

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.10.003

宗继锴, 陈培涛, 罗青青, 等. 甘薯抗旱品系(种)的筛选及其生理特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(10): 21-31.

甘薯抗旱品系(种)的筛选及其生理特征分析

宗继锴, 陈培涛, 罗青青, 赵腾飞,
高纪龙, 秦瑞华, 傅玉凡

西南大学 生命科学学院/重庆市甘薯工程技术研究中心, 重庆 400715

摘要: 采用 20% PEG6000 霍格兰培养液处理 48 h 的方法对 71 个甘薯育种品系和 22 个品种(统称为品系)茎尖模拟干旱胁迫, 根据茎尖生根数(R)、茎尖鲜质量减少度(F)、叶片相对含水量减少度(W) 3 项指标的隶属函数平均值初步评价 93 份甘薯育种品系的抗旱能力, 并在其中选取 7 个抗旱能力最强的品系与 7 个抗旱能力最弱的品系测定干旱胁迫处理后叶片的丙二醛、蛋白质、超氧阴离子、叶绿素 a、叶绿素 b 的质量分数, 比较和分析两类群体在干旱胁迫下的生理响应差异, 以期筛选出抗旱甘薯新品种和种质资源. 结果表明: 干旱胁迫下的 R , F 和 W 以及抗旱能力初步评价 D_1 值在 93 个甘薯品系间差异有统计学意义, 其中有 35 个品系抗旱能力优于公认的抗旱品种潮薯 1 号. 7 个抗旱能力强品系群体的 R , F , W 以及丙二醛抗旱系数(M)、叶绿素 a 抗旱系数(C_a)和叶绿素 b 抗旱系数(C_b)极显著优于 7 个抗旱能力弱品系群体. 通过该干旱胁迫下的形态和生理响应特征的测定分析和抗旱能力综合评价, 初步筛选出抗旱种质资源 XS161819, 21-F-4, 21-P-19, 绵紫薯 9 号和抗旱新品种 XS160615, 可用于进一步大田抗旱鉴定及其分子机制研究.

关键词: 甘薯; 抗旱性; 品系; 茎尖生根数; 生理指标

中图分类号: S531 文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)10-0021-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Screening Drought-resistant Sweetpotato Breeding Lines and Analysis of Their Physiological Characteristics

ZONG Jikai, CHEN Peitao, LUO Qingqing,
ZHAO Tengfei, GAO Jilong, QIN Ruihua, FU Yufan

School of Life Science, Southwest University/Engineering and Technology Research Center for
Sweetpotato of Chongqing, Chongqing 400715, China

收稿日期: 2023-03-25

基金项目: 财政部和农业农村部 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-10-SYZ15); 重庆市农业农村委薯类科企联合体项目.

作者简介: 宗继锴, 硕士研究生, 主要从事甘薯遗传育种研究.

通信作者: 傅玉凡, 博士, 研究员.

Abstract: Vine tips of 93 sweetpotato breeding lines (included 22 varieties) were drought stress treated for 48h with 20% PEG6000 in present study. Based on the average value of membership functions derived from the number of rooting (R), the reduction of fresh weight of vine tip (F) and the reduction of relative water content in the leaves (W) after 48h drought stress treatment, the preliminary evaluation results of drought-resistance abilities of 93 sweetpotato lines were obtained. Seven lines from the strongest drought resistance abilities group and seven lines from the weakest drought resistance abilities group were selected for further measurement and analysis of drought-resistance-coefficients of malondialdehyde, protein, superoxide anion, chlorophyll a, and chlorophyll b in leaves under drought stress, and to compare the differences in physiological response of the two groups under drought stress, in order to screening for the new drought-resistant sweetpotato varieties or germplasm resources. The results showed that under drought stress, there were significant differences among sweetpotato lines on (R), (F), (W), and the D_1 value of drought-resistance. There were 35 lines with better drought-resistance than that of the recognized drought-resistant variety Chaoshu No. 1. The (R), (F), (W), drought-resistance-coefficients of malondialdehyde (M), chlorophyll a (C_a), and chlorophyll b (C_b) of the seven strongest drought-resistance lines group were significantly superior to those of the seven weakest drought-resistance lines group. Through comprehensive evaluation of morphological and physiological response characteristics under drought stress among 93 sweetpotato lines, drought-resistant germplasm resources XS161819, 21-F-4, 21-P-19, Mianzishu No. 9, and new variety XS160615 were preliminarily screened out in present study for further field drought resistance identification and related molecular mechanisms study.

Key words: sweetpotato; drought-resistance; breeding line; rooting number; physiological index

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 是我国第 4 大粮食作物, 在我国具有重要的地位^[1]. 甘薯不仅富含淀粉等碳水化合物^[2-4], 还富含胡萝卜素、花青素和酚类等多种生物活性物质^[5-6], 具有增强免疫力、抗氧化、降血糖、抗心血管疾病和抗肿瘤等药理作用^[7-9].

随着生态环境的恶化和全球气候异常, 旱灾已成为一种常见的气象灾害. 中国是受旱灾影响最大的国家之一, 大规模的干旱灾害频发^[10]. 每年平均约有 2 443 万 hm^2 的农作物遭受干旱, 中国每年因干旱受到的经济损失巨大^[11]. 伏旱会导致根系吸收养分减少、甘薯叶片蒸发加快、茎叶生长受阻, 阻碍甘薯块根的生长和干物质积累等, 导致甘薯产量下降^[12-14]. 高温干旱同时会导致粉虱、麦蛾、斜纹夜蛾等病虫害区域性发生, 进一步导致产量降低^[15]. 选育抗旱甘薯新品种是应对干旱对甘薯生产影响的重要途径之一^[16].

