

DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2025.0536

光质与激素组合对雄性不育西瓜 茎段离体培养的影响

李海伦,李晓慧,康利允,赵卫星,常高正,王慧颖,高宁宁

(河南省农业科学院园艺研究所 郑州 450002)

摘要:以雄性不育西瓜植株的带芽茎段为试验材料,对外植体消毒及不同光质对不定芽诱导、增殖、生根培养进行试验研究,以期建立西瓜茎段组织培养快繁体系。结果表明,先用75%乙醇消毒30 s,再用0.1%氯化汞处理8 min是最适的消毒方法,有效地降低了污染率,成活率达到85.56%;在4R1B光质培养下,组合最佳诱导培养基MS+2 mg·L⁻¹ 6-BA+0.1 mg·L⁻¹ NAA、最佳增殖培养基MS+0.2 mg·L⁻¹ KT+10%椰汁、最佳生根培养基1/2MS+0.1 mg·L⁻¹ IAA+10%椰汁,使不定芽诱导率高达95.00%,增殖系数达到4.80,生根率达到100.00%。该研究结果优化了西瓜组织培养快繁体系,实现了高效、快速、大量增殖,为优质稀缺西瓜种质资源的快繁及长期保存提供了技术支撑,也为西瓜种质资源的可持续利用奠定了基础。

关键词:西瓜;茎段;组织培养;消毒灭菌;不同光质;快速繁殖

中图分类号:S651

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)02-020-12

Effects of light quality and hormone combination on *in vitro* culture of stem segments from male sterile watermelon

LI Hailun, LI Xiaohui, KANG Liyun, ZHAO Weixing, CHANG Gaozheng, WANG Huiying, GAO Ningning

(Horticulture Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: Using stem segments with buds from male sterile watermelon plants as explants, this study optimized the explant disinfection method and systematically investigated the effects of different light qualities on adventitious bud induction, proliferation, and rooting, aiming to establish an efficient tissue culture and rapid propagation system for watermelon stem segments. The results showed that disinfecting with 75% ethanol for 30 seconds followed by treatment with 0.1% mercuric chloride for 8 min was the optimal disinfection method, effectively reducing the contamination rate and achieving a survival rate of 85.56%. Under the light quality condition of 4R1B, combined with the optimal induction medium (MS+2 mg·L⁻¹ 6-BA+0.1 mg·L⁻¹ NAA), proliferation medium (MS+0.2 mg·L⁻¹ KT+10% coconut water), and rooting medium (1/2MS+0.1 mg·L⁻¹ IAA+10% coconut water), the adventitious induction rate increased to 95.00%, the proliferation coefficient reached 4.80, and the rooting rate reached 100.00%. This study effectively optimized the tissue culture and rapid propagation system for watermelon, providing technical support for the efficient rapid propagation and long-term perservation of high-quality and scarce watermelon germplasm resources, and laying a foundation for the sustainable utilizaiton of watermelon germplasm resources.

Key words: Watermelon; Stem segment; Tissue culture; Sterilization; Different light qualities; Rapid propagation

西瓜是葫芦科西瓜属重要的园艺经济作物之一,因其肉质细嫩,汁多甘甜,深受消费者喜爱,也因其具有丰富的营养价值和药用价值,深受育种工

作者的关注。我国是世界上西瓜种植面积和产量最大的国家^[1],当前已由夏季的季节性水果转变为周年供应的水果,导致人们对西瓜的需求量进一步

收稿日期:2025-07-28;修回日期:2025-09-22

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25);河南省西甜瓜产业技术体系建设项目(HARS-22-10-G1);河南省科学院自主创新项目(2025ZC036);河南省农业科学院基础性科研工作项目(2025JC15);河南省农业科学院应用科技攻关项目(2024YY01);河南省科技攻关项目(252102110309,252102110286)

作者简介:李海伦,女,助理研究员,主要从事园艺作物生物技术研究。E-mail:704522973@qq.com**通信作者:**高宁宁,女,副研究员,主要从事西瓜、甜瓜分子育种研究。E-mail:gnnzhu@163.com

增大。它在促进我国农业结构调整和果蔬生产消费中占据重要的地位^[2]。但其遗传基础比较狭窄,使得种质资源也比较贫乏,很多重要的优异性状难以通过常规的育种手段进行改良。西瓜雄性不育材料的雌蕊发育正常,雄蕊或花粉发育不正常,因这一特征性状免去了杂交育种时人工去雄等繁琐操作,减少劳动力的投入和限制,降低投入成本,极大地提高了种子纯度及种子生产量^[3],张显等^[4]利用西瓜雄性不育系G17AB对西瓜品种进行改良和利用。利用这一特性还可以通过基因编辑和分子标记等技术手段创制出更多雄性不育种质材料和优质的西瓜新品种,于远^[5]利用分子生物技术分离出西瓜雄性不育系材料Se18的不育相关基因,为西瓜雄性不育基因的利用和创制新种质奠定了基础。但由于雄性不育西瓜材料自身不能产生可育花粉,所以其繁殖的难度和成本大幅增加,常规方法难以快速大量繁育,因此利用生物新技术对西瓜重要性状种质材料进行快速繁殖具有重要的理论意义和实用价值。

植物组织培养技术作为一种比较成熟的生物技术被广泛传播与应用。它在实现材料快速繁殖的同时又能保证材料优良特性的稳定遗传^[6]。组织培养技术在佛手瓜^[7]、杜鹃^[8]、刺梨^[9]等草本、木本植物应用中都具有显著成果。西瓜组织培养技术起步比较晚,最早于1971年Andrus等^[10]以西瓜的下胚轴为外植体诱导出丛生芽,之后以西瓜的顶芽^[11]、茎尖^[12]、胚轴^[13]、子叶^[14]、花药^[15]、胚珠^[16]、原生质体^[17]等为外植体展开了全方位的组织培养研究。近几年,对西瓜离体培养的研究主要以未受精子房^[18]、子叶节^[19]、无菌苗子叶及下胚轴^[20]等外植体形式开展,不同种类的外植体诱导效果差异显著。此外,组织培养过程中不同基因型材料、外植体消毒灭菌、不同激素配比等对外植体诱导率及成活率均具有显著的影响。郑先波等^[21]在无籽西瓜诱导中得出黑蜜5号诱导指数显著高于其他基因型的材料;在西瓜离体培养中广泛利用乙醇与次氯酸钠组合进行消毒^[22-24];在西瓜子叶诱导中6-BA+NAA组合诱导效果最佳^[23,25],但激素质量浓度配比存在差异,而在西瓜子房诱导中激素组合2,4-D+6-BA+NAA为最佳诱导组合^[24],说明不同类型的外植体和适宜的激素配比组合才能达到最佳的诱导效果。

光是植物进行光合作用的基本能源,也是植物生长发育需要的重要环境因子,更是植物生长发育的重要调节因子^[26]。LED光具有光色纯正、光谱性

好、寿命长、利用率高、节能效果好、发热少、可控制等优点^[27],已成为植物研究的新光源^[28],在番茄^[29]、黄秋葵^[30]、蓝莓^[31]、西瓜和甜瓜^[32]等植物研究中得到广泛应用。有研究表明,红光可以提高光合速率,增加叶面积等,蓝光可以降低净光合速率,使叶片的发育受到抑制等^[33-35]。孙翊等^[36]在红蓝光质对非洲菊组培苗增殖的研究中表明,4R1B(红:蓝=4:1,下同)混合光质使增殖系数达到最大值;金枝^[37]、王跃荣等^[38]在不同光质对西瓜幼苗生长发育的研究中分别表明了8R2B、9R6B红蓝光配比更有利于西瓜幼苗的生长。然而,关于不同光质在西瓜组织离体培养诱导过程中作用效果的相关研究较少。本研究以不同基因型带芽茎段的雄性不育西瓜材料为试验材料,通过研究不同消毒灭菌方法、不同LED光质与激素配比对西瓜茎段不定芽诱导、增殖、生根的影响,以期建立并优化西瓜组织培养快繁体系,为西瓜特殊性状的稀缺材料进行高效快速繁殖提供技术支撑,也为西瓜优异种质的创制和新品种的选育奠定基础,对西瓜产业的可持续发展具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为雄性不育系西瓜PV-1、GMS4、GMS10,均由河南省农业科学院园艺研究所西甜瓜课题室提供,于2022年5—8月定植在河南省农业科学院试验基地连栋塑料大棚中,在植株伸蔓期,取长势健壮、无病虫害、无损伤的带芽茎段,放入冰盒中带回实验室,放入冰箱4℃过夜预处理,备用。

