植物遗传资源学报 2025，26（6）：1132-1141
Journal of Plant Genetic Resources
DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20241031002

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号共12个品种的组培驯化苗和原原种苗为试验材料，测定光合指标等数据，并利用方差分析、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显著高于相应原原种苗，而商薯19组培驯化苗显著低于相应原原种苗。（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相应原原种苗分别高30.95%、21.90%和14.67%，但商薯19组培驯化苗的产量比相应原原种苗低10.42%。（3）鲜薯品质方面，宁紫薯4号组培驯化苗的粗淀粉含量、红瑶组培驯化苗的可溶性糖含量、玛莎莉组培驯化苗的可溶性糖含量和粗蛋白含量以及普薯32组培驯化苗的粗蛋白含量均显著低于相应原原种苗；金海美秀组培驯化苗的粗淀粉含量显著高于原原种苗，但还原糖含量和可溶性糖含量显著低于原原种苗；鸣门金时组培驯化苗的干物率显著高于原原种苗。（4）不同等级脱毒苗的光合特性、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 Sweetpotato Varieties

YUAN Rui，WANG Jie，DAI Xibing，SUN Shujun，ZHAO Donglan，ZHOU Zhilin，CAO Qinghe
（*Xuzhou Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Xuhuai District，Xuzhou 221131*）

Abstract：The production of virus-free sweetpotato seedlings through direct field cultivation of tissue-cultured seedlings or minituber-derived seedlings has become a promising propagation technology for widespread application. In order to investigate the differential effects of these two propagation methods on field performance，yield and quality across sweetpotato varieties，we conducted a comparative study using 12 sweetpotato varieties with both methodologies. The results showed that：（1）Photosynthetic characteristics − Tissue-cultured seedlings of Mingmenjinshi，Shenglibaihao，Ningzishu 4 and Pushu 32 exhibited significantly higher photosynthetic activity and pigment content compared to minituber-derived seedlings，whereas Shangshu 19 showed the opposite trend.（2）Tuber yield − Tissue-cultured seedlings of Mingmenjinshi，Shenglibaihao and Ningzishu 4 produced 30.95%，21.90% and 14.67% higher fresh tuber yield，respectively，but Shangshu 19 tissue-cultured seedlings yielded 10.42% less than their minituber-derived seedlings.（3）Tuber quality − Crude starch content of

收稿日期：2024-10-31　　**网络出版日期：**2025-01-17
URL：https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20241031002
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）

Ningzishu 4 tissue-cultured seedlings, soluble sugar content of Hongyao tissue-cultured seedlings, soluble sugar content and crude protein content of Mashali tissue-cultured seedlings, crude protein content of Pushu 32 tissue-cultured seedlings were all significantly lower than minituber-derived seedlings. Crude starch content of Jinhaimeixiu tissue-cultured seedlings was significantly higher than minituber-derived seedlins, but reducing sugar and soluble sugar of tissue-cultured seedlings were significantly lower than minituber-derived seedlings. Dry matter rate of Mingmenjinshi tissue-cultured seedlings were significantly higher than minituber-derived seedlings. (4) Correlation analysis revealed distinct relationships between photosynthesis parameters and tuber quality; only water use efficiency and dry matter content showed negative correlation in tissue-cultured seedlings, whereas net photosynthetic rate, water use efficiency, and carboxylation efficiency had significant effects on the fresh potato quality of minituber-derived seedlings. This study can provide a theoretical basis for optimizing the use of tissue-cultured and minituber-derived propagation methods for different sweetpotato varieties.

Key words: sweetpotato; tissue-cultured seedling; minituber-derived 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，因其无性繁殖方式，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，脱毒后的甘薯能恢复其品种原始的优良性状[5-6]。迄今，国内外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4个级别：甘薯脱毒组培苗、原原种、原种和生产种。脱毒组培苗，即甘薯茎尖组织培养获得的组培苗，经病毒检测后，确定不带甘薯特定病毒的茎尖组培苗及其微繁苗。原原种是指用脱毒组培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（或脱毒组培苗）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。生产种是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]。因此脱毒组培苗是最基础的材料，原原种苗的培育是由繁苗阶段转入繁薯阶段的重要环节；脱毒组培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，这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]。组培驯化苗和原原种苗不经历或只经历一次种薯生产环节，其繁育周期大大缩短，降低了种苗感染病毒病的风险，从而保证种苗质量。

