

3个彩色马铃薯新品种幼苗的抗旱性研究

姜超^{1,2}, 于卓¹, 于肖夏^{1*}, 宋昌海¹

(1. 内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010019; 2. 呼伦贝尔学院, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要:为深入了解干旱胁迫对彩色马铃薯幼苗生长情况及生理指标的影响,并明确本课题组选育出的3个彩色马铃薯新品种紫彩1号、紫彩2号和紫彩3号的抗旱能力,以3个新品种的父本黑美人为对照,利用不同浓度的聚乙二醇(PEG-6000)溶液模拟干旱胁迫处理供试品种的脱毒幼苗,观测分析不同强度干旱胁迫条件下植株表观生长情况、根系生长变化以及叶片脯氨酸(Pro)含量、细胞质膜相对透性和丙二醛(MDA)含量等生理指标,并采用平均隶属函数法综合评价4个马铃薯品种脱毒幼苗的抗旱性。试验结果表明:随着聚乙二醇(PEG-6000)胁迫强度的增加,3个新品种的植株及根系生长状况受干旱胁迫的影响小于对照品种黑美人;生理指标分析结果显示,各供试品种脱毒苗叶片的Pro含量、细胞质膜相对透性和MDA含量均随着聚乙二醇(PEG-6000)胁迫强度的增加呈不同程度的增加趋势,其中3个彩色马铃薯新品种的细胞质膜相对透性和MDA含量增加幅度小于对照品种黑美人,Pro含量增加幅度大于对照品种黑美人;由平均隶属函数综合分析结果判断,各品种的抗旱性由强到弱的次序为:紫彩3号>紫彩2号>紫彩1号>黑美人。

关键词:彩色马铃薯;新品种;抗旱性评价;生理指标

中图分类号:S532

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2022)02-0103-07

Study on the Drought Resistance of Three New Colored Potato Varieties

JIANG Chao^{1,2}, YU Zhuo¹, YU Xiaoxia^{1*}, SONG Changhai¹

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019; 2. College of Hulunbuir, Hulunbuir 021000, China)

Abstract: In order to further understand the effect of drought stress on the growth and physiological indexes of colored potato seedlings, and to determine the drought resistance ability of three new colored potato varieties Zicai 1, Zicai 2 and Zicai 3 were selected, and their male parent variety Heimeiren was used as the contrast in this study. The virus-free tissue culture seedlings of the tested potato varieties were treated with different concentrations of polyethylene glycol (PEG-6000) solution to simulate drought stress, and the physiological indexes such as plant apparent growth, root growth changes, Pro content, cell plasma membrane relative permeability and MDA content were observed and analyzed. The mean membership function method was used to evaluate the drought resistance of four potato varieties. The results showed that with the increase of PEG-6000 stress intensity, the effect of drought stress on the growth of plant and root of three new varieties was less than that of the control variety. The Pro content, cell membrane relative permeability and MDA content of the leaves of tissue cultured seedlings of each tested variety increased in different degrees with the increase of PEG-6000 stress intensity, while the increase range of Pro content was larger than that of Heimeiren, and the relative permeability of cytoplasmic membrane and the content of MDA of three new colored potato varieties were less than that of Heimeiren. According to the results of the comprehensive analysis of the average membership function, the order of drought resistance of each variety from strong to weak is Zicai 3 > Zicai 2 > Zicai 1 > Heimeiren.

Key words: Colored potato; New variety; Drought resistance evaluation; Physiological index

收稿日期:2020-01-18

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项(ZDZX2018019);内蒙古自治区科技计划重点项目(201602048);内蒙古农业大学科技成果转化专项资金动植物品种培育项目(YZGC2017006)

作者简介:姜超(1989-),女,副教授,博士,主要从事马铃薯遗传育种研究。

通讯作者:于肖夏,女,博士,副教授,E-mail: yuxiaoxia1985@sina.com

马铃薯作为四大主粮作物之一,为解决世界粮食安全问题发挥重要作用。在我国实施乡村振兴战略和全面建成小康社会,打赢脱贫攻坚战等政策背景下,马铃薯产业的发展面临前所未有的机遇。但随着近年来全球气候的变化,耕地总面积减少,干旱、半干旱耕地面积逐年扩大,水资源匮乏问题日益严重,马铃薯产业的可持续发展受到严重制约和挑战^[1-3]。水分是影响马铃薯产量形成和品质优劣的主要环境因子之一。水分亏缺条件下,马铃薯的生理指标、代谢调节、植株生长发育及根系生长等都会受到一定程度的影响,因此,产量的形成也会发生相应的变化。同时,马铃薯块茎的商品性和加工营养品质也会受到干旱胁迫的影响,如薯形改变、链状结薯、薯块周皮龟裂、空心以及因植株过早死亡造成淀粉等营养成分积累量不足等。

