

PEG模拟干旱条件下红花种子萌发特性的比较研究

魏波^{1,2}, 李丹丹¹, 侯凯¹, 张慧慧¹, 吴卫^{1,*}

¹四川农业大学农学院, 成都611130

²文山州农业科学院, 云南文山663099

摘要: 为探讨研究红花芽期抗旱性的最佳模拟条件, 并筛选鉴定红花芽期抗旱指标, 以2份红花材料PI305192和PI401472种子为供试材料, 采用6种不同浓度聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱胁迫处理, 运用主成分分析法对多指标予以鉴定筛选。结果表明, 对红花12个指标进行测定分析, 发现浓度20%的PEG-6000可作为研究红花芽期抗旱性的最佳模拟条件, 且在5%~25% PEG处理下, 红花种子发芽率、发芽势、发芽指数、根长、芽长、总长、芽鲜重、根鲜重和总鲜重等均随着胁迫强度的增加呈明显的下降趋势; 而脯氨酸和可溶性蛋白含量随着浓度增加呈增加趋势。主成分分析结果表明, 发芽率、发芽势、丙二醛含量、总长和总鲜重等5个指标可作为红花芽期抗旱鉴定筛选的主要指标。

关键词: 红花; 干旱胁迫; 种子萌发; 鉴定指标; 主成分分析

红花又名草红花、菊红花, 隶属于菊科红花属, 一年生草本作物。在我国有1300多年的栽培历史, 主要分布于新疆、四川、云南、河南、江苏等省(任超翔等2017)。在全世界已有30多个国家种植, 其中墨西哥、印度、美国等产出的红花油占世界70%以上(Sehgal等2009)。红花种子含油率高, 籽油可供食用, 还有降低胆固醇等作用, 现已成为一种集药材、油料、染料和饲料为一体的特种经济作物。红花具有耐旱、耐寒、耐盐碱、耐贫瘠、适应性强的特征(王果平等2010)。植物的抗旱性不仅是一个较复杂的问题, 而且也是一个重要的经济性状, 因此从某种程度上来说, 植物干旱胁迫的反应研究在理论和实践上都具有重要的意义。从种子到幼苗长出这个阶段, 是植物生活史中最脆弱的阶段, 如果能度过这个阶段, 植物对忍受逆境的能力将会大幅度的提高(渠晓和黄根英等2005)。

近年来, 关于紫花苜蓿、高粱、大豆、沙地樟等植物种子的萌发特性及耐旱性已有研究报道(李文晓等2009; 李俐俐等2007; 孙景宽等2006; 朱教君等2005), 但对红花的研究主要集中在化学成分及药理作用等方面, 对其抗逆性的研究资料较少。因此, 本实验采用不同浓度的PEG-6000溶液对红花种子进行模拟土壤干旱胁迫, 研究干旱胁迫对红花种子萌发特性及生理指标的影响, 旨在筛选出最佳模拟条件, 并初步揭示红花种子抗旱能力和萌发特性及生理指标之间的关系, 进而对于干旱条件下红花栽培和选育抗旱品种提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

用于模拟干旱条件筛选的红花(*Carthamus tinctorius* L.)材料为PI305192和PI401472, 其种子均来自美国国家种子资源库。

1.2 干旱萌发处理

选取籽粒饱满、大小均匀的2份红花材料种子, 将其用蒸馏水浸泡过夜, 并用0.1%的HgCl₂溶液杀菌5 min, 用无菌水冲洗3次后, 放在滤纸上晾干, 置于直径为11 cm的培养皿中, 双层滤纸做发芽床。采用聚乙二醇(PEG-6000)模拟水分胁迫法, 试验设置0 (CK, 无菌水)、5%、10%、15%、20%和25%的6个浓度PEG溶液。每个品种每个处理3次重复, 每个重复120粒种子, 于(25±1)°C恒温光照培养箱内培养7 d, 昼夜光照时间8 h/16 h。每2 d更换1次PEG溶液处理的发芽床, 以保持发芽床水势恒定。记录种子起始萌发的时间, 第3天统计发芽势, 第7天统计种子发芽率, 计算发芽指数(7 d), 测定其芽长、根长、总长、芽鲜重、根鲜重、总重、脯氨酸、可溶性蛋白及丙二醛含量等各项指标。