1.2 方法

1.2.1 外植体消毒灭菌 把经过4℃预处理的茎段取出,剪成2~3 cm的小段,每段带有1个芽,将茎段放入烧杯中用清水冲洗干净,再用洗洁精水清洗,然后用纱布封住烧杯口,流水冲洗0.5~1 h,控干水分,备用。将清洗好的茎段在超净工作台上先用无菌水冲洗3遍,再用75%乙醇处理10、30、60 s,无菌水冲洗3遍,再用0.5%的NaClO或0.1%HgCl₂处理6、8、10 min,最后用无菌水冲洗3遍。将灭菌好的茎段切除两端,以茎段的形态学下端(形态学的下端斜切成45°)插入培养基中。每个处理接种10瓶,每瓶接入3个外植体。1周后统计污染率、死亡率和成活率。

污染率/%=(污染的外植体数/接入的外植体总数)×100;

死亡率/%=(死亡的外植体数/接入的外植体总数)×100;

存活率/%=(存活的外植体数/接入的外植体总数)×100。

1.2.2 诱导培养 诱导培养基以 MS 为 基础培养基,另附加不同质量浓度的 6-BA($1、2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),IAA($0.1、0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。将消毒灭菌后的茎段接入诱导培养基中,每个处理接 10 瓶,每瓶接入 3 个外植体,分别置于 LED 白光灯(W)、LED 红光灯(R)、LED 蓝光灯(B)、红蓝 LED 组合灯光(4R1B、3R5B)5 种不同光质中进行诱导培养,3 周后统计芽诱导率。

诱导率/%=(出芽的外植体数/接入的外植体总数)×100。

1.2.3 增殖培养 诱导出的芽接入添加有 KT($0.15、0.2、0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)或 10% 椰汁(鲜椰汁)的 MS 培养基中进行增殖诱导培养。每个处理接 10 瓶,每瓶接 3 株,分别置于 LED 白色灯光(W)、红蓝 LED 组合灯光(4R1B、2R2B、3R5B)4 种不同光质中进行培养,4 周后统计增殖系数。

增殖系数=增殖完成后的总芽数/接种时的总芽数。

1.2.4 生根培养 挑选长至 3 cm 左右且长势一致的健壮无菌苗接入生根培养基中。以 1/2 MS 为 基础培养基,加入 IAA($0.1、0.3、0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、IBA($0.1、0.3、0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和 10% 椰汁(鲜椰汁),每个处理接 5 瓶,每瓶接 3 株,分别置于 LED 白色灯光(W)、红蓝 LED 组合灯光(4R1B、3R5B)3 种不同光质中进行培养,2 周后统计生根率、生根数、最长根长。

生根率/%=(接入后生根的植株数/接入的植株总数)×100。

1.2.5 炼苗移栽 待根长至 3~5 cm 时,将生根苗移栽到营养钵中,放入人工气候室中驯化 1 周,最后将成活的植株种植到大田中管理。

1.2.6 培养条件 MS 和 1/2 MS 为 基础培养基,含有蔗糖 $30\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,琼脂 $6.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,pH 值在 $5.80\sim5.85$ 。培养室温度为 $(25\pm2)\text{ }^{\circ}\text{C}$,光照强度 $3000\sim4000\text{ lx}$,光照时间 $16\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$,不同光质的具体参数如表 1。

1.3 数据统计与分析

采用 Excel 2013 进行数据统计与作图,采用 DPS 7.05 对试验数据进行差异性检验分析。

2 结果与分析

2.1 不同消毒方法对茎段消毒效果的影响

由表 2 可知,不同的消毒方法显著影响西瓜茎

表 1 不同光质参数

Table 1 Different light quality parameters

处理 Treatment	波峰 Peak of wavelength/nm	光质配比 Light quality ratio	功率 Power/W
W	360~700	纯白光 Pure white light	45
R	660	纯红光 Pure red light	45
B	450	纯蓝光 Pure blue light	45
4R1B	660/450	红:蓝=4:1 Red:Blue = 4:1	45
2R2B	660/450	红:蓝=2:2 Red:Blue = 2:2	45
3R5B	660/450	红:蓝=3:5 Red:Blue = 3:5	45

段的消毒效果。随着 75% 乙醇处理时间的逐渐增加,外植体的污染率和死亡率均表现出相同的变化趋势,先降后升,成活率与之相反,呈现出先升后降的变化趋势,当乙醇处理 30 s 时,污染率和死亡率相对处在最小频率,成活率达到最大频率。乙醇处理 30 s 后,再利用不同质量浓度的 NaClO 和 HgCl₂ 进行消毒,随着 0.5% NaClO 消毒时间的增加,污染率一直降低,消毒 10 min 污染率最低(7.78%),死亡率虽然呈现先降后升的变化趋势,但死亡率在 6.67%~8.89%,成活率则一直呈线性升高,最大存活率为 84.44%;随着 0.1% HgCl₂ 消毒时间逐渐增加,污染率和死亡率均表现出相同的变化形式,先降后升,存活率与之相反,消毒 8 min 存活率最高,为 85.56%,与 0.5% NaClO 消毒 10 min 时得到的最高存活率差异不显著。

为进一步筛选出最佳消毒方法,利用 0.5% NaClO 消毒 10 min 和 0.1% HgCl₂ 消毒 8 min 分别对 3 种不同基因型材料进行处理,结果如图 1 所示,0.1% HgCl₂ 消毒时,PV-1、GMS4、GMS10 的污染率和成活率均高于 0.5% NaClO,污染率最高为 17.78%,死亡率的变化则与之相反,最高为 8.89%。3 个指标在不同基因型材料间存在显著差异,0.1% HgCl₂ 消毒时 PV-1(85.56%)、GMS4(83.33%)成活率显著高于 GMS10(75.56%)。综合污染率、死亡率、存活率在不同基因型的表现,0.1% HgCl₂ 消毒 8 min 为外植体最佳消毒方法。

