

李新蕾,李叶芳,关文灵. PEG 模拟干旱胁迫对大叶醉鱼草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(9):154-159.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.09.030

PEG 模拟干旱胁迫对大叶醉鱼草种子萌发及幼苗生理特性的影响

李新蕾,李叶芳,关文灵

(云南农业大学园林园艺学院,云南昆明 650201)

摘要:以大叶醉鱼草(*Buddleja davidii* Franch.)种子和幼苗为研究对象,分别采用加有蒸馏水(CK)与5%、10%、15%、20%、25%等5个不同质量分数(下同)聚乙二醇6000(PEG-6000)的发芽床蒸馏水(CK)与10%、20%、30%等3个质量分数PEG-6000模拟不同程度的干旱胁迫,研究干旱胁迫条件对大叶醉鱼草种子萌发及幼苗生理生化特性的影响。结果表明:(1)在一定范围内,随着干旱胁迫强度的增加,大叶醉鱼草种子的发芽启动时间推迟,发芽持续时间延长,发芽率、发芽势、发芽指数降低,但种子发芽率在5%~10%PEG胁迫下与对照间无显著差异,而在15%PEG胁迫下均显著低于对照,在20%及以上质量分数PEG胁迫下种子不能萌发。(2)大叶醉鱼草幼苗叶片的游离脯氨酸、丙二醛含量随PEG胁迫强度的增加和时间的延长而增加,各指标均在30%PEG胁迫处理9d时最高,分别为对照的2.88、5.66倍。(3)随着PEG胁迫时间的延长,大叶醉鱼草幼苗叶片过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性先上升后下降,在30%PEG胁迫处理6d时活性最强;过氧化物酶(POD)活性随着胁迫时间的延长呈现出先下降又上升的变化趋势,并在30%PEG胁迫处理3d时活性最强。由结果可得,大叶醉鱼草种子在轻度干旱胁迫下可正常萌发,而且幼苗能通过调节体内渗透调节物质含量和抗氧化酶活性主动适应干旱环境,对干旱环境表现出较好的适应能力。

关键词:大叶醉鱼草;干旱胁迫;种子萌发;幼苗生长;抗逆生理指标;抗旱性

中图分类号:S687.901 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)09-0154-06

世界上有1/3以上的土地处于干旱和半干旱地区^[1]。我国现有干旱区面积占国土总面积的

38.3%^[2-3]。干旱是影响植物分布和生长发育的主要环境因子之一,其危害程度在诸多非生物胁迫中占首位^[4]。研究植物干旱胁迫响应机制、评价其抗旱性,将为提高植物水分利用效率、提高植物抗旱性能、选育抗旱优良品种、发展高产耐旱农业提供理论指导,同时选择适生植被对受损生态系统进行植被修复、恢复和人工生态系统的建立是非常有效的环境治理途径^[5]。

在干旱环境下,种子萌发和幼苗生长阶段是决

收稿日期:2019-04-29

基金项目:园艺学大学生创新创业训练计划(编号:2018ZKX67)。

作者简介:李新蕾(1993—),女,广东湛江人,硕士,主要研究方向为生态修复植物资源开发利用、园林植物资源开发利用。E-mail:459383051@qq.com。

通信作者:关文灵,博士,教授,主要从事园林植物研究。E-mail:158066692@qq.com。

[19] 胡慧蓉,田 昆. 土壤学实验指导教程[M]. 北京:中国林业出版社,2012.

[20] 李新宇,孟 康,李小英,等. 生物炭对元谋燥红壤土壤肥力与番茄生长的影响[J]. 西部林业科学,2019,48(2):114-120.

[21] 郑慧芬,吴红慧,翁伯琦,等. 施用生物炭提高酸性红壤茶园土壤的微生物特征及酶活性[J]. 中国土壤与肥料,2019(2):68-74.

[22] 许云翔,何莉莉,刘玉学,等. 施用生物炭6年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(4):1110-1118.