研究表明,不同基因型的马铃薯品种,水分胁迫处理后,植株的生长发育指标、地上部及地下部的表观形态学指标、根系活力、光合生理特性、内源激素、渗透调节物质、抗氧化酶活性、组织细胞的超微结构、抗旱基因表达量、蛋白组学变化等指标都会发生相应变化,说明不同马铃薯品种的抗旱能力存在一定差异^[4-8]。

在生产中,可通过创新耕作模式和改良栽培技术等方法减轻干旱对马铃薯产量和品质的影响^[9-10]。如合理施肥可提高植株耐旱能力^[9],配备水利设施可满足植株生长各个时期的水分需求,深旋松耕作可提高土壤水分供给能力以及马铃薯水分利用效率等^[11]。但选育抗旱性强的马铃薯品种则更加经济、高效。推广优良抗旱马铃薯品种对于合理利用水资源,减少化肥施用,减少人力、物力等生产成本,以及保持农业生产可持续发展等方面均具有重要意义。特别是我国北方一作马铃薯产区,如内蒙古中西部、河北北部以及甘肃等地区,水资源严重匮乏,灌溉设施不足。因此,在我国北方马铃薯旱作产区,选育抗旱性强、产量高、营养品质好、适应性广的马铃薯新品种是主要育种目标之一^[12]。近年来,国内外虽已育成一些抗旱性较强的马铃薯品种^[13-14],但适合在我国北方干旱半干旱马铃薯一作区大面积推广栽培的综合性状优良且特色鲜明的专用型马铃薯品种资源依然短缺,亟待开展此类品种的选育研究工作。

彩色马铃薯是马铃薯种质资源中较为特殊的类型,因其薯皮和薯肉中含有不同种类和含量的类黄酮化合物花青素,其块茎皮色和肉色呈红、

紫、黑等颜色。研究表明,紫肉马铃薯花青素具有清除自由基、抑制亚麻酸氧化等抗氧化性^[15];从紫色马铃薯中提取出的花青苷对雄激素非依赖性前列腺癌PC-3、Du1 45细胞的增殖能起到较好的抑制作用^[16]。彩色马铃薯的维生素C、蛋白质含量、氨基酸种类和含量等往往高于普通马铃薯品种。彩色马铃薯具有较高的蛋白质营养价值,具有广阔的开发利用前景^[17]。

彩色马铃薯种质资源相对较匮乏,现有的彩色马铃薯种质资源大多农艺性状较差,块茎商品薯性较差(如芽眼深、薯形差等),产量相对较低,抗病虫害、抗非生物逆境能力较差,生产中严重缺乏花青素含量高、高产、抗病虫害能力强、抗逆境能力强、综合性状突出且具有大面积推广潜力的彩色马铃薯优良品种,极大程度地限制彩色马铃薯产业的深化发展。目前国内外还未见有抗旱性强的彩色马铃薯品种的研究报道。

在MS液体培养基中分别加入5个浓度梯度的聚乙二醇(PEG-6000)溶液,模拟干旱胁迫环境条件,拟通过观测和分析植株表观生长状况、根系生长变化情况、脯氨酸(Pro)含量、细胞质膜相对透性和丙二醛(MDA)含量等数据,对本课题组选育出的彩色马铃薯新品种紫彩1号、紫彩2号和紫彩3号及对照品种黑美人的脱毒组培苗进行抗旱性综合评价,以鉴定其抗旱能力,为这3个新品种的栽培应用和推广种植提供一定的理论根据。

1 材料与方 法

1.1 试验品种

供试材料为3个彩色马铃薯新品种紫彩1号、紫彩2号和紫彩3号及对照彩色马铃薯品种黑美人的脱毒组培苗,由内蒙古农业大学农学院马铃薯育种研究中心保存提供。供试品种生育期、花青素含量及薯皮、薯肉颜色等特征如表1所示。

