

不同营养液对甘薯龙薯9号脱毒苗基质培快繁的影响

付国召^{1,2} 杨翠芹¹ 伍凌云³ 段芳^{1,4} 王强¹ 郑顺林¹

(¹四川农业大学农学院, 611130, 四川成都; ²兴隆县农业农村局, 067300, 河北承德;

³宜宾市翠屏区农业农村局, 644000, 四川宜宾; ⁴甘肃亚盛实业(集团)股份有限公司山丹分公司, 734100, 甘肃张掖)

摘要 为确定适宜甘薯脱毒苗快繁的基质培营养液, 以龙薯9号脱毒苗为试验材料, 选用4种营养液并各设2个浓度, 探讨了不同处理对脱毒苗生长的影响。结果表明, 营养液种类和溶液电导率均对脱毒苗的形态和生理产生影响, 以“龙九”处理脱毒苗生长最好且维持根系活力最佳, 尤其龙九2处理的脱毒苗茎蔓长、茎节数、地上部鲜重和干重均优于其他处理。表明龙九2可作为甘薯龙薯9号脱毒苗快繁适宜的培养液。

关键词 甘薯; 脱毒苗; 基质培; 营养液; 快繁

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 属于旋花科甘薯属, 是具有很高食用价值的世界第七大作物, 同时在食品加工和工业生产中发挥着重要作用, 近年来, 市场对甘薯的需求量越来越大^[1-2]。然而, 甘薯在连年种植过程中, 易出现品种退化、品质变劣和产量降低等现象, 严重限制甘薯产业的发展^[3]。利用甘薯脱毒技术能恢复种性, 可有效提高甘薯产量及品质^[4-5]。目前, 生产中快繁甘薯脱毒苗的方式有多种, 但市场上脱毒苗仍供不应求, 其中基质培快繁方式生产效率较高, 所使用的营养液是生产优质脱毒苗的关键。因此, 寻求适宜甘薯脱毒苗快繁的基质培营养液成为研究和生产上关注的重点。王永江等^[6]选用3种常规营养液并配制成不同的浓度, 对商薯19脱毒苗进行处理, 认为1/2Hoaland营养液是适合商薯19脱毒苗静置水培的最佳营养液; 李润根等^[7]以菜用甘薯品种台农71为试验材料, 选用5种常规营养液配方进行水培处理, 认为华南农大A较适宜台农71水培培养。周全卢等^[8]利用改进的MS营养液配制成一种甘薯脱毒苗使用的水培营养液MA, 取得了较好的经济效益^[9-11]。为进一步优化营养液, 避免肥料浪费和节省成本, 本试验前期采用仅富含大量元素与微量元素的MS液体培养基作为培养液, 依据脱毒苗对元素吸收的需求, 研发出新型营养液龙九1。在此基础上, 将大量元素浓度提升至2倍, 得到龙九2, 以下将龙九1与龙九2统

称为龙九。

研究表明, 适当的水肥浓度可促进植物生长、改善苗木品质和增强抗病能力^[12-13], 但浓度过高会产生负面影响^[14-17]。本研究旨在通过开展龙九营养液与其他常规营养液的效果对比试验, 筛选出脱毒苗快繁的最佳营养液。探寻适宜的营养液浓度对于高效生产具有关键意义, 故而针对营养液种类和浓度研究, 能够为优质脱毒苗的生产提供重要的理论支撑, 进而推动甘薯产业化发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年6-8月在四川省成都市四川农业大学农学院(30°42'20" N, 103°51'42" E)温室大棚内进行, 棚内控制温度20~30℃, 空气相对湿度60%~70%, 光强500~1000 μmol/(m²·s)。以龙薯9号甘薯脱毒苗为试验材料, 所用栽培基质为珍珠岩, 营养液配制所需药品均购自成都浩搏优科技有限公司。

1.2 试验方法

基质培营养液种类选用4种: Hoaland营养液、循环水生菜营养液(以下简称循环)、仅含有大量与微量元素的MS液体培养基和龙九新型营养液, 4种营养液分别设2个浓度: 1/2Hoaland、Hoaland、1/2循环、循环、1/2MS、MS、龙九1和龙九2, 共8个处理(表1、2), 每个处理设3次重复, 基

作者简介: 付国召, 主要从事农业技术推广研究, E-mail: 1505567009@qq.com

郑顺林为通信作者, 主要从事薯类栽培与育种研究, E-mail: 248977311@qq.com

基金项目: 四川十四五薯类育种攻关及配套栽培项目(2021YFYZ0005, 2021YFYZ0019); 国家现代农业产业技术体系四川薯类创新团队项目(sccxt-2024-09)

