

DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201711075](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201711075)

PEG 模拟干旱胁迫对冬樱花幼苗叶片 生理特性的影响*

张誉稳[#], 连星然[#], 赵 雁^{**}

(云南农业大学 园林园艺学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】探明冬樱花在干旱胁迫下的适应性。【方法】通过 5%、10% 和 20% 的 PEG-8000 模拟干旱胁迫, 每隔 2 d 对冬樱花幼苗叶片生理指标进行测定。【结果】随 PEG 质量分数的增加和胁迫时间的延长, 叶片电解质外渗率持续上升, 重度干旱胁迫 (20%) 的上升趋势最明显, 第 8 天时比第 0 天上升了 189.21%, 差异显著 ($P<0.05$); 丙二醛含量总体上升, 轻度干旱胁迫 (5%) 上升趋势较缓慢, 中度干旱胁迫 (10%) 和重度干旱胁迫 (20%) 上升明显, 第 8 天时分别比第 0 天上升了 25.59%、55.78% 和 145.25%; 可溶性糖含量出现不同程度的上升, 轻度干旱胁迫的上升趋势最慢, 重度干旱胁迫的上升趋势最明显, 第 8 天时分别比第 0 天上升 31.26% 和 87.78%; 叶片相对含水量在胁迫过程中不断下降, 重度干旱胁迫时下降最明显, 第 8 天时比第 0 天下降了 41.62%。相关性分析表明: 电解质外渗率、丙二醛含量和可溶性糖含量之间呈极显著正相关, 叶片相对含水量与电解质外渗率、丙二醛、可溶性糖均呈极显著负相关。【结论】冬樱花叶片的生理变化说明其幼苗抗旱性较差。

关键词: 冬樱花; 幼苗; PEG-8000; 干旱胁迫; 叶片; 生理特性

中图分类号: S 685.990.34

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2019) 01-0097-06

Effect of Simulated Drought Stress on the Physiological Characteristics of *Cerasus cerasoides* Leaves

ZHANG Yuwen, LIAN Xingran, ZHAO Yan

(College of Horticulture and Landscape, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] In order to study the adaptability of *Cerasus cerasoides* under drought stress. [Method] Through simulation drought stress by different polyethylene glycol (PEG-8000) treatments (5%, 10% and 20%), the physiological changes of leaves every 2 days were tested. [Result] The relative conductivity in leaves continued to rise with the increase of PEG content and the prolongation of stress time. The relative conductivity in leaves increased significantly in the severe drought stress (20%) compared with the other two treatments, with a promotion of 189.21% after 8 days ($P<0.05$). The content of malondialdehyde (MDA) also showed an upward trend in all treatments. The change of MDA in mild drought stress (5%) treatment was relatively slow with an increase of 25.59%, while those in moderate drought stress (10%) and severe drought stress treatments (20%) increased more significantly by 55.78% and 145.25% respectively after 8 days. The content of soluble

收稿日期: 2017-11-29

修回日期: 2018-11-04

网络出版时间: 2019-01-12

*基金项目: 云南农业大学博士科研启动费 (A2002379)。

作者简介: [#]对本文贡献等同, 为并列第一作者。张誉稳 (1994—), 女, 云南昆明人, 在读硕士研究生, 主要从事园林植物资源利用与创新的研究。E-mail: 775197562@qq.com; 连星然 (1995—), 男, 云南昆明人, 本科, 主要从事园林植物资源利用研究。E-mail: 457407820@qq.com

^{**}通信作者 Corresponding author: 赵雁 (1974—), 女, 云南永德人, 博士, 副教授, 主要从事园林植物资源利用与创新的研究。E-mail: 744234036@qq.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201711075](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201711075)

sugar increased under drought stress, and the increase in mild drought stress was the slowest, rising by 31.26% after 8 days, while that in severe drought stress increased by 87.78% after 8 days. The relative water content (RWC) showed a decrease trend, and in severe drought stress the leaf water content decreased by 41.62% after 8 days, which was much more significant than the other two treatments. Correlation analysis showed that the relative conductivity, MDA content and soluble sugar content were positively correlated, and leaf water content was negatively correlated with conductivity, MDA and soluble sugar. [**Conclusion**] The physiological changes in the leaves of *C. cerassoides* indicate that the drought resistance is poor in seedlings.