表1 供试彩色马铃薯品种主要特征

品种	生育期(d)	花青素含量(mg/kg)	薯皮颜色	薯肉颜色
紫彩1号	100	201.32	灰紫	紫色
紫彩2号	115	295.24	灰紫	深紫
紫彩3号	90	626.71	灰紫	黑紫
黑美人	90	112.08	紫色	紫色

1.2 试验设计

1.2.1 配制液体培养基

在MS液体培养基中加入不同量的聚乙二醇(PEG-6000)粉末,配成5个浓度梯度的培养基,

配方见表2。用1 mol/L NaOH溶液将培养基的pH值调至5.8~6.2。

表2 聚乙二醇(PEG-6000)MS液体培养基

处理	MS干粉 (g/L)	蔗糖 (g/L)	PEG-6000粉末 (g/L)	PEG-6000浓度 (%)
CK	40	25	0	0
T ₁	40	25	50	5
T ₂	40	25	100	10
T ₃	40	25	150	15
T ₄	40	25	200	20
T ₅	40	25	250	25

1.2.2 多层滤纸床的制作

制作多层滤纸床用于将组培苗固定于液体培养基中培养。参考李建武等^[18]的方法,将定性滤纸叠成6层后制作成规格为4.5 cm×4.5 cm×1.5 cm的滤纸床,每个滤纸床中间打9个孔,如图1所示。

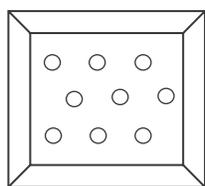


图1 多层滤纸床示意图

1.2.3 基础苗的培养

用镊子将多层滤纸床水平置于组培瓶中,倒入40 mL MS液体培养基(MS+蔗糖30 g/L),使液面略低于滤纸床顶部,立式灭菌锅121 °C灭菌20 min后取出,静置,冷凝。在YS-CZ-DD型超净工作台内,选取长势优良且均一的脱毒苗,剪成含1~2个叶片的茎段,插入到滤纸床的9个开孔中,在GPJ-300智能人工气候箱中无菌培养16 d。

1.2.4 幼苗的水分胁迫处理

在无菌环境下,倒掉1.2.3中培养瓶内所剩的培养基,按1.2.1所列各处理液体培养基配方分别加入相应的培养瓶中,每个浓度梯度的聚乙二醇(PEG-6000)处理18瓶。观测模拟干旱胁迫3 d后各样品的指标。

1.2.5 植株表观及根系变化的观测

观测比较不同浓度PEG-6000模拟干旱胁迫处理下各品种的叶片失绿、干枯萎蔫、水分散失程度及根系生长受抑制程度等表观变化。

1.2.6 测定叶片的生理指标

用灭菌后的双蒸水冲洗3遍干旱胁迫后的脱毒苗,用无菌定性滤纸吸净植株表面水分,再测定各生理指标。采用磺基水杨酸法测定脯氨酸

(Pro)含量^[19],采用电导法测定细胞质膜相对透性^[20],采用硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛(MDA)含量^[21],重复5次。

1.3 数据分析

1.3.1 生理指标分析相关公式

各生理指标比对照(CK)减少百分率(%)=[(对照值-处理值)/对照值]×100

各生理指标比对照(CK)增加百分率(%)=[(处理值-对照值)/对照值]×100

各生理指标相对值(%)=(干旱胁迫下的指标值/对照指标值)×100

1.3.2 隶属函数值计算方法

若指标与抗旱性呈正相关,隶属函数值

$$R(X_{ij})=(X_{ij}-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$$

若指标与抗旱性呈负相关,隶属函数值

$$R(X_{ij})=1-(X_{ij}-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$$

平均抗旱隶属函数值 $X_i=\sum R(X_{ij})/n$

上述公式中, $R(X_{ij})$ 为*i*品种*j*指标的隶属函数值, X_{ij} 为*i*品种*j*指标在干旱条件下指标值与对照值之比, X_{max} 、 X_{min} 分别为*j*指标中所有品种的最小值和最大值^[22],*n*为测定指标个数。

参照吕文河等^[22-23]的分类标准, X_i 越大表示此品种的抗旱性越强,反之, X_i 越小表示抗旱性越弱;当 $X_i \leq 0.2$ 时,属于不抗旱品种;当 $0.2 < X_i \leq 0.4$ 时,属于轻度抗旱品种;当 $0.4 < X_i \leq 0.6$ 时,属于中度抗旱品种;当 $0.6 < X_i \leq 1.0$ 时,属于高度抗旱品种。

