

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.007

论文标题： 水分胁迫对3个造林树种幼苗生长、生物量分配及生理特性的影响

作　　者： 马赵群，张 茜，张路遥，等

收稿日期： 2025-08-28

引文格式： 马赵群,张茜,张路遥,等.水分胁迫对3个造林树种幼苗生长、生物量分配及生理特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):73-86.

Ma Z Q, Zhang X, Zhang L Y, et al. Response of growth, biomass allocation, and physiological characteristics of three afforestation tree species seedlings to water stress[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):73-86.

相关论文推荐

Recommended articles

水分胁迫及恢复对白兰幼树叶片光合生理特性的影响

Effects of water stress and recovery on the physiological and ecological characteristics of *Michelia×alba* sapling

水分胁迫对山乌桕幼苗生长及生理生化的影响

Effects of water stress on the growth, physiological and biochemical characteristics of *Sapium discolor* seedlings

水分胁迫对闽楠幼苗生理及光合特性的影响

Effects of water stress on the physiological and photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* seedlings

持续淹水胁迫对美洲黑杨幼苗生长及生理生化的影响

Effects of continuous waterlogging stress on growth, physiology and biochemistry of *Populus deltoides* seedlings

水分胁迫对桢楠幼树光合生理特性的影响

Effects of water stress on photosynthetic physiology characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings

滇楸优良无性系对水淹胁迫的生理响应及综合评价

Physiological response and comprehensive evaluation of elite clones of *Catalpa fargesii* Bur. f. *duclouxii* under waterlogging stress

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.007
http: //qks.csuft.edu.cn

水分胁迫对 3 个造林树种幼苗生长、生物量分配及生理特性的影响

马赵群，张　茜，张路遥，王　柯，韩　路，王海珍
（塔里木大学，新疆 阿拉尔 843300）

摘　要：【目的】研究水分胁迫对 3 个造林树种幼苗生长、生物量分配及生理特性的影响，以期筛选出抗旱性较强的树种，为干旱区节水抗旱造林提供科学依据。【方法】以 2 年生沙枣、胡杨、文冠果幼苗为试验材料，设置 4 个水分处理，即 75% ～ 80% 田间持水量（CK）、60% ～ 65% 田间持水量（T1）、45% ～ 50% 田间持水量（T2）和 30% ～ 35% 田间持水量（T3），系统测定水分胁迫下幼苗生长、生理生化指标及生物量分配格局，分析各树种幼苗对水分胁迫的响应差异。【结果】1）随着水分胁迫程度的加剧，3 个树种幼苗的株高及地径增长量总体呈降低趋势，其中沙枣幼苗的株高和地径增长量在各水分处理下均为最大，且 3 个树种幼苗在 T1 处理下，株高、地径的增长降幅最小。2）随着水分胁迫程度的加剧，3 个树种幼苗的根、茎、叶生物量明显降低，而根冠比则显著增大，其中文冠果幼苗的根冠比增量最大，沙枣幼苗的根、茎、叶生物量累积量在各处理中均最多。3）随着水分胁迫程度的加剧，3 个树种幼苗的叶绿素含量与净光合速率（Pn）、气孔导度（Gs）等光合参数显著降低（$P < 0.05$），其中胡杨幼苗的 Pn、Gs 等光合参数显著高于其他树种（$P < 0.05$），而沙枣幼苗的水分利用效率（WUE）在 T3 处理下显著高于其他 2 个树种（$P < 0.05$）。4）随着水分胁迫程度的加剧，3 个树种幼苗的丙二醛（MDA）含量、渗透调节物质含量以及超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）活性总体呈上升趋势，其中沙枣幼苗的叶绿素含量、渗透调节物质含量及 POD 活性相对较高，而文冠果幼苗的 MDA 含量相对较高。【结论】在不同水分胁迫条件下，3 个树种幼苗的生长均受到不同程度的抑制，且多项光合指标显著下降，抗逆生理指标呈上升趋势，3 个树种的抗旱机制存在显著差异。结合隶属函数综合评定结果，3 个树种幼苗的抗旱能力排序为：沙枣＞胡杨＞文冠果。

关键词：水分梯度；适宜水分；抗旱性；生长和生理特性
中图分类号：S718.43；Q945　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0073-14

Response of growth, biomass allocation, and physiological characteristics of three afforestation tree species seedlings to water stress

Ma Zhaoqun, Zhang Xi, Zhang Luyao, Wang Ke, Han Lu, Wang Haizhen

(Tarim University, Alar 843300, Xinjiang, China)

Abstract:【Objective】This study aims to investigate the effects of water stress on the growth, biomass allocation, and physiological characteristics of seedlings of three afforestation tree species, in order to screen for species with strong drought resistance and to provide a scientific basis for water-saving and drought-resistant afforestation in arid areas.【Method】Two-year-old seedlings of *Elaeagnus angustifolia*, *Populus euphratica*, and *Xanthoceras sorbifolium* were subjected to four water treatments: 75%-80% of field capacity (CK), 60%-65% of field capacity (T1), 45%-50% of field capacity (T2), and 30%-35% of field capacity (T3). Seedling growth, physiological and biochemical indices, and biomass allocation patterns under water stress were systematically measured, and the differences in the responses of the seedlings of each tree species to water stress were analyzed.【Result】1) With increasing water stress, the increments in height and ground diameter of the three tree species seedlings generally decreased. Among them, *E. angustifolia* seedlings exhibited the largest increments in height and ground diameter across all water treatments, and the three species showed the smallest reductions in height and ground diameter growth under the T1 treatment; 2) As water stress intensified, the root, stem, and leaf biomass of the three tree

收稿日期（Received）：2025-08-28　　**修订日期**（Revised）：2025-11-03
基金项目：兵团财政科技计划项目（2024AB075、2023CB006）。
第一作者：马赵群（zq349086220@163.com），硕士研究生。　　**通信作者：**王海珍（whzzky@163.com），教授，博士。
引文格式：马赵群 , 张茜 , 张路遥 , 等 . 水分胁迫对 3 个造林树种幼苗生长、生物量分配及生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):73-86.
Ma Z Q, Zhang X, Zhang L Y, et al. Response of growth, biomass allocation, and physiological characteristics of three afforestation tree species seedlings to water stress[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):73-86.

species seedlings significantly decreased, while the root-to-shoot ratio (R/S) significantly increased. Among them, *X. sorbifolium* seedlings exhibited the greatest increase in R/S, whereas *E. angustifolia* seedlings accumulated the highest root, stem, and leaf biomass across all treatments; 3) With increasing water stress, chlorophyll content and value of photosynthetic parameters such as net photosynthetic rate (Pn) and stomatal conductance (Gs) significantly decreased ($P < 0.05$). Notably, *P. euphratica* seedlings had significantly higher valuse of Pn, Gs, and other photosynthetic parameters than the other two species ($P < 0.05$), while the water use efficiency (WUE) of *E. angustifolia* seedlings was significantly higher than those of the other two species under the T3 treatment ($P < 0.05$); 4) As water stress intensified, the malondialdehyde (MDA) content, osmoregulatory substance content, and the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) generally increased across the three species. Among them, *E. angustifolia* seedlings exhibited relatively higher chlorophyll content, osmoregulatory substance contents, and POD activity, while *X. sorbifolium* seedlings showed relatively higher MDA content.【Conclusion】Under water stress, the growth of the three tree species seedlings was inhibited to varying degrees, with multiple photosynthetic indices significantly decreasing and stress-resistant physiological indices showing an increasing trend. However, the three species were ranked in drought resistance as follows. Based on the comprehensive evaluation results using the membership function method, the drought resistance of the three tree species seedlings ranked as follows: *E. angustifolia* showed the strongest resistance, followed by *P. euphratica*, and *X. sorbifolium* showed the weakest resistance.

Keywords: water gradient; suitable water; drought resistance; growth and physiological characteristics

全球气候变化引发的高温、干旱等极端气候事件对植物生长和生态系统的稳定构成了严重威胁 [1]，位于中国西北的塔里木盆地，作为极端干旱环境的典型代表，其生态系统本就异常脆弱，年均降水量极低而蒸发量巨大，水资源匮乏成为区域生态安全的关键瓶颈 [2]。在全球变暖趋势与区域极端干旱环境的双重作用下，西北地区水资源短缺问题日益凸显，造成植被盖度低，加剧土地荒漠化 [3]，这一严峻形势对依赖有限水资源而建立和维护的防风固沙林体系带来了前所未有的挑战，严重威胁区域生态安全与可持续发展。因此，为应对这一挑战，筛选和培育节水抗旱树种，成为荒漠化治理、植被恢复与生态环境改善的核心策略。

水分是限制干旱区植被生长、分布与生存的关键因素，荒漠植物长期处于水分胁迫的生存极限状态 [4]。水分短缺会抑制植株生长 [5]，导致幼苗株高增长停滞、地径增粗缓慢、生物量积累减少，还会造成叶绿素合成效率降低、叶片衰老变黄，严重时可引发植株萎蔫甚至死亡 [6-7]。为减少水分散失，植株气孔导度迅速下降，但同时也限制了 CO_2 的吸收，造成光合速率降低 [8]。为维持细胞正常生理功能，植物通过积累脯氨酸、可溶性蛋白等渗透调节物质以降低细胞渗透势。胁迫产生的过量活性氧（ROS）易引发膜脂过氧化损伤，此时超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）等抗氧化酶系统的活性上调，形成关键的抗氧化胁迫防御体系。此外，根系形态（增加根系深度与根冠比）也会发生适应性调整以增强水分吸收与抗旱能力。这些生长改变和生理响应协同适应，直接决定了幼苗在干旱环境中的定植能力和生存前景 [9-11]。

针对塔里木盆地防风固沙和环境改善的迫切需求，本研究选取 3 种耐旱的荒漠造林树种为研究对象。胡杨 *Populus euphratica* 被誉为“沙漠英雄树”，是荒漠河岸林的建群种和乡土树种，具耐盐碱、抗旱特性 [12]；沙枣 *Elaeagnus angustifolia* 则凭借发达的根系、根瘤固氮能力及较强的耐旱耐贫瘠特性，成为防风固沙的先锋树种 [13]；文冠果 *Xanthoceras sorbifolium*，作为具有重要经济价值的木本油料树种 [14]，在北方干旱区表现出优异的抗旱适应性，其深根性和低耗水性使其成为干旱区生态经济型防护林的潜力树种 [15]。三者都是我国重要的防治荒漠化树种，具有耐干旱、抗风沙等特点，能够适应极端干旱环境，兼具生态与经济价值，对打好三北攻坚战及优化防护林结构具有重要作用 [13,16-17]。

