

干旱胁迫对万寿菊种子萌发及幼苗生理特性的影响

马大卫,汪斌强,马彦军*

(甘肃农业大学,甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】探索在干旱胁迫下万寿菊(*Tagetes erecta*)种子萌发及幼苗生理特性。【方法】设置不同浓度聚乙二醇(PEG)(2%、4%、6%、8%和10%)模拟干旱胁迫,利用发芽盒发芽研究干旱胁迫下万寿菊种子发芽率、发芽指数、活力指数和抗旱指数;采用盆栽试验研究自然干旱胁迫0~12 d对万寿菊幼苗形态指标(株高,地径)以及生理指标(含水量、膜透性,3种酶活性等)的影响。【结果】随着PEG浓度增加,万寿菊种子发芽率、发芽指数、活力指数和抗旱指数逐渐降低;在PEG浓度为6%时,其种子发芽率、发芽指数、活力指数和抗旱指数显著下降($P<0.05$),较对照分别降低46%、14.45%、32.21%和0.713;随着自然干旱胁迫天数的增加,万寿菊幼苗株高和地径先增大后减小;叶片中脯氨酸和丙二醛含量呈上升趋势;可溶性蛋白含量先上升后下降;束缚水逐渐降低,自由水逐渐升高;叶绿素a,b和叶绿素总量先上升后降低;超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(Catalase, CAT)3种酶活性随含水量先降低后升高,达到峰值之后开始下降。【结论】PEG浓度小于6%万寿菊种子能正常萌发生长;土壤含水量大于50%万寿菊幼苗可以正常生长。

关键词:万寿菊;PEG;自然干旱胁迫

中图分类号:S681.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)01-0212-08

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2025.01.025



水是植物不可或缺的因素之一。水分直接影响植物的生长发育甚至产量等^[1]。世界上有30%的地区处于干旱或者半干旱状态,水资源匮乏很大程度上限制着这些地区的经济,社会和生态发展,也是开发大西北的重要阻力^[2]。近年来,西北干旱和半干旱地区的治理和建设已成为当务之急,研究不同植物的耐旱性是该地区植树造林或城镇绿化的基础^[3]。

植物的发芽期和幼苗期是植物重要的生长时期,也是进行植物耐旱性研究的重要时期。班勇等^[4]研究

发现,在植物的生长发育过程中,植物死亡率最高的时期是植物萌发期和幼苗期。植物萌发期和幼苗期的耐旱程度在很大程度上反映了该植物的耐旱能力。

万寿菊(*Tagetes erecta*)是菊科(Compositae)万寿菊属(*Tagetes*)一年生草本植物,高0.5~1 m。原产于北美洲和墨西哥的中美洲,于16世纪引入我国,经过大量引种与驯化,目前在全国各地均有分布。目前万寿菊抗性方面,我国研究者做了部分研究,韦朝妹等^[5]研究发现一定浓度赤霉素能有效缓解盐胁迫对万寿菊种子萌发和幼苗生长的直接盐害和正常代谢等的破坏;贾建伟等^[6]等发现低浓度盐有助于万寿菊种子萌发,田治国等^[7]研究发现初花期万寿菊属品种中“珍妮”抗旱性最强,但对于万寿菊种子萌发及幼苗在干旱胁迫下抗性的研究鲜有报道。因此,本试验以不同浓度PEG—6000模拟干旱胁迫,研究干旱胁迫对万寿菊种子萌发的影响,以及持续干旱胁迫下万寿菊幼苗形态和生理指标的变化,为万寿菊在干旱半干旱地区

收稿日期:2023-08-24;**修回日期:**2024-04-09

基金资助:甘肃省高校产业支撑计划(2023CZYC-46)资助

作者简介:马大卫(1999-),男,保安族,甘肃兰州人,主要从事植物组织培养研究。

E-mail:1047405943@qq.com

*通信作者,研究方向为林木种质资源开发利用及林木种苗繁育。

E-mail:mayanjun@gsau.edu.cn

栽培提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

万寿菊种子于2022年8月采自甘肃农业大学校内,千粒重为3.2 g。选取健壮无损伤的黑色种子用10% 84消毒液浸泡30 min,之后用自来水和蒸馏水冲洗干净,放置24 h后进行PEG-6000胁迫处理。2023年3月初于甘肃农业大学校内实习基地,培育万寿菊实生幼苗。于2023年6月选择120盆长势一致,生长健壮,无病虫害问题的万寿菊幼苗作为试验材料,进行自然干旱胁迫试验。