1.3 项目测定与方法

发芽势(%)=3 d时正常发芽种子数/供试种子数×100

发芽率(%)=7 d时正常发芽种子数/供试种子数×100

收稿 2017-10-25 修定 2018-05-09

资助 国家自然科学基金(81274020)。

* 通讯作者(ewuwei@sicau.edu.cn)。

发芽指数(GI)= $\sum(G_t/D_t)$, 式中: G_t 为不同发芽时间(t)的发芽数; D_t 为不同的发芽试验天数。

可溶性蛋白含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)测定采用考马斯亮蓝G-250法(Bradford 1976); 丙二醛含量($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)测定采用Dhindsa等(1981)方法; 脯氨酸含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)测定采用张霞和谢小玉(2012)方法。

1.4 数据分析

实验数据处理及作图采用Microsoft Excel 2010进行, 利用SPSS 19.0统计分析软件对数据进行方差分析和显著性检验及利用统计软件DPS7.05进行主成分分析。

2 实验结果

2.1 不同浓度PEG-6000对红花种子发芽率、发芽势和发芽指数的影响

如表1所示, 不同浓度PEG-6000处理的PI305192和PI401472两份红花材料的发芽率、发芽势和发芽指数与CK相比均呈降低的趋势, 且随着PEG浓度的增加, 降低越显著。与CK相比, 5% PEG处理下PI305192红花的发芽率、发芽势和发芽指数差异不显著, 10%~25% PEG处理的3个指标均显著下降($P<0.05$)。在PEG处理下, 红花材料PI401472发芽率和发芽指数与CK相比差异显著($P<0.05$), 且除5% PEG处理外, 其他PEG处理的发芽势也有显著差异。红花材料PI401472的3个指标在中低浓度PEG处理之间差异不显著; 而发芽率和发芽势在

20% PEG处理时开始呈现显著下降, 发芽指数则在15% PEG处理时开始呈现显著差异, 并随着浓度的增加变化更加显著。整体来看, PI401472的3个指标比PI305192略低, 说明其对干旱更加敏感。

2.2 不同浓度PEG-6000对红花生长指标的影响

如表2显示, 与CK相比, 不同浓度PEG-6000处理均显著抑制红花芽、根的生长和重量的增加, 而且随着浓度的增加, 抑制程度显著增加。不同浓度PEG处理下, PI305192的芽长、根长、总长、根鲜重、芽鲜重和总鲜重大都显著降低, 其中芽长在各处理间差异均显著($P<0.05$)。对红花PI401472而言, 5%和10% PEG处理的各萌发生长指标之间无显著差异, 15%和20% PEG处理对芽鲜重和总鲜重有显著的抑制作用, 但在芽长、根长、总长和根鲜重之间无显著差异。与CK比较, 25% PEG处理下PI305192和PI401472两个品种的各指标变化差异达到最大。PI401472的6个指标比PI305192略低, 同样说明其对干旱更加敏感。

2.3 不同浓度PEG-6000对红花可溶性蛋白、脯氨酸和丙二醛含量的影响

由表3可知, 除在5% PEG处理下的丙二醛含量外, 不同浓度PEG处理的各个指标与CK相比呈显著差异($P<0.05$)。可溶性蛋白和脯氨酸含量随着浓度的增加而显著增加, PI305192和PI401472分别在25%和20% PEG处理下达到最大值。丙二醛是植物膜脂过氧化降解的产物, 是表示植物氧化伤

表1 不同浓度PEG-6000对红花种子发芽率、发芽势和发芽指数的影响

Table 1 Effects of different concentrations of PEG-6000 on germination rate, germination potential and germination index of safflower seeds

红花材料	PEG浓度/%	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数
PI305192	0	85.83 ^a	85.55 ^a	89.69 ^a
	5	78.89 ^{ab}	78.89 ^{ab}	84.00 ^a
	10	75.28 ^{bc}	75.00 ^{bc}	75.64 ^b
	15	72.78 ^{bc}	72.78 ^{bc}	55.45 ^c
	20	68.89 ^c	68.61 ^c	49.36 ^c
	25	66.67 ^c	66.67 ^c	39.83 ^d
PI401472	0	86.11 ^a	84.72 ^a	54.47 ^a
	5	76.67 ^b	76.67 ^{ab}	48.44 ^b
	10	75.28 ^b	75.00 ^b	45.92 ^b
	15	70.00 ^b	70.00 ^b	39.11 ^c
	20	61.94 ^c	60.28 ^c	31.83 ^d
	25	55.55 ^c	45.83 ^d	23.08 ^e

