北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

干热河谷区典型植物生长与光合生理特性对干旱胁迫的响应

邬鹏 王丹 陈超 孙中峰 王作枭 邱国良 高佳文 贺康宁

Responses of growth and photosynthetic physiological characteristics of typical plants to drought stress in the dry-hot valley

Wu Peng, Wang Dan, Chen Chao, Sun Zhongfeng, Wang Zuoxiao, Qiu Guoliang, Gao Jiawen, He Kangning

引用本文:
邬鹏, 王丹, 陈超, 孙中峰, 王作枭, 邱国良, 高佳文, 贺康宁. 干热河谷区典型植物生长与光合生理特性对干旱胁迫的响应[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(7):23-35. doi: 10.12171/j.1000-1522.20260073
Wu Peng, Wang Dan, Chen Chao, Sun Zhongfeng, Wang Zuoxiao, Qiu Guoliang, Gao Jiawen, He Kangning. Responses of growth and photosynthetic physiological characteristics of typical plants to drought stress in the dry-hot valley[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7):23-35. doi: 10.12171/j.1000-1522.20260073

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20260073

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

油莎豆的抗旱性评价及抗旱生理机制研究
Evaluation of drought resistant ability and physiological mechanism in drought resistance of *Cyperus esculentus* var. *sativus*
北京林业大学学报, 2022, 44(4): 107-115. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210378

3种玉兰幼苗生长和生理特性对干旱胁迫的响应
Response of growth and physiological characteristics of three *Magnolia* spp. seedlings to drought stress
北京林业大学学报, 2024, 46(9): 57-67. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230312

金沙江干热河谷冲沟系统优先流影响下的土壤可蚀性
Soil erodibility under the influence of preferential flow in the gully system of the Jinsha River Dry Hot Valley
北京林业大学学报, 2023, 45(4): 101-113. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220135

金沙江干热河谷植物α多样性和群落谱系结构对环境因子的响应
Responses of plant α-diversity and community lineage structure in the dry-hot valley of the Jinsha River to environmental factors
北京林业大学学报, 2026, 48(5): 135-145. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250113

干旱胁迫对黑杨派无性系生长及生理特性的影响
Effects of drought stress on the growth and physiological characteristics of Sect. *Aigeiros* clones
北京林业大学学报, 2023, 45(10): 81-89. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220266

沙棘形态和光合系统对干旱、盐碱及其复合胁迫的响应
Response of *Hippophae rhamnoides* morphology and photosynthetic system to drought, salt alkali and their combined stress
北京林业大学学报, 2026, 48(1): 88-101. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250090

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260073

干热河谷区典型植物生长与光合生理特性对干旱胁迫的响应

邬 鹏[1] 王 丹[2] 陈 超[2] 孙中峰[2] 王作枭[1] 邱国良[1] 高佳文[1] 贺康宁[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 水利部水土保持植物开发管理中心，北京 100038）