1.2 试验设计

1.2.1 万寿菊种子萌发试验设计 设质量浓度分别为2%、4%、6%、8%和10%的PEG溶液,按照李合生^[8]方法配备,对万寿菊种子进行干旱胁迫处理。处理采用发芽盒发芽,首先在发芽盒内铺2层滤纸,将处理好的种子置于滤纸上,然后加入等量的不同浓度的PEG溶液进行萌发,以加蒸馏水为对照。每个处理重复3次,每个重复50粒种子,于甘肃农业大学林学院育苗室进行,培养过程中每天向发芽盒中加入相应处理溶液,保持滤纸湿润。每2 d更换一次发芽盒内滤纸,防止溶液浓度变动^[9]。培养条件为:12 h光照,光照强度2 000 lx,平均昼夜温度为23℃。

1.2.2 万寿菊幼苗生理试验设计 将幼苗分为4个组,每个组分别设为30盆,每盆内保留3株万寿菊幼苗,试验前连续3 d浇透水,之后不再浇水让其自然干旱。每隔4 d采样,即在第0、4、8和12天采样,第1天的样品为对照,每次采样设3次重复,每重复5株。试验于塑料大棚内进行,大棚内通风良好,采样在早上8:00左右进行,样品均采自植株同位叶片。

1.3 指标测定及方法

1.3.1 种子萌发项目测定及方法 从光照培养开始,每天统计种子的发芽情况并记录种子起始萌发的时间,并于第7天统计种子发芽数,计算种子发芽率,发芽指数,活力指数等指标。

发芽率(%)=7 d时正常发芽种子数/供试种子数×100;

发芽指数= $\sum G_i/D_i$ (G_i 为在 t d的种子发芽数, D_i 为种子发芽天数);

活力指数= $\sum G_i/D_i \times S$ (S 为10 d时芽平均鲜质量)^[10];

抗旱指数=PEG-6000胁迫下种子萌发指数/对照种子萌发指数^[11]。

1.3.2 形态指标测定及方法 株高的测量:用钢卷尺分别在第0、4、8和12天测量万寿菊幼苗的株高(根基部到顶芽)。地径的测量:用游标卡尺分别在第0、4、8和12天测量每盆万寿菊幼苗的地径(地面根颈处的植株直径为地径)。

1.3.3 生理生化指标测定及方法 参考程建勋^[12]等方法测定,自由水(FW)和束缚水(BW)的测定:采用马林契克法;丙二醛(MDA)含量测定:采用硫代巴比妥酸比色法;脯氨酸(Pro)含量测定:采用磺基水杨酸提取法;可溶蛋白(SP)含量测定:采用考马斯亮蓝G-250法;叶绿素含量(Chlorophyll)测定:采用乙醇:丙酮=1:1浸提(体积比)法;超氧化物歧化酶(SOD)活性测定:采用抑制NBT光还原比色法;过氧化物酶(POD)活性测定:采用愈创木酚法;过氧化氢酶(CAT)活性测定:采用紫外吸收法。

1.3.4 数据处理与分析 用Excel 2021进行数据的输入与整理。用SPSS 26.0软件对发芽率、种子活力等指标用One-way ANOVA方法进行差异显著性分析,LSD法进行均值比较、显著性水平设为0.05。用Origin 2021软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 PEG胁迫对万寿菊种子萌发及抗旱指数的影响

2.1.1 PEG胁迫对种子发芽率的影响 随着PEG溶液浓度的增加,万寿菊种子发芽率呈下降的趋势,并且随着PEG溶液浓度升高,种子萌发所受的抑制作用也越高(图1)。当PEG浓度为6%时,种子发芽率为45%,比对照降低了46%,差异显著($P<0.05$);当PEG浓度为10%时,种子发芽率为18%,较对照降低了73%,差异显著($P<0.05$),说明PEG浓度达到6%时种子萌发受到抑制,PEG浓度越高,抑制种子萌发程度越明显。

2.1.2 PEG胁迫对种子发芽指数及活力指数的影响 随着PEG浓度增加,万寿菊发芽指数及种子活力呈下降趋势(图1)。当PEG浓度为6%时,万寿菊发芽指数和种子活力相较于对照分别下降了14.45%和

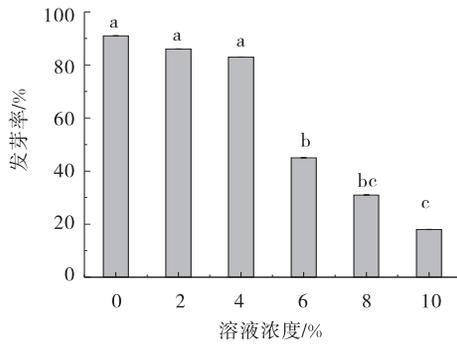


图1 PEG胁迫对万寿菊种子发芽率的影响

Fig. 1 Effect of PEG stress on *Tagetes erecta* seeds germination rate

注:不同小写处理间在0.05水平存在显著性差异。下同。

32.21%, 差异显著($P < 0.05$), 种子活力明显被抑制。当PEG浓度达到10%时, 万寿菊种子发芽指数和活力指数较对照分别下降22.55%和40.76%, 差异显著($P < 0.05$), 此时万寿菊种子基本不能萌发。

