

基于渗透胁迫的马铃薯试管苗 抗旱评价体系的构建

娄 艳^{1,2}, 白江平^{1,2}, 杨宏羽^{1,3}, 高慧娟^{1,2}, 张俊莲^{1,3}, 王 蒂^{1,2}

(1. 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室/甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为探明抗旱生理生化机制和筛选抗旱品种, 建立科学有效的马铃薯实验室抗旱评价体系, 本研究分析了不同浓度 PEG (polyethylene glycol 6000) 对 CIP 397098.12、CIP 391180.6、CIP 391724.1、CIP 392745.7、CIP 392759.1、CIP 393613.2、CIP 397035.26、CIP 302476.108、CIP 304345.102、CIP 304405.47、CIP 391930.1、CIP 391931.1、陇薯 3 号及 Atlantic 马铃薯品种试管苗生理生化指标的影响, 并利用隶属函数分析方法对供试材料的综合抗旱能力进行了评价。结果表明: 随着 PEG 浓度的增加, 马铃薯试管苗的地上部分及根系生长受到严重的抑制, 对马铃薯试管苗的根系长度的抑制作用更明显。当 PEG 浓度为 9% 时, 14 个马铃薯品种间生长指标的差异最大, 试管苗株高、根系长度等 5 个生长指标均显著低于对照, 说明 9% 是用于鉴定不同马铃薯品种试管苗对水分胁迫响应的最适浓度。根据综合抗旱评价对供试马铃薯材料的抗旱性进行了排序, 由强到弱依次为: 陇薯 3 号、CIP 391930.1、CIP 397098.12、CIP 391931.1、CIP 304405.47、CIP 392759.1、CIP 397035.26、CIP 393613.2、CIP 302476.108、CIP 304345.102、CIP 391180.6、Atlantic、CIP 391724.1、CIP 392745.7。

关键词: 马铃薯; 水分胁迫; 生理生化指标; 隶属函数法

中图分类号: S332.1 **文献标志码:** A

Establishment of an evaluation system on drought resistance of potato plantlets based on osmotic stress

LOU Yan^{1,2}, BAI Jiang-ping^{1,2}, YANG Hong-yu^{1,3}, GAO Hui-juan^{1,2}, ZHANG Jun-lian^{1,3}, WANG Di^{1,2}

(1. Gansu Key Laboratory of Crop Improvement and Germplasm Enhancement/Gansu Provincial Key Laboratory of

Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To explore the physiological and biochemical mechanism of drought resistance and establish an efficient drought-resistant evaluation system on potato plantlets, the effect of the PEG (polyethylene glycol 6000) simulated drought stress on the physiological and biochemical parameters for plantlets of potato varieties including CIP 397098.12, CIP 391180.6, CIP 391724.1, CIP 392745.7, CIP 392759.1, CIP 393613.2, CIP 397035.26, CIP 302476.108, CIP 304345.102, CIP 304405.47, CIP 391930.1, CIP 391931.1, Longshu3 and Atlantic, and the drought-resistant abilities of testing materials were comprehensively evaluated using the method of Subordinate Function Analysis. The results showed that increase of PEG concentration inhibited the growth of potato seedlings, especially the length of root system that was seriously affected. When 9% PEG was applied, five growth indicators of the samples, such as plant height, root length, etc., were significantly lower than those in the control samples. Therefore, 9% PEG6000 was the optimal concentration to simulate water stress for potato seedlings. According to the value of the comprehensive evaluation, drought resistance of these varieties from strong to weak could be ranked as follows: Longshu3 > CIP 391930.1 > CIP 397098.12 > CIP 391931.1 > CIP 304405.47 > CIP 392759.1 > CIP 397035.26 > CIP 393613.2 > CIP 302476.108 >

收稿日期: 2015-06-08

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2014DFG31570); 甘肃科技基金(1308RJZA131, 1308RJJA005); 兰州科技研究项目(2013-4-156)

作者简介: 娄 艳(1989—), 女, 甘肃临夏人, 硕士, 主要从事马铃薯遗传育种研究。E-mail: lou_yan0931@163.com。

白江平(并列第一作者), 男, 甘肃天水人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为作物遗传育种。E-mail: baijp@gsau.edu.cn。

通信作者: 王 蒂(1955—), 男, 陕西长安人, 教授, 博士生导师, 主要从事作物遗传育种研究。E-mail: wangdi@gsau.edu.cn。

CIP 304345.102 > CIP 391180.6 > Atlantic > CIP 391724.1 > CIP 392745.7.

Keywords: potato; water stress; physiological and biochemical indicators; subordinate function method

马铃薯根系较浅,对水分亏缺比较敏感^[1]。水分亏缺会对植物的生长状况、形态结构与生理生化代谢产生显著影响^[2-3],进而影响其生长发育并导致其品质下降,严重时可导致大幅度减产。因此,了解马铃薯种质资源的抗旱机理,评价及鉴定其抗旱性,可为选择、培育耐旱高产的马铃薯种质奠定一定的理论基础。田间试验是鉴定品种抗性,产品品质等的最有效的方法,然而,通过大田室外试验来观察植株在干旱胁迫下的表现特征,进而筛选鉴定不同品种的耐旱性情况不仅费时、费力,还会受环境及观察者个人偏好等的影响而造成一定误差,而试管苗组织培养技术可以在短时间内快速对不同基因型品种在不同生长阶段的逆境承受能力情况进行研究,因此,植物组织培养便成了研究植物耐性机制的有用工具。

Heyser 等^[4]首次以 PEG 作为诱导剂和筛选剂筛选出抗旱的烟草细胞系以来,高分子量的聚乙二醇(PEG)(分子量≥6000)常作为一种非穿透渗透剂被广泛用于植物研究领域。大量研究表明:用 PEG6000 诱导水分胁迫所达到的效果与土壤逐步干旱所造成的效果是相似的,因此,用 PEG6000 来模拟水分胁迫是可行的^[5-6]。邓珍等^[7]用 PEG8000 模拟水分胁迫研究了 11 个马铃薯品种脱毒试管苗在不同浓度 PEG 胁迫下生长指标的变化,并利用 6 个相对指标值,对 11 个马铃薯品种的干旱敏感性进行了整体聚类分析,崔江慧等^[8]通过测定、比较不同浓度 PEG6000 胁迫下 3 个高粱品种幼苗中内源抗氧化

酶活性变化,对相对抗旱性直接进行了分析、评价。然而,马铃薯的抗旱性是由多种因素综合影响的,通过对其中单一指标的测定或分析很难准确地反映材料的抗性情况,具有一定的片面性。因此,综合各生理生化指标及生长指标评价植物的抗旱性,可以有效地消除因单个指标测定引起的片面性。杨瑰丽等^[9-10]利用 PEG6000 模拟干旱胁迫研究了水稻萌发期 8 个形态和生理指标的变化,并利用隶属函数分析方法对 62 份水稻材料抗旱能力进行了综合评价,从 62 个水稻品种(系)中筛选出了 14 个高抗旱品种(系)。因此,本研究以 14 个马铃薯品种试管苗为供试材料,通过 PEG6000 模拟干旱胁迫,研究了胁迫处理与对照条件下马铃薯试管苗相关生长指标和生理生化指标,并利用隶属函数对供试材料的抗旱能力进行综合评价,从而为建立科学合理的马铃薯实验室抗旱评价体系提供基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在 2014 年 10 月—2015 年 1 月在甘肃农业大学作物遗传改良与种质创新重点实验室进行,本研究选用 12 份从国际马铃薯中心(CIP)引进的马铃薯材料和 2 份甘肃常用马铃薯品种即抗逆性较强的栽培种陇薯 3 号(L3)和对逆境胁迫较敏感的栽培种大西洋(DXY)脱毒试管苗为试验材料(如表 1)。试验共设四个 PEG 梯度即 0(对照)、3%、6%、9%。