摘要:【目的】探究干旱胁迫对银合欢、葛藤和木豆生长与光合生理特性的影响，评价 3 种典型植物抗旱性，为干热河谷耐旱植物筛选与植被恢复实践提供理论依据。**【方法】**以 3 种植物 1 年生幼苗为试验材料，采用盆栽控水试验，设置对照（CK，土壤含水量为田间持水量的 75%～80%）、轻度干旱（LD，土壤含水量为田间持水量的 60%～65%）、中度干旱（MD，土壤含水量为田间持水量的 45%～50%）、重度干旱（SD，土壤含水量为田间持水量的 30%～35%）4 个处理。测定各处理条件下 3 种植物的生长与光合生理指标，并采用隶属函数法综合评价抗旱性。**【结果】**（1）随着干旱加剧，3 种植物的株高增长量（ΔH）、地径增长量（ΔD）、叶片相对含水量（RWC）、净光合速率（P_n）、气孔导度（G_s）、蒸腾速率（T_r）、羧化效率（CE）及 PSⅡ最大光化学效率（F_v/F_m）是下降趋势，水分饱和亏缺（WSD）、丙二醛（MDA）和脯氨酸（Pro）含量是上升趋势。（2）胞间 CO_2 浓度（C_i）在 LD 胁迫时降低，在 MD 和 SD 胁迫时升高。（3）银合欢和葛藤的水分利用效率（WUE）在 LD 和 MD 时升高，在 SD 时降低；木豆的 WUE 随干旱加剧持续下降。（4）随着干旱加剧，3 种植物的初始荧光（F_o）先升高后降低；银合欢和木豆的最大荧光（F_m）和可变荧光（F_v）先升高后降，而葛藤持续下降。PSII 潜在活性（F_v/F_o）在不同物种间差异明显，葛藤在 MD 至 SD 阶段上升，银合欢和木豆在整个干旱过程中持续下降。（5）相关性分析显示，ΔH 与 P_n、G_s、T_r 及叶绿素荧光参数（F_m、F_v、F_v/F_o、F_v/F_m）呈极显著正相关（$P < 0.01$）；RWC 与 ΔH 和 ΔD、P_n 和 G_s 呈极显著正相关（$P < 0.01$），与 WSD 呈负相关；MDA 与 P_n、G_s 呈极显著负相关（$P < 0.01$），且叶绿素荧光参数（F_m、F_v、F_v/F_o、F_v/F_m）之间相关性强。**【结论】**干旱胁迫显著抑制 3 种植物幼苗生长并降低生理活性，造成叶片细胞膜受损、植株生长减缓。幼苗通过渗透调节、降低气孔导度与蒸腾速率以增强抗旱适应性，维持相对稳定的代谢水平。综合生长、生理与光合作用指标可知，抗旱性为葛藤 > 银合欢 > 木豆，干热河谷区植被恢复建议以葛藤为首选物种、银合欢为伴生物种。

关键词：干热河谷；干旱胁迫；光合生理特性；抗旱性评价；植被恢复
中图分类号：S718.43 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)07−0023−13
引文格式：邬鹏，王丹，陈超，等. 干热河谷区典型植物生长与光合生理特性对干旱胁迫的响应 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(7)：23−35. Wu Peng, Wang Dan, Chen Chao, et al. Responses of growth and photosynthetic physiological characteristics of typical plants to drought stress in the dry-hot valley[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7): 23−35.

Responses of growth and photosynthetic physiological characteristics of typical plants to drought stress in the dry-hot valley

Wu Peng[1] Wang Dan[2] Chen Chao[2] Sun Zhongfeng[2] Wang Zuoxiao[1]
Qiu Guoliang[1] Gao Jiawen[1] He Kangning[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Center for Development and Management of Soil and Water Conservation Plants,
Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

