

甘薯不同等级脱毒苗的光合特性、产量和品质比较研究

袁蕊, 王洁, 戴习彬, 孙书军, 赵冬兰, 周志林, 曹清河

(江苏徐淮地区徐州农业科学研究所, 徐州 221131)

摘要: 由脱毒组培驯化苗或原原种苗直接繁育大田种苗的甘薯脱毒苗生产技术已成为一种新的推广应用技术。为探明不同品种甘薯组培驯化苗和原原种苗的大田长势、产量和品质的差异, 本研究以 12 个品种甘薯: 红瑶、鸣门金时、高系 14、胜利百号、玛莎莉、烟薯 25、普薯 32、济薯 26、商薯 19、金海美秀、蓉粉一号、宁紫薯 4 号的组培驯化苗和原原种苗为试验材料, 通过光合指标等数据的测定, 并对其进行方差分析、主成分分析和相关性分析, 比较光合特性、产量和品质差异。结果表明: (1) 光合特性方面, 鸣门金时、胜利百号、宁紫薯 4 号和普薯 32 组培驯化苗的光合作用和光合色素含量均高于原原种苗, 而商薯 19 组培驯化苗低于原原种苗。(2) 鲜薯产量方面, 鸣门金时、胜利百号和宁紫薯 4 号组培驯化苗的产量比原原种苗分别高 30.95%、21.90% 和 14.67%, 但商薯 19 的组培驯化苗的产量比原原种苗低 10.42%。(3) 鲜薯品质方面, 宁紫薯 4 号、红瑶、玛莎莉和普薯 32 组培驯化苗的鲜薯品质 (粗淀粉、可溶糖、粗蛋白) 低于原原种苗; 金海美秀组培驯化苗的粗淀粉含量高于原原种苗, 但还原糖含量和可溶糖含量低于原原种苗; 品种鸣门金时组培驯化苗的干物率高于原原种苗。(4) 不同等级脱毒苗的光合、产量和品质相关性分析结果表明, 组培驯化苗中只有水分利用率与干物率呈显著性负相关, 原原种苗中净光合速率、水分利用率、羧化效率等参数对鲜薯品质都有显著性影响。本研究可为不同的甘薯品种的组培驯化苗和原原种苗的高效利用提供理论依据。

关键词: 甘薯; 组培驯化苗; 原原种苗; 光合作用; 产量; 品质

Photosynthesis, Yield and Quality of Different Gradation Virus-free Seedlings of Sweet Potato Varieties

YUAN Rui, WANG Jie, DAI Xibing, SUN Shujun, ZHAO Donglan, ZHOU Zhilin, CAO Qinghe

(Xuzhou Institute of Agricultural Sciences of the Xuhuai District, Xuzhou 221131)

Abstract: The production technology of sweet potato virus-free seedlings by directly breeding field seedlings from virus-free tissue culture seedlings or minituber seedlings has become a new promotion and application technology. In order to investigate the differences between tissue culture seedlings and minituber seedlings of different sweetpotato varieties on field growth, yield and quality, 12 sweetpotato varieties of tissue culture seedling and minituber seedlings were used as experimental materials. The results show that: (1) Photosynthetic characteristics, Mingmenjinshi, Shenglibaihao, Ningzishu 4 and Pushu 32 tissue culture seedlings of

¹ 收稿日期: 2024-10-31 网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为甘薯种质资源, E-mail: 278081483@qq.com

通信作者: 周志林, 研究方向为甘薯种质资源, E-mail: zhouzhilinting@163.com

曹清河, 研究方向为甘薯种质资源, E-mail: caoqinghe@jaas.ac.cn

基金项目: 国家甘薯产业技术体系 (CARS-10-GW); 江苏省重点研发计划 (BE2021384); 国家作物种质资源库 (NCGRC-2024-43)

Foundation projects: China Agriculture Research System-Sweetpotato (CARS-10-GW); Key Research and Development Program of Jiangsu Province (BE2021384); National crop germplasm resource centre (NCGRC-2024-43)

photosynthetic activity and pigment content were higher than minituber seedling, while Shangshu 19 tissue culture seedlings were lower than minituber seedlings. (2) Fresh potato yield, Mingmenjinshi, Shenglibaihao and Ningzishu 4 tissue culture seedlings was respectively higher than minituber seedlings by 30.95%, 21.90% and 14.67%, but Shangshu 19 tissue culture seedlings was lower than minituber seedlings by 10.42%. (3) Fresh potato quality, Ningzishu 4, Hongyao, Mashali and Pushu 32 tissue culture seedlings of fresh potato (crude starch, soluble sugar, crude protein) were lower than minituber seedlings. Jinhaimeixiu tissue culture seedlings of crude starch was higher than minituber seedlings, but tissue culture seedlings of reducing sugar and soluble sugar were lower than minituber seedlings. Mingmenjinshi tissue culture seedlings of dry matter rate were higher than minituber seedlings. (4) The correlation analysis results of photosynthesis, yield and quality of virus-free seedlings of sweetpotato varieties showed that, only the water utilization rate and dry matter rate were negatively correlated of tissue culture seedlings, while the net photosynthetic rate, water utilization rate, carboxylation efficiency had significant effects on the fresh potato quality of minituber seedlings. This study can provide a theoretical basis for the efficient utilization of tissue culture seedlings and minituber seedlings of different sweet potato varieties.

Key words: sweetpotato; tissue culture seedling ; minituber seedling; photosynthesis; yield; quality

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.], 是世界第七大粮食作物^[1]。中国是世界上最大的甘薯生产国, 甘薯具有高产稳产、耐热抗旱、适应性强及营养均衡等特点, 在我国的农业生产中占有重要地位, 也是推进精准扶贫的优势作物之一^[2-3]。