2.1.3 PEG胁迫对种子抗旱指数的影响 随着PEG浓度增加, 万寿菊种子抗旱指数呈下降趋势(图3), 当PEG浓度到达4%时, 万寿菊种子抗旱指数为0.7, 较PEG浓度为2%减少了0.306, 差异显著($P < 0.05$); 当PEG浓度为6%时, 万寿菊种子抗旱指数为0.29,

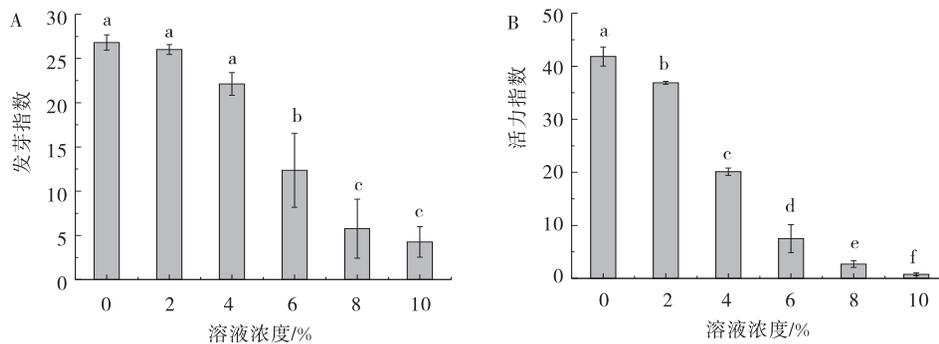


图2 PEG胁迫对万寿菊种子发芽指数、活力指数的影响

Fig. 2 Effects of PEG stress on germination index and vigor index of *Tagetes erecta* seeds

2.3 自然干旱胁迫对万寿菊幼苗生理特性的影响

2.3.1 束缚水和自由水的影响 随着土壤含水量的减少, 万寿菊幼苗束缚水含量总体上呈下降的趋势(图5-A); 当胁迫天数为12 d时, 万寿菊幼苗的束缚水和自由水(图5-B)都达到了其最小和最大值, 分别为38%和62%, 较对照分别减少和增加了33.6%和34%, 差异显著($P < 0.05$); 其比值在不同胁迫天数下分别为2.56、5.76、1.81、0.61。

2.3.2 叶绿素含量的影响 相同土壤含水量下万寿

较PEG浓度为2%下降了0.71, 差异显著($P < 0.05$), 此后, 当PEG浓度为8%和10%时, 其抗旱指数与PEG浓度为6%时相比, 均无显著差异, 结合万寿菊种子发芽率, 活力指数及发芽指数说明, 当PEG浓度为6%时, 万寿菊种子抗旱能力明显降低。

2.2 自然干旱胁迫对万寿菊幼苗生长的影响

2.2.1 土壤含水量变化 测定结果表明, 盆栽土壤水分含量在自然干旱胁迫0 d时, 各盆栽土壤的含水量为70%~80%(CK); 干旱胁迫4 d时, 为50%~60%; 干旱胁迫8 d时, 为40%~50%; 干旱胁迫12 d时, 为30%~40%。

2.2.2 万寿菊株高和地径的影响 在干旱胁迫0~8 d时, 万寿菊幼苗株高呈增大趋势, 较对照变化范围为6.34~6.76 cm, 差异显著($P < 0.05$)(图4-A); 当干旱胁迫达到12 d时, 万寿菊幼苗株高为21.18 cm, 较对照下降1.96, 差异不显著($P < 0.05$)。

随着干旱胁迫天数的延长, 万寿菊幼苗地径呈增大趋势, 较对照变化范围为0.08~0.086 cm, 差异显著($P < 0.05$)(图4-B)。

菊叶绿素a(图6-A)、叶绿素b(图6-B)和总叶绿素含量(图6-C)呈先上升后下降的趋势。当胁迫天数为4 d时, 万寿菊叶绿素a、b和总叶绿素含量达最大, 分别比对照增加了0.239 6、0.204 2和0.470 8 mg/g, 差异显著($P < 0.05$)。此外, 干旱胁迫达到12 d时, 叶绿素a含量为0.230 2 mg/g, 较对照减少了0.4778 mg/g, 差异显著($P < 0.05$); 叶绿素b含量为0.183 4 mg/g, 较对照减少0.1138 mg/g, 差异不显著, 可见万寿菊受到干旱胁迫后是以叶绿素a下降为主。

