

利用隶属函数法评价马铃薯组培苗的抗旱性

谢婉^{1,2}, 杨喜珍², 杨利², 刘磊², 覃亚², 郑维列^{1*}

(1. 西藏大学农牧学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏日喀则市农业科学研究所, 西藏 日喀则 857000)

摘要: 为了建立马铃薯组培苗抗旱性评价体系, 以6个马铃薯品种(系)的脱毒组培苗为试验材料, 研究比较了在固体培养基中分别添加5%, 10%, 15%和20%PEG-8000模拟干旱胁迫和对照处理下(不含PEG-8000)培养50 d后组培苗生长生理指标的变化。结果表明, 在0~20%PEG浓度, 随着胁迫处理PEG浓度的增加, 所有材料的组培苗表现出受干旱胁迫越严重的现象, 生长指标下降, 干物质含量逐渐升高, 脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖、丙二醛含量升高。不同品种(系)对干旱的反应不同, 当固体培养基中PEG浓度为5%时, 供试品种(系)间的差异最大。单采用某一胁迫强度下的生理指标数据不能准确评价植物的抗旱性。以生长指标和丙二醛含量在不同浓度PEG下的变异系数为抗旱评价指标, 利用隶属函数法综合分析, 6个品种(系)的抗旱性由强到弱为: ‘渭薯1号’ > ‘青薯9号’ > ‘春薯2号’ > ‘东农303’ > ‘200902’ > ‘D613’。

关键词: 马铃薯; 组培苗; PEG-8000; 干旱胁迫; 隶属函数法

Evaluation of Potato Plantlets *in vitro* for Drought Resistance Using Subordinate Function Method

XIE Wan^{1,2}, YANG Xizhen², YANG Li², LIU Lei², QIN Ya², ZHENG Weilie^{1*}

(1. Agricultural and Animal Husbandry College, Tibet University, Nyingchi, Tibet 860000, China;

2. Shigatse Institute of Agricultural Sciences, Shigatse, Tibet 857000, China)

Abstract: Six potato varieties (lines) were stressed by adding 5%, 10%, 15%, and 20% (W/V) of PEG-8000 to Murashige-Skoog solid medium, respectively, with no PEG-8000 addition as control in order to establish the evaluation system of potato plantlets *in vitro* for drought resistance. After cultured for 50 days, growth and physiological indices of potato plantlets *in vitro* were measured and analyzed. In the range of 0-20% PEG-8000, more stresses were observed for all the plantlets of potatoes, with the increase of PEG-8000 concentration. The growth index was decreased, however, the contents of dry matter, proline, soluble protein, soluble sugar and malondialdehyde (MDA) were increased. Different varieties (lines) responded differently to drought stress. The varieties (lines) showed the biggest difference under 5% PEG-8000 stress. The drought resistance of potato plants could not be evaluated accurately by individual physiological index. The coefficient of variation of the growth index and MDA content at different polyethylene glycol concentrations were used as index of drought resistance evaluation, and the six varieties (lines) were evaluated comprehensively by the method of subordinate function. The drought resistance of six varieties (lines) from strong to weak was 'Weishu 1', 'Qingshu 9', 'Chunshu 2', 'Dongnong 303', '200902' and 'D613'.

Key Words: potato; plantlet *in vitro*; PEG-8000; drought stress; subordinate function method

收稿日期: 2017-11-29

基金项目: 西藏大学农牧学院研究生创新计划项目(YJS2015-01); 西藏应用基础研究计划项目(NZWYZ)。

作者简介: 谢婉(1982-), 女, 硕士, 助理研究员, 从事马铃薯遗传育种及高原资源植物利用研究。

*通信作者(Corresponding author): 郑维列, 教授, 博士生导师, 主要从事高原植物研究, E-mail: xzzhengweilie@21cn.com。

马铃薯对水分的亏缺非常敏感^[1], 干旱是马铃薯生产的重要限制因素^[2]。减少干旱对马铃薯的影响, 筛选抗旱育种材料, 选育具有综合优良性状的抗旱品种, 对马铃薯产业化发展具有重大意义。马铃薯抗旱性评价的不同方法具有不同的优缺点^[3]。通过渗透调节物质模拟干旱对马铃薯组培苗进行胁迫鉴定的方法相对稳定且易控制^[4]。研究表明, 用聚乙二醇(Polyethylene glycol, PEG)诱导水分逆境达到的效果与将土壤逐步干旱的效果一致^[5]。中国已有多位学者开展了PEG模拟根际水分胁迫法, 对马铃薯试管苗进行水分胁迫处理^[6-9]。目前, 马铃薯抗旱性鉴定多利用干旱胁迫下马铃薯形态、生理生化指标变化的差异确定品种的抗旱性。一般认为, 抗旱性品种受干旱胁迫影响较小, 干旱胁迫下产量降幅、株高降幅、相对含水量的降幅、叶片质膜相对透性升高幅度小的品种抗旱性强, 丙二醛(MDA)含量增幅低的品种抗旱性强^[9]。

本试验采用不同浓度PEG-8000模拟干旱胁迫, 研究不同马铃薯品种(系)组培苗生长生理指标的变化, 利用隶属函数法和因子分析对各指标进行综合评价, 旨在探索适于马铃薯组培苗抗旱性鉴定的评价体系, 为马铃薯抗旱机制的研究及抗旱品种筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2015年8~12月在西藏自治区马铃薯工程研究中心完成。供试马铃薯品种(系)为‘渭薯1号’、‘东农303’、‘青薯9号’、‘春薯2号’、

‘D613’和‘200902’共6个品种(系)的脱毒组培苗。‘D613’为中国农业科学院蔬菜花卉研究所提供的彩色马铃薯高代品系, ‘200902’为西藏自治区薯类脱毒中心提供的系统选育品系, 部分研究者以产量和生理指标等计算抗旱系数进行抗旱性综合评价, 认为‘青薯9号’抗旱性较强^[10,11], 而‘东农303’抗旱性较弱^[7,12]。其他品种(系)的抗旱性不确定。各品种特性见表1。

PEG-8000 购于 Amresco 公司, 化学式为 $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$, $n = 108 \sim 125$, 纯度99.9%。

1.2 试验方法

1.2.1 PEG培养基制作

参考邓珍等^[8]的方法, 配制0, 5%, 10%, 15%和20%(W/V)的PEG溶液(含2 mmol/L MES缓冲液), pH调至 5.8 ± 1 , 高压灭菌。之后等体积倒入已灭菌凝固的MS培养基(琼脂7 g/L、蔗糖30 g/L)中, 平衡72 h后, 在无菌工作台上把上层液体从培养瓶中倒掉。所得的固体培养基即为含PEG固体培养基。其中0处理不添加PEG, 设为对照。