表 1 14 份马铃薯种质材料编号及亲本材料

Table 1 Codes of potato germplasms and pedigrees

品种编号 Species code	CIP 检索号 CIP accession number	母本材料 Parent female	父本材料 Parent male
1	CIP 397098.12	391533.1 = (LR93.060)	391207.2 = (LR93.050)
2	CIP 391180.6	385305.1 = (XY.9)	378017.2 = (LT-7)
3	CIP 391724.1	800959 = (GRANOLA)	386316.1 = (XY.20)
4	CIP 392745.7	88078	386316.1 = (XY.20)
5	CIP 392759.1	388676.1 = (Y84.027)	PENTLAND CROWN
6	CIP 393613.2	391896.15 = (DXY.15)	391894.7 = (DXY.7)
7	CIP 397035.26	392823.4 = (LR93.120)	92.187
8	CIP 302476.108	TITIA	392745.7 = (92.187)
9	CIP 304345.102	388615.22 = (C91.640)	676008 = (I-1039)
10	CIP 304405.47	WA.018	676008 = (I-1039)
11	CIP 391930.1	BWH-87.338	SELF
12	CIP 391931.1	SR-17.50	SELF
13	陇薯 3 号(L3)	35-131	73-21-1
14	Atlantic (DXY)	B5141-6	Wauseon

1.2 试验方法

分别配制含有 0(m/v)、3% (m/v)、6% (m/v)、9% (m/v)PEG6000 的 MS 固体培养基,待凝固、观察一周后将同一时期转接的长势相对一致的脱毒试管苗为基础苗,在超净工作台上将脱毒试管苗剪成 2cm 左右的茎段(含 2—3 个腋芽),接种在分别含有不同 PEG 的培养基中,每三角瓶接种 5~6 个茎段,每个品种的不同胁迫处理各接 30~40 瓶,在 25℃、16h/8h 昼夜光周期条件下培养 40 天。

用 WinRHIZO2009 根系扫描仪进行根系扫描,记录相关数据;用佳能(CANON)EOS 700D 单反相机对不同浓度胁迫处理的试管苗进行拍照(附录 2),观察、记录其生长状况。超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法,以单位时间内光还原 50%氮蓝四唑(NBT)为 1 个酶活性单位(U);过氧化物歧化酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法,其活性以 1g 鲜重所含 POD 在 1min 内氧化愈创木酚的微克分子数表示;过氧化氢酶(CAT)活性和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的测定均采用紫外吸收法,分别以每分钟氧化 1 μmol H₂O₂ 或 1 μmol AsA 的酶量为 1 个酶活性单位(U);可溶性蛋白质含量测定采用考马斯亮蓝(G-250)染色法;以鲜重为基础的植株水分含量的测定采用烘干法(Water content, WC),以上测定方法均参照邹奇^[11]的植物生理实验指导书并稍作调整,且其中所有酶活性测定均使用 U-5100UV 型分光光度计。用 20 cm 的直尺测定株高(Plant height);叶片中叶绿素含量的测定采用浸泡法^[12]。

1.3 数据处理

数据采用相对值(即耐旱系数^[13] $K = \text{干旱处理测定值} / \text{对照测定值}$)。试验数据由 Excel 2007 进行分析处理,所得数据结果运用 Origin 8.0 进行图形输出,用 SPSS19 进行方差统计分析及相关性分析。应用模糊数学中的隶属函数进行综合抗旱性评价^[9]。

隶属函数计算公式:

$$u_j = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} (j = 1, 2, \cdots, n)$$
 (1)

式中, X_j 表示第 j 个指标, $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别表示第 j 指标的最大值和最小值。

权重 W_j 计算公式:

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} (j = 1, 2, \cdots, n)$$
 (2)

式中, P_j 表示第 j 个综合指标的贡献率。

综合抗旱能力(D)的计算公式:

$$D = \sum_{j=1}^n u_j W_j$$
 (3)

式中, u_j 表示第 j 个综合指标的隶属函数值, W_j 表示第 j 个综合指标的权重。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 PEG 对马铃薯试管苗保护酶活性的影响

SOD、POD、CAT、APX 等组成植物体内的抗氧化保护酶系统,能及时清除植物体内过剩的活性氧自由基,从而使植物体免受过氧化伤害。随着 PEG 浓度的增加,14 个马铃薯品种中 CAT、SOD、POD 活性整体呈先上升后下降的趋势(图 1A、1B、1C)。

在 3%、6% PEG 胁迫下品种 12 的 SOD 活性增加幅度最小,相比于其他品种,品种 L3 始终维持较高的 SOD 活性。除 CIP 391930.1 外所有品种的 SOD 均在 PEG 浓度增加到 6% 时达到最大值;POD 测定中 CIP 302476.108 始终维持较高的 POD 活性,在 3%、6%、9% PEG 胁迫下相对于对照依次升高 15.24%、11%、0.99%;而 CIP 391180.6 始终维持较高的 CAT 活性。APX 活性(图 1D)变化规律性不是很强,总体变化趋势是先升高后降低,而在 CIP 397098.12、CIP 304345.102 中 APX 活性则随胁迫程度的加剧呈持续上升的趋势。

2.2 不同浓度 PEG 对马铃薯试管苗可溶性蛋白含量的影响

可溶性蛋白作为渗透调节物质在植物对逆境胁迫的响应中起着积极的作用。本研究中随着胁迫程度的加剧,部分马铃薯品种试管苗中可溶性蛋白的含量呈现先下降后上升再下降的变化,也有部分呈先上升后下降的趋势(图 2)。在 3% PEG 轻度胁迫下, CIP 392745.7 相对于对照增加的量最小,为 0.25%,L3 相对于对照增加的量最大,为 18.09%,而 CIP 393613.2 却相对于对照下降了 24%,是 14 个供试马铃薯品种中下降幅度最大的。在 9% PEG 重度水分胁迫下,除 CIP 391724.1、CIP 392759.1、CIP 304345.102 中可溶性蛋白含量低于对照水平外,其余品种中其含量均维持在高于对照的水平,可使植物细胞的渗透势维持在较低的水平,以增强植物对水分胁迫的抵抗。