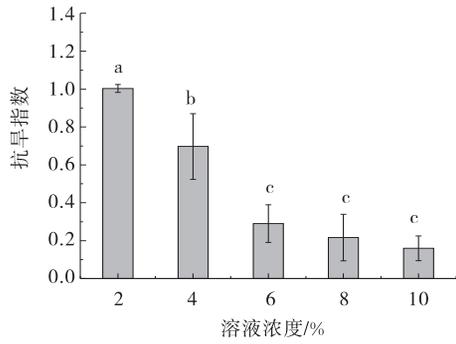


图 3 PEG 胁迫对万寿菊种子抗旱指数的影响

Fig. 3 Effect of PEG stress on *Tagetes erecta* seeds drought tolerance index

2.3.3 丙二醛、脯氨酸和可溶性蛋白的影响 在不

同胁迫天数下万寿菊幼苗的MDA均高于对照(图7-A)。随着干旱胁迫的加深,MDA含量不断上升。当胁迫天数为12 d时,MDA含量大幅度增加,比对照增加了1.91 $\mu\text{mol/g}$,差异显著($P < 0.05$)。在胁迫天数为12 d时,MDA含量达到最大值2.95 $\mu\text{mol/g}$,比胁迫8 d增加了0.4 $\mu\text{mol/g}$,差异显著($P < 0.05$)。说明万寿菊幼苗叶片细胞膜受到了不同程度的损害,进一步表明万寿菊对于干旱的反应较为敏感。

随着土壤含水量的减少,万寿菊幼苗叶片内脯氨酸含量持续增大,当胁迫天数为8~12 d时,万寿菊幼苗叶片脯氨酸含量分别为对照的3.5和4倍,差异显著($P < 0.05$)(图7-B)。说明40%~20%的土壤含水

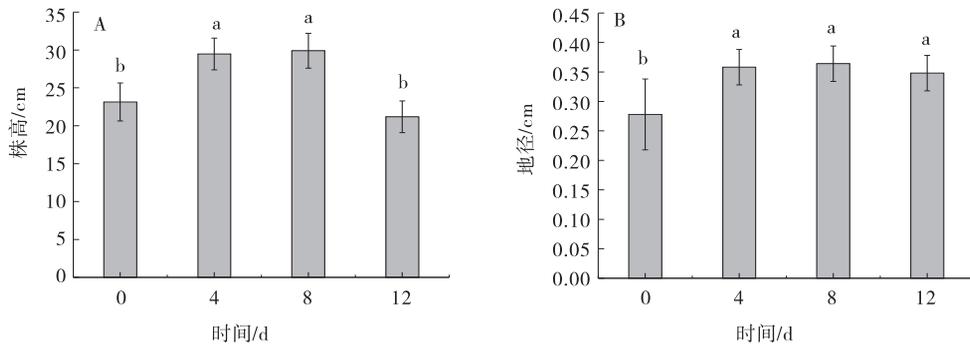


图 4 自然干旱胁迫对万寿菊幼苗株高(A)和地径(B)的影响

Fig. 4 Effects of natural drought stress on plant height (A) and ground diameter (B) of *Tagetes erecta* seedlings

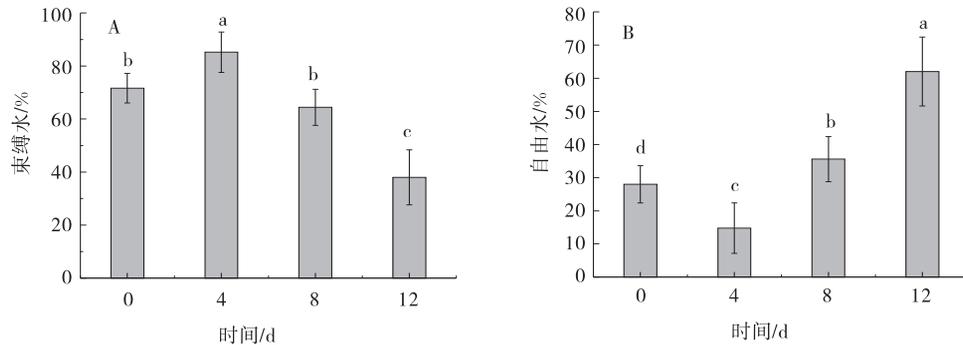


图 5 自然干旱胁迫对万寿菊幼苗束缚水(A)和自由水(B)的影响

Fig. 5 Effects of natural drought stress on bound water (A) and free water (B) of *Tagetes erecta* seedlings