[23] 王义坤,孙琪然,段亚楠,等. 三种菌肥对苹果连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(4):630-638.

[24] 赵晓军,李 丽,张 璇,等. 生物炭与微生物菌剂配施对土壤生物和化学特性的影响[J]. 安徽农业科学,2018,46(25):109-112.

[25] 严陶韬,丁子菊,朱 倩,等. 生物质炭对黄棕壤理化性质及龙脑樟幼苗生长的影响[J]. 土壤,2018,50(4):681-686.

[26] 陈媛媛,江 波,王效科,等. 元宝枫幼苗生长和光合特性对硬化地表的响应[J]. 生态学杂志,2016,35(12):3258-3265.

[27] 黄晓丽,葛根塔娜,梅 梅,等. 生物炭对美国红枫幼苗生长及叶色变化的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2017,48(5):530-536.

[28] 孙琪然,徐 燕,相 立,等. 生物炭和菌肥的混合使用对苹果园连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生理指标的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(8):52-59.

定植物能否正常生长的关键时期,而耐旱性较好的植物,其种子在缺水环境下常常会形成特殊的萌发机制以确保萌发与繁衍。同时干旱胁迫可引起植物幼苗失水,诱发渗透胁迫及活性氧损伤。为了保持体内的水分平衡,使细胞发挥正常功能,抵御干旱胁迫伤害,植物的细胞液渗透势会降低,气孔关闭推迟,同时酶促系统中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、丙二醛(MDA)等的合成活动增强^[6-8]。聚乙二醇(PEG)作为一种渗透调节剂,能较为理想地模拟干旱环境,具有简便快速、重复性好、周期短等优点,已被广泛应用于种子和幼苗干旱胁迫等相关试验中,并在园林植物罗布麻^[9]、小雀花^[10]、玉带草^[11]等种子种苗的抗旱特性方面取得了较好的研究成果。

大叶醉鱼草是醉鱼草属(*Buddleja* L.)植物中具有很高观赏价值的种类,既可作为庭园观赏植物,也是很好的生态修复植物。目前,在欧洲引种栽培的醉鱼草属品种已超过 120 个,是欧美园林植物中最流行的观赏灌木之一。我国虽有丰富的醉鱼草属种质资源,但还没有进行系统的发掘利用^[12]。目前,国内外对大叶醉鱼草的研究主要集中在其药用成分及杀虫成分上,关于其抗性的研究较少,且主要研究其对重金属的耐性。本试验以大叶醉鱼草为材料,通过 PEG-6000 人工模拟不同程度的干旱胁迫,研究干旱胁迫对大叶醉鱼草种子萌发、渗透调节物质、抗氧化酶系统等生理生化特性的影响,以期明确大叶醉鱼草种子及幼苗对于干旱环境的适应机制,为大叶醉鱼草在园林及在生态修复中的应用提供相关理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验用大叶醉鱼草种子于 2018 年 5—6 月采自云南省昆明市,采集后保存于 4 ℃ 冰箱中。2018 年 5—8 月在云南农业大学园林园艺学院实验室进行 PEG-6000 模拟干旱胁迫下种子萌发试验。2018 年 6 月在云南农业大学温室进行播种育苗,2018 年 9 月移至云南农业大学园林园艺学院实验室,进行 PEG-6000 模拟干旱胁迫下幼苗生长试验。

1.2 试验设计

1.2.1 种子萌发试验 选取大小均匀的优质大叶醉鱼草种子,先用 1% 体积分数的次氯酸钠浸泡消毒 30 min,再用蒸馏水冲洗直至无次氯酸钠后待用。

以培养皿(直径 9 cm,内铺有滤纸)作为发芽床,将供试种子均匀排布在加有等量、质量分数(下同)分别为 0(蒸馏水,CK)、5%、10%、15%、20%、25% 的 PEG-6000 水溶液的发芽床中,每床 50 粒,置于光照培养箱中进行萌发测定,培养温度为 25 ℃、光照时间为 12 h/d。每天向滤纸上加蒸馏水或 PEG-6000 水溶液以保持原始质量,每处理重复 3 次。每天 18:00 观察并记录大叶醉鱼草种子萌发情况,种子发芽的标准为种子露出胚根,连续 3d 种子发芽数不足供试种子数的 1/100 视为萌发结束,于 16 d 后结束试验。记录发芽启动时间、发芽持续时间,统计发芽势,最后计算发芽率、发芽指数。计算方法或公式如下:

发芽启动时间:从发芽试验开始到第 1 粒种子开始萌发所需时间(d);

发芽持续时间:第 1 粒种子开始萌发到萌发结束所需时间(d);

发芽率(GR) = 种子发芽数/供试种子总数 × 100% ;

发芽势 = 规定时间内发芽种子总数/供试种子总数 × 100% ;

发芽指数(GI) = \sum (在不同时间的发芽数/对应的发芽所用时间)。

1.2.2 幼苗模拟干旱胁迫试验 将营养土和珍珠砂按体积比 3 : 1 配成基质,等量分装于塑料盆(16 cm × 18 cm)中,每盆种 4 株幼苗,添加适量的蒸馏水后放入人工气候箱中进行培养。光照条件为白天 12 h(25 ℃),夜晚 12 h(15 ℃),进行模拟干旱胁迫处理。根据种子萌发试验的结果,设置 PEG-6000 水溶液质量分数分别为 10%、20%、30% 及对照(蒸馏水,CK),每个处理设 3 次重复,每个重复 2 盆。每天 18:00 用称质量法补充 PEG-6000 水溶液至原始质量,分别于干旱胁迫处理后 3、6、9 d,取幼苗叶片放入液氮速冻后转移至 -80 ℃ 冰箱保存,用于测定幼苗叶片的各项生理指标。

1.3 测定指标及方法

SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)法测定,单位为 U/g;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,以 1 min 内 $D_{410\text{ nm}}$ 变化 0.01 为 1 个酶活性单位(U);CAT 活性采用紫外吸收法测定,以 1 min 内 $D_{240\text{ nm}}$ 减少 0.1 的酶量为 1 个酶活性单位(U);丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定,μg/g;脯氨酸(Pro)含量的测定采用酸性茚三酮法,μg/g。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 软件对数据进行处理,测定结果表示为“平均值 ± 标准差”形式,用 SPSS 18.0 软件进行方差分析,用 Duncan's 法进行单因素比较分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对大叶醉鱼草种子萌发的影响

大叶醉鱼草种子萌发进程见图 1,可见对照组与 5%、10% PEG 胁迫处理的种子在培养 4 d 时开始启动发芽,5 d 时大量萌发,平均萌发种子数分别为 74、72、32 粒;15% PEG 胁迫处理种子到培养 7 d 时有个别重复启动发芽;20% 及以上质量分数 PEG 胁迫处理下种子未见萌发。

