热带亚热带植物学报
JOURNAL OF TROPICAL AND SUBTROPICAL BOTANY

深山含笑和杜英幼苗对干旱-复水的生理生态响应

方尧, 桑栋鑫, 王德福, 陆彤, 欧晓雯, 黄国敏, 段洪浪

引用本文:
方尧, 桑栋鑫, 王德福, 等. 深山含笑和杜英幼苗对干旱-复水的生理生态响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(6): 682–692.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11926/jtsb.4943

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

5种常见水土保持树种的气体交换特性研究

Characteristics of Gas Exchange of Five Common Water and Soil Conservation Tree Species

热带亚热带植物学报. 2017, 25(6): 531–538 https://doi.org/10.11926/jtsb.3747

PEG-6000模拟干旱胁迫对黄秋葵种子萌发和幼苗生理特性的影响

Effect of Drought Stress with PEG-6000 on Seed Germination and Physiological Properties in Abelmoschus esculentus

热带亚热带植物学报. 2018, 26(6): 611–616 https://doi.org/10.11926/jtsb.3907

榄仁树的生理和生物学特性

Physiological and Biological Characteristics of Terminalia catappa

热带亚热带植物学报. 2018, 26(1): 40–46 https://doi.org/10.11926/jtsb.3801

遮荫处理对秋枫幼苗生理生态特性的影响

Effects of Shading on Physio-ecology Characteristics of Bischofia javanica Seedlings

热带亚热带植物学报. 2017, 25(4): 323–330 https://doi.org/10.11926/jtsb.3705

五唇兰对PEG模拟的干旱胁迫响应研究

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 53–61 https://doi.org/10.11926/jtsb.4062

向下翻页，浏览PDF全文

热带亚热带植物学报 2025, 33(6): 682 ~ 692
Journal of Tropical and Subtropical Botany

深山含笑和杜英幼苗对干旱-复水的生理生态响应

方尧[1a,b], 桑栋鑫[2], 王德福[3], 陆彤[1b], 欧晓雯[1b], 黄国敏[4], 段洪浪[1a,b*]

(1. 贵州大学，a. 贵州省森林资源与环境研究中心，贵州省高原山地林木培育全省重点实验室; b. 林学院，贵阳 550025；2. 兰考黄河河务局，河南 开封 475300；3. 四川文理学院，四川革命老区发展研究中心，四川 达州 635000；4. 江西水利电力大学水土保持学院，南昌 330099)

摘要：为了解不同树种对干旱胁迫的生理响应机制和旱后恢复能力，对具有园林和生态价值的深山含笑(*Michlia maudiae*)和杜英(*Elaeocarpus decipiens*)幼苗采用盆栽方法进行干旱复水实验，测定 2 树种在干旱和复水过程中的气体交换参数、叶片水分状况、超氧化物歧化酶(SOD)活性和渗透调节物质等生理指标。结果表明，在干旱胁迫下，杜英幼苗的叶片水势和光合参数较深山含笑下降的更快，仅 6 d 就比对照下降了 99.1%。复水前深山含笑和杜英幼苗叶片中 SOD 活性分别为对照的 36.1%和 33.4%；2 树种幼苗叶片中脯氨酸含量分别是对照的 2.1 和 5.5 倍；但杜英幼苗可溶性糖含量与对照无显著差异。复水 7 d 后，深山含笑幼苗的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率仍未恢复至对照水平，而杜英幼苗已完全恢复。2 树种复水后的 SOD 活性和渗透调节物质都逐渐恢复至对照组水平。因此，深山含笑和杜英幼苗对干旱胁迫的响应及旱后恢复能力存在差异，其中杜英对干旱更为敏感但复水后的恢复能力强于深山含笑。这从植物生理学的角度阐明了深山含笑和杜英对干旱-复水的生理响应机制，可为苗木栽培管理、园林绿化和树种筛选等实践提供参考依据。

关键词：深山含笑；杜英；干旱；复水；生理响应

doi: 10.11926/jtsb.4943 CSTR:32235.14.jtsb.4943

Eco-physiological Responses to Drought and Rewatering of *Michlia maudiae* and *Elaeocarpus decipiens* Seedlings

FANG Yao[1a,b], SANG Dongxing[2], WANG Defu[3], LU Tong[1b], OU Xiaowen[1b], HUANG Guomin[4], DUAN Honglang[1a,b*]

(1a. *Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou*, *Key Laboratory of Forest Cultivation in Plateau Mountain of Guizhou Province*; 1b. *College of Forestry*, *Guizhou University*, Guiyang 550025, China; 2. *Lankao Yellow River Bureau*, Kaifeng 475300, Henan, China; 3. *Development Research Center of Sichuan Old Revolutionary Base Area*, *Sichuan University of Arts and Sciences*, Dazhou 635000, Sichuan, China; 4. *School of Soil and Water Conservation*, *Jiangxi University of Water Resources and Electric Power*, Nanchang 330099, China)

Abstract: To understand the physiological response mechanisms and post-drought recovery capabilities of different tree species to drought stress, a pot experiment was conducted on the seedlings of *Michelia maudiae* and *Elaeocarpus decipiens*, which have both ornamental and ecological values. Gas exchange parameters, leaf water status, superoxide dismutase (SOD) activity, and osmotic adjustment substances were measured during the drought and rewatering processes. The results showed that under drought stress, the leaf water potential and photosynthetic parameters of *E. decipiens* seedlings decreased more rapidly than those of *M. maudiae*, with a 99.1% decrease compared to the control after only 6 days. Before rewatering, the SOD activity in the leaves of *M. maudiae* and *E. decipiens* seedlings was 36.1% and 33.4% of the control, respectively; the proline content in the leaves of the two tree species was 2.1 and 5.5 times that of the control, respectively; however, the soluble sugar

收稿日期: 2024-07-18 **接受日期:** 2024-08-29
基金项目: 贵州大学自然科学人才基金(202132)资助
This work was supported by the Project for Natural Science Talent in Guizhou University (Grant No. 202132).
作者简介: 方尧(2001 年生)，男，硕士研究生，研究方向为森林培育。E-mail: yaofang20001210@163.com
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hlduan@gzu.edu.cn

content of *E. decipiens* seedlings was not significantly different from that of the control. Seven days after rewatering, the net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate of *M. maudiae* seedlings did not yet recover to the control level, while those of *E. decipiens* seedlings fully recovered. The SOD activity and osmotic adjustment substances of the two tree species gradually returned to the control level after rewatering. Therefore, there are differences in the response to drought stress and post-drought recovery capabilities between *M. maudiae* and *E. decipiens* seedlings. *Elaeocarpus decipiens* is more sensitive to drought but has a stronger recovery ability after rewatering than *M. maudiae*. This study clarifies the physiological response mechanisms of *M. maudiae* and *E. decipiens* to drought and rewatering from the perspective of plant physiology, providing a reference basis for practical applications such as seedling cultivation management, landscaping, and tree species selection.