收稿日期: 2024-10-18; 修回日期: 2024-12-05; 网络出版日期: 2025-01-13

质培框作为试验装置,框内放置 4 个花盆,盆内分别装满各处理营养液浸泡充分的珍珠岩,框内倒入各处理营养液,并将黑色地膜覆盖整个塑料框口,模拟根系环境,经过生根处理后的脱毒苗茎段定植于以上各处理的基质培装置中。每个框作为 1 次重复,每个重复 16 株脱毒苗。试验期间每天观察水分蒸发情况并用纯水及时补充至原始体积,将基质培营养液的 pH 控制在 6.0~6.5。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 电导率 (EC) 选取每个装置内 4 个点,使

表 1 各处理大量元素及其含量
Table 1 Macroelements and their contents
in each treatment mg/L

处理 Treatment	N	P	K	Ca	Mg	S
1/2Hoagland	105	16	118	80	24	32
Hoagland	210	31	235	160	49	64
1/2 循环 1/2 circulating	137	31	215	95	12	16
循环 Circulating	273	62	430	190	24	32
1/2MS	420	19	392	60	18	28
MS	840	39	784	120	36	56
龙九 1 Longjiu 1	354	19	351	57	17	24
龙九 2 Longjiu 2	707	39	703	115	34	49

表 2 各处理微量元素及其含量

Table 2 Microelements and their contents in each treatment

处理 Treatment	Fe	Mn	B	Zn	Cu	Mo	Cl
1/2Hoagland	3.000	0.525	0.500	0.050	0.020	0.011	
Hoagland	3.000	0.525	0.500	0.050	0.020	0.011	
1/2 循环 1/2 circulating	3.000	0.370	0.524	0.046	0.026	0.016	
循环 Circulating	3.000	0.370	0.524	0.046	0.026	0.016	
1/2MS	5.584	5.492	1.084	1.956	0.006	0.099	106.000
MS	5.584	5.492	1.084	1.956	0.006	0.099	212.000
龙九 1 Longjiu 1	3.912	3.144	0.441	0.997	0.003	0.075	101.658
龙九 2 Longjiu 2	3.912	3.144	0.441	0.997	0.003	0.075	203.316

用 SG23 电导仪测定电导率,每 7 d 测定 1 次,共测定 8 次。

1.3.2 茎蔓长与茎节数 每个重复内随机选取 4 株具有代表性的植株,利用直尺采用常规方法进行测定,每 15 d 测定 1 次,4 次重复。

1.3.3 叶绿素相对含量 (SPAD 值) 每个重复内选取向阳健康生长的第 4、5 叶位的 5 个成熟叶片,分别在每个叶片的叶基、叶中和叶尖处使用 SPAD-502 叶绿素仪测定 SPAD 值,每 15 d 测定 1 次,3 次重复。

1.3.4 鲜重与干重 基质培第 50 天时采用万分之一电子天平 (奥豪斯/CP114) 测定鲜重与干重。每个重复内选择 4 株代表性植株,将脱毒苗地上部与地下部分分开,称其鲜重,然后放于烘箱 105 °C 杀青 30 min,最后 75 °C 烘干至恒重,称其干重。

1.3.5 根系活力 基质培至第 25 天和 50 天时测定,每个重复内选择 4 株具有代表性的植株,使用 TTC 法^[18]测定根系活力。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行汇总及整理试验数据,使用 DPS 7.05 软件进行统计分析,采用 Duncan 法进行多重比较,利用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下甘薯营养液 EC 值的变化

营养液 EC 值对于无土栽培植物发育及产量有着重要的影响。如表 3 所示,MS 和龙九 2 营养液原始 EC 值分别为 5.513 和 4.963 mS/cm。8 个处理在 6 月 20 日-27 日基质培过程中脱毒苗根系小,吸收营养少,相同时间内营养液的水分蒸发速度高于根系吸收同等水量内营养元素的速度,而导致各处理 EC 值变化小,甚至个别处理出现略有升高的现象;在 7 月 3 日-7 月 18 日,随着脱毒苗根系的不断生长,各处理对营养液中元素不断吸收,EC 值呈明显下降趋势,表明各处理营养液中总离子浓度配制合理,基质培营养液酸碱度、溶氧量和水温等均能有效维持植物细胞内外水分运输平衡及正常生理活动,促进生长快繁,在此期间各处理 EC 值均表现为 MS>龙九 2>1/2MS>循环>龙九 1>Hoaland>1/2 循环>1/2Hoaland;在 7 月 25 日-8 月 9 日基质培过程中 MS 和龙九 2 的 EC 值显著高于其他处理,且除 MS 和龙九 2 外,其他处理均已降低至 0.5 mS/cm 以下,8 月 9 日时 MS 和龙九 2 的 EC 值分别为 1.447 和

表 3 基质培过程中各处理 EC 值变化
Table 3 Changes in EC values during substrate cultivation in various treatments mS/cm