甘薯属于块根作物, 因其无性繁殖在栽培过程中易感染病毒, 病毒在植株体内积累易造成品种退化, 导致产量和品质严重下降^[4]。利用病毒在植物体内分布不均匀、茎尖分生组织不带毒或带毒少的原理, 采用甘薯茎尖分生组织培养脱毒薯苗, 经脱毒后的甘薯能恢复其品种原始的优良性状^[5-6]。国内外迄今尚未选育出高抗病毒病的实用甘薯品种, 也无防治甘薯病毒病的特效农药, 所以推广应用脱毒甘薯苗是目前防治甘薯病毒病、提高甘薯产量和品质的最有效方法^[7]。在脱毒甘薯繁育推广应用中, 通常分为四个级别: 甘薯脱毒试管苗、原原种、原种和生产种。脱毒试管苗, 即甘薯茎尖组织培养获得的试管苗, 经病毒检测后, 确定不带甘薯特定病毒的茎尖试管苗及其微繁苗。原原种, 指用脱毒试管苗在防蚜温室或网室内生产的薯块, 由原原种育苗长出的芽苗称为原原种苗。原种是用原原种苗(或脱毒试管苗)在一定空间隔离条件下生产的薯块, 由原种育苗长出的芽苗称为原种苗。生产种, 用原种苗在常规大田条件下生产的薯块, 由生产种育苗长出的芽苗称为生产种苗^[8]。由此可见, 脱毒试管苗是最基础的材料, 原原种是由繁苗阶段转入繁薯阶段的重要环节; 试管苗和原原种苗质量的好坏, 直接影响生产用甘薯脱毒种薯的质量^[9-10]。此外, 从脱毒组培苗到生产用大田苗, 种薯生产周期长, 种苗繁育环节多; 加大了良种繁育过程中感染病毒病的风险, 也容易出现管理失误和漏洞, 阻碍整个甘薯良种繁育进程^[11]。脱毒组培驯化苗和原原种苗不经历或经历一次种薯生产环节, 繁育周期大大缩短, 降低了种苗感染病毒病的风险, 从而保证种苗质量。

目前, 由脱毒组培驯化苗或原原种苗直接繁大田种苗的这种脱毒甘薯繁育技术已成为一种新的推广应

用技术，但不同品种甘薯的脱毒组培驯化苗和原原种苗的大田长势、产量、品质等方面比较研究鲜见报道。本试验以 12 个品种甘薯（红瑶、鸣门金时、高系 14、胜利百号、玛莎莉、烟薯 25、普薯 32、济薯 26、商薯 19、金海美秀、蓉粉一号、宁紫薯 4 号）为研究材料，对其组培驯化苗和原原种苗的光合参数、光合色素含量、鲜薯产量和鲜薯品质进行比较，通过方差分析、主成分分析和相关性分析，综合探明不同等级脱毒苗和不同品种甘薯光合特性、产量和品质之间的差异，为不同品种甘薯的组培驯化苗和原原种苗的高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参与试验的甘薯品种：红瑶、鸣门金时、高系 14、胜利百号、玛莎莉、烟薯 25、普薯 32、济薯 26、商薯 19、金海美秀、蓉粉一号、宁紫薯 4 号，这 12 个品种的茎尖脱毒组培驯化苗（将组培苗从组培瓶中驯化移栽至育苗盘，再经过一段时间的扩繁育苗）和原原种苗（脱毒组培苗在防虫网温室中直接生产的种薯，然后再进行育苗生产的种苗）均由莱州市金海种业有限公司提供。试验材料于 2023 年 6 月初种植在江苏徐淮地区徐州农业科学研究所院内基地(34° 16'N, 117° 17'E)，2023 年 10 月中旬收获。

1.2 试验方法

1.2.1 田间种植 试验设置 12 个品种甘薯的组培驯化苗、原原种苗 2 个等级脱毒苗（表 1），每个品种每个等级设置 3 个重复，栽插行距 80 cm，株距 25 cm，栽插时足水、足肥，返苗后及时中耕除草，防治病虫害；其他管理措施同甘薯田间常规管理^[10]。

表 1 试验品种及种苗等级

Table 1 Test varieties and seedling gradation

种苗名称	种苗等级	种苗标注
Seedling variety	Seedling gradation	Seedling label
红瑶	组培驯化苗	红瑶 X
Hongyao	原原种苗	红瑶 Y
鸣门金时	组培驯化苗	鸣门金时 X
Mingmenjinshi	原原种苗	鸣门金时 Y
高系 14	组培驯化苗	高系 14 X
Gaoxi 14	原原种苗	高系 14 Y
胜利百号	组培驯化苗	胜利百号 X
Shenglibaihao	原原种苗	胜利百号 Y
玛莎莉	组培驯化苗	玛莎莉 X
Mashali	原原种苗	玛莎莉 Y
烟薯 25	组培驯化苗	烟薯 25 X
Yanshu 25	原原种苗	烟薯 25 Y
普薯 32	组培驯化苗	普薯 32 X
Pushu 32	原原种苗	普薯 32 Y

济薯 26	组培驯化苗	济薯 26 X
Jishu 26	原原种苗	济薯 26 Y
商薯 19	组培驯化苗	商薯 19 X
Shangshu 19	原原种苗	商薯 19 Y
金海美秀	组培驯化苗	金海美秀 X
Jinhaimexiu	原原种苗	金海美秀 Y
蓉粉 1 号	组培驯化苗	蓉粉 1 号 X
Rongfen 1	原原种苗	蓉粉 1 号 Y
宁紫薯 4 号	组培驯化苗	宁紫薯 4 号 X
Ningzishu 4	原原种苗	宁紫薯 4 号 Y

1.2.2 甘薯叶片光合参数测定 在甘薯栽插后 90 d 晴天上午 8:30-11:00, 采用 LI-6400 便携式光合仪测定^[12] 光合参数, 选择选长势良好的甘薯植株 3 株, 顶端往下第 4 片-6 片功能叶经进行测定, 叶室 CO₂ 浓度 400 μmol/mol, 用内置红蓝光源, 光量子通量密度(PPFD)1400 μmol/ (m² · s), 叶室温度设 25℃。记录光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci)、蒸腾速率(Tr), 并计算水分利用率 (WUE), 蒸腾效率 (TE), 羧化效率 (CE): $WUE = Pn/Tr$, $TE = Pn/ Gs$, $CE = Pn/ Ci$ 。

1.2.3 甘薯叶片光合色素测定 在甘薯栽插后 90 d 晴天上午 9:00, 对不同等级薯苗随机选取第一片展开叶, 摘取后立即置于便携式液氮罐保存, 取样完成带回室内检测, 采用乙醇浸提法^[13]测定光合色素含量, 包括叶绿素 a (C_a)、叶绿素 b (C_b)、类胡萝卜素 (C_{x.c}) 和叶绿素总量 (C_{a+b})。