1.3.3 方差分析

数据采用Excel 2017进行数据统计,并用SPSS 26.0软件进行差异显著性分析(Duncan's 检验法)。

2 结果与分析

2.1 不同浓度PEG-6000处理对彩色马铃薯脱毒苗植株及根系生长状况的影响

根系是植物重要的营养器官,能够最直接感应土壤水分含量的变化。根系的形态指标、健壮程度等均可作为作物品种抗旱性评价的依据之一。彩色马铃薯脱毒组培苗受PEG-6000模拟干旱胁迫后,其根系生长受到不同程度的抑制,抑制程度因基因型和胁迫浓度不同而异。图2为不同浓度PEG-6000处理下供试品种组培苗根系生长状况对比图。在相同的培养条件下,不同基因型品种的根系形态特征存在明显差异。3个彩色马铃薯新品种的单株根总数多于对照品种黑美人,紫彩3号的单株根数最多且根系较粗壮。PEG-6000浓度为5%时,对照品种黑美人根总数

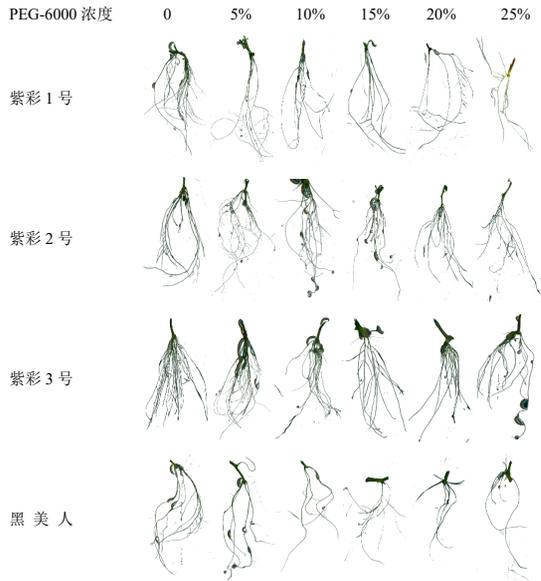


图2 4个品种脱毒组培苗在不同PEG-6000胁迫强度下根系生长比较

有所减少,3个新品种根系变化不明显;PEG-6000浓度为10%和15%时,紫彩1号和紫彩2号根系生长开始受到轻度抑制,对照品种黑美人根系生长受到明显抑制;当PEG-6000浓度为20%和25%时,4个品种的根系生长均受到明显抑制,根总数明显减少,根长度明显降低,受抑制程度由重到轻依次为:黑美人、紫彩1号、紫彩2号和紫彩3号。

综合幼苗受干旱胁迫影响后植株及根系生长以及形态变化情况(图3),推测4个品种的抗旱性由强到弱依次为:紫彩3号、紫彩2号、紫彩1号和黑美人。

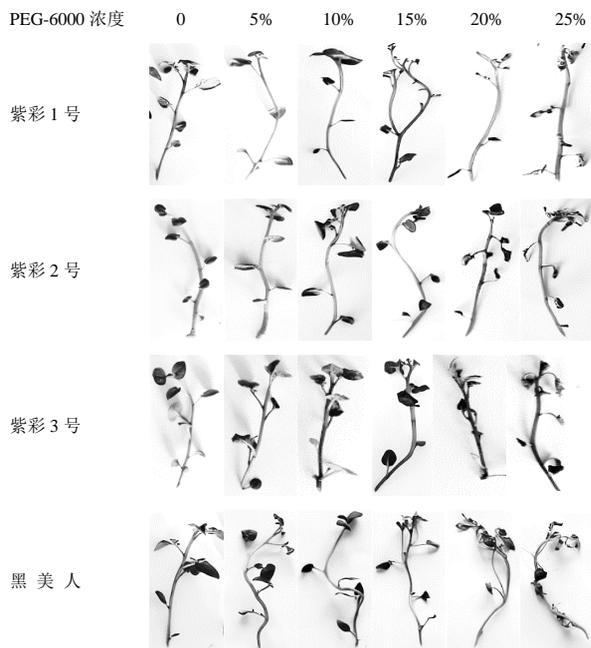
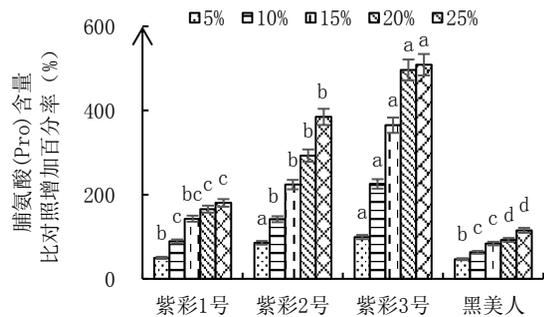


