

7个菜用甘薯品种在黄淮地区的越冬表现及耐寒性评价

刘广卿, 孙喜云, 丁芳, 韩玉璞

(商丘市农林科学院 河南商丘 476000)

摘要:为探究不同品种菜用甘薯的抗寒机制,提高菜用甘薯薯苗在黄淮地区越冬栽培留种供应的种源量,突破种苗越冬障碍,为菜用甘薯耐寒资源鉴定与评价提供依据,本研究以7个叶菜型甘薯品种为材料,分别在2023—2024年与2024—2025年进行越冬抗寒性试验,研究不同品种的种苗成活率,测定叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、叶片光合性能以及丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)含量等13个指标对低温胁迫的响应,运用相关性分析、主成分分析、隶属函数分析等方法进行耐寒性综合评价。结果表明,不同品种在黄淮地区的越冬表现不同,叶片光合性能、抗氧化酶活性及MDA含量存在显著差异,其中,2023—2024年鄂菜薯1号和福菜薯18的净光合速率(P_n)最高,分别为7.12、6.88 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著高于其他品种,2024—2025年表现与之一致。鄂菜薯10号的SOD、POD活性2023—2024年与2024—2025年均最高,显著高于其他品种。相关性分析表明,菜用甘薯茎尖鲜质量与叶片 P_n 、POD活性、Pro含量均呈显著正相关,与叶片MDA含量呈显著负相关,与叶片SPAD值、越冬成活率和扩繁系数均呈极显著正相关。由隶属函数分析可知,综合隶属函数值(D 值)较大的为福菜薯18、鄂菜薯1号和鄂菜薯10号,分别为0.896 9、0.862 7和0.782 2; D 值较小的为阜菜1号和薯绿1号,分别为0.148 7和0.076 4。综合评价结果表明,耐寒性最强的为福菜薯18,可作为黄淮地区冬季菜薯育苗的首选;其次为鄂菜薯1号和鄂菜薯10号;耐寒性最差的为阜菜1号和薯绿1号。

关键词:叶菜型甘薯;越冬试验;耐寒性;相关性分析;主成分分析;隶属函数法

中图分类号:S531

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)04-201-09

Winter survival and cold tolerance evaluation of 7 leafy sweet potato varieties in Huang-Huai region

LIU Guangqing, SUN Xiyun, DING Fang, HAN Yupu

(Shangqiu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, Henan, China)

Abstract: To investigate the cold resistance mechanisms of different leafy sweet potato varieties, improve the seedling stock supply for overwintering cultivation of leafy sweet potato seedlings in the Huang-Huai region, break through the obstacle of seedling overwintering, and provide a basis for the identification and evaluation of cold-tolerant germplasm resources of leafy sweet potato, this study used seven leafy sweet potato varieties as materials. Overwintering cold resistance experiments were conducted during 2023—2024 and 2024—2025, respectively. The seedling survival rate of each cultivar was investigated, and 13 physiological indices in response to low-temperature stress were determined, including the activity of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) in leaves, leaf photosynthetic performance, as well as the content of malondialdehyde (MDA) and proline (Pro). Comprehensive evaluation of cold tolerance was carried out using correlation analysis, principal component analysis, and subordinate function analysis. The results showed that different varieties exhibited distinct overwintering performance in the Huang-Huai region, with significant difference in leaf photosynthetic performance, antioxidant enzyme activity, and MDA content. Among them, the net photosynthetic rate (P_n) of Ecaishu No. 1 and Fucaishu No. 18 was the highest in 2023—2024, reaching 7.12 and 6.88 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively, which were significantly higher than those of other varieties; a consistent trend was observed in 2024—2025. The activity of SOD and POD in Ecaishu No. 10 were the highest in both 2023—2024 and 2024—2025, and were significantly higher than those of other varieties. Correlation analysis indicated that the fresh mass of sweet potato shoot tips

收稿日期:2025-09-02;修回日期:2025-11-19

基金项目:河南省优势特色农业产业科技支撑行动计划(20240503003);商丘市农林科学院科技攻关(2025004)

作者简介:刘广卿,女,副研究员,主要从事甘薯育种及栽培技术研究。E-mail:lmc2565626@163.com

通信作者:丁芳,女,助理研究员,主要从事甘薯育种及栽培技术研究。E-mail:214681636@qq.com

was significantly positively correlated with leaf P_n , POD activity and Pro content, significantly negatively correlated with leaf MDA content, and extremely significantly positively correlated with leaf SPAD value, overwintering survival rate, and propagation coefficient. According to subordinate function analysis, the varieties with higher comprehensive subordinate function values (D -value) were Fucaishu No. 18 (0.896 9), Ecaishu No. 1 (0.862 7), and Ecaishu No. 10 (0.782 2), while those with lower D -value were Fucai No. 1 (0.148 7) and Shulv No. 1 (0.076 4). The comprehensive evaluation demonstrated that Fucaishu No. 18 had the strongest cold tolerance and could be used as the preferred variety for winter seedling raising of leafy sweet potato in the Huang-Huai region, followed by Ecaishu No. 1 and Ecaishu No. 10. Fucai No. 1 and Shulü No. 1 showed the weakest cold tolerance.