Key words: *Michlia maudiae*; *Elaeocarpus decipiens*; Drought; Rewater; Physiological response

近年来，随着全球气候变化的加剧与降水格局的改变，干旱发生的频率和持续时间不断增加；包括我国降雨充沛的南方也时常受到季节性干旱的影响，因此，越来越多区域遭受着干旱带来的不良影响[1]。干旱作为对植物影响最大的非生物胁迫之一，严重影响着植物的生长和代谢[2]。

轻度干旱胁迫下植物的叶片相对含水量和水势下降、气孔关闭及光合作用下降。随着干旱胁迫的加剧，植物的光合器官和导水功能受损，影响碳吸收和水分传导，最终导致植物死亡[3]。干旱胁迫也会导致细胞内活性氧的生成，从而使活性氧的产生与清除之间的平衡被打破，导致大量活性氧积累，造成膜脂过氧化，细胞膜结构被破坏[4]。为了应对干旱对植物造成的伤害，植物一方面通过积累脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质来降低细胞水势，提高植物的吸水能力，维持细胞膨压稳定，保证植物生理代谢功能的正常进行[5–6]；另一方面通过提升超氧化物歧化酶活性来缓解膜脂过氧化带来的伤害，保护植物细胞膜。研究表明大花旋蒴苣苔(*Boea clarkeana*)、狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)、黄莲花(*Lysimachia davurica*)幼苗在干旱期间提高脯氨酸、可溶性糖含量和超氧化物歧化酶活性来应对干旱[7–9]。

实验证明，当植物经历过一段时间的干旱胁迫，及时复水能对植物起到一定程度修复作用，弥补干旱对植物造成的损伤[10]，但恢复程度受到植物种类、干旱胁迫时间和胁迫程度的影响[11]。刘溢健等[12]对马铃薯(*Solanum tuberosum*)的研究表明，轻度和中度干旱胁迫下，复水后马铃薯的净光合速率、生物量、水分利用效率和产量均出现补偿效应。张卫华等[13]对牛鞭草(*Hemarthria compressa*)的研究表明，重度干旱胁迫下牛鞭草的苗高、产量等在复水较长时间内仍然显著低于对照组。程平等[14]对天山北坡前山带的 12 种植物进行干旱-复水实验，结果表明不同植物对干旱胁迫的适应对策不同，并表明净光合速率、叶绿素含量、电子传递效率和丙二醛含量可作为评价各植物适应干旱胁迫的重要指标。受到自然降水因素的影响，植物在生长过程中往往处在干湿交替的环境中[15]，植物在干旱环境中能否存活不仅取决于自身抗旱能力，还受干旱复水后恢复能力的影响[16]。

目前，深山含笑和杜英被广泛应用于城市的行道绿化。杜英(*Elaeocarpus decipiens*)为杜英科(Elaeocarpaceae)杜英属常绿乔木，速生树种，材质好，适应性强，病虫害少，产于中国南方，其根系发达，萌芽力强，耐阴、耐寒[17]。深山含笑(*Michlia maudiae*)为木兰科(Magnoliaceae)含笑属的常绿阔叶树种，具有观赏性好，适应性强病虫害少，耐寒耐旱，寿命长，常规观赏期长，特色观赏性明显等优点，是十分优秀的观赏植物资源[18]。目前关于深山含笑和杜英研究主要集中在空气净化能力、观赏性和盐胁迫等方面[19–21]，而对干旱胁迫的响应研究较少，特别是有关旱后恢复能力的研究尚未见报道。气候变化背景下，城市环境极易出现高温热浪和干旱等环境胁迫条件[22]。选择具有不同生长和生态特性的深山含笑和杜英幼苗进行实验，可以更全面地评价二者对干旱的抗性及旱后恢复能力，可为气候变化背景下园林绿化抗旱树种选择提供重要的科学指导。为此，本实验选择 1 a 生深山含笑和杜英幼苗为材料，采用盆栽方法进行干旱复水实验，测定 2 种植物在复水前后的光合参数、水分状态、SOD 活性和渗透调节物质等生理指标，探讨二

者对干旱的响应以及干旱复水后恢复能力的差异，有助于阐释不同抗旱性树木对干旱-复水的响应策略及机制。

1 材料和方法

1.1 试验材料

于2018年3月—9月在南昌市(116°01′50.16″ E, 28°41′17.21″ N)开展试验。该地区属亚热带季风气候，年降雨量 1 600~1 700 mm。2018 年 3 月初，选取生长良好、长势一致的 1 a 生杜英(*Elaeocarpus decipiens*)[苗高(99.1±2.3) cm、地径(12.1±0.4) mm]和深山含笑(*Michlia maudiae*)[苗高(51.1±3.5) cm、地径(10.2±0.3) mm]幼苗进行盆栽试验，花盆体积约为10 L [18 cm (直径)×36 cm (高)]，每盆定植 1 株，所有土壤来自当地人工林地表层土壤，种植前将所有土壤风干混匀，然后装入盆中。所有盆栽均置于塑料遮雨棚内，在试验开始前对所有苗木进行正常灌溉，并定期对苗木进行统一施肥，使苗木进行正常生长。

1.2 试验设计

2018 年 8 月开始进行干旱处理，设置对照组和复水组 2 个处理。对照组在试验期间进行正常浇水，使土壤含水量维持在田间持水量。复水组在干旱处理期间，每隔 3 d 进行一次光合参数测定，直至光合速率下降至 0 左右。随后开始复水，使其土壤水分恢复至对照组水平。在复水前和复水后第 1、3、7 天(杜英还包括第 13 天)测定 2 个树种的生理生化指标。

1.3 指标测定

1.3.1 气体交换参数

使用Licor-6400便携式气体交换系统进行气体交换参数测定[23–24]，在晴天选择方向、大小和长势一致的叶片，试验期间将 PAR 设定为 1 500 μmol/(m^2·s)，CO_2浓度为 400 μmol/mol，流速 500 μmol/mol。干旱处理期间，每隔 3 d 进行 1 次光合参数测定，直至光合速率下降至 0 左右；复水期间，分别在第 1、3、7 天进行光合参数测定。测定时间为上午 9:00—11:00，每个处理重复 3 次，测定指标包括净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等气体交换参数。

1.3.2 叶片水势

叶片水势测量采用 PMS-Model 1505D 数显便携式植物水势压力室(PMS instruments, Corvalis, Oregon USA)[25–26]分别在每次测定光合参数当天的黎明前 1 h 和中午 12 点采集叶片装入保温箱中保存并带回实验室测定黎明前水势和正午水势，每个处理重复 3 次。

1.3.3 叶片相对含水量

测定方法参考《植物生理学实验指导》[22]。从分别在复水前和复水后的第 1、3、7 天，从深山含笑和杜英植株上采集待测叶片(杜英在复水后的第 13 天也进行了采集)，称鲜重(FW)，随后将叶片浸入蒸馏水中 2 h 后称饱和鲜重(TW)，紧接着将叶片置于 105 ℃烘箱中杀青 30 min，将温度调至 75 ℃烘至恒重，称干重(DW)，每个处理重复 3 次。由于对照组前后差异很小，测定时间点也十分密集，因此复水第 3 天未测定对照组的叶片相对含水量(LRWC)=(FW−DW)/(TW−DW)×100%。