目前，针对 3 个树种幼苗在干旱梯度胁迫下的生理生化响应，尤其是对 3 个树种幼苗抗旱性对比研究较少，限制了对其生态适应性的全面评价及抗旱树种的利用。因此，本研究以沙枣、胡杨和文冠果 2 年生幼苗为试验材料，通过盆栽试验模拟不同干旱梯度，分析比较其生长、生物量分配、光合水分生理与生理生化等关键指标的响应差异，以期阐明 3 个树种在干旱胁迫下的生长、生理响应特性及生态适应策略，筛选节水抗旱型树种，为极端干旱区荒漠化防治、节水抗旱造林树种配置及绿洲防护林网化建设提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2024 年在塔里木大学园艺试验站进行，该站位于新疆阿拉尔市，地处塔里木盆地北缘（81°29′E，40°54′N），属于暖温带极端大陆

性干旱荒漠气候。平均海拔 1 100 m，年平均降水量为 40.1 ～ 82.5 mm，平均年日照时数 2 556.3 ～ 2 991.8 h，年平均气温 10.7 ℃，全年气温≥ 10 ℃年有效积温 4 113 ℃，无霜期 220 d[18]。

1.2 试验设计

选择塔里木大学园艺试验站苗圃地长势基本一致、健康无病虫害的 2 年生胡杨、沙枣、文冠果实生苗为供试材料，于 2024 年 3 月下旬进行盆栽试验，栽植桶直径为 28 cm、高 30 cm，底部铺一层鹅卵石，并在桶侧装一根 PVC 管用来浇水，以防止水分从土壤表面蒸发。每桶装 15 kg 自然风干后的过筛棕钙土，田间持水量（θ_f）为 21.90％，土壤容重为 1.47 g/cm^3，土壤总孔隙度为 45.15%，毛细孔隙度为 32.22%，pH 值为 7.69，电导率为 1 511.8 μS/cm，总盐含量为 4.7 g/kg，有机质含量为 7.59 g/kg，全氮含量为 9.15 g/kg。苗木移植后置于人工防雨棚下，正常浇水缓苗，使之成活。

2024 年 6 月 15 日进行水分胁迫处理，采用完全随机区组试验设计，将 3 个树种幼苗分为 4 组，土壤相对含水量（土壤含水量占田间持水量的百分比）设为：75% ～ 80% 田间持水量（CK）、60% ～ 65% 田间持水量（T1）、45% ～ 50% 田间持水量（T2）和 30% ～ 35% 田间持水量（T3）4 个水分梯度。每个处理设置 6 个重复，每个重复（盆）3 株幼苗，每天 20:00 用电子秤称盆栽桶质量，补充蒸散发的水分，保证各处理间土壤含水量维持在预定水分胁迫范围内。胁迫期间，阴雨天气将盆栽放置在人工雨棚中，晴天则正常接受光照，试验于 2024 年 10 月 1 日结束。

1.3 研究方法

1.3.1 生长指标的测定

于水分胁迫第 1 天、第 30 天、第 60 天、第 90 天分别用米尺（精度 0.1 cm）和数显游标卡尺（分辨率 0.01 mm）测定所有个体的株高与地径（离地 5 cm 处茎干直径），株高、地径相对增长量的计算公式如下：

$$H_R=(H_1-H_0)/H_0\times100\%; \quad (1)$$

$$D_R=(D_1-D_0)/D_0\times100\%。 \quad (2)$$

式中：H_R 为幼苗株高的相对增长量；D_R 为幼苗地径的相对增长量；H_1、D_1 为测定时间点的株高、地径；H_0、D_0 为胁迫处理初期的株高、地径。

分别于胁迫第 60 天与第 108 天，用流水冲洗盆栽内土壤，操作过程中避免损伤幼苗根茎；将冲洗出的幼苗立即带回实验室清洗干净，每个处理设置 3 个重复；随后将植株分为根、茎、叶 3 部分，分别装入信封并置于烘箱中，先以 105 ℃杀青 30 min，再调至 80 ℃烘干至恒质量，以各器官干质量表征生物量，并计算根冠比（R/S）。

1.3.2 气体交换参数的测定

分别于胁迫第 30 天、第 60 天、第 90 天的 10:00—12:00 进行光合参数的测定，随机选取各处理 6 株植株不同方向的 4 片叶子，每个叶片重复测定 3 次；采用 Li-6400 便携式光合系统仪（LI-COR，USA）进行测定，测定时设置红蓝光源强度为 1 500 μmol·m^{-2}·s^{-1}，叶室温度为 25 ℃，主要测定净光合速率（Pn）、气孔导度（Gs）、蒸腾速率（Tr）等参数，并计算水分利用效率（WUE）。

1.3.3 生理生化指标的测定

分别于胁迫第 30 天、第 60 天、第 90 天采集不同水分处理的 3 个树种成熟叶片，并用冰盒带回实验室；将叶片洗干净后用滤纸吸干表面水分，置于超低温冰箱（−80 ℃）中保存，用于后续生理指标的测定。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G250 染色法测定，脯氨酸含量采用茚三酮法测定，丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定，超氧化物歧化酶活性采用 NBT 还原法测定，过氧化物酶活性采用愈创木酚氧化法测定，叶绿素含量采用比色法（95% 乙醇提取）测定，以上方法均参考《植物生理学实验指导》[19]，每个处理重复 3 ～ 4 次。

1.4 数据处理和分析

采用隶属函数法 [20] 对 3 个荒漠树种的抗旱能力进行综合评价，计算公式为：

$$U(X_i)=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min}); \quad (3)$$

$$U(X_i)=1-(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})。 \quad (4)$$

式中：X_i 为某一指标的测定值 / 对照值（i=1,2,3,...,19）；X_{min} 为 X_i 中最小值；X_{max} 为 X_i 中最大值。若指标与抗旱性呈正相关，用公式（3）计算，反之用公式（4）计算。

使用 Excel 2019 软件进行数据统计、隶属函数分析，使用 SPSS 26.0 软件进行方差分析，使用 Origin 2024 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对 3 个树种幼苗生长的影响

由表 1、表 2 可知，随着水分胁迫程度的增强，3 个造林树种幼苗的株高与地径增长量整体呈下降趋势。其中，沙枣幼苗的株高与地径增长量在 3 个树种中最高，文冠果幼苗最低。不同水分梯度

下 3 个树种幼苗的株高和地径增长量均存在显著差异，T1 处理显著高于其他处理；相同水分胁迫下，沙枣幼苗的株高、地径增长量显著高于其他树种，胡杨显著高于文冠果（$P < 0.05$）。

表 1 水分胁迫对 3 种幼苗株高增长量的影响 †

Table 1 Effects of water stress on seedling height increment of three tree species

树种 Tree species	处理 Treatment	株高增长量 Plant height increment /cm		
		30 d	60 d	90 d
胡杨 *Populus euphratica*	CK	13.34±1.00 bB（16.13%）	18.75±0.25 aB（22.68%）	21.65±2.00 aB（26.18%）
	T1	16.79±2.01 aB（19.13%）	19.85±2.00 aB（22.62%）	22.63±2.10 aB（25.90%）
	T2	7.34±0.30 cB（7.78%）	8.94±1.02 bB（9.46%）	11.25±0.25 bB（11.82%）
	T3	1.06±0.03 dB（1.00%）	1.67±0.10 cC（1.58%）	2.15±0.10 cB（2.02%）
沙枣 *Elaeagnus angustifolia*	CK	15.92±1.00 bA（19.88%）	26.95±2.00 bA（33.65%）	32.28±1.02 bA（40.31%）
	T1	19.38±1.01 aA（27.71%）	31.07±1.00 aA（44.42%）	36.18±1.05 aA（51.73%）
	T2	12.34±0.31 cA（14.87%）	18.20±0.04 cA（21.93%）	20.71±0.11 cA（24.95%）
	T3	11.09±0.71 cA（16.23%）	17.22±0.12 cA（25.21%）	19.75±1.68 cA（28.91%）
文冠果 *Xanthoceras sorbifolium*	CK	2.18±0.08 cC（2.86%）	3.35±0.16 cC（4.40%）	4.03±0.07 cC（5.30%）
	T1	4.70±0.08 aC（6.32%）	9.38±0.33 aC（12.61%）	11.00±0.33 aC（14.80%）
	T2	3.60±0.10 bC（5.10%）	6.01±0.04 bC（8.51%）	7.63±0.21 bC（10.81%）
	T3	1.49±0.08 dB（2.18%）	2.76±0.04 dB（4.03%）	3.68±0.26 cB（5.38%）

† 表中数据为平均值 ± 标准差；不同小写字母表示同一胁迫时间同一树种不同胁迫处理间差异显著（$P < 0.05$）；不同大写字母表示同一胁迫时间同一胁迫处理不同树种之间差异显著（$P < 0.05$）。括号内数字为相对增长量。下同。
The data in the table are mean values ± standard deviation; different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different stress treatments for the same tree species at the same stress time; different uppercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among the same stress treatment for different tree species at the same stress time. The numbers in parentheses indicate relative growth. The same below.