一直以来, 人们对植物耐旱性进行了大量的研究, 其中以人工模拟干旱的情况居多^[17]. 聚乙二醇 (Polyethyleneglycol, PEG) 是一种惰性的、较为理想的渗透调节剂, 如利用 PEG 溶液处理模拟土壤干旱来探究番茄、小麦、水稻等植物的抗旱机制^[18-20]. 对植物耐旱性鉴定的生理生化研究表明茎尖鲜质量减少度、茎尖生根数、相对含水量减少度、丙二醛质量分数等生理指标与植物抗旱性有着密切的联系, 可作为植物抗旱性的重要指标^[21-24].

本研究在对课题组育种进程中 93 个育种材料品系 (部分为育成品种) 干旱胁迫下的茎尖生根数、茎尖鲜质量减少度、叶片相对含水量减少度 3 项指标进行测定和隶属函数综合评价分析后, 选取 7 个抗旱能力强的与 7 个抗旱能力弱的供试材料进一步测定丙二醛、可溶性蛋白、超氧阴离子、叶绿素 a、叶绿素 b 的质量分数等生理指标, 并分析两类品种抗旱的生理特征差异, 以期能对甘薯新品系抗旱性能的进一步鉴定和抗旱种质资源的筛选与研究奠定基础.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本文供试材料来自西南大学重庆市甘薯工程技术研究中心合川实验农场基地的 71 个育种品系和 22 个品种(下文统称为品系), 它们的编号、名称和类型见表 1。

表 1 93 个供试甘薯品系的编号、名称、类型

编号	品系名称	类型	编号	品系名称	类型	编号	品系名称	类型
S1	忠薯 1 号	兼用	S32	XN1526-3	食用	S63	21-F-4	叶菜
S2	浙薯 1 号	兼用	S33	W50-13	淀粉	S64	21-F-33	叶菜
S3	渝泗薯 1 号	食用	S34	QJW-1	淀粉	S65	21-F-3	叶菜
S4	渝薯 27	淀粉	S35	G20-9	食用	S66	21-F-25	叶菜
S5	渝薯 15	淀粉	S36	CT18-5-8	食用	S67	21-F-14	叶菜
S6	徐薯 22	淀粉	S37	CT173306	食用	S68	21-F-11	叶菜
S7	心香	兼用	S38	21-P-9	叶菜	S69	20XN130-1	叶菜
S8	湘薯 203	兼用	S39	21-P-6	叶菜	S70	2019/1/15	叶菜
S9	W1925-3	淀粉	S40	21-P-45	叶菜	S71	2018-2-37	叶菜
S10	W1915-17	食用	S41	21-P-44	叶菜	S72	190PF0-2-1	叶菜
S11	万薯 21	食用	S42	21-P-39	叶菜	S73	18-6-47	淀粉
S12	商薯 19	淀粉	S43	21-P-37	叶菜	S74	18-6-46	淀粉
S13	宁紫薯 1 号	紫薯	S44	21-P-34	叶菜	S75	18-6-33H	食用
S14	绵紫薯 9 号	紫薯	S45	21-P-31	叶菜	S76	2018/5/23	食用
S15	绵薯 6 号	淀粉	S46	21-P-29	叶菜	S77	18-4-24dR	兼用
S16	龙薯 10 号	淀粉	S47	21-P-28	叶菜	S78	18-2-57	淀粉
S17	栗子香	食用	S48	21-P-27	叶菜	S79	18-2-5	淀粉
S18	晋薯 3 号	兼用	S49	21-P-26	叶菜	S80	18-2-47	淀粉
S19	济薯 25	淀粉	S50	21-P-24	叶菜	S81	18-2-44	食用
S20	黄香蕉	食用	S51	21-P-21	叶菜	S82	18-12-3	淀粉
S21	广紫薯 8 号	紫薯	S52	21-P-2	叶菜	S83	18-11-5	淀粉
S22	福薯 7-6	叶菜	S53	21-P-19	叶菜	S84	18-11-4	食用
S23	福菜薯 20	叶菜	S54	21-P-15	叶菜	S85	171404R	食用
S24	潮薯 1 号	饲料	S55	21-F-9	叶菜	S86	1672-1	食用
S25	XS190409	食用	S56	21-F-8	叶菜	S87	160608	食用
S26	XS161819	淀粉	S57	21-F-68	叶菜	S88	15-8-9	淀粉
S27	XS160615	食用	S58	21-F-63	叶菜	S89	173307	食用
S28	XS15-12-2	淀粉	S59	21-F-6	叶菜	S90	173306	食用
S29	XN1945-5	食用	S60	21-F-58	叶菜	S91	170407	食用
S30	XN1746-1	叶菜	S61	21-F-56	叶菜	S92	162611	淀粉
S31	XN1729-11	食用	S62	21-F-40	叶菜	S93	161837	食用

1.2 实验方法

1.2.1 采样方法

当甘薯处于茎叶盛长与薯块膨大期 90 d 时, 取 20~25 cm 的新鲜、无病、健康的茎尖, 在实验室的

1/2 霍格兰培养液中培养 24 h(3 次重复, 每重复 3 株茎尖)。

1.2.2 PEG 处理浓度及处理时间的确定

茎尖在 1/2 霍格兰培养液中培养 24 h 后随机选取 4 个甘薯品系茎尖, 转入含 10%, 20%, 30%, 35% PEG6000 的霍格兰培养液中培养, 在 0, 6, 12, 24, 48, 72, 96 h 分别拍照比较茎尖生长状况, 确定适宜的 PEG 处理浓度与处理时间。

1.2.3 93 个甘薯品系 3 项抗旱性指标的测定及抗旱性能力的初步评价

将 1/2 霍格兰培养液培养 24 h 的茎尖苗按照 1.2.2 实验结果(20% PEG6000 处理 48 h)进行干旱胁迫处理, 对照采用 1/2 霍格兰培养液培养。