Keywords: *Cerasus cerassoides* (D. Don) Sok.; seeding; PEG-8000; drought stress; leaf; physiological characteristics

干旱是影响植物正常生长发育的主要非生物因子之一^[1], 位列气候灾害之首^[2], 严重阻碍了林业生产的发展和生态环境的改善^[3]。中国多个城市普遍存在缺水的问题^[4], 严重程度逐年加剧^[5], 随着城市化建设步伐的加快, 园林绿化用水量也逐年增加^[6], 应用耐旱树种可以节约水资源、降低管养成本, 是园林绿化的理想选择^[7]。

冬樱花 [*Cerasus cerassoides* (D. Don) Kon.] 是蔷薇科 (Rosaceae) 樱属 (*Cerasus*) 唯一在冬季开花的植物^[8-9], 是对现代樱花品种进行花期改良的珍贵种质资源^[9]。同时冬樱花具有一定的抗污染能力^[10], 是一种极具开发潜力的优良园林树种, 对丰富城市园林景观具有重要的意义。目前, 冬樱花的研究主要集中在不同繁殖方式的成活率^[11-14], 以及冬樱花在园林中的运用^[15-16]、地理分布^[8, 17]和开花生物学特性^[18]等方面, 在其抗逆性评价如耐旱性的研究则鲜见报道。本研究拟采用聚乙二醇 (PEG-8000) 溶液模拟干旱胁迫, 探讨不同干旱程度对冬樱花幼苗叶片的生理影响, 研究结果将对冬樱花资源抗旱性评价提供依据, 为其进一步园林应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

2015 年 4 月在云南农业大学校园内采集成熟的冬樱花果, 去掉果肉, 清洗晾干, 于 4 ℃ 下保存, 待用。

1.2 冬樱花生长条件和胁迫处理

2016 年 5 月初将种子播种于试验大棚中, 半年后, 冬樱花幼苗株高约 50 cm、叶片 16~20 片时选取长势一致的健康植株进行测试。试验期间

棚内白天平均温度为 25 ℃, 相对湿度为 65%~75%, 平均日照时间为 12 h。本研究采用聚乙二醇 (PEG-8000) 溶液进行干旱胁迫处理, 参照孙存华等^[19]的方法共设置 4 个处理, 即 0% (CK)、5% (轻度)、10% (中度)、20% (重度)。所用溶液均为 Hoagland 营养液混合液。在浇灌混合液后的第 0、2、4、6、8 天分别取每个分枝顶端第 3 片平展的叶片进行试验。

1.3 测定方法

可溶性糖含量、丙二醛含量和电解质外渗率的测定参照李合生^[20]的方法; 相对含水量的测定参照赫再彬等^[21]的方法。

1.4 数据分析处理

用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件进行数据处理和统计, 数据以平均值±标准差表示; 采用单因素方差分析和 Duncan 多重比较来处理各组数据的差异; 用 Pearson 相关系数评价不同指标间的相关关系。每个处理重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对冬樱花幼苗叶片电解质外渗率的影响

由表 1 可知: 随着干旱时间的增加, 不同程度的干旱胁迫下的冬樱花幼苗叶片电解质外渗率均呈上升的趋势。干旱胁迫第 2 天时, 轻度、中度、重度干旱胁迫处理的电解质外渗率出现明显上升, 分别比第 0 天上升了 22.60%、19.55% 和 39.38%, 差异显著 ($P<0.05$)。整个干旱胁迫过程中, 重度干旱时电解质外渗率上升趋势最明显, 胁迫第 2 天与对照差异显著 ($P<0.05$), 第 8 天时比第 0 天上升了 189.21%, 差异显著 ($P<0.05$)。第 8

天时, 电解质外渗率从大到小为: 重度干旱、中度干旱、轻度干旱、对照。

2.2 干旱胁迫对冬樱花幼苗叶片丙二醛 (MDA) 含量的影响

由表 2 可知: 随着干旱时间的增加, 冬樱花幼苗叶片的 MDA 含量总体出现上升的趋势。轻

度干旱胁迫的 MDA 变化趋势与对照较为接近, 在胁迫过程中均为缓慢上升, 胁迫第 8 天时, 对照和轻度干旱分别比第 0 天上升 25.59% 和 55.78%, 差异显著 ($P<0.05$)。重度干旱胁迫时的 MDA 含量出现显著上升, 第 2 天和第 8 天时分别比第 0 天上升了 53.93% 和 145.25%, 差异显著 ($P<0.05$)。