Key words: Leafy sweet potato; Overwintering experiment; Cold resistance; Correlation analysis; Principal component analysis; Membership function method

菜用甘薯(以下简称菜薯)是一种美味且健康的保健蔬菜,具有烹饪后色泽翠绿、食味清淡、入口脆嫩细滑、无苦涩味、清甜可口等特点^[1],不仅富含维生素、蛋白质、膳食纤维、矿物质等营养物质,还含有丰富的绿原酸、多酚等抗氧化物质^[2],在营养机体的同时还具有抗衰老、提高免疫力等多种保健功效,素有“航天食品”“长寿菜”“蔬菜皇后”的美誉^[3-4]。随着社会经济的发展、人民生活水平的提高,人们对营养保健型蔬菜认识逐渐加深,菜用甘薯在蔬菜市场上备受青睐,我国福建、广东、湖北、浙江等地菜用型甘薯产业已初具规模、经济效益显著。福建、广东等地因气候温和,菜用甘薯无明显生育期,可周年生产^[5]。黄淮生态区属暖温带季风性气候,具有四季分明、春暖夏热秋凉冬寒的气候特点,谷雨(4月20日)到霜降(10月23日)期间(无霜期200 d左右),菜薯可在露地正常生长,其他时间最低气温低于15℃,菜薯地上部分停止生长,当最低气温低于8℃时,植株甚至会萎蔫、枯死^[6]。并且由于菜薯块根较小,在气温较低的情况下种苗形成极为困难(育苗系数较低),从南方调运成本较高。因此,黄淮地区菜薯规模化种植的前提就是需要抗寒性较强的菜薯种苗,并且积极探索较为可行的种苗越冬模式,以保证种苗持续供应。晓春^[7]利用温室大棚培育越冬苗,解决了菜薯薯苗因气温过低而扦插延迟的问题。李建国等^[8]采用保护地越冬保苗的栽培方式,大大提高了菜薯的经济效益。基于此,本试验以7个在黄淮地区生长势较好的菜薯品种为试材,分别于2023年9月至2024年4月、2024年9月至2025年4月于冬季低温条件下在温室大棚内进行种苗越冬试验,测定种苗成活率及生理、生化特性,探讨菜薯在低温胁迫下的生理响应及菜薯生理指标与耐寒性之间的关系,以期筛选出适宜黄淮地区越冬保苗需求的菜薯品种,解决菜薯生产中的实际问题,为

菜薯防寒栽培及在黄淮地区越冬保苗繁殖技术提供参考,推动黄淮地区菜薯产业的蓬勃发展。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种为豫东地区表现较好的菜薯品种鄂菜薯10号、台农71、福菜薯18、阜菜1号、鄂菜薯1号、蒲薯53、薯绿1号,具体来源详见表1。

表1 不同菜用甘薯品种的名称及来源

Table 1 Names and origins of different leafy sweet potato varieties

品种名称	品种来源
Variety name	Source of variety
鄂菜薯10号	湖北省农业科学院粮食作物研究所
Ecaishu No. 10	Institute of Food Crop Research, Hubei Academy of Agricultural Sciences
台农71	台湾省农业试验所
Tainong 71	Taiwan Province Agricultural Research Institute
福菜薯18	福建省农业科学院作物研究所
Fucaishu 18	Crop Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences
阜菜1号	安徽省阜阳市农业科学院
Fucai No. 1	Fuyang Academy of Agricultural Sciences, Anhui Province
鄂菜薯1号	湖北省农业科学院粮食作物研究所
Ecaishu No. 1	Institute of Food Crops, Hubei Academy of Agricultural Sciences
蒲薯53	莆田市农业科学研究所
Pushu 53	Putian Institute of Agricultural Sciences
薯绿1号	江苏徐淮地区徐州农业科学研究所
Shulü No. 1	Xuzhou Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Xuhuai District

1.2 试验地概况

试验分别于2023年9月至2024年4月、2024年9月至2025年4月在商丘市农林科学院巴庄试验基地日光温室内进行,温室长60 m,宽8 m,前茬作物为茄子,土质属黄潮土偏黏土,土壤有机质含量(w ,下同)为11.38 g·kg⁻¹,pH 6.8,碱解氮含量为71.63 mg·kg⁻¹,有效磷含量为17.3 mg·kg⁻¹,速效钾

含量为 211.00 mg·kg⁻¹。试验地为低氮、低磷、高钾土壤,呈弱酸性。

1.3 试验设计

2023年、2024年分别于9月20日左右整地、撒施基肥,生物菌肥 1563 kg·hm⁻²,复合肥 729 kg·hm⁻²;旋耕两遍后起畦,畦面宽 120 cm,沟宽 30 cm,畦高 25 cm,小区面积 10.5 m²。菜薯苗为商丘市农林科学院组培室提供的脱毒菜薯苗,苗长 25 cm。9月25日插苗栽植并统计扦插株数,扦插后浇水定根,1周后查苗补缺,2周后打顶并中耕除草。各小区株、行距均为 20 cm×20 cm,种植密度为 202 500 株·hm⁻²,试验采用随机区组排列,3次重复。

1.4 试验指标测定

记录 2023年12月至2024年2月、2024年12月至2025年2月温室大棚内温度,具体温度变化

如图1和图2所示。最低气温低于 15℃,菜薯地上部分停止生长,当最低气温低于 8℃时,植株会萎蔫,甚至枯死。2023年12月至2024年2月低温时段分别为 2023年12月22日前后,最低气温低于 8℃,2024年2月9日前后,最低气温低于 6℃。2024年12月至2025年2月低温时段分别为 2024年12月8日前后,最低气温低于 10℃,2025年1月12日前后,最低气温低于 8℃。

1.4.1 越冬后菜薯苗形态指标调查 分别于2024和2025年3月中旬越冬结束后进行调查。每小区选取长势一致的菜薯 20株,参照《甘薯育种学》^[9]中的甘薯品种性状观察记载标准,调查不同品种株型、叶形、叶色、分枝和生长势情况,摘取主分枝 10~12 cm的顶尖茎段,用电子天平称量茎尖鲜质量并计算平均值(g·株⁻¹)。调查各小区越冬成活株数,并