图3 不同PEG-6000浓度胁迫下各品种脱毒组培植株生长变化

2.2 PEG-6000模拟干旱胁迫对彩色马铃薯叶片Pro含量的影响

在植物水分亏缺时,Pro作为植物组织细胞的渗透调节物质,可起到调控细胞渗透势的作用,增强植物细胞的渗透调节能力。因此,植物在干旱胁迫下Pro的含量可作为评价其抗旱能力强弱的依据之一。一般而言,抗旱能力强的品种体内Pro积累量较多。

由图4可以看出,随着PEG-6000胁迫强度的增加,各彩色马铃薯的叶片Pro含量出现不同程度的增加,增加百分比存在显著差异。各浓度处理下,紫彩3号叶片Pro含量增幅最大,紫彩2号次之,紫彩1号 and 对照品种黑美人的Pro含量增幅相对较小;在25%PEG-6000浓度处理下,紫彩3号Pro含量比对照增加508.79%,是4个品种中增幅最大的品种,表明干旱胁迫对其影响程度最小,是抗旱性强的生理表现之一;紫彩2号Pro含量比对照增加幅度次之;其次为紫彩1号;对照品种黑美人(CK)增幅最小(115.22%),表明干旱胁迫对其影响最严重,是抗旱性弱的生理特征之一。



注:小写字母不同表示各处理间差异显著($P < 0.05$),下同
图4 4个品种脱毒苗在不同PEG-6000胁迫强度下Pro含量比对照增加百分率

2.3 PEG-6000模拟干旱胁迫对彩色马铃薯脱毒苗细胞膜相对透性的影响

不加PEG-6000(CK)时,4个品种的细胞膜相对透性值具有一定的差异性,这可能是由于不同材料之间遗传背景的差异造成的。为消除因此导致的误差,本研究比较分析5个浓度梯度的PEG-6000模拟干旱胁迫处理下的细胞质膜相对透性测定值比对照(CK)增加的百分率(计算方法见1.3)。

干旱缺水会使植物细胞质膜受损而透性增大,受损害程度越严重,细胞膜透性值增加幅度越大,表明其抗旱性越弱。因此,可用细胞质膜相对透性值的大小,表示其受损害程度,进而反映抗旱性强弱^[24]。由图5可以看出,不同品种的

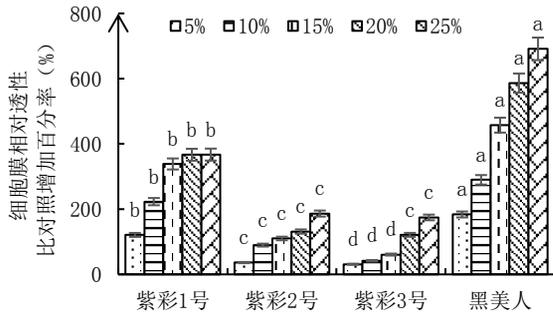


图5 4个品种脱毒苗在不同PEG-6000胁迫强度下细胞膜相对透性值比对照增加百分率

细胞质膜相对透性值随着PEG-6000干旱胁迫强度的增加呈不同幅度的增加。各浓度处理下,对照品种黑美人的细胞膜透性增加幅度最大,其次为紫彩1号、紫彩2号和紫彩3号。在PEG-6000胁迫浓度为25%时,4个品种幼苗的细胞膜相对透性增加幅度差异最为明显,增加幅度的大小依次为:黑美人(691.36%)>紫彩1号(367.20%)>紫彩2号(186.38%)>紫彩3号(174.51%)。说明干旱胁迫下对照品种黑美人(CK)的细胞膜受损程度最为严重,是一种抗旱性较弱的生理反应机制;紫彩3号受损程度最轻,是一种抗旱性较强的生理表征。

2.4 干旱胁迫对彩色马铃薯新品种脱毒组培苗丙二醛(MDA)含量的影响

植物在水分亏缺条件下,组织内自由基作用于细胞质膜,会发生过氧化反应,释放出丙二醛(MDA)。由于丙二醛可与核酸、蛋白质反应伤害细胞膜,因此可通过丙二醛含量了解干旱胁迫下膜