目前，由组培驯化苗或原原种苗直接繁大田种苗的脱毒甘薯繁育技术已成为一种新的推广应用技术，但不同品种甘薯的组培驯化苗和原原种苗的大田长势、产量、品质等方面的比较研究鲜见报道。本研究以12个甘薯品种（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）为材料，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测定，通过方差分析、主成分分析和相关性分析，综合比较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

本研究甘薯品种包括红瑶、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号共12个品种，所有品种的组培驯化苗（将脱毒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。

1.2　试验方法

1.2.1　田间种植　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。试验设置12个甘薯品种的组培驯化苗、原原种苗共2个等级脱毒苗(表1),每个品种每个等级3个重复,每个重复3行,每行50棵苗,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 Varieties and their seedling gradation

种苗名称 Seedling variety name	种苗等级 Seedling gradation	种苗标注 Seedling label	种苗名称 Seedling variety name	种苗等级 Seedling gradation	种苗标注 Seedling label
红瑶	组培驯化苗	红瑶 X	普薯32	组培驯化苗	普薯32 X
Hongyao	原原种苗	红瑶 Y	Pushu 32	原原种苗	普薯32 Y
鸣门金时	组培驯化苗	鸣门金时 X	济薯26	组培驯化苗	济薯26 X
Mingmenjinshi	原原种苗	鸣门金时 Y	Jishu 26	原原种苗	济薯26 Y
高系14	组培驯化苗	高系14 X	商薯19	组培驯化苗	商薯19 X
Gaoxi 14	原原种苗	高系14 Y	Shangshu 19	原原种苗	商薯19 Y
胜利百号	组培驯化苗	胜利百号 X	金海美秀	组培驯化苗	金海美秀 X
Shenglibaihao	原原种苗	胜利百号 Y	Jinhaimeixiu	原原种苗	金海美秀 Y
玛莎莉	组培驯化苗	玛莎莉 X	蓉粉1号	组培驯化苗	蓉粉1号 X
Mashali	原原种苗	玛莎莉 Y	Rongfen 1	原原种苗	蓉粉1号 Y
烟薯25	组培驯化苗	烟薯25 X	宁紫薯4号	组培驯化苗	宁紫薯4号 X
Yanshu 25	原原种苗	烟薯25 Y	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 甘薯栽插后90 d,在晴天上午8:30-11:00,采用LI-6400便携式光合仪测定光合参数[12],每个品种不同等级薯苗选择选长势良好的甘薯植株3株,对顶端往下第4片~6片功能叶进行测定,叶室CO_2浓度400 μmol/mol,用内置红蓝光源,光量子通量密度(PPFD, photosynthetic photon flux density)1400 μmol/(m^2·s),叶室温度设25℃。记录净光合速率(Pn,net photosynthetic rate)、气孔导度(Gs, stomatal conductance)、胞间CO_2浓度(Ci, intercellular CO_2 concentration)、蒸腾速率(Tr, transpiration rate),并计算水分利用率(WUE, water utilization rate),蒸腾效率(TE, transpiration efficiency),羧化效率(CE, carboxylation efficiency),公式分别为:WUE = Pn/Tr,TE= Pn/Gs,CE= Pn/Ci。

1.2.3 甘薯叶片光合色素测定 甘薯栽插后90 d,在晴天上午9:00,对每个品种不同等级的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含量、叶绿素b含量、类胡萝卜素含量和叶绿素总量。

1.2.4 甘薯产量测定 甘薯收获期进行田间测产,每个品种不同等级的每个重复收获薯块,装框称重,每个品种不同等级甘薯3次重复取平均。

1.2.5 甘薯薯块品质性状测定 每个品种不同等级甘薯取中等大小薯块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 ℃烘箱中烘干后称重,即为干物质重量,3次重复,计算干物率=(干物质重量÷50)×100%。烘干的样品充分磨碎后经100目铜网过滤,收集干粉,利用近红外分析仪测定甘薯干基粗淀粉含量、可溶性糖含量、还原糖含量和粗蛋白含量[14-15]。