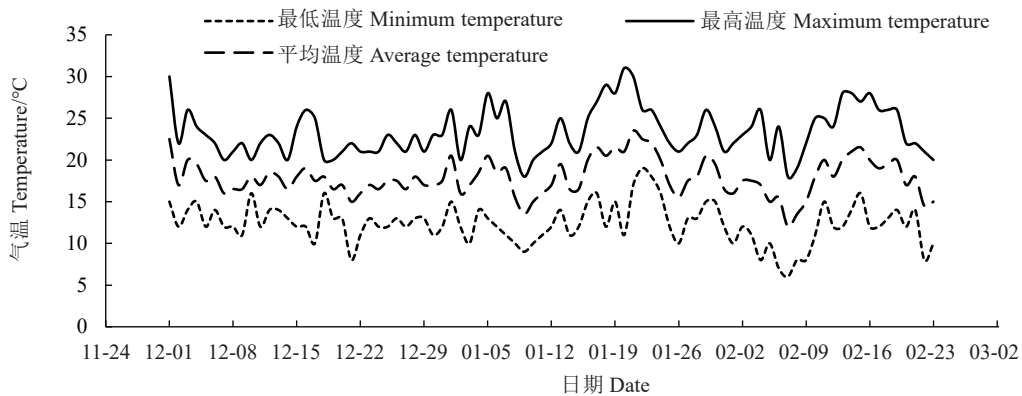


图1 2023年12月至2024年2月冬季日光温室日最低气温、日最高气温与日均气温

Fig. 1 Daily minimum, maximum and average air temperature in the solar greenhouse during winter from December 2023 to February 2024

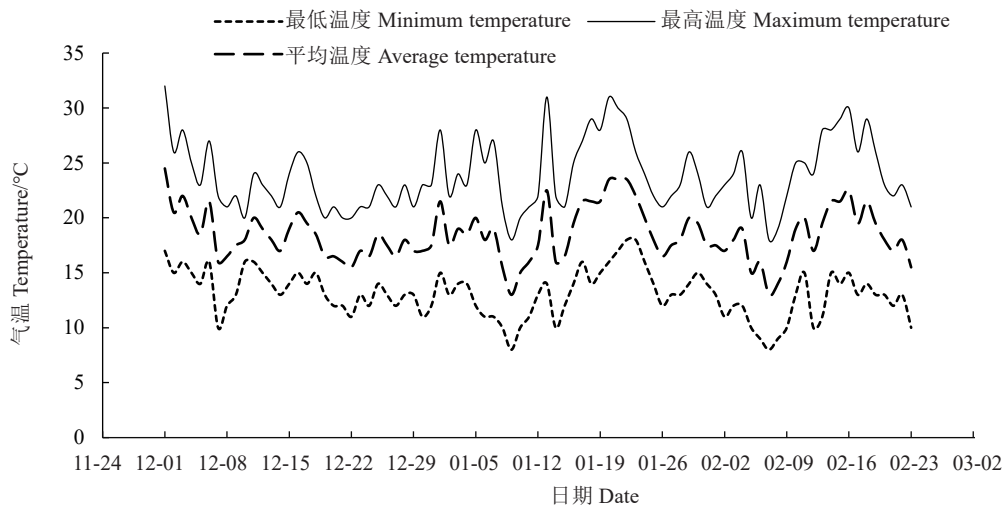


图2 2024年12月至2025年2月冬季日光温室日最低气温、日最高气温与日均气温

Fig. 2 Daily minimum, maximum and average air temperature in the solar greenhouse during winter from December 2024 to February 2025

计算成活率;调查各小区4月中旬总茎数,计算扩繁系数。

$$\text{越冬成活率}/\% = \text{成活株数}/\text{越冬前扦插株数} \times 100; \quad (1)$$

$$\text{扩繁系数} = \text{4月中旬总茎数}/\text{越冬前扦插株数}。 \quad (2)$$

1.4.2 越冬后菜薯生理生化指标测定 3月中旬越冬结束后,每小区选取长势一致菜薯10株,取植株主分枝顶端第3~4片完全展开叶,取样后立即用液氮速冻,放入-80℃冰箱保存备用。采用愈创木酚氧化比色法测定过氧化物酶(POD)活性^[10];采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[10];采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[11];采用磺基水杨酸法测定脯氨酸(Pro)^[12]、丙二醛(MDA)含量^[13]。

3月中旬越冬结束后,每小区随机选取长势一致的菜薯5株,于晴天上午10:00左右,选取主茎顶端向下第3~5片完全展开的功能叶,采用全自动便携式光合仪(LI-6800,北京莱阔生物科技有限公司)测定净光合速率 P_n 值;采用叶绿素计(SPAD-502型,日本柯尼卡美能达控股公司)测定叶绿素相对含量(SPAD值)。采用长宽系数法测定叶面积指数(LAI)^[14];用便携式电导率仪[FG3型,梅特勒托利多科技(中国)有限公司]测定叶片电导率,并计算相对电导率(REC)^[15]。 $REC/\% = E_1/E_2 \times 100$ 。

式中: E_1 为叶片浸泡后的溶液电导率; E_2 为将上述溶液煮沸后冷却至室温测得的电导率。

1.5 数据分析

采用Excel 2016软件进行数据整理和制图,采用Duncan法进行差异显著性分析,采用SPSS 22.0软件进行相关性分析、主成分分析和隶属函数分析。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对菜薯种苗萌发的影响

7个菜用甘薯品种的形态特征如表2所示。7个品种的叶色均为绿色,表明这7个品种在该地区生长状态良好。其中生长势最强的品种为鄂菜薯10号、福菜薯18和鄂菜薯1号,其次为台农71、蒲薯53、薯绿1号,阜菜1号的生长势相对较弱;株型对种植密度意义重大,鄂菜薯10号、鄂菜薯1号、福菜薯18、阜菜1号均为半直立株型,台农71、蒲薯53、薯绿1号均为直立株型,株型紧凑,更适合高密度栽培;除蒲薯53外,其他6个菜薯品种均为心形叶。深复缺刻叶(蒲薯53)叶片裂刻深,可能影响其光能捕获效率和蒸腾作用,是蒲薯53的显著特征;分枝数量直接关系到可采摘的茎尖数量,鄂菜薯10号、福菜薯18和鄂菜薯1号这3个品种分枝数多,意味着它们具有更高的茎尖产量潜力。