脂过氧化程度及细胞膜系统受损程度,从而间接判断品种抗旱性强弱。抗旱性弱的材料丙二醛含量增加幅度较大,抗旱性强的材料增加幅度较小^[25]。

由图6可以看出,4个品种的丙二醛(MDA)含量均随着PEG-6000浓度的增加呈不同幅度的增加趋势,其中以黑美人(CK)的增加幅度最明显,紫彩1号次之,紫彩2号和紫彩3号增加幅度差异不显著,推断4个彩色马铃薯品种对干旱最敏感的是黑美人,紫彩1号次之。

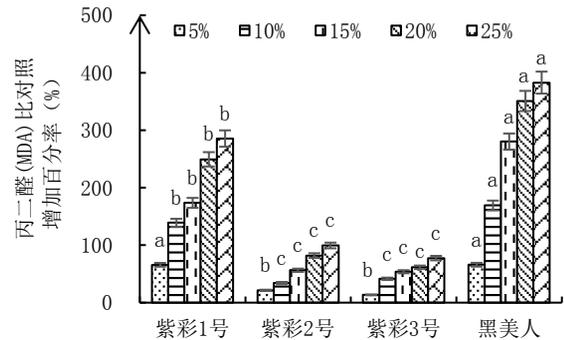


图6 4个品种脱毒组培苗在不同PEG-6000胁迫强度下丙二醛(MDA)含量比对照增加百分率

2.5 干旱胁迫下彩色马铃薯新品种幼苗生理指标的抗旱性综合评价

植物对干旱胁迫的响应机制较为复杂,因此在评价品种的抗旱能力时需综合考虑多个鉴定指标,以提高鉴定准确性。表3结果表明,紫彩3号的平均隶属函数值最大,为0.8173;紫彩2号次之,为0.7149;紫彩1号又次之(0.4436);对照品种黑美人(CK)最低,仅为0.2703。

表3 聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱胁迫下各品种脱毒苗3个生理指标的平均隶属函数值比较

品种	聚乙二醇(PEG-6000)浓度(%)	隶属函数值			平均隶属函数值	抗旱性
		细胞质膜相对透性	丙二醛(MDA)含量	脯氨酸(Pro)含量		
紫彩1号	5	0.864 1	0.858 2	0.006 8	0.443 6	中度抗旱
	10	0.709 5	0.660 1	0.091 7		
	15	0.534 5	0.566 4	0.208 1		
	20	0.491 7	0.361 3	0.257 2		
	25	0.491 0	0.263 5	0.289 3		
紫彩2号	5	0.992 5	0.978 2	0.084 4	0.714 9	高度抗旱
	10	0.911 4	0.943 5	0.205 5		
	15	0.880 6	0.883 8	0.383 5		
	20	0.848 4	0.814 9	0.532 6		
	25	0.764 9	0.767 2	0.731 6		
紫彩3号	5	1.000 0	1.000 0	0.113 7	0.817 3	高度抗旱
	10	0.984 0	0.924 0	0.387 0		
	15	0.955 3	0.890 7	0.688 9		
	20	0.863 7	0.870 0	0.973 2		
	25	0.782 9	0.826 6	1.000 0		

续表 3

品种	聚乙二醇(PEG-6000) 浓度(%)	隶属函数值			平均隶属函数 值	抗旱性
		细胞质膜相对透性	丙二醛(MDA)含量	脯氨酸(Pro)含量		
黑美人	5	0.769 1	0.857 8	0.000 0	0.270 3	轻度抗旱
	10	0.608 1	0.578 6	0.035 4		
	15	0.354 3	0.277 7	0.080 4		
	20	0.158 8	0.086 5	0.099 0		
	25	0.000 0	0.000 0	0.148 3		

根据隶属函数值越大则抗旱性越强的规律,对供试品种进行抗旱性评价,3个彩色马铃薯新品种及对照品种黑美人(CK)的抗旱性由强到弱次序为:紫彩3号>紫彩2号>紫彩1号>黑美人。按吕文河等^[22]的隶属函数分级标准划分,紫彩3号和紫彩2号为高度抗旱品种,紫彩1号为中度抗旱品种,对照品种黑美人为轻度抗旱品种。