表 2 水分胁迫对 3 种幼苗地径增长量的影响

Table 2 Effects of water stress on seedling ground diameter increment of three tree species

树种 Tree species	处理 Treatment	地径增长量 Ground diameter increment /mm		
		30 d	60 d	90 d
胡杨 *Populus euphratica*	CK	1.05±0.02 bB(16.46%)	1.69±0.05 aB(26.49%)	2.04±0.06 aB(32.00%)
	T1	1.21±0.02 aB(18.33%)	1.65±0.08 aB(25.00%)	2.07±0.04 aB(31.36%)
	T2	1.25±0.02 aA(20.10%)	1.60±0.04 aB(27.01%)	2.02±0.04 aB(32.48%)
	T3	1.04±0.06 bA(15.27%)	1.36±0.04 bB(19.97%)	1.57±0.03 bB(23.05%)
沙枣 *Elaeagnus angustifolia*	CK	1.49±0.04 aA(20.19%)	2.97±0.30 aA(40.24%)	3.72±0.07 aA(50.41%)
	T1	1.28±0.04 bA(16.26%)	2.77±0.01 aA(35.20%)	3.92±0.08 aA(49.81%)
	T2	1.06±0.01 dB(12.94%)	2.07±0.01 bA(25.27%)	2.96±0.18 cA(36.14%)
	T3	1.12±0.08 cA(16.70%)	2.19±0.02 bA(32.64%)	3.23±0.10 bA(48.14%)
文冠果 *Xanthoceras sorbifolium*	CK	0.51±0.02 bC(3.19%)	1.00±0.03 aC(8.40%)	1.39±0.03 aC(12.55%)
	T1	0.35±0.02 cC(1.99%)	0.94±0.09 aC(8.15%)	1.41±0.04 aC(13.06%)
	T2	0.48±0.02 bC((3.09%)	0.76±0.05 bC(6.30%)	1.11±0.07 cC(10.46%)
	T3	0.72±0.04 aB(5.38%)	1.01±0.04 aC(10.42%)	1.25±0.10 bC(14.58%)

2.2 水分胁迫对 3 个树种幼苗不同器官生物量积累与分配的影响

2.2.1 水分胁迫对 3 种幼苗干物质分配的影响

由表 3 可知，胁迫 60 d，随着水分胁迫程度的增强，与对照组（CK）相比，T3 处理下所有幼苗的叶片生物量均显著降低（$P < 0.05$），根生物量均显著升高；胡杨和文冠果的茎生物量显著降低，而沙枣的茎生物量无显著差异。胁迫 108 d，各器官生物量整体呈显著下降趋势（$P < 0.05$）。除胡杨幼苗的茎生物量无显著差异外，不同水分处理下，其余 2 个树种各器官生物量及胡杨根、叶生物量均差异显著（$P < 0.05$），其中沙枣幼苗各器官生物量积累量显著高于文冠果和胡杨幼苗（$P < 0.05$）。水分胁迫前期（60 d），沙枣与文冠果幼苗在 T1 处理下、胡杨幼苗在 T2 处理下，各器官生物量及增长量显著高于其他处理。进入水分胁迫后期（108 d），3 个树种幼苗各器官生物量总体随水分胁迫加剧呈降低趋势。

表 3　水分胁迫对 3 种幼苗干物质分配的影响 †

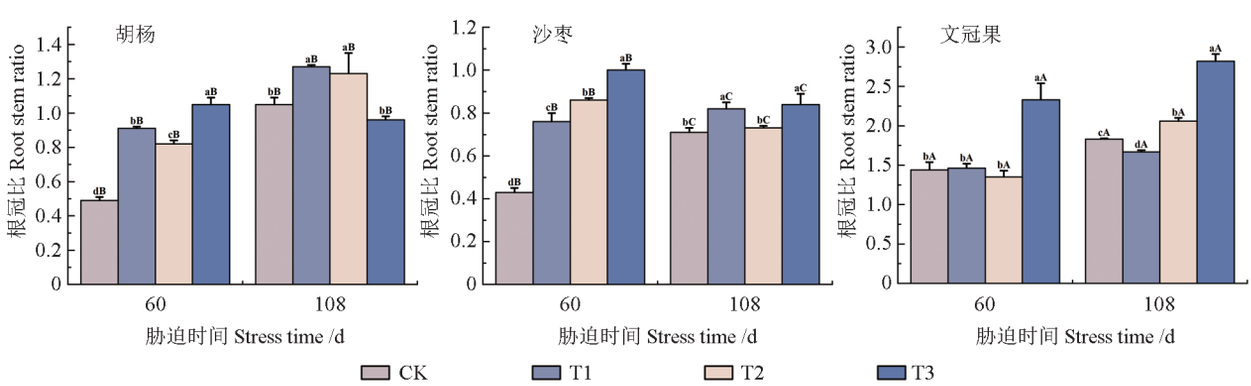
Table 3　Effects of water stress on seedling dry matter distribution of three tree species

胁迫时间 Stress time /d	树种 Tree species	水分处理 Treatment	根生物量 Root biomass /g	茎生物量 Stem biomass /g	叶生物量 Leaf biomass /g
60	胡杨	CK	8.14±0.47 bC(32.92%)	12.31±1.29 abB(49.77%)	4.28±0.30 bB(17.31%)
		T1	14.71±2.39 aB(47.78%)	10.88±1.21 bC(35.35%)	5.19±0.31 aB(16.87%)
		T2	15.66±1.08 aA(44.98%)	13.68±1.23 aA(39.28%)	5.48±0.50 aA(15.73%)
		T3	10.26±0.39 bC(51.06%)	7.51±0.48 cB(37.40%)	2.32±0.27 cB(11.54%)
	沙枣	CK	10.67±1.13 cB(29.83%)	16.23±0.77 bA(45.37%)	8.87±1.23 aA(24.81%)
		T1	24.01±0.36 aA(43.27%)	21.59±1.13 aA(38.91%)	9.89±0.91 aA(17.82%)
		T2	11.10±0.47 cB(46.25%)	8.83±0.38 cB(36.77%)	4.08±0.21 bB(16.99%)
		T3	21.04±1.36 bA(49.88%)	15.88±1.64 bA(37.66%)	5.26±0.40 bA(12.46%)
	文冠果	CK	16.72±1.48 bA(58.85%)	10.16±1.52 bB(35.78%)	1.53±0.29 bC(5.37%)
		T1	26.34±2.03 aA(59.27%)	15.26±1.72 aB(34.34%)	2.84±0.36 aC(6.39%)
		T2	17.61±1.27 bA(57.29%)	10.74±1.29 bB(34.95%)	2.38±0.38 aC(7.76%)
		T3	18.05±1.51 bB(69.72%)	6.61±1.13 cB(25.52%)	1.23±0.23 bC(4.76%)
108	胡杨	CK	22.91±1.89 bcC(51.14%)	15.03±0.83 aC(33.54%)	6.87±0.29 aB(15.32%)
		T1	27.28±1.96 aC(56.02%)	15.64±1.12 aB(32.12%)	5.78±0.53 abB(11.87%)
		T2	23.97±2.94 abC(54.79%)	14.24±2.92 aB(32.54%)	5.54±1.31 abB(12.67%)
		T3	19.45±0.84 cC(49.02%)	15.25±0.29 aB(38.42%)	4.98±0.20 bB(12.55%)
	沙枣	CK	43.14±1.83 aB(41.57%)	41.74±3.42 aA(40.22%)	18.90±0.88 aA(18.21%)
		T1	37.82±1.57 bA(45.15%)	32.15±2.03 bA(38.38%)	13.79±1.14 bA(16.46%)
		T2	26.50±1.18 cB(42.10%)	26.01±1.70 cA(41.34%)	10.42±0.07 cA(16.56%)
		T3	22.27±2.04 dB(45.61%)	19.34±0.70 dA(39.62%)	7.21±0.09 dA(14.76%)
	文冠果	CK	55.77±3.46 aA(64.62%)	23.88±1.23 aB(27.66%)	6.66±0.69 aB(7.72%)
		T1	33.22±1.98 cB(62.49%)	16.78±1.32 bB(31.57%)	3.16±0.11 bC(5.94%)
		T2	46.53±3.32 bA(67.29%)	18.30±1.76 bB(26.46%)	4.32±0.28 cB(6.25%)
		T3	29.78±0.22 cA(73.83%)	8.12±0.09 cC(20.13%)	2.44±0.32 cC(6.04%)

† 括号内数字为各器官生物量占总生物量的比例。The numbers in parentheses indicate the proportion of each organ's biomass to the total biomass.

2.2.2　水分胁迫对 3 种幼苗根冠比的影响

由图 1 可知，在整个水分胁迫期间，3 种幼苗的根生物量占总生物量比例、根冠比均随水分胁迫程度的加剧呈显著上升趋势，而茎、叶生物量占比则相应降低。各水分胁迫处理下，文冠果的根冠比均显著高于沙枣和胡杨幼苗（$P < 0.05$），不同树种间及同一树种不同处理间均存在显著差异（$P < 0.05$），其中根冠比在 T3 处理下最高（除胁迫 108 d 的胡杨幼苗例外）。上述结果表明，水分胁迫显著抑制了 3 种幼苗地上部分的生物量积累，并改变了植株各器官之间生物量分配格局。3 个树种幼苗可通过增加根系生物量分配、根冠比来抵御干旱胁迫，且短期适度水分胁迫（60 d）可增加幼苗生物量的积累。



图中不同小写字母表示不同胁迫处理间差异显著（$P < 0.05$）；不同大写字母表示不同树种间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences among different stress treatments ($P < 0.05$); different uppercase letters indicate significant differences among different tree species ($P < 0.05$). The same below.

图 1　水分胁迫对 3 种幼苗根冠比的影响

Fig. 1　Effects of water stress on seedling root-shoot ratio of three tree species

2.3 水分胁迫对 3 个树种幼苗光合特性的影响

由图 2 可知，在整个生长期内，3 个树种幼苗的净光合速率（Pn）、气孔导度（Gs）、蒸腾速率（Tr）随水分胁迫程度增加呈下降趋势，同一树种在不同水分胁迫处理下 Pn、Gs、Tr 均存在显著差异（$P < 0.05$）。不同水分胁迫下胡杨幼苗的 Pn、Gs、Tr 均显著高于沙枣和文冠果幼苗（$P < 0.05$），文冠果幼苗的 Pn、Gs、Tr 则显著高于沙枣幼苗（$P < 0.05$）。综合分析表明，胡杨属于高光合、高蒸腾型树种，沙枣为低光合、低蒸腾型树种，文冠果的光合与蒸腾特性介于二者之间。