1.2.4 甘薯产量测定 甘薯收获期进行田间测产, 每个处理设置 3 个重复。

1.2.5 甘薯薯块品质性状测定 每个处理取中等大小薯块 4-6 块, 将薯块洗净擦干表皮水分后切成细条, 混匀后取 50 g 于 80 °C 烘箱中烘干后称重, 设置 3 次重复, 称量干物质含量。烘干的样品充分磨碎后经 100 目铜网过滤, 收集干粉, 利用近红外分析仪^[14-15]测定甘薯干基淀粉、可溶性糖、还原糖和粗蛋白含量。

1.3 数据分析

利用 Microsoft Excel (2016 版) 数据录入、计算和绘制图表, IBM SPSS (25.0 版) 用于数据统计分析、主成分分析和相关性分析, 其中相关性分析采用双变量相关性分析, 以 Pearson 系数进行检验, 图表中数据为平均值±标准误。

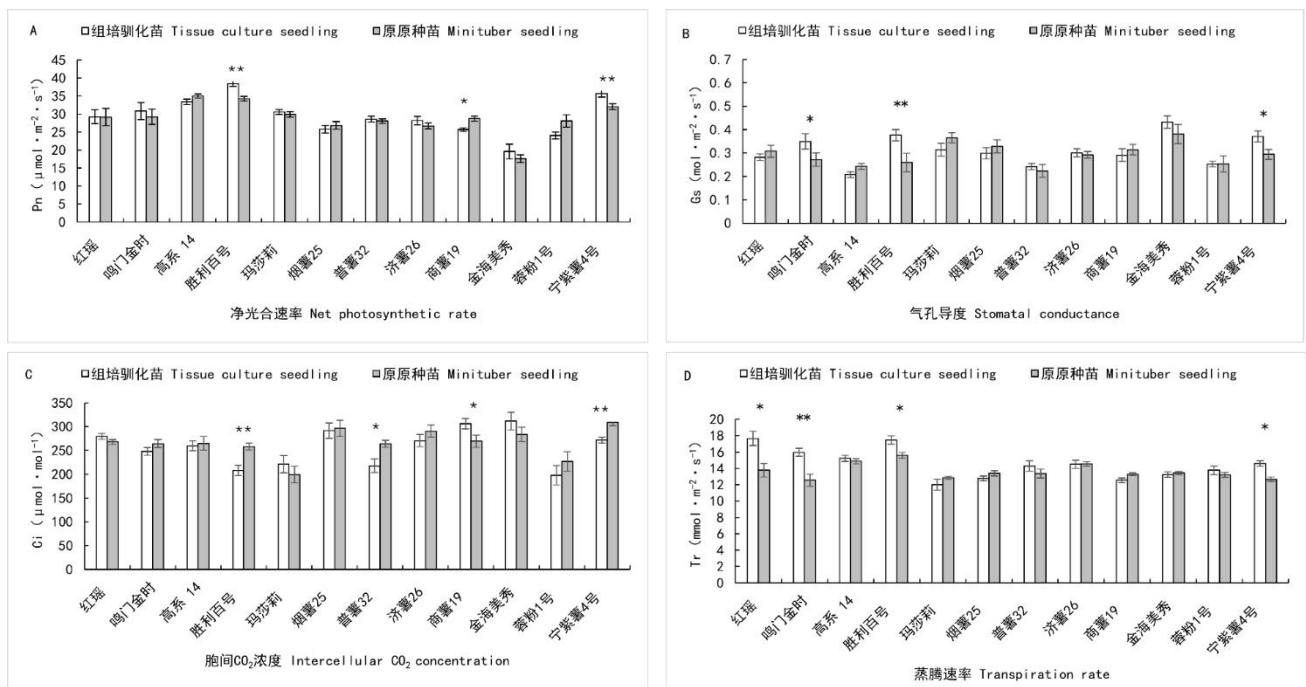
2 结果与分析

2.1 甘薯不同等级脱毒苗叶片光合作用的差异

12 个品种甘薯的组培驯化苗与原原种苗的叶片光合作用见图 1。由图 1-A 可以看出, 有 3 个品种甘薯的净光合速率差异达到显著水平, 胜利百号和宁紫薯 4 号组培驯化苗的净光合速率分别高原原种苗 12.24% 和 11.30%, 而商薯 19 的组培驯化苗比原原种苗低 19.44%。图 1-B 有 3 个品种甘薯的气孔导度差异达到显著水平, 鸣门金时、胜利百号和宁紫薯 4 号组培驯化苗的气孔导度分别高原原种苗 28.60%、44.99%和 26.17%。图 1-C 有 4 个品种甘薯的胞间 CO₂ 浓度差异达到显著水平, 胜利百号、普薯 32 和宁紫薯 4 号组培驯化苗的

胞间 CO₂ 浓度分别低原原种苗 19.45%、17.57%和 12.07%，而高薯 19 组培驯化苗比原原种苗高 13.70%。图 1-D 有 4 个品种甘薯的蒸腾速率差异达到显著水平，红瑶、鸣门金时、胜利百号和宁紫薯 4 号组培驯化苗的蒸腾速率分别高原原种苗 28.26%、27.30%、12.05%和 15.22%。

对光合参数进行主成分分析，结果发现，特征值大于 1 的主成分为净光合速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度，总贡献率达到 87.39%，表明这 3 个主成分代表了总数据的大部分信息，可以作为分析依据。第 1 主成分的特征值为 2.81，贡献率为 40.14%，气孔导度和胞间 CO₂ 浓度对 Y1 有较高的正载荷，蒸腾效率对 Y1 有较高的负载荷；第 2 主成分的特征值为 1.770，贡献率为 25.29%，净光合速率和羧化效率对 Y2 有较高的正载荷；第 3 主成分的特征值为 1.537，贡献率为 21.96%，水分利用率对 Y3 有较高的正载荷（见表 2）。因此可将气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、净光合速率、羧化效率、水分利用率作为光合作用中的主导因子进行下一步相关性分析。



**：组培驯化苗和原原种苗之间的差异达到 0.01 显著水平；*：组培驯化苗和原原种苗之间的差异达到 0.05 显著水平

**：The difference between seedling gradation reached a significant level of 0.01；*：The difference between the seedling gradation reached a significant level of

0.05

图 1 甘薯不同等级脱毒苗叶片光合作用的差异

Fig.1 Differences of different gradation virus-free seedling and sweetpotato varieties on leaf photosynthesis