1.3 数据分析

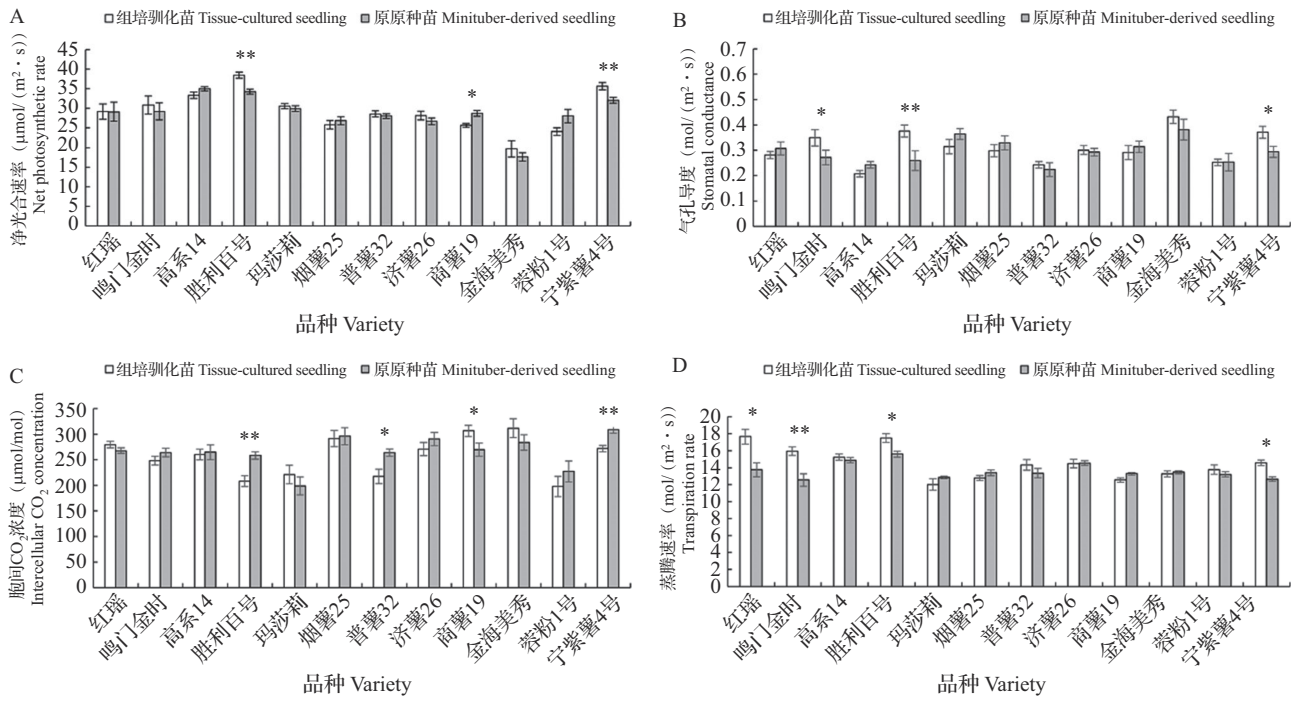
利用Microsoft Excel 2016进行数据计算和图表绘制,利用IBM SPSS 25.0进行数据统计分析、主成分分析和相关性分析,其中相关性分析采用双变量相关性分析,以Pearson系数进行检验,图表中数据为平均值±标准误。

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个甘薯品种的组培驯化苗与原原种苗的叶片光合作用见图1。由图1A可以看出,有3个甘薯品种的净光合速率在组培驯化苗与原原种苗间的差异达到显著水平,胜利百号和宁紫薯4号组培驯化苗的净光合速率分别比原原种苗高12.24%和

11.30%，而商薯 19 组培驯化苗比原原种苗低 19.44%。有 3 个甘薯品种的气孔导度在组培驯化苗与原原种苗间的差异达到显著水平，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比原原种苗高 28.60%、44.99% 和 26.17%（图 1B）。有 4 个甘薯品种的胞间 CO_2 浓度在组培驯化苗与原原种苗间的差异达到显著水平，胜利百号、普薯 32 和宁紫薯 4 号组培驯化苗的胞间 CO_2 浓度分别比原原种苗低 19.45%、17.57% 和 12.07%，而商薯 19 组培驯化苗比原原种苗高 13.70%（图 1C）。有 4 个品种甘薯的蒸腾速率在组培驯化苗与原原种苗间的差异达到显著水平，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比原原种苗高 28.26%、27.30%、12.05% 和 15.22%（图 1D）。



*、**分别表示组培驯化苗和原原种苗之间的差异达到 0.05、0.01 显著水平，下同

*, ** indicate the differences between the tissue-cultured seedling and minituber-derived seedling respectively at the significant levels of 0.05 and 0.01, the same as below

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 of sweetpotato varieties on leaf photosynthesis