2.2 不同光质和培养基对西瓜茎段诱导的影响

将消毒后的外植体接种至不同的诱导培养基中,经过不同光质处理,芽诱导情况如表 3 和图 2 所示,不同质量浓度的激素及其组合均能诱导出

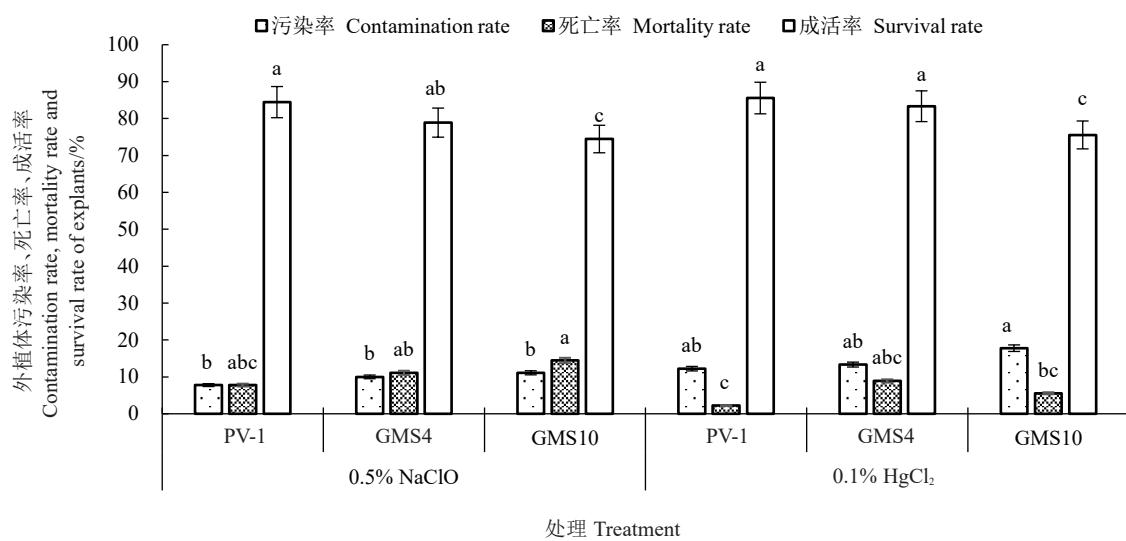
表2 不同消毒时间对外植体消毒效果的影响

Table 1 The influence of different disinfection times on the disinfection effect of explants

处理 Treatment	75%乙醇处理时间 75% Ethanol treatment time/s	0.5% NaClO 处理时间 0.5% NaClO treatment time/min	0.1% HgCl ₂ 处理时间 0.1% HgCl ₂ treatment time/min	污染率 Contamination rate/%	死亡率 Mortality rate/%	成活率 Survival rate/%
1	10	6		91.11±1.92 a	7.78±1.92 def	1.11±1.92 j
2	10	8		87.78±1.92 ab	8.89±1.92 def	3.33±0.00 ij
3	10	10		86.67±3.33 b	8.89±3.85 def	4.44±1.92 ij
4	10		6	86.67±1.92 bc	10.00±3.33 de	5.56±1.92 hij
5	10		8	82.22±1.92 cd	8.89±1.92 def	10.00±3.33 gh
6	10		10	80.00±3.33 d	12.22±3.85 d	7.78±1.92 ghi
7	30	6		21.11±1.92 i	8.89±3.85 def	70.00±6.67 d
8	30	8		17.78±1.92 i	6.67±0.00 defg	75.56±1.92 c
9	30	10		7.78±1.92 k	7.78±3.85 def	84.44±5.09 ab
10	30		6	18.89±3.85 i	4.44±5.09 efg	76.67±3.33 c
11	30		8	12.22±5.09 j	2.22±3.85 g	85.56±1.92 a
12	30		10	16.67±0.00 i	3.33±0.00 fg	80.00±0.00 bc
13	60	6		51.11±1.92 e	42.22±1.92 ab	6.67±3.33 ghi
14	60	8		47.78±1.92 ef	41.11±1.92 ab	11.11±3.85 g
15	60	10		46.67±0.00 f	44.44±3.85 a	10.00±3.33 gh
16	60		6	40.00±3.33 g	38.89±1.92 b	21.11±5.09 f
17	60		8	37.78±1.92 gh	33.33±3.33 c	28.89±1.92 e
18	60		10	34.44±1.92 h	37.78±1.92 bc	26.67±0.00 e

注:同列数字后不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。所用外植体基因型为PV-1,表3~5同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below. The genotype of the explants is PV-1, the same as table 3-5.



注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

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

图1 不同基因型外植体在不同消毒方法下的污染率、死亡率和成活率

Fig. 1 Contamination rate, mortality rate and survival rate of different genotypic explants under different disinfection methods

芽,但在不同光质的处理下,诱导率存在显著差异,诱导芽的长势也存在差异。

在不同光质培养下,不添加激素的培养基也能诱导出芽,其在5种光质处理下的诱导率高低为

4R1B (50.00%)>3R5B (41.67%)>R (35.00%)>W (31.67%)>B (28.33%),显著低于添加激素的培养基,且茎段在13d后才开始出现萌动,再生芽弱小,生长缓慢(图2-A);在添加激素的培养基中,不同光

表3 不同光质和培养基对西瓜茎段诱导的影响

Table 3 Effects of different light quality and medium on stem induction of watermelon

编号 Number	光质 Light quality	ρ (激素) Phytohormone concentration/(mg·L ⁻¹)		诱导率 Inductivity rate/%	芽生长情况 Growth condition of the bud
		6-BA	IAA		
A0	W	0	0	31.67±2.36 k	+
A1	W	1	0.1	55.00±2.36 ghi	++
A2	W	1	0.3	58.33±2.36 fgh	++
A3	W	2	0.1	86.67±0.00 bc	++++
A4	W	2	0.3	75.00±2.36 e	++++
A5	R	0	0	35.00±2.36 k	+
A6	R	1	0.1	61.67±2.36 fg	+++
A7	R	1	0.3	63.33±4.71 f	+++
A8	R	2	0.1	86.67±0.00 bc	++++
A9	R	2	0.3	80.00±0.00 cde	+++
A10	B	0	0	28.33±2.36 k	+
A11	B	1	0.1	48.33±2.36 i	++
A12	B	1	0.3	53.33±4.71 hi	++
A13	B	2	0.1	60.00±4.71 fgh	+++
A14	B	2	0.3	55.00±2.36 ghi	++
A15	4R1B	0	0	50.00±4.71 i	++
A16	4R1B	1	0.1	83.33±4.71 bcd	++++
A17	4R1B	1	0.3	85.00±2.36 bcd	++++
A18	4R1B	2	0.1	95.00±2.36 a	++++
A19	4R1B	2	0.3	90.00±4.71 ab	++++
A20	3R5B	0	0	41.67±2.36 j	++
A21	3R5B	1	0.1	75.00±2.36 e	+++
A22	3R5B	1	0.3	78.33±2.36 de	+++
A23	3R5B	2	0.1	88.33±2.36 ab	++++
A24	3R5B	2	0.3	80.00±4.71 cde	+++

注:+表示15 d左右腋芽才开始有萌动,后期芽较弱小,伸长较慢,芽长势较弱;++表示13 d左右腋芽开始萌动,后期芽弱小,伸长慢,芽长势弱;+++表示10 d左右腋芽开始萌动,后期芽弱小,伸长一般,芽长势一般;++++表示7 d左右腋芽萌发,后期芽较健壮,伸长较快,芽长势较好;+++++表示5 d左右腋芽萌发,后期芽健壮,伸长快,芽长势好。