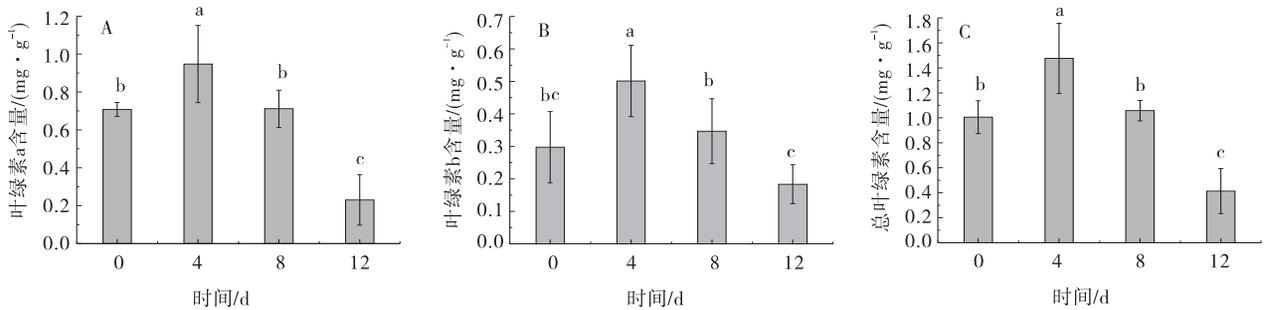


图 6 自然干旱胁迫对万寿菊幼苗叶绿素a(A)、b(B)和叶绿素总量(C)的影响

Fig. 6 Effects of natural drought stress on chlorophyll a (A), b (B) and total chlorophyll (C) of *Tagetes erecta* seedlings

量可以大幅度刺激幼苗脯氨酸显著的上升。

随着土壤含水量的减少,万寿菊幼苗叶片可溶性蛋白表现为先增大后减小的趋势(图7-C)。当胁迫天数为4~8 d时,可溶性蛋白的含量为6.981 4 mg/g和7.597 mg/g,分别比对照增加了1.270 9 mg/g和

1.886 8 mg/g,差异显著($P<0.05$)。说明万寿菊幼苗在轻度干旱和中度干旱胁迫下,能迅速诱导可溶性蛋白的产生,提高自身保水性,抵御干旱胁迫。但当干旱胁迫进一步加深土壤含水量在20%左右时,可溶性蛋白含量开始减少,但并没有低于对照。

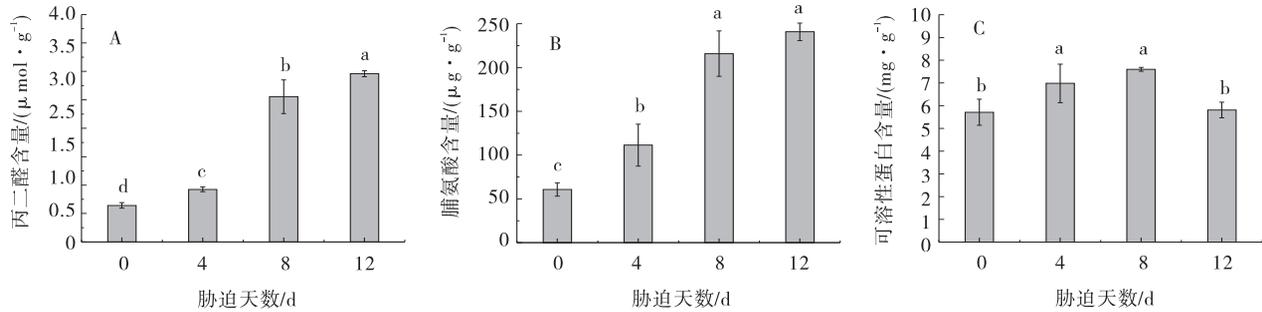


图7 自然干旱胁迫对万寿菊幼苗MDA(A)、脯氨酸(B)和可溶性蛋白(C)的影响

Fig. 7 Effects of natural drought stress on MDA (A), proline (B) and soluble protein (C) in *Tagetes erecta* seedlings

2.3.4 保护酶活性的影响 自然干旱胁迫下幼苗SOD活性表现出先上升后下降的趋势(图8-A)。当胁迫天数为4 d时,幼苗SOD活性为26.28 $\mu\text{g}/\text{g}$,比对照增加了6.17 $\mu\text{g}/\text{g}$,差异显著($P<0.05$)。当胁迫天数达到8和12 d时,幼苗SOD活性为10.55 $\mu\text{g}/\text{g}$ 和9.94 $\mu\text{g}/\text{g}$,分别比对照下降了9.57 $\mu\text{g}/\text{g}$ 和10.18 $\mu\text{g}/\text{g}$,差异显著($P<0.05$)。

自然干旱胁迫对幼苗CAT活性影响与对SOD活性相似,都表现出先上升后下降的趋势(图8-B)。当胁迫天数为4 d时,CAT活性达到最高,比对照上升

2.71 U/($\text{min}\cdot\text{mg}$),差异显著($P<0.05$);当胁迫天数继续增加到8和12 d时,幼苗CAT活性下降并分别低于对照0.11和0.74 U/($\text{min}\cdot\text{mg}$),差异不显著。