表 2 甘薯光合参数的主成分分析

Table 2 Principal component analysis of sweetpotato photosynthetic parameters

光合参数 Photosynthetic parameters	主成分 Principal component		
	1	2	3
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.593	0.878	0.218
气孔导度 Stomatal conductance	0.820	0.403	0.425

胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration	0.761	-0.418	0.185
蒸腾速率 Transpiration rate	0.335	-0.318	-0.448
水分利用率 Water utilization rate	-0.461	0.470	0.876
蒸腾效率 Transpiration efficiency	-0.814	0.344	-0.345
羧化效率 Carboxylation efficiency	-0.365	0.970	0.262
特征值 Eigenvalue	2.810	1.770	1.537
贡献率%Contribution rate	40.142	25.291	21.959
累计贡献率%Cumulative contribution rate	40.142	65.432	87.391

2. 2 甘薯不同等级脱毒苗叶片光合色素的差异

对 12 个品种甘薯的组培驯化苗与原原种苗的光合色素含量进行测定(表 3),有 6 个品种的叶绿素 a(C_a)含量差异达到显著水平:鸣门金时、胜利百号、烟薯 25、普薯 32 和宁紫薯 4 号组培驯化苗的 C_a 含量高于原原种苗,其中差异最大的是普薯 32 比原原种苗 C_a 含量高了 51.46%,而商薯 19 的组培驯化苗比原原种苗低 9.24%。有 1 个品种甘薯的叶绿素 b (C_b) 含量差异达到显著水平:金海美秀组培驯化苗的 C_b 比原原种苗低 51.73%。12 个品种甘薯的类胡萝卜素 (C_{xc}) 含量差异均没有达到显著水平。有 5 个品种甘薯的叶绿素总量 (C_{a+b}) 差异达到显著水平:鸣门金时、胜利百号、烟薯 25 和普薯 32 组培驯化苗的 C_{a+b} 含量高于原原种苗,其中差异最大的是普薯 32 比原原种苗 C_{a+b} 含量高了 37.64%,而商薯 19 的组培驯化苗比原原种苗低 5.32%。

表 3 甘薯不同等级脱毒苗叶片光合色素的差异

Table 3 Differences of different gradation virus-free seedling and sweetpotato varieties on leaf photosynthetic pigment content

种苗 Seedling	色素含量 (mg/g 鲜重) Photosynthetic pigment content (mg/g fresh weight)			
	C _a	C _b	C _{xc}	C _{a+b}
红瑶 X Hongyao X	1.575±0.125	0.116±0.023	0.262±0.046	1.792±0.105
红瑶 Y Hongyao Y	1.345±0.036	0.143±0.059	0.234±0.020	1.487±0.08
鸣门金时 X Mingmenjinshi X	1.749±0.133	0.152±0.044	0.281±0.027	1.901±0.115
鸣门金时 Y Mingmenjinshi Y	1.538±0.057*	0.173±0.014	0.296±0.015	1.711±0.043*
高系 14 X Gaoxi 14 X	1.513±0.038	0.380±0.068	0.340±0.027	1.893±0.106
高系 14 Y Gaoxi 14 Y	1.629±0.032	0.334±0.135	0.260±0.041	1.963±0.103
胜利百号 X Shenglibaihao X	2.146±0.057	0.354±0.176	0.304±0.067	2.500±0.233
胜利百号 Y Shenglibaihao Y	1.669±0.113*	0.360±0.091	0.266±0.013	2.030±0.204*
玛莎莉 X Mashali X	2.410±0.065	0.689±0.131	0.456±0.052	3.099±0.197
玛莎莉 Y Mashali Y	2.313±0.045	0.556±0.033	0.458±0.032	3.069±0.078
烟薯 25 X Yanshu 25 X	2.458±0.044	0.486±0.056	0.296±0.023	2.944±0.1

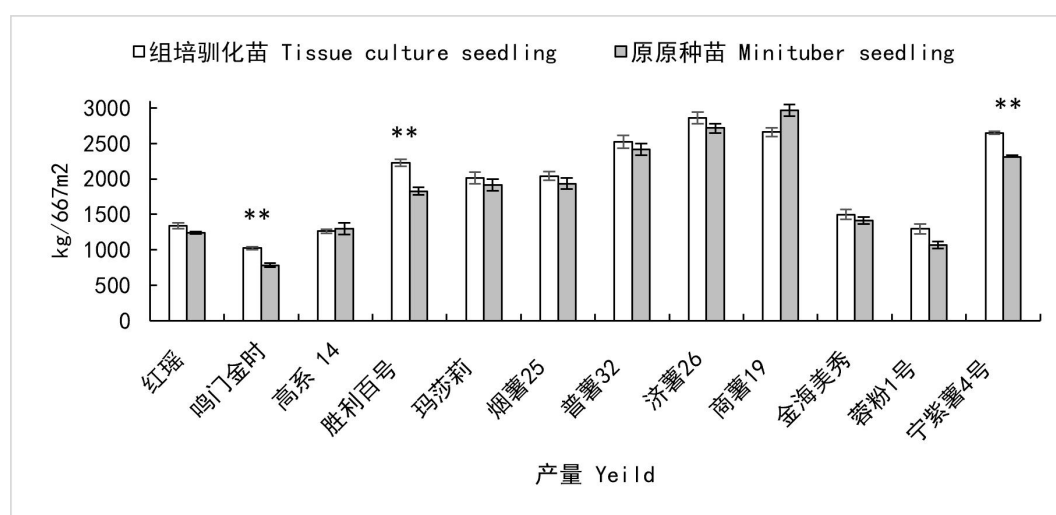
烟薯 25 Y Yanshu 25 Y	1.955±0.131*	0.500±0.095	0.241±0.038	2.455±0.226*
普薯 32 X Pushu 32 X	2.499±0.035	0.763±0.151	0.280±0.064	3.262±0.186
普薯 32 Y Pushu 32 Y	1.650±0.069*	0.720±0.175	0.213±0.038	2.370±0.244*
济薯 26 X Jishu 26 X	1.803±0.365	0.577±0.09	0.278±0.063	2.380±0.455
济薯 26 Y Jishu 26 Y	2.436±0.066	0.941±0.285	0.277±0.040	3.377±0.352
商薯 19 X Shangshu 19 X	2.457±0.098	0.676±0.176	0.225±0.076	3.133±0.074
商薯 19 Y Shangshu 19 Y	2.707±0.078*	0.603±0.031	0.248±0.030	3.309±0.075*
金海美秀 X Jinhaimeixiu X	2.669±0.045	0.334±0.043	0.403±0.013	3.003±0.003
金海美秀 Y Jinhaimeixiu Y	2.658±0.121	0.692±0.042*	0.320±0.027	3.250±0.141
蓉粉 1 号 X Rongfen 1 X	1.652±0.16	0.454±0.107	0.236±0.061	2.106±0.128
蓉粉 1 号 Y Rongfen 1 Y	1.672±0.123	0.341±0.034	0.432±0.048	2.013±0.143
宁紫薯 4 号 X Ningzishu 4 X	1.943±0.225	0.467±0.167	0.253±0.081	2.410±0.247
宁紫薯 4 号 Y Ningzishu 4 Y	1.679±0.176*	0.542±0.053	0.306±0.039	2.221±0.138