处理 Treatment	EC 值 EC value							
	06-20	06-27	07-03	07-11	07-18	07-25	08-01	08-09
1/2Hoagland	1.107±0.061g	1.050±0.036g	0.701±0.032f	0.434±0.050e	0.165±0.057d	0.072±0.073b	0.091±0.037c	0.076±0.058b
Hoagland	2.097±0.021e	2.120±0.010e	1.510±0.145e	1.069±0.302d	0.582±0.175cd	0.389±0.150b	0.300±0.112c	0.213±0.090b
1/2 循环 1/2 circulating	1.360±0.010f	1.343±0.040f	0.904±0.493f	0.520±0.081e	0.194±0.168d	0.071±0.086b	0.049±0.056c	0.013±0.004b
循环 Circulating	2.590±0.026d	2.573±0.038d	1.893±0.050d	1.411±0.081cd	0.847±0.249c	0.445±0.187b	0.307±0.213c	0.206±0.256b
1/2MS	2.950±0.052c	2.970±0.053c	2.313±0.180c	1.654±0.232c	0.884±0.274c	0.483±0.250b	0.296±0.249c	0.220±0.337b
MS	5.513±0.090a	5.450±0.205a	4.440±0.098a	4.127±0.107a	3.397±0.593a	2.415±0.477a	2.055±0.246a	1.447±0.915a
龙九 1 Longjiu 1	2.550±0.040d	2.513±0.025d	1.719±0.091de	1.224±0.085d	0.656±0.192cd	0.293±0.200b	0.227±0.146c	0.178±0.180b
龙九 2 Longjiu 2	4.963±0.015b	4.990±0.010b	3.931±0.255b	3.693±0.350b	2.780±0.108b	1.947±0.448a	1.531±0.322b	1.120±0.735a

不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。
Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level, the same below.

1.120 mS/cm，对根系活力的维持仍然具有一定的效用。1/2 循环和 1/2Hoagland EC 值分别降至 0.013 和 0.076 mS/cm，已明显无法满足脱毒苗正常生长的需求。

2.2 不同处理对甘薯脱毒苗茎蔓长和茎节数的影响

如表 4 所示，6 月 27 日龙九 1 茎蔓长显著高于其他处理，7 月 11 日龙九 2 处理最高，但与其他处理间差异小，7 月 25 日龙九 2 处理显著高于其他处理，至 8 月 8 日，龙九 2 处理显著高于除 1/2MS 以外的处理，并且比 1/2Hoagland 处理提高

101.37%，比 MS 提高 43.37%，此时各处理茎蔓长依次为龙九 2 > 1/2MS > 龙九 1 > MS > 循环 > 1/2 循环 > Hoagland > 1/2Hoagland；如表 5 所示，6 月 27 日龙九 1 处理的茎节数最多，但与除 1/2MS 以外的其他处理无显著性差异，在 7 月 11 日，龙九 2 处理最高，龙九 1 次之，且二者之间无显著性差异，7 月 25 日龙九 2 处理显著高于其他处理，8 月 8 日龙九 2 处理显著高于除 1/2MS 以外的其他处理，并且比 1/2Hoagland 提高 85.48%，比 MS 提高 27.53%，此时各处理茎节数依次为龙九 2 > 1/2MS > 龙九 1 > MS > 1/2 循环 > 循环 > Hoagland

表 4 不同处理对甘薯脱毒苗茎蔓长的影响
Table 4 Effects of different treatments on stem vine length of sweet potato virus-free seedlings cm

处理 Treatment	茎蔓长 Stem vine length			
	06-27	07-11	07-25	08-08
1/2Hoagland	1.835±0.363b	23.083±1.797ab	44.792±11.114c	52.746±4.321c
Hoagland	1.983±1.033b	22.475±8.536ab	49.492±11.297bc	55.538±9.337c
1/2 循环 1/2 circulating	2.067±1.023b	24.225±2.722ab	49.083±4.836bc	60.012±3.963c
循环 Circulating	2.367±0.354b	24.583±6.705ab	57.875±0.388bc	60.875±5.850c
1/2MS	1.543±0.337b	28.233±6.357ab	63.617±11.346bc	90.571±4.396a
MS	1.792±0.354b	20.100±5.988b	55.117±9.537bc	74.083±0.117b
龙九 1 Longjiu 1	4.430±0.643a	31.567±5.761ab	66.038±0.887b	80.450±2.650b
龙九 2 Longjiu 2	2.802±1.334b	33.125±6.752a	85.308±17.165a	106.213±15.513a

表 5 不同处理对甘薯脱毒苗茎节数的影响
Table 5 Effects of different treatments on stem node number of sweet potato virus-free seedlings

处理 Treatment	茎节数 Stem node number			
	06-27	07-11	07-25	08-08
1/2Hoagland	1.333±0.144ab	6.583±2.155c	11.917±1.876c	15.815±3.467e
Hoagland	1.500±0.500ab	8.583±2.323abc	15.583±3.556bc	18.500±2.750de
1/2 循环 1/2 circulating	1.417±0.382ab	8.667±1.528abc	17.500±1.392bc	21.500±0.500cd
循环 Circulating	1.667±0.289ab	9.417±1.774abc	17.583±0.520bc	20.458±0.208cd
1/2MS	1.167±0.144b	9.583±2.402abc	19.333±0.804b	27.458±3.208ab
MS	1.250±0.250ab	7.333±2.036bc	17.500±0.661bc	23.000±3.000c
龙九 1 Longjiu 1	2.193±0.992a	10.917±2.504ab	19.000±0.750b	23.958±0.292bc
龙九 2 Longjiu 2	1.943±0.602ab	11.500±0.250a	27.417±1.308a	29.333±1.667a