3 讨 论

3.1 马铃薯的表观形态学指标与抗旱性鉴定

马铃薯表观形态学特征与抗旱性有密切关系。如通过减少叶面积,增大气孔,增加叶片、茎、根的持水力等减少水分散失并提高水分吸收利用效率,以适应干旱胁迫环境^[26-27]。一般可将根系、叶片等形态和生长指标作为植物抗旱性鉴定指标,如株高、叶片形状、叶面积、叶片卷曲程度、根系长度、根冠比等。植物根系发达是抗旱作物的基本特征,较多的深层根、根系较长的品种的抗旱性较强^[26];樊民夫等^[28]认为马铃薯根系拉力和冠层覆盖度可作为评价种质资源抗旱性重要指标;Ouiam等^[29]认为在田间条件下马铃薯的根重、根深度、匍匐茎上不定根的数量与产量呈显著正相关;娄艳等^[30]用聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱试验,对不同马铃薯品种组培苗的根长、根表面积、根体积进行比较分析,认为根长、根表面积和根体积三个指标对水分胁迫较为敏感;Deblonde等^[31]在马铃薯植株结薯前,观测分析不同品种在水分胁迫环境下株高、叶片数、叶片长度等指标,发现这些指标对水分敏感、抗旱性分析具有参考意义;Lahlou等^[32]认为叶片干重、叶面积和叶面积指数可作为不同熟期马铃薯的抗旱鉴定指标;Richard等^[33]认为干旱会影响植物的蒸腾效率、生长发育初期的叶面积大小、开花数目多少等性状,这些性状指标可在一定程度上用于鉴定植物抗旱性强弱,是植物抗旱性育种的重要依据之一。本研究中,紫彩3号的叶片面积较小,小叶

形状为长卵圆形,植株株高较矮,且根系发达,在受到干旱胁迫时,其叶片水分散失相对少,根系吸水能力强,在一定程度上提高植株水分利用效率,因此其生长受抑制程度较轻,表现出较强的抗旱性。可通过田间试验测定各品种在干旱胁迫下株高、光合特性、根系活力、根冠比、产量等指标的变化,对各品种抗旱性作进一步验证。

3.2 隶属函数法在作物抗旱研究中的应用

马铃薯抗旱性是受多种因素综合影响的,除表观形态指标外,生理生化特性也是鉴定和筛选马铃薯抗旱种质资源的重要指标。单一的指标测定或分析很难准确地反映材料的抗旱性强弱,需对多个指标进行综合分析,以提高试验准确性。平均隶属函数法是在多指标测定基础上对作物品种资源的抗旱能力进行客观分析评价的重要方法之一^[34]。本试验采用平均隶属函数法,综合细胞质膜相对透性、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸(Pro)含量生理生化指标对3个彩色马铃薯新品种及对照品种黑美人进行抗旱性评价,为新品种进一步推广种植提供理论依据,为彩色马铃薯优良新品种的进一步选育工作奠定基础,对彩色马铃薯乃至马铃薯产业发展具有重要意义。

4 结 论

4.1 在不同强度的干旱胁迫处理下,3个彩色马铃薯新品种脱毒组培苗叶片的细胞质膜相对透性、丙二醛(MDA)含量增加幅度均小于对照品种黑美人,脯氨酸(Pro)的积累量增加幅度均大于对照品种黑美人。

4.2 结合植株、根系表观形态变化及生理指标变化,利用平均隶属函数法评定3个彩色马铃薯新品种及对照品种幼苗的抗旱性,按抗旱能力强弱依次为紫彩3号>紫彩2号>紫彩1号>黑美人。

参考文献:

[1] 赵媛媛,张丽莉,石 瑛.马铃薯抗旱种质资源的筛选[J].