表 1 干旱胁迫下冬樱花叶片电解质外渗率的比较
Tab. 1 Comparison of electrolyte leakage rate of *C. cerassoides* leaves under drought stress %

w (PEG-8000)/%	胁迫时间 stress time				
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
0	0.251±0.012 Aa	0.262±0.076 Aa	0.273±0.010 Aa	0.295±0.038 Aa	0.300±0.011 Aa
5	0.243±0.032 Aa	0.297±0.003 Ab	0.319±0.002 Bbc	0.343±0.008 Bcd	0.361±0.010 Bd
10	0.245±0.032 Aa	0.293±0.026 Ab	0.336±0.006 Cc	0.401±0.021 Cd	0.453±0.003 Ce
20	0.253±0.011 Aa	0.353±0.013 Bb	0.412±0.003 Dc	0.531±0.006 Dd	0.732±0.005 De

注: 同列中不同大写字母表示同一测定时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$); 同行中不同小写字母表示同一处理下不同测定时间差异显著 ($P<0.05$); 下同。
Note: Different capitals in the same columns indicate significant difference of different treatments in the same measurement time, and there is a significant difference among different treatments when $P<0.05$; different lowercase in the same lines indicate significant difference in the time of measurement under the same treatment ($P<0.05$); the same as below.

表 2 干旱胁迫下冬樱花叶片丙二醛含量的比较
Tab. 2 Comparison of malondialdehyde content in leaves of *C. cerassoides* under drought stress $\mu\text{mol/g}$

w (PEG-8000)/%	胁迫时间 stress time				
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
0	4.751±0.643 Aa	5.126±0.038 Aab	5.532±0.048 Abc	5.877±0.057 Acd	6.157±0.130 Ad
5	5.041±0.035 Aa	5.453±0.112 Bb	6.174±0.384 Bc	6.975±0.050 Bd	7.853±0.131 Be
10	4.805±0.097 Aa	6.143±0.057 Cb	7.374±0.032 Cc	8.132±0.039 Cd	9.561±0.095 Ce
20	4.895±0.101 Aa	7.535±0.034 Db	9.327±0.097 Dc	10.763±0.933 Dd	12.005±0.520 De

2.3 干旱胁迫对冬樱花幼苗叶片可溶性糖含量的影响

由表 3 可知: 随着干旱时间的增加, 不同程度的干旱胁迫下冬樱花幼苗叶片的可溶性糖含量均上升。对照在胁迫第 4 天时出现 6.00% 的下降, 随后上升, 其余 3 个处理均在胁迫过程中呈

现不同程度的持续上升。其中, 轻度干旱胁迫时, 可溶性糖含量变化趋势较为平缓, 第 8 天时比第 0 天上升 31.26%, 差异显著 ($P<0.05$)。中度干旱胁迫和重度干旱胁迫出现明显的上升趋势, 第 8 天时分别比第 0 天上升了 65.92% 和 87.78%, 差异显著 ($P<0.05$)。

表 3 干旱胁迫下冬樱花叶片可溶性糖含量的比较
Tab. 3 Comparison of soluble sugar content in leaves of *C. cerassoides* under drought stress mg/g

w (PEG-8000)/%	胁迫时间 stress time				
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
0	2.398±0.018 Aa	2.416±0.008 Aa	2.271±0.036 Aa	2.553±0.024 Ab	2.563±0.030 Ab
5	2.403±0.010 Aa	2.563±0.018 Bb	2.669±0.030 Bc	2.874±0.029 Bd	3.154±0.033 Be
10	2.418±0.007 Aa	2.699±0.087 Cb	3.112±0.006 Cc	3.546±0.036 Cd	4.012±0.017 Ce
20	2.405±0.032 Aa	2.796±0.061 Cb	3.401±0.061 Dc	3.992±0.004 Dd	4.516±0.055 De

