

范奕, 韩傲仁, 张娟宁, 等. 马铃薯无糖组织培养的条件优化及其在马铃薯原原种生产中的应用[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(5): 858-866.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.05.004

马铃薯无糖组织培养的条件优化及其在马铃薯原原种生产中的应用

范奕¹, 韩傲仁¹, 张娟宁¹, 唐勋², 苗叶³, 阿金娟⁴, 李亚杰¹, 马宁¹

(1. 定西市农业科学研究院/甘肃省马铃薯产业技术创新中心, 甘肃 定西 743000; 2. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃兰州 730070; 3. 建平县农业技术推广中心, 辽宁 朝阳 122400; 4. 定西市安定区园艺工作站, 甘肃 定西 743000)

摘要: 为了进一步优化无糖组织培养的微环境参数, 本研究以青薯9号为供试材料, 设置不同梯度蛭石与营养液配比($V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.7$ 、 $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.8$ 、 $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.9$)、 CO_2 含量(500 $\mu\text{mol/mol}$ 、800 $\mu\text{mol/mol}$ 、1 100 $\mu\text{mol/mol}$ 、1 400 $\mu\text{mol/mol}$)、光照度[50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]试验, 探究各处理对马铃薯组培苗生长发育的影响。研究表明, 马铃薯无糖组织培养的最适条件为 $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.8$, CO_2 含量 800 $\mu\text{mol/mol}$, 光照度 75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。与传统组织培养相比, 无糖组织培养得到的马铃薯原原种的产量、数量和成活率分别显著提高 16.09%、22.37%和 3.27% ($P < 0.05$)。综上所述, 本研究结果不仅明确了无糖组织培养的关键技术参数, 还证实了该技术在提升马铃薯种薯生产效率方面的优势, 为马铃薯组培苗的标准化生产和工厂化繁育提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 无糖组织培养; 马铃薯; 组培苗

中图分类号: Q813.1⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)05-0858-09

Optimization of sugar-free tissue culture conditions for potato and its application in pre-basic seed production

FAN Yi¹, HAN Jingren¹, ZHANG Juaning¹, TANG Xun², MIAO Ye³, A Jinjuan⁴, LI Yajie¹, MA Ning¹

(1. Dingxi Academy of Agricultural Sciences/Gansu Province Potato Industry Technology Innovation Center, Dingxi 743000, China; 2. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Jianping County Agricultural Technology Extension Center, Chaoyang 122400, China; 4. Dingxi City Anding District Horticultural Research Station, Dingxi 743000, China)

Abstract: To further optimize the microenvironment parameters of sugar-free tissue culture, this study used Qingshu No.9 as the test material and designed different gradient experiments with different ratios of vermiculite to nutrient solution ($V_{\text{vermiculite}} : V_{\text{nutrient solution}} = 1.0 : 0.7$, $V_{\text{vermiculite}} : V_{\text{nutrient solution}} = 1.0 : 0.8$, $V_{\text{vermiculite}} : V_{\text{nutrient solution}} = 1.0 : 0.9$), CO_2 concentrations (500 $\mu\text{mol/mol}$, 800 $\mu\text{mol/mol}$, 1 100 $\mu\text{mol/mol}$, 1 400 $\mu\text{mol/mol}$), and light intensities to investigate the effects of each treatment

收稿日期: 2025-01-13

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(23JRRJ0002); 甘肃省青年人才个人项目(2025QNGR83); 甘肃省科技重大专项计划资助项目(23ZDNA006); 定西市重点技术攻关专项(DX2023AZ13、DX2024AZ14)

作者简介: 范奕(1994-), 女, 甘肃定西人, 硕士, 助理研究员, 主要从事马铃薯遗传育种及栽培技术研究。(E-mail) fanly15101788930@163.com

通讯作者: 马宁, (E-mail) dxmaning@163.com; 李亚杰, (E-mail) liyajie_2008@163.com

on the growth and development of potato tissue-cultured seedlings. The light intensity was set at 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The results showed that the optimal conditions for sugar-free tissue culture of potatoes were as follows: $V_{\text{vermiculite}} : V_{\text{nutrient solution}} = 1.0 : 0.8$, CO_2 concentration of 800 $\mu\text{mol/mol}$, and light intensity of 75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Compared with traditional tissue culture, the yield, quantity, and survival rate of potato pre-basic seeds obtained through sugar-free tissue culture were significantly increased by 16.09%, 22.37%, and 3.27%, respectively ($P <$

0.05)。In conclusion, this study not only clarified the key technical parameters of sugar-free tissue culture but also confirmed the advantages of this technology in improving the production efficiency of potato seed tubers, providing theoretical basis and technical support for the standardized production and industrial propagation of potato tissue-cultured seedlings.

Key words: sugar-free tissue culture; potato; tissue-cultured seedlings

植物无糖组织培养技术由日本千叶大学古在丰树教授发明^[1],其技术核心在于通过精确控制微环境因素(如 CO₂ 浓度、温度、湿度等),以环境 CO₂ 替代培养基中添加的外源糖作为碳源,实现植物完全自养生长。这种自养生长方式不仅能显著提高植物的生长速率和生物量,还能有效降低培养过程中的微生物污染风险,适用于大规模植物组织培养^[2-5]。

近年来,无糖组织培养技术已被广泛应用于园艺作物及药用植物的快速繁殖。已有研究人员对草莓^[6]、楸树^[7]、甘薯^[8]、地黄^[9]、半夏^[10]等植物在无糖培养条件下的培养基配方、光照时长、通气时间、CO₂ 浓度和光照度等关键因素进行系统探究。Chen 等^[11]利用转基因测序技术揭示了无糖培养促进马铃薯试管苗光合作用和生长发育的机理。尽管无糖组织培养技术已在马铃薯组培苗的生产与扩繁中初步应用,但其培养过程中的 CO₂ 浓度、光照度、最佳通气量等核心参数仍需进一步优化^[12-16]。