1.3.4 生理生化指标

分别在复水前和复水后的第 1、3、7 天，从深山含笑和杜英植株上采集若干长势一致的新鲜叶片放入液氮中立即带回实验室，用于测定生理生化指标(杜英在复水后的第 13 天也进行了采集)。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法[22]，脯氨酸(Pro)含量采用酸性茚三酮法[27]。将剩下的叶片置于烘箱中 105 ℃杀青 30 min，再调至 60 ℃烘至恒重。之后粉碎过 0.42 mm 筛，称取 0.1 g 烘干样品测定可溶性糖含量，可溶性糖的测定采取蒽酮比色法[28]。每个处理重复 3 次。由于对照组前后差异很小，测定时间点也十分密集，因此复水第 3 天未测定对照组的生理生化指标。

1.4 数据的统计分析

数据分析采用单因素方差分析和Duncan多重比较，利用 SPSS19.0 进行分析。以 P<0.05 表示处理间差异显著。使用 R 软件(R 4.3.1)进行图形绘制，图表中数据均以平均值±标准误表示。

2 结果和分析

2.1 气体交换对干旱胁迫及复水的响应

由图 1 可见，干旱胁迫显著降低了深山含笑、杜英幼苗的净光合速率，在干旱胁迫 6 d 时，深山含笑、杜英幼苗的净光合速率较对照组分别降低了79.8%、99.1%。深山含笑在第 6 天后，随着干旱胁迫时间的延长，下降速率逐渐变缓，在干旱第 12 天，光合速率降至最低。杜英幼苗净光合速率下降速度更快，在第 6 天时接近 0。复水后深山含笑、

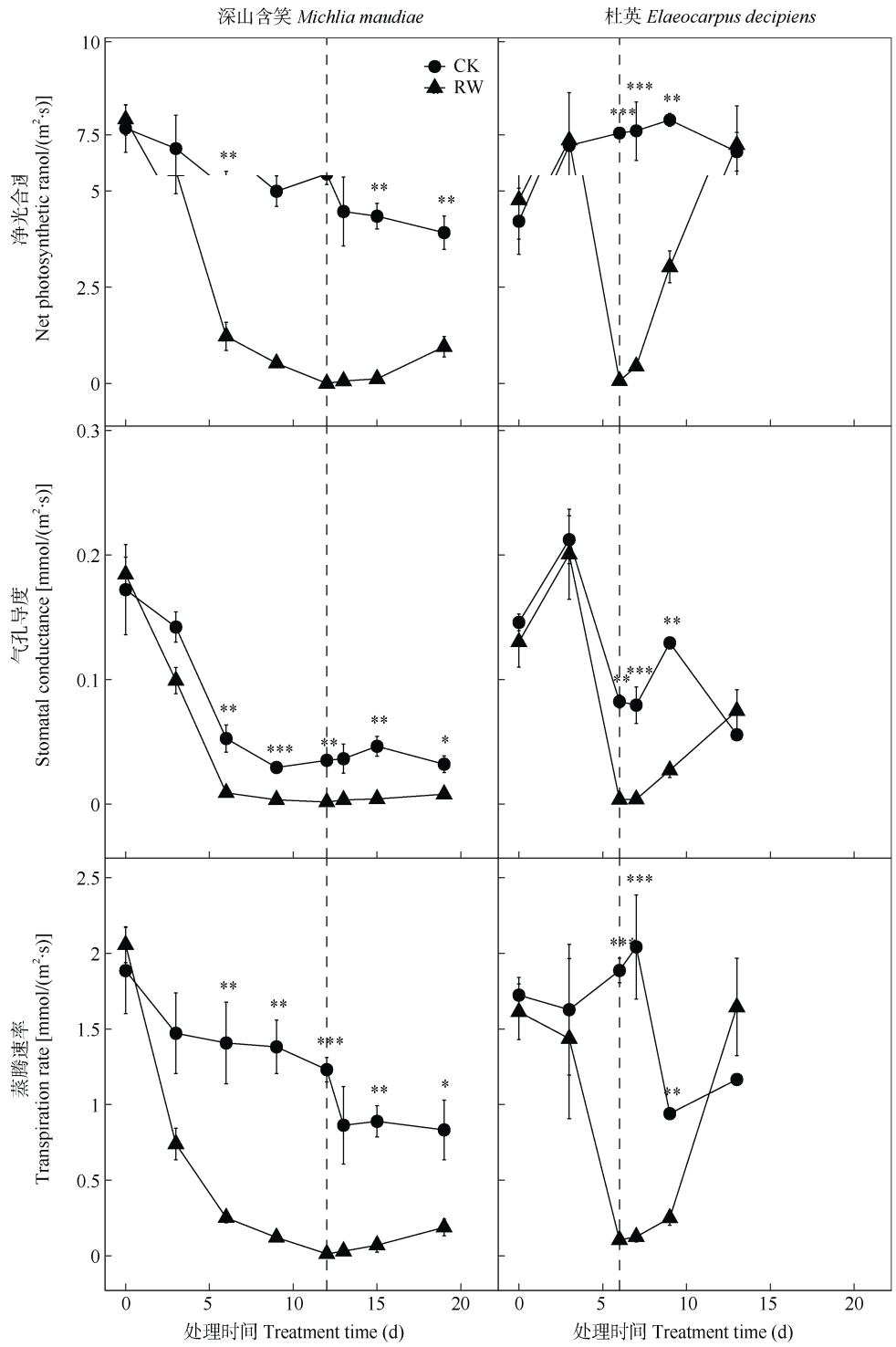

图 1 干旱胁迫和复水对深山含笑和杜英气体交换参数的影响。CK: 对照; RW: 复水; n=3; *: P<0.05; **: P<0.01; ***: P<0.001。下同

Fig. 1 Effects of drought stress and rewater on gas exchange parameters of *Michlia maudiae* and *Elaeocarpus decipiens*. CK: Control; RW: Rewater; n=3; *: P<0.05; **: P<0.01; ***: P<0.001. The same below

杜英幼苗的净光合速率开始上升，但恢复速度有所不同。深山含笑在复水 3 d 后，光合速率仅恢复至对照组的 3%，复水 7 d 后，仍未恢复至对照水平; 杜英幼苗在复水 3 d 后，光合速率恢复至对照组的 38.3%，复水 7 d 后，恢复至对照水平。

干旱胁迫对深山含笑、杜英的气孔导度都产生了显著影响，在胁迫处理下气孔导度都呈下降趋势。在干旱胁迫第 6 天时，深山含笑、杜英幼苗的

气孔导度较对照组分别降低了 82.9%、96.0%，此时杜英的气孔导度几乎降低为 0。而深山含笑在第 6 天后，气孔导度开始缓慢下降，直到 12 d 时气孔才基本关闭，气孔导度下降为 0。与光合速率相似，杜英幼苗气孔导度接近 0 的速度更快。复水 3 d 后，深山含笑、杜英分别恢复至对照组的 8.27%、24.30%。复水 7 d 后，深山含笑恢复至对照组的 24.9%；杜英已恢复至对照水平。