表2 不同菜薯品种在黄淮地区田间性状表现

Table 2 Field performance of different leafy sweet potato varieties in Huang-Huai region

品种名称 Variety name	株型 Plant architecture	叶形 Leaf shape	叶色 Leaf colour	分枝 Branch	生长势 Growth vigor
鄂菜薯10号 Ecaishu No. 10	半直立 Semi-upright	心形带齿 Cordate, serrated	绿 Green	多 Abundant	强 Strong
台农71 Tainong 71	直立 Upright	心形 Cordate	绿 Green	较多 Relatively abundant	较强 Relatively strong
福菜薯18 Fucaishu 18	半直立 Semi-upright	心形带齿 Cordate, serrated	绿 Green	多 Abundant	强 Strong
阜菜1号 Fucai No. 1	半直立 Semi-upright	心形(大) Cordate (Large)	绿 Green	较多 Relatively abundant	一般 Moderate
鄂菜薯1号 Ecaishu No. 1	半直立 Semi-upright	心形带齿 Cordate, serrated	绿 Green	多 Abundant	强 Strong
蒲薯53 Pushu 53	直立 Upright	深复缺刻 Deeply incised	绿 Green	较多 Relatively abundant	较强 Relatively strong
薯绿1号 Shulü No. 1	直立 Upright	心形 Cordate	绿 Green	较多 Relatively abundant	较强 Relatively strong

2.2 不同菜薯品种越冬后成活及扩繁情况

由表3可以看出,2023—2024年7个菜薯品种茎尖鲜质量为5.44~6.89 g·株⁻¹,其中鲜质量最大的是福菜薯18,为6.89 g·株⁻¹,其次是鄂菜薯1号和鄂菜薯10号,分别为6.72、6.60 g·株⁻¹,均显著高于蒲

薯53、台农71、薯绿1号、阜菜1号,鲜质量最小的为阜菜1号,较福菜薯18显著降低21.04%。

2024—2025年7个菜薯品种茎尖鲜质量为5.56~7.10 g·株⁻¹,其中鲜质量最大的为鄂菜薯10号,其次为鄂菜薯1号、福菜薯18,鲜质量最小的为

表3 不同菜薯品种越冬后种苗成活扩繁情况

Table 3 Survival and propagation of seedlings from multiple leafy sweet potato varieties after overwintering

年份 Year	品种名称 Variety name	越冬成活率 Winter-survival rate/%	扩繁系数 Multiplication coefficient	茎尖鲜质量/(g·株 ⁻¹) Fresh mass of shoot tips/(g·plant ⁻¹)
2023—2024	鄂菜薯 10 号 Ecaishu No. 10	80.4±2.66 a	23.5±1.02 a	6.60±0.34 a
	台农 71 Tainong 71	65.8±1.78 b	14.2±0.24 b	5.87±0.28 b
	福菜薯 18 Fucaishu 18	81.5±2.58 a	25.0±1.21 a	6.89±0.45 a
	阜菜 1 号 Fucai No. 1	56.5±1.96 c	9.3±0.40 d	5.44±0.29 c
	鄂菜薯 1 号 Ecaishu No. 1	80.2±2.13 a	22.4±0.89 a	6.72±0.22 a
	蒲薯 53 Pushu 53	64.2±1.55 b	13.7±0.54 b	5.92±0.36 b
	薯绿 1 号 Shulü No. 1	58.4±1.74 c	10.6±0.77 c	5.66±0.16 c
2024—2025	鄂菜薯 10 号 Ecaishu No. 10	82.6±2.02 a	22.6±0.68 a	7.10±0.26 a
	台农 71 Tainong 71	60.7±1.45 b	13.2±0.36 b	6.04±0.21 b
	福菜薯 18 Fucaishu 18	82.9±2.35 a	23.2±0.76 a	6.80±0.35 a
	阜菜 1 号 Fucai No. 1	55.4±2.06 c	10.8±0.42 c	5.56±0.17 c
	鄂菜薯 1 号 Ecaishu No. 1	80.6±2.10 a	21.5±0.77 a	6.92±0.13 a
	蒲薯 53 Pushu 53	60.2±1.46 b	12.6±0.58 b	5.60±0.13 c
	薯绿 1 号 Shulü No. 1	61.5±1.77 b	13.4±0.19 b	5.83±0.16 b

注:同一时期同列数值后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column at same period indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

阜菜 1 号。

越冬成活率较高的品种,扩繁系数也相对较高,2023—2024 年与 2024—2025 年表现一致。鄂菜薯 10 号、福菜薯 18 及鄂菜薯 1 号在 2023—2024 年与 2024—2025 年的越冬成活率均在 80%以上,扩繁系数均在 21%以上。越冬成活率较低品种,扩繁系数也相对较低,阜菜 1 号的越冬成活率、扩繁系数 2023—2024 年与 2024—2025 年均最低。

2.3 低温胁迫对不同菜薯品种光合性能的影响

由表 4 可知,除薯绿 1 号外,2024—2025 年其

他 6 个品种的 P_n 、SPAD 值、LAI 均高于 2023—2024 年。2023—2024 年鄂菜薯 1 号和福菜薯 18 的 P_n 最高,分别为 7.12、6.88 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,两者无显著差异,但均显著高于其他品种,2024—2025 年表现与之一致。2023—2024 年与 2024—2025 年福菜薯 18 和鄂菜薯 1 号的 SPAD 值均较高,薯绿 1 号、台农 71 和阜菜 1 号的 SPAD 值均较低,且均显著低于福菜薯 18 和鄂菜薯 1 号,2023—2024 年与 2024—2025 年表现基本一致。2023—2024 年和 2024—2025 年鄂菜薯 1 号的 LAI 值均为最大,分别