本研究拟引入强制换气装置系统,精准控制环境条件,并利用外源 CO₂ 替代糖分作为碳源,旨在缩短马铃薯种薯繁育周期,降低生产成本,同时提高组培苗的质量与生产效率,最终实现马铃薯的高效生产。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

供试材料为青薯 9 号脱毒组培苗,由定西市农业科学研究院提供。

无糖组织快繁装置由上海离草科技有限公司生产。无糖组织培养所用培养盒尺寸为 25 cm×20 cm×8 cm (长×宽×高),传统组织培养所用培养盒尺寸为 6.35 cm×6.35 cm×9.15 cm (长×宽×高)。M519 培养基和 M524 培养基为 Phyto Technology Laboratories 公司产品,蔗糖、琼脂均为国药集团化学试剂有限公司产品。

含糖培养基:所用营养液为 M519 培养基(不含维生素)+4.0%蔗糖,基质为琼脂(7 g/L),培养基 pH 值为 5.8~6.0,培养基经高温高压灭菌。无糖培养基:所用营养液为 M524 培养基(含维生素),pH 值为

5.8~6.0,基质为蛭石,营养液、蛭石经高温高压灭菌。

1.2 试验设计

1.2.1 无糖条件下蛭石与营养液配比对马铃薯组培苗的影响 采用无糖培养基,设置 $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.7$ (M1)、 $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.8$ (M2)、 $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.9$ (M3) 3 个梯度的蛭石与营养液配比。温度为 (22 ± 2) °C,光照时间为 16 h/d,光照度为 $75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,培养第 5 d 通入 $1\ 200 \mu\text{mol}/\text{mol}$ CO₂,通气时长为 8 h/d。培养 21 d 后测定植株形态及生理指标。

1.2.2 无糖条件下 CO₂ 含量对马铃薯组培苗的影响 根据前期预试验结果,CO₂ 含量 < $400 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 或者 > $1\ 500 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 时,组培苗长势较差。因此设置 $500 \mu\text{mol}/\text{mol}$ (C1)、 $800 \mu\text{mol}/\text{mol}$ (C2)、 $1\ 100 \mu\text{mol}/\text{mol}$ (C3) 和 $1\ 400 \mu\text{mol}/\text{mol}$ (C4) 4 个梯度的 CO₂ 含量。温度为 (22 ± 2) °C,采用无糖培养基 ($V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.8$),光照时间为 16 h/d,光照度为 $75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。培养第 5 d 通入 CO₂ 气体,通气时长为 8 h/d。培养 21 d 后测定植株形态及生理指标。

1.2.3 无糖条件下光照度对马铃薯组培苗的影响 根据预试验的结果,光照度 < $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 > $110 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,组培苗长势不佳。因此设置 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (L1)、 $75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (L2) 和 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (L3) 3 个梯度的光照度。培养温度为 (22 ± 2) °C,采用无糖培养基 ($V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.8$),光照时间为 16 h/d。培养第 5 d 通入 CO₂ 气体,通气时长为 8 h/d。培养 21 d 后测定植株形态及生理指标。

1.2.4 无糖组织培养与传统组织培养对马铃薯组培苗和原原种的影响 无糖组织培养(SF)采用无糖培养基 ($V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.8$),培养温度为 (22 ± 2) °C,光照时间为 16 h/d,光照度为 $75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。第 5 d 通入 CO₂ 气体,CO₂ 含量为 $1\ 200 \mu\text{mol}/\text{mol}$,通气时长为 8 h/d。培养 21 d 后,随机选择 10 株马铃薯组培苗,在自然光下炼苗 3 d,将其定植于蛭石中,用于生产马铃薯原原种。

传统组织培养(S)采用含糖培养基。培养温度为 (22 ± 2) °C,光照时间为 16 h/d,光照度为 $75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。培养 21 d 后,随机选择 10 株马铃薯组培苗,在自然光下炼苗 3 d,将其定植于蛭石中,用于生产马铃薯原原种。

定植密度为 1 m^2 200 株,采用随机区组设计,每种培养方式重复 3 次。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 植株形态指标及生理指标测定 株高:用直尺测量茎基部至植株最高点的垂直高度。茎粗:用游标卡尺测量植株基部最粗处横纵 2 个方向的直径,并计算平均值。鲜重:组培苗洗净擦干后,用精度为 0.01 g 的电子天平测定。茎节间长度:用直尺测量组培苗底部自下而上前 3 节的节间长度。SPAD 值:采用手持便携式叶绿素测定仪(型号 SPAD-502Plus,日本 Minolta 公司产品)测定植株顶端完全展开的第 3、4 片叶。成活率:成活率=成活组培苗数/扦插组培苗总数 $\times 100\%$ 。

1.3.2 原原种产量及数量测定 收获后按单薯重量分级统计产量及数量,分级标准为单薯重量 $< 2.0 \text{ g}$, $2.0 \sim 4.9 \text{ g}$, $5.0 \sim 9.9 \text{ g}$, $10.0 \sim 19.9 \text{ g}$, $\geq 20.0 \text{ g}$ 。单薯重量 $\geq 2.0 \text{ g}$ 的马铃薯原原种为有效薯。

1.4 数据统计及分析

使用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理和图表绘制,使用 Graphpad prism 软件对数据进行统计分析,采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 无糖条件下蛭石与营养液比对马铃薯组培苗的影响

如图 1 所示, M2 处理马铃薯组培苗株高最高,为 97.64 mm。M1 处理和 M3 处理马铃薯组培苗株高显著低于 M2 处理($P < 0.05$)。M2 处理马铃薯组培苗茎最粗,为 1.53 mm, M1 处理和 M3 处理马铃薯组培苗茎粗显著低于 M2 处理($P < 0.05$)。各处理马铃薯组培苗叶片数、鲜重无显著差异($P > 0.05$)。M3 处理马铃薯组培苗 SPAD 值最高,为 36.19, M1 和 M2 处理马铃薯组培苗 SPAD 值显著低于 M3 处理($P < 0.05$)。M2 处理马铃薯组培苗第 1 茎节间显著高于 M3 处理($P < 0.05$),第 2 茎节间长度均显著高于 M1 处理和 M3 处理($P < 0.05$)。表明无糖条件下, $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} =$