2.3 不同浓度 PEG 对马铃薯试管苗叶绿素含量的影响

植物叶片内叶绿素含量的高低通常是反映其光合能力强弱的重要指标之一。随着 PEG 浓度的增加,马铃薯试管苗其叶片内叶绿素 a、叶绿素 b 及类

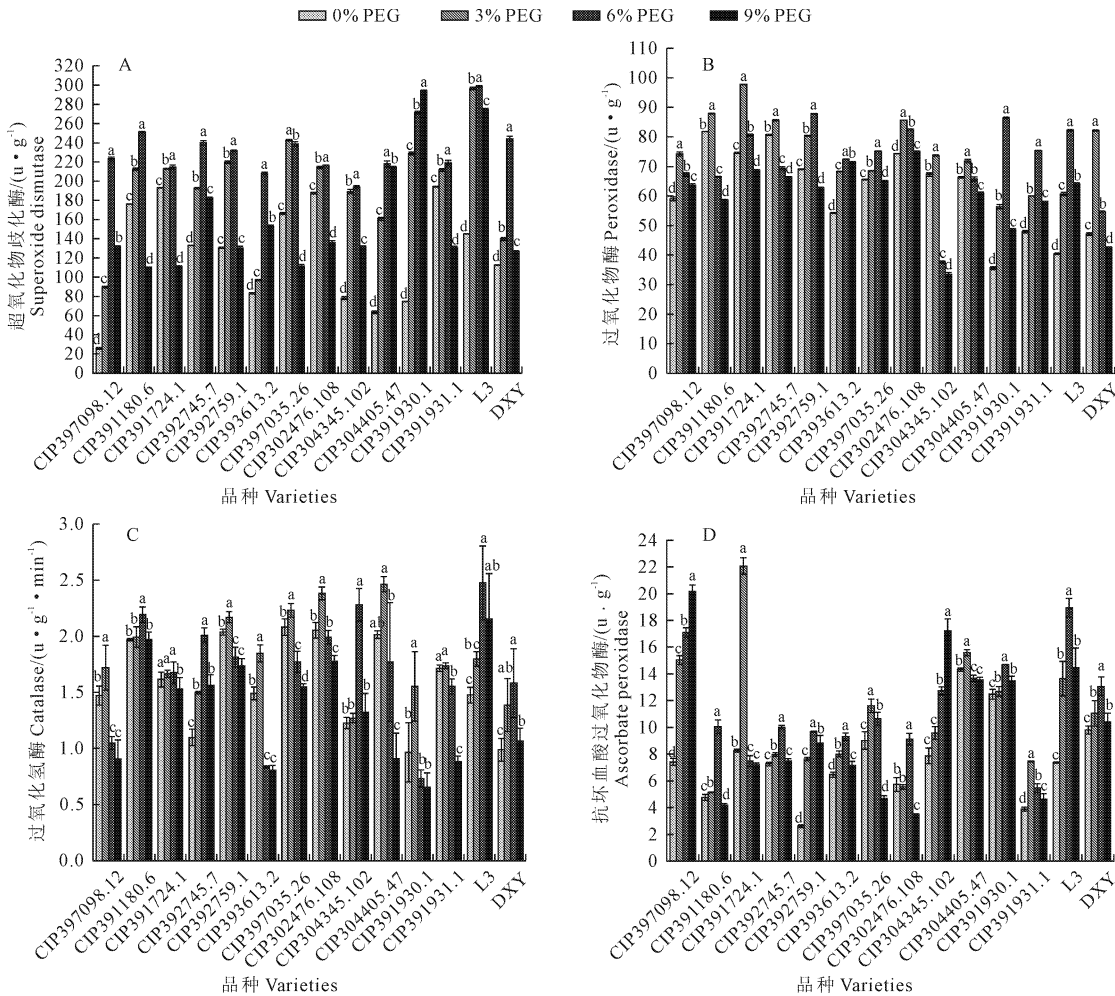


图 1 PEG 渗透胁迫对马铃薯试管苗 SOD、POD、CAT 及 APX 含量的影响

Fig.1 Effects of PEG osmotic stress on SOD, POD, CAT and APX contents of potato plantlets

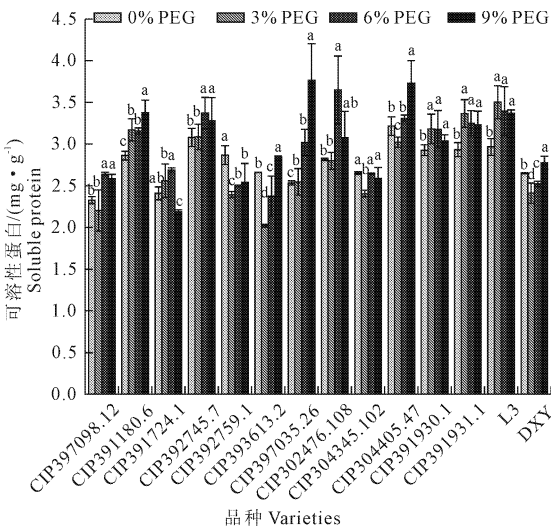


图 2 PEG 渗透胁迫对马铃薯试管苗可溶性蛋白含量的影响

Fig.2 Effects of PEG osmotic stress on soluble protein contents of potato plantlets

胡萝卜素含量整体变化并无明显的规律性(图 3A、3B,3C)。相对于大部分品种而言,这三种叶绿素含

量均随胁迫程度的加强而呈持续下降的趋势,但 CIP 304345.102、CIP 304405.47、CIP 391930.1 和 DXY 等四个品种中叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量均呈先下降后升高再下降的趋势。而 CIP 391931.1 中类胡萝卜素含量呈现升高后下降的趋势。

2.4 不同浓度 PEG 对马铃薯试管苗生长的影响

马铃薯试管苗受到 PEG 模拟水分胁迫后,其生长状况因品种、胁迫浓度而异,受到不同程度的影响,随着 PEG 浓度的不断增加,马铃薯试管苗的地上部分及根系生长受到越来越严重的影响(附录 1)。

在不含 PEG 的正常处理下 14 个品种各生长指标有较明显的差异,这可能与品种之间遗传基础的不同有关。在 3%、6% 及 9% PEG 胁迫下,所有马铃薯品种试管苗的各相对生长指标的平均值,均呈现逐渐下降的趋势。通过方差分析对每个品种在不同浓度 PEG 胁迫下的生长指标进行了分析(附录

1),并对 14 个不同马铃薯品种在 PEG 浓度为 3%、6%、9% 下相对生长指标^[14](即处理生长指标与对照生长指标的比值)的平均值大小、标准差及其变异系数进行了计算(表 2)。

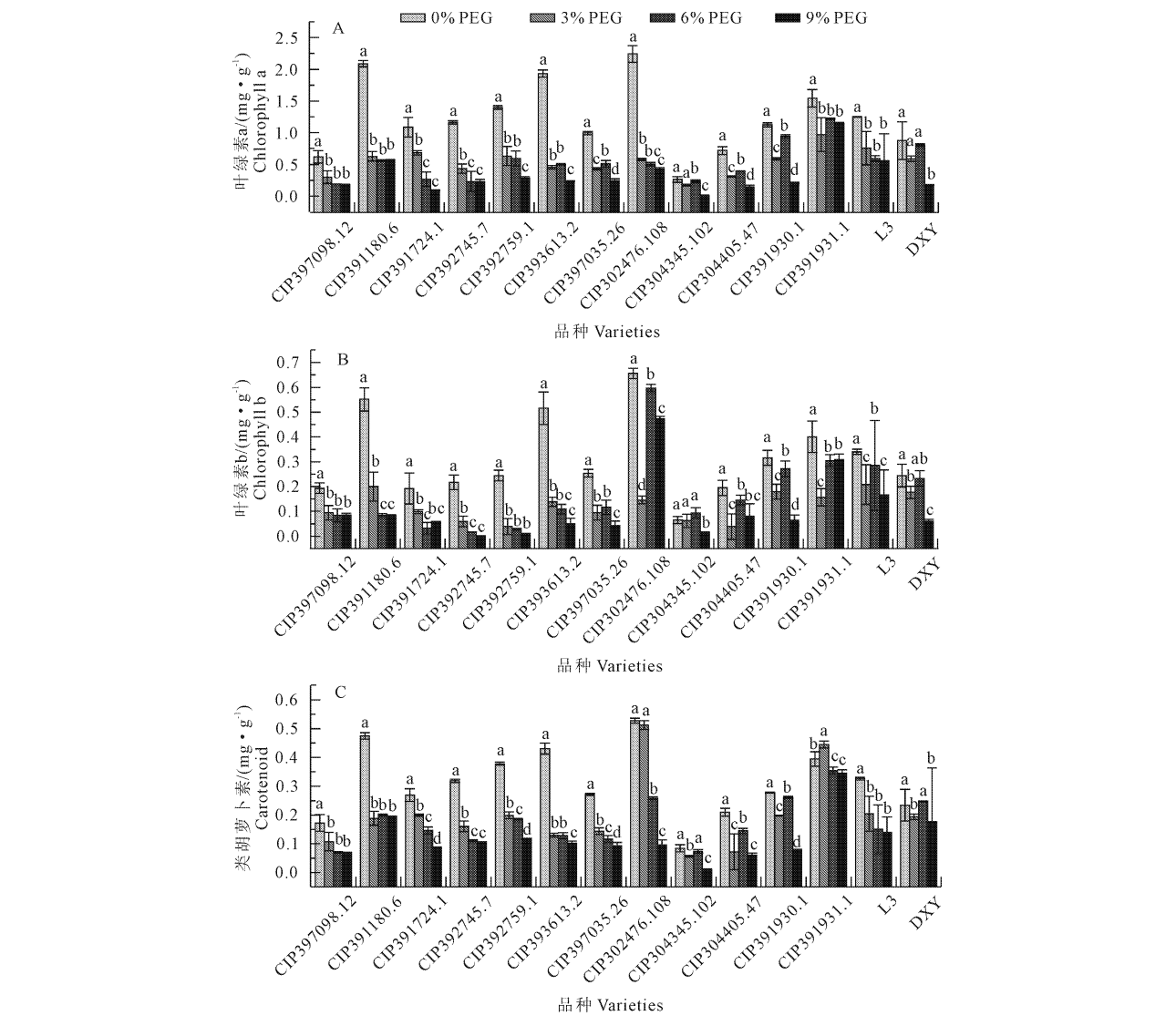


图 3 PEG 渗透胁迫对马铃薯试管苗叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量的影响
Fig.3 Effects of PEG osmotic stress on chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid contents of potato plantlets