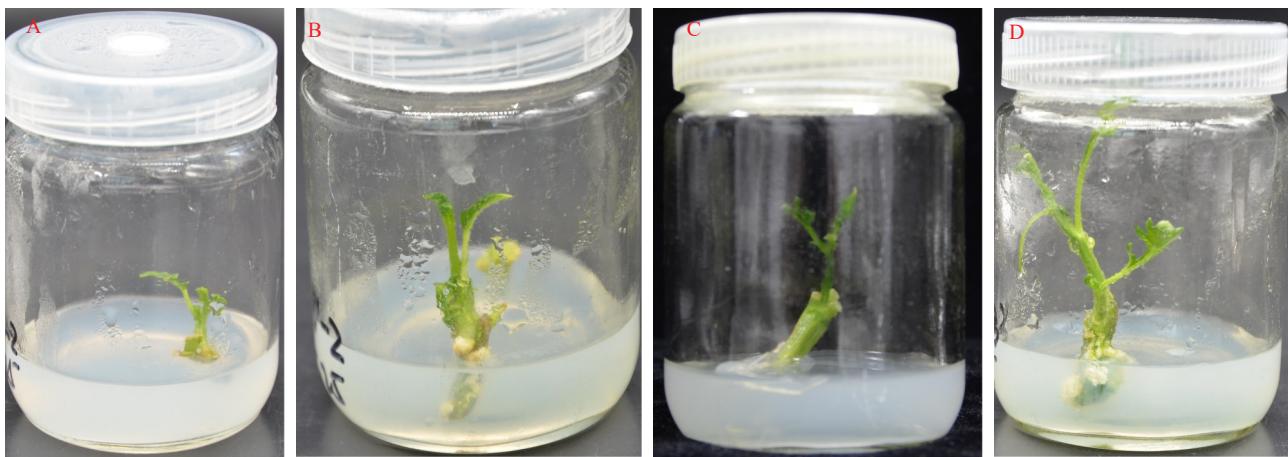
Note: + indicates that the axillary buds start to germinate around 15 d, and the buds are weaker in the later stage, with slower elongation and weaker growth; ++ indicates that the axillary buds start to germinate around 13 d, and the buds are weak, slow in elongation and weak in the later stage. +++ indicates that the axillary buds start to germinate around 10 d, and the buds are weak in the later stage, with general elongation and general bud growth; ++++ indicates axillary bud germination around 7 d, and the buds are more robust and elongated in the later stage, and the buds grow well. +++++ indicates axillary bud germination around 5 d, and the buds are robust, elongate quickly and grow well in the later stage.

质诱导下的诱导率差异显著,B光质培养下的各种培养基的诱导效果均显著低于相同激素处理下的其他光质,且其最高诱导率只有60.00%,W、R、3R5B、4R1B培养下最高诱导率依次为86.67%、86.67%、88.33%、95.00%,其中4R1B培养下的诱导率显著高于其他光质。

在光质相同的条件下,不同质量浓度的激素处理对诱导率也存在显著影响,当6-BA质量浓度为1 mg·L⁻¹时,随着IAA质量浓度的增加,诱导率也在增加,在IAA质量浓度为0.3 mg·L⁻¹时,诱导率达到最大值,其中4R1B光质诱导效果最佳,诱导率为85.00%,且诱导芽的生长势优于其他光质,5 d左

右就能诱导出芽(图2-D),其他光质大部分在5~13 d左右才能诱导出芽(图2-B~C);当6-BA质量浓度为2 mg·L⁻¹时,随着IAA质量浓度的增加,诱导率反而降低,IAA为0.1 mg·L⁻¹时,诱导率达到最大值,其中4R1B光质诱导效果最佳,诱导率为95.00%。在4R1B组合光质下利用A18培养基诱导PV-1、GMS4、GMS10三种不同基因型茎段,结果如图3所示,其诱导率在85%~95%,诱导率高低依次为PV-1(95.00%)>GMS4(88.33%)>GMS10(85.00%),PV-1与GMS10基因型间存在显著差异。

综上可知,在组合2 mg·L⁻¹ 6-BA+0.1 mg·L⁻¹ IAA诱导下,诱导率达到最大值,在组合光质的培



注:A. 15 d 萌动的诱导芽;B、C. 5~13 d 萌动的诱导芽;D. 5 d 萌动的诱导芽。
Note: A. Induced buds that begin to germinate after 15 d; B, C. Induced buds that begin to germinate within 5 to 13 d; D. Induced buds that begin to germinate after 5 d.

图 2 不同培养基诱导芽的生长情况

Fig. 2 Growth of buds induced by different medias

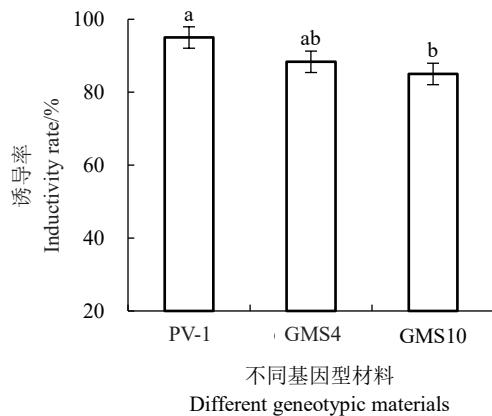


图 3 不同基因型外植体在 A18 培养基诱导下的诱导率

Fig. 3 Inductivity rate of different genotypic explants induced by A18 medium

养下,诱导率进一步提高,所以西瓜带芽茎段最佳诱导方式为最佳诱导培养基 $MS+2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 6-BA+ $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ IAA 与组合光质 4R1B 的结合诱导培养。

2.3 不同光质和培养基对西瓜茎段诱导芽增殖的影响

将长至 2~3 cm 的诱导芽转入增殖培养基中,在不同光质中进行增殖培养,培养 4 周后的增殖效果如表 4 所示,不同光质和培养基对芽增殖系数的影响显著。在同一光质培养中,诱导芽的增殖系数随着 KT 质量浓度的增加,都呈现出先升后降的变化趋势,且诱导芽的增殖系数差异显著,均在 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ KT 时,增殖系数达到最大值,且芽分化快,生长快,发育良好,其中 4R1B 最大增殖系数

为 4.80, 显著高于 W (4.00)、2R2B (4.43)、3R5B (4.15)。在不同光质与相同培养基的诱导下,组合光质诱导的增殖系数都明显高于单一光质,如 B7 (4.27)、B11(4.12)、B15(4.02) 的增殖系数显著高于 B3(3.40)。进一步分析发现,红蓝光质的比例对增殖系数有显著影响,R:B(4R1B)为 4 时,增殖系数在 1.9~4.8, R:B(2R2B)为 1 时,增殖系数在 1.8~4.5, R:B(3R5B)为 0.6 时,增殖系数在 1.67~4.15, 随着 R:B 比值的减小,增殖系数也在逐渐降低,说明红光对增殖的影响起主导作用。此外还发现,不同光质培养下,在只含有 10% 椰汁的培养基中诱导芽增殖,增殖系数在 1.38~1.93, 显著低于添加激素的培养基,且芽分化缓慢,生长缓慢,发育不良或一般。在最佳诱导组合 B6 的诱导下(图 4),PV-1、GMS4、GMS10 诱导芽的增殖系数分别为 4.80、4.70、4.77, 不同基因型之间增殖系数差异不显著,说明 4R1B 与 $MS+0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ KT+10% 椰汁组合可以达到最佳增殖效果。

2.4 不同光质和培养基对组培苗生根的影响

以 1/2 MS 为基础培养基,添加不同质量浓度的 IAA、IBA 配置成诱导生根培养基,并在不同光质中诱导生根,诱导生根的情况如表 5 所示。在不同光质培养下,生根培养基不添加激素时,其生根率、生根数、最长根长均显著低于添加激素的培养基,且诱导的根细弱,须根少,长势弱或一般。当生根培养基添加激素 IAA 或 IBA 时,植株的生根率、生根数、最长根长均表现出相同的变化趋势,均随

表4 不同光质和不同质量浓度的激素对诱导芽增殖的影响

Table 4 Effects of different light qualities and different hormone concentrations on induction of bud proliferation