- 作物杂志,2017,33(4):72-77.
- [2] 徐建飞,刘杰,卞春松,等.马铃薯资源抗旱性鉴定和筛选[J].中国马铃薯,2011,25(1):1-6.
- [3] 张丽莉.干旱胁迫条件下马铃薯耐旱基因表达及叶片蛋白质组学分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2015.
- [4] 张凤军,叶景秀,师理,等.干旱胁迫下不同抗旱水平马铃薯叶片蛋白质组学分析[J].江苏农业科学,2018,46(9):23-28.
- [5] 闫士朋,焦润安,张俊莲,等.灌溉量对马铃薯生理特性及块茎产量品质的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):41-51.
- [6] 王洁,贺文辉,刘英,等.干旱胁迫下马铃薯差异表达基因的验证分析[J].甘肃农业大学学报,2015,50(1):42-47,52.
- [7] 王小静.不同基因型马铃薯对干旱及抗旱措施反应的研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2016.
- [8] Levy D, Coleman W K, Veilleux R E. Adaptation of potato to water shortage: irrigation management and enhancement of tolerance to drought and salinity[J]. American Journal of Potato Research, 2013, 90(2): 186-206.
- [9] 朱涛.磷对马铃薯植株耐旱能力以及钾对块茎加工品质的影响[D].雅安:四川农业大学,2009.
- [10] 贺锦红.种植模式对半干旱地区马铃薯淀粉积累及产量的影响[D].银川:宁夏大学,2019.
- [11] 孙智广.不同栽培模式对免耕马铃薯农艺性状和土壤养分的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2014.
- [12] 张绪成,马一凡,于显枫,等.西北半干旱区深旋松耕作对马铃薯水分利用和产量的影响[J].应用生态学报,2018,29(10):3293-3301.
- [13] 姜超.彩色马铃薯优良新品种培育及花青素组分的HPLC-MS分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [14] 李勤志.中国马铃薯生产的经济分析[D].武汉:华中农业大学,2008.
- [15] Han K H, Sekikawa M, Shimada K, et al. Anthocyanin -rich purple potato flake extract has antioxidant capacity and improves antioxidant potential in rats[J]. British Journal of Nutrition, 2006, 96(6): 1125-1133.
- [16] 方芳.紫色马铃薯花色苷提取物体外抗前列腺癌研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [17] 徐丽珊,戴一辉,谢子玉,等.七种彩色马铃薯的蛋白质营养评价[J].浙江师范大学学报(自然科学版),2020,43(1):13-18.
- [18] 李建武,王蒂,司怀军,等.水分胁迫下马铃薯试管苗的生理响应[J].甘肃农业大学学报,2005,40(3):319-323.
- [19] 李小方,张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2015:192-193.
- [20] 陈红林,林强,张群,等.不同品系花椒幼苗抗旱性研究[J].干旱地区农业研究,2019,37(6):8-15.
- [21] 孙晓东,贾娜,何鹏,等.干旱胁迫对陕北沙棘幼苗生长发育的影响[J].东北农业科学,2018,43(2):16-20.
- [22] 吕文河,李志燕,雷雪萍,等.离体条件下聚乙二醇(PEG-6000)胁迫对马铃薯组培苗影响[J].东北农业大学学报,2015,46(10):1-9.
- [23] 李志燕.聚乙二醇(PEG-6000)胁迫下马铃薯耐旱指标的筛选[D].哈尔滨:东北农业大学,2015.
- [24] 胡小京,丁圣果,吴小波.干旱胁迫下不同基质对佛甲草生理生化的影响[J].中国农学通报,2012,28(34):234-237.
- [25] 张舒娜,邵财,马琳,等.人参对干旱胁迫的生理生化反应[J].东北农业科学,2016,41(5):37-41.
- [26] 吴文荣.玉米不同品种芽苗期抗旱性及指标的研究[D].北京:中国农业科学院,2008.
- [27] Zhang S, Xu X, Sun Y, et al. Influence of drought hardening on the resistance physiology of potato seedlings under drought stress [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(2): 336-347.
- [28] 樊民夫,杨明君,李久昌.马铃薯抗旱资源评价与抗旱指标探讨[J].山西农业科学,1993,21(2):6-11.
- [29] Ouïam L, Jean L. Root mass and depth, stolons and roots formed on stolons in four cultivars of potato under water stress [J]. European Journal of Agronomy, 2005, 22: 159-173.
- [30] 娄艳.马铃薯种质资源遗传多样性分析及试管苗抗旱性鉴定[D].兰州:甘肃农业大学,2015.
- [31] Deblonde P M K, Ledent J F. Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars [J]. European Journal of Agronomy, 2001,14(1):31-41.
- [32] Lahlou O, Ouattar S, Ledent J F. The effect of drought and cultivar on growth parameters, yield and yield components of potato [J]. Agronomie EDP Sciences, 2003, 23(3): 257-268.
- [33] Richards R A. Defining selection criteria to improve yield under drought[J]. Plant Growth Regulation, 1996, 20(2): 157-166.
- [34] 刘方明,高玉山,孙云云,等.高粱抗旱性鉴定研究进展[J].东北农业科学,2016,41(3):5-7.

(责任编辑:王昱)