对光合参数进行主成分分析，结果发现，前 3 个主成分特征值均大于 1，总贡献率达到 87.391%，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 2.810，贡献率为 40.142%，气孔导度和胞间 CO_2 浓度有较高的正载荷，蒸腾效率有较高的负载荷；第 2 主成分的特征值为 1.770，贡献率为 25.291%，净光合速率和羧化效率有较高的正载荷；第 3 主成分的特征值为 1.537，贡献率为 21.959%，水分利用率有较高的正载荷（表 2）。因此可将气孔导度、胞间 CO_2 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。

表 2　基于光合参数的主成分分析

Table 2　Principal component analysis using 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

表2（续）

光合参数 Photosynthetic parameters	主成分 Principal component		
	1	2	3
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个甘薯品种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含量在组培驯化苗与原原种苗间的差异达到显著水平,鸣门金时、胜利百号、烟薯25、普薯32和宁紫薯4号组培驯化苗的叶绿素a含量显著高于原原种苗,其中差异最大的是普薯32,其组培驯化苗叶绿素a含量比原原种苗高51.46%,而商薯19的组培驯化苗叶绿素a含量比原原种苗低9.24%。1个品种的叶绿素b含量在组培驯化苗与原原种苗间的差异达到显著水平,金海美秀组培驯化苗的叶绿素b含量比原原种苗低51.73%。12个品种的类胡萝卜素含量在组培驯化苗与原原种苗间差异均未达到显著水平。5个品种甘薯的叶绿素总量在组培驯化苗与原原种苗间的差异达到显著水平,鸣门金时、胜利百号、烟薯25和普薯32组培驯化苗的叶绿素总量高于原原种苗,其中差异最大的是普薯32,其组培驯化苗叶绿素总量比原原种苗高37.64%,而商薯19的组培驯化苗叶绿素总量比原原种苗低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 of sweetpotato varieties on leaf photosynthetic pigment content

种苗 Seedling	叶绿素a含量(mg/g) Chlorophyll a content	叶绿素b含量(mg/g) Chlorophyll b content	类胡萝卜素含量(mg/g) Carotenoid content	叶绿素总量(mg/g) Total chlorophyll content
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±0.080
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±0.100
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±0.090	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*

表3（续）

种苗 Seedling	叶绿素a含量(mg/g) Chlorophyll a content	叶绿素b含量(mg/g) Chlorophyll b content	类胡萝卜素含量(mg/g) Carotenoid content	叶绿素总量(mg/g) Total chlorophyll content
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±0.160	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

2.3　甘薯不同等级脱毒苗产量的差异

12个甘薯品种的组培驯化苗与原原种苗的产量结果见图2。有4个甘薯品种的产量在组培驯化苗与原原种苗间的差异达到显著水平，鸣门金时、胜利百号和宁紫薯4号组培驯化苗的产量分别比原原种苗高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%，其余品种的不同等级脱毒苗间的产量差异没有达到显著水平。

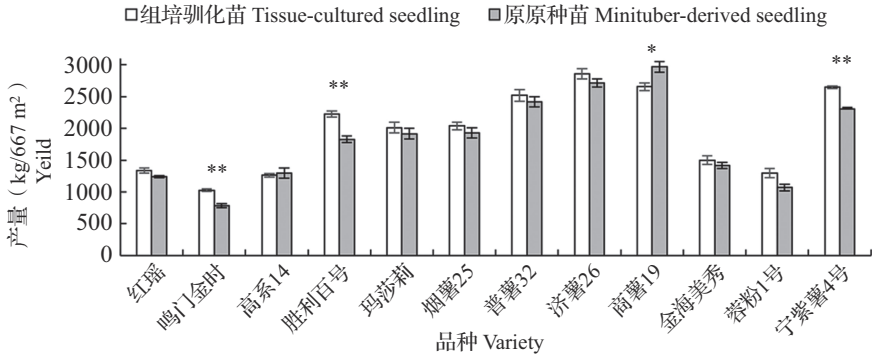


图2　甘薯不同等级脱毒苗产量的差异

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

2.4　甘薯不同等级脱毒苗鲜薯品质的差异

12个甘薯品种的组培驯化苗与原原种苗的鲜薯品质测定结果见表4。有6个甘薯品种组培驯化苗与原原种苗在鲜薯品质方面的差异达到显著水平，其中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性糖含量比原原种苗分别低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性糖含量比原原种苗低36.80%；玛莎莉组培驯化苗的可溶性糖含量和粗蛋白含量比原原种苗分别低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 of sweetpotato varieties on quality