2.4 干旱胁迫对冬樱花幼苗叶片相对含水量的影响

由表 4 可知: 随着干旱胁迫时间的增加, 冬

樱花叶片相对含水量总体呈现下降的趋势。对照的相对含水量变化趋势较为平缓, 且在第 6 天时比第 4 天出现 1.92% 的上升, 随后下降, 第 8 天

时比第 0 天下降 5.22%。轻度、中度、重度干旱胁迫在整个胁迫过程中表现为连续下降。其中，轻度干旱胁迫的相对含水量下降量与对照较接近，重度干旱的下降趋势最明显。第 8 天时，轻度、中度和重度干旱胁迫分别比第 0 天下降了 10.58%、30.76% 和 41.62%，差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 干旱胁迫下冬樱花叶片相对含水量的比较
Tab. 4 Comparison of relative moisture content of *C. cerassoides* leaves under drought stress %

w (PEG-8000)/%	胁迫时间 stress time				
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
0	90.35±0.08 Aa	88.85±0.03 Ab	86.25±0.02 Ac	87.91±0.02 Ad	85.46±0.03 Ae
5	90.33±0.17 Aa	87.05±0.14 Bb	84.33±0.01 Bc	81.59±0.02 Bd	80.77±0.03 Be
10	90.39±0.15 Aa	85.44±0.04 Cb	81.25±0.02 Cc	74.33±0.03 Cd	62.59±0.02 Ce
20	90.36±0.01 Aa	82.79±0.01 Db	78.19±0.02 Dc	70.32±0.02 Dd	52.75±0.02 De

2.5 干旱胁迫下冬樱花叶片生理特性的相关性分析

由表 5 可知：干旱胁迫下冬樱花幼苗叶片的 MDA 含量与电解质外渗率呈正相关 ($r=0.933$, $P<0.05$)，相关性达到极显著水平，表明在干旱胁迫下，MDA 含量越高，电解质外渗率越高；可溶性糖含量与电解质外渗率呈正相关 ($r=0.933$, $P<0.05$)，与 MDA 含量呈正相关 ($r=0.964$, $P<0.05$)，

相关性均达到极显著水平，表明在干旱胁迫下，可溶性糖含量越高，电解质外渗率和 MDA 含量越高；相对含水量与电解质外渗率呈负相关 ($r=-0.944$, $P<0.05$)，与 MDA 呈负相关 ($r=-0.933$, $P<0.05$)，与可溶性糖含量呈负相关 ($r=-0.970$, $P<0.05$)，相关性均达到极显著水平，表明干旱胁迫下，相对含水量越低，电解质外渗率、MDA、可溶性糖含量越高。

表 5 干旱胁迫下冬樱花叶片电解质外渗率、MDA、可溶性糖含量和相对含水量的相关性分析
Tab. 5 Correlation analysis of electrolyte leakage rate, malondialdehyde content, soluble sugar content and relative water content of *C. cerassoides* leaves under drought stress

相关系数 correlation coefficient	电解质外渗率 electrolyte leakage rate	丙二醛含量 malondialdehyde content	可溶性糖含量 soluble sugar content	叶片相对含水量 relative water content
电解质外渗率 electrolyte leakage rate	1.000			
丙二醛含量 malondialdehyde content	0.933**	1.000		
可溶性糖含量 soluble sugar content	0.933**	0.964**	1.000	
叶片相对含水量 relative water content	-0.944**	-0.933**	-0.970**	1.000

注：“**”表示在 0.01 水平显著相关。
Note: “**” means the correlation on 0.01 significance level.

3 讨论

干旱胁迫下，植物细胞膜受到损伤，导致其透性增大，并引起膜脂过氧化反应。研究表明：电解质外渗率增加越多，植物受到的伤害越大；丙二醛积累越多，干旱程度越大^[22-25]。冬樱花叶片中的电解质外渗率与 MDA 变化趋势一致，均随胁迫时间的增加而增大。不同 PEG 质量分数处理下，冬樱花电解质外渗率和 MDA 含量均有所增加，并且显著高于对照 ($P<0.05$)，PEG 质量分数越高，电解质外渗率和 MDA 含量越高，表明随着干旱程度的加深，细胞膜受到的伤害越大，

膜脂过氧化程度也越大。这与构树 (*Broussonetia papyrifera*)^[26]和北美红栎 (*Quercus rubra*)^[25]幼苗受到干旱胁迫时的变化趋势一致。另有研究表明：一年生福建山樱花 (*Cerasus campanulata*)^[27]和日本樱花 (*Cerasus yedoensis*)^[27]的电解质外渗率和 MDA 变化均随干旱胁迫时间的增加而增大；两年生欧李 (*Cerasus humilis*)^[28]的电解质外渗率和 MDA 在干旱胁迫过程中均随时间增加而呈现先升高后降低的趋势。张尧^[29]认为幼苗比成年植株更容易遭受水分胁迫，因此，冬樱花幼苗与成年植株之间抗旱机制是否有差异还有待研究。