随着干旱胁迫及复水时间的变化，深山含笑、杜英的蒸腾速率呈现先降低后增加的趋势。与对照组相比，干旱胁迫显著降低了深山含笑和杜英幼苗的蒸腾速率。在干旱胁迫 6 d 时，深山含笑、杜英幼苗的蒸腾速率较对照组分别降低 82.1%、94.4%，杜英蒸腾速率降至最低，而深山含笑在干旱第 12 天时才降至最低。复水后深山含笑、杜英幼苗的蒸腾速率均有所回升，但恢复程度有所不同。复水 3 d，深山含笑、杜英蒸腾速率分别恢复至对照组的 8.0%、26.6%，复水 7 d 后，深山含笑蒸腾速率恢复至对照组的 22.6%，杜英已恢复至对照水平。

2.2 水势对干旱胁迫和复水的响应

与对照相比，干旱胁迫期间深山含笑和杜英幼苗在黎明前和正午的水势显著降低(图 2)。随着干旱胁迫的加剧，杜英幼苗水势下降速度快于深山含笑。深山含笑在第 12 天时的黎明前和正午水势下降至最低，而杜英在第 6 天时就下降至最低。复水 3 d 后，杜英黎明前水势、正午水势恢复至对照水平。而深山含笑水势在复水 7 d 时才恢复至对照水平。

2.3 叶片相对含水量对干旱胁迫和复水的响应

干旱胁迫显著降低了深山含笑和杜英幼苗的叶片相对含水量，干旱后深山含笑的叶片相对含水量约为对照的 60%，而杜英的约为对照的 80%。复水 1 d 后，深山含笑和杜英的叶片相对含水量均恢复至对照水平(图 3)。

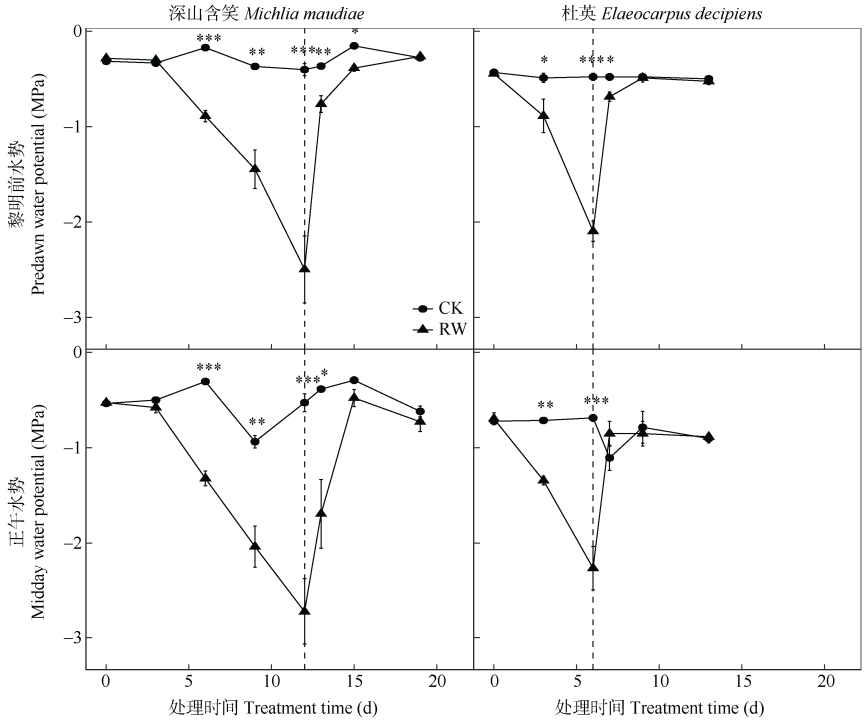

图 2 干旱胁迫及复水对深山含笑和杜英黎明前和正午水势的影响

Fig. 2 Effects of drought stress and rewater on predawn and midday water potential of *Michlia moaudiae* and *Elaeocarpus decipiens*

2.4 SOD 活性和 Pro 含量对干旱胁迫和复水的响应

由图 4 可见，干旱显著降低了深山含笑和杜英幼苗叶片的 SOD 活性，分别是对照组的 36.1%和 33.4%。复水后，深山含笑和杜英幼苗叶片中 SOD 活性呈逐渐上升趋势，并均在复水 7 d 后恢复至对照水平。干旱显著提高了深山含笑和杜英幼苗叶片的 Pro 含量，分别为对照组的 2.1 和 5.5 倍。复水后，深山含笑和杜英 Pro 含量均不同程度下降，其中，深山含笑在复水 7 d 就恢复至对照水平，而杜英在复水 13 d 才恢复至对照水平。

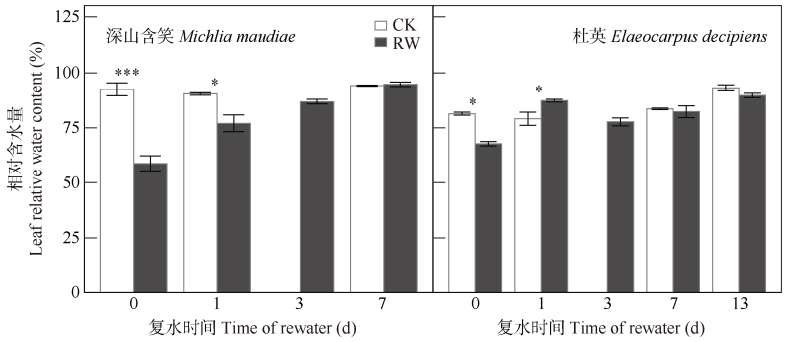

图 3 干旱胁迫和复水对深山含笑和杜英叶片相对含水量的影响

Fig. 3 Effects of drought stress and rewater on leaf relative water content of *Michlia moaudiae* and *Elaeocarpus decipiens*