不同干旱胁迫程度下,POD酶活性表现为先上升后下降的趋势(图8-C)。当胁迫天数为4 d时,POD活性为12.79 U/($\text{min}\cdot\text{g}$),比对照上升了9.45 U/($\text{min}\cdot\text{g}$),差异显著($P<0.05$);当胁迫天数到达8 d时,POD活性开始下降,但仍比对照高出4.52 U/($\text{min}\cdot\text{g}$),差异显著($P<0.05$);胁迫天数为12 d时,酶活性为2.78U/($\text{min}\cdot\text{g}$),比对照下降0.86 U/($\text{min}\cdot\text{g}$)。

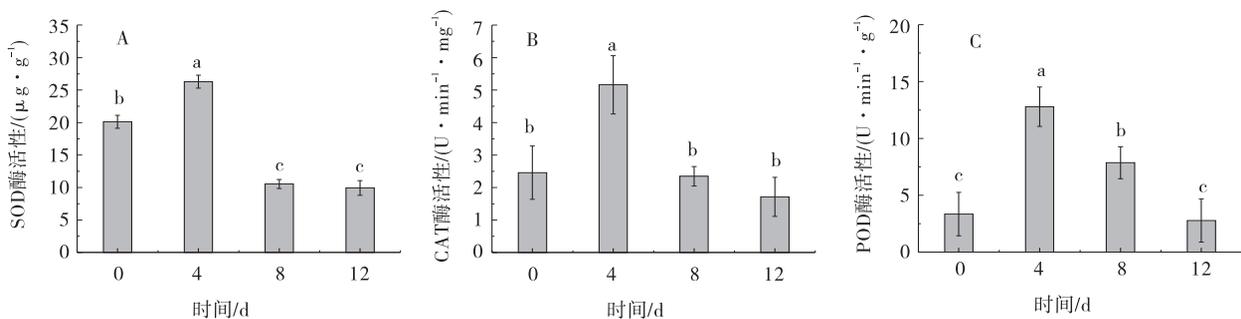


图8 自然干旱胁迫对万寿菊幼苗SOD(A)、CAT(B)和POD(C)酶活性的影响

Fig. 8 Effects of natural drought stress on activities of SOD (A), CAT (B) and POD (C) in *Tagetes erecta* seedlings

3 讨论

3.1 PEG胁迫对种子萌发的影响

聚乙二醇(PEG-6000)是用来造成水分胁迫的渗透剂,它起到类似于自然干旱的胁迫作用^[13],利用PEG模拟干旱胁迫探究种子发芽率等已有较多报道。

种子吸水力与植物抗旱性呈正相关,吸水力强的种子在干旱胁迫下能够保持较高的发芽率,而吸水率弱的种子则相反^[14]。植物种子能否萌发与生境条件和其自然分布地区的气候密切相关,是植物对分布地区自然生长环境长期适应的结果^[15]。在本试验中,低浓度(0%~4%)PEG胁迫对万寿菊种子发芽率、发芽指

数、活力指数和抗旱指数影响不是很明显,但当PEG浓度大于6%时,种子萌发受到明显的抑制,其发芽率、发芽指数、活力指数和抗旱指数显著降低。

3.2 自然干旱胁迫对幼苗株高和地径的影响

干旱胁迫对植物的形态和生长产生不同水平的影响,对万寿菊幼苗造成不可逆的伤害。幼苗株高和地径可以综合反映其生长特点^[16]。本试验中,干旱胁迫0~8 d时,万寿菊的株高和地径增加,但其增量在8 d时已开始减少,说明万寿菊幼苗生长受到抑制。干旱胁迫12 d时,万寿菊幼苗的株高和地径减少,且株高低于对照,这可能是由于土壤含水量不足使植株缺水造成茎秆萎蔫失水,这与魏鸣等^[17]研究结论一致。