1.2.3.1 茎尖生根数(R): 人工计数统计茎尖生根数。

1.2.3.2 茎尖鲜质量减少度(F):

$$F = M_2 / M_1$$

式中, M_2 指处理前的茎尖苗质量, M_1 指处理后的茎尖苗质量。

1.2.3.3 叶片相对含水量减少度(W):

$$W = [(M_3 - M_5) / (M_4 - M_5)] / [(m_3 - m_5) / (m_4 - m_5)] \times 100\%$$

式中, M_3 指处理后茎尖第 3 片叶鲜质量, M_4 指处理后茎尖第 3 片叶再次浸入蒸馏水 12 h 吸干表面水分后的鲜质量, M_5 指 M_4 叶片 115 °C 杀青 10 min 再 60 °C 干燥后的恒质量. m_3 , m_4 , m_5 分别为对照组相应数据。

1.2.3.4 综合抗旱能力的隶属函数评价: 每个品系 R , F 和 W 的隶属函数值

$$U_{X_j} = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad j = 1, 2, 3, \dots, 93$$

式中, U_{X_j} 为第 j 个品系某一指标的隶属函数值, X_j 表示第 j 个品系指标测定值, X_{\min} , X_{\max} 表示该指标在 93 个品系间的最小值和最大值. 每一个品系 3 个指标的隶属函数值的平均值为该品系的综合抗旱能力初步评价得分 D_1 值。

1.2.4 7 个抗旱能力强品系和 7 个抗旱能力弱品系生理指标的测定和抗旱性分析

根据 1.2.3.4 的 D_1 值在 93 个供试材料中的排名, 分别选取排名前 7 位品系和排名后 7 位品系再次按照 1.2.2 实验结果(20% PEG 处理 48 h)进行干旱胁迫处理, 对照采用 1/2 霍格兰培养液培养, 测定生理指标及进行分析评价。

1.2.4.1 叶片丙二醛质量分数测定: 参考刘新等^[25]的测定方法, 并稍加改进. 取 1.00 g 甘薯叶片加入 2 mL 10% 的三氯乙酸(TCA)溶液, 研磨至匀浆, 后加入 8 mL 10% TCA 溶液继续研磨, 匀浆后 4 000 r/min 离心 20 min, 取上清液 2 mL, 加入 2 mL 0.6% 硫代巴比妥酸(TBA), 沸水反应 15 min, 冷却后离心, 测定上清液的 600 nm, 450 nm, 532 nm 吸光度, 计算丙二醛抗旱系数(M)为

$$M = M_{\text{CK}} / M_{\text{EG}}$$

式中, M_{EG} 为实验组丙二醛质量分数, M_{CK} 为对照组丙二醛质量分数。

1.2.4.2 叶片可溶性蛋白质量分数测定: 参照刘小华等^[26]的测定方法, 并稍加改进. 取 1.00 g 甘薯叶片用 10 mL 50 mmol 磷酸缓冲液(pH 值为 7.8)研磨成匀浆, 4 000 r/min 离心 20 min, 取 0.1 mL 上清液, 加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 试剂, 充分混合, 放置 2 min 后测定 595 nm 吸光度, 可溶性蛋白抗旱系数(P)为

$$P = P_{\text{CK}} / P_{\text{EG}}$$

式中, P_{EG} 为实验组可溶性蛋白质量分数, P_{CK} 为对照组可溶性蛋白质量分数。

1.2.4.3 叶片超氧阴离子质量分数测定: 参考刘新等^[25]的测定方法, 并稍加改进. 取 1.00 g 甘薯叶片用 10 mL 50 mmol 磷酸缓冲液(pH 值为 7.8)研磨成匀浆, 4 000 r/min 离心 20 min, 取 0.5 mL 上清液, 加入

0.5 mL 50 mmol 磷酸缓冲液和 1 mL 1 mmol/L 盐酸羟胺, 混匀后于 25 °C 水浴锅中保温 1 h, 然后再加入 1 mL 17 mmol/L 对氨基苯磺酸和 1 mL 7 mmol/L α -萘胺, 混匀后于 25 °C 水浴锅中保温 20 min, 后测定 530 nm 吸光度, 计算超氧阴离子抗旱系数(O)为

$$O = O_{\text{CK}} / O_{\text{EG}}$$

式中, O_{EG} 为实验组超氧阴离子质量分数, O_{CK} 为对照组超氧阴离子质量分数.

1.2.4.4 叶片叶绿素 a、叶绿素 b 质量分数测定: 参考刘新等^[25]的测定方法, 并稍加改进. 取 0.20 g 甘薯叶片, 去除叶脉后剪成 0.2 cm 左右的细丝, 然后加入 10 mL 无水乙醇和丙酮(1:1)混合试剂, 暗处浸提 24 h, 离心取上清液, 测定上清液的 663 nm, 646 nm, 470 nm 吸光度, 计算叶绿素 a 质量分数和叶绿素 b 质量分数, 叶绿素 a 抗旱系数(C_a)和叶绿素 b 抗旱系数(C_b)为

$$C_a = C_{a(\text{EG})} / C_{a(\text{CK})}$$

$$C_b = C_{b(\text{EG})} / C_{b(\text{CK})}$$

式中, $C_{a(\text{EG})}$ 为实验组叶绿素 a 质量分数, $C_{a(\text{CK})}$ 为对照组叶绿素 a 质量分数; $C_{b(\text{EG})}$ 为实验组叶绿素 b 质量分数, $C_{b(\text{CK})}$ 为对照组叶绿素 b 质量分数.

1.2.4.5 综合抗旱能力分析: 参照 1.2.3.4 计算隶属函数值, 计算生理指标权重值(W)为

$$W_i = C_i / \Sigma C_i$$

式中, W_i 为第 i 项生理指标抗旱系数的权重, C_i 为第 i 项生理指标抗旱系数的变异系数. 品系的综合抗旱能力(D_2)为

$$D_2 = \Sigma[W_i \times U(X_i)]$$

式中, $U(X_i)$ 为第 X 个品种的第 i 项生理指标的隶属函数值.

1.2.4.6 主成分综合评价得分分析

$$Y = \Sigma F_{jn} \times E_i$$

式中, Y 为主成分分析法得到的第 n 品系的主成分综合分值, F_{jn} 为第 n 个品系累积贡献率大于 80% 第 j 个主成分的得分值, E_i 为第 i 个主成分的方差贡献率.