> 1/2Hoagland。

2.3 不同处理对甘薯脱毒苗鲜重和干重的影响

如表 6 所示, 龙九 2 与 MS 处理下脱毒苗地上鲜重显著高于其他处理, 龙九 2 比 1/2Hoagland 处理提高 158.82%, 比 MS 提高 4.21%; 龙九 2 处理地上干重最高, 显著高于 1/2Hoagland、Hoagland、1/2 循环、循环与 MS 处理, 1/2Hoagland 地上干重

最低, 龙九 2 比 1/2Hoagland 处理提高 56.24%, 比 MS 处理提高 9.60%; 在地下鲜重和干重指标中, 1/2Hoagland 处理显著高于其他处理, 分别比龙九 2 提高 31.29% 和 100.32%。并且 1/2Hoagland、Hoagland、1/2 循环和循环处理均有薯块产生 (图 1)。各处理地上部分干、鲜重在同种营养液中基本表现为高剂量浓度大于低剂量浓度, 且地上干、

表 6 培养 50 d 后不同处理对甘薯脱毒苗鲜重与干重的影响
Table 6 Effects of different treatments on fresh and dry weights of sweet potato virus-free seedlings after 50 days of cultivation

处理 Treatment	地上鲜重 Aboveground fresh weight	地上干重 Aboveground dry weight	地下鲜重 Underground fresh weight	地下干重 Underground dry weight
1/2Hoagland	19.553±0.391e	2.798±0.053d	8.303±0.402a	0.804±0.054a
Hoagland	26.684±1.194d	3.170±0.028c	6.789±0.389bc	0.546±0.037b
1/2 循环 1/2 circulating	28.070±0.803d	3.276±0.126c	7.197±0.163b	0.485±0.031bc
循环 Circulating	35.546±2.418c	3.500±0.135c	6.235±0.565c	0.396±0.055d
1/2MS	42.898±3.142b	4.273±0.239ab	6.938±0.512bc	0.462±0.016cd
MS	48.563±3.758a	3.989±0.213b	6.708±0.436bc	0.392±0.052d
龙九 1 Longjiu 1	39.454±2.440bc	4.088±0.153ab	6.998±0.593bc	0.481±0.027bc
龙九 2 Longjiu 2	50.607±2.972a	4.372±0.165a	6.324±0.370c	0.401±0.014d



图 1 基质培 50 d 后部分脱毒苗根系膨大

Fig.1 Root expansion in some virus-free seedlings after 50 days of substrate cultivation

鲜重与地下干、鲜重基本呈负相关。

2.4 不同处理对甘薯脱毒苗 SPAD 值的影响

测定脱毒苗叶片 SPAD 值可作为调节营养液中 N 元素的参考依据, 由表 7 所示, 不同处理对脱毒苗 SPAD 值的影响开始差异较小, 越到培养后期差异变大, 表现为浓度低的 SPAD 值变大。在基质培 15 d 时, 龙九 2 处理的脱毒苗 SPAD 值为 38.443, 显著高于除龙九 1 以外的其他处理; 基质培 30 d 时, 1/2Hoagland 和 1/2 循环处理的脱毒苗 SPAD 值分别为 41.577 和 41.967, 显著高于其他处理, 分别比 MS 处理高 9.90% 和 10.93%, 其次为龙九 2 和龙九 1; 基质培 45 d 时, 1/2Hoagland 处理的 SPAD 值为 47.693, 显著高于其他处理, 比最小值循环高 9.31%, 其次为 Hoagland、1/2 循环和龙九 1。

2.5 不同处理对甘薯脱毒苗根系活力的影响

如表 8 所示, 在不同时期各基质培营养液处理

表 7 不同处理对甘薯脱毒苗 SPAD 值的影响
Table 7 Effects of different treatments on SPAD values of sweetpotato virus-free seedlings

处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value		
	15 d	30 d	45 d
1/2Hoagland	37.310±0.215bc	41.577±0.301a	47.693±0.269a
Hoagland	36.597±0.379cd	40.133±0.636c	46.227±0.600b
1/2 循环 1/2 circulating	37.063±0.231c	41.967±0.276a	46.180±0.564b
循环 Circulating	37.247±0.504bc	39.253±0.240d	43.630±0.295c
1/2MS	35.490±0.726e	38.053±0.400e	44.427±0.244c
MS	35.967±0.563de	37.833±0.322e	43.730±0.361c
龙九 1 Longjiu 1	37.967±0.222ab	40.420±0.215bc	45.977±0.240b
龙九 2 Longjiu 2	38.443±0.280a	40.867±0.451b	44.110±1.269c