渗透调节是植物适应干旱胁迫的重要生理机

制^[30]。干旱胁迫使植物体内的渗透调节物质可溶性糖大量积累, 从而提高对水分的吸水保水能力, 使植物适应干旱缺水的环境^[25]。本研究, 随着干旱时间的延长, 冬樱花叶片中的可溶性糖含量显著增加, 表明干旱胁迫诱导冬樱花叶片中可溶性糖含量的积累来提高渗透保护能力, 以适应外界环境变化^[31], 其幼苗具有一定的抗旱能力。这与同科的苹果 (*Malus pumila*)^[31]、杏 (*Armeniaca vulgaris*)^[32-33]、李 (*Prunus saeicina*)^[33]和桃 (*Prunus persica*)^[33]受到干旱胁迫时表现一致。

干旱胁迫还将使植物体内组织含水量产生变化, 由叶片相对含水量作为重要指标进行衡量。叶片相对含水量越大, 下降速率越小, 则植物抗旱性越强^[34-35]。大量研究表明: 不同植物的叶片含水量在受到干旱胁迫时总体呈现下降的趋势^[36]。随着干旱时间延长及 PEG 质量分数的升高, 冬樱花幼苗叶片出现叶片萎蔫、枯黄的现象, 且叶片含水量显著下降, 在重度干旱胁迫时下降速率最快。这与紫叶李 (*Prunus cerasifera*)^[37]、裸果木 (*Gymnocarpus przewalskii*)^[38]、小叶杨 (*Populus simonii*)^[39]受到干旱胁迫时表现一致。叶片含水量的显著下降表明干旱胁迫对冬樱花造成了明显伤害, 其幼苗抗旱性较差。

4 讨论

冬樱花是樱属唯一在冬季开花的植物, 极具开发潜力, 对丰富城市园林景观具有重要的意义, 本文首次对冬樱花幼苗耐旱性进行探索。PEG 模拟干旱胁迫处理后, 随着 PEG 质量分数的增加和干旱时间的延长, 冬樱花幼苗叶片的电解质外渗率、MDA 和可溶性糖含量均上升, 而相对含水量则下降, 表明冬樱花受到干旱胁迫时将会通过调节自身膜透性及渗透调节物质来适应干旱, 具有一定的抗旱能力, 但抗旱性较差。建议在冬樱花的人工栽培中, 应计划好播种期, 幼苗生长尽量避开少雨干旱的季节; 另外对园林中应用的冬樱花幼苗应及时合理浇灌。

[参考文献]

- [1] 荣秀连, 王波, 刘刊, 等. PEG-6000 模拟干旱胁迫对冷季型草坪种子萌发特性影响[J]. 北方园艺, 2010(8): 80.
- [2] 尹晗, 李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述[J]. 干旱气象, 2013(1): 182.
- [3] 鲁松. 干旱胁迫对植物生长及其生理的影响[J]. 江苏林业科技, 2012(4): 51. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7380.2012.04.015.
- [4] 王宏哲. 我国城市缺水的原因与对策[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2001(2): 33. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0185.2001.02.009.
- [5] RYAN M G. Tree responses to drought[J]. Tree Physiology, 2011, 31(3): 237. DOI: 10.1093/treephys/tpr022.
- [6] 何磊. 干旱区园林绿化设计中的节水措施[J]. 绿化与生活, 2013(12): 23.
- [7] 洪震, 练发良, 刘术新, 等. 3 种乡土林地植物对干旱胁迫的生理响应[J]. 浙江农林大学学报, 2016(4): 636.
- [8] 段晓梅, 王自辉, 樊国盛. 云南冬樱花的群落特征及地理分布[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2004, 28(6): 83. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2004.06.022.
- [9] 关文灵. 冬日里的浪漫花木——冬樱花[J]. 云南林业, 2006(6): 27.
- [10] 杨明艳, 李兴明, 杨发军, 等. 冬樱花嫁接繁殖试验[J]. 农业研究与应用, 2012(2): 17. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0764.2012.02.006.
- [11] 杨文良, 关文灵, 毛昆明, 等. 冬樱花不同时期播种试验[J]. 中国园艺文摘, 2010(12): 7. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0873.2010.12.003.
- [12] 和风美, 朱永平, 杨晓红, 等. 冬樱花愈伤组织诱导和抑制褐化初探[J]. 中国农学通报, 2010(12): 130.
- [13] 杨明艳, 李兴明, 杨发军, 等. 冬樱花扦插生根处理研究[J]. 热带农业科学, 2011(12): 20. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2196.2011.12.006.
- [14] 段晓梅. 冬樱花扦插繁殖研究[J]. 西南林学院学报, 2003, 23(1): 43. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1914.2003.01.012.
- [15] 谢凤云, 戴明仲, 张飞, 等. 冬樱花的引种栽培及其在园林中的应用[J]. 现代农业科技, 2017(3): 140. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2017.03.095.
- [16] 赵大克, 郑丽. 云南冬樱花及其在园林中的应用[J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2009, 24(5): 778. DOI: 10.3969/j.issn.1004-390X.2009.05.027.
- [17] 陈剑英, 董琼, 杨超本. 冬樱花生态地理学研究[J]. 西南林学院学报, 1999, 19(1): 1. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1914.1999.01.001.
- [18] 李丽, 范眸天, 杨德, 等. 昆明地区冬樱花开花生物学特性的初步研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(3): 448. DOI: 10.3969/j.issn.1004-390X.2005.03.034.
- [19] 孙存华, 李扬, 贺鸿雁, 等. PEG6000 渗透胁迫对藜幼苗叶片渗透调节物质的影响 (英文)[J]. Agricultural Science & Technology, 2007(Z1): 20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2007.z1.006.
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [21] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [22] 孙程旭, 刘立云, 李荣生, 等. PEG 处理对蛇皮果幼苗的生理响应及酶变化研究[J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2011, 26(5): 673. DOI: 10.3969/j.issn.1004-390X(n).2011.05.017.