1.2.2 试验处理

将在常规培养基中预培养至长势一致的马铃薯脱毒苗按单节茎段剪切到PEG培养基中进行培养。每瓶接入12个茎段, 每个处理80瓶。培养瓶直径0.65 cm, 内装40 mL培养基。培养温度(23 ± 2)℃, 光强3 000 lx, 每天光照16 h。培养50 d后测定各指标, 每次取3个重复, 每个重复3瓶。

1.2.3 生长指标测定

用无菌水将组培苗根部培养基清洗干净, 用吸水纸吸去附着在植物上的水分, 将根与茎叶部分从根基部剪开, 去掉原接种的单节茎段, 测量

表1 品种(系)特性
Table 1 Characteristics of varieties (lines)

品种(系) Variety (line)	生育期(d) Growth duration	块茎性状 Tuber characteristic
渭薯1号 Weishu 1	114	黄皮黄肉
东农303 Dongnong 303	80	黄皮黄肉
青薯9号 Qingshu 9	128	红皮黄肉
200902	97	红皮黄肉
D613	103	玫红皮粉肉
春薯2号 Chunshu 2	87	黄皮白肉

最大株高和茎粗。分别称取茎叶和根两部分鲜重, 将鲜样置于 80 ℃ 烘箱内烘干 72 h 至恒重, 称取干重。

1.2.4 生化指标测定

取组培苗的地上茎叶部分鲜样, 丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸法^[13], 脯氨酸含量测定采用磺基水杨酸法^[14], 可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 法^[15], 可溶性糖含量测定采用蒽酮-硫酸法^[16]。

1.3 数据分析

数据统计和作图采用 Excel 2013 进行。方差分析、邓肯氏多重比较和因子分析采用 SPSS 20。采用平均隶属函数法进行综合分析。隶属函数值公式为:

$$U_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中: U_i 为第 i 个指标的隶属函数值; X_i 为第 i 个指标的原始数据; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 为样品组中第 i 个指标的最大值与最小值^[17]。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 PEG 胁迫对马铃薯组培苗茎长的影响

在 0~20%, 随着 PEG 浓度的升高, 各品种(系)的马铃薯组培苗茎长表现出逐渐降低的趋势

(表 2), 在不含 PEG 的培养基中马铃薯组培苗生长最好, 在 5%PEG 下, 各品种(系)茎长相比对照的茎长已显著降低($P < 0.05$)。在 20%PEG 下, 马铃薯组培苗仍能生长但生长很差, 说明 PEG 浓度越高, 马铃薯受干旱胁迫越严重。在 10%PEG 浓度下, ‘渭薯 1 号’、‘东农 303’、‘青薯 9 号’、‘200902’、‘D613’和‘春薯 2 号’的茎长相对 CK 分别降低了 4.42, 11.71, 6.64, 6.15, 5.92 和 6.50 cm。随着 PEG 浓度的升高, 茎长下降趋势减缓, 其中‘青薯 9 号’在 15%PEG 下与 10%PEG 下的茎长已不具有显著差异, ‘东农 303’、‘200902’、‘D613’在 20%PEG 下与 15%PEG 下的茎长已不具有显著差异。茎长变异系数最大的是‘东农 303’, 最小为‘渭薯 1 号’, 说明‘东农 303’茎长受 PEG 影响较大, ‘渭薯 1 号’茎长受影响较小。

2.2 不同浓度 PEG 胁迫对马铃薯组培苗根长的影响

在 0~20%, 随着 PEG 浓度的升高, 各品种(系)的马铃薯组培苗根长表现出逐渐降低的趋势(表 3), 在不含 PEG 的培养基中马铃薯组培苗生长最好, 在 5%PEG 下, 除‘渭薯 1 号’和‘青薯 9 号’, 其他各品种(系)的马铃薯组培苗根长较对照具有显著差异($P < 0.05$), 在 20%PEG 下, 马铃薯组培苗仍能生长但生长很差。变异系数最大为‘D613’, 最小为‘渭薯 1 号’。

表 2 不同浓度 PEG 下马铃薯组培苗茎长(cm)

Table 2 Stem length of potato plantlets *in vitro* under different PEG concentrations

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
0(CK)	9.28 ± 1.26 a	14.45 ± 2.88 a	10.19 ± 1.19 a	9.62 ± 1.76 a	8.80 ± 2.09 a	9.99 ± 0.87 a
5%	5.21 ± 1.92 b	6.57 ± 3.93 b	5.88 ± 3.36 b	4.29 ± 1.81 b	5.05 ± 2.16 b	5.45 ± 1.62 b
10%	4.86 ± 1.47 b	2.74 ± 0.95 c	3.55 ± 2.36 c	3.47 ± 1.12 c	2.88 ± 0.75 c	3.49 ± 2.05 c
15%	3.43 ± 1.44 c	3.34 ± 1.44 c	3.92 ± 2.05 c	2.48 ± 0.95 d	1.25 ± 0.34 d	1.67 ± 0.69 d
20%	1.80 ± 0.53 d	2.27 ± 0.80 c	2.04 ± 0.87 d	2.64 ± 0.98 d	1.50 ± 0.52 d	2.40 ± 1.28 c
均值 Mean	4.92	5.87	5.11	4.501	3.89	4.60
标准差 SD	2.78	5.08	3.15	2.95	3.13	3.33
变异系数(%) CV	56.63	86.48	61.55	65.60	80.38	72.46

注: 表中平均值后数据是标准偏差, 同列不同小写字母表示平均数差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Data after the average value is standard deviation, and means with different letters in each column mean significant difference ($P < 0.05$). The same below.