对根系活力有不同的影响。基质培 25 d 时, 1/2Hoagland 和龙九 2 根系活力最高, 显著高于 Hoagland 和 MS, 但各处理间的差异不明显; 基质培 50 d 时各处理根系活力排序为 1/2MS > 龙九 1 >

龙九 2 > 循环 > MS > Hoagland > 1/2Hoagland > 1/2 循环，并且越到后期龙九对延缓根系衰老的效果越好，而总离子浓度较低的处理尤其 1/2Hoagland 和 1/2 循环则维持根系活力效果相对较差，分别比 25 d 下降 89.50% 和 86.45%，这也印证了 2.1 中的分析结果。

表 8 不同处理对甘薯脱毒苗根系活力的影响
Table 8 Effects of different treatments on root activity of sweet potato virus-free seedlings

处理 Treatment	根系活力 Root activity [$\mu\text{gTPF}/(\text{g FW}\cdot\text{h})$]	
	25 d	50 d
1/2Hoagland	28 608.814±7764.674a	3002.986±469.569c
Hoagland	14 249.312±5964.362b	3600.224±503.919c
1/2 循环 1/2 circulating	20 654.270±5916.756ab	2797.686±708.974c
循环 Circulating	22 617.078±6346.653ab	6549.085±427.639b
1/2MS	17 796.143±2480.056ab	13 473.312±2421.464a
MS	13 947.657±3707.674b	3954.834±614.202c
龙九 1 Longjiu 1	21 170.799±6624.739ab	12 390.817±1981.165a
龙九 2 Longjiu 2	28 298.898±5701.818a	8004.853±1056.931b

3 讨论

基质培快繁营养液作为植物根系吸收营养物质的主要来源，不同营养液中各营养元素含量的配比对于植物生长至关重要^[19-20]。李平芳等^[21]研究了不同 N、P、K 配比对甘薯产量和商品率的影响，结果得出 N (0.8~1) : P (0.8~1) : K (2) 时最优。柳洪鹃等^[22]在研究中发现，甘薯北京 553 完成生长周期同样需要合理的元素含量配比，其中所需要的大量元素中 N、K 和 Ca 最多，所需微量元素中 Fe 最多。本研究表明，在脱毒苗茎蔓长、茎节数和地上鲜重与干重等指标均是龙九 2 处理优于其他处理，其原因可能为龙九 2 养分配比是根据脱毒苗生长过程中对各营养元素的吸收情况合理配制的，各营养元素间配比均衡，富含植物生长所必需的大量元素和微量元素，且新型营养液龙九 2 中大量元素 N、K 和 Ca 离子浓度最多，微量元素中的 Fe 含量相对较高，新型营养液龙九 2 的养分配比与柳洪鹃等^[22]研究结果类似。

作物基质培营养液除了各元素配比对植物生长至关重要外，营养液 EC 值对作物生长发育同样具有重大影响，其可反映溶液的总离子浓度剂量大小。无土栽培管理中经常会根据 EC 值的大小确定营养液剂量，相反也可以根据剂量来计算得到 EC 值^[23]。许多学者^[24-25]曾对基质培营养液 EC 值与作

物生长发育做过相关研究。

本试验中发现溶液原始 EC 值大约在 0~5 mS/cm 范围内脱毒苗生长量与溶液 EC 值呈正相关，其中龙九 2 处理原始 EC 值为 4.963 mS/cm，在脱毒苗基质培适宜的离子浓度范围内，符合脱毒苗正常生长需求，MS 处理原始 EC 值为 5.513 mS/cm，EC 值过高，李嘉炜等^[26]研究了可溶性盐浓度对南瓜幼苗生长的影响，表明 EC 值过高，会形成反渗透压，造成根系失水，进而降低南瓜对养分的吸收和分配，使得生长速度变慢。本研究中 MS 处理的脱毒苗生长同样受到一定程度的影响。因此，在作物无土栽培过程中，营养液 EC 值应根据作物需求规律和目的，适当调节营养液 EC 值，促进作物生长的同时避免养料浪费。周庐萍等^[27]研究还发现，高营养液 EC 值在一定条件下能够促进菊花对水分和营养元素的吸收，利于菊花健康生长，并且前人^[26,28]研究还发现即使轻微过量的养分供应也可提高作物幼苗光能利用效率，促进作物生长。本试验中发现虽然 MS 处理 EC 值略高于适宜 EC 值范围，但对脱毒苗的生长依旧优于 1/2 循环、循环、Hoagland 及 1/2Hoagland 处理，当然，这也可能是因为 MS 处理相对于其他处理含有更多的 N 元素，更利于脱毒苗地上部营养生长的原因所致。