收稿日期: 2026−02−09 **修回日期:** 2026−05−05
基金项目: 中国三峡建工（集团）有限公司科研项目（BHT/0980）。
第一作者: 邬鹏。主要研究方向：林业生态工程。Email：wpbjfu@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 贺康宁，教授，博士生导师。主要研究方向：林业生态工程。Email：hkn@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] This paper aims to investigate the effects of drought stress on growth and photosynthetic physiological characteristics of *Leucaena leucocephala*, *Pueraria montana*, and *Cajanus cajan*, and to evaluate the drought resistance of these three typical plants, providing theoretical basis for the selection of drought-tolerant plants and vegetation restoration in the dry-hot valley. [**Method**] Using one-year-old seedlings of these three species as experimental materials, a pot experiment with controlled water supply was conducted. Four treatments were set as followings: control (CK, soil moisture content was 75%–80% of field capacity), mild drought (LD, 60%−65% of field capacity), moderate drought (MD, 45%−50% of field capacity), and severe drought (SD, 30%−35% of field capacity). The growth and photosynthetic physiological indicators of the three species under each treatment were measured, and the drought resistance was evaluated by membership function method. [**Result**] (1) With the intensification of drought, plant height and ground diameter growth, relative water content of leaves, net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, carboxylation efficiency, and maximum photochemical efficiency of PSII decreased, while the water saturation deficit, malondialdehyde, and proline contents increased. (2) The intercellular CO_2 concentration decreased under MD stress, and increased under MD and SD stress. (3) The water use efficiency (WUE) of *Leucaena leucocephala* and *P. montana* increased under LD and MD stress, but decreased under SD stress; the WUE of *Cajanus cajan* continuously decreased with the intensification of drought. (4) The initial fluorescence of the three species increased first and then decreased with the intensification of drought; the maximum fluorescence and variable fluorescence of *L. leucocephala* and *C. cajan* increased first and then decreased, while that of *P. montana* continuously decreased. The potential activity of PSII varied significantly among varied species, with *P. montana* increasing from MD to SD, and *L. leucocephala* and *C. cajan* continuously decreasing throughout the drought process. (5) Correlation analysis showed that plant height growth was significantly positively correlated with net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, and chlorophyll fluorescence parameters ($P < 0.01$); the relative water content was significantly positively correlated with plant height and ground diameter growth, net photosynthetic rate, stomatal conductance, and water saturation deficit, and negatively correlated with malondialdehyde ($P < 0.01$); the chlorophyll fluorescence parameters were strongly correlated with each other. [**Conclusion**] Drought stress significantly inhibites the growth of three plant seedlings and reduces their physiological activities, causing damage to the cell membranes of leaves and slowing down the growth of plants. The seedlings enhance their drought adaptability through osmotic regulation and reducing stomatal conductance and transpiration rate, maintaining a relatively stable metabolic level. The comprehensive evaluation indicates that the drought resistance of the three species decreases from strong to weak is *P. montana*, *L. leucocephala* and *C. cajan*. For vegetation restoration in the dry-hot valley, it is recommended to choose *P. montana* as the preferred species, with *L. leucocephala* as the companion species.

Key words: dry-hot valley; drought stress; photosynthetic physiological characteristics; evaluation of drought resistance; vegetation restoration

干旱已成为全球气候变化背景下影响陆地生态系统结构与功能的重要非生物胁迫因子之一。干旱胁迫会显著限制植物的生长与抗逆能力[1−3]，常表现为生长受抑[4−5]、光合效率下降[6−7]，并诱发渗透调节紊乱与膜系统损伤等生理响应[8−9]，进而对植物生长发育过程中的多种代谢活动造成不利影响。干热河谷区因特殊的气候条件，易形成季节性水分亏缺，对植被生长的限制效应较为突出[10]。作为典型代表，云南干热河谷位于金沙江流域生态修复与水土保持重点区域[11]，关键生长季（4—6 月）水分亏缺频发，显著制约植被生长[12−14]。因此，筛选适宜该区域生长的耐旱植物并阐明其抗旱响应机制，对于提升干热河谷生态恢复成效具有重要意义。

银合欢（*Leucaena leucocephala*）、葛藤（*Pueraria montana*）和木豆（*Cajanus cajan*）是该区域常见且具有代表性的植物种类[15]。在干热河谷 16 个豆科（Fabaceae）牧草品种的引种试验中，银合欢产量达 26 933.9 kg/hm^2，排名前三[16]；葛藤羊喜食程度达最

高级（5 级），产量优于多数参试品种[17]；木豆作为干热河谷植被恢复的先锋树种，在金沙江流域的推广面积超过 4×10^3 hm^2，是该区域种植面积最大的生态经济型树种之一[18]。3 种植物发达的根系特征[19]和较强的水分利用调节能力[20]使其在干热河谷环境中展现出较高的干旱适应能力。

近些年来，相关研究[21–23]主要从抗旱生理、光合特性及分子遗传层面展开，为本研究揭示植物抗旱响应与适应机制提供了宝贵的文献基础。例如，谭景晨等[21]以葛藤种苗为材料，采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫，发现干旱诱导抗氧化酶活性增强并提高渗透调节物质含量，从而减轻膜脂过氧化伤害；李登峰等[22]通过野外测定银合欢的光合生理及叶绿素荧光特征，表明湿季光合受气孔限制主导，干季主要受非气孔限制影响；魏一凡等[23]以木豆为材料，运用生物信息学鉴定 *SnRK*$_2$ 基因并构建过表达植株，结果表明，*SnRK*$_2$ 家族基因可增强木豆耐旱性。尽管已有研究从不同层面探讨了银合欢、葛藤和木豆对干旱胁迫的响应机制，但多集中于单一物种，缺乏对干热河谷环境下 3 种植物生长与光合生理响应特征的对比研究。