编号 Number	光质 Light quality	$\rho(KT)/$ (mg·L ⁻¹)	增殖系数 Multiplication coefficient	芽增殖生长状态 Bud proliferation and growth state
B0	W	0	1.38±0.02 k	芽分化缓慢,生长缓慢,发育不良 Slow bud differentiation, slow growth and poor development
B1	W	0.15	2.10±0.14 h	芽分化慢,生长快,发育一般 Slow bud differentiation, fast growth, and moderate development
B2	W	0.2	4.00±0.19 d	芽分化快,生长快,发育好 Fast bud differentiation, fast growth, and excellent development
B3	W	0.3	3.40±0.05 e	芽分化较快,生长快,发育良好 Relatively fast bud differentiation, fast growth, and good development
B4	4R1B	0	1.93±0.09 hi	芽分化一般,生长较慢,发育一般 Moderate bud differentiation, relatively slow growth, and moderate development
B5	4R1B	0.15	2.82±0.07 f	芽分化较快,生长快,发育良好 Relatively fast bud differentiation, fast growth, and good development
B6	4R1B	0.2	4.80±0.05 a	芽分化快,生长快,发育好 Fast bud differentiation, fast growth, and excellent development
B7	4R1B	0.3	4.27±0.14 bc	芽分化快,生长快,发育好 Fast bud differentiation, fast growth, and excellent development
B8	2R2B	0	1.80±0.05 ij	芽分化一般,生长较慢,发育一般 Moderate bud differentiation, relatively slow growth, and moderate development
B9	2R2B	0.15	2.65±0.16 f	芽分化较快,生长快,发育良好 Relatively fast bud differentiation, fast growth, and good development
B10	2R2B	0.2	4.43±0.09 b	芽分化快,生长快,发育好 Fast bud differentiation, fast growth, and excellent development
B11	2R2B	0.3	4.12±0.12 cd	芽分化快,生长快,发育好 Fast bud differentiation, fast growth, and excellent development
B12	3R5B	0	1.67±0.05 j	芽分化一般,生长较慢,发育一般 Moderate bud differentiation, relatively slow growth, and moderate development
B13	3R5B	0.15	2.42±0.12 g	芽分化较快,生长快,发育良好 Relatively fast bud differentiation, fast growth, and good development
B14	3R5B	0.2	4.15±0.02 cd	芽分化快,生长快,发育好 Fast bud differentiation, fast growth, and excellent development
B15	3R5B	0.3	4.02±0.07 d	芽分化快,生长快,发育好 Fast bud differentiation, fast growth, and excellent development

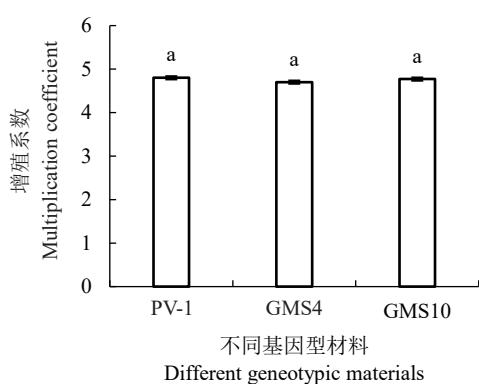


图4 不同基因型外植体在A6诱导下的增殖系数

Fig. 4 Multiplication coefficient of different genotypic explants induced by A6

着激素质量浓度的增加而逐渐降低,都在添加0.1 mg·L⁻¹ IAA时达到最大值,均高于其他生根培养基,且根粗,须根多,长势健壮,其中含IAA激素的诱导效果优于含IBA激素,如在4R1B培养下含IAA与IBA诱导的最佳生根率、生根数、最长根长分别为100.00%、90.00%,5.83、4.96条,21.52、17.82 cm。在含同一激素的生根培养基中,不同光质培养下,诱导生根的情况也存在明显差异,W、4R1B、3R5B光质培养下,最大生根率依次为96.67%、100.00%、100.00%,RB组合光质虽然高于单一W光质,但是差异不显著;生根数最多的依次为4.94、5.83、5.36条,最长根长分别为17.57、

表5 不同光质和培养基对再生植株生根培养的影响

Table 5 Effects of different light qualities and medias on rooting culture of regenerated plants

编号 Number	光质 Light quality	ρ (IAA)/ (mg·L ⁻¹)	ρ (IBA)/ (mg·L ⁻¹)	生根率 Rooting rate/%	生根数 Roots number	最长根长 root length/cm	根生长情况 Roots growth condition
C0	W	0	0	36.67±4.71 j	1.92±0.121	3.50±0.42 i	根细弱,须根极少,长势弱。Thin and weak roots, very few fibrous roots, and weak growth vigor
C1	W	0.1	0	96.67±4.71 a	4.94±0.39 c	17.57±0.63 cde	根粗,须根多,长势健壮。Thick roots, abundant fibrous roots, and vigorous growth
C2	W	0.3	0	86.67±9.43 bcde	4.00±0.00 fgh	16.80±0.78 defg	根粗,须根多,长势健壮。Thick roots, abundant fibrous roots, and vigorous growth
C3	W	0.5	0	73.33±0.00 fgh	3.32±0.06 j	15.73±0.54 fg	根较粗,须根量一般,长势一般
C4	W	0	0.1	83.33±4.71 cdef	3.84±0.01 gh	16.73±0.76 defg	Relatively thick roots, moderate amount of fibrous roots, and moderate growth vigor
C5	W	0	0.3	76.67±4.71 efgh	3.69±0.08 hi	16.17±0.25 efgh	根粗,须根多,长势较健壮。Thick roots, abundant fibrous roots, and vigorous growth
C6	W	0	0.5	66.67±0.00 h	3.35±0.21 ij	15.43±0.06 g	根细,须根少量,长势一般。Thin roots, a small amount of fibrous roots, and moderate growth vigor
C7	4R1B	0	0	53.33±9.43 i	3.00±0.00 j	9.63±0.62 h	根较细,须根少量,长势一般。Relatively thin roots, a small amount of fibrous roots, and moderate growth vigor
C8	4R1B	0.1	0	100.00±0.00 a	5.83±0.24 a	21.52±2.18 a	根粗,须根多,长势健壮。Thick roots, abundant fibrous roots, and vigorous growth
C9	4R1B	0.3	0	96.67±4.71 ab	5.62±0.12 b	19.44±0.82 b	根粗,须根多,长势健壮。Thick roots, abundant fibrous roots, and vigorous growth
C10	4R1B	0.5	0	90.00±4.71 abcd	5.41±0.03 b	18.00±0.11 bcd	根粗,须根多,长势健壮。Thick roots, abundant fibrous roots, and vigorous growth
C11	4R1B	0	0.1	90.00±4.71 abcd	4.96±0.05 c	17.82±0.04 cde	根粗,须根多,长势健壮。Thick roots, abundant fibrous roots, and vigorous growth
C12	4R1B	0	0.3	86.67±9.43 bcde	4.52±0.33 de	17.12±0.33 cdef	根较粗,须根多,长势较健壮。Relatively thick roots, abundant fibrous roots, and relatively vigorous growth vigor
C13	4R1B	0	0.5	80.00±0.00 defg	4.38±0.29 ef	16.81±0.35 defg	根较粗,须根量一般,长势较健壮。Relatively thick roots, moderate fibrous roots, and relatively vigorous growth vigor
C14	3R5B	0	0	43.33±4.71 ij	2.61±0.15 k	9.02±0.62 h	根细,须根少量,长势一般。Thin roots, a small amount of fibrous roots, and moderate growth vigor
C15	3R5B	0.1	0	100.00±0.00 a	5.36±0.38 b	19.40±0.55 b	根粗,须根多,长势健壮。Thick roots, abundant fibrous roots, and vigorous growth
C16	3R5B	0.3	0	93.33±0.00 abc	4.89±0.45 c	18.67±0.95 bc	根粗,须根多,长势健壮。Thick roots, abundant fibrous roots, and vigorous growth
C17	3R5B	0.5	0	83.33±4.71 cdef	4.80±0.05 cd	17.77±0.30 cde	根较粗,须根多,长势较健壮。Relatively thick roots, abundant fibrous roots, and relatively vigorous growth vigor
C18	3R5B	0	0.1	86.67±0.00 bcde	4.42±0.16 e	16.90±0.19 defg	根较粗,须根多,长势较健壮。Relatively thick roots, abundant fibrous roots, and relatively vigorous growth vigor
C19	3R5B	0	0.3	80.00±9.43 defg	4.20±0.15 efgh	16.77±0.01 defg	根较粗,须根量一般,长势较健壮
C20	3R5B	0	0.5	70.00±4.71 gh	4.00±0.13 fgh	16.42±0.39 defg	Relatively thick roots, moderate amount of fibrous roots, and relatively vigorous growth vigor
							根较粗,须根量一般,长势一般。Relatively thick roots, moderate amount of fibrous roots, and moderate growth vigor