1.3 数据处理

利用 Excel 2010 对数据进行整理及计算, 利用 SPSS 23.0 进行主成分与相关性分析.

2 结果与分析

2.1 PEG 浓度和处理时间选择

福薯 7-6、忠薯 1 号、渝薯 1 号、商薯 19 在 10% PEG6000 和 20% PEG6000 处理下, 培养的甘薯苗生出的根都有不同程度的生长, 总体上不如在 0% PEG6000 培养液条件下生长状况好. 20% PEG6000 处理下根生长比 10% PEG6000 处理下根生长更为缓慢, 其叶子萎蔫比 10% PEG6000 处理发生更早. 当 PEG6000 浓度达到 30% 以上, 6 h 根已经有缺水干枯的现象, 且没有新根发生; 处理 48 h 时, 部分品系甘薯叶片及茎萎蔫过于严重, 无法再进行后续实验. 这 4 个品系在 20% PEG6000, 30% PEG6000 处理下的植株形态如图 1. 选定 20% PEG6000 培养 48 h 的干旱胁迫处理方案开展后续实验.

2.2 93 个甘薯品系 20% PEG6000 模拟干旱处理后的抗旱能力初步评价及品系分类分析

在 93 个甘薯品系经过 20% PEG6000 模拟干旱处理 48 h 后的茎尖生根数(R)、茎尖鲜质量减少度(F)和相对含水量减少度(W)的统计分析见表 2. 独立样本 t 检验分析表明, 每项指标在 93 个品系间差异有统计学意义. 3 项指标的隶属函数初步评价 D_1 值变幅达 0.65, 品系间抗旱能力差异也有统计学意义. 93 个品系 D_1 平均值为 0.48, 有 43 个品系 D_1 值高于这个平均值, 有 35 个品系 D_1 值超过公认的抗旱品种潮薯 1 号^[27-29]的 D_1 值(0.52).

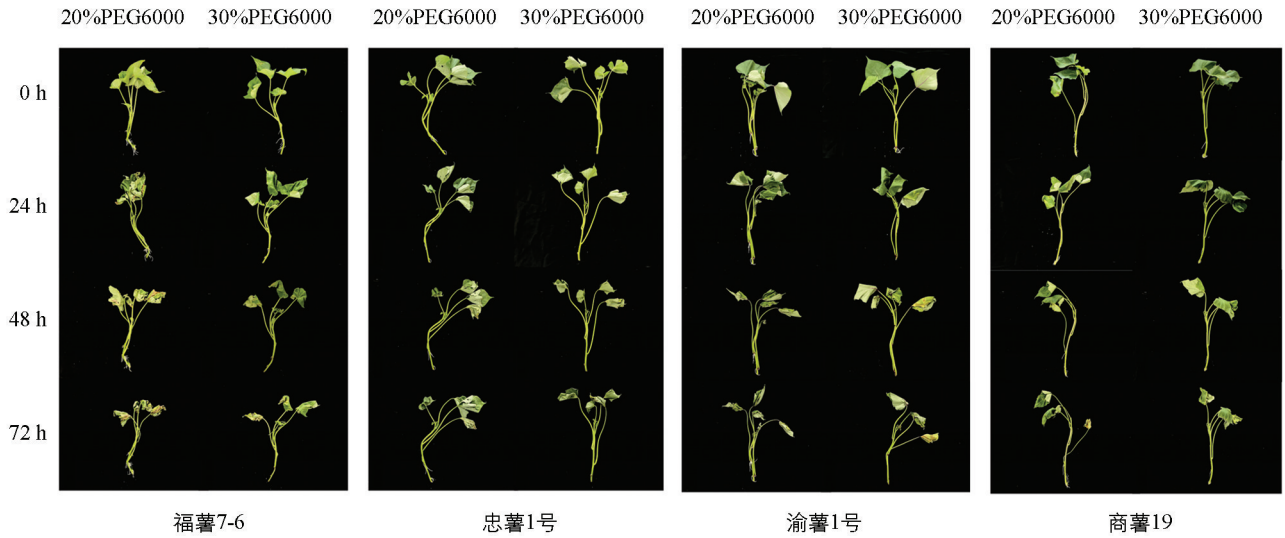


图 1 4 个品系甘薯在 20%, 30% PEG6000 浓度下的生长情况

表 2 93 个甘薯品系 20% PEG6000 模拟干旱处理后的生长情况及抗旱性综合得分的统计

项目	茎尖生根数(R)	茎尖鲜质量减少度(F)	相对含水量减少度(W)	D_1 值
最大值	47.33	0.82	0.87	0.77
最小值	3.33	0.38	0.57	0.12
平均值	19.96	0.60	0.76	0.48
变异系数/%	52.23	17.05	8.60	31.36

6 类甘薯的茎尖生根数(R)、茎尖鲜质量减少度(F)和相对含水量减少度(W)及隶属函数初步评价 D_1 值比较分析结果见表 3。隶属函数初步评价 D_1 值和茎尖鲜质量减少度在品系类型间差异无统计学意义, 淀粉型生根能力最差, 饲料型和叶菜型的茎尖鲜质量减少度最小。总体而言每类型甘薯都有抗旱能力强的品系和抗旱能力弱的品系。

表 3 不同类型甘薯 20% PEG6000 模拟干旱处理后分类分析

类型	种类数	茎尖生根数(R)	茎尖鲜质量减少度(F)	相对含水量减少度(W)	D_1 值
兼用型	6	20.83bcB	0.77aA	0.57abA	0.49aA
食用型	24	24.35bcB	0.77aA	0.60aA	0.51aA
淀粉型	21	14.46cB	0.77aA	0.62aA	0.45aA
紫薯型	3	27.11bB	0.80aA	0.63aA	0.60aA
叶菜型	38	18.58bcB	0.76aA	0.59abA	0.47aA
饲料型	1	44.67aA	0.73aA	0.47bA	0.52aA