表3 不同浓度PEG下马铃薯组培苗根长(cm)
Table 3 Root length of potato plantlets *in vitro* under different PEG concentrations

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯1号 Weishu 1	东农303 Dongnong 303	青薯9号 Qingshu 9	200902	D613	春薯2号 Chunshu 2
0	6.08 ± 1.89 a	7.51 ± 1.68 a	10.77 ± 1.69 a	12.81 ± 1.86 a	10.98 ± 2.55 a	15.05 ± 1.43 a
5%	5.51 ± 1.79 a	6.19 ± 2.04 b	10.30 ± 3.91 a	5.08 ± 1.62 b	6.48 ± 3.05 b	7.79 ± 1.16 b
10%	5.74 ± 2.55 a	5.91 ± 3.62 b	5.70 ± 3.84 c	5.23 ± 2.63 b	5.18 ± 2.82 c	5.93 ± 2.43 c
15%	5.86 ± 1.71 a	5.47 ± 2.29 b	7.50 ± 3.22 b	4.60 ± 2.72 b	1.75 ± 1.42 d	5.02 ± 2.10 c
20%	3.49 ± 1.70 b	2.88 ± 2.32 c	6.58 ± 3.86 bc	1.93 ± 1.54 c	2.26 ± 2.12 d	2.13 ± 1.56 d
均值 Mean	5.34	5.59	8.17	5.93	5.33	7.18
标准差 SD	1.05	1.70	2.26	4.07	3.73	4.85
变异系数(%) CV	19.66	30.34	27.61	68.65	69.91	67.54

2.3 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗茎叶鲜重的影响

在0~20%, 随着PEG浓度的升高, 各品种(系)的马铃薯组培苗茎叶鲜重表现出逐渐降低的趋势(表4), 说明PEG浓度越高, 马铃薯组培苗受干旱胁迫越严重。在不含PEG的培养基中马铃

薯组培苗生长最好, 在5%PEG下各品种(系)(除了‘200902’)的茎叶鲜重与CK相比已具有显著性降低($P < 0.05$), 同时, 随着PEG浓度的升高, 茎叶鲜重下降趋势减缓, 除‘渭薯1号’, 其他各品种(系)在20%PEG下与15%PEG下的茎叶鲜重已不具有显著差异。变异系数最大为‘200902’, 最小为‘东农303’。

表4 不同浓度PEG下马铃薯组培苗茎叶鲜重(mg)
Table 4 Stem and leaf fresh weight of potato plantlets *in vitro* under different PEG concentrations

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯1号 Weishu 1	东农303 Dongnong 303	青薯9号 Qingshu 9	200902	D613	春薯2号 Chunshu 2
0(CK)	130.15 ± 6.81 a	204.62 ± 19.56 a	186.08 ± 25.55 a	108.12 ± 72.32 a	137.43 ± 17.07 a	160.71 ± 9.62 a
5%	32.72 ± 3.28 b	95.86 ± 40.50 b	77.06 ± 26.16 b	57.52 ± 42.02 ab	47.10 ± 6.68 b	27.77 ± 0.96 c
10%	38.29 ± 2.74 b	66.78 ± 13.28 bc	61.38 ± 19.72 b	25.24 ± 9.58 b	31.89 ± 13.51 bc	53.18 ± 7.73 b
15%	36.56 ± 4.88 b	50.87 ± 16.27 c	44.08 ± 14.95 bc	29.77 ± 6.75 b	17.64 ± 9.74 c	30.30 ± 3.22 c
20%	13.94 ± 4.81 c	28.16 ± 15.92 c	22.90 ± 4.42 c	14.36 ± 2.98 b	16.83 ± 0.97 c	19.64 ± 4.57 c
均值 Mean	50.33	89.26	78.30	47.00	50.18	58.32
标准差 SD	42.46	66.88	61.16	47.31	47.52	54.47
变异系数(%) CV	84.36	74.93	78.11	100.66	94.70	93.40

2.4 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗根鲜重的影响

在0~20%, 随着PEG浓度的升高, 各品种(系)的马铃薯组培苗根鲜重表现出逐渐降低的趋势(表5), 且根鲜重降低的趋势随着PEG浓度的升高

逐渐减缓。在5%PEG下, 除‘青薯9号’, 其他各品种(系)的根鲜重与CK相比显著降低($P < 0.05$)。除‘春薯2号’, 其他各品种(系)组培苗根鲜重在15%与20%PEG下无显著差异。变异系数最大为‘D613’, 最小为‘青薯9号’。

表5 不同浓度PEG下马铃薯组培苗根鲜重(mg)

Table 5 Root fresh weight of potato plantlets *in vitro* under different PEG concentrations

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
0(CK)	54.92 ± 11.78 a	37.07 ± 7.96 a	24.84 ± 7.67 a	68.38 ± 15.49 a	76.35 ± 5.61 a	34.17 ± 2.22 a
5%	29.94 ± 5.62 b	12.77 ± 1.25 b	22.13 ± 9.17 ab	33.74 ± 8.00 b	14.31 ± 6.73 b	14.63 ± 0.69 b
10%	25.15 ± 4.99 b	9.50 ± 3.74 bc	20.58 ± 5.15 ab	6.03 ± 2.26 c	7.77 ± 2.64 bc	10.44 ± 2.61 c
15%	17.59 ± 3.69 bc	7.69 ± 1.87 bc	10.18 ± 3.32 bc	5.24 ± 2.10 c	2.43 ± 1.99 c	7.18 ± 1.66 d
20%	5.94 ± 2.01 c	3.12 ± 3.86 c	7.34 ± 2.54 c	1.17 ± 0.77 c	2.16 ± 1.00 c	1.67 ± 0.36 e
均值 Mean	26.82	14.03	16.35	19.63	20.60	10.01
标准差 SD	18.19	13.34	7.75	28.52	31.55	12.43
变异系数(%) CV	68.10	95.10	45.55	124.49	153.13	91.25

表6 不同浓度PEG下马铃薯组培苗茎叶干物质含量(%)

Table 6 Stem and leaf dry matter contents of potato plantlets *in vitro* under different PEG concentrations

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
0(CK)	8.37 ± 0.43 c	7.21 ± 0.49 d	6.52 ± 0.43 c	6.94 ± 2.26 b	7.00 ± 0.42 c	8.01 ± 0.36 b
5%	7.41 ± 0.73 c	7.64 ± 1.15 cd	7.74 ± 0.81 bc	7.78 ± 0.69 b	6.79 ± 0.59 c	10.01 ± 1.02 b
10%	10.32 ± 0.36 bc	10.34 ± 0.77 bc	9.59 ± 1.69 b	9.84 ± 1.29 b	7.81 ± 0.43 c	9.02 ± 1.05 b
15%	11.79 ± 1.68 b	10.84 ± 0.98 b	9.68 ± 2.03 b	13.86 ± 0.80 a	12.34 ± 0.84 b	11.88 ± 0.96 a
20%	15.38 ± 2.6 a	15.28 ± 3.19 a	14.67 ± 0.90 a	14.26 ± 2.56 a	16.30 ± 0.91 a	16.64 ± 6.44 a
均值 Mean	10.88	10.26	9.64	10.54	10.21	11.11
标准差 SD	3.13	3.29	3.08	3.45	3.99	4.04
变异系数(%) CV	28.77	32.07	31.95	32.73	39.08	36.36