3.3 自然干旱胁迫对幼苗生理特性的影响

植物体内束缚水和自由水含量及其比值与植物抗旱性有着密切的关系^[18]。一般来说,耐旱性较强的植物,其束缚水含量高;束缚水和自由水的比值也高^[19]。干旱、盐渍、高低温等逆境条件下植物可以通过主动积累或释放某些有机和无机物质来改变细胞液浓度,从而抵抗逆境,这是植物的渗透调节^[20]。其中有机物质包括脯氨酸和可溶性蛋白等,其含量是了解植物抗逆性的重要指标^[21]。植物体内可溶性蛋白大多是参与各种代谢的酶类,它们既有合成作用,又有分解作用,有研究表明,可溶性蛋白的积累有一定限度,当其含量达到一定阈值时,不会继续增加而是减少^[22]。在本试验中万寿菊幼苗可溶性蛋白在0~8 d处于上升的状态,说明通过生成蛋白质为抵御干旱胁迫提供物质基础;在胁迫天数到达12 d时,可溶性蛋白含量开始下降,但没有低于对照,这可能是胁迫已达万寿菊极限,蛋白质的分解速率大于合成速率的结果,这与姜慧芳等^[23]研究结论一致。大量研究表明,植物脯氨酸的积累与其所受的干旱程度呈正相关^[24]。植物通过提高自身脯氨酸含量来抵抗外界胁迫,细胞中脯氨酸含量提高,对降低植物渗透势、维持细胞的膨压,保护细胞中酶和膜系统免受胁迫的毒害有一定作用^[25]。本研究中,万寿菊幼苗体内脯氨酸随干旱胁迫天数的增加逐渐升高,胁迫8~12 d时,脯氨酸含量显著升高,说明在胁迫下脯氨酸充分积累,其作为渗透调节剂努力维持植物细胞正常膨压,缓解干旱胁迫对植物的伤害,这与代英超^[26]等研究一致。

在干旱胁迫下,植物体内会产生过量的活性氧,

导致膜脂过氧化加速反应,生成丙二醛等有害物质。这时,植物体内的抗氧化防御体系会防止植物受到迫害而发挥作用,其中以3种保护酶(SOD、CAT和POD)最为重要^[27],SOD能将 O_2^- 转化为 H_2O_2 ,同时POD和CAT能将 H_2O_2 进一步转化为 H_2O ,三者协同将自由基维持在一个较低的水平,缓解植物由于干旱胁迫造成的膜质过氧化作用^[28]。已有研究表明,MDA含量与膜的伤害程度成正比,与植物抗旱能力呈负相关^[29]。目前,利用MDA含量和抗氧化酶活性来衡量植物的膜质过氧化程度以及植物的抗旱性已有较多报道。在本试验中,随着胁迫天数的增加,MDA含量表现为上升的趋势;保护酶活性先上升后下降。在0~4 d时,MDA含量缓慢升高;3种酶活性缓慢升高并且变化基本一致。说明在一定范围(0~4 d)内,自然干旱胁迫会诱导其体内抗氧化酶活性提高,抑制膜质过氧化反应,减少MDA的生成。当胁迫天数在4~8 d时,MDA含量急剧升高,3种酶活性显著下降,表明此时膜质过氧化作用增大,其程度已超过抗氧化防御体系防御能力,幼苗的膜系统已经受到损坏,导致幼苗抗性减弱,这与何森等^[30]的研究结果一致。

4 结论

综上所述,低浓度PEG(0~4%)对万寿菊种子萌发抑制作用微弱;PEG浓度为6%时,种子萌发受到明显抑制,其发芽率、发芽指数、活力指数和抗旱指数显著降低($P<0.05$);PEG浓度达到10%时已基本不能萌发;当土壤含水量大于40%(自然干旱胁迫0~8 d)时,万寿菊幼苗通过增加体内脯氨酸、可溶性蛋白含量,以及提高SOD、POD和CAT3种酶活性来抵御干旱胁迫对其造成的危害;当土壤含水量小于40%(自然干旱胁迫8 d以上)时,万寿菊幼苗开始死亡。

参考文献:

- [1] 崔大练,马玉心,王俊. 干旱胁迫下紫穗槐叶片解剖特征的变化[J]. 广西植物,2011,31(3):332-337.
- [2] 黎祐琛,邱治军. 树木抗旱性及抗旱造林技术研究综述[J]. 世界林业研究,2003,16(4):17-22.
- [3] 李磊,贾志清,朱雅娟等. 我国干旱区植物抗旱机理研究进展[J]. 中国沙漠,2010,30(5):1053-1059.
- [4] 班勇. 植物生活史对策的进化[J]. 生态学杂志,1995,14