注: 小写字母不同表示 $p < 0.05$, 大写字母不同表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义。

D_1 排名前 7 位品系分别是 XS160615, 21-F-4, XS161819, XN1729-11, XN1526-3, 绵紫薯 9 号, 21-P-19, D_1 值介于 0.70~0.77, 排名后 7 位品系分别是 18-11-5, 21-P-21, 21-P-26, 忠薯 1 号, 21-P-34, 18-12-3 和 商薯 19, D_1 值介于 0.12~0.27。这 14 个品系进一步进行 20% PEG6000 处理, 测定和分析其生理指标。

2.3 7 个抗旱能力强的品系和 7 个抗旱能力弱的品系的抗旱能力验证

7 个抗旱能力强的品系和 7 个抗旱能力弱的品系经过 20% PEG6000 生长培养 48 h 后的茎尖生根数(R)、茎尖鲜质量减少度(F)、相对含水量减少度(W)、丙二醛抗旱系数(M)、可溶性蛋白抗旱系数(P)、

超氧阴离子抗旱系数(O)、叶绿素 a 抗旱系数(C_a)和叶绿素 b 抗旱系数(C_b)测定与计算结果表明, 这 8 项指标不仅在 14 个品系之间差异有统计学意义, 在同等抗旱能力强的品系之间或同等抗旱能力弱的品系之间差异也有统计学意义. 形态与生理指标的隶属函数分析得到的综合抗旱能力 D_2 值及 7 个抗旱能力强的品系和 7 个抗旱能力弱的品系指标统计表明, XS161819, 21-F-4, 21-P-19, XS160615 和绵紫薯 9 号综合抗旱性能较好, 居于 14 个品系前 5 位(表 4).

表 4 7 个抗旱能力强的品系和 7 个抗旱能力弱的品系指标统计

品系	R	F	W	M	P	O	C_a	C_b	D_2
XS161819	25.33 dCD	0.87 aA	0.82 aA	0.77 aAB	0.81 abA	0.72 aA	0.89 abA	0.83 aA	0.83 aA
21-F-4	35.67 bcAB	0.84 abAB	0.77 abA	0.81 aA	0.88 aA	0.40 bcdBCD	0.84 abcAB	0.74 abABC	0.76 abABC
21-P-19	29.00 cdBC	0.86 aAB	0.69 bcAB	0.73 abABC	0.77 abABC	0.55 abAB	0.87 abAB	0.80 aAB	0.72 abcABC
XS160615	35.67 bcAB	0.84 abAB	0.72 bAB	0.70 abcABCD	0.76 abABC	0.40 bcdBCD	0.78 abcABC	0.71 abcABCDE	0.67 bedABC
绵紫薯 9 号	40.00 abA	0.82 abAB	0.61 cdBC	0.54 bcdBCDE	0.79 abAB	0.42 bcdBC	0.90 aA	0.74 abABC	0.67 bedABC
XN1526-3	44.00 aA	0.79 bB	0.59 cdBC	0.52 cdBCDE	0.72 abABC	0.33 cdeBCD	0.80 abcABC	0.73 abcABCD	0.61 cdBC
XN1729-11	25.00 dCD	0.85 aAB	0.77 abA	0.57 bcdABCDE	0.67 bcdABC	0.32 cdeBCD	0.84 abcAB	0.74 abABC	0.55 dC
21-P-34	16.67 eDE	0.64 deDE	0.42 dD	0.50 cdBCDE	0.78 bcdABC	0.40 bcdBCD	0.77 abcABC	0.69 abcABCDE	0.34 eD
忠薯 1 号	12.67 efEF	0.71 cCD	0.43 dD	0.43 dDE	0.79 abAB	0.28 deBCD	0.79 abcABC	0.71 abcABCDE	0.28 eD
21-P-26	11.00 efgEF	0.69 cdCDE	0.51 deCD	0.48 dCDE	0.64 bcdABC	0.50 bcAB	0.65 defC	0.54 dDE	0.28 eD
21-P-21	6.00 fgF	0.71 cC	0.51 deCD	0.51 cdBCDE	0.67 bcdABC	0.31 cdeBCD	0.77 bcdABC	0.59 cdCDE	0.23 eDE
18-11-5	17.00 eDE	0.63 eE	0.53 deCD	0.43 dDE	0.52 dBC	0.19 dCD	0.72 cdefBC	0.61 bedBCDE	0.20 eDEF
18-12-3	6.67 fgF	0.68 cdCDE	0.51 deCD	0.40 dE	0.53 cdBC	0.13 dD	0.64 fC	0.54 dDE	0.06 fEF
商薯 19	4.33 gF	0.66 deCDE	0.45 dD	0.38 dE	0.62 bcdABC	0.16 dCD	0.65 efC	0.53 dE	0.05 fF

注: 小写字母不同表示 $p < 0.05$, 大写字母不同表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义.

本文把抗旱能力强的 7 个品系集合体称为抗旱群体, 7 个抗旱能力弱的品系集合体称为不抗旱群体, 两个群体的茎尖生根数(R)、茎尖鲜质量减少度(F)、相对含水量减少度(W)和丙二醛抗旱系数(M)的变幅范围完全没有交叉, 叶绿素 a 抗旱系数(C_a)和叶绿素 b 抗旱系数(C_b)变幅交叉较少, 而可溶性蛋白抗旱系数(P)和超氧阴离子抗旱系数(O)交叉较多(表 5). R , F , W , M , C_a 和 C_b 在抗旱与不抗旱两个品系群体之间差异有统计学意义($p < 0.01$), P 和 O 在抗旱与不抗旱两个品系群体之间差异有统计学意义($p < 0.05$). 综合抗旱能力 D_2 值在两个品系群体之间差异有统计学意义($p < 0.01$). 初步表明 R , F , W , M , C_a 和 C_b 是抗旱品系和不抗旱品系之间最为显著的差异特征.