**：组培驯化苗和原原种苗之间的差异达到 0.01 显著水平，*：组培驯化苗和原原种苗之间的差异达到 0.05 显著水平

** : The difference between seedling gradation reached a significant level of 0.01. * : The difference between the seedling gradation reached a significant level of 0.05

2.3 甘薯不同等级脱毒苗产量的差异

12 个品种甘薯的组培驯化苗与原原种苗的产量结果见图 2。有 4 个品种甘薯的产量差异达到显著水平：品种鸣门金时、胜利百号和宁紫薯 4 号的组培驯化苗的产量比原原种苗分别高 30.95%、21.90%和 14.67%，但商薯 19 的组培驯化苗的产量比原原种苗低 10.42%，其余品种的产量差异没有达到显著水平。



**：组培驯化苗和原原种苗之间的差异达到 0.01 显著水平，*：组培驯化苗和原原种苗之间的差异达到 0.05 显著水平。

** : The difference between seedling gradation reached a significant level of 0.01. * : The difference between the seedling gradation reached a significant level of 0.05

图 2 甘薯不同等级脱毒苗产量的差异

Fig.2 Differences of different gradation virus-free seedling and sweetpotato varieties on yield

2.4 甘薯不同等级脱毒苗鲜薯品质的差异

12 个品种甘薯的组培驯化苗与原原种苗的鲜薯品质测定结果见表 5。有 6 个品种甘薯在鲜薯品质方面的差异达到显著水平，鸣门金时组培驯化苗的干物率比原原种苗高 12.64%；金海美秀组培驯化苗的粗淀粉含量比原原种苗高 14.76%，但金海美秀组培驯化苗的还原糖含量和可溶糖含量比原原种苗低 65.40%和 33.00%；宁紫薯 4 号组培驯化苗的粗淀粉含量比原原种苗低 5.08%；红瑶组培驯化苗的可溶糖含量比原原种苗低 36.80%；玛莎莉组培驯化苗的可溶糖含量和粗蛋白含量分别低 26.61%和 12.26%；普薯 32 组培驯化苗的粗蛋白含量比原原种苗低 18.58%。

表 4 甘薯不同等级脱毒苗鲜薯品质的差异

Table 4 Differences of different gradation virus-free seedling and sweetpotato varieties on quality

种苗	干物率%	粗淀粉%	还原糖%	可溶糖%	粗蛋白%
Seedling	Dry matter rate	Crude starch	Reducing sugar	Soluble sugar	Crude protein
红瑶 X	34.267±0.371	63.285±0.088	2.538±0.141	5.244±0.291	11.045±0.218
Hongyao X					
红瑶 Y	32.933±0.240	62.651±0.072	2.626±0.091	8.298±0.170*	9.253±0.238
Hongyao Y					
鸣门金时 X	33.867±0.067	68.164±0.121	3.578±0.254	7.552±0.1664	6.388±0.209
Mingmenjinshi X					
鸣门金时 Y	30.067±1.964*	68.246±0.186	4.068±0.113	7.860±0.067	4.346±0.070
Mingmenjinshi Y					
高系 14 X	35.733±0.677	70.363±0.073	3.178±0.101	5.225±0.093	6.367±0.044
Gaoxi 14 X					
高系 14 Y	35.867±0.353	68.689±0.094	2.578±0.146	4.379±0.033	8.511±0.047
Gaoxi 14 Y					
胜利百号 X	29.467±0.240	65.046±0.121	2.138±0.045	6.673±0.038	8.441±0.081
Shenglibaihao X					
胜利百号 Y	29.400±0.757	65.349±0.081	2.735±0.068	6.534±0.102	7.544±0.013
Shenglibaihao Y					
玛莎莉 X	33.400±0.200	69.611±0.209	1.7149±0.054	5.711±0.017	5.823±0.065
Mashali X					
玛莎莉 Y	33.267±0.133	66.814±0.164	2.467±0.086	7.782±0.044*	6.637±0.061*
Mashali Y					
烟薯 25 X	26.067±0.176	56.363±0.161	9.592±0.093	13.356±0.059	6.450±0.048
Yanshu 25 X					
烟薯 25 Y	27.000±0.115	56.110±0.018	7.316±0.016	12.380±0.056	6.755±0.068
Yanshu 25 Y					
普薯 32 X	30.867±0.067	62.609±0.167	2.979±0.034	9.682±0.102	7.054±0.014
Pushu 32 X					
普薯 32 Y	28.467±0.240	60.184±0.034	3.120±0.079	9.404±0.036	8.664±0.019*
Pushu 32 Y					
济薯 26 X	26.200±0.200	58.863±0.114	6.176±0.050	12.307±0.068	6.152±0.035
Jishu 26 X					
济薯 26 Y	26.000±0.115	59.713±0.061	5.724±0.013	11.869±0.007	7.512±0.017