表 2 不同胁迫条件下各生长指标的比较

Table 2 Comparisons of various growth indexes under different stress conditions						
PEG 浓度	指标 Indicators	相对株高 Relative plant height/ %	相对根长 Relative root length/%	相对根系表面积 Relative root surf area/ %	相对根系体积 Relative root volume/ %	相对含水量 Relative water content/ %
3%	均值 Mean	66.70	36.49	37.45	36.92	97.76
3%	标准差 SD	18.85	19.14	17.63	18.50	1.42
3%	变异系数 CV	28.26	52.45	47.06	50.12	1.45
6%	均值 Mean	49.01	16.78	19.24	20.82	95.73
6%	标准差 SD	16.79	10.49	9.34	7.60	1.84
6%	变异系数 CV	34.26	62.50	48.56	36.52	1.92
9%	均值 Mean	32.76	7.99	9.19	14.58	92.11
9%	标准差 SD	8.91	6.56	4.82	5.50	3.17
9%	变异系数 CV	27.21	82.13	52.46	37.73	3.44

在 3% PEG 胁迫下, 14 个品种中, 除 CIP 397035.26 的株高与其对照间没有显著差异, CIP 302476.108 的根长与根系表面积与其相应对照间差异不显著外, 其余各品种的株高、根长、根系体积、根系表面积均与其对照间具有显著差异。然而, 在不同马铃薯品种地上部分组织含水量的分析中发现大部分品种均与其对照间没有显著差异。在 9% PEG 渗透胁迫下, 相对根长、相对根系表面积、相对根系体积及相对含水量的变异系数分别为 82.13%、52.46%、37.73%、3.44%, 均较大于 6% PEG 胁迫处理下的变异系数(表 2), 表明在 PEG 为 9% 的胁迫下, 测得的各生长指标值间差异明显, 能更好地反映不同马铃薯品种之间的差异。因此, 9% PEG 是鉴定不同马铃薯品种试管苗对水分胁迫反应的最佳浓度。且在该胁迫下, 供试马铃薯材料的平均相对根系长度为 7.99%, 变异系数为 82.13%, 是 5 个生长指标中变化最大的指标, 说明马铃薯试管苗的根系长度更易在水分胁迫下受到影响。

2.5 9% PEG6000 胁迫下马铃薯试管苗抗旱性的综合评价

在对 9% PEG 胁迫下马铃薯试管苗的相关生理生化指标及生长指标进行相关性分析(表 3), 结果表明, POD 活性与根系长度、根系表面积, 叶绿素 a 含量与叶绿素 b、类胡萝卜素含量及根系长度与根系表面积间有极显著的相关性($P < 0.01$), CAT 活性与株高, 根系体积与根系长度、根系表面积间存在显著的相关性($P < 0.05$), 表明 POD 活性与根系的生长状况关系密切, CAT 活性更偏向于与植株地上部分生长相关, 三种叶绿素之间互相影响, 根系面积的大小则主要受根系长度影响。

利用 SPSS statistic19 统计软件对不同马铃薯在 9% PEG 模拟水分胁迫下的各个抗旱指标进行主成分分析, 前五个指标的累计贡献率已达 81.78% (表 4)。由表 5 可知, POD、根系长度、根系表面积、根系体积在第一个主成分上有较高的载荷, 说明第一主成分能基本反映这几个指标的信息。同理, 叶绿素 a 与叶绿素 b、类胡萝卜素在第二个主成分上有较高的载荷, SOD、可溶性蛋白、株高在第三个主成分上有较高的载荷, APX 在第四个主成分上有较高的载荷, CAT 和地上部分组织含水量在第五个主成分上有较高的载荷, 也就是说提取的五个主成分能基本反映 13 个指标的信息。因此, 用前五个主成分代替全部的 13 个指标, 组成新的综合指标对供试马铃薯材料进行抗旱性评价分析, 依次命名为 (Comprehensive Index, CI) CI1、CI2、CI3、CI4、CI5。利用公式(1),

分别计算出 14 份供试马铃薯材料在五个新的综合指标下的隶属函数值 U_j (表 6), 再由公式(2)计算出个综合指标的权重值 W_j (表 7), 依次为 0.311, 0.250, 0.174, 0.137, 0.129, 最后用公式(3)计算各马铃薯材料的综合抗旱能力值 D 的大小(表 6)。根据 D 值的大小就可以对不同品种马铃薯试管苗的抗旱能力强弱进行排序。由表 6 可知, 品种 L3 的 D 值最大, 表明品种 L3 在 9% PEG 模拟水分胁迫下抗旱性最强; AS 的 D 值最小, 表明 AS 在 9% PEG 模拟水分胁迫下抗旱性最弱。14 份供试马铃薯材料的抗旱性由强到弱依次为: L3、CIP 391930.1、CIP 397098.12、CIP 391931.1、CIP 304405.47、CIP 392759.1、CIP 397035.26、CIP 393613.2、CIP 302476.108、CIP 304345.102、CIP 391180.6、DXY、CIP 391724.1、CIP 392745.7。

3 讨论与结论

本研究发现, 14 个马铃薯品种的试管苗在 3% PEG 轻度水分胁迫下, 其 CAT、SOD、POD 活性均相对于其对照上升, 而在 6%、9% PEG 胁迫下, 因品种对水分胁迫的敏感差异, 抗性强的品种中 CAT、SOD、POD 活性仍呈持续的上升趋势, 而抗性弱的品种则有下降趋势, 这与崔江慧等^[8,15-16]研究报道是一致的, 而这与贾琼等^[17]在 PEG 模拟水分胁迫试验中指出的马铃薯叶片中 SOD 活性在轻度水分胁迫下活性下降, 而在中、重度水分胁迫下活性有上升趋势的结论并不一致。一方面, 可能是由于研究所用马铃薯材料自身特性的差异及其酶活性测定所选组织的不同引起的; 另一方面, 本研究选取生长相对一致的供试马铃薯试管苗茎段接种在分别含有 0%、3%、6%、9% PEG 的 MS 固体培养基上进行培养, 并对其生理生化指标的变化进行比较分析, 这与李建武等^[16]用不同浓度的 PEG 溶液对培养的长出大量根系的试管苗进行根际水分胁迫及贾琼等分别用 15%、20%、25% 的 PEG 溶液浸泡从田间采集的马铃薯叶片 24 h, 测定相关生理指标的水分胁迫研究方法有较大的差异。另外, 本研究在含有不同浓度 PEG 的 MS 培养基配制上是通过将准确配制并经过滤灭菌的 PEG 的标准液与经高温高压灭菌的 MS 固体培养基, 待其降温凝固前迅速按一定的比例进行混合配置而成, 然后将配好的培养基置于培养室观察 3~5 d, 一方面保证其中 PEG 充分渗透, 另一方面也可观察是否有污染发生。这与邓珍等^[7]用分别含有 PEG8000 的 1/2MS 液体培养基与液体培养基等体积混合, 待固体培养基和液体培养基平衡 48 h