同列不同小写字母表示在5%水平差异显著。下表同此。

表2 不同浓度PEG-6000对红花生长指标的影响

Table 2 Effects of different concentrations of PEG-6000 on growth indexes of safflower

红花材料	PEG浓度/%	芽长/cm	根长/cm	总长/cm	芽鲜重/g	根鲜重/g	总鲜重/g
PI305192	0	2.895 ^a	0.784 ^a	3.679 ^a	0.1433 ^a	0.0139 ^a	0.1572 ^a
	5	2.230 ^b	0.641 ^{ab}	2.870 ^b	0.1067 ^b	0.0117 ^{ab}	0.1184 ^b
	10	1.884 ^c	0.548 ^{bc}	2.431 ^b	0.0941 ^{bc}	0.0103 ^b	0.1044 ^b
	15	1.513 ^d	0.544 ^{bc}	2.056 ^c	0.0781 ^c	0.0081 ^c	0.0861 ^c
	20	1.156 ^e	0.478 ^{bc}	1.634 ^{cd}	0.0555 ^d	0.0048 ^d	0.0603 ^d
	25	1.108 ^e	0.408 ^c	1.516 ^d	0.0488 ^d	0.0030 ^d	0.0518 ^d
PI401472	0	2.706 ^a	1.495 ^a	4.202 ^a	0.1257 ^a	0.0167 ^a	0.1424 ^a
	5	1.832 ^b	0.867 ^b	2.699 ^b	0.0811 ^b	0.0106 ^b	0.0917 ^b
	10	1.818 ^b	0.725 ^b	2.543 ^b	0.0798 ^b	0.0094 ^{bc}	0.0892 ^b
	15	1.427 ^c	0.574 ^b	2.001 ^c	0.0660 ^c	0.0085 ^{bc}	0.0745 ^c
	20	1.366 ^c	0.535 ^{bc}	1.900 ^c	0.0534 ^d	0.0062 ^c	0.0596 ^d
	25	0.986 ^d	0.209 ^c	1.195 ^d	0.0359 ^e	0.0023 ^d	0.0382 ^e

表3 不同浓度PEG-6000对红花可溶性蛋白、脯氨酸和丙二醛含量的影响

Table 3 Effects of different concentrations of PEG-6000 on soluble protein, proline and malondialdehyde contents of safflower

红花材料	PEG浓度/%	可溶性蛋白含量/mg·g ⁻¹	脯氨酸含量/μg·g ⁻¹	丙二醛含量/μmol·g ⁻¹
PI305192	0	11.929 ^e	744.42 ^c	17.022 ^b
	5	15.428 ^d	1256.46 ^b	18.343 ^{ab}
	10	18.498 ^c	1360.17 ^b	18.087 ^b
	15	19.145 ^c	1482.20 ^a	20.652 ^a
	20	21.864 ^b	1549.94 ^a	18.401 ^{ab}
	25	27.423 ^a	1554.67 ^a	18.822 ^{ab}
PI401472	0	9.198 ^f	884.10 ^d	16.529 ^c
	5	11.871 ^e	1187.65 ^c	18.554 ^{bc}
	10	13.644 ^d	1145.21 ^c	20.528 ^{ab}
	15	15.306 ^c	1271.13 ^b	19.543 ^b
	20	20.764 ^a	1329.69 ^a	19.159 ^b
	25	18.103 ^b	1280.73 ^{ab}	21.953 ^a

害程度的指标。随PEG浓度上升, PI305192丙二醛含量先上升后下降; 而PI401472的先上升后下降再上升, 且基本高于PI305192的。PI305192和PI401472的丙二醛含量分别在15%和25% PEG处理差异最显著。以上结果表明 PI305192较PI401472更加耐旱。