同时,大叶醉鱼草种子发芽率、发芽势、发芽指

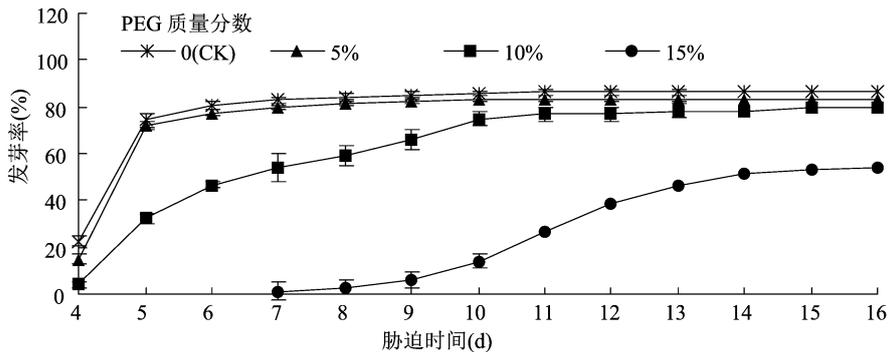


图1 干旱胁迫处理下大叶醉鱼草的萌发进程

表 1 不同浓度 PEG 6000 处理下种子萌发情况比较

PEG 质量分数 (%)	发芽率 (%)	发芽势 (%)	发芽指数	发芽启动时间 (d)	发芽持续时间 (d)
0 (CK)	84.33 ± 3.06a	74.33 ± 3.21a	17.56 ± 0.42a	4.00 ± 0.00a	4.33 ± 0.58a
5	83.33 ± 1.15a	72.00 ± 6.00a	16.79 ± 0.50a	4.00 ± 0.00a	7.00 ± 0.00b
10	79.33 ± 3.06a	32.33 ± 9.71b	12.76 ± 1.83b	4.00 ± 0.00a	11.67 ± 0.58c
15	54.33 ± 3.06b	26.33 ± 6.11c	4.82 ± 0.46c	7.33 ± 0.58b	13.00 ± 0.00d
20	0	0	0		

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.1 干旱胁迫对大叶醉鱼草幼苗叶片游离脯氨酸和丙二醛含量的影响

游离脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,能够参与植物细胞水势的调节^[13]。从图 2 - A 可以看出,大叶醉鱼草幼苗中游离脯氨酸的含量随着 PEG 胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长而持续上升,并显著高于同期对照($P < 0.05$)。其中 10%、20% PEG 胁迫处理游离脯氨酸含量上升速度较 30% PEG 胁迫处理慢,其间无明显差异;30% PEG

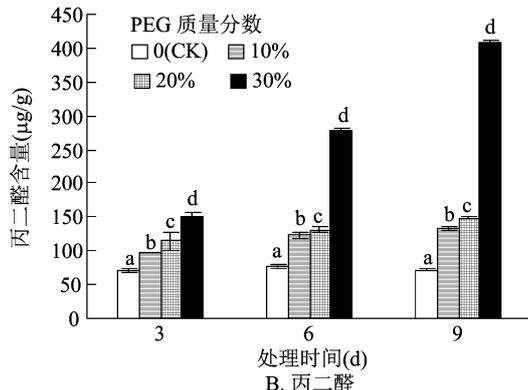
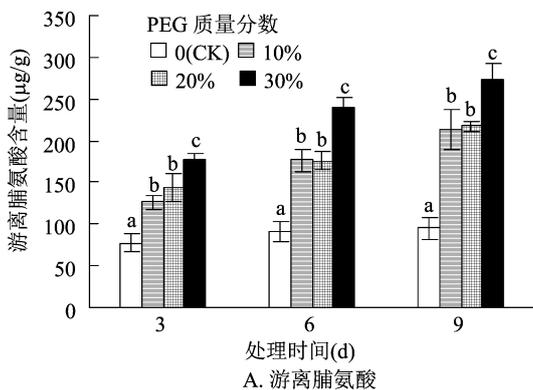
数随 PEG 质量分数的加大而呈逐渐下降的趋势(表 1),且影响效应随 PEG 质量分数不同呈现出差异性。在发芽率方面,5%、10% PEG 胁迫处理与对照比较差异不显著,15% 胁迫处理与对照间差异显著($P < 0.05$);在发芽势、发芽指数方面,5% PEG 胁迫处理与对照间差异不显著,10%、15% PEG 胁迫处理与对照比较差异显著($P < 0.05$);15% PEG 胁迫处理下大叶醉鱼草种子萌发的各项指标急剧下降,与对照间差异均显著($P < 0.05$),发芽率仅为对照的 64.43%;在发芽启动时间方面,除 15% PEG 胁迫处理在培养 7 d 启动发芽外,0 ~ 15% PEG 处理均在培养 4 d 开始发芽;PEG 质量分数在 20% 及以上时则已完全抑制了大叶醉鱼草种子萌发,各项测定指标全部为 0。