种苗 Seedling	干物率(%) Dry matter rate	粗淀粉含量(%) Crude starch content	还原糖含量(%) Reducing sugar content	可溶性糖含量(%) Soluble sugar content	粗蛋白含量(%) Crude protein content
红瑶 X Hongyao X	34.267±0.371	63.285±0.088	2.538±0.141	5.244±0.291	11.045±0.218
红瑶 Y Hongyao Y	32.933±0.240	62.651±0.072	2.626±0.091	8.298±0.170*	9.253±0.238
鸣门金时 X Mingmenjinshi X	33.867±0.067	68.164±0.121	3.578±0.254	7.552±0.166	6.388±0.209
鸣门金时 Y Mingmenjinshi Y	30.067±1.964*	68.246±0.186	4.068±0.113	7.860±0.067	4.346±0.070
高系14 X Gaoxi 14 X	35.733±0.677	70.363±0.073	3.178±0.101	5.225±0.093	6.367±0.044
高系14 Y Gaoxi 14 Y	35.867±0.353	68.689±0.094	2.578±0.146	4.379±0.033	8.511±0.047
胜利百号 X Shenglibaihao X	29.467±0.240	65.046±0.121	2.138±0.045	6.673±0.038	8.441±0.081

表4（续）

种苗 Seedling	干物率(%) Dry matter rate	粗淀粉含量(%) Crude starch content	还原糖含量(%) Reducing sugar content	可溶性糖含量(%) Soluble sugar content	粗蛋白含量(%) Crude protein content
胜利百号 Y Shenglibaihao Y	29.400±0.757	65.349±0.081	2.735±0.068	6.534±0.102	7.544±0.013
玛莎莉 X Mashali X	33.400±0.200	69.611±0.209	1.715±0.054	5.711±0.017	5.823±0.065
玛莎莉 Y Mashali Y	33.267±0.133	66.814±0.164	2.467±0.086	7.782±0.044*	6.637±0.061*
烟薯25 X Yanshu 25 X	26.067±0.176	56.363±0.161	9.592±0.093	13.356±0.059	6.450±0.048
烟薯25 Y Yanshu 25 Y	27.000±0.115	56.110±0.018	7.316±0.016	12.380±0.056	6.755±0.068
普薯32 X Pushu 32 X	30.867±0.067	62.609±0.167	2.979±0.034	9.682±0.102	7.054±0.014
普薯32 Y Pushu 32 Y	28.467±0.240	60.184±0.034	3.120±0.079	9.404±0.036	8.664±0.019*
济薯26 X Jishu 26 X	26.200±0.200	58.863±0.114	6.176±0.050	12.307±0.068	6.152±0.035
济薯26 Y Jishu 26 Y	26.000±0.115	59.713±0.061	5.724±0.013	11.869±0.007	7.512±0.017
商薯19 X Shangshu 19 X	30.867±0.176	65.483±0.083	4.117±0.042	6.146±0.033	8.150±0.035
商薯19 Y Shangshu 19 Y	29.067±0.067	65.699±0.154	3.627±0.031	5.107±0.104	8.787±0.050
金海美秀 X Jinhaimeixiu X	34.067±0.133	68.598±0.062	2.568±0.038	7.150±0.030	7.103±0.034
金海美秀 Y Jinhaimeixiu Y	32.200±0.200	59.777±0.027*	7.422±0.089**	10.671±0.099**	7.160±0.027
蓉粉1号 X Rongfen 1 X	32.200±0.231	61.185±0.018	1.247±0.053	7.304±0.021	8.462±0.074
蓉粉1号 Y Rongfen 1 Y	31.067±0.133	60.815±0.060	1.482±0.128	7.419±0.030	7.384±0.044
宁紫薯4号 X Ningzishu 4 X	29.067±0.240	61.042±0.102	6.073±0.023	10.867±0.018	6.463±0.101
宁紫薯4号 Y Ningzishu 4 Y	29.467±0.067	64.309±0.055*	5.179±0.072	9.210±0.025	5.561±0.044

2.5 甘薯光合参数与产量、品质性状相关性分析

12个甘薯品种的光合参数、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、羧化效率和粗淀粉含量呈显著或极显著正相关，与还原糖含量、可溶性糖含量均呈显著负相关，水分利用率与干物率呈显著负相关。