1.0 : 0.8 的配比可显著提高马铃薯组培苗株高、茎粗、茎节间长度和 SPAD 值。

2.2 无糖条件下 CO_2 含量对马铃薯组培苗的影响

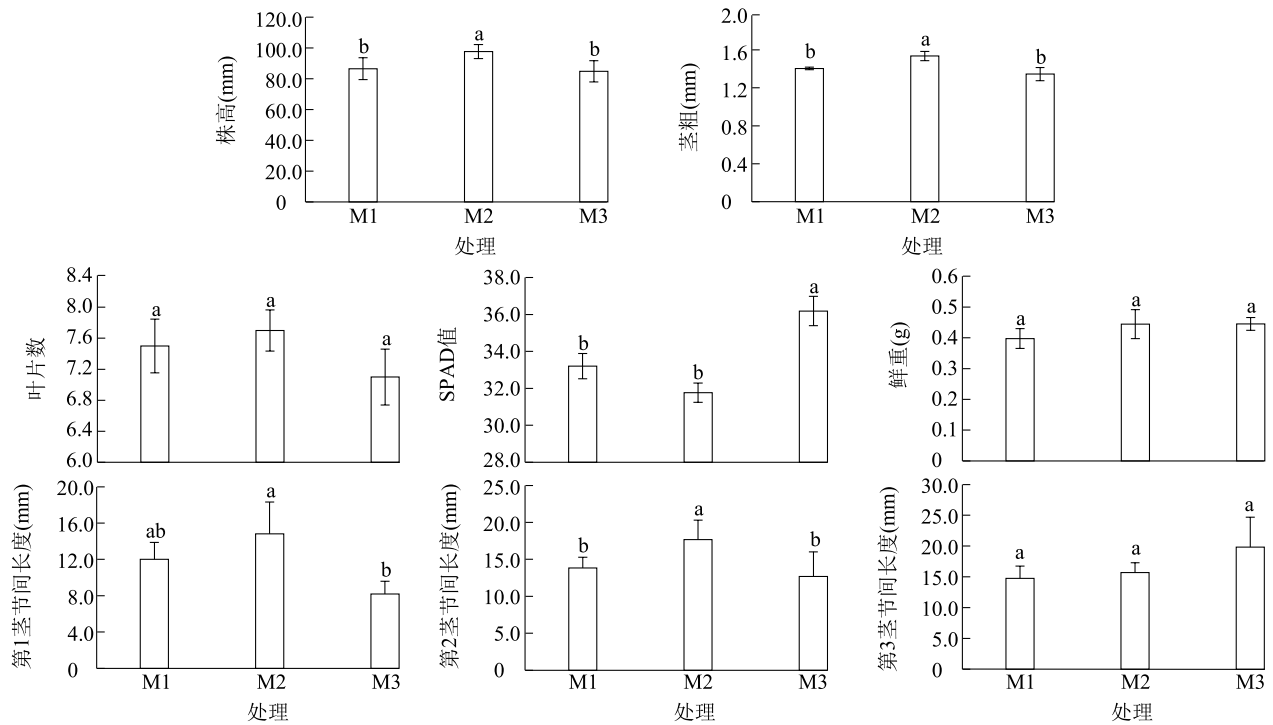
如图 2 所示,无糖条件下,随着 CO_2 含量的增加,马铃薯组培苗的株高、茎粗、叶片数、SPAD 值、鲜重、茎节间长度呈先升高后降低的趋势。C2 处理马铃薯组培苗株高、茎粗、SPAD 值均显著高于 C1 处理、C3 处理和 C4 处理($P < 0.05$), C2 处理马铃薯组培苗鲜重显著高于 C3 处理和 C4 处理($P < 0.05$)。各处理马铃薯组培苗叶片数无显著差异($P > 0.05$)。C2 处理马铃薯组培苗第 2 茎节间长度显著高于 C1 处理($P < 0.05$)。C2 处理马铃薯组培苗第 3 茎节间长度显著高于 C1 处理、C3 处理和 C4 处理($P < 0.05$)。表明无糖条件下, $800 \mu\text{mol}/\text{mol}$ CO_2 可显著提高马铃薯组培苗的株高、茎粗、SPAD 值、鲜重和茎节间长度。

2.3 无糖条件下光照度对马铃薯组培苗的影响

如图 3 所示, L2 处理和 L3 处理马铃薯组培苗株高分别为 85.25 mm 和 84.39 mm,均显著高于 L1 处理($P < 0.05$)。L3 处理马铃薯组培苗茎粗、叶片数分别为 1.67 mm 和 9.40,均显著高于 L1 处理($P < 0.05$)。L3 处理马铃薯组培苗 SPAD 值最高,为 53.83, L1 和 L2 处理马铃薯组培苗 SPAD 值显著低于 L3 处理($P < 0.05$)。L2 处理和 L3 处理马铃薯组培苗鲜重分别为 0.47 g 和 0.52 g, L1 处理马铃薯组培苗鲜重显著低于 L2 处理和 L3 处理($P < 0.05$)。各处理马铃薯组培苗第 1、第 3 茎节间长度无显著差异($P > 0.05$); L3 处理马铃薯组培苗第 2 茎节间长度显著低于 L1 和 L2 处理($P < 0.05$)。由于 L2 处理和 L3 处理马铃薯组培苗株高、茎粗、叶片数、鲜重、第 1 茎节间长度、第 3 茎节间长度均无显著差异($P > 0.05$),考虑到降本增效,选用 L2 处理下的光照度 [$75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 作为最佳参数。