Jishu 26 Y						
商薯 19 X	30.867±0.176	65.483±0.083	4.117±0.042	6.146±0.033	8.15±0.035	
Shangshu 19 X						
商薯 19 Y	29.067±0.067	65.699±0.154	3.627±0.031	5.107±0.104	8.787±0.050	
Shangshu 19 Y						
金海美秀 X	34.067±0.133	68.598±0.062	2.568±0.038	7.15±0.030	7.103±0.034	
Jinhaimexiu X						
金海美秀 Y	32.200±0.200	59.777±0.027*	7.422±0.089**	10.671±0.099**	7.16±0.027	
Jinhaimexiu Y						
蓉粉 1 号 X	32.200±0.231	61.185±0.018	1.247±0.053	7.304±0.021	8.462±0.074	
Rongfen 1 X						
蓉粉 1 号 Y	31.067±0.133	60.815±0.060	1.482±0.128	7.419±0.030	7.384±0.044	
Rongfen 1 Y						
宁紫薯 4 号 X	29.067±0.240	61.042±0.102	6.073±0.023	10.867±0.018	6.463±0.101	
Ningzishu 4 X						
宁紫薯 4 号 Y	29.467±0.067	64.309±0.055*	5.179±0.072	9.21±0.025	5.561±0.044	
Ningzishu 4 Y						

**：组培驯化苗和原原种苗之间的差异达到 0.01 显著水平，*：组培驯化苗和原原种苗之间的差异达到 0.05 显著水平。

** : The difference between seedling gradation reached a significant level of 0.01. * : The difference between the seedling gradation reached a significant level of 0.05.

2.5 甘薯光合参数与产量、品质性状相关性分析

12 个品种甘薯的光合参数、产量和品质性状相关性分析见表 5。在组培驯化苗中，产量与气孔导度、水分利用率、羧化效率和淀粉含量呈显著正相关，与还原糖含量、可溶糖含量呈显著负相关，水分利用率与干物率呈显著负相关。

在原原种苗中，产量与净光合速率、羧化效率和干物率呈显著正相关，与胞间 CO₂ 浓度呈显著负相关；干物率与羧化效率呈显著正相关，与胞间 CO₂ 浓度呈显著负相关；淀粉含量与净光合速率、水分利用率和羧化效率呈显著正相关；胞间 CO₂ 浓度与还原糖含量和可溶糖含量呈显著正相关；蛋白含量与气孔导度呈显著正相关。

表 5 组培驯化苗/原原种苗的光合参数与产量、营养品质相关性分析

Table 5 Correlation analysis of tissue culture seedling /minituber seedling on photosynthetic parameters, yield and nutritional quality

参数指标 Parameter index	净光合速率 Net photosynthetic rate	气孔导度 Stomatal conductance	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration	水分利用率 Water utilization rate	羧化效率 Carboxylation efficiency	产量 Yield
产量 Yield	0.124/0.389*	0.388*/0.226	0.180/-0.705**	0.464**/0.119	0.468**/0.524**	1/1
干物率 Dry matter rate	-0.118/0.132	0.151/-0.166	-0.012/-0.485**	-0.407*/-0.002	0.046/0.354*	0.223/0.553**
粗淀粉 (%) Crude starch	0.125/0.396*	0.168/0.064	0.068/-0.274	-0.180/0.419*	0.081/0.374*	0.458**/-0.220
还原糖 (%) Reducing sugar	0.027/-0.179	-0.101/0.283	0.279/0.631**	0.229/-0.266	-0.038/-0.171	-0.412*/0.124
可溶糖 (%) Soluble sugar	-0.109/-0.139	-0.284/0.142	0.141/0.435*	0.214/-0.270	-0.226/-0.251	-0.321*/0.152

粗蛋白 (%) Crude protein	-0.064/-0.008	0.038/0.393*	-0.125/-0.116	0.223/-0.116	0.091/0.100	-0.235/0.209
-----------------------	---------------	--------------	---------------	--------------	-------------	--------------

每个单元格中“/”上下分别表示组培驯化苗和原原种苗的光合参数与产量、营养品质相关性分析数据;** : 参数指标相关性达到 0.01 显著水平; * : 参数指标相关性达到 0.05 显著水平

In each cell, the upper and lower tables of “/” represents the correlation analysis data of photosynthetic parameters, yield and nutritional quality of tissue culture seedlings and minituber seedlings respectively;** : The correlation of parameter index reached a significant level of 0.01. * : The correlation of parameter index reached a significant level of 0.05.

3 讨论

作用光合作用是作物干物质积累和产量形成的基础, 植物大于 90%干物质质量来自光合产物^[16]。通过测定和计算光合参数可以反映光合作用强弱, 如植物胞间 CO₂ 浓度越低, 说明植物 CO₂ 同化率越高光合作用越强^[17]。本研究通过对 12 个品种甘薯的组培驯化苗和原原种苗的光合作用测定, 发现达到差异显著水平有: 品种胜利百号和宁紫薯 4 号组培驯化苗的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均高于原原种苗, 品种鸣门金时组培驯化苗的气孔导度和蒸腾速率高于原原种苗, 表明这些品种组培驯化苗的光合作用可能强于原原种; 而品种商薯 19 组培驯化苗的净光合速率低于原原种苗, 胞间 CO₂ 浓度高于原原种苗, 表明商薯 19 种原原种苗的光合作用可能强于组培驯化苗。因此不同品种甘薯的不同等级脱毒种苗光合作用存在差异。

光合色素是叶片光合作用的物质基础, 叶绿素含量的高低可以反映植物的生长状况和叶片的光合能力^[18-19]。植物中叶绿素 a 含量越高, 越能够有效地将太阳能转化为化学能, 为碳同化提供充足的能量来源, 维持光合作用的高效运转^[20-21]。本试验中光合色素含量差异达到显著水平的有: 品种鸣门金时、胜利百号和烟薯 25 组培驯化苗的叶绿素 a 和叶绿素总量均高于原原种苗; 而品种商薯 19 组培驯化苗的叶绿素 a 和叶绿素总量低于原原种苗, 这与光合参数测定值变化一致, 同样也说明不同品种甘薯的不同等级脱毒种苗光合作用存在差异。