胁迫处理下游离脯氨酸含量上升幅度较大,在 3、6、9 d 时游离脯氨酸含量分别为 177.29、239.75、273.821 $\mu\text{g/g}$,分别是同期对照组的 2.29、2.635、2.878 倍。表明大叶醉鱼草幼苗体内会积累较多的脯氨酸来适应干旱环境。

另外,干旱胁迫初期处理 3 d 时,大叶醉鱼草幼苗 MDA 含量随着胁迫溶液质量分数的增加而上升(图 2 - B),但变化幅度较小,而各处理组与对照相比仍差异显著($P < 0.05$);在处理 6、9 d 时,10%、

20% PEG 胁迫处理幼苗 MDA 质量分数上升不明显,但与对照组相比仍差异显著 ($P < 0.05$),30% PEG 胁迫处理 MDA 含量持续升高,且幅度增大。结果表明,随着干旱胁迫时间延长,大叶醉鱼草幼

苗可以抵抗一定程度的干旱胁迫诱导的膜质过氧化作用伤害,且得到明显缓和,但干旱胁迫程度过高仍会导致大叶醉鱼草幼苗质膜出现明显损坏。



图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。图3同
图2 干旱胁迫下大叶醉鱼草游离脯氨酸和丙二醛含量的变化

2.2 干旱胁迫对大叶醉鱼草幼苗抗氧化酶活性的影响

超氧化物歧酶的主要功能是清除 $O_2 \cdot^-$,降低氧自由基对细胞膜系统的伤害,其活性高低是评价植物抗旱性的重要指标之一^[14]。CAT 通过与 SOD 起协同作用,将植物体内的 H_2O_2 转化成 H_2O ,以保持体内的活性氧在较低水平上^[15]。随着 PEG 模拟干旱胁迫程度的加强,各时期大叶醉鱼草幼苗 SOD 活性均表现出逐渐升高的变化趋势,且处理组始终显著高于同期对照组 ($P < 0.05$);随着处理时间的延长,各处理 SOD 活性基本呈先上升后下降的变化趋势,20% PEG 胁迫处理 6 d 时,大叶醉鱼草幼苗 SOD 活性为 231.23 U/g,是同期对照组的 1.47 倍(图 3-A)。随着 PEG 胁迫强度的增加,大叶醉鱼草幼苗 CAT 活性呈逐渐上升的趋势;随着胁迫时间的延长,大叶醉鱼草幼苗 CAT 活性均表现出明显的先上升后下降的趋势,但各组均在处理 6 d 时具有最大值,30% PEG 胁迫处理在在 6 d 时的 CAT 活性最强,达 47.24 U/(g·min),为同期对照组的 17.56 倍(图 3-B)。在 PEG 模拟干旱胁迫处理下,大叶醉鱼草幼苗 POD 活性的变化动态与 SOD、CAT 稍有不同。干旱胁迫处理组的 POD 活性均显著高于同期对照组 ($P < 0.05$),随处理时间延长,各处理组均表现出先下降后上升的趋势,并在处理后 3 d 时出现最高活性,30% PEG 胁迫处理在处理 3 d 时活性最强,达 98.03 U/(g·min),为同期对照的 6.44 倍(图 3-C)。表明大叶醉鱼草幼苗在遭受干旱胁迫

时,体内抗氧化酶体系增强,能够发挥清除活性氧的作用,以减轻过氧化伤害。

3 结论与讨论

3.1 干旱胁迫对大叶醉鱼草种子萌发的影响

干旱胁迫是影响植物生长发育的重要环境因子之一,而植物种子萌发和幼苗生长阶段是对外界环境变化响应最为敏感和脆弱的时期^[16]。因此,通过模拟干旱环境来考察植物种子萌发和幼苗生长情况,评价其对于干旱胁迫的生理机制和抗逆性,具有较高的实际和理论价值。PEG-6000 作为渗透调节剂,已广泛应用于不同植物的干旱环境模拟方面^[6,17-18]。本试验通过对 PEG-6000 模拟干旱胁迫下大叶醉鱼草种子萌发相关指标及幼苗生理特性进行分析,可以对大叶醉鱼草种子和幼苗的抗旱性有初步的了解。