基于此，本研究以 3 种植物幼苗为试验对象，拟揭示其在干旱胁迫下生长与光合生理特性的变化规律，并比较不同物种的抗旱响应差异及耐旱能力强弱，为干热河谷地区耐旱植物选择与植被恢复实践提供理论依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于金沙江白鹤滩水电站坝址上游巧家县旱谷地村（26°54′N，102°54′E），属亚热带季风气候区，具有典型干热河谷气候特征，土壤多为燥红壤。年平均气温为 21.7 ℃，年均降水量为 715.9 mm，降水主要集中于 7—9 月（汛期），其降雨量占全年总量的 77.5% 以上。年平均蒸发量为 2 306.7 mm，年平均无霜期约 320 d，年日照时数为 2 257.7 h。研究区植被以耐旱植物为主，代表种包括葛藤、银合欢和木豆等。

1.2　试验材料

试验材料为银合欢、葛藤和木豆 1 年生幼苗。供试幼苗购自云南省昆明市林木种苗繁育基地，采用种子播种繁育，繁育期间采用常规水肥管理，未进行特殊处理。移栽前选取株高、叶片数接近且无病虫害的健壮个体，银合欢平均苗高 31.57 cm、平均地径 2.52 m；葛藤平均苗高 25.62 cm、平均地径 1.76 mm；木豆平均苗高 44.66 cm、平均地径 1.45 mm。于 2024 年 4 月移栽至塑料盆（上口直径约 35 cm）中，每盆定植 3 株；每物种设置 20 盆，共 60 盆。栽培基质取自云南省巧家县旱谷地村表层（0 ~ 20 cm）干红壤，质地为砂质壤土，经 2 mm 筛网过筛后使用。每盆装土约 5 kg，采用环刀法测定土壤密度和田间持水量，测得土壤密度约为 1.25 g/cm^3，田间持水量约为 24.67%。管理期间定期浇水并施用营养液，待植株缓苗成活后开展干旱胁迫试验。

1.3　试验方法

1.3.1　试验设计

2025 年 4 月开展盆栽干旱胁迫试验。参考穆寅生等[24]和戴文静等[25]的试验设计方法，对每种植物设置 4 个水分处理水平，分别为对照（CK，土壤含水量为田间持水量的 75% ~ 80%）、轻度干旱（LD，土壤含水量为田间持水量的 60% ~ 65%）、中度干旱（MD，土壤含水量为田间持水量的 45% ~ 50%）、重度干旱（SD，土壤含水量为田间持水量的 30% ~ 35%）。每个处理设置 5 个盆栽重复。处理开始前 2 d 对所有盆栽充分浇水，使土壤含水量接近饱和状态。随后停止浇水，通过自然耗水形成不同程度的干旱胁迫。试验时间为 2025 年 4 月至 5 月中旬，与云南干热河谷区春季干旱期同步。每日 18：00 采用盆栽称质量法，并结合 TDR 土壤水分速测仪监测土壤含水量，根据目标含水量梯度进行定量补水。

1.3.2　生长指标测定

用卷尺测量株高，胁迫处理前后分别记为 H_1 和 H_2；用游标卡尺测量地径，胁迫处理前后分别记为 D_1 和 D_2，株高生长量 $\Delta H = H_2 - H_1$，地径生长量 $\Delta D = D_2 - D_1$。