另外，研究^[29]表明 N 元素过多会与 K、P、Ca 和 Mg 元素产生拮抗作用，而这些元素对甘薯膨大具有重要支持作用，所以这可能就是虽然在龙九 2 和 MS 处理中这些元素足够多，但对脱毒苗根系膨大无明显作用的原因。且通过分析发现，各处理地上与地下部分的生长呈明显的负相关性，这是由于植物地上与地下部分的生长存在相互协调和制约的关系，这种关系通常受植物对营养、水分等需求的影响，李炎等^[30]研究得出，当冬小麦受到水分、营养及水分和营养双重胁迫时，根冠比会增加。同理，在本研究中发现 EC 值高，营养元素含量较多的处理中（龙九 1、龙九 2、1/2MS 和 MS 处理）N 元素含量较多，大量光合产物用于蛋白质的合成，地上营养生长过旺，碳代谢失调，从而削弱了同化物向地下的转运，甘薯贮藏根膨大受到影响，根冠比减小，这同样也是对根系膨大无明显作用的原因，生产中可通过水肥管理和化学调控达到丰产目的。

本研究中还发现 EC 值低的治疗不利于地上部分的生长，但促进了地下部分生长量的增加，同时

还发现 EC 值较低的 1/2Hoagland 和 1/2 循环处理下的脱毒苗基质培后期 SPAD 值较高,根系活力较低。原因可能是由于无土栽培植物相对于土培植物生长周期较短^[31-32],尤其 EC 值较低的 1/2Hoagland 和 1/2 循环处理的脱毒苗会最先出现养分缺乏而导致生长周期缩短^[33-34],使结薯期提前,SPAD 值上升,说明叶片对 N 素吸收率提高,叶片中的有效 N 对叶绿素的合成有重要作用。叶绿素是光合色素的主要组成成分,在光合作用中能够吸收光能,将 CO₂ 和水转化为有机物质,产生更多的干物质^[35],进而促进结薯性能的提高,这与前人^[36]的研究结果类似,当然,结薯性能提高也与 EC 值较低的营养液中溶氧量较高有关,这促使根系膨大,进而导致根系活力下降^[37-39],这就解释了 EC 值较低的营养液对脱毒苗地下部分生长量的增多效果较好及基质培后期 SPAD 值较高及根系活力较低的原因,所以在配制营养液时应严格控制 EC 值。

根系活力影响植物对矿质元素的吸收能力,反映脱毒苗质量的好坏,好的培养液能够更持久地维持根系活力,本研究中发现各处理对根系活力的影响越到后期越显著,是因为在前期各处理溶液中的各种养分比较全面,均能够满足脱毒苗需求,根系活力差异较小,而到了 50 d 时,某些营养液处理中的一些养分不足,已不能满足脱毒苗正常生长需求。

大量元素中 N、P 和 K 对根系活力影响更大^[40-41],除 1/2MS 和 MS 处理以外,龙九中 N、P 和 K 含量与其他处理相比相对较多,N、P 和 K 含量相对较少的处理尤其 1/2Hoagland 和 1/2 循环基质培后期更容易缺乏营养,出现营养胁迫而导致根系活力下降较大。另外,龙九中微量元素除 B 和 Cu 以外,Mn、Mo、Fe、Zn 和 Cl 的含量也相对较多(除 1/2MS 和 MS 以外),这些微量元素对根系活力同样具有重要影响,例如 Mn 可参与植物光合和酶促反应,促进根细胞的呼吸及养分吸收;Mo 是固氮酶的重要部分,参与 N 的固定和转化;Fe 参与植物光合和呼吸等代谢过程,缺 Fe 会导致植株生长发育异常,进而影响根系发育和活力;Zn 对生长素的合成有着重要作用,促进根尖部分发育;Cl 可维持根系细胞的渗透压和离子平衡,缺 Cl 会导致根系功能异常^[42-43]。这也就证明了龙九相对于其他处理根系活力的维持效果较好并再一次解释说明了 EC 值较低的营养液后期根系活力较低

的原因。

然而,本研究中 1/2MS、MS 及龙九溶液配方中含有 Cl 元素,这是因为配方中的 Ca 源于化学药品 CaCl₂,导致溶液中含有 Cl 元素,相关研究^[41]已证明薯类作物为忌氯作物,Cl 元素会影响薯类作物块根或者块茎中的淀粉等糖含量,影响口感,但本研究目的为快繁,发现 Cl 元素未对脱毒苗生长产生不利影响,正如戚冰洁等^[44]通过研究发现,短期内低浓度外源氯对甘薯幼苗生长及养分吸收具有积极作用,并且相同纯度的含 Ca 化学药品中 CaCl₂ 价格较低,可有效减少成本。

4 结论

新型营养液龙九 2 对甘薯脱毒苗快繁效率高,薯苗质量好,适宜甘薯脱毒苗基质培快繁生产,且相较于 MS 配方可降低肥料成本,可为甘薯脱毒苗专用营养液的研究提供参考;EC 值较低的营养液(1/2Hoagland 和 1/2 循环)有利于脱毒苗地下干物质积累,促进根系膨大。