21.52、19.40 cm, 后 2 项指标中 4R1B 显著高于 3R5B 和 W, 3R5B 也显著高于 W。综合以上分析表明, 在 4R1B 光质的培养下配合添加 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ IAA 诱导生根, 能提高生根率和促进根的长势。

2.5 培养体系建立及炼苗移栽

西瓜培养体系建立如图 5 所示。将生根的培

养瓶在室温条件下炼苗 5 d, 然后从培养瓶中取出植株(图 5-E), 去除根部的培养基并用清水洗净, 用滤纸将根部水分吸干, 移栽到营养钵中(图 5-F)放入人工培养间, 并用塑料薄膜覆盖, 1 周后揭开塑料薄膜, 继续培养 1 周后, 移栽到大田中进行常规水肥管理。



注:A. 西瓜茎段接入诱导培养基;B. 诱导的腋芽接入增殖培养基;C. 植株增殖;D. 植株接入生根培养基;E. 植株生根;F. 植株移栽营养钵。
Note: A. Watermelon stem segment access induction medium; B. Induced axillary bud access to proliferation medium; C. Plant proliferation; D. Plant access to rooting medium; E. Plant rooting; F. Plant transplant pot.

图 5 西瓜茎段组织离体培养体系建立

Fig. 5 Establishment of *in vitro* culture system of watermelon stem tissue

3 讨论与结论

外植体消毒效果将直接影响组织培养的下一步试验能否继续展开。影响消毒效果的因素有很多, 外植体材料的种类和品种、外植体部位、外植体的生长状态、取材的时间、消毒方法等都将直接影响外植体的成活率。大部分西瓜组织培养以无菌的材料作为研究对象, 本研究以大田的西瓜茎段作为外植体进行研究, 目的是研究在复杂的环境条件下外植体最普适的消毒方法, 同时也为了能探索出简便、高效、符合生产中稀有的优异性状的种质资源的扩繁与保存技术。目前, 对外植体的消毒多采

用乙醇、氯化汞、次氯酸钠、双氧水等, 其中对茎段的消毒常使用氯化汞。王兰兰等^[7]利用 75% 乙醇处理 20 s 配合 0.1% 氯化汞处理 8 min 使佛手瓜茎段的存活率在 85.00% 以上, 别赵微等^[39]在香瓜茄茎段培养中同样利用 0.1% 氯化汞处理 8 min, 使得污染率和死亡率最低, 与本研究利用 75% 乙醇处理 30 s, 0.1% 氯化汞处理 8 min, 存活率也在 85.00% 以上的结果一致, 只是在 PV-1、GMS4、GMS10 三种不同基因型材料之间存在差异, 可能与品种不同有关。李利娟等^[40]在海棠上的研究也使用相同的消毒方法, 成活率也高达 83.30%。宣杨等^[23]、阳腾等^[41]、吴辉晶等^[9]分别在西瓜、山药和刺梨上也利用相同

的消毒组合,说明75%乙醇和0.1%氯化汞消毒组合的效果较好,在不同草本、木本植物中均能达到最佳的消毒效果,具有一定的普适性。

光质是影响植物的重要环境因素之一,对植物的生长发育、光合作用、形态构建等均有一定的调控作用^[42],对组织培养也有一定的影响。不同光质在树莓^[43]、石斛^[44]、鳄梨^[45]等组织培养中产生了重要影响,而光质在西瓜中的研究主要集中表现在西瓜幼苗的生长生理^[37-38]、生根^[46]、果实的糖及色素积累^[47]等方面,在西瓜组织培养过程中的研究报道较少。本研究以雄性不育西瓜带芽茎段为试验材料,研究纯白色、纯红色、纯蓝色及红蓝组合光质对其诱导、增殖、生根的影响,以期建立并优化西瓜茎段组织培养快繁体系。在不同光质培养下,其诱导率、增殖系数、生根率均存在差异。在芽诱导培养中,红蓝组合光质诱导效果要优于单色光质,其中4R1B光质培养下,诱导效果最好,诱导率高达95.00%,李凤华等^[48]研究光质对西瓜幼苗质量影响的结果表明6R1B比4R1B更有利于提高幼苗质量,说明西瓜实生苗和组培诱导芽均在高红光低红蓝比例的光质中生长最佳。郭丽等^[49]在牡丹的组织培养研究中表明了红蓝复合光质更有利于诱导不定芽,黄文静等^[45]在鳄梨组织培养优化中的研究也表明,一红一蓝组合光质使腋芽诱导率达到了89.70%,与本研究结果相似,只是在红蓝光比例上存在差异,可能是因为所属的植物科属不同,对光质的需求量存在差异。进一步分析发现,在红蓝组合光质中,随着红光的减少,诱导率也在降低,Budiarso^[50]在红掌组织诱导研究中也得到相同的结果,说明红光更有利于植物组织的诱导培养。本研究不定芽诱导的试验结果表明复合光质效果好,所以在芽增殖培养中,仅利用白色LED光质和红蓝复合光质进行诱导,结果表明4R1B光质仍然是最佳增殖诱导光质,增殖系数高达4.80。任桂萍等^[51]的研究结果显示,LED白色光质是蝴蝶兰增殖的最适宜光源,与本研究结果相反。顾梦云等^[52]的研究中显示R:B=3:1时,增殖系数最高,与本研究类似,都是高红光低蓝光更有利于增殖。孙翊等^[53]发现,4R1B组合光质是非洲菊组培苗增殖的最佳光源,与本研究结果一致。说明大部分植物更适用红蓝组合的光质,具体红蓝组合光质的比例会因植物的种类不同而存在差异。PV-1、GMS4、GMS10三种不同基因型雄性不育材料的诱导率和增殖系数均存在差异,但差异不显著,说明筛选出的诱导条件具有一定的