植物种子萌发指标是反映其耐旱性能的最直接指标,本研究结果表明,大叶醉鱼草种子能在 PEG 质量分数为 5% 的干旱胁迫下正常萌发,发芽率、发芽势、发芽指数和发芽启动时间与对照组间无显著差异;10% PEG 胁迫处理下大叶醉鱼草的发芽势和发芽指数虽然显著低于对照组 ($P < 0.05$),但发芽启动时间和最终发芽率与对照相比无显著差异;在 15% PEG 胁迫下所有指标均显著低于对照组 ($P < 0.05$);而当 PEG 质量分数为 20% 时,大叶醉鱼草种子萌发受到强烈抑制,质量分数达到 25% 时已完全致死。

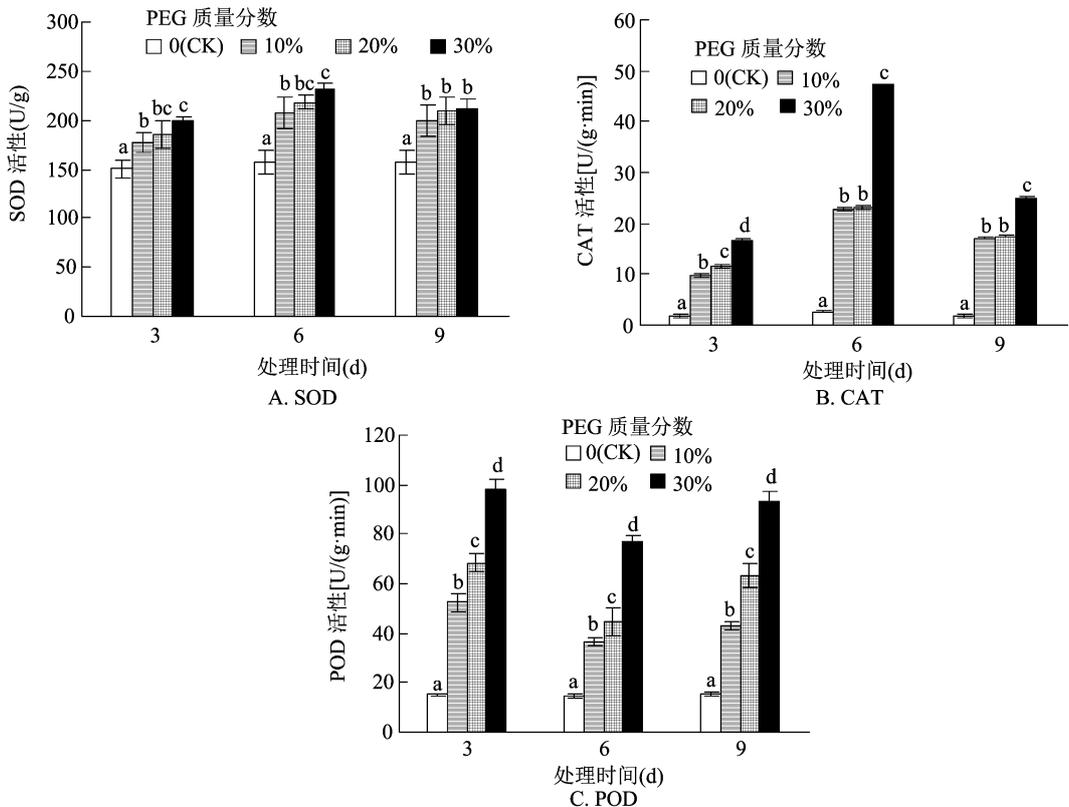


图3 干旱胁迫下大叶醉鱼草幼苗 SOD、CAT、POD 活性的变化

3.2 干旱胁迫对大叶醉鱼草幼苗叶片渗透调节物质含量和膜脂过氧化作用的影响

游离脯氨酸作为植物体内重要的渗透调节物质,在植物响应干旱胁迫时大量增加以发挥生理保护作用。植物体内的脯氨酸会在其面对高温和干旱等逆境胁迫时大量积累,其含量高低可以在一定程度上反映植物遭受干旱胁迫伤害的程度,大叶醉鱼草遭受干旱胁迫时体内会积累较多的脯氨酸,且脯氨酸含量与胁迫程度和时间呈正相关,表明大叶醉鱼草幼苗随着干旱胁迫强度的增加,其体内需要产生大量的脯氨酸来应对外界干旱胁迫,与众多植物干旱胁迫研究的结果^[19-20]一致。MDA 能通过结合膜上的酶和蛋白质而破坏质膜的完整性,并导致选择透性丧失,其含量高低可以反映植物受到干旱胁迫伤害程度的大小^[21]。本研究中大叶醉鱼草幼苗遭受干旱胁迫时,叶片 MDA 含量显著增加,细胞膜出现损伤,膜透性降低;而随着干旱胁迫时间的延长,低浓度、中浓度 PEG 胁迫下的叶片 MDA 含量上升不明显,高浓度 PEG 胁迫下 MDA 含量急剧上升,说明大叶醉鱼草幼苗可通过生理调节作用调整生理机能以适应一定程度的干旱环境,具有一定的抗干旱能力,然而 PEG 胁迫强度过大会导致大叶醉