参考文献

- [1] Suparno A, Prabawardani S, Pattikawa A. The nutritional value of sweet potato tubers [*Ipomoea batatas* (L.) Lamb.] consumed by infants and children of Dani Tribe in Kurulu District, Baliem-Jayawijaya. *Journal of Agricultural Science*, 2016, 8(3): 64.
- [2] Kurniasari F N, Susetyowati S, Hardianti M S, et al. Nutritional value and physical quality of oral nutritional supplements made from purple sweet potatoes to treat malnutrition in patients with cancer. *Current Nutrition & Food Science*, 2023, 20(2): 262-270.
- [3] Amparo R, Iván P, Remberto M, et al. Nutritional value and consumer perception of biofortified sweet potato varieties. *Annals of Agricultural Sciences*, 2022, 67(1): 79-89.
- [4] Kiem F W, Salamon P, Jewehan A, et al. Detection and elimination of viruses infecting sweet potatoes in Hungary. *Plant Pathology*, 2022, 71(4): 1001-1009.
- [5] Kano Y, Nagata R. Comparison of the rooting ability of virus infected and virus-free cuttings of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* Poir.) and an anatomical comparison of the roots. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2015, 74(6): 785-790.
- [6] 王永江,王爽,乔奇,等.商薯 19 静置水培营养液的筛选与内源激素分析. *中国农学通报*, 2022, 38(32): 99-105.
- [7] 李润根,卢其能,刘佳丽.台农 71 菜用甘薯水培营养液配方筛选. *浙江农业科学*, 2019, 60(11): 2060-2062, 2065.
- [8] 周全卢,李育明,何素兰,等.脱毒甘薯水培快速繁育方法. *江苏师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(4): 31-32.
- [9] 张希太.无机基质加简化的 MS 营养液快繁甘薯脱毒苗. *河南职业技术师范学院学报*, 2002(3): 24-25.
- [10] Chen L Z, Xu C, Du Z S, et al. Establishment of an efficient and practical virus-free seedling supply system by means of culture of shoot apices, RT-PCR and clonal propagation in sweet potato (*Ipomoea batatas*). *British Biotechnology Journal*, 2014, 4(1): 51-63.
- [11] 沈升法,吴列洪,项超,等.甘薯脱毒微型薯育苗技术研究. *江苏农业科学*, 2020, 48(5): 97-100.