2.5 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗茎叶干物质含量的影响

在不同的PEG浓度下,各品种(系)的茎叶干物质含量具有显著差异($P < 0.05$)。在0~20%,随着PEG浓度的升高,各品种(系)的马铃薯组培苗茎叶干物质含量表现出逐渐升高的趋势(表6),在低浓度PEG下变化不显著,在高浓度下显著升高。变异系数最大的品种为‘D613’,最小的为‘渭薯1号’。

2.6 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗根干物质含量的影响

在不同的PEG浓度下,各品种(系)的根干物质含量具有显著差异($P < 0.05$)。在0~20%,随着

PEG浓度的升高,各品种(系)的马铃薯组培苗根干物质含量表现出逐渐升高的趋势(表7)。变异系数最大的为‘200902’,最小为‘春薯2号’。

2.7 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗脯氨酸含量的影响

在0~20%,随着PEG浓度的升高,各品种(系)的马铃薯组培苗脯氨酸含量表现出逐渐升高的趋势(表8),说明干旱会导致马铃薯植株脯氨酸的积累,是其抵御干旱的一种积极调节机制。其中‘200902’和‘渭薯1号’在20%PEG下略微下降。‘青薯9号’的脯氨酸涨幅最大,其次是‘东农303’,‘200902’的涨幅最小,20%PEG下脯氨酸的含量分别为对照的10.06,9.88和1.50倍。

表7 不同浓度PEG下马铃薯组培苗根干物质含量(%)

Table 7 Root dry matter contents of potato plantlets *in vitro* under different PEG concentrations

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
0(CK)	7.21 ± 1.61 c	5.44 ± 0.83 d	7.12 ± 1.94 b	7.50 ± 1.03 b	10.22 ± 2.25 c	6.51 ± 0.16 b
5%	10.77 ± 0.31 bc	7.10 ± 1.55 bc	7.55 ± 0.17 b	9.64 ± 1.08 b	11.14 ± 2.48 bc	8.14 ± 1.90 b
10%	13.35 ± 4.07 abc	6.87 ± 1.60 cd	7.11 ± 0.66 b	9.75 ± 2.22 a	11.67 ± 1.19 bc	13.65 ± 3.08 b
15%	14.46 ± 0.47 ab	12.72 ± 3.14 b	12.17 ± 2.39 b	12.78 ± 2.62 a	13.25 ± 1.92 b	15.19 ± 0.89 b
20%	19.16 ± 3.99 a	22.79 ± 4.80 a	21.95 ± 3.46 a	30.19 ± 16.53 a	33.90 ± 3.96 a	15.26 ± 1.04 a
均值 Mean	13.02	11.71	11.77	13.97	16.45	12.33
标准差 SD	5.07	7.29	6.45	10.70	9.74	3.97
变异系数(%) CV	38.93	62.21	54.74	76.59	59.22	32.23

表8 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗脯氨酸含量的影响(μg/g FW)

Table 8 Effect of different concentrations of PEG stress on proline contents of potato plantlets *in vitro*

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
0(CK)	114.29 ± 15.76 b	35.96 ± 0.75 c	29.00 ± 1.38 d	148.18 ± 4.95 a	24.18 ± 11.99 c	38.87 ± 0.44 b
5%	163.13 ± 35.28 b	36.36 ± 0.73 c	36.96 ± 0.21 d	172.16 ± 15.20 a	64.08 ± 40.04 bc	39.48 ± 11.80 b
10%	245.08 ± 29.55 a	183.31 ± 43.34 b	96.80 ± 6.22 c	203.17 ± 116.04 a	79.02 ± 12.39 b	48.79 ± 8.63 b
15%	300.68 ± 42.73 a	198.24 ± 4.15 b	182.73 ± 0.20 b	243.09 ± 63.33 a	102.78 ± 2.14 ab	104.22 ± 10.80 a
20%	265.46 ± 1.65 a	355.30 ± 7.21 a	291.68 ± 25.31 a	222.16 ± 14.63 a	152.26 ± 6.90 a	133.42 ± 25.94 a
均值 Mean	217.73	161.83	127.43	197.75	84.46	72.95
标准差 SD	75.55	126.29	104.55	57.29	47.11	42.17
变异系数(%) CV	34.70	78.04	82.04	28.97	55.78	57.80

2.8 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗可溶性蛋白含量的影响

在 0~20%, 随着 PEG 浓度的升高, 各品种(系)的马铃薯组培苗可溶性蛋白含量表现出逐渐升高的趋势(表 9)。其中增幅最大的是‘青薯 9 号’, 增幅最小的为‘东农 303’, 在 20%PEG 下分别为 CK 的 11.52 和 2.29 倍。说明干旱会导致植株可溶性蛋白的积累, 是其抵御干旱的一种积极调节机制。

2.9 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗丙二醛含量的影响

‘D613’丙二醛浓度最高, 呈现先降低后升高的趋势, ‘东农 303’在 5%PEG 浓度下丙二醛浓度

略降低, 之后持续升高, 其他各品种(系)丙二醛含量整体表现为上升趋势, 其中‘春薯 2 号’的变幅最小, ‘东农 303’和‘200902’变幅较大(表 10)。

2.10 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗可溶性糖含量的影响

‘D613’在 5%PEG 浓度下可溶性糖含量比对照降低, 之后持续升高, 其他各品种(系)的马铃薯组培苗可溶性糖含量随着 PEG 浓度的升高表现出逐渐升高的趋势(表 11)。在 20%PEG 下, ‘渭薯 1 号’升高的幅度最大, 其次是‘青薯 9 号’, 最低的是‘春薯 2 号’, 分别是对照的 4.16, 3.44 和 1.93 倍。‘春薯 2 号’和‘200902’在 5%PEG 后可溶性糖

表9 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗可溶性蛋白含量的影响(mg/g FW)

Table 9 Effect of different concentrations of PEG stress on soluble protein contents of potato plantlets *in vitro*