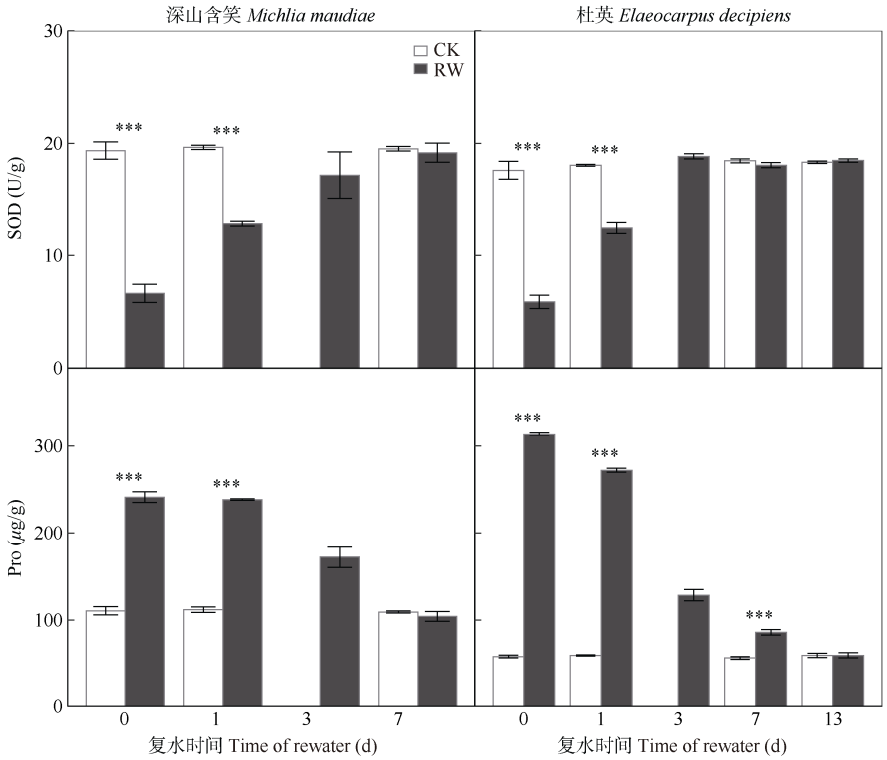

图 4 干旱胁迫及复水对深山含笑和杜英超氧化物歧化酶活性(SOD)和脯氨酸(Pro)含量的影响

Fig. 4 Effects of drought stress and rewater on SOD activity and Pro content of *Michlia moaudiae* and *Elaeocarpus decipiens*

2.5 叶片可溶性糖含量对干旱胁迫和复水的响应

在干旱胁迫处理下，深山含笑和杜英幼苗叶片中可溶性糖含量呈现不同的变化趋势。干旱显著提高了深山含笑叶片的可溶性糖含量，为对照组的 1.3 倍，但对杜英叶片可溶性糖含量影响不显著。复水后，深山含笑叶片可溶性糖含量迅速恢复至对照组水平(图 5)。

3 讨论和结论

光合作用是植物生长最重要的生理过程，通过光合作用积累有机物质，为其生长发育提供物质基础[29]。干旱胁迫会影响植物的净光合作用、蒸腾作用和气孔导度，其中气孔导度是影响光合速率的一个重要因素[30]。当植物受到干旱胁迫时，会通过关闭气孔、降低蒸腾速率来减少水分散失，这也将导致光合速率下降[31]。本研究结果表明干旱胁迫显著降低了深山含笑和杜英幼苗的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率。杜英幼苗的净光合速率和气孔导度下降到 0 的速度快于深山含笑，说明杜英对干旱胁迫响应较快。在面对干旱胁迫时，随着水分的消耗，及时关闭气孔、降低蒸腾作用以减少水分散失，这

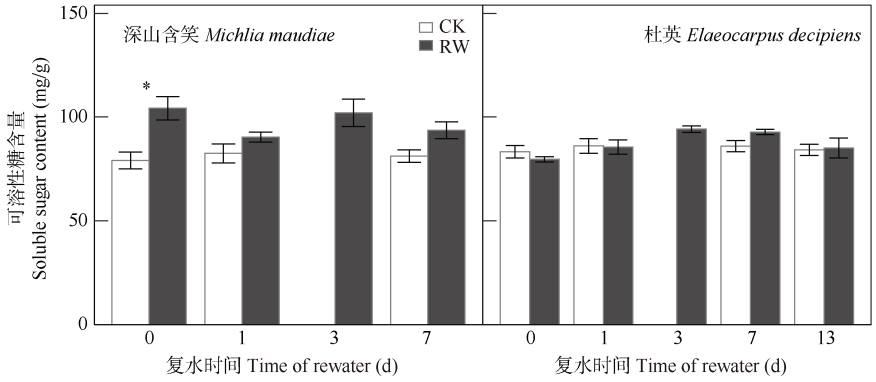

图 5 干旱胁迫及复水对深山含笑和杜英叶片可溶性糖含量的影响

Fig. 5 Effects of drought stress and rewater on soluble sugar content in leaves of *Michlia moaudiae* and *Elaeocarpus decipiens*

是植物的一种自我保护，这与冯延芝等[32]的研究结果一致。在干旱胁迫下，适时补水可以减轻干旱对植物的影响。赵玉坤等[33]对黑花生的研究表明，短期干旱的黑花生光合参数在复水后能较快恢复至对照组水平，但重度干旱复水后未能恢复至对照组水平。本研究结果同样表明，复水后深山含笑和杜英幼苗净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均有所恢复，但恢复程度不同。深山含笑幼苗净光合速率、气孔导度和蒸腾速率在复水 7 d 后均未恢复至对照水平，而杜英幼苗在复水 7 d 后就恢复至对照水平，表明杜英幼苗在复水后能迅速恢复，具有较强的旱后恢复能力。

保持植物内部水分平衡是维持植物正常生长的重要条件，叶片水势可以反映植物体内水分亏缺程度或水分状况[34–35]。当植物面对干旱胁迫时，会通过降低叶片水势来增强植物的吸水能力。本研究表明，在干旱胁迫期间，杜英叶片水势下降时间早于深山含笑。深山含笑叶片水势保持在对照组水平一段时间后，开始逐渐降低，在第 12 天降至最低，而杜英在干旱胁迫开始就呈现逐渐降低趋势，在第 6 天降至最低。与深山含笑相比，杜英幼苗叶片水势下降速度更快，对干旱的响应更快。植物在干旱结束后复水能否迅速恢复并修复损伤，主要与植物所受的胁迫程度有关[36]。研究表明，元宝枫(*Acer truncatum*)幼树在干旱胁迫后复水叶水势恢复随干旱程度有所不同，受到胁迫程度越大，其叶片水势的恢复能力越差[37]；李继文等[38]对刺槐(*Robinia pseudoacacia*)幼苗的研究表明，在干旱胁迫解除复水 24 h 后，刺槐幼苗叶水势恢复至接近对照水平，表现出较强的旱后恢复能力。随着土壤水分的逐渐降低，植物吸收的水分会逐渐减少，再加上叶片的蒸腾作用，从而表现出较低的叶片相对含水量。在复水后，深山含笑和杜英幼苗叶片相对含水量迅速恢复，表现出较强的旱后恢复能力。

在正常情况下，植物体内活性氧的产生和清除往往处于动态平衡状态。干旱胁迫下，这种动态平衡就会被打破，细胞内活性氧会大量积累，造成膜系统损伤，导致植物受到伤害[39]。植物为了避免活性氧带来的伤害，通过体内的抗氧化酶活性来清除活性氧[40]。SOD 是抵御活性氧自由基介导的氧化损伤的第一道防线，可通过 Haberweiss 反应清除植物体内多余的超氧根阴离子，是保护酶体系中的关键酶[41]。SOD 活性变化速度和活性水平对植物的耐旱性有直接影响，对于 SOD 活性上升速度较快的植物，在相同胁迫阶段下，SOD 活性较高的往往对干旱的耐受性较好[42]。冯晓敏等[43]对缺水处理下耐旱性糜子的研究表明，耐旱品种通过较短时间内快速提升 SOD 活性，以此对水分胁迫做出更快响应。Shao 等[44]研究表明，SOD 对活性氧的清除存在一个阈值，当超过这个临界点，酶活性就会下降。因此植物 SOD 活性在轻度或者短暂的水分胁迫下呈现上升趋势，在长期或者严重干旱胁迫下反而下降。本研究中，干旱处理后，深山含笑和杜英幼苗 SOD 活性显著低于对照组，表明 2 种树木经历了严重的干旱，SOD 对活性氧的清除已经超过了阈值。这与田晓明等[45]对黄山紫荆(*Cercis chingii*)的研究存在一定差异，可能与干旱胁迫时间、强度有关。经过一段时间复水后，深山含笑和杜英幼苗均能恢复至对照组水平。