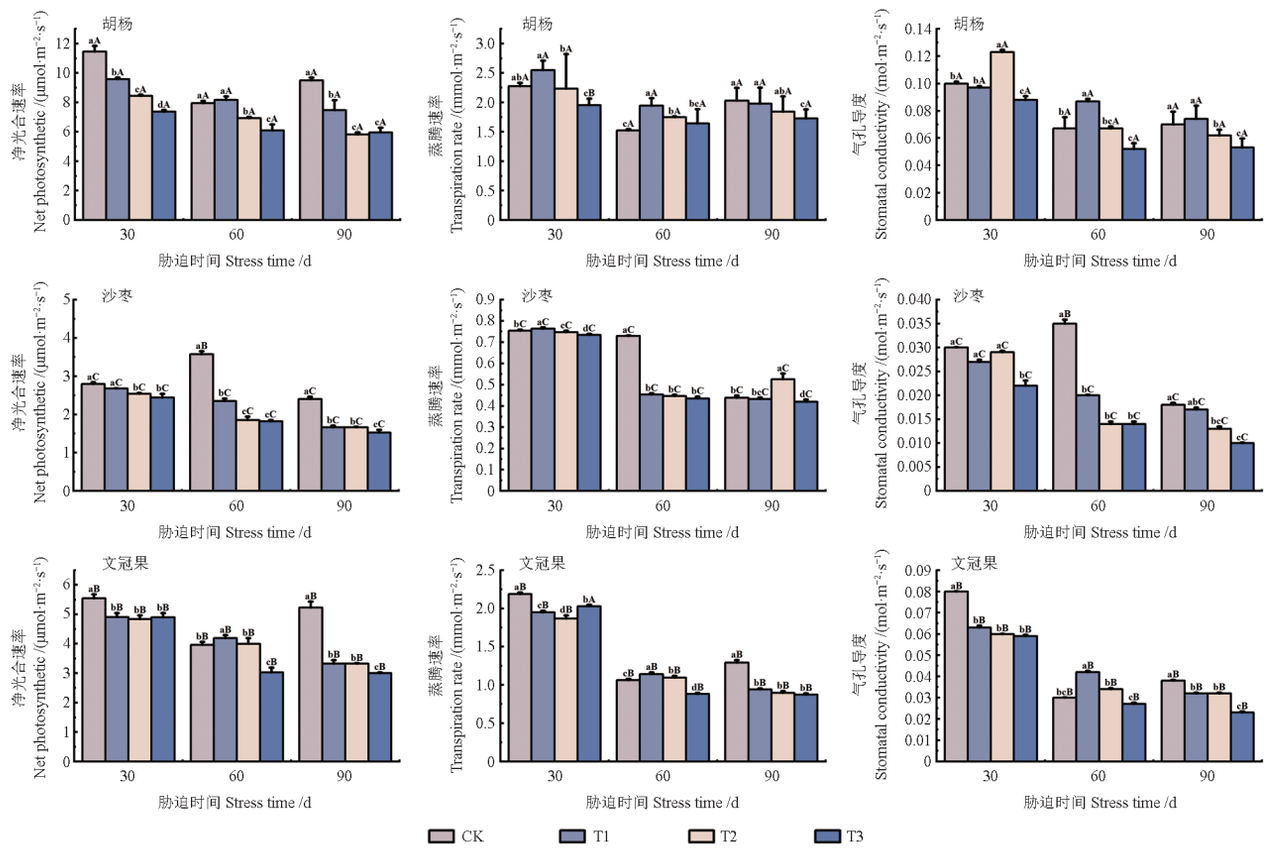


图 2 水分胁迫对 3 种幼苗光合特性的影响

Fig. 2 Effects of water stress on seedling photosynthetic characteristics of three tree species

2.4 水分胁迫对 3 个树种幼苗水分利用效率的影响

随着水分胁迫程度的增强，3 个树种幼苗的水分利用效率（WUE）普遍呈下降趋势（图 3）。在同一胁迫时间与同一水分处理下，3 个树种幼苗的 WUE 均存在显著差异（$P < 0.05$）。各水分处理下，胡杨、沙枣幼苗的水分利用效率高于文冠果。在 T3 处理下，沙枣幼苗的水分利用效率最高，说明沙枣幼苗可通过减小气孔开度来减少蒸腾失水，从而提高水分利用效率。

2.5 水分胁迫对 3 个树种幼苗生理生化指标的影响

2.5.1 水分胁迫对 3 个树种幼苗叶绿素含量的影响

3 个树种幼苗的叶绿素含量随水分胁迫程度的增强呈显著下降趋势（$P < 0.05$），且随着胁迫时间的延长，胡杨和文冠果幼苗叶绿素含量的降幅进一步增大（图 3）。水分胁迫初期（30 d），各处理下文冠果幼苗叶绿素含量均显著高于其他 2 个树种（$P < 0.05$）；而在水分胁迫中后期（60 ～ 90 d），沙枣幼苗叶绿素含量显著高于文冠果、胡杨幼苗（$P < 0.05$）。

2.5.2 水分胁迫对 3 个树种幼苗丙二醛含量的影响

3 个树种幼苗的丙二醛（MDA）含量总体上随水分胁迫程度的加剧呈上升趋势（图 4）。在整个胁迫周期内，相同水分胁迫处理下，沙枣幼苗的 MDA 含量均高于胡杨。与 CK 比较，T3 处理下沙枣、胡杨幼苗的 MDA 含量达到最高，而文冠果幼苗的 MDA 含量在 CK 和 T3 处理下均维持在较高水平。整个胁迫期间，文冠果幼苗叶片的 MDA 含量显著高于其他 2 个树种（$P < 0.05$），表明水分胁迫下文冠果幼苗的细胞膜脂过氧化程度更严重，其耐旱性相对较差。

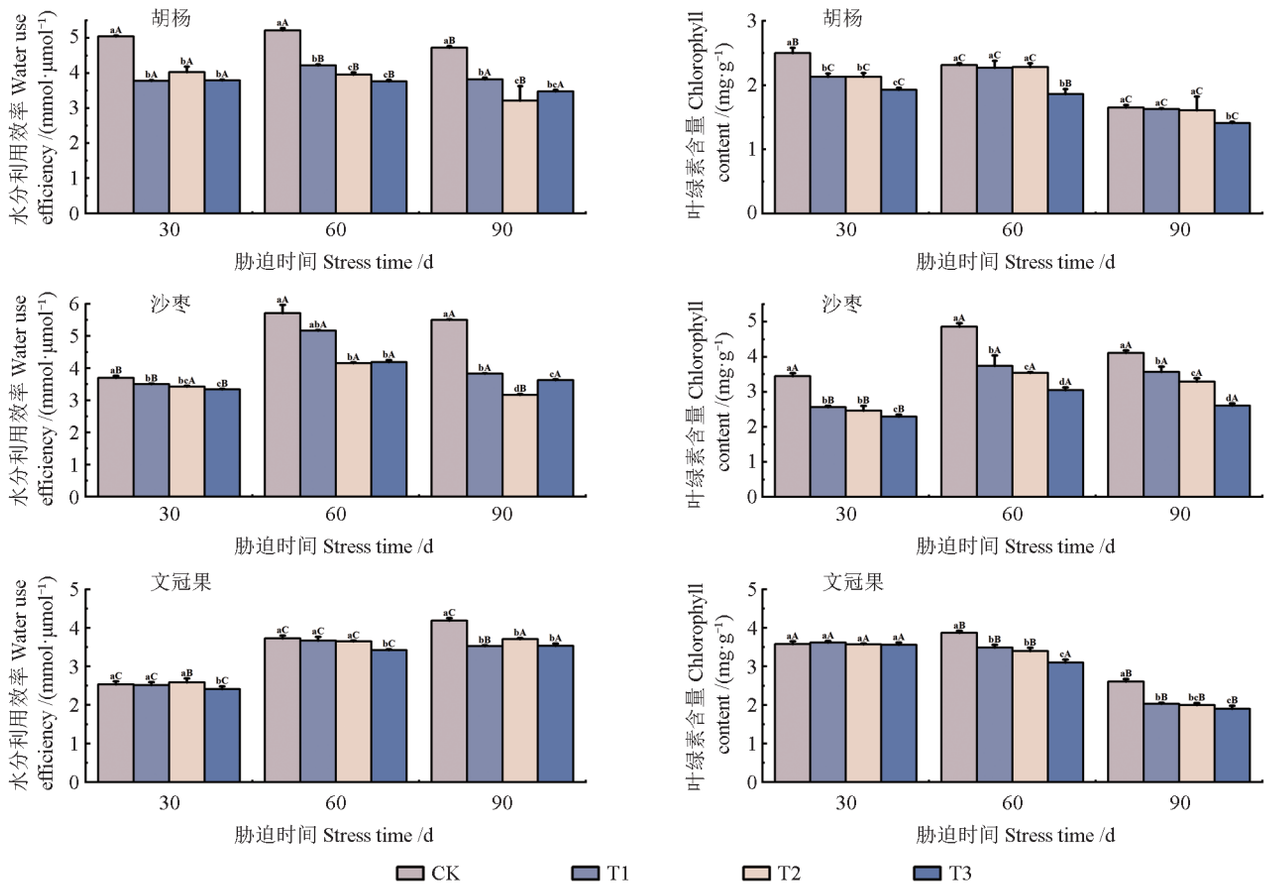


图 3　水分胁迫对 3 种幼苗水分利用效率和叶绿素含量的影响

Fig. 3　Effects of water stress on seedling WUE and chlorophyll content of three tree species