1.3.3　生理指标测定

叶片相对含水量采用烘干称质量法[26]测定。采集各处理组幼苗的成熟叶片，洗净并擦干后测定鲜质量（M_f）；将叶片在蒸馏水中浸泡 12 h 后称取饱和鲜质量（M_t）；随后 105 ℃ 杀青 30 min，再于 85 ℃ 烘干至恒质量，测定干质量（M_d），各处理 3 次重复。叶片相对含水量（RWC）和水分饱和亏缺（WSD）分别按如下公式计算。

$$\mathrm{RWC} = \frac{M_f - M_d}{M_t - M_d} \times 100\% \tag{1}$$

$$\mathrm{WSD} = 100\% - \mathrm{RWC} \tag{2}$$

参考胡衍平等[27]的方法，采用酸性茚三酮法测定脯氨酸（Pro）含量，采用硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛（MDA）含量。

1.3.4　光合作用参数测定

上午 09：00—11：00，采用 Li-6400xt 便携式光

合仪(Lincoln, NE, USA)测定植物叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等气体交换参数，测定条件为：光合有效辐射(PAR)1 000 μmol/(m^2·s)，叶温 35 ℃，流速 500 mol/s，CO_2 浓度 420 μmol/mol。选取植株上部生长健壮的成熟功能叶片进行测定，每处理设 3 次重复。根据公式(3)计算水分利用效率(WUE)和公式(4)计算羧化效率(CE)。

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} \tag{3}$$

$$CE = \frac{P_n}{C_i} \tag{4}$$

采用手持式叶绿素荧光仪(Handy PEA, Hansatech, UK)测定不同水分梯度下的叶绿素荧光参数。测定前，将叶片暗适应 20 min，光源强度设为 3 000 μmol/(m^2·s)。测定的指标有初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v)、PSII 潜在活性(F_v/F_o)和 PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)。每处理选择生长一致的 3 株植物，每株测定 3 片功能叶，每片叶测定 3 次。

1.4 隶属函数抗旱性评价

单一指标难以全面反映植物抗旱能力，故采用多指标综合评价方法[28]。本研究结合隶属函数法与主成分分析法，对 3 种植物抗旱能力进行综合评价，计算步骤如下。

(1)干旱处理相对值计算

$$X_i = \frac{X_{SD}}{X_{CK}} \tag{5}$$

式中：X_i表示干旱处理相对值，X_{SD}表示重度干旱处理下各指标测定值，X_{CK}表示对照条件下各指标的测定值。

(2)耐旱系数(隶属度)的计算

当测定指标与抗旱性呈正相关时，其计算公式为

$$\mu(X_i) = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \tag{6}$$

当测定指标与抗旱性呈负相关时，其计算公式为

$$\mu(X_i) = 1 - \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \tag{7}$$

式中：$\mu(X_i)$表示第 i 个指标的耐旱系数，X_{max}和X_{min}分别表示该指标干旱处理相对值的最大值和最小值。

(3)抗旱综合指标值的计算

$$Z_i = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 \cdots + a_iX_i \quad (i = 1, 2, 3 \cdots, n) \tag{8}$$

式中：Z_i表示第 i 个抗旱综合指标值，a_i表示单一指标特征值所对应的特征向量，X_i为经隶属函数标准化处理后的单一指标值。

(4)抗旱综合指标权重的确定

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i} \quad (i = 1, 2, 3 \cdots, n) \tag{9}$$

式中：W_i表示第 i 个抗旱综合指标的权重，P_i表示对应主成分的方差贡献率。

(5)抗旱性综合评价值(D)的计算

$$D = \sum_{i=1}^{n} (Z_i \cdot W_i) \quad (i = 1, 2, 3 \cdots, n) \tag{10}$$

D 值越大，表明植物的抗旱能力越强。

1.5 数据处理

使用 Excel 2024 进行试验数据整理。运用 SPSS 26.0 进行数据分析，采用单因素方差分析进行显著性检验($P < 0.05$)；使用邓肯法(Duncan's)进行多重比较。使用软件 Origin 2022 绘图；利用 Li-6400 Sim5.3 软件输入实际叶面积，对 Li-6400xt 测定数据进行重新计算，并用软件 HandyPEA 处理叶绿素荧光参数值。