表 3 9% PEG 胁迫下马铃薯生理生化指标间的相关矩阵

Table 3 Correlation matrix of potato drought resistance indicators under 9% PEG stress

变量 Variables	超氧化物歧化酶 SOD	过氧化物酶 POD	过氧化氢酶 CAT	抗坏血酸过氧化物酶 APX	可溶性蛋白 Soluble protein	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	株高 Plant height	根系长度 Root length	根系表面积 Root surf area	根系体积 Root volume	含水量 Water content
超氧化物歧化酶 SOD	1												
过氧化物酶 POD	0.283	1											
过氧化氢酶 CAT	-0.339	-0.137	1										
抗坏血酸过氧化物酶 APX	0.162	-0.232	-0.019	1									
可溶性蛋白 Soluble protein	-0.025	0.134	-0.153	-0.397	1								
叶绿素 a Chlorophyll a	-0.068	0.458 *	-0.127	0.050	0.257	1							
叶绿素 b Chlorophyll b	0.045	0.313	-0.249	-0.254	0.096	0.615 * *	1						
类胡萝卜素 Carotenoid	-0.184	0.209	-0.046	0.003	0.092	0.751 * *	0.343	1					
株高 Plant height	0.207	-0.341	-0.482 *	0.047	0.388	-0.060	-0.210	-0.185	1				
根系长度 Root length	0.276	0.620 * *	0.149	0.134	-0.104	0.093	-0.030	-0.153	-0.135	1			
根系表面积 Root surf area	0.374	0.630 * *	0.076	0.022	-0.146	0.011	0.029	-0.261	-0.114	0.957 * *	1		
根系体积 Root volume	0.445	0.270	0.035	0.440	-0.405	-0.136	0.038	-0.439	-0.187	0.482 *	0.588 *	1	
含水量 Water content	0.216	0.414	-0.240	-0.164	-0.285	-0.070	-0.112	0.059	-0.247	0.108	0.146	0.034	1

注:“*”、“* *”分别表示在 0.05、0.01 水平的显著相关。

表 4 基于 9% PEG 胁迫下马铃薯各抗旱变量解释的总方差

Table 4 Total variance explained by potato drought variables under 9% PEG stress

成份 Component	初始特征值 Initial Eigen values			提取平方和载入 Extraction of sum of squares loaded		
	合计 Total	方差的 % % of variance	累积/% Cumulative	合计 Total	方差的 % % of variance	累积/% Cumulative
1	3.305	25.424	25.424	3.305	25.424	25.424
2	2.656	20.429	45.853	2.656	20.429	45.853
3	1.852	14.246	60.099	1.852	14.246	60.099
4	1.452	11.172	71.270	1.452	11.172	71.270
5	1.366	10.509	81.780	1.366	10.509	81.780
6	0.916	7.043	88.823			
7	0.542	4.169	92.991			
8	0.405	3.112	96.103			
9	0.229	1.765	97.868			
10	0.157	1.211	99.078			
11	0.097	0.745	99.823			
12	0.019	0.144	99.967			
13	0.004	0.033	100.000			

表 5 基于 9% PEG 胁迫下马铃薯各抗旱变量的成份矩阵

Table 5 Component matrixes of potato drought variables under 9% PEG stress

变量 Variables	成份 Component				
	综合指标 1 CI1	综合指标 2 CI2	综合指标 3 CI3	综合指标 4 CI4	综合指标 5 CI5
超氧化物歧化酶 SOD	0.523	− 0.056	0.559	0.177	− 0.197
过氧化物酶 POD	0.681	0.617	0.032	− 0.239	− 0.069
过氧化氢酶 CAT	0.025	− 0.226	− 0.749	− 0.222	0.415
抗坏血酸过氧化物酶 APX	0.195	− 0.351	− 0.068	0.819	0.072
可溶性蛋白 Soluble protein	− 0.329	0.375	0.486	− 0.373	0.437
叶绿素 a Chlorophyll a	0.007	0.869	− 0.039	0.366	0.181
叶绿素 b Chlorophyll b	0.051	0.709	0.012	0.214	0.047
类胡萝卜素 Carotenoid	− 0.259	0.744	− 0.248	0.303	− 0.103
株高 Plant height	− 0.287	− 0.187	0.817	0.086	0.199
根系长度 Root length	0.862	0.072	− 0.010	− 0.133	0.327
根表面积 Root surf area	0.913	0.034	0.070	− 0.182	0.254
根系体积 Root volume	0.766	− 0.300	0.001	0.326	0.071
含水量 Water content	0.327	0.121	− 0.023	− 0.263	− 0.832

表 6 不同马铃薯种质资源在五个综合指标下的隶属函数值及综合评价值 D

Table 6 Subordinate function value (U_j) and Comprehensive evaluation D of different potato germplasms under five composite indicators

品种 Germplasm	综合指标 1 的 隶属函数值 U_{CI1}	综合指标 2 的 隶属函数值 U_{CI2}	综合指标 3 的 隶属函数值 U_{CI3}	综合指标 4 的 隶属函数值 U_{CI4}	综合指标 5 的 隶属函数值 U_{CI5}	D 值综合 评价值
CIP 397098.12	0.494	0.420	0.785	0.911	0.168	0.542
CIP 391180.6	0.051	0.323	0.366	0.526	0.702	0.323
CIP 391724.1	0.341	0.293	0.190	0.139	0.000	0.231
CIP 392745.7	0.166	0.232	0.099	0.186	0.217	0.180
CIP 392759.1	0.661	0.097	0.226	1.000	0.417	0.460
CIP 393613.2	0.430	0.355	0.581	0.083	0.055	0.342
CIP 397035.26	0.000	0.465	0.906	0.000	0.767	0.373
CIP 302476.108	0.363	0.452	0.194	0.281	0.332	0.341
CIP 304345.102	0.161	0.000	0.504	0.619	0.799	0.325
CIP 304405.47	0.397	0.411	1.000	0.352	0.384	0.498
CIP 391930.1	1.000	0.372	0.737	0.226	0.217	0.591
CIP 391931.1	0.128	1.000	0.445	0.857	0.293	0.523
L3	0.960	0.667	0.054	0.201	1.000	0.631
DXY	0.096	0.503	0.000	0.379	0.231	0.237

表 7 基于 9% PEG 胁迫下马铃薯抗旱性指标综合指标 CIx 的特征值、特征向量及权重

Table 7 Characteristic values, vectors and weight values of Comprehensive Index of potato drought resistance under 9% PEG stress

综合 指标 Compre- hensive index (CI)	特征值 Eigen values	特征向量 Eigenvectors													贡献 率/% Rate of contribution	权重 (W_j) Weight
		超氧 化物 歧化酶 SOD	过氧 化物 酶 POD	过氧 化氢 酶 CAT	抗坏血 酸过氧 化物酶 APX	可溶性 蛋白 Soluble protein	叶绿 素 a Chloro- phyll a	叶绿 素 b Chloro- phyll b	类胡 萝卜 素 Carotenoid	株高 Plant height	根系 长度 Root length	根系 表面积 Root surf area	根系 体积 Root volume	含水 量 Water content		
CI1	3.305	0.287	0.375	0.014	0.107	− 0.181	0.004	0.028	− 0.142	− 0.2	0.474	0.502	0.422	0.180	25.424	0.311
CI2	2.656	− 0.034	0.379	− 0.139	− 0.215	0.230	0.533	0.435	0.456	− 0.1	0.044	0.021	− 0.184	0.074	20.429	0.250
CI3	1.852	0.411	0.023	− 0.550	− 0.050	0.357	− 0.028	0.009	− 0.182	0.6	− 0.007	0.051	0.001	− 0.017	14.246	0.174
CI4	1.452	0.341	0.019	− 0.457	− 0.041	0.296	− 0.023	0.007	− 0.151	0.5	− 0.006	0.043	0.001	− 0.014	11.172	0.137
CI5	1.366	− 0.169	− 0.059	0.355	0.061	0.373	0.155	0.040	− 0.088	0.2	0.280	0.217	0.061	− 0.712	10.509	0.129