表 5 抗旱群体和不抗旱群体的 9 项指标的变幅、平均数和变异系数

群体	指标	R	F	W	M	P	O	C_a	C_b	D_2 值
抗旱群体	最小值	25.00	0.79	0.59	0.52	0.67	0.32	0.78	0.71	0.55
	最大值	44.00	0.87	0.82	0.81	0.88	0.72	0.90	0.83	0.83
	平均值	33.52aA	0.84aA	0.71aA	0.66aA	0.77aA	0.45aA	0.85aA	0.76aA	0.69aA
	变异系数/%	21.81	3.21	12.11	17.88	8.70	31.33	5.29	5.66	9.32
不抗旱群体	最小值	4.33	0.63	0.42	0.38	0.52	0.16	0.64	0.53	0.05
	最大值	16.67	0.71	0.53	0.51	0.79	0.50	0.79	0.71	0.34
	平均值	10.62bB	0.67bB	0.48bB	0.45bB	0.65bA	0.28bA	0.71bB	0.60bB	0.21bB
	变异系数/%	48.31	4.78	9.38	11.11	16.46	48.21	9.30	12.17	11.20

注: 小写字母不同表示 $p < 0.05$, 大写字母不同表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义.

2.4 14 个品系主成分分析及其主成分得分

14 个品系 8 项指标的主成分分析表明, 这 8 项指标可简化为累积贡献度大于 80% 的两个独立主成分, 累计贡献率为 83.2%, 可代表原来所有指标的绝大部分信息, 主成分 1(F1)中主要综合了 $W(0.95)$, $M(0.73)$, $F(0.85)$ 和 $R(0.67)$, 代表原始数据信息量的 74.39%. 主成分 2(F2)中主要综合了 $P(0.91)$, $O(0.72)$, $C_a(0.75)$ 和 $C_b(0.76)$, 代表原始数据信息量的 8.81%. 14 个品系在两个主成分上的得分介于 -2.67~2.81 之间, 其中前 5 位分别是 XS161819 (2.81), 21-F-4(2.13), 21-P-19(2.02), 绵紫薯 9 号(1.39)和 XS160615(1.23).

2.5 14 个品系 8 项指标的相关性分析

进一步考察主成分载荷较大指标与其余指标的相关性发现, 抗旱群体与不抗旱群体的关键形态差异指标茎尖生根数(R)与茎尖鲜质量减少度(F), 叶绿素 a 和叶绿素 b 抗旱系数呈极显著正相关(表 6).

表 6 8 项形态、生理指标及其与综合抗旱能力 D_2 的相关系数

指标	M	P	O	W	F	R	C_a	C_b	D_2
M	1.00								
P	0.72**	1.00							
O	0.75**	0.65*	1.00						
W	0.87**	0.44	0.58*	1.00					
F	0.84**	0.63*	0.63*	0.90**	1.00				
R	0.63*	0.59*	0.42	0.64*	0.74**	1.00			
C_a	0.71**	0.76**	0.63*	0.66**	0.80**	0.72**	1.00		
C_b	0.86**	0.77**	0.67**	0.69**	0.81**	0.74**	0.94**	1.00	
D_2	0.90**	0.77**	0.76**	0.84**	0.91**	0.86**	0.87**	0.90**	1.00

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义.

20% PEG6000 处理 48 h 后的表现响应指标茎尖鲜质量减少度(F)不仅得益于与茎尖生根数(R)的极显著正向作用, 而且对 W 值, 叶绿素 a 和叶绿素 b 的抗旱系数和丙二醛抗旱系数(M)具有极显著正向效应。叶绿素 a、b 功能的维持进一步极显著增强丙二醛抗旱系数(M)和可溶性蛋白抗旱系数(P)。表明在干旱情形下, 生根能力强(本文具体指茎尖生根数多)的品系, 叶片鲜质量和相对含水量保持能力较强, 相对较强地维持了叶绿素的正常功能, 丙二醛、可溶性蛋白、超氧阴离子应急响应程度低; 生根能力弱(茎尖生根数少)的品系由于水分吸收总量的减少, 叶片里丙二醛、可溶性蛋白、超氧阴离子应急抗旱方面的代价相对高于生根能力强的品系。 D_2 值与 R , F , C_b 和 C_a 指标的相关系数大也印证了 R 对于抗旱能力的重要性。

3 讨论与结论

已有研究表明茎尖生根数(R)、茎尖鲜质量减少度(F)以及相对含水量减少度(W)是开展植物抗旱能力评价的可靠指标^[23-24, 30]。因此, 本文在确定 PEG6000 浓度为 20% 和时间为 48 h 干旱模拟处理方法的基础上, 对 93 个供试材料的茎尖生根数、茎尖鲜质量减少度和叶片相对含水量减少度进行测定与分析, 结果表明, 这 3 项指标在供试材料之间差异有统计学意义($p < 0.01$)。参照菊芋、桑树、马铃薯等种质抗旱性鉴定^[31-33]的隶属函数方法综合评价了 93 个品系的抗旱能力, 得到该供试材料的综合抗旱能力初步评价 D_1 值, 且有 35 个品系 D_1 值超过抗旱品种潮薯 1 号^[27-29]的 D_1 值。为了进一步确认抗旱能力, 将 93 个供试材料综合抗旱能力排名前 7 和后 7 共计 14 个供试材料分别构成抗旱和不抗旱两类群体, 进一步分析两类群体之间的生理抗旱指标差异, 以期进行生理指标印证抗旱能力。