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
0(CK)	1.36 ± 0.52 c	1.47 ± 0.70 a	0.23 ± 0.06 d	0.81 ± 0.15 b	1.24 ± 0.32 c	1.03 ± 0.18 c
5%	1.60 ± 0.48 c	1.34 ± 1.33 a	0.85 ± 0.05 c	1.38 ± 0.29 ab	1.24 ± 0.30 c	1.05 ± 0.04 c
10%	2.37 ± 0.62 bc	1.71 ± 1.08 a	1.32 ± 0.26 bc	1.84 ± 0.20 a	1.55 ± 0.41 bc	1.18 ± 0.09 c
15%	3.11 ± 0.37 ab	1.80 ± 0.12 a	1.75 ± 0.19 b	1.62 ± 0.03 a	2.54 ± 0.29 ab	2.57 ± 0.04 b
20%	3.52 ± 0.52 a	3.36 ± 0.66 a	2.65 ± 0.41 a	1.78 ± 0.36 a	2.95 ± 0.80 a	3.20 ± 0.14 a
均值 Mean	2.45	1.94	1.36	1.49	1.96	1.93
标准差 SD	0.96	1.01	0.88	0.43	0.86	1.00
变异系数(%) CV	39.18	52.06	64.71	28.86	43.88	51.81

表10 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗丙二醛含量的影响(μmol/g FW)

Table 10 Effect of different concentrations of PEG stress on malondialdehyde (MDA) contents of potato plantlets *in vitro*

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
0(CK)	11.87 ± 0.81 b	12.79 ± 0.32 b	9.14 ± 1.14 c	17.99 ± 3.07 b	49.28 ± 0.64 bc	14.96 ± 0.17 a
5%	16.92 ± 5.89 b	9.87 ± 1.74 b	17.63 ± 0.43 b	20.59 ± 4.59 b	48.36 ± 0.55 bc	18.05 ± 2.45 a
10%	18.69 ± 5.24 b	29.22 ± 11.94 a	17.64 ± 0.74 b	25.51 ± 4.06 b	40.90 ± 8.06 c	18.24 ± 4.59 a
15%	18.94 ± 6.69 b	31.08 ± 4.87 a	23.85 ± 5.09 a	28.86 ± 2.19 b	60.89 ± 1.28 ab	21.03 ± 4.80 a
20%	30.23 ± 6.76 a	43.75 ± 12.86 a	22.53 ± 0.36 ab	46.62 ± 10.54 a	74.23 ± 12.31 a	21.75 ± 8.34 a
均值 Mean	19.33	25.34	17.34	27.92	56.87	18.75
标准差 SD	7.79	14.69	6.08	11.50	13.80	4.47
变异系数(%) CV	40.30	57.97	35.06	41.19	24.27	23.84

表11 不同浓度PEG胁迫对马铃薯组培苗可溶性糖含量的影响(mg/g FW)

Table 11 Effect of different concentrations of PEG stress on soluble sugar contents of potato plantlets *in vitro*

PEG 浓度 PEG concentration	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
0(CK)	2.99 ± 1.56 c	4.16 ± 0.71 c	2.41 ± 0.31 b	6.48 ± 2.88 b	6.34 ± 0.82 d	6.57 ± 0.79 b
5%	2.76 ± 0.82 c	4.78 ± 2.28 bc	3.51 ± 0.18 b	10.20 ± 5.36 ab	4.66 ± 0.47 d	8.87 ± 1.04 ab
10%	8.21 ± 3.24 b	7.18 ± 1.28 abc	3.21 ± 0.38 b	14.35 ± 0.22 ab	11.00 ± 1.03 c	9.09 ± 0.50 ab
15%	10.41 ± 1.77 ab	8.09 ± 2.25 ab	6.55 ± 1.78 a	15.17 ± 1.88 a	14.92 ± 1.10 b	11.65 ± 1.58 a
20%	12.43 ± 2.32 a	10.60 ± 1.21 a	8.30 ± 1.25 a	15.24 ± 3.21 a	16.86 ± 0.00 a	12.70 ± 3.63 a
均值 Mean	7.36	7.35	4.96	11.63	10.62	9.48
标准差 SD	4.41	2.73	2.55	4.66	4.85	2.74
变异系数(%) CV	59.92	37.14	51.41	40.07	45.67	28.90

含量增高的幅度很小, 而‘渭薯1号’和‘D613’一直以较大的增长幅度增长。

2.11 马铃薯组培苗各生长指标在不同浓度 PEG 胁迫下变异分析

为筛选鉴定不同品种马铃薯组培苗对干旱胁迫反应的最佳 PEG 浓度, 计算分析了不同浓度 PEG 下各指标在不同品种间的变异系数(表 12)。各指标在不同 PEG 浓度下的变异系数不同, 茎长变异系数在 15%PEG 下最大, 5%PEG 下最小; 根长变异系数在 20%PEG 下最大, 为 54.39%, 在 10%PEG 下最小。为综合考虑相同 PEG 浓度下各

指标的变异性, 采用隶属函数法对各指标的变异系数进行转换, 分别计算各指标的隶属函数值, 比较平均隶属函数值, 值越大, 说明变异越大。从结果可以看出, 5%PEG 胁迫下的平均隶属函数值比其他处理值高, 表明在 5%PEG 胁迫下品种之间测得的指标值差异较大, 能更好地反应不同品种受 PEG 模拟的干旱胁迫后各品种之间的差异。各指标的变异系数比较, 脯氨酸、丙二醛和根鲜重的变异系数较大, 说明这几个指标对干旱较敏感, 而茎叶干物质含量变异系数较小, 说明该指标在干旱胁迫下可以保持一定的稳定性。

表 12 不同浓度 PEG 下品种间各指标的变异系数(%)

Table 12 Coefficient of variation of various indexes under different PEG concentrations

指标 Index	0(CK)	5%	10%	15%	20%
茎长 Stem length	19.75	14.28	21.47	39.72	19.74
根长 Root length	31.45	27.75	5.86	37.65	54.39
茎叶鲜重 Stem and leaf fresh weight	23.48	46.64	36.40	33.63	28.45
茎叶干物质含量 Stem and leaf dry matter content	9.58	13.91	10.10	12.01	5.94
根鲜重 Root fresh weight	41.62	41.88	58.43	62.01	70.24
根干物质含量 Root dry matter content	21.71	18.83	28.69	8.62	29.12
脯氨酸 Proline	80.83	75.71	54.98	41.16	35.81
可溶蛋白 Soluble protein	44.45	21.20	25.44	27.14	18.26
丙二醛 MDA	77.41	61.41	36.20	50.21	49.72
可溶性糖 Soluble sugar	39.03	52.11	42.29	31.55	24.30
平均隶属函数值 Average subordinate function value	0.536 7	0.556 8	0.427 6	0.462 6	0.375 7
排序 Rank	2	1	4	3	5