表4 低温胁迫对不同菜薯品种光合性能的影响

Table 4 Effects of low-temperature stress on photosynthetic performance in different leafy sweet potato varieties

年份 Year	品种名称 Variety name	P_n ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	SPAD 值 SPAD value	LAI
2023—2024	鄂菜薯 10 号 Ecaishu No. 10	6.50±0.09 c	29.24±0.42 b	4.10±0.18 b
	台农 71 Tainong 71	6.44±0.13 c	26.32±0.63 c	3.61±0.11 d
	福菜薯 18 Fucaishu 18	6.88±0.14 ab	32.31±0.88 a	3.82±0.12 c
	阜菜 1 号 Fucai No. 1	6.18±0.12 d	26.40±0.24 c	2.60±0.14 fg
	鄂菜薯 1 号 Ecaishu No. 1	7.12±0.16 a	31.62±0.36 a	4.31±0.12 a
	蒲薯 53 Pushu 53	6.13±0.15 d	27.11±0.19 c	3.10±0.13 e
	薯绿 1 号 Shulü No. 1	6.04±0.18 d	26.81±0.25 c	2.71±0.11 f
2024—2025	鄂菜薯 10 号 Ecaishu No. 10	6.63±0.19 c	29.82±0.43 b	4.18±0.18 b
	台农 71 Tainong 71	6.58±0.13 c	26.83±0.74 c	3.67±0.11 d
	福菜薯 18 Fucaishu 18	7.02±0.24 ab	32.91±0.89 a	3.87±0.12 c
	阜菜 1 号 Fucai No. 1	6.31±0.12 d	26.90±0.64 c	2.85±0.12 e
	鄂菜薯 1 号 Ecaishu No. 1	7.26±0.16 a	32.24±1.24 a	4.38±0.12 a
	蒲薯 53 Pushu 53	6.26±0.25 d	27.62±1.19 c	3.16±0.13 d
	薯绿 1 号 Shulü No. 1	5.88±0.22 e	24.80±0.84 d	2.81±0.14 e

为4.31和4.38,两年间差异较小;阜菜1号和薯绿1号的LAI在2023—2024年与2024—2025年均处于较低水平。综上所述,各参试品种在不同年份间的光合性能表现基本一致。

2.4 低温胁迫对不同菜薯品种抗氧化酶活性的影响

由表5可知,2024—2025年7个菜薯品种的SOD、POD、CAT活性均高于2023—2024年。其中鄂菜薯10号的SOD活性2023—2024年与2024—2025年均最高,分别为145.24、151.05 U·g⁻¹;鄂菜薯1号、福菜薯18次之。2023—2024年与2024—2025年鄂菜薯10号的POD活性均最高,均显著高

于其他品种,台农71、阜菜1号和薯绿1号的POD活性均较低,2023—2024年与2024—2025年表现一致。2023—2024年与2024—2025年鄂菜薯1号CAT活性均最高,均显著高于其他品种;鄂菜薯10号、福菜薯18、阜菜1号次之;台农71、薯绿1号和蒲薯53的CAT活性最低,2023—2024年与2024—2025年表现一致。综上所述,2023—2024年与2024—2025年鄂菜薯10号的SOD、POD活性均最高,表明其清除活性氧(ROS)的能力最强,可能具有最优的抗逆性。福菜薯18、鄂菜薯1号次之。蒲薯53、薯绿1号、阜菜1号3种酶活性均较低,表明这些品种在低温胁迫下的抗逆性较差。

表5 低温胁迫对不同菜薯品种抗氧化酶活性的影响

Table 5 Effects of low-temperature stress on antioxidant enzyme activities in different leafy sweet potato varieties

(U·g⁻¹)

年份 Year	品种名称 Variety name	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity
2023—2024	鄂菜薯 10 号 Ecaishu No. 10	145.24±4.26 a	328.01±9.78 a	18.25±0.36 b
	台农 71 Tainong 71	128.52±3.13 d	288.36±6.54 d	16.42±0.46 e
	福菜薯 18 Fucuishu 18	138.90±5.24 b	308.26±7.25 b	17.98±0.55 c
	阜菜 1 号 Fucai No. 1	132.64±4.33 c	284.32±5.68 d	17.25±0.42 d
	鄂菜薯 1 号 Ecaishu No. 1	140.17±4.65 b	308.27±6.25 b	18.66±0.54 a
	蒲薯 53 Pushu 53	122.16±2.47 e	298.44±5.96 c	15.38±0.34 f
	薯绿 1 号 Shulü No. 1	127.39±1.56 d	284.36±4.33 d	16.09±0.56 e
2024—2025	鄂菜薯 10 号 Ecaishu No. 10	151.05±4.31 a	341.13±9.85 a	18.98±0.37 b
	台农 71 Tainong 71	133.66±4.18 d	299.89±8.60 d	17.08±0.37 e
	福菜薯 18 Fucuishu 18	144.46±3.29 b	320.59±8.30 b	18.72±0.46 c
	阜菜 1 号 Fucai No. 1	137.95±5.38 c	295.69±7.75 d	17.59±0.23 d
	鄂菜薯 1 号 Ecaishu No. 1	145.78±4.72 b	320.60±6.30 b	19.41±0.25 a
	蒲薯 53 Pushu 53	127.05±3.53 e	310.38±8.04 c	15.68±0.34 f
	薯绿 1 号 Shulü No. 1	132.49±2.62 d	295.73±9.38 d	16.74±0.27 e

2.5 低温胁迫对不同菜薯品种的渗透调节物质含量的影响

由表6可知,2023—2024年台农71、薯绿1号的MDA含量较高,表明细胞膜脂过氧化程度最严重,鄂菜薯10号、福菜薯18的MDA含量最低,表明细胞膜损伤最轻。2024—2025年台农71的MDA含量最高,其次为阜菜1号,鄂菜薯10号、福菜薯18的MDA含量较低。