- (3):33—39.
- [5] 韦朝妹,胡小京,莫幻. 外源赤霉素对盐胁迫下万寿菊种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 北方园艺,2022(16):69—75.
- [6] 贾建伟. 高温和盐胁迫对万寿菊种子发芽影响研究[J]. 农家顾问,2014(15):26.
- [7] 田治国,王飞,张文娥,等. 万寿菊属不同品种初花期抗旱特性分析[J]. 西北植物学报,2011,31(7):1390—1399.
- [8] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:260—265.
- [9] 宋丽华,周月君. 盐胁迫对臭椿种子发芽的影响[J]. 种子,2008(9):22—25.
- [10] 高群英,于占晶,孙文清,等. 干旱胁迫对三种菊科植物种子萌发的影响[J]. 北方园艺,2020(16):56—61.
- [11] 王进,王桔红,张勇,等. 苦豆子和披针叶黄华种子萌发和幼苗生长对干旱胁迫的响应[J]. 中国生态农业学报,2011,19(4):872—877.
- [12] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社,2002.
- [13] 万里强,李向林,石永红,等. PEG胁迫下4个黑麦草品种生理生化指标响应与比较研究[J]. 草业学报,2010,19(1):83—88.
- [14] 杜晓燕,张玉霞,谭巍巍,等. PEG胁迫对芦笋种子萌发的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2008,23(1):51—54.
- [15] 孙可蒙,隋晓青,王玉祥,等. PEG模拟干旱胁迫下12份新疆野生无芒雀麦种质萌发期抗旱性评价[J]. 草原与草坪,2020,40(6):102—107+117.
- [16] 王晓娟,李娜,姚文强,等. 树木抗旱生理特性及转录组调控研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2023,44(5):81—88.
- [17] 马彦军,马瑞,曹致中,等. PEG胁迫对胡枝子幼苗叶片生理特性的影响[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1662—1668.
- [18] 张卫华,张方秋,张守攻,等. 大叶相思抗旱性生理指标主成分分析[J]. 浙江林业科技,2005(6):15—19.
- [19] Seleiman M F, Al-suhaibani N, Ali N, *et al.* Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects[J]. *Plants*,2021,10(2):1—25.
- [20] 史玉炜,王燕凌,李文兵,等. 水分胁迫对刚毛怪柳可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量变化的影响[J]. 新疆农业大学学报,2007,30(2):5—8.
- [21] 武维华. 植物生理学[M]. 北京:科学出版社,2003:35—426.
- [22] 姜慧芳,任小平. 干旱胁迫对花生叶片SOD活性和蛋白质的影响[J]. 作物学报,2004,30(2):169—174.
- [23] 李君,周守标,王春景,等. 野生和栽培马蹄金抗旱性比较及其抗旱机制初探[J]. 植物生态学报,2007,31(3):521—527.
- [24] 段慧荣,李毅,马彦军. PEG胁迫对沙冬青种子萌发过程的影响[J]. 水土保持研究,2011,18(3):221—225.
- [25] 代英超,徐奎源,马凯等. 珍稀濒危植物堇叶紫金牛对持续干旱的生理响应[J]. 生态学报,2015,35(9):2954—2959.
- [26] 杜润峰,郝文芳,王龙飞. 达乌里胡枝子抗氧化保护系统及膜脂过氧化对干旱胁迫及复水的动态响应[J]. 草业学报,2012,21(2):51—61.
- [27] 安钰,沈应柏,张志翔. 伤害胁迫对合作杨叶片膜质过氧化及抗氧化酶活性的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(5):241—244.
- [28] 姜英淑,陈书明,王秋玉,等. 干旱胁迫对2个欧李种源生理特征的影响[J]. 林业科学,2009,45(6):6—10.
- [29] 何淼,李文鹤,卓丽环. 野菊幼苗对自然干旱胁迫的生理响应[J]. 草业科学,2011,28(8):1456—1460.

Effects of drought stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Tagetes erecta*

MA Da-Wei, WANG Bin-Qiang, MA Yan-Jun*

(College for forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The aim of the study is to explore the seed germination and seedling physiological characteristics of *Tagetes erecta* under drought stress. [Method] Different concentrations of polyethylene glycol (PEG) (2%, 4%, 6%, 8% and 10%) were set to simulate drought stress. Germination rate, germination index, vitality index and drought resistance index of Marigold seeds under drought stress were studied by germinating box. Pot experiment was conducted to study the effects of natural drought stress from 0 d to 12 d on morphological indexes (plant height, ground diameter) and physiological indexes (water content, membrane permeability, three enzyme activities, etc.) of Marigold seedlings. [Result] The experiments showed that the germination rate, germination index, vitality index and drought resistance index of *T. erecta* seeds decreased gradually with the increase of PEG concentration. When PEG concentration was 6%, the germination rate, germination index, vigor index and drought resistance index of the seeds were significantly decreased, which were 46%, 14.45%, 32.21% and 0.713 lower than the control group, respectively ($P < 0.05$). With the increase of drought stress days, the seedling height and ground diameter of *T. erecta* seedlings increased first and then decreased, while the contents of proline and malondialdehyde in leaves of *T. erecta* seedlings showed an increasing trend. The content of soluble protein increased first and then decreased. The bound water gradually decreases and the free water gradually increases. The total amount of chlorophyll a, b and chlorophyll first increased and then decreased; The activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) enzymes decreased first and then increased with water content, and then decreased after reaching the peak value. [Conclusion] The seeds of *T. erecta* under the PEG concentration less than 6% could germinate normally. *T. erecta* seedlings could grow normally if the soil water content is greater than 50%.

Key words: *Tagetes erecta*; PEG; natural drought stress

(责任编辑:刘建荣)