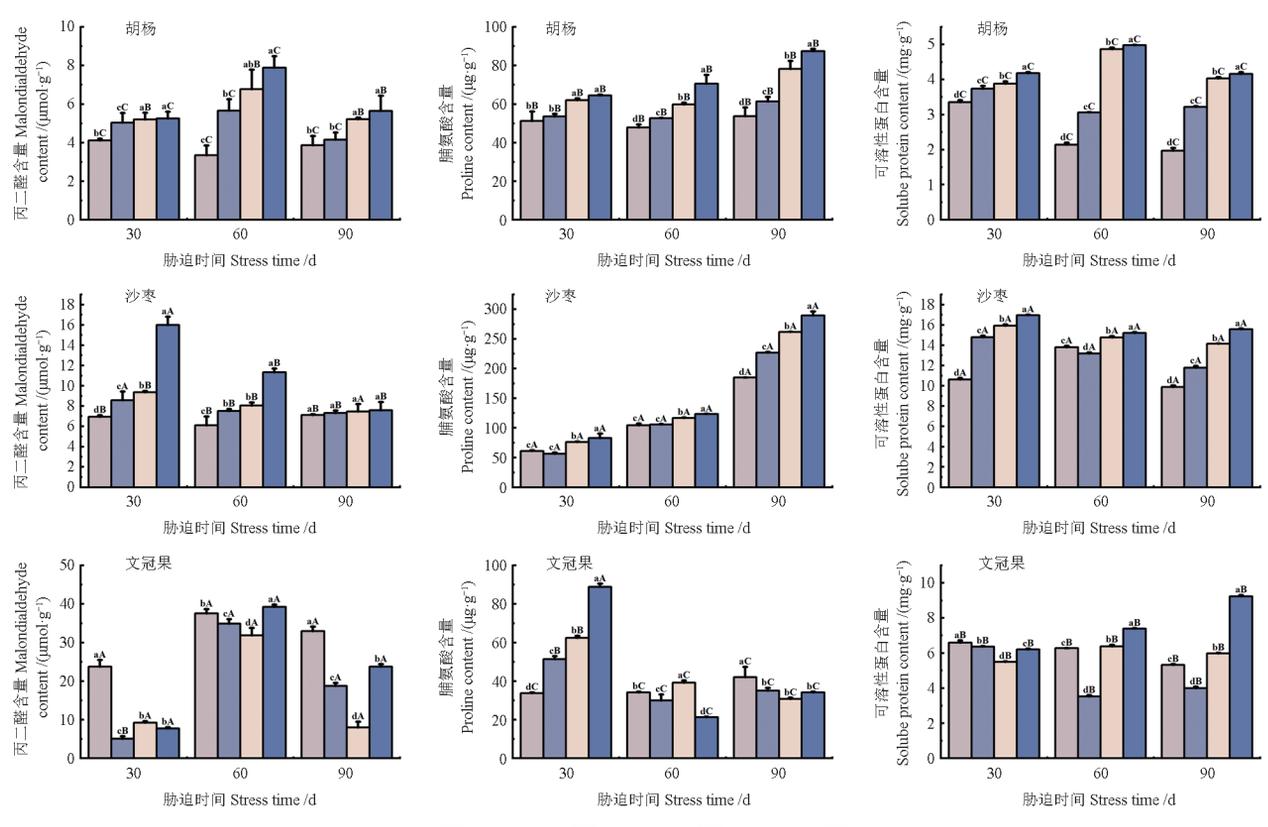


图 4　水分胁迫对 3 种幼苗丙二醛和渗透调节物质含量的影响

Fig. 4　Effects of water stress on seedling malondialdehyde and osmotic adjustment substance contents of three tree species

2.5.3　水分胁迫对 3 个树种幼苗游离脯氨酸、可溶性蛋白含量的影响

胡杨与沙枣幼苗的游离脯氨酸（Pro）含量、可溶性蛋白（SP）含量均随水分胁迫加剧呈上升趋势（图 4），而文冠果幼苗的 Pro 含量在胁迫前 30 d 呈增加趋势，胁迫 60 ～ 90 d 则呈下降趋势。整个水分胁迫期间，相同水分处理下沙枣幼苗的 Pro、SP 含量均显著高于其他 2 个树种（$P < 0.05$）；与 CK 相比，不同水分处理下沙枣 Pro、SP 含量的增长量也高于其他 2 个树种（$P < 0.05$）。文冠果幼苗的 Pro 含量在水分胁迫前 30 d 显著增加（$P < 0.05$），之后反而下降，表明胁迫中后期文冠果幼苗自身的渗透调节能力可能逐渐减弱，长期胁迫已对其生理代谢产生一定负面影响，导致 Pro 含量的合成减少或消耗增加。

2.5.4　水分胁迫对 3 个树种幼苗超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性的影响

沙枣幼苗的过氧化物酶（POD）活性随水分胁迫加剧呈上升趋势，胡杨和文冠果幼苗的 POD 活性则在胁迫 30、90 d 表现出升高趋势（图 5）。胡杨幼苗 POD 活性在处理 90 d 时显著上升，而沙枣幼苗 POD 活性在 30 ～ 60 d 内显著增加（$P < 0.05$）。在整个水分胁迫过程中，不同水分处理下沙枣幼苗均能维持较高的 POD 活性，且显著高于其他 2 个树种（$P < 0.05$）；胡杨与文冠果幼苗始终维持较高的超氧化物歧化酶（SOD）活性，显著高于沙枣（$P < 0.05$）。胡杨与文冠果幼苗的 SOD 活性在整个胁迫周期无明显波动，而沙枣幼苗在胁迫后期 SOD 活性增幅明显变大。上述结果表明，沙枣幼苗前期通过提升 POD 活性来清除活性氧，后期则通过 POD 与 SOD 协同作用增强抗氧化防御能力，而胡杨和文冠果幼苗将 SOD 作为主要的抗氧化防御系统以应对水分胁迫。

2.6　3 种幼苗相关抗旱指标的相关性及主成分分析

为了明确不同抗旱性指标间的关联程度，实现抗旱指标降维并提取少数典型指标以简化抗旱性评价，对 3 个树种幼苗的相关抗旱指标进行了相关性分析和主成分分析。由图 6A 可知，胡杨幼苗株高增长量（HI）与地径增长量（GI）、Pn 呈极显著正相关（$P < 0.001$），与 WUE 呈显著正相关（$P < 0.05$），而与 MDA、Pro、SP、SOD 呈极显著负相关（$P < 0.001$）；WUE 与 Pn、Tr 呈极显著正相关

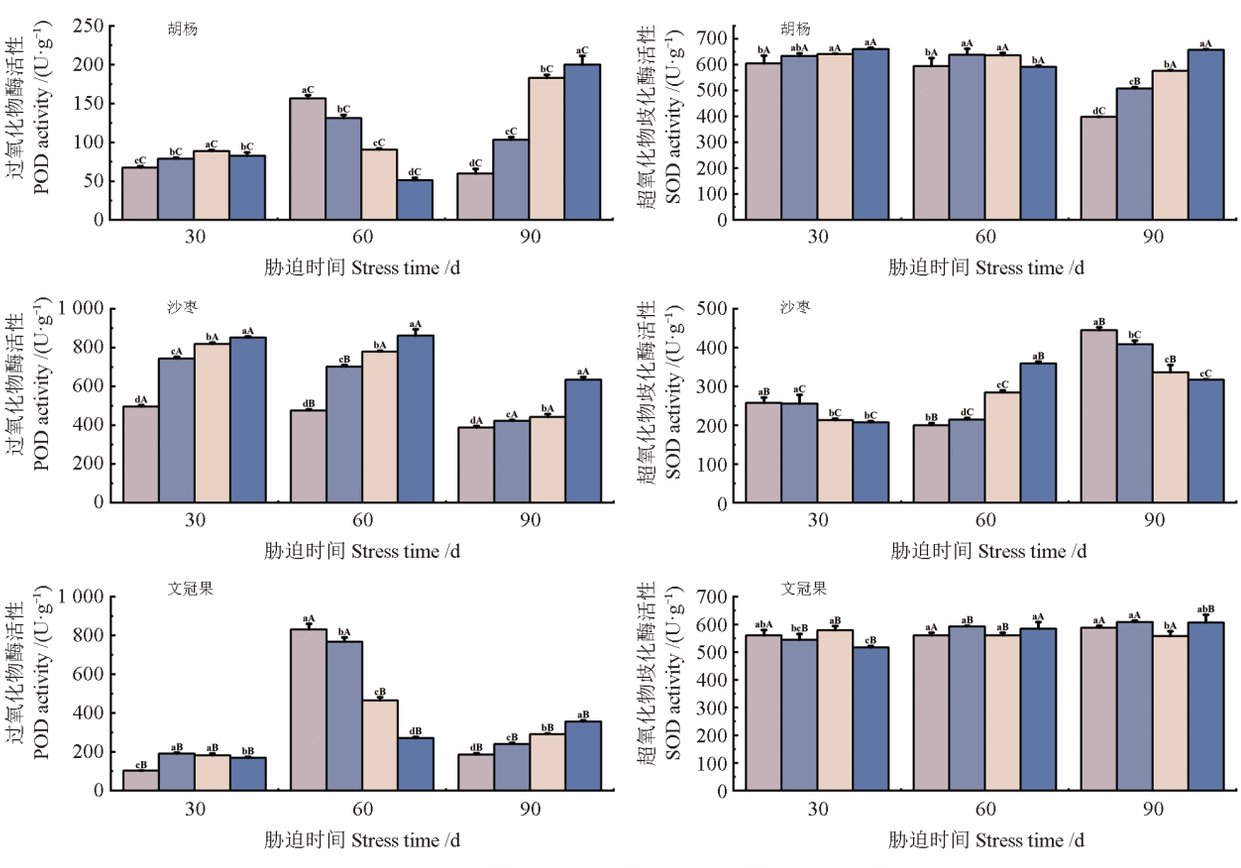


图 5　水分胁迫对 3 种幼苗保护酶活性的影响

Fig. 5　Effects of water stress on seedling protective enzyme activities of three tree species