通用性。根据增殖培养的结果,在生根培养中,再次利用高红光低蓝光与低红光高蓝光诱导生根,试验结果再次验证了4R1B组合光质的高效性,生根率达到100%,且生根数和最长根长均达到最大值,分别为5.83条、21.52 cm,显著高于其他光质。黄雯等^[54]在红白光质对西瓜苗生长发育的研究中发现白光更有利于西瓜生根及长势,与本研究结论不同,可能是因为组培诱导芽更依赖可控的环境条件,而实生苗受自然环境的影响大,更依赖白光源。黄文静等^[45]在鳄梨上利用一红一蓝光质诱导,生根效果最好,刘伟超等^[55]在大花萱草的研究中显示6R4B光质生根率最高,也是红蓝光组合光质诱导效果最好。杨艳敏等^[43]利用4R1B1G使蓝莓生根率达到最大值,吴瑶等^[44]在秋石斛中采用6R3B3G,在春石斛中采用6R3B0G组合光质处理,生根效果最好,与本试验不同的是加入了绿色光质,但是光质还是以高红光低蓝光为主,说明高红光低蓝光组合光质在大多数不同植物中具有一定的通用性。进一步分析发现,鳄梨^[45]、蓝莓^[31]都是在相同的光质下使得增殖系数和生根率达到最大值,与本研究结论一致。在组织培养过程中,植物激素质量浓度及配比也是组织培养诱导成功的关键因素,在植物离体组织再生中发挥关键作用^[56-57],调控着外植体的发育进度、分化方向和器官发生^[58]。本研究利用6-BA、IAA组合诱导西瓜带芽茎段,筛选出了最佳诱导培养基为MS+2 mg·L⁻¹ 6-BA+0.1 mg·L⁻¹ IAA,在4R1B光质配合下,诱导率达到最大值,且芽萌发得早,伸长快,长势好。有研究表明,6-BA在不同植物组织培养中均能起到关键的诱导作用,Poles等^[59]的研究也表明了6-BA主要用于刺激腋芽的分化、生长及不定芽的形成,本研究结果也表明6-BA的诱导效果显著。王喜庆^[25]、李玲等^[24]分别在西瓜子叶、子房组织培养中都利用6-BA达到最佳诱导效果。Jardark等^[60]的研究结果也表明4 mg·L⁻¹ 6-BA与0.3 mg·L⁻¹ IAA配比时茎段诱导的不定芽数最多,而在施平丽等^[61]和任菲宏等^[62]的研究中,6-BA与NAA配比是最佳的诱导组合,可能不同植物对不同激素的敏感度存在差异。在前期研究的基础上,本研究利用不同质量浓度KT和鲜椰汁诱导增殖。当KT质量浓度为0.2 mg·L⁻¹时,增殖系数达到最大值(4.80),李新等^[63]的研究表明,6-BA+IAA诱导增殖的效果比单一激素的诱导效果好,刘晓等^[64]在紫薇茎段培养中也得出6-BA和NAA诱导增殖效果最佳,王闯等^[65]在无籽西瓜茎段培养的

研究结果也表明了 6-BA 和 IAA 组合诱导增殖率达到最大值,与本研究的激素种类和配比都不一样,而本研究仅用单一激素就能达到较好的增殖效果,说明本研究的增殖诱导方法简单高效,优势更加突出。组培苗生根是组织培养再生体系建立的最后一个关键环节,生长素在诱导植物不定根分化的过程中发挥着重要的作用。本研究在 1/2 MS 基础培养基中添加 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ IAA 诱导生根,生根率达到 100.00%,与高宁宁等^[66]在甜瓜生根的研究中筛选出的生根培养基相同,宣杨等^[23]利用不同质量浓度的 IBA 诱导小果型西瓜生根都能达到 100.00% 的生根率,可能是因为本研究的材料是雄性不育系西瓜,纪书琴^[67]和施平丽等^[61]的研究表明 IBA 诱导生根的效果更好,可能是由于不同的科属间存在差别。在 4R1B 组合光质的培养下配合最佳诱导和增殖培养基,PV-1、GMS4、GMS10 的诱导率分别达到 95.00%、88.33%、85.00%,增殖系数依次为 4.80、4.70、4.77,不同基因型间表现出一定差异但不显著,可能与不同基因型品种或植物内源激素的含量有关,表明不同基因型对外植体组织培养产生一定的影响。

本研究以雄性不育系西瓜带芽茎段为外植体,通过对外植体消毒灭菌及利用不同光质进行诱导、增殖、生根培养的研究,筛选出最佳消毒灭菌方法:乙醇处理 30 s 后 0.1% HgCl_2 处理 8 min,在 4R1B 光质的培养下配合最佳诱导培养基 $\text{MS}+2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 6-BA+ $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NAA、最佳增殖培养基 $\text{MS}+0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ KT+10%椰汁、最佳生根培养基 1/2MS+ $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ IAA+10%椰汁,能达到最佳的诱导效果,建立并优化了西瓜组织培养快繁技术体系,为优异西瓜种质材料的扩繁和保存提供了可靠的技术支撑,对西瓜新种质的创制和新品种改良具有重要作用。

参考文献

- [1] 杨念,杨孟阳,王蔚宇,等.基于 Nerlove 模型的我国西瓜供给需求反应[J].中国瓜菜,2019,32(5):50-53.
- [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.
- [3] 马双武,王吉明,何红华.我国西瓜雄性不育系的研究利用[J].中国瓜菜,2006,19(5):28-30.
- [4] 张显,魏大钊.西瓜雄性不育两用系 G17AB 的改良及利用[J].北京农业大学学报,1993,19(增刊 4):154-155.
- [5] 于远.利用 mRNA 差异显示技术分离西瓜(*Citrullus lanatus*)核雄性不育基因相关 cDNA 片段的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [6] LONG Y, YANG Y, PAN G T, et al. New insights into tissue culture plant-regeneration mechanisms[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:926752.
- [7] 王兰兰,李裕荣,陈之林,等.佛手瓜茎段组培快繁技术研究[J].中国瓜菜,2023,36(9):30-35.
- [8] 张华纬.不同植物激素对露珠杜鹃茎段产生不定芽和继代增殖的影响[J].长治学院学报,2023,40(2):51-55.
- [9] 吴辉晶,蒋兰兰,安华明,等.无刺刺梨茎段快繁体系的建立[J].北方园艺,2023(8):17-23.
- [10] ANDRUS C F, SESHADRI V S, GRIMBALL C. Production of seedless watermelon[J]. Technical Bulletin, 1971, 21 (3) : 293-301.
- [11] 吴文勇.无籽西瓜的组织培养及快速繁殖试验研究[J].长江蔬菜,2008(8):69-70.
- [12] 羊杏平,陈学好,张朝阳,等.无籽西瓜茎尖不定芽诱导和增殖的影响因子[J].江苏农业学报,2010,26(3):567-571.
- [13] 张全美.西瓜高效植株再生体系建立及四倍体离体诱导研究[D].杭州:浙江大学,2004.
- [14] 牛波,张晨光,刘阳,等.西瓜子叶离体再生体系的建立[J].中国蔬菜,2022(3):78-82.
- [15] ABDOLLAHI M R, DARBANDI M, HAMIDVAND Y, et al. The influence of phytohormones, wheat ovary co-culture, and temperature stress on anther culture response of watermelon (*Citrullus lanatus* L.)[J]. Brazilian Journal of Botany, 2015, 38 (3):447-456.
- [16] 荣文娟,刘君璞,朱迎春,等.西瓜未受精胚珠离体培养若干影响因素的研究[J].中国瓜菜,2015,28(3):9-13.
- [17] 林伯年.甜瓜、西瓜原生质体电融合及其杂种分子生物学鉴别[J].园艺学报,1994,21(3):302-304.
- [18] 龚思,梁少华,严静怡,等.西瓜未受精子房离体培养技术[J].中国瓜菜,2019,32(5):17-21.
- [19] 徐洪国,宣杨,仲娟娟,等.小果型西瓜子叶节离体培养[J].中国瓜菜,2018,31(3):38-40.
- [20] 刘静,赵强,王旭英,等.西瓜高效离体培养再生植株的研究[J].北方园艺,2012(4):108-110.
- [21] 郑先波,夏国海,崔红,等.无籽西瓜种苗愈伤组织诱导研究[J].河南农业大学学报,2003,37(1):39-43.
- [22] 李迎迎.西瓜未授粉子房离体培养技术的研究[D].郑州:河南农业大学,2017.
- [23] 宣杨,徐洪国,仲娟娟,等.小果型西瓜快速繁殖技术研究[J].黑龙江农业科学,2017(11):45-47.
- [24] 李玲,闵子扬,童龙,等.西瓜未授粉子房的离体培养[J].中国瓜菜,2014,27(6):6-10.
- [25] 王喜庆.小型西瓜离体培养技术研究[J].东北农业大学学报,2012,43(10):120-124.
- [26] 许大全,高伟,阮军.光质对植物生长发育的影响[J].植物生理学报,2015,51(8):1217-1234.
- [27] LI Y, ZHENG Y J, LIU H C, et al. Effect of supplemental blue light intensity on the growth and quality of Chinese kale[J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2019, 60(1), 49-57.
- [28] 周鹏,张敏.LED 光质对植物组织培养影响研究进展[J].江苏林业科技,2016,43(4):44-48.
- [29] 熊辉俊,樊建霞,覃贵勇.不同光质配比对番茄幼苗生长、AsA-GSH 循环及内源激素含量的影响[J].江苏农业科学,2025,53(9):146-152.
- [30] 李慧敏.不同光质对黄秋葵组培苗生长、气孔和生理特性的影响[J/OL].分子植物育种,1-15[2024-12-12]. <https://link.cnki.net>.