前人对杭菊、红芽芋等作物^[22-24]的研究结果表明, 脱毒苗产量一般高于常规苗。然而针对甘薯组培驯化苗与原原种苗的产量比较研究较少, 本试验研究结果表明, 品种鸣门金时、胜利百号和宁紫薯 4 号的组培驯化苗以及商薯 19 的原原种苗鲜薯产量显著较高。甘薯脱毒不但能提高产量, 还能够不同程度改善其品质, 但不同等级脱毒种苗在产量、品质及生产效益等方面存在差异^[25-27]。本试验结果表明, 品种红瑶和玛莎莉组培驯化苗的可溶性糖含量低可能会影响甘薯的食用风味; 品种普薯 32 和玛莎莉组培驯化苗的蛋白含量低可能影响甘薯的营养价值; 品种金海美秀的组培驯化苗的淀粉含量高、还原糖含量和可溶糖含量低, 可能会影响甘薯的鲜食价值。本研究分别对甘薯组培驯化苗和原原种苗的光合参数、产量和品质性状进行相关性分析可知, 组培驯化苗叶片的水分利用率和薯块中干物率、还原糖含量以及可溶糖含量对产量有显著的影响; 原原种苗的叶片光合作用对薯块中淀粉含量、蛋白含量、干物率的积累有促进作用。

不同品种、不同等级脱毒苗, 对大田环境敏感度和适应性能力不同, 可导致产量和品质性状产生差异^[28]。参与试验的 12 个品种甘薯, 只有商薯 19 的原原种苗综合表现优于组培驯化苗, 这可能是由于商薯 19 的组

培驯化苗存在环境逆境胁迫响应的植物生理学过程从而提高其对环境的适应。所以,甘薯生产中应依据组培驯化苗和原原种苗的光合特性和物质分配特点以及各甘薯品种生育规律,选择合适的甘薯品种和适宜的脱毒苗级别进行生产。

参考文献

- [1] Wanjala B W, Ateka E M, Miano D W, Low J W, Kreuze J F. Storage Root Yield of Sweetpotato as Influenced by Sweetpotato leaf curl virus and Its Interaction With Sweetpotato feathery mottle virus and Sweetpotato chlorotic stunt virus in Kenya. *Plant disease*,2020,104(5):1477-1486.
- [2] 王欣,李强,曹清河,马代夫. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望. *中国农业科学*,2021,54(3):483-492.
Wang X, Li Q, Cao Q H, Ma D F. Current Status and Future Prospective of Sweetpotato Production and Seed Industry in China. *Scientia Agricultura Sinica*,2021,54(3):483-492.
- [3] 赵路宽. 115个中国甘薯登记品种遗传多样性分析及指纹图谱构建. *中国农业科学院*,2020.
Zhao L K. Genetic Diversity Assessment and DNA Fingerprint Construction of 115 Registered Sweetpotato Varieties in China. *Chinese Academy of Agricultural*,2020.
- [4] 王颖. 甘薯茎尖脱毒组培快繁技术研究. *河南农业*,2018,(28):45-46.
Wang Y. Study on virus-free tissue culture and rapid propagation of sweetpotato stem tips. *Agriculture of Henan*,2018,(28):45-46.
- [5] Wu H J, Qu X Y, Dong Z C, Luo L J, Shao C, Forner J C, Lohmann J U, Su Meng, Xu M C, Liu X B, Zhu L, Zeng J, Liu S M, Tian Z X, Zhao Z. WUSCHEL triggers innate antiviral immunity in plant stem cells. *Science*,2020,370(6513):227-231.
- [6] 董彦琪,原连庄,原让花,肖艳,吴涛. 几个甘薯脱毒苗快繁试验. *河南农业科学*,2011,40(09):41-43.
Dong Y Q, Yuan L Z, Yuan L H, Xiao Y, Wu T. Study on Rapid Propagation of Sweetpotato Virus-free Seedling. *Journal of Henan Agricultural Sciences*,2011,40(09):41-43.
- [7] 陈益华,钟志凌,贺正金,盛穗. 甘薯脱毒苗的快速繁殖与生产技术. *长江蔬菜*,2009,(14):9-11.
Chen Y H, Zhong Z L, He Z J, Sheng S. Rapid propagation and production technology of virus-free sweet potato seedlings. *Journal of Changjiang Vegetables*,2009,(14):9-11.
- [8] 张立明,王庆美,王建军,郝光辉,王荫墀. 脱毒甘薯种薯分级标准和生产繁育体系. *山东农业科学*,1999(1):24-26.
Zhang L M, Wang Q M, Wang J J, Xi G H, Wang Y C. Classification standard and production and breeding system of virus-free sweet potato seed. *Journal of Shandong Agricultural Science*,1999(1):24-26.
- [9] 张振臣. 我国甘薯脱毒种薯种苗繁育存在的问题及建议. *植物保护*,2020,46(06):10-13.
Zhang Z C. Problems and suggestions for breeding of virus-free sweet potato seeds in China. *Plant Protection*,2020,46(06):10-13
- [10] 郭小丁,谢一芝,贾赵东,马佩勇,边小峰. 甘薯试管苗及其种薯产量比较试验. *江苏农业科学*,2013,41(09):83-84.
Guo X J, Xie Y Z, Jia Z D, Ma P Y, Bian X F. Comparative experiment of sweetpotato seedling and seed potato yield in vitro. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2013,41(09):83-84.
- [11] 李军利,胡晓强,陈曦,吴家静,李政,李江伟,朱坤. 甘薯脱毒试管苗直繁种苗生产技术体系的创建. *种业导刊*,2023,(03):32-35.
Li X L, Hu X Q, Chen X, Wu J J, Li Z, Li J W, Zhu K. Establishment of Technology System for Direct Propagation of Sweet Potato Virus-Free Tube Plantlet. *Journal of Seed Industry Guide*,2023,(03):32-35.
- [12] 张晓丽,王强,陈雷,唐茂艳,吕荣华,郭辉,梁天锋,高国庆. 东南亚特种水稻种质资源光合特性研究. *植物遗传资源学报*,2016,17(06):1008-1013.
Zhang X L, Wang Q, Chen L, Tang M Y, Lv R H, Guo H, Liang T F, Gao G Q. Photosynthetic Characters of Special Rice Germplasm Resources from Southeast Asia. *Journal of Plant Genetic Resources*,2016,17(06):1008-1013.
- [13] 杨振欣,朱雅静,陆庄跃,罗茜,苏鑫,成思丽,蔡年辉,许玉兰,王德新. 不同倍性紫果西番莲满天星的形态特征和光合特性比较研究. *植物遗传资源学报*,2023,24(06):1659-1668.
Yang Z X, Zhu Y J, Lu Z Y, Luo X, Su X, Cheng S L, Cai N H, Xu Y L, Wang D X. Photosynthetic Characteristics of the Different Ploidy of *Passiflora edulis* Miantianxing. *Journal of Plant Genetic Resources*,2023,24(06):1659-1668.
- [14] 饶庆琳,姜敏,吕建伟,胡廷会,成良强,王金花,王军. 花生种质资源品质性状分析及综合评价. *植物遗传资源学报*,2024,25(09):1454-1467.
Rao Q L, Jiang M, Lv J W, Hu T H, Cheng L Q, Wang J H, Wang J. Analysis and Comprehensive Evaluation of Quality Characters of Peanuts Germplasm

Resources. *Journal of Plant Genetic Resources*,2024,25(09):1454-1467.