2023—2024年与2024—2025年福菜薯18的Pro含量均最高,均显著高于其他品种;2023—2024年薯绿1号、阜菜1号的Pro含量较低,2024—2025年Pro含量较低的品种为薯绿1号、蒲薯53,2023—2024年与2024—2025年表现不完全一致。2023—2024年与2024—2025年蒲薯53的EC值均最高,表明细胞膜损伤最严重,福菜薯18的EC值均较低,表明细胞膜完整性最好,可能与品种自

身抗逆机制有关。

综上所述,福菜薯18在2023—2024年与2024—2025年的Pro含量均最高,MDA含量和EC值均较低,综合表现最优。薯绿1号的MDA含量均较高,EC值均较高,Pro含量均最低,抗逆性较差。

2.6 耐寒指标的相关性分析、主成分分析与隶属函数分析

2.6.1 相关性分析 将越冬处理后菜薯的10个生理指标进行相关性分析(表7),结果表明,菜薯茎尖鲜质量与叶片P_n、POD活性、Pro含量均呈显著正相关,与叶片MDA含量呈显著负相关,与叶片SPAD值、越冬成活率和扩繁系数均呈极显著正相关;SOD活性与CAT活性呈极显著正相关,与POD活性、越冬成活率、扩繁系数均呈显著正相关,与MDA含量呈显著负相关;扩繁系数与Pro含量、茎

表6 低温胁迫对不同菜薯品种渗透调节物质的影响

Table 6 Effects of low-temperature stress on osmoregulatory substances in different leafy sweet potato varieties

年份 Year	品种名称 Variety name	$b(\text{MDA})/(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1})$	$w(\text{Pro})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	REC/%
2023—2024	鄂菜薯 10 号 Ecaishu No. 10	3.54±0.026 e	42.37±1.89 b	17.89±0.16 d
	台农 71 Tainong 71	4.72±0.064 a	40.26±1.56 c	19.11±0.24 b
	福菜薯 18 Fucaishu 18	3.48±0.012 e	44.96±1.42 a	16.44±0.24 e
	阜菜 1 号 Fucai No. 1	4.26±0.033 c	36.77±1.78 d	18.47±0.12 c
	鄂菜薯 1 号 Ecaishu No. 1	4.09±0.015 d	41.28±1.26 b	18.22±0.15 c
	蒲薯 53 Pushu 53	4.47±0.014 b	40.16±1.50 c	21.06±0.15 a
	薯绿 1 号 Shulü No. 1	4.68±0.028 a	35.52±1.32 d	19.26±0.17 b
2024—2025	鄂菜薯 10 号 Ecaishu No. 10	3.38±0.016 e	42.93±1.31 b	17.10±0.27 e
	台农 71 Tainong 71	4.41±0.017 a	41.87±1.62 c	19.87±0.25 b
	福菜薯 18 Fucaishu 18	3.22±0.012 e	46.76±1.48 a	18.61±0.27 d
	阜菜 1 号 Fucai No. 1	4.37±0.015 a	41.77±1.56 c	19.21±0.16 c
	鄂菜薯 1 号 Ecaishu No. 1	3.84±0.016 d	44.06±1.97 b	18.90±0.46 c
	蒲薯 53 Pushu 53	4.03±0.024 c	38.24±1.85 d	21.90±0.76 a
	薯绿 1 号 Shulü No. 1	4.25±0.021 b	36.94±1.37 d	20.03±0.88 b

表7 各耐寒性指标的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of cold tolerance indicators

指标 Index	茎尖鲜质量 Fresh mass of shoot tip	P_n	SPAD 值 SPAD value	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity	MDA 含量 MDA content	Pro 含量 Pro content	越冬成活率 Overwintering survival rate	扩繁系数 Multiplication coefficient
茎尖鲜质量 Fresh mass of shoot tip	1									
P_n	0.86*	1								
SPAD 值 SPAD value	0.94**	0.89*	1							
SOD 活性 SOD activity	0.74	0.69	0.71	1						
POD 活性 POD activity	0.83*	0.56	0.67	0.78*	1					
CAT 活性 CAT activity	0.72	0.81*	0.77*	0.96**	0.65	1				
MDA 含量 MDA content	-0.79*	-0.59	-0.78*	-0.84*	-0.82*	-0.77*	1			
Pro 含量 Pro content	0.89*	0.74	0.78*	0.57	0.75	0.53	-0.70	1		
越冬成活率 Overwintering survival rate	0.99**	0.86*	0.89*	0.79*	0.88*	0.76	-0.80*	0.90**	1	
扩繁系数 Multiplication coefficient	0.99**	0.83*	0.90*	0.79*	0.87*	0.74	-0.84*	0.91**	0.99**	1

注:*表示在 0.05 水平显著相关;**表示在 0.01 水平极显著相关。

Note: * represents significant correlation at 0.05 level; ** represents extremely significant correlation at 0.01 level.

尖鲜质量、越冬成活率均呈极显著正相关,与 P_n 、POD 活性、SOD 活性、SPAD 值均呈显著正相关,与 MDA 含量呈显著负相关。

2.6.2 主成分分析与隶属函数分析 由表 8 可知,对菜薯越冬后的 10 个性状指标进行主成分分析,以特征值 > 1 为原则,共提取 3 个主成分,贡献率分

别为 70.235%、10.659% 和 6.172%, 3 个主成分的累计贡献率为 87.066%, 说明 3 个相互独立的综合指标包含了原始数据绝大部分信息,符合主成分分析要求。因此,选择前 3 个主成分作为有效成分,进行隶属函数分析并按大小排序, D 值越大,说明品种的耐寒性越强。如表 9 所示, 7 个菜薯

表8 各主成分的贡献率和累计贡献率

Table 8 Contribution rate and accumulated contribution rate of each principal component