后,把上层液体培养基从培养瓶中倒掉的配制方法相比,既保证了两种液体通过混合阶段的充分震荡和3~5 d的放置观察,使PEG得到充分渗透,同时也避免了后者因从培养瓶中倒掉上层液体培养基而可能引起的PEG误差。大量研究表明一般抗旱性强的品种能始终维持较高的酶活性,且不同程度胁迫前后变化幅度不会太大,说明相比于抗旱性弱的品种,抗旱性强的品种可能具有强的抗氧化保护酶合成和调节系统,能更加有效地清除植物体内的活性氧自由基^[3,18]。APX活性在马铃薯试管苗受不同程度PEG胁迫后变化并无明显规律,总体变化趋势是先升高后降低,这与周洁等^[19]对苍术幼苗在干旱胁迫下的相关研究中指出的APX活性随着水分胁迫的加剧呈先上升后下降的趋势,且在高浓度胁迫下变化幅度更大的结论一致。

随着胁迫程度的加剧,部分马铃薯品种试管苗中可溶性蛋白的含量呈现先下降后上升再下降的变化,也有部分呈先上升后下降的趋势(图2)。据李妮亚等^[20]的研究,在盐、干旱等逆境胁迫下,植物体内正常蛋白质的合成过程会受到抑制,但同时会诱导出一些与逆境胁迫相关的新蛋白质出现或使原有蛋白质的含量明显增加。所以,当马铃薯受到水分胁迫后,其植株体内可溶性蛋白含量的增加,可能是由于在干旱逆境下诱导合成了活性更强、性质稳定的同工酶,也可能是由于新合成的高活性同工酶取代了干旱条件下活性不稳定的酶的结果,而在低浓度胁迫下试管苗中可溶性蛋白含量有所下降可能是由于正常蛋白质合成受到抑制,且新逆境蛋白的诱导产生相对滞后引起的。

随胁迫程度的加强,大部分品种试管苗叶片内叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素含量均呈持续下降的趋势,这与大量研究报道^[21-23]是相符的,而与寿惠霞等^[24]在对春大豆苗期干旱胁迫的研究中指出的受到水分胁迫后,大豆幼苗叶片叶绿素含量迅速增加的结论并不一致,这可能是由于水分胁迫加速了植物叶片内叶绿素的分解,同时抑制其合成过程,从而使叶绿素含量有减小造成的;同时,部分品种试管苗叶片内叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素含量呈先下降后升高再下降的趋势,这与高蕾等^[25]的研究结果一致,可能是由于受到水分胁迫后叶片的相对含水率下降,使叶片内的叶绿素含量因发生浓缩而使单位叶面积上叶绿素浓度有升高引起的。14个不同品种马铃薯试管苗的地上部株高、地上部

组织含水量及根系的相对生长也随着胁迫浓度的增加均受到严重的影响,且胁迫浓度越大,受影响则越严重,这与前人的研究报道是相一致的^[26-27]。

马铃薯的抗旱性是由多种因素综合影响的,其对于干旱的胁迫响应也是通过多种指标(如生长指标、形态指标及生理生化指标等)综合反映的,因此,对其中单一指标的测定或分析很难准确地反映材料的抗旱性强弱。利用马铃薯试管苗受水分胁迫前后各生长、生理生化指标的相对值进行的主成分分析、隶属函数统计方法对供试马铃薯材料的抗旱性进行综合评价,可以有效、全面地评价马铃薯种质材料的抗旱性,避免因单一指标测定而造成的片面性^[9,28-31]。本研究用五个累计贡献率已达81.78%的主成分来代替全部的13个指标对供试马铃薯材料进行抗旱性评价分析,简便易行。当然,马铃薯的抗旱性是一个综合特征,可以发生在其生长发育的各个阶段,马铃薯不同生育期对水分的需求不同,对水分胁迫的响应机制也有差异,因此,本研究针对于室内马铃薯试管苗筛选的指标是否适于其他生育阶段或大田的生长的鉴定,仍有待进一步的研究和验证。

参考文献:

- [1] Gopal J, Iwama K. In vitro screening of potato against water - stress mediated through sorbitol and polyethylene glycol[J]. Plant Cell Reports, 2007, 26(5):693-700.
- [2] 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.
- [3] 抗艳红,龚学臣,田再民,等.聚乙二醇处理马铃薯脱毒试管苗的生理反应[J].江苏农业科学,2011,39(2):162-164.
- [4] Heyser J W, Nabors M W. Osmotic adjustment of tobacco cells and plants to penetrating and non-penetrating solutes[J]. Plant Physiology, 1979, 63(5):63-77.
- [5] Deblonde P M K, Ledent J F. Ledent. 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.
- [6] Ekanayake I J, Midmore D J. Genotypic variation for root pulling resistance in potato and its relationship with yield under water-deficit stress[J]. Euphytica, 1992, 61(1):43-53.
- [7] 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.
- [8] 崔江慧,李霄,常金华.PEG模拟干旱胁迫对高粱幼苗生理特性的影响[J].中国农学通报,2011,27(9):160-165.
- [9] 杨瑰丽,杨美娜,李帅良,等.水稻萌芽期抗旱指标筛选与抗旱性综合评价[J].华南农业大学学报,2015,36(2):1-5.
- [10] 刘华,王峰,李娜,等.隶属函数法对12个树种抗旱

性的综合评价[J].中国农村小康科技,2010,(10):39-41.

[11] 邹奇.植物生理实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.

[12] 白宝璋,朱广发,陈颖,等.玉米光合色素含量快速测定[J].玉米科学,1994,2(2):77-79.

[13] 袁菊红,屠乃美,胡绵好,等.水稻和陆稻品种抗旱性综合评价[J].中国农学通报,2005,21(6):167-170.

[14] 王俊娟,叶武威,王德龙,等.PEG胁迫条件下41份陆地棉种质资源萌发特性研究及其抗旱性综合评价[J].植物遗传资源学报,2011,12(6):840-846.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 贾琼,张冬红,蒙美莲,等.PEG6000渗透胁迫对马铃薯生理特性的影响[J].中国马铃薯,2009,23(5):263-267.

[18] 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.

[19] 周洁,黄璐琦,郭兰萍,等.干旱胁迫下苍术幼苗生理特性变化研究[J].中国中药杂志,2008,33(19):2163-2166.

[20] 李妮亚,曹翠玲.干旱对小麦幼苗诱导蛋白表达与某些生理特性的初步探讨[J].西北植物学报,1997,17(2):210-216.

[21] 刘玉英,易红华,徐泽.干旱胁迫对不同茶树品种叶绿素含量的影响[J].南方农业,2007,1(1):68-70.

[22] 董守坤,赵坤,刘丽君,等.干旱胁迫对春大豆叶绿素含量和根系活力的影响[J].大豆科学,2011,30(6):949-953.

[23] 何广礼,忠乃.干旱胁迫对盆栽小黑麦生物学特性及叶绿素含量的影响[J].畜牧与饲料科学,2010,31(10):54-56.

[24] 寿惠霞,朱丹华,陈彩霞,等.8个春大豆品种对旱境的反应及抗旱指标初探[J].浙江农业科学,1991,(6):278-281.

[25] 高蕾,刘丽君,董守坤,等.干旱胁迫对大豆幼苗叶片生理生化特性的影响[J].东北农业大学学报,2009,40(8):1-4.

[26] 王瑾,刘桂茹,杨学举.PEG胁迫下小麦再生植株根系特性与抗旱性的关系[J].麦类作物学报,2006,26(3):117-119.

[27] 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.

[28] 周广生,周竹青.用隶属函数法评价小麦的耐湿性[J].麦类作物学报,2001,21(4):34-37.

[29] 栗燕,黎明,袁晓晶,等.干旱胁迫下菊花叶片的生理响应及抗旱性评价[J].石河子大学学报,2011,29(1):30-34.