2.4 无糖组织培养与传统组织培养对马铃薯组培苗和原原种的影响

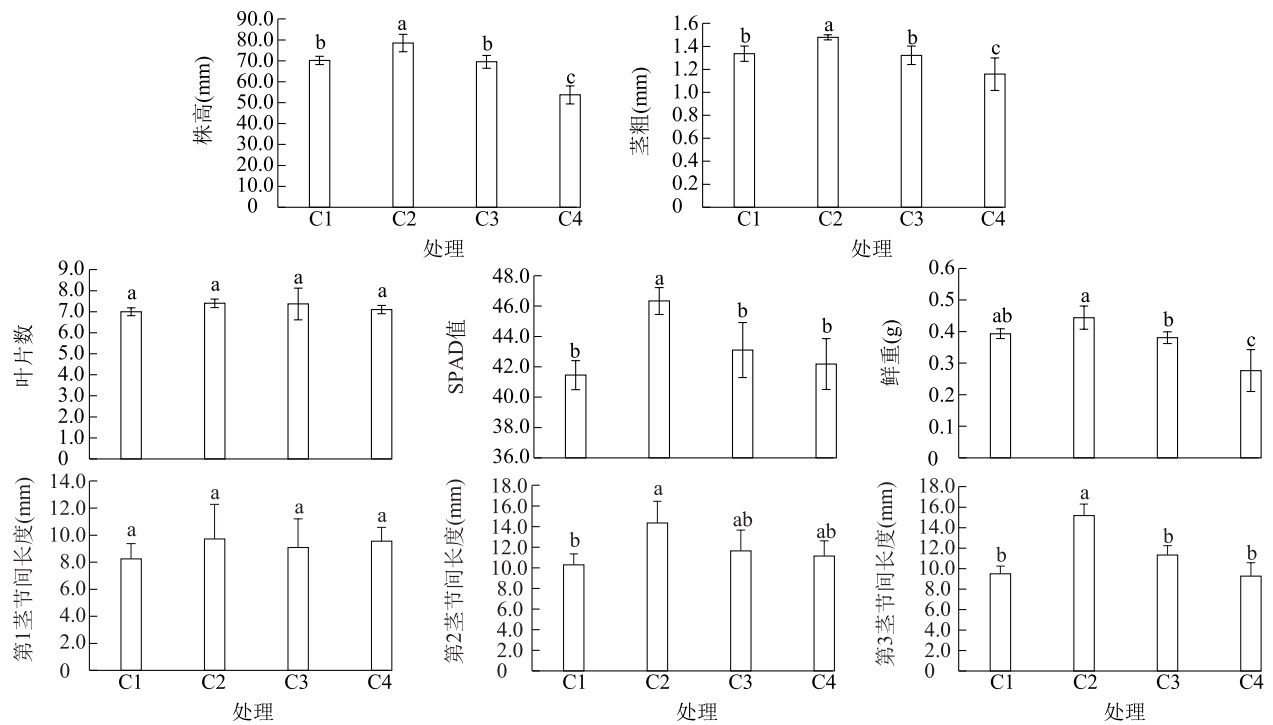
2.4.1 不同培养方式对马铃薯组培苗形态指标和生理指标的影响 如图 4 所示, SF 处理马铃薯组培苗的株高、茎粗、鲜重和 SPAD 值均显著高于 S 处理。SF 处理马铃薯组培苗第 1 茎节间长度显著低于 S 处理($P < 0.05$),第 3 茎节间长度显著高于 S 处理($P < 0.05$)。表明无糖组织培养可显著提高马铃薯组培苗的株高、茎粗、鲜重和 SPAD 值。



M1: $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.7$; M2: $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.8$; M3: $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.9$ 。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 无糖条件下蛭石与营养液配比对马铃薯组培苗的影响

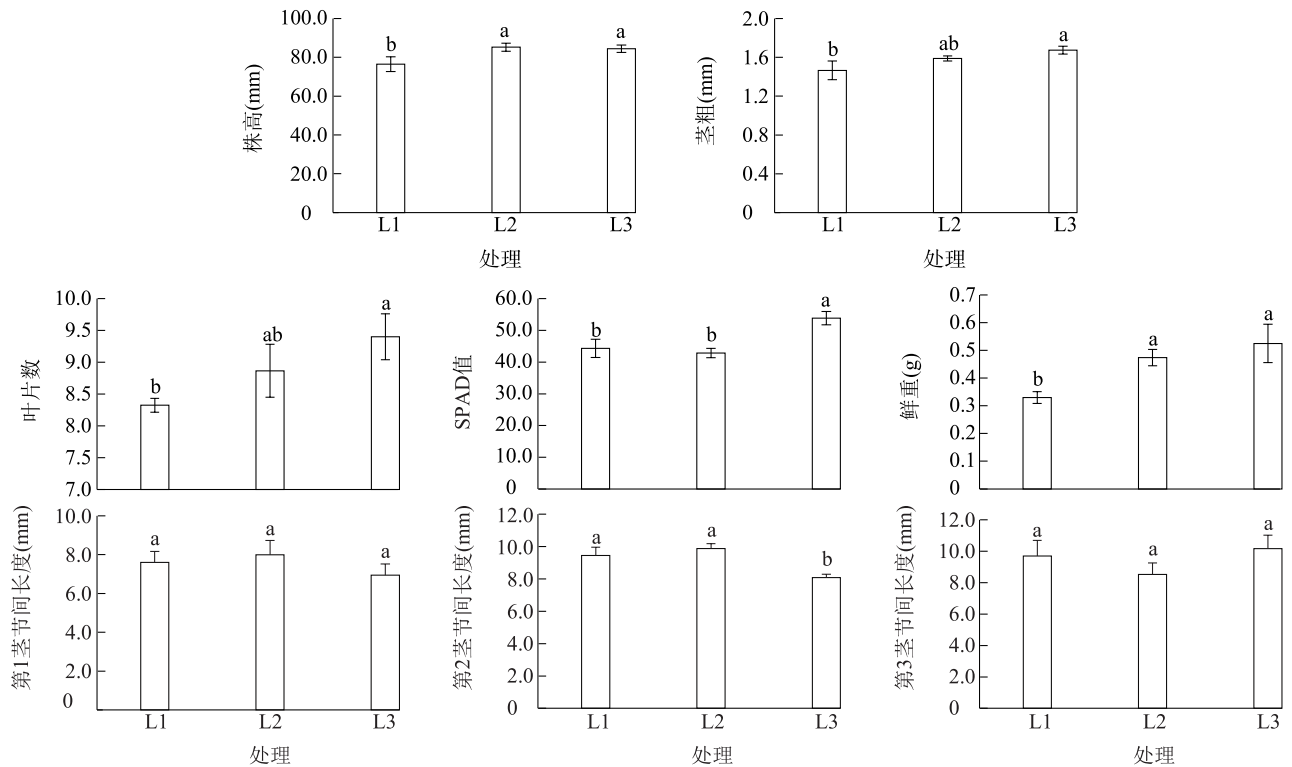
Fig.1 The impact of vermiculite and nutrient solution ratios on potato tissue-cultured seedlings under sugar-free conditions