- [15] 唐忠厚,李洪民,李强,魏猛,刘正辉,丁艳锋.基于近红外光谱技术预测甘薯块根淀粉与糖类物质含量. *江苏农业学报*,2013,29(06):1260-1265.
Tang Z H, Li H M, Li Q, Wei M, Liu Z H, Ding Y F. Prediction of starch and sugar contents in sweet potato root by near-infra-red spectroscopy (NIRS). *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*,2013,29(06):1260-1265.
- [16] 胡敏杰,姜良超,李守中,周立峰,仝川.覆膜与滴灌对河套灌区玉米花粒期叶片光合特征的影响. *应用生态学报*,2017, 28(12):3955-3964.
Hu M J, Jiang L C, Li S Z, Zhou L F, Tong C. Effects of different mulching and drip irrigation patterns on photosynthetic characteristics of maize leaves in the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2017, 28(12):3955-3964.
- [17] 郭邦利,陈国爱,杨凉花,叶岚.梅营七号甘薯的脱毒培养及高产栽培技术. *陕西农业科学*,2009(6) :40-53.
Guo B L, Chen G A, Yang L H, Ye L. Virus-free culture and high-yield cultivation of Meiying No. 7 sweetpotato. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*,2009(6) :40-53.
- [18] 徐辉,李磊,李庆会,周琳,朱旭君,陈法军,王玉花,房婉萍.大气 CO₂ 浓度与温度升高对茶树光合系统及品质成分的影响. *南京农业大学学报*, 2016, 39(4):550-556.
Xu H, Li L, Li Q H, Zhou L, Zhu X J, Chen F J, Wang Y H, Fang W P. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on photosynthesis system and quality components in tea plant. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(4):550-556.
- [19] 余海云,石元值,马立锋,伊晓云,阮建云.茶树树冠不同冠层叶片光合作用特性的研究. *茶叶科学*, 2013(6):505-511.
Yu H Y, Shi Y Z, Ma L F, Yi X Y, Ruan J Y. Leaf Photosynthetic Traits at Different Canopies of Tea Plants. *Journal of Tea Science*, 2013(6):505-511.
- [20] 罗密,尹旺,邓仁菊,杨航,付梅,王洪亮,宋吉轩,王启富,李飞.不同甘薯品种(系)的光合特性研究. *西南农业学报*,2022,35(5):1039-1047.
Luo M, Yi W, Deng R J, Yang H, Fu M, Wang H L, Song J X, Wang Q F, Li F. Study on photosynthetic characteristics of different sweet potato varieties(lines). *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*,2022,35(5):1039-1047.
- [21] 张边江,凌俐俐,周峰,陈全战,华春,周泉澄,焦德茂.转PEPC基因水稻花粉株系不同生育期的光合生理表现. *华北农学报*,2012, 27(1):184-188.
Zhang B J, Ling L L, Zhou F, Chen Q Z, Hua C, Zhou Q C, Jiao M D. Photosynthetic Performance of Transgenic Rice with Phosphoenolpyruvate Carboxylase Gene during Different Developmental Stages. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2012, 27(1):184-188.
- [22] 张立明,王庆美,马代夫,王毅.甘薯主要病毒病及脱毒对块根产量和品质的影响. *西北植物学报*, 2005, 25(2):316-320.
Zhang L M, Wang Q M, Ma D F, Wang Y. Major Viruses and Effect of Major Virus Diseases and Virus-Eliminating Meristem Culture on Sweetpotato Yield and Quality in China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(2):316-320.
- [23] 周庆红,刘星月,王葡萄,朱强龙,单楠,杨寅桂.脱毒红芽芋不同世代生长特性及产量分析. *种子*, 2020, 39(2):96-98.
Zhou Q H, Liu X Y, Wang P T, Zhu Q L, Shan N, Yang Y G. Analysis of Growth Characteristics and Yield of Virus-free Red Bud Taro In Different Generations. *Seed*, 2020, 39(2):96-98.
- [24] 赵庆年,鄧慧,周嘉琳,高山林.脱毒杭菊的农艺性状和药材品质的研究. *药物生物技术*,2015,22(06):505-508.
Zhao Q N, Zhi H, Zhou J L, Gao S L. Study on Agronomic Characters and Quality of Chinese Traditional Medicine in the Virus-Free *C.morifolium*. *Pharmaceutical Biotechnology*,2015,22(06):505-508.
- [25] 陈石品.脱毒甘薯不同世代的农艺性状与产量表现. *福建农业科技*,2000,(04):19-20.
Chen S P. Agronomic traits and yield performance of virus-free sweetpotato in different generations. *Fujian Agricultural Science and Technology*,2000,(04):19-20.
- [26] 韩瑞华,张自启,刘长营,刘顺通,段爱菊,王利霞,王淑枝.脱毒甘薯不同世代对产量的影响. *陕西农业科学*,2014,60(11):11-13.
Han R H, Zhang Z Q, Liu C Y, Liu S T, Duan A J, Wang L X, Wang S Z. Effect of different generations of virus-free sweet potato on yield. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*,2014,60(11):11-13.
- [27] 肖关丽,王贵淇,郭华春.甘薯脱毒苗驯化培养及大田光合效率研究. *西南农业学报*,2012,25(02):416-419.
Xiao G L, Wang G Q, Guo H C. Study on Domesticated Cultivation of Virus-free Sweet Potato Seedlings and Photosynthetic Efficiency in Field. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*,2012,25(02):416-419.
- [28] 颜克如.杭白菊病毒检测及不同世代脱毒苗产量品质的研究. *浙江大学*,2021.
Yan K R. Virus identification and analysis of yield and quality of virus-free plantlets at different generations on *Chrysanthemum morifolium*. *Zhejiang University*,2021.