- net/urlid/46.1068.S.20241211.2003.010.
- [31] 杨艳敏,刘有春,魏鑫,等. LED 光质对‘都克’蓝莓组培苗增殖与生根的影响[J]. 中国果树,2021(7):48-50.
- [32] 王跃荣. 不同光质对西瓜甜瓜幼苗的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2024.
- [33] ABIDI F, GIRAUT T, DOUILLET O, et al. Blue light effects on rose photosynthesis and photomorphogenesis[J]. Plant Biology (Stuttgart, Germany), 2013, 15(1):67-74.
- [34] KIM H Y, LEE S J. Growth and contents of anthocyanins and ascorbic acid in lettuce as affected by supplemental UV-A LED irradiation with different light quality and photoperiod[J]. Korean Journal of Horticultural Science and Technology, 2016, 34 (4):596-606.
- [35] PENG X, WANG T, LI X, et al. Effects of light quality on growth, total gypenosides accumulation and photosynthesis in gynostemma pentaphyllum[J]. Botanical Sciences, 2017, 95(2): 235-243.
- [36] 孙翊,殷丽青,张永春,等. 不同 LED 光质对非洲菊组培苗生长及生理特性的影响[J]. 分子植物育种, 2017, 15(12): 5140-5147.
- [37] 金枝. 植物工厂不同光环境对西瓜生长发育的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2024.
- [38] 王跃荣,陈鹏宇,杨贵春,等. LD 不同红蓝光比例对西瓜幼苗生长、光合作用及抗氧化酶活性的影响[J]. 蔬菜, 2025(11): 42-47.
- [39] 别赵微,詹得利,曹云河,等. 香瓜茄茎段愈伤组织离体再生体系的建立[J]. 中国蔬菜, 2025(4):116-125.
- [40] 李利娟,孙艳艳,张龙,等. ‘云想容’海棠茎段组织培养技术[J]. 北方园艺, 2021(7):66-72.
- [41] 阳腾,刘怒安,甘建阳,等. 双胞山药快繁体系的建立[J/OL]. 分子植物育种, 1- 15[2024- 01- 11]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240110.1622.006>.
- [42] 代绿叶,顾益银,韩莹琰. LED 光环境调控对植物影响的研究进展[J]. 分子植物育种, 2024;22(22):7535-7545.
- [43] 杨艳敏,刘有春,张舵,等. 不同光质对树莓组培苗生长的影响[J]. 北方果树, 2024(2):5-9.
- [44] 吴瑶,王再花,叶广英,等. 不同 LED 光质组合对两种观赏石斛组培及生长影响[J]. 广东农业科学, 2023, 50(2):32-41.
- [45] 黄文静,杨光柱,刘丹丹,等. 不同 LED 光质组合与植物生长调节剂配比对鳄梨砧木 AV-1 的组织培养优化[J]. 中国果树, 2022(11):66-71.
- [46] 王芽芽,张帆,石玉,等. 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 (3):87-98.
- [47] 呂亭辉. 红蓝光质补光对西瓜果实糖及色素积累的影响机制[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2022.
- [48] 李凤华,介元芬,吴帼秀,等. 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.
- [49] 郭丽,朱飞雪,寇艳玲,等. 不同光质对牡丹乌龙捧盛不定芽诱导的影响[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(7):84-86.
- [50] BUDIARTO K. Spectral quality affects morphogenesis on anthurium plantlet during *in vitro* culture[J]. Agrivita Journal of Agricultural Science, 2010, 32(3):234-240.
- [51] 任桂萍,王小菁,朱根发. 不同光质的 LED 对蝴蝶兰组织培养增殖及生根的影响[J]. 植物学报, 2016, 51(1):81-88.
- [52] 顾梦云,曾伟达,宿庆连,等. 不同 LED 光质配比和光照强度对红掌新品种福星组织培养的影响[J]. 广东农业科学, 2023, 50(5):46-55.
- [53] 孙翊,张永春,殷丽青,等. LED 光质对非洲菊组培苗增殖及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(12):2419-2426.
- [54] 黄雯,魏猷刚,甘小虎,等. 不同 LED 光源对西瓜苗生长发育的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(10):1809-1812.
- [55] 刘伟超,王政,何松林,等. 不同红蓝光质比对大花萱草组培苗增殖及生根的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2):134-139.
- [56] BERNULA D, BENKÓ P, KASZLER N, et al. Timely removal of exogenous cytokinin and the prevention of auxin transport from the shoot to the root affect the regeneration potential of *Arabidopsis* roots[J]. Plant Cell Tissue Organ Culture, 2020, 140 (2):327-339.
- [57] RASPOR M, MOTYKA V, KALERI A R, et al. Integrating the roles for cytokinin and auxin in de novo shoot organogenesis is: From hormone uptake to signaling outputs[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(16):8854.
- [58] 吴秀燕,张鸽香. 美国流苏离体胚的组织培养与快速繁殖[J]. 植物生理学报, 2017, 53(2):227-233.
- [59] POLES L, LICCIARDELLO C, DISTEFANO G, et al. Recent advances of *in vitro* culture for the application of new breeding techniques in citrus[J]. Plants, 2020, 9(8):938.
- [60] JARDARK R, BOUBAKRI H, ZEMNI H, et al. Establishment of an *in vitro* regeneration system and genetic transformation of the Tunisian Maltese half-blood (*Citrus sinesis*): An agro-economically important variety[J]. 3 Biotech, 2020, 10(3):99.
- [61] 施平丽,曾文丹,严华兵,等. 毛薯组织培养再生体系的建立[J]. 分子植物育种, 1- 12[2023- 07- 11]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230711.1545.006.html>.
- [62] 任菲宏,李晓松,王姣,等. 沙子空心李组织培养技术研究[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(20):78-82.
- [63] 李新,黄东益,成善汉,等. 山薯单芽茎段培养与快繁技术研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(11):2255-2259.
- [64] 刘晓,李卓,唐丽丹,等. 紫薇茎段离体培养体系的优化[J]. 河南农业科学, 2017, 46(3):112-117.
- [65] 王闯,李中勇,刘敏,等. 无籽西瓜茎段组织培养与嫁接育苗技术研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5):189-192.
- [66] 高宁宁,李晓慧,康利允,等. 厚皮甜瓜未受精子房离体培养获得胚囊再生植株[J]. 果树学报, 2020, 37(7):1036-1045.
- [67] 纪书琴. 冬枣的组织培养技术研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (4):1712-1714.