[30] 张朝阳,许桂芳.利用隶属函数法对4种地被植物的耐热性综合评价[J].草业科学,2009,26(2):57-60.

[31] 张耿,高洪文,王赞,等.偃麦草属植物苗期耐盐性指标筛选及综合评价[J].草业学报,2007,16(4):55-61.

附 录

附录 1 PEG 胁迫对马铃薯组培苗生长指标的影响

Appendix 1 Effects of PEG stress on growth index of in vitro plantlets of potato

品种	浓度 PEG	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	根系表面积/cm ² Root surfArea	根系体积/cm ³ Root volume	含水率 Water content
CIP 397098.12	0%	6.00 ± 0.71a	63.22 ± 2.90a	6.82 ± 0.73a	0.059 ± 0.010a	0.91 ± 0.01A
	3%	4.25 ± 0.35b	16.90 ± 0.18b	2.02 ± 0.06b	0.020 ± 0.001b	0.88 ± 0.04AB
	6%	2.30 ± 0.14c	2.62 ± 0.02c	0.66 ± 0.01c	0.016 ± 0.001bc	0.85 ± 0.01AB
	9%	2.05 ± 0.07c	2.61 ± 0.03c	0.43 ± 0.01c	0.012 ± 0.002c	0.84 ± 0.01C
CIP 391180.6	0%	6.53 ± 0.15a	62.39 ± 5.70a	6.86 ± 0.96a	0.060 ± 0.011a	0.89 ± 0.01A
	3%	3.80 ± 0.42b	14.17 ± 4.97b	1.57 ± 0.74b	0.014 ± 0.008b	0.88 ± 0.01A
	6%	2.70 ± 0.42c	10.27 ± 3.67bc	1.16 ± 0.27c	0.011 ± 0.001b	0.86 ± 0.02A
	9%	2.30 ± 0.01c	4.26 ± 2.96c	0.44 ± 0.14c	0.004 ± 0.001b	0.79 ± 0.11A
CIP 391724.1	0%	7.10 ± 0.14a	53.02 ± 1.39a	6.30 ± 1.19a	0.060 ± 0.007a	0.92 ± 0.01A
	3%	5.65 ± 0.21b	10.29 ± 0.41b	1.28 ± 0.13b	0.013 ± 0.002b	0.91 ± 0.03A
	6%	4.10 ± 0.66c	4.83 ± 1.10b	0.66 ± 0.03b	0.009 ± 0.001bc	0.91 ± 0.01A
	9%	2.15 ± 0.49d	4.52 ± 1.77b	0.56 ± 0.05b	0.006 ± 0.001c	0.89 ± 0.02A
CIP 392745.7	0%	11.87 ± 1.21a	88.43 ± 2.39a	11.13 ± 0.15a	0.112 ± 0.005a	0.90 ± 0.01A
	3%	4.75 ± 0.35b	19.56 ± 4.70b	2.64 ± 0.59b	0.029 ± 0.006b	0.89 ± 0.01A
	6%	4.25 ± 0.35bc	11.74 ± 2.74c	1.88 ± 0.16c	0.025 ± 0.002b	0.87 ± 0.01B
	9%	3.45 ± 0.49c	1.26 ± 0.04d	0.48 ± 0.01d	0.014 ± 0.001c	0.86 ± 0.01B
CIP 392759.1	0%	5.65 ± 0.64a	37.37 ± 0.54a	5.52 ± 0.02a	0.065 ± 0.001a	0.90 ± 0.01A
	3%	5.10 ± 0.01b	14.89 ± 2.45b	2.14 ± 0.35b	0.025 ± 0.003b	0.88 ± 0.02A
	6%	4.65 ± 0.07c	13.84 ± 2.76b	2.06 ± 0.43b	0.022 ± 0.001b	0.86 ± 0.01AB
	9%	1.75 ± 0.07d	5.06 ± 0.01c	0.63 ± 0.02c	0.016 ± 0.001c	0.83 ± 0.01B

续附录 1 Continue appendix 1

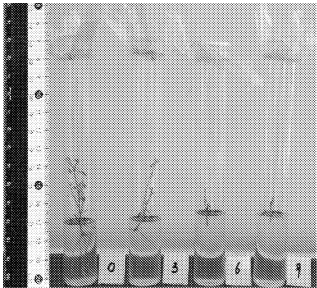
品种	浓度 PEG	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	根系表面积/cm ² Root surfArea	根系体积/cm ³ Root volume	含水率 Water content
CIP 393613.2	0%	7.00 ± 0.71a	62.56 ± 6.33a	8.41 ± 1.19a	0.090 ± 0.017a	0.89 ± 0.01A
	3%	3.45 ± 0.35b	19.18 ± 4.56b	2.40 ± 0.14b	0.024 ± 0.003b	0.87 ± 0.02A
	6%	2.40 ± 0.69c	11.70 ± 2.59c	1.81 ± 0.33bc	0.015 ± 0.001b	0.85 ± 0.03A
	9%	2.15 ± 0.21c	4.07 ± 2.14d	0.73 ± 0.05c	0.012 ± 0.005b	0.84 ± 0.01A
CIP 397035.26	0%	5.40 ± 0.26a	63.14 ± 9.33a	8.88 ± 1.61a	0.100 ± 0.022a	0.89 ± 0.01A
	3%	5.07 ± 0.25a	8.90 ± 1.21b	1.37 ± 0.30b	0.017 ± 0.006b	0.87 ± 0.01B
	6%	3.35 ± 0.21b	3.24 ± 0.34b	0.67 ± 0.01b	0.011 ± 0.001b	0.85 ± 0.01C
	9%	2.60 ± 0.28c	3.01 ± 0.84b	0.55 ± 0.01b	0.010 ± 0.001b	0.80 ± 0.01D
CIP 302476.108	0%	7.80 ± 0.72a	45.66 ± 3.73a	5.81 ± 1.51a	0.052 ± 0.002a	0.92 ± 0.01A
	3%	5.60 ± 0.57b	42.85 ± 3.37a	5.11 ± 0.49a	0.046 ± 0.003b	0.91 ± 0.02B
	6%	3.33 ± 0.65c	7.04 ± 0.15b	0.93 ± 0.17b	0.015 ± 0.004c	0.87 ± 0.02AB
	9%	1.40 ± 0.14d	1.36 ± 1.04c	0.44 ± 0.32b	0.010 ± 0.001d	0.84 ± 0.02B
CIP 304345.102	0%	4.10 ± 0.14a	38.18 ± 0.01a	5.72 ± 0.01a	0.067 ± 0.001a	0.92 ± 0.01A
	3%	2.80 ± 0.14b	15.78 ± 6.39b	2.16 ± 1.07b	0.024 ± 0.013b	0.86 ± 0.01B
	6%	2.25 ± 0.35c	1.62 ± 0.13c	1.28 ± 0.02c	0.014 ± 0.001c	0.84 ± 0.01C
	9%	1.80 ± 0.01d	1.17 ± 0.01c	0.43 ± 0.01d	0.012 ± 0.001c	0.78 ± 0.01D
CIP 304405.47	0%	5.37 ± 0.12a	93.55 ± 0.72a	12.5 ± 0.28a	0.133 ± 0.005a	0.91 ± 0.02A
	3%	3.65 ± 0.21b	31.42 ± 2.75b	4.03 ± 0.65b	0.041 ± 0.011b	0.88 ± 0.01A
	6%	3.40 ± 0.28c	22.19 ± 0.01c	2.40 ± 0.01c	0.020 ± 0.001c	0.87 ± 0.01A
	9%	2.45 ± 0.07d	10.44 ± 1.34d	1.41 ± 0.05d	0.016 ± 0.001c	0.84 ± 0.01A
CIP 391930.1	0%	7.70 ± 0.89a	36.04 ± 5.22a	4.16 ± 0.23a	0.038 ± 0.011a	0.92 ± 0.01A
	3%	6.30 ± 0.42b	16.54 ± 4.49b	2.14 ± 0.32b	0.022 ± 0.001b	0.90 ± 0.02A
	6%	3.30 ± 0.26c	10.27 ± 5.62bc	1.29 ± 0.59c	0.013 ± 0.004b	0.89 ± 0.02A
	9%	2.75 ± 0.07c	6.70 ± 0.40c	0.83 ± 0.06c	0.009 ± 0.001c	0.89 ± 0.01A
CIP 391931.1	0%	5.25 ± 0.92a	67.21 ± 6.29a	8.04 ± 0.81a	0.077 ± 0.011a	0.89 ± 0.01A
	3%	4.40 ± 0.01b	30.23 ± 8.47b	4.18 ± 1.12b	0.046 ± 0.012b	0.88 ± 0.03A
	6%	4.00 ± 0.01b	7.14 ± 2.09c	0.90 ± 0.11c	0.010 ± 0.001c	0.87 ± 0.01A
	9%	1.90 ± 0.14c	1.97 ± 0.01c	0.43 ± 0.01c	0.008 ± 0.001c	0.82 ± 0.02B
I3	0%	14.35 ± 0.21a	60.93 ± 2.29a	7.79 ± 0.85a	0.068 ± 0.004a	0.92 ± 0.01A
	3%	7.45 ± 0.49b	30.69 ± 6.17b	3.41 ± 0.11b	0.018 ± 0.008b	0.90 ± 0.02A
	6%	4.25 ± 0.35c	21.78 ± 0.50b	2.87 ± 0.07b	0.018 ± 0.008b	0.90 ± 0.01A
	9%	2.90 ± 0.28d	14.98 ± 1.30b	1.54 ± 0.25c	0.013 ± 0.003b	0.83 ± 0.01B
DXY	0%	9.55 ± 0.35a	64.24 ± 1.85a	7.33 ± 2.64a	0.067 ± 0.028a	0.92 ± 0.01A
	3%	2.50 ± 0.28b	16.27 ± 1.17b	2.93 ± 0.09b	0.022 ± 0.002b	0.89 ± 0.01A
	6%	2.35 ± 0.21bc	8.18 ± 0.98c	0.91 ± 0.17b	0.008 ± 0.001b	0.85 ± 0.01B
	9%	1.95 ± 0.35c	1.80 ± 0.19c	0.35 ± 0.11b	0.006 ± 0.003b	0.84 ± 0.03B