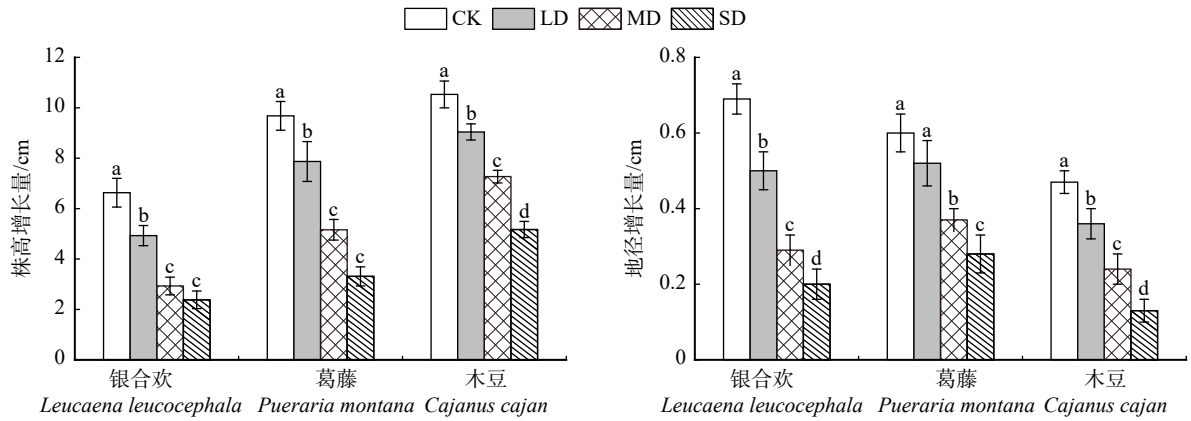
2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对 3 种植物生长指标的影响

由图 1 可以看出，3 种植物的株高增长量(ΔH)和地径增长量(ΔD)随着干旱胁迫程度的加剧均是下降趋势。各干旱胁迫处理组较 CK 显著降低($P < 0.05$)，且在重度干旱(SD)下达到最小值。与 CK 水分梯度相比，株高增长量下降幅度从大到小依次为葛藤(65.806%) > 银合欢(64.070%) > 木豆(50.934%)，中度干旱(MD)和 SD 处理银合欢和葛藤的株高增长量差异不显著，但均显著低于 CK，而轻度干旱(LD)、MD、SD 处理木豆的株高增长量与 CK 差异显著($P < 0.05$)。地径增长量较 CK 下降幅度从大到小依次为木豆(73.239%)、银合欢(71.014%)、葛藤(53.631%)。LD 处理葛藤的地径增长量与 CK 无显著差异，MD 与 SD 处理差异显著，而 LD、MD、SD 处理银合欢、木豆的地径增长量较 CK 存在显著差异($P < 0.05$)。

2.2 干旱胁迫对 3 种植物生理指标的影响

由表 1 可知，随着干旱胁迫程度的加剧，3 种植物各胁迫处理组叶片相对含水量(RWC)呈现下降趋下降 45.051%、38.740%、40.456%, 水分饱和亏缺(WSD)分别上升 221.626%、241.781%、88.221%。3 种植物的丙二醛(MDA)含量随着干旱加剧而增加，表明细胞膜损伤加重。葛藤在 LD、MD 处理下的 MDA 含量无显著差异，但均显著高于 CK；LD、MD、SD 处理上升幅度依次为 27.349%、32.169%、51.807%。银合欢和木豆的 MDA 含量在不同处理下存在显著差异($P < 0.05$)，银合欢的 MDA 含量最低



不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

图 1　干旱胁迫下 3 种植物的株高和地径增长量

Fig. 1　Plant height and ground diameter increment of three species under drought stress