C1: CO_2 含量 $500 \mu\text{mol/mol}$; C2: CO_2 含量 $800 \mu\text{mol/mol}$; C3: CO_2 含量 $1100 \mu\text{mol/mol}$; C4: CO_2 含量 $1400 \mu\text{mol/mol}$ 。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 无糖条件下 CO_2 含量对马铃薯组培苗的影响

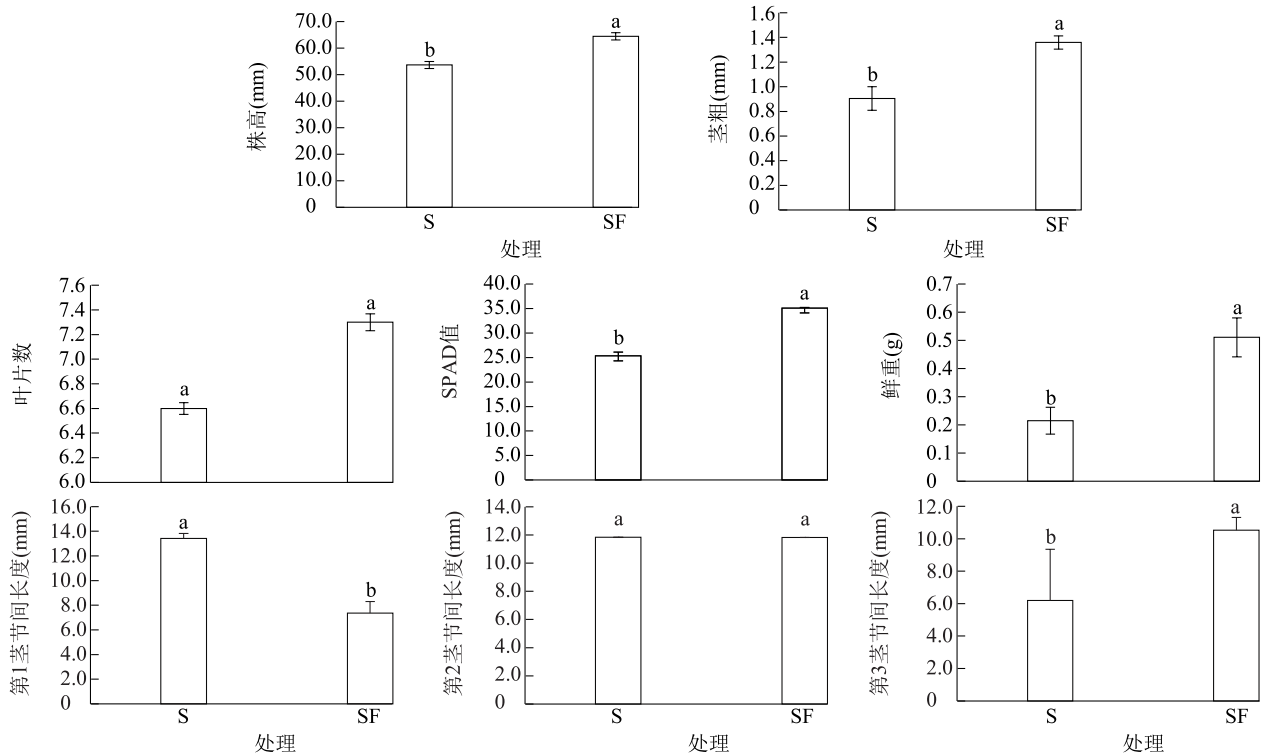
Fig.2 The impact of CO_2 concentration on potato tissue-cultured seedlings under sugar-free conditions



L1:光照度 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;L2:光照度 75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;L3:光照度 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。图柱上不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图3 无糖条件下光照度对马铃薯组培苗的影响

Fig.3 The impact of light intensity on potato tissue-cultured seedlings under sugar-free conditions



S:传统组织培养;SF:无糖组织培养。图柱上不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图4 无糖组织培养与传统组织培养对马铃薯组培苗的影响

Fig.4 The impact of sugar-free tissue culture vs. traditional tissue culture on potato tissue-cultured seedlings

2.4.2 不同培养方式对不同生育期马铃薯植株的影响 如表 1 所示,在苗期,SF 处理马铃薯株高、茎粗、SPAD 值和地上部鲜重均显著高于 S 处理。在块茎形成期,SF 处理马铃薯株高、茎粗、SPAD 值、地上部鲜重、地下部鲜重和根冠比均显著高于 S 处理 ($P<0.05$)。在块茎膨大期,SF 处理马铃薯株高、地上部鲜重、地下部鲜重均显著高于 S 处理 ($P<0.05$)。在淀粉积累期,SF 处理马铃薯株高、地上部鲜重、地下部鲜重均显著高于 S 处理 ($P<0.05$)。综上,无糖组织培养(SF)得到的马铃薯植株整体长势优于传统组织培养,特别是在植株生长的早期阶段。

表 1 不同培养方式对不同生育期马铃薯植株的影响

Table 1 The impact of different cultivation methods on potato plants at various growth stages