PEG6000 是一种高分子渗透剂, 因其不能透过植物细胞壁和细胞膜, 不会给植物提供营养, 给植物提供一个高渗环境使植物细胞缓慢吸水, 类似干旱条件下较少吸水情形, 因此常用来模拟干旱胁迫^[34]。关于植物在干旱处理的生理响应指标较多, 贾学静等^[35]根据金叶吊兰的丙二醛质量分数、超氧阴离子质量分数等指标确定金叶吊兰叶片不同部位的抗旱能力。谢贤健等^[36]根据可溶性蛋白、叶绿素等形态和生理指标对 3 种岩生植物进行抗旱能力排名。Batool 等^[37]研究表明耐旱油菜品种表现出更高的叶绿素质量分数和较低的丙二醛质量分数。因此本文采用丙二醛抗旱系数(M)、可溶性蛋白抗旱系数(P)、超氧阴离子抗旱系数(O)、叶绿素 a 抗旱系数(C_a)和叶绿素 b 抗旱系数(C_b)对抗旱和不抗旱两类群体的抗旱能力做进一步测定与分析。结果表明抗旱群体的 P , O 显著高于不抗旱群体, 抗旱群体的 M , C_a 和 C_b 极显著高于不抗旱群体。主成分分析和相关系数分析表明, 品系茎尖生根数(R)对于茎尖鲜质量减少度(F)、叶片相对含水量减少度(W)和丙二醛抗旱系数(M)、叶绿素 a 抗旱系数(C_a)和叶绿素 b 抗旱系数(C_b)具有较强的正向影响。抗旱群体茎尖生根数变幅为 25.00~44.00, 平均值为 33.52, 极显著高于不抗旱群体的平均值 10.62。植物根系首先会感知到干旱情况的发生, 并经过形态和生理代谢变化来吸收水分及营养^[38], 继而影响整个植株的生长与发育, 例如鲜质量及含水量的减少、膜脂氧化的发生^[29, 39], 光合作用减弱^[40]等。有研究表明抗旱植物的根系能通过垂直生长与增多伸展根数来增加根际面积, 从而提高根系的吸水量以供应植株的正常生长发育^[41-42]。根的数量、形态、分布和生理条件直接影响甘薯的抗旱强度^[43]。

甘薯是重要的粮食作物和食品加工原料之一, 在其大田生长的早、中期, 极易遭遇干旱灾害性天气, 生长和产量受到极大影响^[12]。选育抗旱品种是重要的干旱应对措施, 朱天亮等^[44]研究表明不同杂交类型组合后代出现抗旱品系的频率差异很大, 其中耐旱与耐旱的组合, 后代中出现耐旱、耐瘠的品种最多。因此, 要育出既拥有优良性状又耐旱的甘薯新品种, 亲本中至少有一方必须是耐旱的育种资源, 所以选育出耐旱、抗旱的甘薯种质资源是抗旱品种的选育、应对干旱灾害性天气的重要基础性工作。本研究通过在 93 份供试材料中初步筛选 7 个抗旱能力强的品种, 再进行 5 项抗旱生理指标的测定和验证, 筛选出 XS161819, 21-F-4, 21-P-19, 绵紫薯 9 号和 XS160615 共 5 个抗旱种质资源, 其中 XS161819 是高淀粉高产甘薯品系, 21-F-4 和 21-P-19 是叶菜用甘薯品系, 绵紫薯 9 号是已经通过行业组织机构鉴定

的高产紫肉甘薯品种, XS160615 是一个已经行业组织机构鉴定的熟食口感优的黄心食用型新品种. 这些抗旱品系、种质资源和品种将进行进一步大田抗旱鉴定和相关分子机制研究, 以期建立切实可行的实验室抗旱测定技术, 为进一步应用于抗旱甘薯新品种筛选育种或作为抗旱新品种推广奠定基础.

参考文献:

- [1] 王欣, 李强, 曹清河, 等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 483-492.
- [2] HUANG T T, ZHOU D N, JIN Z Y, et al. Effect of Debranching and Heat-moisture Treatments on Structural Characteristics and Digestibility of Sweetpotato Starch [J]. Food Chemistry, 2015, 187: 218-224.
- [3] 季蕾蕾, 孙红男, 木泰华. 12 种甘薯淀粉产品的理化和卫生指标分析 [J]. 食品科技, 2019, 44(3): 245-251, 255.
- [4] 王璐璐, 黄雨, 傅玉凡, 等. 甘薯淀粉相关性状变异性的分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 39-47.
- [5] 李静, 傅玉凡, 黄雨, 等. 10 个叶菜型甘薯品种茎尖性状的分析与评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 45-53.
- [6] AMOANIMAA-DEDE H, SU C T, YEBOAH A, et al. Flesh Color Diversity of Sweetpotato; an Overview of the Composition, Functions, Biosynthesis, and Gene Regulation of the Major Pigments [J]. Phyton, 2020, 89(4): 805-833.
- [7] MARCEL M R, CHACHA J S, OFOEDU C E. Nutritional Evaluation of Complementary Porridge Formulated from Orange-fleshed Sweetpotato, Amaranth Grain, Pumpkin Seed, and Soybean Flours [J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(2): 536-553.
- [8] WU X F, YAO H L, CAO X M, et al. Production of Vinegar from Purple Sweetpotato in a Liquid Fermentation Process and Investigation of Its Antioxidant Activity [J]. 3 Biotech, 2017, 7(5): 308.
- [9] LAVERIANO-SANTOS E P, LÓPEZ-YERENA A, JAIME-RODRÍGUEZ C, et al. Sweetpotato is not Simply an Abundant Food Crop; a Comprehensive Review of Its Phytochemical Constituents, Biological Activities, and the Effects of Processing [J]. Antioxidants, 2022, 11(9): 1648.
- [10] ZHANG Q, YAO Y B, LI Y H, et al. Causes and Changes of Drought in China: Research Progress and Prospects [J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(3): 460-481.
- [11] 杨艳颖, 毛克彪, 韩秀珍, 等. 1949-2016 年中国旱灾规律及其对粮食产量的影响 [J]. 中国农业信息, 2018, 30(5): 76-90.
- [12] 马代夫, 刘庆昌, 张立明. 中国甘薯 [M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2021.
- [13] SHENG M F, XIA H Q, DING H Z, et al. Long-term Soil Drought Limits Starch Accumulation by Altering Sucrose Transport and Starch Synthesis in Sweet Potato Tuberos Root [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(3): 30-53.
- [14] 张海燕, 汪宝卿, 冯向阳, 等. 不同时期干旱胁迫对甘薯生长和渗透调节能力的影响 [J]. 作物学报, 2020, 46(11): 1760-1770.
- [15] 康影. 甘薯病虫害绿色防控技术 [J]. 现代农业科技, 2019(3): 101, 104.
- [16] 傅玉凡, 杨新笋, 王庆美, 等. 高温干旱 [M] // 李强, 马代夫. 甘薯防灾减灾技术. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2022.
- [17] 曹清河, 李雪华, 戴习彬, 等. PEG-6000 模拟干旱胁迫对甘薯近缘野生种 *Ipomoea trifida* (Kunth) G. Don 幼苗生理生化指标的影响 [J]. 西南农业学报, 2016, 29(11): 2536-2541.
- [18] AYZAZ M, AHMAD R, SHAHZAD M, et al. Drought Stress Stunt Tomato Plant Growth and Up-regulate Expression of *SIAREB*, *SINCED3*, and *SIERF024* Genes [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 195: 48-55.
- [19] CUI G B, ZHAO Y F, ZHANG J L, et al. Proteomic Analysis of the Similarities and Differences of Soil Drought and Polyethylene Glycol Stress Responses in Wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Plant Molecular Biology, 2019, 100(4-5): 391-410.
- [20] MA L J, WANG L L, MEI Y X, et al. Cross Adaptation Tolerance in Rice Seedlings Exposed to PEG Induced Salinity and Drought Stress [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2016, 18(3): 535-541.
- [21] 王宁, 袁美丽, 陈浩, 等. 干旱胁迫及复水对入侵植物节节麦幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 草业学报, 2019,