- [23] 吴庆贵, 杨敬天, 邹利娟, 等. 珙桐幼苗生理生态特性对土壤干旱胁迫的响应[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(2): 119. DOI: [10.3969/j.issn.1002-1302.2014.02.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-1302.2014.02.040).
- [24] 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.
- [25] 苏寒之, 金建邦, 祝遵凌. 干旱胁迫对北美红栎幼苗生理特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014(8): 34. DOI: [10.3969/j.issn.1000-5382.2014.08.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5382.2014.08.008).
- [26] 丁菲, 杨帆, 杜天真. 干旱胁迫对构树幼苗抗氧化酶活性变化的影响[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(4): 680. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2286.2008.04.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2286.2008.04.022).
- [27] 李书平. 福建山樱花和日本樱花对干旱胁迫的生理响应研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [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. DOI: [10.3321/j.issn:1001-7488.2009.06.002](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-7488.2009.06.002).
- [29] 张尧. 梭梭幼苗干旱死亡过程中的水力结构变化与碳分配动态[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [30] 郭春芳, 孙云. 干旱胁迫下植物的渗透调节及脯氨酸代谢研究进展[J]. 福建教育学院学报, 2015, 16(1): 114. DOI: [10.3969/j.issn.1673-9884.2015.01.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9884.2015.01.032).
- [31] 刘忠霞. 干旱胁迫下苹果树苗光合、耗水特性及抗旱性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011.
- [32] 蒲光兰, 袁大刚, 胡学华, 等. 土壤干旱胁迫对 3 个杏树品种生理生化特性的影响[J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(4): 375. DOI: [10.3969/j.issn.2095-0756.2005.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0756.2005.04.004).
- [33] 胡学华, 李、桃、杏和梨四种经济树木对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2005.
- [34] 赵福庚, 何龙飞, 罗庆云. 植物逆境生理生态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [35] 唐承财, 钟全林, 王健. 林木抗旱生理研究进展[J]. 世界林业研究, 2008(1): 20.
- [36] 段胜芝, 马士祝, 牟凤娟. 裸子植物水分特征与抗旱机理研究进展[J]. 陕西林业科技, 2016(3): 83. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2117.2016.03.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2117.2016.03.022).
- [37] 李云飞. 土壤干旱胁迫对李属彩叶植物抗旱生理及叶色的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2008.
- [38] 孙宗国. PEG-6000 模拟干旱胁迫下裸果木幼苗的生理响应[J]. 甘肃农业科技, 2014(12): 41. DOI: [10.3969/j.issn.1001-1463.2014.12.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1463.2014.12.015).
- [39] 仇云峰, 李亚光, 李青山. 干旱胁迫对小叶杨幼苗生长的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 42.

责任编辑: 何承刚