渗透调节作用是植物应对干旱的重要生理方式。在干旱胁迫下，植物通过渗透物质的积累对渗透势进行调节，维持植物体内的水分平衡，提高植

物在干旱环境的适应能力[46]。陈爱萍等[47]通过对伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)幼苗的研究表明，在干旱胁迫下可以通过 Pro 和可溶性糖等渗透物质积累来降低干旱胁迫带来的伤害。本研究中深山含笑和杜英幼苗在复水前 Pro 含量显著高于对照，表明深山含笑和杜英幼苗在干旱胁迫时迅速合成 Pro，降低细胞水势，增强吸水能力来应对干旱胁迫[48]。复水后，深山含笑和杜英幼苗经过一段时间均可恢复至对照组水平，这与崔豫川等[49]对栓皮栎(*Quercus variabilis*)幼苗的研究结果一致。于同泉等[50]对板栗(*Castanea mollissima*)苗的研究表明，可溶性糖主要在中度胁迫时才开始积累，与 Pro 等渗透调节物质相比有一定的滞后性。本研究中深山含笑在复水前可溶性糖含量显著高于对照组，而杜英在复水前与对照组相比没有显著差异，可能是杜英幼苗干旱胁迫时间较短，而可溶性糖积累又有一定的滞后性。结合 Pro 和可溶性糖在干旱复水状态变化规律推测，在干旱期间，深山含笑幼苗可能通过提高 Pro 和可溶性糖的含量作为主要渗透调节物质，而杜英幼苗则可能仅通过提高 Pro 含量作为主要渗透调节物质。

综上，通过测定深山含笑和杜英幼苗在干旱-复水条件下的水分状况、光合参数、SOD 活性和调节渗透物质等指标，探讨了深山含笑和杜英 2 种绿化树种对干旱胁迫的响应和旱后恢复能力。结果表明，杜英幼苗对干旱胁迫更敏感，但在复水后恢复较快，而深山含笑幼苗对干旱的耐受性较强。因此，在持续干旱环境中可优选深山含笑作为绿化树种，以减少灌溉需求；在偶发性干旱或水分充足的环境中，可选择旱后恢复能力强的杜英。此外，在光合作用完全停止前及时补水能有效恢复幼苗生理和水分状况，保持其健康生长。

参考文献

[1] ANDEREGG W R L, KANE J M, ANDEREGG L D L. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress [J]. Nat Climate Change, 2013, 3(1): 30–36. doi: 10.1038/nclimate1635.

[2] BARIGAH T S, CHARRIER O, DOURIS M, et al. Water stress-induced xylem hydraulic failure is a causal factor of tree mortality in beech and poplar [J]. Ann Bot, 2013, 112(7): 1431–1437. doi: 10.1093/aob/mct204.

[3] SHI Q, BAO X W, HUA J F, et al. Effects of drought stress and recovery on photosynthesis and physiological characteristics of *Hibiscus hamabo* [J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(8): 2600–2606. [施钦, 包学文, 华建峰, 等. 干旱胁迫及复水对海滨木槿光合作用和生理特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2600–2606. doi: 10.13287/j.1001-9332.201908.020.]

[4] MITTLER R, BLUMWALD E. The roles of ROS and ABA in systemic acquired acclimation [J]. Plant Cell, 2015, 27(1): 64–70. doi: 10.1105/tpc.114.133090.

[5] BLUM A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production [J]. Plant Cell Environ, 2017, 40(1): 4–10. doi: 10.1111/pce.12800.

[6] CHAVES M M, FLEXAS J, PINHEIRO C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. Ann Bot, 2009, 103(4): 551–560. doi: 10.1093/aob/mcn125.

[7] ZHANG D D, ZHOU S B, ZHOU H, et al. Physiological response of *Boea clarkeana* to dehydration and rehydration [J]. Chin J Ecol, 2016, 35(1): 72–78. [张丹丹, 周守标, 周会, 等. 大花旋蒴苣苔对脱水与复水的生理响应 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 72–78. doi: 10.13292/j.1000-4890.201601.010.]

[8] CUI T R, YU H M, LI H B, et al. Effect of drought stress and rewatering on physiological characteristics of *Pennisetum alopecuroides* seedlings [J]. Pratacul Sci, 2017, 34(4): 788–793. [崔婷茹, 于慧敏, 李会彬, 等. 干旱胁迫及复水对狼尾草幼苗生理特性的影响 [J]. 草业科学, 2017, 34(4): 788–793. doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0535.]

[9] ZHANG Y N, LEI L, XIA B. Effects of drought stress and rewatering on seedling growth and physiological characteristics of *Lysimachia davurica* [J]. Pratacul Sci, 2016, 33(9): 1681–1689. [张彦妮, 雷蕾, 夏斌. 干旱胁迫及复水对黄连花幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 草业科学, 2016, 33(9): 1681–1689. doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0179.]

[10] DENG Y S, MA C Y, YUAN W R, et al. Effects of drought stress and rehydration on leaf structures and water conditions of *Handeliodendron bodinieri* seedlings [J]. Guangxi For Sci, 2024, 53(2): 178–184. [邓雅诗, 马朝阳, 袁炜蓉, 等. 干旱胁迫和复水对掌叶木幼苗叶片结构和水分状况的影响 [J]. 广西林业科学, 2024, 53(2): 178–184. doi: 10.19692/j.issn.1006-1126.20240206.]

[11] QI J C, LIU D Q, LIU H, et al. Effects of drought stress and rehydration on the morphology and physiological characteristics of betel nut seedlings [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2024, 40(4): 615–624. [戚金存, 刘大泉, 刘泓, 等. 干旱胁迫及复水对槟榔幼苗形态和生理特性的影响 [J]. 江苏农业学报, 2024, 40(4): 615–624. doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.04.005.]

[12] LIU Y J, REN J H, YIN L N, et al. Compensation effect of re-watering

after different drought stresses on source-sink metabolism during tuber expansion period of potato [J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(11): 3777–3786. [刘溢健, 任建宏, 殷俐娜, 等. 马铃薯块茎膨大期不同程度干旱后复水的源库补偿效应 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3777–3786. doi: 10.13287/j.1001-9332.201911.023.]