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Accumulated contribution rate/%
PC1	14.024	70.235	70.235
PC2	2.086	10.659	80.894
PC3	1.017	6.172	87.066

品种中,福菜薯 18 的 D 值最大,为 0.896 9;其次是鄂菜薯 1 号和鄂菜薯 10 号, D 值分别为 0.862 7、0.782 2;说明这 3 个品种的耐寒性较强。 D 值

较小的为阜菜 1 号和薯绿 1 号,分别为 0.148 7 和 0.076 4,说明这 2 个品种越冬后的生长、生理性能表现均较弱。

表9 7个菜薯品种的抗寒性综合评价

Table 9 Comprehensive evaluation of cold resistance in 7 leafy sweet potato varieties

品种名称 Variety name	隶属函数值 Membership value			D 值 D value	排名 Rank
	U1	U2	U3		
鄂菜薯 10 号 Ecaishu No. 10	0.900 1	0.459 5	0	0.782 2	3
台农 71 Tainong 71	0.233 7	0.653 0	0.790 1	0.324 3	4
福菜薯 18 Fucaishu 18	1	0.444 2	0.506 7	0.896 9	1
阜菜 1 号 Fucai No. 1	0.148 4	0	0.408 2	0.148 7	6
鄂菜薯 1 号 Ecaishu No. 1	0.899 5	0.561 8	0.966 4	0.862 7	2
蒲薯 53 Pushu 53	0.086 7	1	0.319 8	0.214 6	5
薯绿 1 号 Shulü No. 1	0	0.313 6	0.537 7	0.076 4	7

3 讨论与结论

3.1 低温胁迫对菜薯生长的影响

菜薯属于喜温短日照作物,生长受气温的影响较大,当最低气温低于 8 °C 时,菜薯叶片开始萎蔫发黄、植株停止生长、甚至枯死^[6]。菜薯的抗逆性受遗传和环境条件的共同作用^[5]。本研究发现,7 个菜薯品种的叶色均为绿色,其中鄂菜薯 10 号、福菜薯 18 和鄂菜薯 1 号这 3 个品种产生的分枝数多,生长势强。台农 71、蒲薯 53、薯绿 1 号,阜菜 1 号的生长势相对较弱,分枝相对较少。分枝数多,生长势强,意味着低温胁迫下菜薯具有更高的茎尖产量的潜力。2023—2024 年越冬大棚内平均气温较 2024—2025 年同时期大棚温度低 1~2 °C,最终表现为 2023—2024 年大多数菜薯品种茎尖鲜质量低于 2024—2025 年,可能是因为在基因型相同的情况下,较低的温度会导致作物体内酶活性下降,光合能力减弱,进而导致茎尖减产,这与王新欣等^[17]对大豆的研究结论一致。菜薯茎尖鲜质量与越冬成活率和扩繁系数均呈极显著正相关,抗寒性强的菜薯品种如鄂菜薯 10 号、福菜薯 18,越冬成活率较高,扩繁系数较大,菜薯茎尖鲜质量较大;抗寒性弱的品种,越冬成活率较低,菜薯茎尖鲜质量也相应较

小。因此,在选育适宜黄淮地区的菜薯新品种时,应侧重选择茎尖鲜质量较大的菜薯品种,其越冬成活率及扩繁系数相对较高,可更好地适应菜薯在黄淮地区的越冬环境。

3.2 低温胁迫对菜薯光合性能的影响

低温胁迫会破坏植物叶绿体结构,导致光合系统电子传递受阻,从而影响植物的光合作用。前人对黄瓜^[18]、小麦^[19]的研究表明,叶绿体对低温胁迫的反应最为敏感,叶绿素被分解,光合能力下降。具体表现为 P_n 、SPAD 值、LAI 下降。在本研究中,不同品种表现不同,其中越冬成活率较高的品种如福菜薯 18、鄂菜薯 1 号,其光合性能较强,LAI、SPAD 值较高;越冬成活率较低品种如阜菜 1 号,光合性能较弱,LAI、SPAD 值均较低,这与前人研究一致。

3.3 低温胁迫对菜薯生理生化指标的影响

低温胁迫下,细胞内的 SOD、POD 可以消除自身活性氧自由基,使细胞内自由基维持在较低水平^[20]。品种的抗寒性与植物体内的抗氧化酶活性及渗透调节物质含量关系密切^[21-22]。张小贝等^[23]研究表明,菜用甘薯叶片中 POD 活性、可溶性蛋白含量均会随着胁迫温度的降低而升高,但不同品种表现不同,抗寒性差异较大;崔强旺等^[24]通过对 13 个叶菜型甘薯品种的抗寒性研究表明,耐寒能力强的品

种 POD 活性较强;康冬鸽等^[25]研究认为,随低温胁迫的加剧,木薯的 POD、SOD 活性种间差异不显著。本研究对 7 个菜用甘薯品种进行越冬栽培试验,结果表明不同菜薯品种在相同越冬条件下叶片的 POD 活性、SOD 活性、CAT 活性以及 MDA、Pro 含量均差异较大。其中,鄂菜薯 10 号 SOD、POD 活性最高,MDA 含量较低,抗寒能力较强,台农 71、薯绿 1 号 MDA 含量较高,表明细胞膜脂过氧化程度最严重。鄂菜薯 1 号 CAT 活性最高,其次为鄂菜薯 10 号、福菜薯 18;福菜薯 18 的 Pro 含量最高,显著高于其他品种,MDA 含量和 EC 值均较低;表明不同品种间的耐寒能力不同,具体表现在对酶活性的调节能力不同,酶活性的提高可以有效清除细胞中富余的活性氧自由基等有毒物质,在维持细胞稳定性方面起着重要作用,这与耿亚林等^[26]的研究结果一致。