对2份红花材料种子萌发进行观察, 5%~15% PEG-6000处理的叶片颜色深绿色, 与CK比较, 没有明显差异。随着PEG浓度的增加, 20% PEG处理的子叶颜色逐渐变黄; 25% PEG处理的基本全黄, 差异较CK更明显, 芽苗也明显的变小, 不仅发芽率较低, 而且后续生长有腐烂现象。因此, 综合考虑发芽率、发芽势、发芽指数、根长、芽长、总长、根鲜重、芽鲜重、总鲜重、可溶性蛋白、脯

氨酸及丙二醛含量共12个指标, 认为浓度20%的PEG-6000为红花芽期耐旱性鉴定的最适浓度。

2.4 红花萌发期抗旱指标的筛选

对2份红花材料的发芽率、发芽势、发芽指数、根长、芽长、总长、芽鲜重、根鲜重、可溶性蛋白、脯氨酸、丙二醛等12个指标进行因子主成分分析, 根据累积贡献率 $\geq 90\%$ 的原则取主成分, 本试验提取了2个主成分(表4和5), 其中第一主成分的特征值为10.3813, 贡献率为86.5108%, 对应特征向量中, 数量较大的指标有发芽率、发芽势、总长、芽鲜重和总鲜重。第二主成分的特征值为1.1347, 贡献率为9.4557%, 对应的特征向量中主要表现在根鲜重和丙二醛含量方面。以上2个主成分的累计贡献率为95.9665%, 基本包含了所测指标的全部信息。

表4 各因子载荷矩阵

Table 4 Loading matrix of each component

指标	主成分	
	I	II
发芽率	0.3075	-0.0937
发芽势	0.3012	-0.2113
发芽指数	0.2938	-0.1924
芽长	0.3084	0.0661
根长	0.3039	0.1239
总长	0.3091	0.0612
芽鲜重	0.3093	-0.0051
根鲜重	0.2169	0.5853
总鲜重	0.3097	0.0160
可溶性蛋白	-0.3029	0.1431
脯氨酸	-0.2878	-0.3446
丙二醛	-0.1796	0.6357

表5 主成分分析

Table 5 Principal component analysis

主成分	特征值	贡献率	累积贡献率/%
1	10.3813	86.5108	86.5108
2	1.1347	9.4557	95.9665
3	0.4268	3.5563	99.5228
4	0.0387	0.3222	99.8450
5	0.0186	0.1550	100.0000

为进一步筛选主要指标,对这12项指标进行相关性分析。结果(表6)表明,萌发特性方面,发芽率与发芽势和发芽指数呈极显著正相关($P<0.01$);

在生长状况方面,总鲜重(包括根鲜重和芽鲜重)与总长(包括芽长和根长)呈极显著正相关关系($P<0.01$);在生理指标方面,脯氨酸和可溶性蛋白呈显著正相关关系($P<0.05$),脯氨酸和可溶性蛋白与总长、总鲜重呈极显著负相关($P<0.01$)。总长和总鲜重与发芽率、发芽势、发芽指数呈极显著正相关($P<0.01$)。

综合主成分分析和相关性分析结果,选择发芽率、发芽势、总长、总鲜重和丙二醛含量这5个指标作为红花芽期抗旱鉴定筛选的主要指标。

3 讨论

发芽率、发芽势和种子活力指数反映植物种子发芽速度,发芽整齐度和幼苗健壮的趋势,常作为评价种子发芽的指标(余如刚等2012)。本研究中随着PEG浓度增加,干旱胁迫加重,2份红花材料种子萌发受到不同程度的抑制,种子发芽率、发芽势、发芽指数均下降,这与干旱胁迫下沙枣、柠条、杠柳、白蜡等种子的萌发规律一致(Sun等2006)。本实验中5% PEG处理的红花种子与对照对比,发芽率、发芽势及发芽指数均不显著,且5%、10%和15%三个不同浓度的PEG处理之间指标也无明显差异,说明了在中低PEG浓度时红花种子的萌发对干旱胁迫的影响不敏感;当PEG浓度达到20%及以上,红花的发芽率、发芽势及发芽指数明显受到抑制,表现较大的差异。