[13] ZHANG W H, JIN J Y, WANG M X, et al. Compensatory effects of drought stress and rewatering on growth of *Hemarthria compressa* [J]. Acta Pratacul Sin, 2016, 25(10): 104–112. [张卫华, 靳军英, 汪明星, 等. 干旱胁迫与复水对牛鞭草生长发育的补偿效应研究 [J]. 草业学报, 2016, 25(10): 104–112. doi: 10.11686/cyxb2015584.]

[14] CHENG P, TANG D, WANG K, et al. Physiological responses and drought resistance evaluation of 12 plants to drought stress and rehydration in the northern piedmont of Tianshan Mountains in Xinjiang [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2024, 44(5): 691–705. [程平, 汤东, 王凯, 等. 天山北坡前山带 12 种植物对干旱胁迫和复水的生理响应及抗旱性评价 [J]. 西北植物学报, 2024, 44(5): 691–705. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.20220635.]

[15] LIU T T, CHEN D Q, WANG S W, et al. Physio-ecological responses to drought and subsequent re-watering in sorghum seedlings [J]. Acta Pratacul Sin, 2018, 27(6): 100–110. [刘婷婷, 陈道钳, 王仕稳, 等. 不同品种高粱幼苗在干旱复水过程中的生理生态响应 [J]. 草业学报, 2018, 27(6): 100–110. doi: 10.11686/cyxb2017410.]

[16] WANG X X, LI Y, ZHANG B, et al. Effects of drought stress and rehydration on root growth and physiological characteristics of oats [J]. Acta Agrest Sin, 2020, 28(6): 1588–1596. [王晓雪, 李越, 张斌, 等. 干旱胁迫及复水对燕麦根系生长及生理特性的影响 [J]. 草地学报, 2020, 28(6): 1588–1596. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2020.06.012.]

[17] ZHOU W. Study on the garden application of plant resources of Duinaceae in Zhejiang Province [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2007, 13(13): 91–92. [周伟. 浙江省杜英科植物资源的园林应用研究 [J]. 安徽农学通报, 2007, 13(13): 91–92. doi: 10.3969/j.issn.1007-7731.2007.13.038.]

[18] XU H B, WAN Z Z, LIU J W. The experiment on the introduction and cultivation of the deep mountain *Michelia amudiae* and the *M. chapensis* in the Zhongshan Mausoleum Scenic Area [J]. J Jiangsu For Sci Technol, 2005, 32(3): 9–10. [徐海兵, 万志洲, 刘江伟. 中山陵园风景区深山含笑、乐昌含笑引种栽培试验 [J]. 江苏林业科技, 2005, 32(3): 9–10. doi: 10.3969/j.issn.1001-7380.2005.03.004.]

[19] PAN W, ZHANG W Q, ZHANG F Q, et al. Decontamination ability of sulfur dioxide and nitrogen dioxide for 38 young landscaping plants in Guangzhou City [J]. Ecol Environ Sci, 2012, 21(4): 606–612. [潘文, 张卫强, 张方秋, 等. 广州市园林绿化植物苗木对二氧化硫和二氧化氮吸收能力分析 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 606–612. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2012.04.003.]

[20] FANG X C, WANG P, ZHANG X Y, et al. Resources and evaluation of wild ornamental plants of Magnoliaceae in Zhejiang province [J]. Chin J Trop Crops, 2018, 39(8): 1513–1518. [方晓晨, 王盼, 张雪莹, 等. 浙江木兰科野生观赏植物资源及评价 [J]. 热带作物学报, 2018, 39(8): 1513–1518. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2018.08.007.]

[21] YAN L, CHEN M X, LIU Y N, et al. Effect of salt stress on growth of *Michelia maudiae* seedlings and related physiological indices [J]. For Sci Technol, 2013, 38(4): 14–17. [严理, 陈铭显, 刘延男, 等. 盐胁迫对深山含笑苗木生长及生理指标的影响 [J]. 林业科技, 2013, 38(4): 14–17. doi: 10.3969/j.issn.1001-9499.2013.04.005.]

[22] FRANCESCHI E, MOSER-REISCHL A, HONOLD M, et al. Urban environment, drought events and climate change strongly affect the growth of common urban tree species in a temperate city [J]. Urban For Urban Greening, 2023, 88: 128083. doi: 10.1016/j.ufug.2023.128083.

[23] LI M. Photosynthetic characteristics and carbon sequestration capacity of several commonly used tree species of Magnoliaceae of Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2014. [李梦. 木兰科几种常用绿化树种光合特性及固碳能力研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014. doi: 10.7666/d.D570606.]

[24] LIU X X, ZHANG M R, WEN G S, et al. Photosynthetic characteristics for fifteen potted seedlings common to Zhejiang Province [J]. J Zhejiang A&F Univ, 2012, 29(2): 173–179. [刘欣欣, 张明如, 温国胜, 等. 浙江省常见 15 个树种的光合特性 [J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(2): 173–179. doi: 10.3969/j.issn.2095-0756.2012.02.004.]

[25] HAN W, HAMID Yimit H, LI L, et al. Characterizations of chlorophyll fluorescence parameters and stem water potentials of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa* grown in the hinterland of Taklimakan Desert [J]. J Desert Res, 2011, 31(6): 1472–1478. [韩炜, 海米提·依米提, 李利, 等. 胡杨和灰杨的叶绿素荧光参数及茎水势对塔克拉玛干沙漠腹地生境的响应 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1472–1478.]

[26] GAO J F. Experimental Guidance for Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]

[27] LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164–261. [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: 164–261.]

[28] LI N N, HE N P, YU G R. Non-structural carbohydrates in leaves of tree species from four typical forests in China [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2015, 35(9): 1846–1854. [李娜妮, 何念鹏, 于贵瑞. 中国 4 种典型森林中常见乔木叶片的非结构性碳水化合物研究 [J]. 西北植物学报, 2015, 35(9): 1846–1854. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.

2015.09.1846.]

[29] ZHANG S B, WANG J R, ZHOU T, et al. Response of photosynthetic gas exchange and chlorophyll fluorescence characteristics to drought stress in hybrid of *Physocarpus amurensis* Maxim (♀) × *Physocarpus opulifolius* "Diabolo" (♂) [J]. J CS Univ For Technol, 2019, 39(9): 33–38. [张书博, 王均睿, 周涛, 等. 风箱果(♀)×紫叶风箱果(♂)杂交种光合特性对干旱胁迫的响应 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(9): 33–38. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.09.006.]

[30] XIE Z Y, ZHANG W H. Effects of drought and rewatering on growth and photosynthetic physioecological characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Chin J Appl Ecol, 2018, 29(6): 1759–1767. [谢志玉, 张文辉. 干旱和复水对文冠果生长及生理生态特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1759–1767. doi: 10.13287/j.1001-9332.201806.007.]

[31] WANG B, HU H L, HU T X, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and growth of *Phoebe zhennan* seedlings [J]. J NW A&F Univ (Nat Sci), 2019, 47(2): 79–87. [王彬, 胡红玲, 胡庭兴, 等. 干旱胁迫对桢楠幼树生长及光合特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 79–87. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.02.010.]