3.4 菜薯各耐寒性指标的相关性分析

耐寒性相关指标间存在显著或极显著相关性,可反映不同生理过程在低温胁迫下的协同变化^[27]。本研究结果表明,菜用甘薯茎尖鲜质量与 P_n 、POD 活性、Pro 含量均呈显著正相关,与 MDA 含量呈显著负相关,与 SPAD 值、越冬成活率和扩繁系数均呈极显著正相关;扩繁系数与 Pro 含量、茎尖鲜质量、越冬成活率均呈极显著正相关,与 P_n 、POD 活性、SOD 活性、SPAD 值均呈显著正相关,与 MDA 含量呈显著负相关,这可能反映了植物在应对低温胁迫时的生理响应机制^[28]。通过主成分分析法一共提取出 3 个主成分,解释了 87.066% 的变异,通过隶属函数分析将 7 个菜薯品种的耐寒性进行综合评价,根据 D 值大小排序,耐寒性最强的为福菜薯 18,其次为鄂菜薯 1 号和鄂菜薯 10 号,耐寒性较差的为阜菜 1 号和薯绿 1 号。

综上所述,黄淮地区菜薯育苗可选择耐寒能力较强的菜薯品种福菜薯 18,以解决菜用甘薯薯苗越冬困难的问题,保证薯苗的持续供应。

参考文献

- [1] 曾燕楠,陈德荣,程润东,等.菜用甘薯菜干烘干式加工技术探讨[J].江苏农业科学,2013,41(7):234-235.
- [2] LI M S, JANG G Y, LEE S H, et al. Comparison of functional components in various sweet potato leaves and stalks[J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(1):97-103.
- [3] HUANG Z L, WANG B, EAVES D H, et al. Phenolic compound profile of selected vegetables frequently consumed by African Americans in the southeast united states[J]. Food Chemistry, 2007, 103(4):1395-1402.
- [4] 杨士辉.值得开发的营养保健蔬菜甘薯茎尖[J].蔬菜,1999(3):16.
- [5] 张雄坚,房伯平,陈景益,等.甘薯资源耐寒性调查[J].广东农业科学,2008(增刊1):67-68.
- [6] 罗晓锋,涂前程,乔锋,等.优质菜用型甘薯新品种“福菜薯 18 号”露地越冬栽培技术[J].福建农业科技,2014(7):44-45.
- [7] 晓春.利用大棚培育越冬甘薯苗好[J].农村实用技术,2007(12):30.
- [8] 李建国,朱德雄,肖义芳,等.保护地叶用薯越冬保苗栽培技术[J].长江蔬菜,2012(11):28-29.
- [9] 陆淑韵,刘庆昌,李惟基.甘薯育种学[M].北京:中国农业出版社,1998.
- [10] 李合生,王学奎.现代植物生理学[M].4版.北京:高等教育出版社,2019.
- [11] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].3版.北京:高等教育出版社,2015.
- [12] 职明星,李秀菊.脯氨酸测定方法的改进[J].河南科技学院学报(自然科学版),2005,33(4):10-12.
- [13] 赵世杰,许长成,邹琦,等.植物组织中丙二醛测定方法的改进[J].植物生理学通讯,1994,30(3):207-210.
- [14] 田媛,李丰,王东勇,等.矮壮素对改善芝麻机收农艺性状的作用及其对光合生理的影响[J].江苏农业科学,2024,52(5):128-133.
- [15] 李遥.低温胁迫下叶菜型甘薯耐寒生理响应及筛选鉴定[D].重庆:西南大学,2022.
- [16] 江苏省农业科学院.中国甘薯栽培学[M].上海:上海科学技术出版社,1984.
- [17] 王新欣,赵晶晶,冯乃杰,等.低温胁迫对大豆花期不同冠层叶片生理活性及产量的影响[J].大豆科学,2020,39(2):252-259.
- [18] 刘鸿先,曾韶西,王以柔,等.低温对不同耐寒力的黄瓜(*Cucumis sativus*)幼苗子叶各细胞器中超氧化物歧化酶(SOD)的影响[J].植物生理学报,1985,11(1):48-57.
- [19] 范博.低温胁迫下 ABA 诱导冬小麦抗氧化防护系统的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [20] 龚双军,李国英,杨德松,等.不同棉花品种苗期抗寒性及其生理指标测定[J].中国棉花,2005,32(3):16-17.
- [21] 孟凡珍,张振贤,于贤昌,等.田间低温胁迫对大白菜某些理化特性的影响研究[J].中国生态农业学报,2005,13(2):84-86.
- [22] 王易振,杨治国,曾祥琼,等.低温处理对青蒿叶片脯氨酸、SOD 和 CAT 的含量及蛋白质的影响[J].基因组学与应用生物学,2010,29(5):927-930.
- [23] 张小贝,朱国鹏,南文卓,等.隶属函数法对 5 种菜用甘薯耐寒性的评价[J].热带生物学报,2016,7(4):450-456.
- [24] 崔强旺,曹子怡,贾光红,等.低温胁迫对 4 个菜用甘薯品种生理生化特性的影响[J].分子植物育种,2018,16(17):5804-5811.
- [25] 康冬鸽,李瑞梅,胡新文,等.低温胁迫下木薯几种保护酶活性变化及其与耐寒性的关系[J].热带作物学报,2009,30(7):908-911.
- [26] 耿亚林,李瑶,潘攀,等.叶菜型甘薯资源耐寒性评价体系研究[J].西南农业学报,2023,36(3):532-540.
- [27] 许祖元,陈立,杨宝婷,等.马大杂交相思低温生理响应及耐寒性评价[J/OL].广西师范大学学报(自然科学版),1-12[2025-12-31].<https://link.cnki.net/urlid/45.1067.N.20251231.1247.002>
- [28] 崔芸瑜,何应会,杨日升,等.低温胁迫下不同品种油梨生理响应及耐寒性评价[J].中南林业科技大学学报,2024,44(12):97-105.