28(1): 70-78.

- [22] 薛新平, 薄伟, 王松, 等. 鸢尾种质资源抗旱性综合评价及生理机制研究 [J]. 种子, 2022, 41(1): 49-55.
- [23] 张海燕, 解备涛, 姜常松, 等. 不同抗旱性甘薯品种叶片生理性状差异及抗旱指标筛选 [J]. 作物学报, 2022, 48(2): 518-528.
- [24] 马玉慧, 张小虎, 马小乐, 等. 干旱胁迫下春小麦品种(系)萌发期抗旱性鉴定与评价 [J]. 分子植物育种, 2022, 20(19): 6459-6473.
- [25] 刘新, 刘洪庆. 植物生理学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [26] 刘小华, 张美霞, 于春梅, 等. 考马斯亮兰法测定壳聚糖中蛋白的含量 [J]. 中国交通医学杂志, 2006, 20(2): 159-160.
- [27] 王洁, 赵路宽, 邓逸桐, 等. 光合参数用于甘薯抗旱性评价的适用性研究 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 89-94.
- [28] 周志林, 唐君, 金平, 等. 甘薯抗旱鉴定及早胁迫对甘薯叶片生理特性的影响 [J]. 西南农业学报, 2016, 29(5): 1052-1056.
- [29] 张明生, 谈锋, 张启堂. 快速鉴定甘薯品种抗旱性的生理指标及方法的筛选 [J]. 中国农业科学, 2001, 34(3): 260-265.
- [30] 张海燕, 解备涛, 汪宝卿, 等. 不同甘薯品种抗旱性评价及耐旱指标筛选 [J]. 作物学报, 2019, 45(3): 419-430.
- [31] 张海旺, 钟启文, 娄祥云, 等. 干旱胁迫对不同基因型菊芋生理特性的影响 [J]. 植物生理学报, 2022, 58(12): 2312-2320.
- [32] 刘丹, 邱长玉, 李标, 等. 用隶属函数法综合评价 9 个实用桑树品种的耐旱性 [J]. 蚕学通讯, 2022, 42(4): 1-11.
- [33] 李丰先, 罗磊, 李亚杰, 等. 基于 PCA 和隶属函数法分析的马铃薯创新种质抗旱性鉴定与分类 [J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(11): 141-147.
- [34] 何正付, 王凤立, 柏新盛. PEG6000 和甘露醇模拟干旱胁迫效应比较研究 [J]. 安徽农学通报, 2019, 25(10): 19, 40.
- [35] 贾学静, 董立花, 丁春邦, 等. 干旱胁迫对金心吊兰叶片活性氧及其清除系统的影响 [J]. 草业学报, 2013, 22(5): 248-255.
- [36] 谢贤健, 兰代萍, 白景文. 三种野生岩生草本植物的抗旱性综合评价 [J]. 草业学报, 2009, 18(4): 75-80.
- [37] BATOOL M, EL-BADRI A M, WANG Z K, et al. Rapeseed Morpho-physio-biochemical Responses to Drought Stress Induced by PEG-6000 [J]. Agronomy, 2022, 12(3): 579-599.
- [38] DINNENY J R. Developmental Responses to Water and Salinity in Root Systems [J]. Annual Review of Cell and Developmental Biology, 2019, 35: 239-257.
- [39] 代崇雯, 刘亚敏, 刘玉民, 等. 3 种外源物质对干旱胁迫下红椿生理特性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 48-56.
- [40] VAN HEERDEN P D R, LAURIE R. Effects of Prolonged Restriction in Water Supply on Photosynthesis, Shoot Development and Storage Root Yield in Sweetpotato [J]. Physiologia Plantarum, 2008, 134(1): 99-109.
- [41] SHOAI B M, BANERJEE B P, HAYDEN M, et al. Roots' Drought Adaptive Traits in Crop Improvement [J]. Plants, 2022, 11(17): 2256-2276.
- [42] YAN S Y, WENG B S, JING L S, et al. Adaptive Pathway of Summer Maize under Drought Stress: Transformation of Root Morphology and Water Absorption Law [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 1020553.
- [43] LI S P, ZHAO L, ZHANG S H, et al. Effects of Nitrogen Level and Soil Moisture on Sweetpotato Root Distribution and Soil Chemical Properties [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(1): 536-546.
- [44] 朱天亮, 杨立明. 甘薯耐旱性的遗传趋势及其与性状的相关 [J]. 福建农业科技, 1985(4): 25-26.