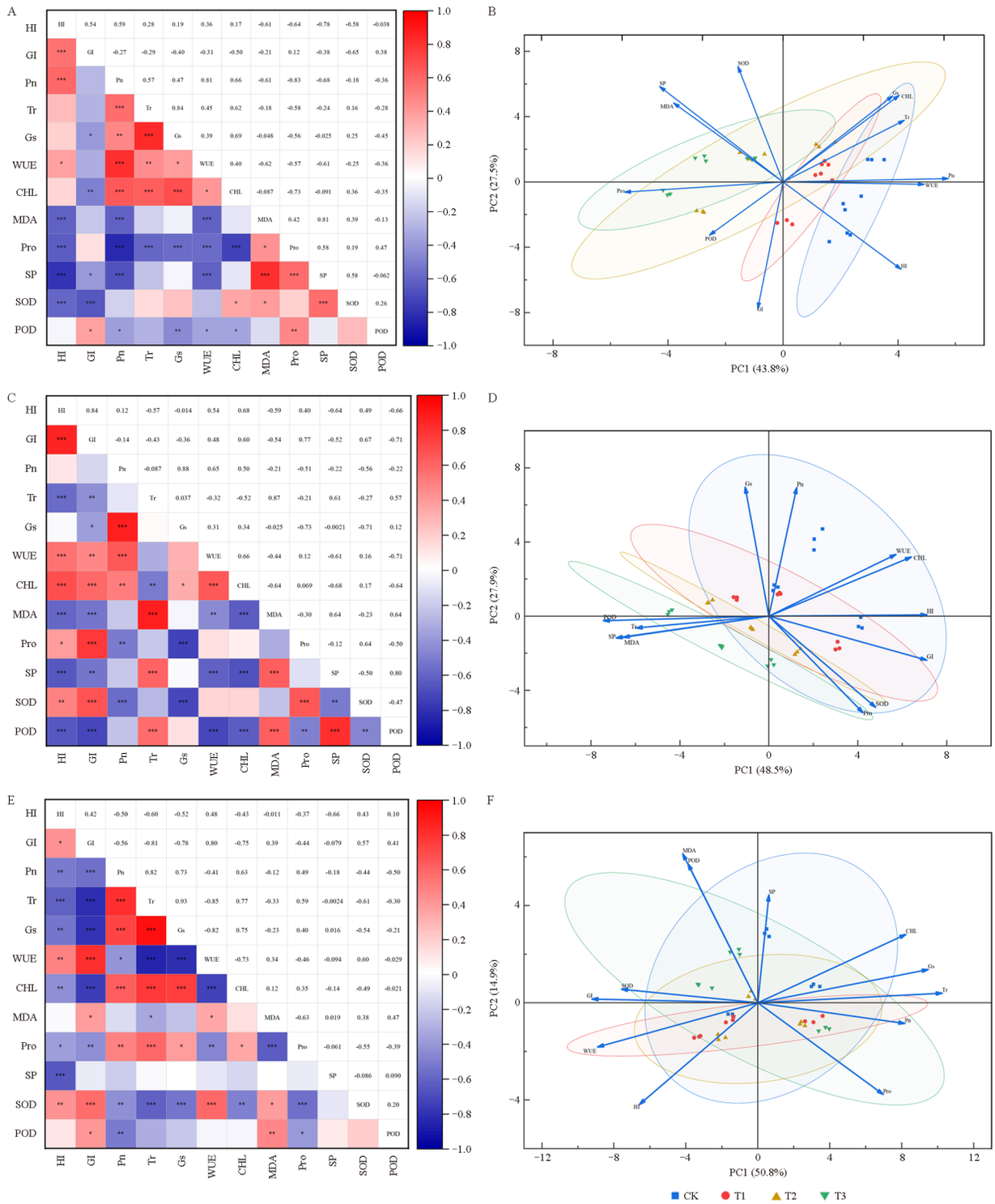


图 A、C、E 中蓝色代表显著负相关，红色代表显著正相关。* 表示 $P < 0.05$；** 表示 $P < 0.01$；*** 表示 $P < 0.001$。
In Figure A, C, and E, blue color represents significant negative correlation and red color represents significant positive correlation.
* indicates $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$; *** indicates $P < 0.001$.

图 6　水分胁迫下 3 种幼苗各指标间相关性和主成分分析结果

Fig. 6　Results of correlation and principal component analysis among various seedling indicators of three tree species under water stress

（$P < 0.01$），与 MDA、Pro、SP 呈极显著负相关（$P < 0.001$）；SP 与 MDA、Pro、SOD 呈极显著正相关（$P < 0.001$），与 HI、Pn、WUE 呈极显著负相关（$P < 0.001$）。主成分分析结果显示，胡杨幼苗 T2 处理和 T3 处理的特征值较为接近，与 T1 处理和 CK 处理差异显著。由图 6B 可知，前两个主成分的累计贡献率分别为 43.8%、27.5%，PC1 中 Pn、WUE、HI、CHL、Pro 的载荷量较大，PC2 中 SP、SOD、GI 的载荷量较大，表明胡杨幼苗以 SP、SOD 协同来抵御水分胁迫。

由图 6C 可知，沙枣幼苗 HI 与 GI、WUE、CHL、SOD 呈极显著正相关（$P < 0.01$），与 Tr、MDA、SP 呈极显著负相关（$P < 0.001$）；POD 与 MDA、SP 呈极显著正相关（$P < 0.001$），与生长指标呈极显著负相关。主成分分析结果（图 6D）显示：T1、T2、T3 处理的沙枣幼苗特征值较为相似，与 CK 处理差异显著。PC1 贡献率为 48.5%，其中 HI、GI、WUE、CHL、SP、POD 的载荷量较大；PC2 贡献率为 27.9%，其中 Pn、Gs、Pro 的载荷量较大，表明沙枣幼苗主要通过 SP、抗氧化酶 SOD 和 POD 的协同作用来减轻干旱胁迫对细胞的伤害，进而增强对干旱胁迫的耐受性。

由图 6E 可知，文冠果幼苗 HI、GI 与 WUE、SOD 活性呈极显著正相关（$P < 0.01$），与 Pn 等光合参数、CHL、Pro、SP 含量呈显著负相关（$P < 0.05$）；MDA 含量与 Pro 含量呈极显著负相关（$P < 0.001$），与 POD、SOD 活性呈显著正相关（$P < 0.05$）。主成分分析结果（图 6F）显示，PC1 贡献率为 50.8%，其中 Pn、Tr、Gs、WUE、CHL、Pro 含量的载荷量较大；PC2 贡献率为 14.9%，其中 MDA、SP 含量、POD 活性的载荷量较大，表明文冠果幼苗主要通过抗氧化酶系统（POD、SOD）清除体内活性氧，同时通过 Pro 调节细胞液浓度，维持细胞相对膨压，并提高 WUE 来适应水分胁迫。

2.7 抗旱性综合评价

为综合评价胡杨、沙枣、文冠果 3 个树种幼苗的抗旱能力，本研究选取重度干旱胁迫处理（T3）下的各项指标数据，采用隶属函数法进行综合分析。结果（表 4）显示，胡杨、沙枣、文冠果幼苗的隶属函数平均值分别为 0.46、0.61、0.37。根据“隶属函数平均值越高，抗旱性越强”的评价标准，可得出 3 个树种幼苗的抗旱性强弱顺序为：沙枣＞胡杨＞文冠果。

3 讨 论

3.1 水分胁迫对 3 种幼苗生长的影响

干旱胁迫可诱导植物产生一系列复杂的生理生态与形态响应，其中最为直观的是植株形态上的变化，具体表现为地上部分的株高、地径和生物量累积增长受到抑制，且不同品种的响应机制存在明显差异 [21-23]。在不同水分处理条件下，各树种幼苗的株高和地径增长表现出显著差异，3 个树种幼苗株高和地径的增长量均在 T1 处理下显著高于其他水分处理，表明适度干旱胁迫可能出现“补偿”或促进生长的现象 [24]。此外，3 个造林树种幼苗在干旱胁迫下的生长特性和生物量分配策略存在差异：文冠果幼苗的株高、地径及各器官生物量累积量显著低于沙枣，但其根冠比显著高于沙枣，表明水分胁迫下文冠果会将更多生物量分配至根系，以增强其养分吸收与抗逆能力 [25]；沙枣可能将更多资源分配给地上部分，促进地上部分的生长；胡杨介于两者之间，更偏向于文冠果。

表 4 水分胁迫下 3 种幼苗各指标的隶属函数值
Table 4 Subordinate function values of various seedling indicators of three tree species under water stress

指标 Index	隶属函数值 Subordinate function values		
	胡杨 *Populus euphratica*	沙枣 *Elaeagnus angustifolia*	文冠果 *Xanthoceras sorbifolium*
株高增长量 HI	0	1.00	0.07
地径增长量 GI	0.28	1.00	0
根生物量 RB	0.00	0.75	1.00
茎生物量 SB	0.39	1.00	0
叶生物量 LB	0.41	1.00	0
根冠比 R/S	0.05	0	1.00
叶绿素 Chl	0	0.82	1.00
可溶性蛋白 SP	0	1.00	0.28
脯氨酸 Pro	0.22	1.00	0
丙二醛 MDA	1.00	0.18	0
超氧化物歧化酶 SOD	1.00	0	0.80
过氧化物酶 POD	0	1.00	0.30
净光合速率 Pn	1.00	0	0.38
气孔导度 Gs	1.00	0	0.43
蒸腾速率 Tr	1.00	0	0.59
水分利用效率 WUE	0.93	1.00	0
平均值 Mean	0.46	0.61	0.37
抗旱性排序 DRR	2	1	3

3.2 水分胁迫对 3 种幼苗生理特性的影响

丙二醛（MDA）含量的变化能够反映植物在胁迫下细胞膜的完整性、膜脂过氧化程度以及膜系统的受损状况。通常情况下，MDA 含量越高，表明细胞膜受到的损伤越严重 [26]。本研究中，胡杨和沙枣幼苗的 MDA 含量随水分胁迫程度的加剧而逐渐升高，与张婷等 [27] 的研究结果一致。文冠果幼苗的 MDA 含量在 CK 和 T3 处理下显著高于 T1 和 T2 处理，这可能是因为文冠果幼苗不耐涝 [28]，在土壤相对含水量为 75% ～ 80% 田间持水量时，文冠果幼苗处于水淹胁迫状态，膜脂化程度严重，导致 MDA 含量升高。值得注意的是，文冠果幼苗的 MDA 含量在整个胁迫周期都显著高于沙枣和胡

杨幼苗，表明文冠果幼苗的抗旱能力较差。

当植物受到干旱胁迫时，会通过释放可溶性蛋白、游离脯氨酸等渗透调节物质来调控细胞液的浓度，以维持细胞渗透压[29]，降低渗透势，进而促进细胞吸收水分，保障植物的正常生理活动[30]。胡杨和沙枣幼苗随着胁迫时间的延长，脯氨酸含量呈上升趋势，而文冠果则呈下降趋势，此差异表明文冠果可能在胁迫初期提前积累脯氨酸，将其作为一种缓解后期氧化损伤的潜在适应性策略，这一早期响应机制与文冠果中后期MDA含量显著升高的变化特征一致，进一步证实了文冠果通过提前储备脯氨酸来增强细胞抗氧化能力，从而维持细胞膜渗透压稳定。在可溶性蛋白积累方面，3个树种幼苗均呈现出随胁迫时间延长和程度加剧而持续增长的趋势，且该变化趋势与MDA含量变化高度吻合，这表明随着胁迫加剧，细胞膜脂过氧化程度不断加深，植物通过合成更多可溶性蛋白作为渗透调节物质，维持细胞内渗透压平衡，增强细胞保水能力，以抵御胁迫伤害。进一步研究发现，3个树种幼苗的可溶性蛋白累积量均高于脯氨酸累积量，表明可溶性蛋白在应对植物损伤中的贡献度高于脯氨酸，这一结论与主成分分析结果一致。胁迫后期文冠果幼苗脯氨酸含量下降而可溶性蛋白含量却持续增加，原因在于胁迫初期优先将能量用于脯氨酸的合成与积累，快速提升细胞的渗透调节能力，以应对早期逆境胁迫；而后期则将代谢资源转向可溶性蛋白合成，通过维持细胞代谢来应对持续的干旱胁迫环境，这与马兴羽等[31]的研究结果一致。