- [12] 曾燕楠, 赵韩伟, 纪洪亭, 等. 不同施肥水平下叶面对菜用甘薯生长的影响. 浙江农业科学, 2024, 65(1): 108-112.
- [13] 赵雄伟, 宫彬彬, 徐昱松, 等. 基于主成分分析的腐殖酸添加浓度对番茄幼苗生长效果研究. 河北农业大学学报, 2021, 44(2): 41-47.
- [14] 于宏, 郭丽娟, 李海峰, 等. 不同肥水 EC 值对观赏竹芋生长发育的影响. 安徽农业科学, 2021, 49(17): 155-157, 185.
- [15] 刘红梅, 梁妙妍. 不同浓度配方肥对温室盆栽绿萝生长的影响. 黑龙江农业科学, 2021(4): 33-36.
- [16] 徐昱松, 宫彬彬, 吴晓蕾, 等. 育苗基质喷施海藻肥对番茄幼苗生长的影响. 河北农业大学学报, 2022, 45(4): 32-36.
- [17] 张晓虹, 杨延杰. 不同浓度海藻生根剂对黄瓜幼苗生长及根系形态的影响. 北方园艺, 2015(17): 11-14.
- [18] 蔡庆生. 植物生理学实验. 北京: 中国农业大学出版社, 2012.
- [19] 谢紫娉, 罗扬帆, 贾国凯, 等. 四种营养液配方对水培紫薯叶的影响. 湖南科技学院学报, 2017, 38(10): 54-56.
- [20] 丁旭, 李树和, 郭小鸥, 等. 不同营养液配方对莴苣生长的影响. 天津农业科学, 2024, 30(4): 7-11.
- [21] 李平芳, 王红梅, 张艳丽, 等. 不同密度、氮磷钾配比对甘薯产量和商品率的影响. 中国农学通报, 2021, 37(33): 41-49.
- [22] 柳洪鹏, 张立明, 史春余, 等. 甘薯矿质元素吸收与分配特性研究. 中国土壤与肥料, 2011(2): 71-75.
- [23] 张冬梅, 高娃, 张东旭, 等. 土壤水溶性全盐含量 S 与电导率 EC5:1 之间的关系. 长江蔬菜, 2017(20): 92-94.
- [24] 阳攀, 姜永强, 文雅, 等. 不同营养液 EC 值对叶用莴苣生长及营养品质的影响. 青海大学学报, 2024, 42(1): 57-62.
- [25] 王玮玮, 汪国莲, 孙玉东, 等. 不同电导率(EC)肥水对牛角、羊角型辣椒基质盆栽的影响. 农业工程技术, 2018, 38(7): 56-58, 65.
- [26] 李嘉炜, 陈潇, 常静静, 等. 可溶性盐浓度影响南瓜幼苗生长和荧光响应特性. 中国农学通报, 2022, 38(18): 70-78.
- [27] 周庐萍, 崔永一. 光照强度和营养液电导率对微型水培菊花苗生长的影响. 浙江林学院学报, 2010, 27(4): 554-558.
- [28] 倪纪恒, 毛罕平. 不同营养液电导率对温室黄瓜光合速率及产量和品质的影响. 北方园艺, 2013(21): 53-55.
- [29] 宋炜涵, 后猛, 张允刚, 等. 甘薯块根膨大机制研究进展. 分子植物育种, 2024, 22(20): 6796-6804.
- [30] 李炎, 王丹, 王仰仁. 水分养分胁迫对冬小麦器官生长相关性影响研究. 节水灌溉, 2021(8): 56-61.
- [31] 文俊丽, 陈琴, 郭元元, 等. 栽培方式对空心菜生长和品质的影响. 中国农学通报, 2025, 41(18): 65-74.
- [32] 杨新琴, 何润云, 徐媛媛, 等. LED 植物工厂数字化育苗方式对黄瓜生长的影响. 浙江农业科学, 2021, 62(5): 866-867, 870.
- [33] Chen H Y, Cheng Q, Chen Q L, et al. Effects of selenium on growth and selenium content distribution of virus-free sweet potato seedlings in water culture. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 965649.
- [34] 甘银波. 植物响应逆境的激素调控机理. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [35] 张钧恒, 马乐乐, 李建明. 全有机营养肥水耦合对番茄品质、产量及水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2788-2798.
- [36] 任凤玲, 张旭博, 孙楠, 等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析. 中国农业科学, 2018, 51(1): 119-128.
- [37] 余韩开宗. 薯蔓特性与施肥对甘薯块根形成的影响. 重庆: 西南大学, 2011.
- [38] 杨国才, 滕艳, 陈香颖, 等. 基施氮肥用量对甘薯生长及产量的影响. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 53-59.
- [39] 孙泽强, 董晓霞, 王学君, 等. 施氮量对多用品甘薯济薯 21 产量和养分吸收的影响. 山东农业科学, 2013, 45(11): 70-73.
- [40] 谭勇, 梁宗锁, 王渭玲, 等. 氮、磷、钾营养胁迫对黄芪幼苗根系活力及根系导水率的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 69-72.
- [41] Sulistiono W, Brahmantiy B, Hartanto S, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and NPK fertilizer on roots growth and nitrate reductase activity of coconut. *Journal of Agronomy*, 2019, 19(1): 46-53.
- [42] Hoekstra N J, Finn J A, Buchmann N, et al. Methodological tests of the use of trace elements as tracers to assess root activity. *Plant and Soil*, 2014, 380(1/2): 265-283.
- [43] 李卫宁, 郗国宏, 李超, 等. 微量元素铁对芦荟根系活力及活性物质含量的影响. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10619-10621.
- [44] 戚冰洁, 曹月阳, 张珮琪, 等. 外源氯对甘薯幼苗生长及养分吸收的影响. 江苏农业学报, 2014, 30(1): 80-86.

Effects of Different Nutrient Solutions on Rapid Propagation of Virus-Free Sweet Potato Longshu No.9 in Substrate Culture

Fu Guozhao^{1,2}, Yang Cuiqin¹, Wu Lingyun³, Duan Fang^{1,4}, Wang Qiang¹, Zheng Shunlin¹

⁽¹⁾College of Agriculture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China;

⁽²⁾Agriculture and Rural Bureau of Xinglong County, Chengde 067300, Hebei, China;

⁽³⁾Agriculture and Rural Bureau of Cuiping District, Yibin 644000, Sichuan, China;

⁽⁴⁾Gansu Yasheng Industry (Group) Co., Ltd., Shandan Branch, Zhangye 734100, Gansu, China)

Abstract To determine a suitable nutrient solution for rapid propagation of virus-free sweet potato seedlings, four nutrient solutions at two concentrations each were tested using virus-free seedlings of Longshu No.9 in substrate culture to explore the effects of different treatments on the growth of virus-free seedlings. The results showed that both nutrient solution type and electrical conductivity significantly affected morphology and physiology of the virus-free seedling. The Longjiu treatments showed the best growth performance and root vitality, particularly Longjiu 2 resulted in superior stem vine length, stem node number, and aboveground fresh and dry weights compared with other treatments. These results indicated that Longjiu 2 was a suitable nutrient solution for rapid propagation of virus-free Longshu No.9 sweet potato seedlings.

Key words Sweet potato; Virus-free seedling; Substrate culture; Nutrient solution; Rapid propagation