[32] FENG Y Z, ZHAO Y, WANG B P, et al. Effects of drought and rewatering on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Paulownia catalpifolia* seedlings [J]. J CS Univ For Technol, 2020, 40(4): 1–8. [冯延芝, 赵阳, 王保平, 等. 干旱复水对楸叶泡桐幼苗光合和叶绿素荧光的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 1–8. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.04.001.]

[33] ZHAO Y K, LI N, NING D X, et al. Physiological response to drought and rewatering of black peanuts in pod-pin stage [J]. SW China J Agric Sci, 2022, 35(2): 352–358. [赵玉坤, 李楠, 宁东贤, 等. 黑花生花针期干旱后复水的生理响应 [J]. 西南农业学报, 2022, 35(2): 352–358. doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2022.2.013.]

[34] FENG S L, ZHOU T, HUANG Y, et al. Response characteristics of water potential of *Platycladus orientalis* seedlings to drought stress and rewatering [J]. Jiangsu Agric Sci, 2021, 49(19): 149–156. [冯树林, 周婷, 黄优, 等. 侧柏水势对干旱胁迫与复水的响应特征 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49(19): 149–156. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2021.19.027.]

[35] DGHIM F, ABDELLAOUI R, BOUKHRIS M, et al. Physiological and biochemical changes in *Periploca angustifolia* plants under withholding irrigation and rewatering conditions [J]. S Afr J Bot, 2018, 114: 241–249. doi: 10.1016/j.sajb.2017.11.007.

[36] LÜ C Y, GAO Z X, YAN Y, et al. Effects of drought-rewatering on leaf water potential of two *Dendrobium* plants [J]. Guihaia, 2021, 41(2): 177–182. [吕朝燕, 高智席, 严羽, 等. 干旱-复水对两种石斛属植物叶水势的影响 [J]. 广西植物, 2021, 41(2): 177–182. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201905001.]

[37] PANG Y L, WANG J X, TIAN L. Effect of water stress and rewatering on the physiological characteristics of *Acer truncatum* seedlings [J]. J NW A&F Univ (Nat Sci), 2008, 36(6): 92–96. [庞云龙, 王进鑫, 田丽. 水分胁迫及复水对元宝枫幼树生理特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 92–96. doi: 10.3321/j.issn:1671-9387.2008.06.018.]

[38] LI J W, WANG J X, ZHANG M L, et al. Effect of drought and rewater on leaf water potential of *Robinia pseudoacacia* [J]. J NW For Univ, 2009, 24(3): 33–36. [李继文, 王进鑫, 张慕黎, 等. 干旱及复水对刺槐叶水势的影响 [J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 33–36.]

[39] RAMZAN M, ASLAM M N, AKRAM S, et al. Exogenous glutathione revealed protection to bacterial spot disease: Modulation of photosystem II and H_2O_2 scavenging antioxidant enzyme system in *Capsicum annum* L. [J]. J King Saud Univ Sci, 2021, 33(1): 101223. doi: 10.1016/j.jksus.2020.10.020.

[40] MUHTAR ZARI, QIMAN YUNUS, NORIMOZU Y. Effect of exogenous ABA and silicon on leaf water potential and protective enzyme activities of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings under drought stress [J]. Bull Bot Res, 2010, 30(4): 468–472. [木合塔尔·扎热, 齐曼·尤努斯, 山中典和. 干旱胁迫下外源脱落酸和硅对沙枣幼苗叶片水势及保护酶活性的影响 [J]. 植物研究, 2010, 30(4): 468–472.]

[41] LI X N, DONG S K, LIU L J, et al. Effect of drought stress on SOD activity and MDA content of spring soybean [J]. Chin Agric Sci Bull, 2016, 32(15): 93–97. [李雪凝, 董守坤, 刘丽君, 等. 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 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(15): 93–97.]

[42] WEI J, XU C, LI K X, et al. Progress on superoxide dismutase and plant stress resistance [J]. Plant Physiol J, 2020, 56(12): 2571–2584. [魏婧, 徐畅, 李可欣, 等. 超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性 [J]. 植物生理学报, 2020, 56(12): 2571–2584. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2020.0311.]

[43] FENG X M, ZHANG Y Q. Characteristics of protective enzyme activities and lipid peroxidation in broomcorn millet leaves under soil water stress [J]. Agric Res Arid Areas, 2019, 37(1): 200–207. [冯晓敏, 张永清. 水分胁迫下不同耐旱性糜子叶片保护酶活性及膜脂过氧化特性 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 200–207. doi: 10.7606/j.issn.1000-7601.2019.01.28.]

[44] SHAO C C, DUAN H L, DING G J, et al. Physiological and biochemical dynamics of *Pinus massoniana* Lamb. seedlings under extreme drought stress and during recovery [J]. Forests, 2022, 13(1):

65. doi: 10.3390/f13010065.

[45] TIAN X M, CHEN X W, YAN L H, et al. Effect of drought stress on morphology and physiological properties of *Cercis chingii* [J]. J Zhejiang For Sci Technol, 2021, 41(2): 23–28. [田晓明, 陈新文, 颜立红, 等. 干旱胁迫对黄山紫荆生长形态和生理特性的影响 [J]. 浙江林业科技, 2021, 41(2): 23–28. doi: 10.3969/j.issn.1001-3776.2021.02.004.]

[46] SZABADOS L, SAVOURÉ A. Proline: A multifunctional amino acid [J]. Trends Plant Sci, 2010, 15(2): 89–97. doi: 10.1016/j.tplants.2009.1.009.

[47] CHEN A P, SUI X Q, WANG Y X, et al. Effects of drought and re-watering on growth and physiological characteristics of *Seriphidium transiliense* seedlings [J]. Acta Agrest Sin, 2020, 28(5): 1216–1225. [陈爱萍, 隋晓青, 王玉祥, 等. 干旱胁迫及复水对伊犁绢蒿幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1216–1225. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2020.05.005.]

[48] ENNAJEH M, VADEL A M, KHEMIRA H. Osmoregulation and osmoprotection in the leaf cells of two olive cultivars subjected to severe water deficit [J]. Acta Physiol Plant, 2009, 31(4): 711–721. doi: 10.1007/s11738-009-0283-6.

[49] CUI Y C, ZHANG W H, LI Z P. Effects of drought stress and rewatering on growth and physiological characteristics of *Quercus variabilis* seedlings [J]. Sci Silv Sin, 2014, 50(7): 66–73. [崔豫川, 张文辉, 李志萍. 干旱和复水对栓皮栎幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 林业科学, 2014, 50(7): 66–73. doi: 10.11707/j.1001-7488.20140710.]

[50] YU T Q, QIN L, WANG Y N. The accumulation and fluctuation of soluble sugar compositions under water stress of chestnut seedlings [J]. J Beijing Univ Agric, 1996, 11(1): 43–47. [于同泉, 秦岭, 王有年. 渗透胁迫板栗苗可溶性糖的积累及组分变化的研究 [J]. 北京农学院学报, 1996, 11(1): 43–47.]