干旱胁迫会导致植物产生过量的活性氧自由基，而植物可以通过激活抗氧化系统（如SOD、POD等）清除自由基，从而减轻细胞膜脂过氧化程度，增强其对干旱胁迫的适应性[32]。3个树种幼苗的SOD、POD活性随胁迫程度的加剧总体呈上升趋势，随胁迫时间的延长则呈先升高后降低的趋势，这与王培等[33]的研究结果一致。胡杨幼苗的SOD活性显著高于沙枣和文冠果幼苗，表明胡杨幼苗主要通过强化SOD介导的活性氧（ROS）清除机制，提升自身抗旱能力。沙枣幼苗则表现出独特的复合防御策略，其POD活性显著高于胡杨和文冠果幼苗，同时维持较高水平的SOD活性，且SP积累量同步增加，说明沙枣幼苗通过协同调控POD、SOD抗氧化酶活性与渗透调节物质合成，构建多层次的抗旱防御体系。相较之下，文冠果幼苗主要依赖POD和SOD组成的抗氧化酶系统，结合Pro的渗透调节作用，实现对ROS的有效清除与细胞稳态的维持。3种幼苗在抗氧化系统组成与作用模式上的差异，揭示了不同物种在干旱胁迫下具有多样化的生理适应策略。胡杨、文冠果幼苗POD活性在胁迫60 d时随胁迫强度的增加而下降，这可能是由于水分处理初期胡杨、文冠果幼苗叶片POD活性升高，可有效避免膜脂过氧化，但随着处理时间的延长，因长期水分胁迫导致机体内蛋白质合成受阻或分解，POD酶活性降低。这表明叶片细胞对活性氧的清除很可能存在一个时间上的阈值，在阈值范围（＜30 d）内，植株能够提高保护酶活性，有效清除自由基；当超过这个阈值，保护酶活性便会下降，植物可能受到活性氧损害[34]。沙枣SOD活性在90 d后随胁迫强度的增加呈显著下降趋势，这可能与MDA含量对SOD活性的不可逆抑制作用有关[35]。随着水分胁迫时间的延长，沙枣叶片MDA含量不断积累，当MDA含量超过细胞自身调节能力时，就会导致SOD活性的降低，因此，在胁迫后期，随着MDA含量的急剧增加，沙枣幼苗SOD活性呈下降趋势[34]。

植物体内叶绿素含量的变化能够揭示植物对水分胁迫的敏感性，并直接影响植物光合产量[21]。本研究结果表明，3个树种幼苗的叶绿素含量均随胁迫时间的延长和胁迫程度的加剧呈降低趋势，其中在重度干旱胁迫条件下，叶绿素含量大幅度下降，植物光合潜力受到显著抑制。这可能是由于干旱胁迫诱导叶绿体发生膜脂过氧化，产生的活性氧破坏了叶绿素的合成，与罗杰等[36]的研究结果一致。随着胁迫时间的延长，胡杨和文冠果幼苗的叶绿素含量呈下降趋势，而沙枣幼苗则呈先升高后降低的趋势，这可能是由于前期植物体内产生应激反应所致，而随着干旱的持续进行，叶绿素含量总体呈下降趋势，这表明干旱胁迫对叶绿素的影响存在滞后性[37]。

植物可通过关闭气孔等方式提高自身抗旱性，但关闭气孔切断外界向叶绿体提供CO_2的途径，从而引起光合速率的下降[38]。3个造林树种幼苗的光合参数整体随着胁迫程度的加剧呈下降趋势，与朱婧等[39]的研究结果一致。本研究显示，沙枣幼苗的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度显著低于胡杨和文冠果，属于低光合、低蒸腾树种。但在重度干旱胁迫下，沙枣幼苗的水分利用效率最高，说明沙枣幼苗通过关闭气孔、降低蒸腾速率来提高水分利用效率[40]。

4 结 论

本研究揭示了4个水分梯度下胡杨、沙枣和

文冠果 3 个树种幼苗在生长、光合及抗逆三个方面的抗旱策略的差异。1）生长策略方面。沙枣幼苗将资源优先分配给地上部分，文冠果幼苗优先向根部分配生物量，通过增大根冠比提升根部吸水能力；相较之下，胡杨幼苗未表现出明显的资源分配偏向性，地上部分与地下部分生长较为均衡。2）光合特性方面。沙枣幼苗维持低光合、低蒸腾的生长状态，通过降低水分消耗来提高水分利用效率；胡杨幼苗则将资源优先用于高代谢过程，始终维持较高的蒸腾速率和光合速率；文冠果幼苗的光合能力介于两者之间，其光合速率与蒸腾速率既未达到胡杨的高代谢水平，也未呈现沙枣的低耗水特征，呈现中度适应特征。3）抗逆机制方面。沙枣幼苗以 POD 活性的快速响应和初期大量积累为特征，有效缓解氧化损伤；胡杨幼苗则以持续维持较高 SOD 活性为主要特征，在中、重度干旱胁迫下能及时清除光合系统产生的超氧阴离子，保护光合结构免受不可逆损害；文冠果主要依赖脯氨酸积累进行渗透调节，通过维持细胞膨压来应对干旱胁迫。综上，3 个树种的抗旱策略可概括为：沙枣幼苗采取低耗水保守型策略，胡杨幼苗实行高代谢维持型策略，文冠果幼苗则选择强根系保水型策略。结合隶属函数法综合评价结果，3 个树种幼苗的抗旱性由强到弱依次为：沙枣＞胡杨＞文冠果。

基于上述研究结果，建议在极端干旱区防护林网构建中，优先选用沙枣作为核心造林树种。同时，针对单一防护林在地下水水位下降时易出现枯梢的问题，可采用混交造林模式优化群落结构，增强物种多样性与群落整体稳定性。

参考文献：

[1] 唐宗树 , 李生宇 , 郑伟 , 等 . 塔中沙漠植物园 5 种多年生植物叶片特征及其抗逆性评估 [J]. 草业科学 ,2025,42(11):2813-2823.
Tang Z S, Li S Y, Zheng W, et al. Evaluation of tesponses and adaptability of five perennial desert plants to environmental conditions in the central Taklamakan desert[J]. Pratacultural Science, 2025,42(11):2813-2823.

[2] 文迪 , 吕爱锋 , 李涛辉 , 等 . 塔里木盆地农业光热资源特征及开发潜力分析 [J]. 干旱区研究 ,2025,42(2):384-396.
Wen D, Lü A F, Li T H, et al. Characteristics and development potential analysis of agricultural solar-thermal resources in the Tarim basin[J]. Arid Zone Research,2025,42(2):384-396.

[3] 苏敬媛 . 黄土高原典型流域土壤水分时空变异及其养分特征对不同植被类型的响应 [D]. 杨凌 : 西北农林科技大学 ,2019:15-18.
Su J Y. Characteristics of soil moisture and nutrients under different vegetation types patterns in the water-wind-erosion crisscross region of Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University,2019:15-18.

[4] 韩路 , 冯宇 , 李沅楷 , 等 . 地下水埋深对灰胡杨叶片与土壤养分生态化学计量特征及其内稳态的影响 [J]. 植物生态学报 , 2024,48(1):92-102.
Han L, Feng Y, Li Y K, et al. Effects of groundwater depth on carbon, nitrogen, phosphorus ecological stoichiometric and homeostasis characteristics of *Populus pruinosa* leaves and soil in Tarim basin, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024,48(1):92-102.

[5] Gupta A, Rico-Medina A, Caño-Delgado A I. The physiology of plant responses to drought[J]. Science,2020,368:266-269.

[6] 谢雨霜 , 韩冰鑫 , 柳荻 , 等 . 干旱对白桦和水曲柳木质部形成过程和生长的影响 [J]. 应用生态学报 ,2025,36(5):1289-1297.
Xie Y S, Han B X, Liu D, et al. Effects of drought on the xylem formation process and growth of *Betula platyphylla* and *Fraxinus mandshurica*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(5):1289-1297.

[7] 王沛芳 , 赵少欣 , 饶磊 , 等 . 水分胁迫下菜苔叶绿素分布演化的高光谱分析及预警研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025,53(5):58-64.
Wang P F, Zhao S X, Rao L, et al. Hyperspectral analysis and early warning research on distribution evolution of chlorophyll in Chinese cabbage under water stress[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(5):58-64.

[8] 李泽坤 , 谢军红 , 杨通 , 等 . 耕作方法与施氮量对旱作农田土壤团聚体稳定性及玉米产量的影响 [J]. 水土保持学报 , 2025,39(4):313-323.
Li Z K, Xie J H, Yang T, et al. Effects of tillage methods and nitrogen application rates on dryfed maize yield and stability of soil aggregates[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2025,39(4):313-323.

[9] 张玲雪 , 李小锋 , 屈军 , 等 . 水盐胁迫对四翅滨藜生理生长特性的影响 [J]. 干旱区研究 ,2024,41(10):1767-1777.
Zhang L X, Li X F, Qu J, et al. Effects of water and salt stress on the physiological growth characteristics of *Atriplex canescens*[J]. Arid Zone Research,2024,41(10):1767-1777.

[10] 杨艳 , 陈景震 , 吉悦娜 , 等 . 紫色土干旱胁迫对栀子生长及生理的影响 [J]. 湖南林业科技 ,2023,50(5):28-33.
Yang Y, Chen J Z, Ji Y N, et al. Effects of drought stress on growth and physiological indexes of *Gardenia jasminoides* in purple soil[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2023,50(5):28-33.

[11] 姜雅文 , 解文艳 , 何久兴 , 等 . 微生物种子包衣促进干旱条件下小麦种子萌发及幼苗生长 [J]. 中国农业气象 ,2025,46(5):609-618.
Jiang Y W, Xie W Y, He J X, et al. Microbial seed coating promote wheat seed germination and seedling growth under drought stress condition[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2025,46(5):609-618.