表6 各指标的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of each index

指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.0000											
2	0.9900**	1.0000										
3	0.9758**	0.9764**	1.0000									
4	0.9817**	0.9496**	0.9462**	1.0000								
5	0.9432**	0.9122*	0.8774*	0.9771**	1.0000							
6	0.9796**	0.9501**	0.9381**	0.9986**	0.9860**	1.0000						
7	0.9919**	0.9715**	0.9414**	0.9870**	0.9662**	0.9876**	1.0000					
8	0.6036	0.5249	0.4497	0.7099	0.8046	0.7251	0.6934	1.0000				
9	0.9923**	0.9697**	0.9511**	0.9944**	0.9709**	0.9937**	0.9974**	0.6942	1.0000			
10	-0.9933**	-0.9842**	-0.9734**	-0.9650**	-0.9140*	-0.9613**	-0.9808**	-0.5496	-0.9767**	1.0000		
11	-0.8800*	-0.8121*	-0.8038	-0.9502**	-0.9589**	-0.9506**	-0.9190**	-0.8713*	-0.9287**	0.8514*	1.0000	
12	-0.6021	-0.6901	-0.5793	-0.4946	-0.5343	-0.5227	-0.5742	-0.1376	-0.5435	0.6177	0.2879	1.0000

*和**分别表示在5%和1%水平上显著关系;数值1~12分别代表发芽率、发芽势、发芽指数、芽长、根长、总长、芽鲜重、根鲜重、总鲜重、脯氨酸、可溶性蛋白、丙二醛。

根系是植物吸收水分的最主要的器官,对外界环境水分的变化感受极为敏感,不同的环境条件下,作物根系表现不同。水分胁迫下根系形态会发生变化,但轻度的干旱胁迫可能对根的影响不是很大。本实验中不同浓度的PEG处理的红花萌发期的根长、芽长、根鲜重、芽鲜重均是随着浓度的增加而明显的下降,其结果与曹凤娇和李立芹(2012)在黑麦种子上的研究结果相似。胡新元和周义龙(2011)在不同浓度的PEG处理胡麻种子研究发现,当PEG浓度为20%以上时,胡麻的苗鲜重及根鲜重受到伤害达到显著水平。而本实验中,红花的芽长、根长、芽鲜重及根鲜重在PEG浓度达到15%时开始受到明显的抑制,当达到25%时,严重受到伤害。

植物通过可溶性蛋白和脯氨酸等渗透调节物质来适应干旱胁迫。在干旱胁迫下植物会产生大量的可溶性蛋白,适应干旱胁迫(徐彩霞等2009)。本试验中,随着PEG浓度的增加,可溶性蛋白质含量明显呈增加趋势,但红花PI401472在20%浓度时最高,PEG浓度为25%时反而下降了,说明了适宜浓度的PEG会增加可溶性蛋白质来适应干旱胁迫,而超过一定的浓度,植物会受到伤害导致可溶性蛋白质含量下降。脯氨酸是植物体内最为有效的渗透调节物质之一。王启明等(2005)认为,严重的水分胁迫下抗旱性强的大豆品种积累脯氨酸的能力更强。本研究结果同样显示了干旱胁迫下,红花的脯氨酸含量呈显著增加,且随着PEG浓度的增加,脯氨酸含量也成增加趋势,当PEG浓度达到20%时,脯氨酸含量差异显著。干旱胁迫对植物的毒害可表现为对细胞膜系统的伤害。丙二醛作为膜质过氧化的重要产物之一,具有很强的细胞毒性(李雪凝等2016)。而本实验结果表明,不同PEG浓度处理的PI401472和PI305192的丙二醛含量较对照相比均增加,但PI305192增加幅度在各浓度处理均是较小的,说明其在干旱胁迫中是一个自我调控能力较强品种。从而推测PI305192较PI401472在干旱胁迫下较耐旱些。

自1979年人们首次利用PEG作为筛选剂获得抗旱性较强的烟草细胞系以来,由于PEG无毒,且分子量大不易被植物所吸收,已被广泛应用于多种作物的幼苗期、苗期的抗旱性鉴定研究。在小

麦、花生、玉米等作物上筛选一些抗旱性强的品种。但不同作物、不同生长时期、不同的方法所选用的PEG高渗溶液的浓度各不相同。王玉萍等(2003)利用30%的PEG-6000高渗溶液筛选到18株甘薯耐旱突变体。杨春杰等(2007)设置7个PEG-6000浓度对油菜芽期抗旱性进行研究,认为10%的PEG-6000可以作为最适处理浓度。本实验认为20%的PEG-6000浓度为红花芽期耐旱性鉴定的最适浓度,且经过综合比较,PI305192较PI401472耐旱性强。因此,红花栽培过程中要因地制宜选择适宜的红花品种。

