period. The tomato variety 'Fendu 153' was used as the scion, while the 'Jinzuan' was used as the rootstock. The healing status and root regeneration of grafted seedlings were investigated under different light intensity gradients of 30-60-90 (CK), 40-80-120 (T1), 50-100-150 (T2), 60-120-180 (T3), and 70-140-210 (T4) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ during the healing period (1-2, 3-4, and 5 d). The grafted seedlings were cut under different light intensities after high-density healing for 1, 3, and 5 d, respectively, in order to evaluate the growth of plants. The growth indexes were measured, such as the plant height, stem diameter, leaf area, shoot ratio, and length, as well as surface area, diameter, and volume of root. The results showed that a higher survival rate of grafted seedlings was achieved in the T1 and T2 treatments. There was no significant difference, compared with the CK. The grafted seedlings under T1 treatment shared the fastest healing, the higher activities of antioxidant enzymes, the content of photosynthetic pigment, and the lower content of superoxide anion at the incision. There was a higher survival rate of cuttings after 3 d of treatment with the different light intensities. Among them, T1 and T2 treatments presented the highest. There was no significant difference among the treatments at 1 d of treatment with different light intensities. But the survival rate of cuttings decreased after 5 d. After evaluation on the growth of cutting grafted seedlings, the root and above-ground growth of grafted seedlings were the best after T1 treatment for 1, 3, and 5 d, followed by T2, T3 at 5 d. In summary, the most favorable healing was achieved in the light intensity mode of 40-80-120 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ at 1-2, 3-4, and 5 d, respectively. The best performance was obtained to cut within 3 d during the high-density healing stage of two-stage grafted tomato, in terms of the survival rate and the quality of grafted seedlings. The finding can also provide technical support to the two-stage grafted seedling of tomatoes.

Keywords: tomato; light intensity; two-stage grafting; healing; growth