[12] 廖小龙 , 王兴胜 , 陈勇 , 等 . 杨属植物 HKT 基因家族成员鉴定与盐胁迫下的表达模式分析 [J]. 浙江农业学报 ,2025,37(10):2104-2115.
Liao X L, Wang X S, Chen Y, et al. Identification of the HKT gene family members in *Populus* species and analysis of their expression patterns under salt stress[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2025,37(10):2104-2115.

[13] 杨学雷 . 西北地区沙枣造林技术分析 [J]. 现代园艺 ,2025,48(2):69-70,73.
Yang X L. Analysis on afforestation techniques of *Elaeagnus angustifolia* in northwest China[J]. Contemporary Horticulture, 2025,48(2):69-70,73.

[14] 宗建伟 , 邓海芳 , 蔡沅原 , 等 .AM 真菌对干旱胁迫下文冠果根系形态和叶片结构耦合的影响 [J]. 生物技术通报 ,2025,41(6):167-178.
Zong J W, Deng H F, Cai Y Y, et al. Coupling effect of AM fungi on the root morphology and leaf structure of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge under drought stress[J]. Biotechnology Bulletin,2025,41(6):167-178.

[15] 王华田 , 张光灿 , 刘霞 . 论黄土丘陵区造林树种选择的原则 [J]. 世界林业研究 ,2001,14(5):74-78.
Wang H T, Zhang G C, Liu X. Principles of silvicultural tree species selection for loess hilly areas[J]. World Forestry Research, 2001,14(5):74-78.

[16] 古丽米娜 • 吐尔孙江 , 陈启民 , 桑巴叶 . 不同林龄胡杨液流特征及耗水量研究 [J]. 防护林科技 ,2024(6):61-63.
Gulimina·Tursunjiang, Chen Q M, Sang B Y. Study on sap flow characteristics and water consumption of *Populus euphratica* at different forest ages[J]. Protection Forest Science and Technology,2024(6):61-63.

[17] 王桂华 , 李钢铁 , 高越 . 文冠果育苗及造林管理技术 [J]. 农业科技通讯 ,2025(2):203-205.
Wang G H, Li G T, Gao Y. Seedling raising and afforestation management techniques of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology,2025(2):203-205.

[18] 林熬 , 邢植 , 万亚楠 , 等 . 不同化学封顶剂对棉花生长及冠层结构的影响 [J]. 农业科技与装备 ,2023(1):23-27.
Lin A, Xing Z, Wan Y N, et al. Effects of different chemical capping agents on cotton growth and canopy structure[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2023(1):23-27.

[19] 高俊凤 . 植物生理学实验指导 [M]. 北京 : 高等教育出版社 ,2006:65-70.
Gao J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press,2006:65-70.

[20] Liu J W, Zhang R H, Zhang G C, et al. Effects of soil drought on photosynthetic traits and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* seedlings[J]. Journal of Forestry Research,2017,28(2):255-263.

[21] 李天翔 , 肖亚琴 , 曹基武 , 等 . 干旱对不同种源花榈木幼苗生长及生理生化的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(12):86-96.
Li T X, Xiao Y Q, Cao J W, et al. Effects of drought on growth and physiological and biochemical characteristics of seedlings of *Ormosia henryi* from different provenances[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(12):86-96.

[22] 曹瑞兰 , 李知青 , 欧阳雯婷 , 等 . 油茶 *NAC* 基因鉴定及对干旱胁迫响应分析 [J]. 江西农业大学学报 ,2021,43(6):1357-1370.
Cao R L, Li Z Q, Ouyang W T, et al. Identification of *NAC* gene in *Camellia oleifera* and analysis of its response to drought stress[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2021,43(6):1357-1370.

[23] 刘长成 , 刘玉国 , 郭柯 . 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性 [J]. 植物生态学报 ,2011,35(10):1070-1082.
Liu C C, Liu Y G, Guo K. Ecophysiological adaptations to drought stress of seedlings of four plant species with different growth forms in karst habitats[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2011,35(10):1070-1082.

[24] 谢志玉 , 张文辉 , 刘新成 . 干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响 [J]. 西北植物学报 ,2010,30(5):948-954.
Xie Z Y, Zhang W H, Liu X C. Growth and physiological characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings under soil drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2010,30(5):948-954.

[25] 耿晓东 , 岳继飞 , 刘英 , 等 .‘ 豫济 ’ 山桐子幼苗生长对干旱胁迫的响应 [J]. 经济林研究 ,2025,43(1):29-39.
Geng X D, Yue J F, Liu Y, et al. Response of *Idesia polycarpa* ‘Yuji’ seedling growth to drought stress[J]. Non-wood Forest Research,2025,43(1):29-39.

[26] 梁含云 , 李先宽 , 王广苹 , 等 . 外源茉莉酸甲酯对盐胁迫酸枣幼苗的生理影响 [J]. 西北农业学报 ,2025,34(9):1677-1684.
Liang H Y, Li X K, Wang G P, et al. Physiological effects of

exogenous methyl jasmonate on jujube seedlings under salt stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2025,34(9):1677-1684.

[27] 张婷 , 魏振艳 , 黄海霞 , 等 . 裸果木对模拟渗透胁迫的生理响应 [J]. 甘肃农业大学学报 ,2024,59(3):204-211.
Zhang T, Wei Z Y, Huang H X, et al. Physiological responses of *Gymnocarpos przewalskii* to simulated osmotic stress[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2024,59(3):204-211.

[28] 曹文月 , 王宁 , 秦家乐 , 等 . 外源褪黑素对淹水胁迫下文冠果幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 江苏农业科学 ,2025,53(1):209-217.
Cao W Y, Wang N, Qin J L, et al. Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge seedlings under flooding stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2025,53(1):209-217.

[29] 魏湜 , 吉彪 , 李赞 , 等 . 盐胁迫下油菜素内酯对玉米幼苗生理特性的影响 [J]. 东北农业大学学报 ,2018,49(5):9-16.
Wei S, Ji B, Li Z, et al. Effect of brassinolide on physiological characteristics of maize seedlings under salt stress[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2018,49(5):9-16.

[30] 王诗琪 , 杨柳青 , 廖飞勇 , 等 . 干旱胁迫下基质和保水剂对 3 种景天属植物生长和生理的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(6):55-66.
Wang S Q, Yang L Q, Liao F Y, et al. Effects of substrate and water retaining agent on the growth and physiology of three *Sedum* plants under drought stress[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(6):55-66.

[31] 马兴羽 , 黄彩变 , 曾凡江 , 等 . 沙地盐胁迫对油莎豆幼苗生理生长影响的模拟研究 [J]. 干旱区研究 ,2022,39(6):1862-1874.
Ma X Y, Huang C B, Zeng F J, et al. To simulate the growth and physiological responses of *Cyperus esculentus* seedlings to salt stress in sandy soil[J]. Arid Zone Research,2022,39(6):1862-1874.

[32] 马潇 . 辣椒 *CaCIPKs* 对干旱和低温胁迫的响应及其调控机理研究 [D]. 杨凌 : 西北农林科技大学 ,2022:11-13.
Ma X. Responses and regulation mechanisms of *CaCIPKs* under drought and cold stresses in *Capsicum annuum*[D]. Yangling: Northwest A & F University,2022:11-13.

[33] 王培 , 张家君 , 刘翠 , 等 . 酸铝对杉木幼苗叶片抗氧化酶活性的影响 [J]. 福建农业学报 ,2019,34(7):852-857.
Wang P, Zhang J J, Liu C, et al. Physiological response of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings under acid and/or aluminum stresses[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences,2019,34(7):852-857.

[34] 唐晓敏 , 王文全 , 马春英 . 长期水分胁迫下甘草叶片的抗旱生理响应 [J]. 河北农业大学学报 ,2008,31(2):16-20.
Tang X M, Wang W Q, Ma C Y. Physiological drought responses of *Glycyrrhiza uralensis* leaves under prolonged water stress[J]. Journal of Agricultural University of Hebei,2008,31(2):16-20.

[35] 伍泽堂 , 张刚元 . 脱落酸、细胞分裂素和丙二醛对超氧化物歧化酶活性的影响 [J]. 植物生理学通讯 ,1990,26(4):30-32.
Wu Z T, Zhang G Y. Effects of abscisic acid, cytokinin and malonaldehyde on superoxide dismutase activity[J]. Plant Physiology Communications,1990,26(4):30-32.

[36] 罗杰 , 周光良 , 胡庭兴 , 等 . 干旱胁迫对润楠幼苗生长和生理生化指标的影响 [J]. 应用与环境生物学报 ,2015,21(3):563-570.
Luo J, Zhou G L, Hu T X, et al. Effects of drought stress on growth and physiological parameters of *Machilus pingii* seedlings[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2015,21(3):563-570.

[37] 潘昕 , 邱权 , 李吉跃 , 等 . 干旱胁迫对青藏高原 6 种植物生理指标的影响 [J]. 生态学报 ,2014,34(13):3558-3567.
Pan X, Qiu Q, Li J Y, et al. Physiological indexes of six plant species from the Tibetan plateau under drought stress[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(13):3558-3567.

[38] 侯立伟 , 鲁绍伟 , 李少宁 , 等 . 城市绿化灌木耐旱性评价及灌溉制度研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2023,36(1):45-51.
Hou L W, Lu S W, Li S N, et al. Review of research on drought tolerance evaluation and irrigation regime of urban greening shrubs[J]. World Forestry Research,2023,36(1):45-51.

[39] 朱婧 , 聂水 , 刘思 , 等 .4 种木本园林植物水分胁迫生理响应及耐旱性评价 [J]. 分子植物育种 ,2023,21(23):7867-7883.
Zhu J, Nie S, Liu S, et al. Physiological response and drought tolerance evaluation of seedlings of four woody garden plants under water stress[J]. Molecular Plant Breeding,2023,21(23):7867-7883.

[40] 马洋 , 王雪芹 , 张波 , 等 . 风蚀和沙埋对塔克拉玛干沙漠南缘骆驼刺水分和光合作用的影响 [J]. 植物生态学报 ,2014,38(5):491-498.
Ma Y, Wang X Q, Zhang B, et al. Effects of wind erosion and sand burial on water relations and photosynthesis in *Alhagi sparsifolia* in the southern edge of the Taklimakan desert[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2014,38(5):491-498.

[本文编校：谢荣秀]