指标	生育期	S	SF
株高(cm)	苗期	11.47±0.93b	16.33±1.10a
	块茎形成期	29.77±2.12b	38.03±1.50a
	块茎膨大期	45.50±1.82b	51.27±2.48a
	淀粉积累期	47.93±2.08b	55.43±2.63a
茎粗(mm)	苗期	1.58±0.13b	2.59±0.20a
	块茎形成期	2.98±0.19b	3.54±0.09a
	块茎膨大期	4.65±0.44a	5.01±0.20a
	淀粉积累期	5.39±0.37a	5.64±0.19a
SPAD 值	苗期	26.80±1.85b	32.83±3.21a
	块茎形成期	35.07±0.45b	40.50±1.60a
	块茎膨大期	44.40±3.12a	48.27±0.61a
	淀粉积累期	47.13±2.57a	45.50±2.98a
地上部鲜重(g)	苗期	0.82±0.07b	1.41±0.13a
	块茎形成期	5.82±0.48b	7.30±0.29a
	块茎膨大期	16.25±0.67b	23.17±1.71a
	淀粉积累期	26.49±1.06b	38.46±1.83a
地下部鲜重(g)	苗期	0.28±0.03a	0.64±0.19a
	块茎形成期	1.94±0.09b	4.83±0.51a
	块茎膨大期	19.50±1.02b	25.05±1.61a
	淀粉积累期	46.34±3.37b	68.75±4.32a
根冠比	苗期	0.35±0.06a	0.46±0.18a
	块茎形成期	0.34±0.04b	0.66±0.09a
	块茎膨大期	1.20±0.02a	1.09±0.14a
	淀粉积累期	1.75±0.19a	1.79±0.10a

S:传统组织培养;SF:无糖组织培养。同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.4.3 不同培养方式对原原种产量和数量的影响

如表 2 所示,SF 处理青薯 9 号原原种总产量、结薯总数、有效薯数量、单株结薯数、单薯重量和成活率均显

著高 S 处理($P<0.05$)。如表 3 所示,SF 处理马铃薯 ≥ 20.0 g 的原原种产量和数量显著高于 S 处理 ($P<0.05$)。SF 处理马铃薯 5.0~9.9 g 的原原种产量和数量显著低于 S 处理 ($P<0.05$)。SF 处理马铃薯总数和总产量显著高于 S 处理 ($P<0.05$)。表明无糖培养可以显著提高大薯数量和大薯产量。

2.5 马铃薯组培苗农艺性状与马铃薯原原种产量构成因素的相关性

相关性分析结果如表 4 所示,马铃薯原原种总产量与单薯重量呈极显著相关($r=1.00, P<0.001$),与结薯总数($r=0.93$)、单株结薯数($r=0.93$)、成活率($r=0.93$)、株高($r=0.97$)、地上部鲜重($r=0.97$)、地下部鲜重($r=0.96$)呈极显著正相关($P<0.01$)。表明提高单株结薯数、单薯重量、成活率和株高,同时协调地上部与地下部的生长发育,是获得马铃薯原原种高产的关键。

3 讨论

3.1 无糖培养条件下培养基含水量的影响

在植物无糖培养体系中,蛭石因其多孔结构而被广泛用作支撑基质^[17-18]。这种多孔结构可储存充足的氧气,能够有效避免因水分过多导致的植物根系缺氧问题,还能缓释营养液满足植株对营养的需求^[19]。与传统琼脂培养基相比,蛭石成本更低,且蛭石具有重量轻、来源广且便于机械化操作的特点,更适用于工业化生产^[20]。研究表明,固体基质与营养液的比例直接影响植株的生长,较高的固液比虽能给植株提供稳定支撑,但可能会限制根系对养分的吸收,而较低的固液比虽有利于植物对水分和养分的吸收,却可能影响植物根系对氧气的吸收^[21]。本研究发现,无糖条件下, $V_{\text{蛭石}}:V_{\text{营养液}}=1.0:0.8$ 的配比可以显著促进马铃薯组培苗的生长。王中月等^[22]发现,当蛭石基质含水量为 80%,猕猴桃组培苗的生根率最大,与本研究结论一致。

3.2 CO₂浓度和光照度对马铃薯组培苗的影响

作为光合作用的关键底物,CO₂浓度直接影响植物生长。截至 2024 年 9 月,大气 CO₂浓度低于多数植物的 CO₂饱和点^[23],CO₂浓度成为限制植物光合速率和生物积累量的主要因素。CO₂浓度过低会限制光合作用,浓度过高则可能引起气孔关闭和氧化胁迫^[24-25]。在无糖条件下,外界 CO₂浓度直接影

表 2 不同培养方式对马铃薯原种产量及产量构成因素的影响

Table 2 The impact of different cultivation methods on the yield and yield components of potato pre-basic seeds

处理	总产量 (kg)	结薯总数 (个)	有效薯数量 (个)	单株结薯数 (个)	单薯重量 (g)	成活率 (%)
S	27.29±0.60b	3 096.33±44.09b	2 624.00±62.48b	2.06±0.03b	18.19±0.40b	96.29±1.15b
SF	31.68±0.87a	3 789.00±159.74a	2 937.67±37.17a	2.53±0.11a	21.12±0.58a	99.44±0.51a

S:传统组织培养;SF:无糖组织培养。同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 3 不同培养方式对马铃薯原种产量和数量的影响

Table 3 The impact of different cultivation methods on the yield and quantity of potato pre-basic seeds

指标	分级标准	S	SF
产量(kg)	<2.0 g	0.73±0.04a	1.08±0.12a
	2.0~4.9 g	3.25±0.37b	4.92±0.52a
	5.0~9.9 g	6.10±0.08a	5.89±0.12b
	10.0~19.9 g	11.34±1.77a	9.83±0.41a
	≥20.0 g	5.87±0.20b	9.96±0.23a
	总产量	27.29±0.60b	31.68±0.87a
结薯数(个)	<2.0 g	472.33±28.71b	851.33±130.79a
	2.0~4.9 g	653.33±73.90b	1 072.33±214.51a
	5.0~9.9 g	1 013.33±56.76a	784.67±48.84b
	10.0~19.9 g	810.67±12.22a	720.33±12.42b
	≥20.0 g	146.67±4.62b	360.33±14.01a
	总结薯数	3 096.33±44.09b	3 789.00±159.74a