2.12 马铃薯组培苗各生长指标在不同浓度 PEG 胁迫下变异分析

根据前面数据分析结果, 不同品种(系)在不同 PEG 浓度胁迫下各指标发生了不同变化, 计算各品种(系)指标在不同浓度 PEG 间变异系数的隶属函数值(表 13)。在 0~20% 5 个 PEG 浓度梯度, 各指标的变异系数不同, 茎长变异系数‘东农 303’最大, ‘渭薯 1 号’最小, 根长变异系数‘D613’最大, ‘渭薯 1 号’最小。采用平均隶属函数值法对各品种(系)的指标变异系数进行综合分析, 变异系数从大到小依次

为‘D613’、‘东农 303’、‘200902’、‘春薯 2 号’、‘青薯 9 号’和‘渭薯 1 号’。平均隶属函数值越大, 说明该品种(系)受胁迫影响导致的生理生长变化越大。

2.13 马铃薯组培苗抗旱性综合评价

植物通过合成渗透调节物质, 如脯氨酸、可溶性糖等调节渗透压, 或者提高叶绿素含量, 诱导合成干旱蛋白等, 各种不同的机制共同作用, 其最终目的都是减少干旱对植株的伤害, 维持植株的正常生理代谢和能量供需平衡以维持植株的正常生长, 所以植株生长指标所受影响应该是一

表 13 不同品种(系)各指标变异系数的隶属函数值

Table 13 Subordinate function values of coefficient of variation of various indexes under different PEG concentrations

指标 Index	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
茎长 Stem length	0	1	0.164 8	0.300 5	0.795 6	0.530 3
根长 Root length	0	0.212 5	0.158 2	0.974 9	1	0.952 8
茎叶鲜重 Stem and leaf fresh weight	0.366 5	0	0.123 6	1	0.768 4	0.717 8
茎叶干物质 Stem and leaf dry matter	0	0.320 1	0.308 4	0.384 1	1	0.736 2
根鲜重 Root fresh weight	0.209 6	0.460 6	0	0.733 8	1	0.424 8
根干物质 Root dry matter	0.151 0	0.675 8	0.507 4	1	0.608 4	0
脯氨酸 Proline	0.108 0	0.924 6	1	0	0.505 2	0.543 2
可溶性蛋白 Soluble protein	0.287 9	0.647 1	1	0	0.419 0	0.640 2
丙二醛 MDA	0.482 3	1	0.328 7	0.508 4	0.012 6	0
可溶性糖 Soluble sugar	1	0.265 6	0.725 7	0.360 1	0.540 6	0
平均隶属函数值 Average subordinate function value	0.260 5	0.550 6	0.431 7	0.526 2	0.665 0	0.454 5
排序 Rank	6	2	5	3	1	4

表 14 抗旱性综合评价相关指标的隶属函数值

Table 14 Subordinate function values of indexes related to comprehensive evaluation of drought resistance

指标 Index	渭薯 1 号 Weishu 1	东农 303 Dongnong 303	青薯 9 号 Qingshu 9	200902	D613	春薯 2 号 Chunshu 2
茎长 Stem length	1	0	0.835 2	0.699 5	0.204 4	0.469 7
根长 Root length	1	0.787 5	0.841 8	0.025 1	0	0.047 2
茎叶鲜重 Stem and leaf fresh weight	0.633 5	1	0.876 4	0	0.231 6	0.282 2
茎叶干物质含量 Stem and leaf dry matter content	1	0.679 9	0.691 6	0.615 9	0	0.263 8
根鲜重 Root fresh weight	0.790 4	0.539 4	1	0.266 2	0	0.575 2
根干物质含量 Root dry matter content	0.849 0	0.324 2	0.492 6	0	0.391 6	1
丙二醛 MDA	0.517 7	0	0.671 3	0.491 6	0.987 4	1
平均隶属函数值 Average subordinate function value	0.827 2	0.475 9	0.772 7	0.299 8	0.259 3	0.519 7
排序 Rank	1	4	2	5	6	3

个最直观的综合评价指标,而MDA是干旱对植株造成的伤害的代表性生理指标。根据分析,抗旱性强的品种茎长、根长、茎叶鲜重、根鲜重、茎叶干物质含量、根干物质含量受干旱影响相对较小,变幅较小,MDA含量增幅小。因此,以茎长、根长、茎叶鲜重、根鲜重、茎叶干物质含量、根干物质含量、MDA含量的变异系数为负相

关指标,采用隶属函数法综合评价品种的抗旱性,分别计算各指标的隶属函数值,比较平均隶属函数值,值越大,说明抗旱性越强。

由表14可以看出,得分最高的是‘渭薯1号’,最低的是‘D613’,因此抗旱性从强到弱依次为:‘渭薯1号’>‘青薯9号’>‘春薯2号’>‘东农303’>‘200902’>‘D613’,与实际生产基本一致。

3 讨 论

隶属函数法是植物抗逆生理实验中常用的一种方法, 常用于抗旱、品质评价等需涉及多个综合指标的评价体系中, 避免了使用单一指标进行评价的片面性, 使评价结果更科学准确。马铃薯品种抗旱性评价目前仍无统一标准, 实际生产中主要采用以产量为基础的耐旱系数为标准^[18], 在实际农业生产中, 产量确实是耐旱的最终体现, 但是该评价方法受季节限制, 年际间重复结果可比性差, 而且很可能会淘汰本身产量低但抗旱性很强的育种资源。很多学者采用人工气候鉴定、组培苗胁迫鉴定以及自然失水胁迫鉴定等方法以生长指标和生理生化指标评价马铃薯耐旱性^[3]。采用马铃薯组培苗胁迫鉴定可以克服大田试验重复性差等弊端, 是相对稳定且易控制的模拟系统。本试验采用隶属函数法对马铃薯组培苗生长指标和MDA指标的变异系数进行抗旱性综合评价, 得出‘渭薯1号’和‘青薯9号’抗旱性较强, 与实际生产基本相符。