参考文献(References)

- Bradford MM (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem*, 72 (1-2): 248-254
- Cao FJ, Li LQ (2012). Effect of PEG stress on seed germination and seedlings growth of rye (*Secale cereal L.*). *J Anhui Agric Sci*, 40 (25): 12431-12433 (in Chinese with English abstract) [曹凤娇, 李立芹(2012). PEG胁迫对黑麦种子萌发及幼苗生长的影响. *安徽农业科学*, 40 (25): 12431-12433]
- Dhindsa RS, Plumb-Dhindsa P, Thorpe TA (1981). Leaf senescence: correlated with increased leaves of membrane permeability and lipid peroxidation and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *J Exp Bot*, 32 (1): 93-101
- Hu XY, Zhou YL (2011). Effect of PEG stress on germination of flax seed. *Gansu Agric Sci Tech*, (7): 22-23 (in Chinese with English abstract) [胡新元, 周义龙(2011). PEG胁迫对胡麻种子萌发的影响. *甘肃农业科技*, (7): 22-23]
- Li WR, Zhang SQ, Shan L (2009). Seed germination characteristics and drought-tolerance of alfalfa and sorghum seeding under water stress. *Acta Ecol Sin*, 29 (6): 3066-3074 (in Chinese with English abstract) [李文晓, 张岁岐, 山仑(2009). 水分胁迫下紫花苜蓿和高粱种子萌发特性及幼苗耐旱性. *生态学报*, 29 (6): 3066-3074]
- Li LL, Liu TX, Zhao X (2007). Response of soybean varieties to osmotic stress at germination stage. *Soybean Sci*, 26 (4): 550-554 (in Chinese with English abstract) [李俐俐, 刘天学, 赵霞(2007). 大豆种子萌发期对渗透胁迫的响应. *大豆科学*, 26 (4): 550-554]
- Li XN, Dong SK, Liu LJ, et al (2016). Effect of drought stress on SOD activity and MDA content of spring soybean. *Chin Agric Sci Bull*, 32 (15): 93-97 (in Chinese with English abstract) [李雪凝, 董守坤, 刘丽君等(2016). 干旱胁迫对春大豆超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量的影响. *中国农学通报*, 32 (15): 93-97]