S:传统组织培养;SF:无糖组织培养。同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

响植物的光合作用效率。本研究发现,随着 CO_2 含量的升高,马铃薯组培苗的株高、茎粗、叶片数、SPAD 值、鲜重、茎第 3 节间长度呈先升高后降低的趋势。当 CO_2 含量为 $800 \mu\text{mol/mol}$ 时,马铃薯组培苗的株高、茎粗、SPAD 值、鲜重达到最大值。表明适当提升 CO_2 浓度能够有效促进植物碳同化作用,提高其生长速率。不同作物对 CO_2 含量的响应存在差异,随 CO_2 含量的升高,菊花组培苗株高呈降低的趋势,但其茎粗呈先增高后降低的趋势^[26]。半夏组培苗株高随着 CO_2 浓度的升高呈先升高后降低的趋势,且在 CO_2 含量为 $1\ 500 \mu\text{mol/mol}$ 时,半夏组培苗株高达到最大值^[27]。何长征等^[28]对田间栽培的马铃薯大西洋进行光合特性研究,发现当 CO_2 含量低于 $2\ 000 \mu\text{mol/mol}$ 时,叶片光合速率随着 CO_2 含量的增加而提高,另外,不同品种、植株形态的马铃薯 CO_2 饱和点存在差异。

表 4 马铃薯组培苗农艺性状与马铃薯原种产量构成因素的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between agronomic traits of potato tissue-cultured seedlings and yield components of potato pre-basic seeds

项目	TY	TN	NTP	ITW	NTT	SR	PH	SD	SPAD	FWAP	FWUP	RSR
TY	1.00											
TN	0.93 **	1.00										
NTP	0.93 **	1.00 ***	1.00									
ITW	1.00 ***	0.93 **	0.93 **	1.00								
NTT	0.64	0.87 *	0.87 *	0.64	1.00							
SR	0.93 **	0.83 *	0.83 *	0.93 **	0.51	1.00						
PH	0.97 **	0.89 *	0.89 *	0.97 **	0.62	0.90 *	1.00					
SD	0.60	0.44	0.44	0.60	0.17	0.75	0.67	1.00				
SPAD	-0.24	-0.33	-0.33	-0.24	-0.45	-0.14	-0.34	0.18	1.00			
FWAP	0.97 **	0.96 **	0.96 **	0.97 **	0.71	0.90 *	0.88 *	0.49	-0.16	1.00		
FWUP	0.96 **	0.99 ***	0.99 ***	0.96 **	0.83 *	0.86 *	0.94 **	0.50	-0.38	0.94 **	1.00	
RSR	0.19	0.25	0.25	0.19	0.42	0.06	0.41	0.17	-0.70	0.02	0.34	1.00

TY 为总产量;TN 为结薯总数;NTP 为单株结薯数;ITW 为单薯重量;NTT 为有效薯数量;SR 为成活率;PH 为株高;SD 为茎粗;FWAP 为地上部鲜重;FWUP 为地下部鲜重;RSR 为根冠比。* 表示在 0.05 水平相关性显著;** 表示在 0.01 水平相关性极显著;*** 表示在 0.001 水平相关性极显著。

光照是影响组培苗生长的另一关键因素。传统植物组织培养过程中,马铃薯组培苗生长所需的光照度为 $25.0\sim 37.5\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ^[29-31]。然而,本研究发现,在无糖培养条件下,随着光照度的增加,马铃薯组培苗的株高、茎粗、叶片数量、SPAD 值以及鲜重均显著提高。这一结果表明,适当提高光照度能够显著促进马铃薯组培苗的生长发育, $75\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的光照度能够满足马铃薯组培苗的光合需求,又可避免因光照度过高导致的能量浪费。占艳等^[32]发现,适宜的光照度能够显著提升半夏组培苗的光能利用效率及生长发育。本研究进一步证实,合理调控光照度不仅能显著提升组培苗的生物量,还能避免资源浪费和光损伤,为植物组织培养的光环境优化提供了科学依据。

3.3 有糖与无糖组织培养方式的比较

传统有糖组织培养方式虽然能直接为组培苗提供碳源,但这种培养方式可能导致植株光合能力和代谢能力下降。相比之下,无糖组织培养则迫使组培苗完全依赖光合作用获取能量,从而激发其光合潜力和自主代谢能力,形成更加健壮的植株^[11,33]。本研究发现,无糖组织培养显著提高了马铃薯组培苗株高、茎粗、叶片数、鲜重和 SPAD 值。已有研究结果表明,在无糖条件下,通过优化光照度、CO₂ 浓度等环境因素,能够显著提升植物的光合效率^[34-35]。这可能是由于无糖环境改变了植株的碳代谢途径,促使其更高效地利用外界的 CO₂ 进行光合作用。无糖组织培养的原原种产量、数量和成活率均显著高于传统组织培养,该结果与冯洁等^[15]的研究结果一致。本研究首次系统分析了无糖组织培养技术在马铃薯组培苗生产中的优势,为其他经济作物的无糖组织培养提供了理论依据和技术参考。