供试材料马铃薯组培苗茎长、根长、茎叶鲜重、根鲜重随着PEG浓度的升高呈下降趋势, 说明随着PEG浓度的升高马铃薯组培苗植株生长受干旱胁迫越严重, 在不含PEG的培养基中生长最好, 与邓珍等^[8]的研究结果一致。抗旱性强的品种受干旱影响小, 茎长、根长、茎叶鲜重、根鲜重指标变幅较小。同时, 随着PEG浓度的升高, 各生长指标的下降趋势渐缓, 即在高浓度PEG的环境中, 马铃薯组培苗生长极其缓慢或者不生长, 越接近最适生长环境植株生长的越快。

在0~20%, 随着PEG浓度的升高, 各品种(系)的马铃薯组培苗茎叶干物质含量、根干物质含量表现出逐渐升高的趋势, 除‘春薯2号’, 其他各品种(系)的根干物质含量的变异系数高于茎叶干物质含量的变异系数, 说明根干物质含量较茎叶干物质含量对干旱的反应更为敏感。在PEG模拟的低强度干旱环境下, 马铃薯组培苗植株的茎叶干物质含量及根干物质含量变化不大, 分析原因可能为组培苗在低强度干旱环境下通过自我调节机制维持组织的含水量以有效减轻干旱对自身生理活动的影响, 随着干旱强度的加大, 组培苗

的干物质含量升高速度加快, 组织的含水量快速降低, 说明此时的干旱胁迫对植株已产生了严重影响。抗旱性强的品种茎叶干物质含量、根干物质含量受干旱影响相对较小, 变幅较小。

目前, 部分研究认为水分胁迫下脯氨酸积累与抗旱性成正相关^[19-21], 另一部分研究认为脯氨酸积累是逆境胁迫产生的结果, 与品种的抗旱性无关^[22-24]。一部分研究认为干旱胁迫下游离脯氨酸含量的变化可作为衡量马铃薯抗旱能力的指标, 抗性强的品种脯氨酸含量增加的幅度较小^[25]。还有一部分研究认为旱性强的品种增幅较大^[26-29]。因此脯氨酸与植物抗性的关系还有待进一步研究。

植物在受到非致死干旱胁迫时能够诱导合成干旱诱导蛋白, 具有保护细胞结构, 增强耐脱水能力, 参与渗透调节, 制约离子吸收等作用^[30]。本文在0~20%, 随着PEG浓度的升高, 各品种(系)的马铃薯组培苗可溶性蛋白含量表现出逐渐升高的趋势。岳勇丽^[31]在研究杨梅(*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.)发现部分品种可溶性蛋白含量随着干旱胁迫程度的加剧而增加, 部分品种可溶性蛋白含量的变化呈现先上升后下降的变化趋势, 与侯栋等^[32]、李志燕^[26]研究结果一致。因此可溶性蛋白的变化趋势有待进一步研究。

丙二醛是膜脂氧化的主要产物之一, 反映了植物细胞受伤害的程度, 可用于表示细胞内氧自由基积累导致的膜脂氧化程度的强弱^[33,34]。大部分研究发现, 植物在干旱胁迫下丙二醛含量会增加, 抗旱性强的品种受干旱胁迫伤害相对较小, MDA的含量增加较小^[25,28,35]。大部分研究认为MDA可作为马铃薯重要的抗旱鉴定指标, 抗旱性强的品种膜质过氧化作用小, 抗旱性较强的品种含量增幅低于抗旱性较弱的品种^[3], 与本文研究结果一致。

可溶性糖是一种重要的渗透调节物质^[36]。干旱胁迫下, 作物体内常常积累大量的可溶性糖以提高细胞渗透势, 降低细胞的水势, 减少水分的流失; 某些可溶性糖能直接与细胞组分分子相连接, 对细胞膜与酶起到稳定作用^[37]。本研究中可溶性糖含量随着PEG浓度的升高表现出逐渐升高的趋势, 与焦志丽等^[38]的研究结果一致。而贾琼^[39]研究

中马铃薯在苗期一定的水分胁迫范围内可溶性糖含量增加,但是随着胁迫的加剧,可溶性糖含量变化不一,这些差异可能是由于不同品种对干旱的应对机制不同所致,因此可溶性糖含量作为抗旱指标还有待进一步研究。

邓珍等^[8]研究认为固体培养下 15%PEG-8000 浓度下品种间差异最大,是鉴定马铃薯品种组培苗对干旱胁迫反应的最佳浓度。李志燕^[26]认为固体培养条件下 8%PEG-6000 浓度为鉴定和评价不同马铃薯品种之间耐旱性强弱的最佳浓度。王谧^[9]研究认为浓度为 5%的 PEG-6000 下马铃薯生长指标变化达到显著差异。本次研究结果为固体培养下 5%PEG-8000 胁迫下培养 50 d 能更好地反应马铃薯组培苗受 PEG 模拟的干旱胁迫后各品种之间的差异。由于各品种耐旱性不同,抗旱性差的品种可能在低浓度的 PEG 下,或者在短期的高浓度 PEG 胁迫下各生理指标表现出较大的变化,而抗旱性强的品种可能在高浓度的 PEG 下或者在长时间的低浓度 PEG 胁迫下才表现出较大的变化,而从不同的指标来看,对于干旱敏感的指标,可能在低浓度 PEG 下就表现出较大的变化,对于干旱不敏感的指标,可能在高浓度的 PEG 胁迫下或者长时间低浓度的 PEG 胁迫下才表现出较大的变化,因此在考虑最适 PEG 胁迫浓度时,应结合品种、胁迫时间等因素。而且由于不同的品种抗旱机制不同,有些品种对干旱敏感,在低强度的干旱胁迫下就表现出强烈的变化,随即诱导相应抗旱机制的启动,以减轻干旱对植株的伤害,而某些品种忍耐能力强,在低强度的干旱胁迫下不受影响,在高强度的干旱胁迫下才启动相应的抗旱机制,因此单采用某一个强度的干旱胁迫或许并不能完全反映植物的全部抗旱机制,不能对抗旱性进行准确的判断。

不同品种受干旱影响后各指标的变异系数不同,‘渭薯 1 号’的变异主要受可溶性糖含量的影响,而‘东农 303’的变异主要受丙二醛含量的影响,可能与不同品种抗旱机制不同有关。‘青薯 9 号’和‘东农 303’的干旱下脯氨酸含量增幅大,这 2 个品种可能利用渗透调节的机制更多,‘渭薯 1 号’在干旱下可溶性糖含量增幅大,或许其利用增