- Qu XX, Huang ZY (2005). The adaptive strategies of halophyte seed germination. *Acta Eco Sin*, 25 (9): 2389–2398 (in Chinese with English abstract) [渠晓霞, 黄振英(2005). 盐生植物种子萌发对环境的适应对策. *生态学报*, 25 (9): 2389–2398]
- Ren CX, Wu YY, Tang XH, et al (2017). Safflower's origin and changes of producing areas. *China J Chin Mater Med*, 42 (11): 2219–2222 (in Chinese with English abstract) [任超翔, 吴沂芸, 唐小慧等(2017). 红花的起源与产地变迁. *中国中药杂志*, 42 (11): 2219–2222]
- Sehgal D, Raina SN, Devarumath RM, et al (2009). Nuclear DNA assay in solving issues related to ancestry of the domesticated diploid safflower (*Carthamus tinctorius* L.) and the polyploid (*Carthamus*) taxa, and phylogenetic and genomic relationships in the genus *Carthamus* L. (Asteraceae). *Mol Phylogenet Evol*, 53 (3) : 631–644
- Sun JK, Zhang WH, Zhang JM, et al (2006). Response to droughty stress and drought-resistances evaluation of four species during seed germination. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 26 (9): 1811–1818 (in Chinese with English abstract) [孙景宽, 张文辉, 张洁明等(2006). 种子萌发期4种植物对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究. *西北植物学报*, 26 (9): 1811–1818]
- Wang GP, Pa LD, Li XJ, et al (2010). Suitable producing area of *Carthamus tinctorius* in Xin Jiang. *Chin J Ethnomed Ethnophar*, 19 (23): 49–50 (in Chinese with English abstract) [王果平, 帕丽达, 李晓瑾等(2010). 药用植物红花新疆产地适应性数值分析. *中国民族民间医药*, 19 (23): 49–50]
- Wang QM, Xu XC, Ma YS, et al (2005). Influences of drought stress on physiological and biochemical characters of different soybean varieties in flowering period. *Agric Res Arid Areas*, 23 (4): 98–101 (in Chinese with English abstract) [王启明, 徐心诚, 马原松等(2005). 干旱胁迫下大豆开花期的生理生化变化与抗旱性的关系. *干旱地区农业研究*, 23 (4): 98–101]
- Wang YP, Liu QC, Li AX, et al (2003). In vitro selection and identification of drought-tolerant mutants of sweet potato. *Sci Agric Sin*, 39 (9): 1000–1005 (in Chinese with English abstract) [王玉萍, 刘庆昌, 李爱贤等(2003). 甘薯耐旱突变体的离体筛选与鉴定. *中国农业科学*, 36 (9): 1000–1005]
- Xu CX, Zhao Z, Chen MT (2009). Effects of water stress on physiological indicators in tree roots of five varieties. *J Northwest A&F Unive (Nat Sci Ed)*, 37 (8): 109–114 [徐彩霞, 赵忠, 陈明涛(2009). 水分胁迫对5个树种苗木根系部分生理指标的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 37 (8): 109–114]
- Yang CJ, Zhang CJ, Zhang XK, et al (2007). Effects of drought simulated by PEG-6000 on germination and seedling growth of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Chin J Oil Crop Sci*, 29 (4): 653–657 (in Chinese with English abstract) [杨春杰, 张学昆, 邹崇顺等(2007). PEG-6000模拟旱胁迫对不同甘蓝型油菜品种萌发和幼苗生长的影响. *中国油料作物学报*, 29 (4): 653–657]
- Yu RG, Du XL, Chen C, et al (2012). Effect of PEG stress on seed germination and seeding physiology of three legumes. *Agric Res Arid Areas*, 20 (5): 99–103 (in Chinese with English abstract) [余如刚, 杜雪玲, 陈楚等(2012). PEG胁迫对三种豆科牧草种子萌发及幼苗生理影响. *干旱地区农业研究*, 20 (5): 99–103]
- Zhang X, Xie XY (2012). Studies on identification indexes of drought resistance by PEG during seed germination of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 21 (2): 72–77 [张霞, 谢小玉(2012). PEG胁迫下甘蓝型油菜种子萌发期抗旱鉴定指标的研究. *西北农业学报*, 21 (2): 72–77]
- Zhu JJ, Li ZH, Kang HZ, et al (2005). Effects of polyethylene glycol (PEG) –simulated drought stress on *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seed germination on sandy land. *Chin J Appl Ecol*, 16 (5): 801–804 (in Chinese with English abstract) [朱教君, 李智辉, 康宏樟等(2005). 聚乙二醇模拟水分胁迫对沙地樟子松种子萌发影响研究. *应用生态学报*, 16 (5): 801–804]

Comparative study on germination characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius*) under PEG-6000 simulated drought stress

WEI Bo^{1,2}, LI Dan-Dan¹, HOU Kai¹, ZHANG Hui-Hui¹, WU Wei^{1,*}

¹College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

²Wenshan Academy of Agricultural Sciences, Wenshan, Yunnan 663099, China

Abstract: To study the optimum conditions of simulated drought stress and screen the indexes of drought resistance at germinating stage, the seeds of safflower (*Carthamus tinctorius*) PI305192 and PI401472 were used as the tested materials under the simulated drought conditions with six different concentrations of PEG-6000, and the principal component analysis method was used to identify and screen multiple indicators. The results showed that 20% PEG-6000 could be the optimum condition for the simulation of drought stress. The germination rate, germination potential, germination index, root length, bud length, total length, germination fresh weight, root fresh weight and total fresh weight decreased with the increase of stress intensity under the treatments of 5%–25% PEG, whereas the contents of proline and soluble protein increased. The principal component analysis results showed that the five indexes, including germination rate, germination potential, malondialdehyde, total length and total fresh weight, could be selected as the main indexes for drought resistance identification of safflower at germinating stage.

Key words: safflower (*Carthamus tinctorius*); drought stress; seed germination; principal component analysis; identification index

Received 2017-10-25 Accepted 2018-05-09

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (81274020).

*Corresponding author (ewuwei@sicau.edu.cn).