注:表中所有数据均用三次重复试验的平均值 ± 标准误表示。每个项目中相同大写字母表示同一品种的不同处理在 1% 水平上无显著差异。每个项目中相同小写字母表示同一品种的不同处理在 5% 水平上无显著差异。

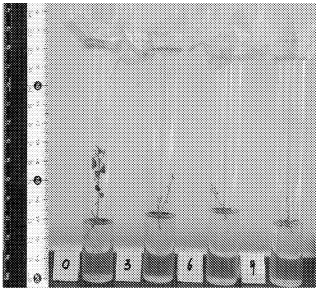
Note: Data in table are shown as means ± SE of three times. The same capital letters in the same items are no significant difference at 1% level. The same capital letters in the same items are no significant difference at 5% level.

附录 2 PEG6000 梯度胁迫下马铃薯试管苗生长情况

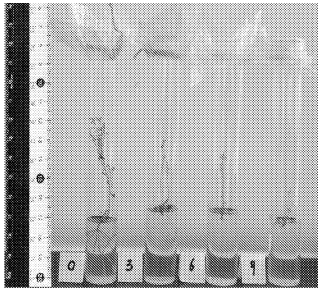
Appendix 2 Growth situation of in vitro potato plantlets under PEG6000 gradient stress



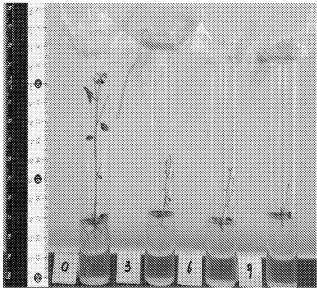
CIP 397098.12



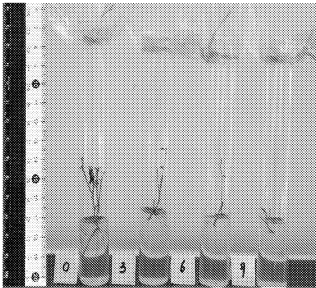
CIP 391180.6



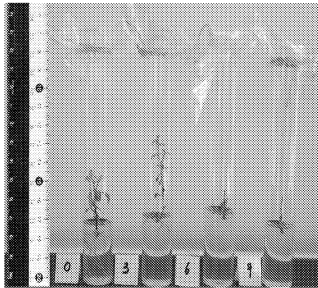
CIP 391724.1



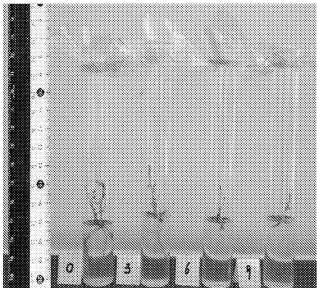
CIP 392745.7



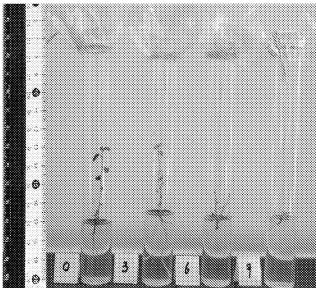
CIP 392759.1



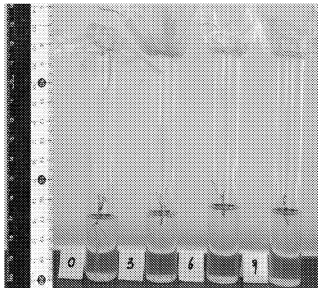
CIP 393613.2



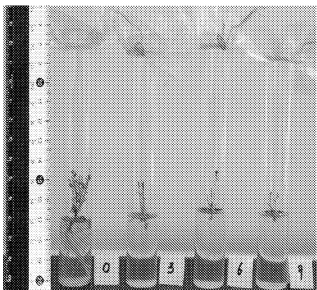
CIP 397035.26



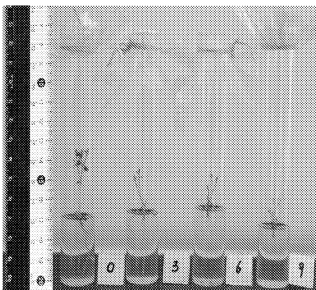
CIP 302476.108



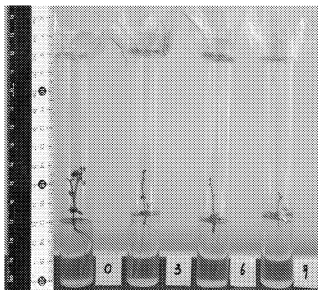
CIP 304345.102



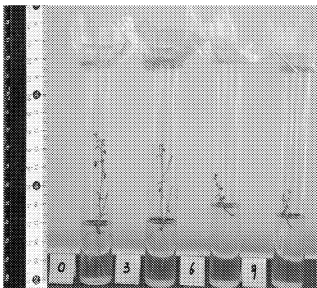
CIP 304405.47



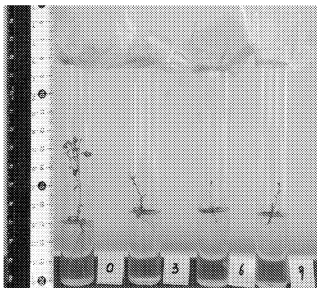
CIP 391930.1



CIP 391931.1



L3



DXY

注:图中 0、3、6、9 分别代表 PEG6000 浓度为 0%、3%、6%、9%。

Note: Number 0, 3, 6, 9 in figures represent the concentration of PEG6000 0%, 3%, 6%, 9%, respectively.