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**
粗淀粉含量 Crude starch content	0.125/0.396*	0.168/0.064	0.068/−0.274	−0.180/0.419*	0.081/0.374*	0.458**/−0.220
还原糖含量 Reducing sugar content	0.027/−0.179	−0.101/0.283	0.279/0.631**	0.229/−0.266	−0.038/−0.171	−0.412*/0.124
可溶性糖含量 Soluble sugar content	−0.109/−0.139	−0.284/0.142	0.141/0.435*	0.214/−0.270	−0.226/−0.251	−0.321*/0.152
粗蛋白含量 Crude protein content	−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“/”前后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

In each cell, the before and after of “/” represents the correlation analysis data of photosynthetic parameters, yield and nutritional quality of tissue-cultured seedlings and minituber-derived seedlings, respectively

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或极显著正相关，与胞间CO_2浓度呈极显著负相关；干物率与羧化效率呈显著正相关，与胞间CO_2浓度呈极显著负相关；粗淀粉含量与净光合速率、水分利用率和羧化效率均呈显著正相关；胞间CO_2浓度与还原糖含量和可溶性糖含量呈显著或极显著正相关；粗蛋白含量与气孔导度呈显著正相关。

3　讨论

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%的干物质来自光合产物[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CO_2浓度越低，说明植物CO_2同化率越高，光合作用越强[17]。本研究对12个甘薯品种的组培驯化苗和原原种苗的光合作用进行测定，发现胜利百号和宁紫薯4号组培驯化苗的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均显著高于原原种苗，鸣门金时组培驯化苗的气孔导度和蒸腾速率均显著高于原原种苗，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显著低于原原种苗，胞间CO_2浓度显著高于原原种苗，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]。本研究中品种鸣门金时、胜利百号和烟薯25组培驯化苗的叶绿素a和叶绿素总量均显著高于原原种苗；而品种商薯19组培驯化苗的叶绿素a和叶绿素总量均显著低于原原种苗，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。

前人对甘薯[22]、红芽芋[23]、杭菊[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号的组培驯化苗的鲜薯产量显著高于原原种苗，而商薯19的原原种苗的鲜薯产量显著高于组培驯化苗。甘薯脱毒不但能提高产量，还能够改善其品质，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]。本研究结果表明，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粗蛋白含量低，可能影响甘薯的营养价值；品种金海美秀组培驯化苗的粗淀粉含量高、还原糖含量和可溶性糖含量低，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，发现组培驯化苗叶片的水分利用率和薯块中还原糖含量以及可溶性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粗淀粉含量、粗蛋白含量、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]。本研究的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的原原种苗对逆境胁迫具有较强的植物响应功能，可以提高其对环境的适应性。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] Meng X Q, Dong T T, Li Z Y, Zhu M K. First systematic review of the last 30 years of research on sweetpotato: Elucidating the frontiers and hotspots. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1428975

[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. 北京：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. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 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 M, 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(9):41-43
Dong Y Q, Yuan L Z, Yuan R H, Xiao Y, Wu T. Study on rapid propatation of sweetpotato virus-free seedling. Journal of Henan Agricultural Sciences,2011,40(9):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,郗光辉,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(6):10-13
Zhang Z C. Problems and suggestions for breeding of virus-free sweet potato seeds in China. Plant Protection, 2020, 46(6):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(9):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(9):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(3):32-35
Li J L, Hu X Q, Chen X, Wu J J, Li Z, Li J W, Zhu K. Establishment of technology system for direct propagation of sweetpotato virus-free tube plantlet. Journal of Seed Industry Guide,2023(3):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(6):1008-1013
Zhang X L, Wang Q, Chen L, Tang M Y, Lyu 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(6):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(6):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 mantianxing. Journal of Plant Genetic Resources,2023,24(6):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(9):1454-1467
Rao Q L, Jiang M, Lyu 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(9):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(6):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(6):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,2009,55(6):240,253
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,2009,55(6):240,253

[18] 徐辉,李磊,李庆会,周琳,朱旭君,陈法军,王玉花,房婉萍.大气 CO_2 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 CO_2 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, 2013,33(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, 2013,33(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, Yin 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,凌丽俐,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，郅慧，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(6)：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(6):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(4)：19-20
Chen S P. Agronomic traits and yield performance of virus-free sweetpotato in different generations. Fujian Agricultural Science and Technology, 2000(4):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(2)：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(2):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.杭州：浙江大学，2021
Yan K R. Virus identification and analysis of yield and quality of virus-freeplantlets at different generations on *Chrysanthemun morifolium*. Hangzhou: Zhejiang University, 2021