4 结论

本研究发现,无糖条件下,马铃薯无糖组织培养的最适条件为 $V_{\text{蛭石}} : V_{\text{营养液}} = 1.0 : 0.8$, CO₂ 含量 $800\ \mu\text{mol}/\text{mol}$, 光照度 $75\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。与传统组织培养相比,无糖组织培养得到的马铃薯原原种的产量、数量和成活率分别显著提高 16.09%、22.37% 和 3.27% ($P < 0.05$)。本研究为马铃薯组培苗的标准化生产和工厂化繁育提供了理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] 肖玉兰,张立力,张光怡,等. 非洲菊无糖组织培养技术的应用研究[J]. 园艺学报,1998(4):97-99.
- [2] KOZAI T, KUBOTA C. Developing a photoautotrophic micropropagation system for woody plants[J]. Journal of Plant Research,2001(114):525-537.
- [3] MOON K B, PARK J S, PARK Y I, et al. Development of systems for the production of plant-derived biopharmaceuticals[J]. Plants,2019,9(1):30.
- [4] 唐云仙. 甘蔗茎尖组织培养过程中褐变与生理生化性状的关系[D]. 南宁:广西大学,2015.
- [5] 徐 芬. 三尖杉组织培养机理及种质保存研究[D]. 福州:福建农林大学,2010.
- [6] 谢莹莹,黄 敏,鲁峻宏,等. ‘红颜’草莓无糖组培生根技术研究及移栽基质筛选[J]. 北方园艺,2024(14):18-26.
- [7] 张 蕊,石 娜,孙玲凌,等. 楸树无糖组织培养快繁技术初探[J]. 江苏农业科学,2022,50(1):45-50.
- [8] 张振臣. 我国甘薯脱毒种薯种苗繁育存在的问题及建议[J]. 植物保护,2020,46(6):4.
- [9] 陈金鹏,张克霞,刘 毅,等. 地黄化学成分和药理作用的研究进展[J]. 中草药,2021,52(6):13.
- [10] 占 艳,王 荔,陈疏影,等. 微环境调控对半夏无糖组培苗光合自养的影响[J]. 云南农业大学学报,2009,24(4):539-544.
- [11] CHEN L L, LU Y, HU Y, et al. RNA-Seq reveals that sucrosefree medium improves the growth of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets cultured *in vitro*[J]. Plant Cell,2020,140:505-521.
- [12] OH M M, SEO J H, PARK J S, et al. Physicochemical properties of mixtures of inorganic supporting materials affect growth of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets cultured photoautotrophically in a nutrient-circulated micropropagation system[J]. Horticulture Environment and Biotechnology,2012,53:497-504.
- [13] SEABROOK J E. Light effects on the growth and morphogenesis of potato (*Solanum tuberosum*) *in vitro*: a review[J]. American Journal of Potato Research,2005,82:353-367.
- [14] SIVAKUMAR P, WANG C, DEBOER D L. High-frequency micropropagation of potato clones using a temporary immersion system[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant,2014,50(2):192-201.
- [15] 冯 洁,曹琳琳,王 越,等. 无糖组织培养技术在马铃薯种苗快繁中的应用[J]. 华中农业大学学报,2019,38(6):62-69.
- [16] 刘 丹,梁瑞萍,李秀华,等. 一种马铃薯脱毒种苗无糖组织培养快繁方法[J]. 中国农学通报,2023,39(22):11-15.
- [17] 陈光彩. LED 光源下香蕉和桉树组培苗的生根培养[D]. 湛江:广东海洋大学,2015.
- [18] 陈相涛,陈芳芳,王 方,等. 蓝莓无糖组培关键技术因素研究[J]. 中国果树,2023(5):50-55.
- [19] KIRDMANEE C, KITAYA Y, KOZAI T. Effects of CO₂ enrichment and supporting material on growth, photosynthesis and water

- potential of *Eucalyptus* shoots/plantlets cultured photoautotrophically *in vitro*[J]. *Environment Control in Biology*, 1995, 33(2): 133-141.
- [20] 肖玉兰,张光怡,杨育华,等. 植物无糖组培微繁殖规模化生产技术[C]//中国园艺学会. 中国园艺学会第九届学术年会论文集. 北京:中国科学技术出版社,2001.
- [21] YAO Y L, TOYOKI K. Commercial application of a photoautotrophic micropropagation system using large vessels with forced ventilation: plantlet growth and production cost[J]. *HortScience*, 2004, 39(6): 1387-1391.
- [22] 王中月,王健,张阿玲,等. 无糖组培条件下猕猴桃茎尖快速生根试验[J]. *西北农业学报*, 2023, 32(11): 1821-1830.
- [23] NISHIOKA M. Cross-correlation between global temperature and atmospheric CO₂ with a temperature-leading time lag[J]. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2024, 14(4): 484-494.
- [24] 郝田,范宁丽,于景金. CO₂浓度升高影响植物生长发育的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(21): 52-56.
- [25] LI D X, LIU H L, QIAO Y Z, et al. Effects of elevated CO₂ on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] under drought stress[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 129: 105-112.
- [26] 宋越冬,马明建. 不同 CO₂浓度对大空间液体培养无糖菊花组培苗生长特性的研究[J]. *北方园艺*, 2009(1): 62-64.
- [27] 和世平,王荔,陈疏影,等. 半夏无糖组培苗营养生长和光合生理对增施 CO₂ 的响应[J]. *云南农业大学学报*, 2009, 24(2): 204-209.
- [28] 何长征,刘明月,宋勇,等. 马铃薯叶片光合特性研究[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2005(5): 60-62.
- [29] 谭体琼,艾勇,鲍菊,等. 马铃薯脱毒组培苗简化培养、低成本扩繁技术研究[J]. *种子*, 2009, 28(1): 85-87.
- [30] 晁祥健,杨煜,金黎平,等. 二倍体马铃薯高效再生体系的建立[J]. *园艺学报*, 2009, 36(1): 109-114.
- [31] 高军,张永成. 几种植物生长调节剂对马铃薯脱毒组培苗生长的影响[J]. *种子*, 2008(5): 77-79.
- [32] 占艳,王荔,陈疏影,等. 微环境调控对半夏无糖组培苗光合自养的影响[J]. *云南农业大学学报*, 2009, 24(4): 539-544.
- [33] KUBOTA C, KAKIZAKI N, KOZAI T, et al. Growth and net photosynthetic rate of tomato plantlets during photoautotrophic and photomixotrophic micropropagation [J]. *HortScience*, 2001, 36(1): 49-52.
- [34] 刘水丽,杨其长. 无糖培养条件下三种大豆组培苗生长差异研究[J]. *大豆科学*, 2007(2): 163-166.
- [35] 吴丽芳,蒋亚莲,张艺萍,等. 花椰菜雄性不育系组培快繁及无糖培养技术[J]. *北方园艺*, 2009(6): 57-58.

(责任编辑:成纾寒)