加可溶性糖含量来应对逆境的机制更发达。因此,在干旱条件下,不同品种可能有不同的主导抗旱机制,可能某些品种主要通过合成大量可溶性糖来减缓光合效率降低的速度,而某些品种主要通过合成大量的干旱诱导蛋白来抵抗干旱带来的伤害,而某些品种各种抗旱机制所发挥的作用差不多,所以对植株进行抗旱评价时如果单采用某一个或者几个具体指标,如单用可溶性糖或可溶性蛋白,或者脯氨酸等指标,并不能全面综合反映出植株的抗旱性。

马铃薯干旱胁迫下生理变化过程复杂,简单的用某项或者几项生理变化值作为抗旱性鉴定指标缺乏准确性。马铃薯对干旱的响应机制,随着胁迫强度和历时的变化而变化,这是一个渐进的系列变化,各种生理变化之间的内在联系缺乏深入研究,如何确定起主导作用的变化过程是研究瓶颈。因此今后抗旱鉴定工作的重点应从分子水平上阐明马铃薯抗旱机制,选用正确的综合性抗旱评价方法,提高马铃薯抗旱性鉴定的科学性和准确性。

[参 考 文 献]

- [1] 白雅梅. 马铃薯的需水特性及水分胁迫对其生理特性的影响 [J]. 马铃薯杂志, 1999, 13(2): 117-120.
- [2] 何华, 陈国良, 赵世伟. 水肥配合对马铃薯水分利用效率的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 59-66.
- [3] 谢婉, 郑维列. 马铃薯抗旱评价指标及方法 [J]. 西藏农业科技, 2015, 37(4): 27-35.
- [4] 周桂莲, 杨慧霞. 小麦抗旱性鉴定的生理生化指标及其分析评价 [J]. 干旱地区农业研究, 1996, 14(2): 65-71.
- [5] Kaufmann M R. Evaluation of water stress control with polyethylene glycol by analysis of guttation [J]. Plant Physiology, 1971(47): 454-456.
- [6] 李建武, 王蒂. 水分胁迫对马铃薯试管苗抗氧化酶活性的影响 [J]. 北方园艺, 2008(1): 7-9.
- [7] 秦玉芝, 陈珏, 刘明月, 等. 聚乙二醇模拟干旱对马铃薯幼苗生长与细胞膜透性的影响 [J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2011, 37(6): 627-631.
- [8] 邓珍, 徐建飞, 段绍光, 等. PEG-8000 模拟干旱胁迫对 11 个马铃薯品种的组培苗生长指标的影响 [J]. 华北农学报, 2014, 29

- (5): 99–106.
- [9] 王谧. 马铃薯抗旱指标研究及抗旱性鉴定 [D]. 西宁: 青海大学, 2014.
- [10] 李亚杰. 不同马铃薯品种根系提水能力与抗旱性研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [11] 王谧, 王芳, 王舰. 应用隶属函数法对马铃薯进行抗旱性综合评价 [J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2014, 29(4): 476–481.
- [12] 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.
- [13] 李合生, 孙群. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 105–109.
- [14] 朱广廉. 植物体内游离脯氨酸的测定 [J]. 植物生理学通讯, 1983, 6(1): 35–37.
- [15] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 158–162.
- [16] 邹琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 112–115.
- [17] 靳志强, 王顺喜. 基于品质评价的玉米微波灭霉工艺参数选择 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 163–170.
- [18] Ramirez-Vallejo P, Kelly J D. Traits related to drought resistance in common bean [J]. Euphytica, 1998, 99(2): 127–136.
- [19] 汤章城. 逆境条件下植物脯氨酸的积累其可能的意义 [J]. 植物生理学通讯, 1984(1): 15–21.
- [20] 范敏, 金黎平, 刘庆昌, 等. 马铃薯抗旱机理及其相关研究进展 [J]. 中国马铃薯, 2006, 20(2): 101–107.
- [21] 钮福祥, 华希新, 郭小丁, 等. 甘薯品种抗旱性生理指标及其综合评价初探 [J]. 作物学报, 1996, 22(4): 392–398.
- [22] 张明生, 杜建厂, 谢波, 等. 水分胁迫下甘薯叶片渗透调节物质含量与品种抗旱性的关系 [J]. 南京农业大学学报, 2004, 27(4): 123–125.
- [23] Wood A J, Sanedoda H, Joly R J. Betaine aldehyde dehydrogenase in sorghum [J]. Plant Physiology, 1996, 110(4): 1301–1308.
- [24] 刘娥娥, 宗会, 郭振飞, 等. 干旱、盐、低温胁迫对水稻幼苗脯氨酸含量的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2007, 8(3): 235–238.
- [25] 抗艳红, 龚学臣, 赵海超, 等. 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯生理生化指标的影响 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 97–101.
- [26] 李志燕. 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.
- [27] 聂华堂, 陈竹生, 计玉. 水分胁迫下柑桔的生理变化与抗旱性的关系 [J]. 中国农业科学, 1991, 24(4): 14–18.
- [28] 宋志荣. 马铃薯对旱胁迫的反应 [J]. 中国马铃薯, 2004, 18(6): 330–332.
- [29] 李建武, 王蒂, 雷武生. 干旱胁迫对马铃薯叶片膜保护酶系统的影响 [J]. 江苏农业科学, 2007(3): 100–103.
- [30] 李建武. 水分胁迫对马铃薯生理生化特性的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.
- [31] 岳勇丽. 干旱胁迫下不同品种杨梅苗期生长和生理生化特征 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [32] 侯栋, 马风云, 王笛. 干旱胁迫对4核桃品种生化指标的影响 [J]. 西南林学院学报, 2010, 30(3): 24–27.
- [33] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会. 沙漠化过程中植物的适应对策及植被稳定性机理 [M]. 北京: 海洋出版社, 2004.
- [34] 茹广欣, 郝绍菊, 茹桃勤, 等. 干旱梯度下刺槐无性系生理指标的变化与品种抗旱性关系的研究 [J]. 河南科技学院学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 37–40.
- [35] 田魏龙. 沙棘六个种(品种)对干旱胁迫的响应 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [36] 郭华军. 水分胁迫过程中的渗透调节物质及其研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(15): 7750–7753.
- [37] 杨德光, 刘永玺. 作物渗透调节及抗渗透胁迫基因工程研究进展 [J]. 作物杂志, 2015(1): 6–13.
- [38] 焦志丽, 李勇, 吕典秋, 等. 不同程度干旱胁迫对马铃薯幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 中国马铃薯, 2011, 25(6): 329–333.
- [39] 贾琼. 水分胁迫对马铃薯生长与生理特性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.