鱼草幼苗细胞膜出现严重损伤,加剧膜脂过氧化程度,导致生理劣变。

3.3 干旱胁迫对大叶醉鱼草幼苗抗氧化酶活性的影响

SOD、POD 和 CAT 普遍存在于植物体内,是植物体内的重要抗氧化酶,与植物的生理生化活动关系密切。干旱或水分胁迫下,上述 3 种酶可协同起作用,有效清除活性氧及其他过氧化物自由基,缓解外在环境胁迫对植物造成的伤害^[22-23]。本研究结果表明,随着胁迫时间的延长,大叶醉鱼草幼苗的 SOD、CAT 活性均表现为先上升后下降的趋势,POD 活性则在胁迫初期就表现出最强的活性,与相关研究结果^[23-24]一致,说明在遭受干旱胁迫时大叶醉鱼草幼苗体内抗氧化酶系统能够通过复杂的协同调控发挥减少活性氧累积的作用,但在严重干旱胁迫下活性氧的增加已超过抗氧化酶系统的负荷而对其造成伤害,从而引起酶活性的降低。此外,MDA 的积累也会抑制 SOD、POD 的活性^[25],从而破坏了保护酶系统的功能,促使膜系统受损加重。

3.4 大叶醉鱼草抗旱性的综合评价

植物抗旱性是一个复杂的综合性状,它受多因素影响,而各因素之间又相互作用。综上所述,大

叶醉鱼草种子具有一定的干旱耐受能力,在轻度干旱环境中可正常萌发,在中度、重度的干旱环境中仍有一定的种子萌发。同时,大叶醉鱼草幼苗能通过调节体内的游离脯氨酸和丙二醛含量来抵抗所处干旱环境的伤害,表现出较好的耐性。

大叶醉鱼草是速生常绿灌木,其花期长,花量多,具有较高的观赏价值。在园林应用中,可在其种子萌发和幼苗生长阶段给予一定的干旱胁迫以提升其抗旱能力。本研究结果可为揭示大叶醉鱼草种子、幼苗适应干旱环境的机制及今后大叶醉鱼草的栽培应用和抗性品种选育提供相关科学依据。

参考文献:

- [1] Sivakumar M K, Das H P, Brunini O. Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and Semi - Arid tropics [J]. Climatic Change, 2005, 70 (1/2): 31 - 72.
- [2] 褚建民. 干旱区植物的水分选择性利用研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [3] 慈龙骏, 杨晓晖. 中国沙尘暴与荒漠化的扩展趋势[C]. 2003年中国 - 欧盟荒漠化综合治理研讨会论文集. 北京, 2003.
- [4] 刘友良. 植物水分逆境生理[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [5] 李瑞雪, 孙任洁, 汪泰初, 等. 植物抗旱性鉴定评价方法及抗旱机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2017, 33(7): 40 - 48.
- [6] Ahmad P, Mohd R W. Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [7] 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.
- [8] Zhu Z B, Liang Z S, Han R L. Saikosaponin accumulation and antioxidative protection in drought - stressed *Bupleurum chinense* DC. plants [J]. Environmental & Experimental Botany, 2009, 66(2): 326 - 333.
- [9] 徐振朋, 宛涛, 蔡萍, 等. PEG模拟干旱胁迫对罗布麻种子萌发及生理特性的影响[J]. 中国草地学报, 2015, 37(5): 75 - 80.
- [10] Li F L, Bao W K, Wu N. Morphological, anatomical and physiological responses of *Campylotropis polyantha* (Franch.) Schindl. seedlings to progressive water stress [J]. Scientia Horticulturae, 2011, 127(3): 436 - 443.
- [11] 刘晓东, 李洋洋, 何森. PEG模拟干旱胁迫对玉带草生理特性的影响[J]. 草业科学, 2012, 29(5): 687 - 693.
- [12] 葛佳. 大叶醉鱼草(*Buddleja davidii*)种质资源评价与园林应用前景研究[D]. 昆明: 中科院昆明植物研究所, 2013: 6 - 10.
- [13] Zahra S V. The salicylic acid effect on the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) sugar, protein and proline contents under salinity stress (NaCl) [J]. Journal of Biophysics and Structural Biology, 2011, 2(3): 35 - 41.
- [14] Zhang X, Ervin E H, Liu Y, et al. Differential responses of antioxidants, abscisic acid, and auxin to deficit irrigation in two perennial ryegrass cultivars contrasting in drought tolerance [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2015, 140(6): 562 - 572.
- [15] Zhang L X, Lai J H, Liang Z S, et al. Interactive effects of sudden and gradual drought stress and foliar - applied glycinebetaine on growth, water relations, osmolyte accumulation and antioxidant defence system in two maize cultivars differing in drought tolerance [J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2015, 200(6): 425 - 433.
- [16] Matías L, González - Díaz P, Jump A S. Larger investment in roots in southern range - edge populations of Scots pine is associated with increased growth and seedling resistance to extreme drought in response to simulated climate change [J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 105: 32 - 38.
- [17] 刘佳月, 杜建材, 王照兰, 等. 紫花苜蓿和黄花苜蓿种子萌发期对PEG模拟干旱胁迫的响应[J]. 中国草地学报, 2018(3): 27 - 34, 61.
- [18] Bu Y, Guo P, Ji Y, et al. Effects of *Epichloë sinica* on *Roegneria kamoji* seedling physiology under PEG - 6000 simulated drought stress [J]. Symbiosis, 2019, 77(2): 123 - 132.
- [19] 贾根良, 代惠萍, 冯佰利, 等. PEG模拟干旱胁迫对糜子幼苗生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(10): 2073 - 2079.
- [20] 冯慧芳, 薛立, 任向荣, 等. 4种阔叶幼苗对PEG模拟干旱的生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 371 - 382.
- [21] Ammar M H, Anwar F, El - Hartly E H, et al. Physiological and yield responses of faba bean (*Vicia faba* L.) to drought stress in managed and open field environments [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2015, 201(4): 280 - 287.
- [22] 任安芝, 高玉葆, 刘爽. 青菜幼苗体内几种保护酶的活性对Pb、Cd、Cr胁迫的反应研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 510 - 512.
- [23] 安玉艳, 梁宗锁, 郝文芳. 杠柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 716 - 725.
- [24] 彭亮, 杨冰月, 张岗, 等. 干旱胁迫对远志种子萌发及幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(4): 159 - 167.
- [25] 范苏鲁, 苑兆和, 冯立娟, 等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 651 - 657.