表 1　干旱胁迫下 3 种植物的生理指标

Tab. 1　Physiological indicators of three species under drought stress

物种	处理	叶片相对含水量/%	水分饱和亏缺值/%	丙二醛/(μmol·g^{-1})	脯氨酸/(mg·g^{-1})
银合欢 *Leucaena leucocephala*	CK	83.107 ± 3.912a	16.893 ± 3.912d	42.903 ± 1.861d	211.500 ± 0.578d
	LD	72.577 ± 2.504b	27.423 ± 2.504c	52.258 ± 2.021c	314.121 ± 2.292c
	MD	53.000 ± 2.646c	47.000 ± 2.646b	64.903 ± 2.402b	508.018 ± 1.476b
	SD	45.667 ± 2.082d	54.333 ± 2.082a	75.892 ± 3.124a	2 510.807 ± 8.681a
葛藤 *Pueraria montana*	CK	86.190 ± 1.857a	13.810 ± 1.857c	71.398 ± 1.780c	66.343 ± 1.320d
	LD	69.510 ± 3.689b	30.490 ± 3.689b	90.925 ± 1.043b	81.157 ± 1.609c
	MD	66.843 ± 2.644b	33.157 ± 2.644b	94.366 ± 2.505b	85.648 ± 2.709b
	SD	52.800 ± 2.450c	47.200 ± 2.450a	108.387 ± 2.024a	96.204 ± 2.698a
木豆 *Cajanus cajan*	CK	68.560 ± 1.964a	31.440 ± 1.964c	53.204 ± 2.192d	94.741 ± 2.769d
	LD	59.317 ± 4.318b	40.683 ± 4.318b	69.591 ± 1.350c	455.000 ± 3.307c
	MD	53.520 ± 3.061b	46.480 ± 3.061b	75.857 ± 2.723b	1 540.341 ± 1.811b
	SD	40.823 ± 2.902c	59.177 ± 2.902a	107.527 ± 3.033a	5 084.656 ± 5.561a

(75.892 μmol/g)，较 CK 上升 76.891%。脯氨酸(Pro)含量随着干旱加剧而显著增加，SD 处理下增幅最大。银合欢和木豆的 Pro 含量显著上升，银合欢从 CK(211.500 mg/g)增加至 SD(2 510.807 mg/g)，增幅达 1 087.143%。木豆从 CK(94.741 mg/g)增加至 SD(5 084.656 mg/g)，增幅达 5 266.920%。葛藤 Pro 含量也显著增加，但增幅较为平缓，从 CK(66.343 mg/g)显著增加至 SD(96.204 mg/g)。结果表明，在重度干旱胁迫下，木豆不仅维持了相对较低的 WSD 增幅和 MDA 积累，同时通过爆发式积累 Pro 来主动降低渗透势，表现出最为高效的渗透调节与膜保护协同响应机制，因此其对干旱胁迫的耐受性优于银合欢和葛藤。

2.3　干旱胁迫对 3 种植物光合作用参数的影响

如图 2 所示，净光合速率(P_n)随着干旱加剧呈下降趋势，木豆降幅最大，银合欢降幅最小。与 CK 相比，LD、MD、SD 处理葛藤和木豆的 P_n 分别显著降低 47.424%，65.632%，85.703% 和 36.288%、68.226% 和 97.401%。银合欢 LD 处理 P_n 与 CK 无显著差异，MD 和 SD 处理分别显著降低 20.293%，82.519%。气孔导度(G_s)变化趋势与 P_n 基本一致，银合欢、葛藤、木豆在 SD 处理下的 G_s 分别较 CK 降低 91.612%，95.132% 和 94.804%。

胞间 CO_2 浓度(C_i)表现为先降低后升高，LD 处理 3 种植物 C_i 较 CK 显著下降，降幅依次为葛藤(23.799%) > 木豆(7.395%) > 银合欢(3.704%)。在 MD 和 SD 处理下，C_i 开始回升。干旱胁迫结束时，银合欢和木豆的 C_i 较 CK 分别增加 29.398% 和 2.803%，而葛藤下降 16.202%。

蒸腾速率(T_r)随着干旱加剧显著降低($P < 0.05$)。SD 处理下 3 种植物的 T_r 分别为 0.338、0.232、0.213 mmol/(m^2·s)。较 CK 分别降低 86.967%、91.620% 和 92.936%。其中，银合欢和葛藤的 T_r 在各处理间差异显著($P < 0.05$)，木豆降幅最大，MD、SD 处理

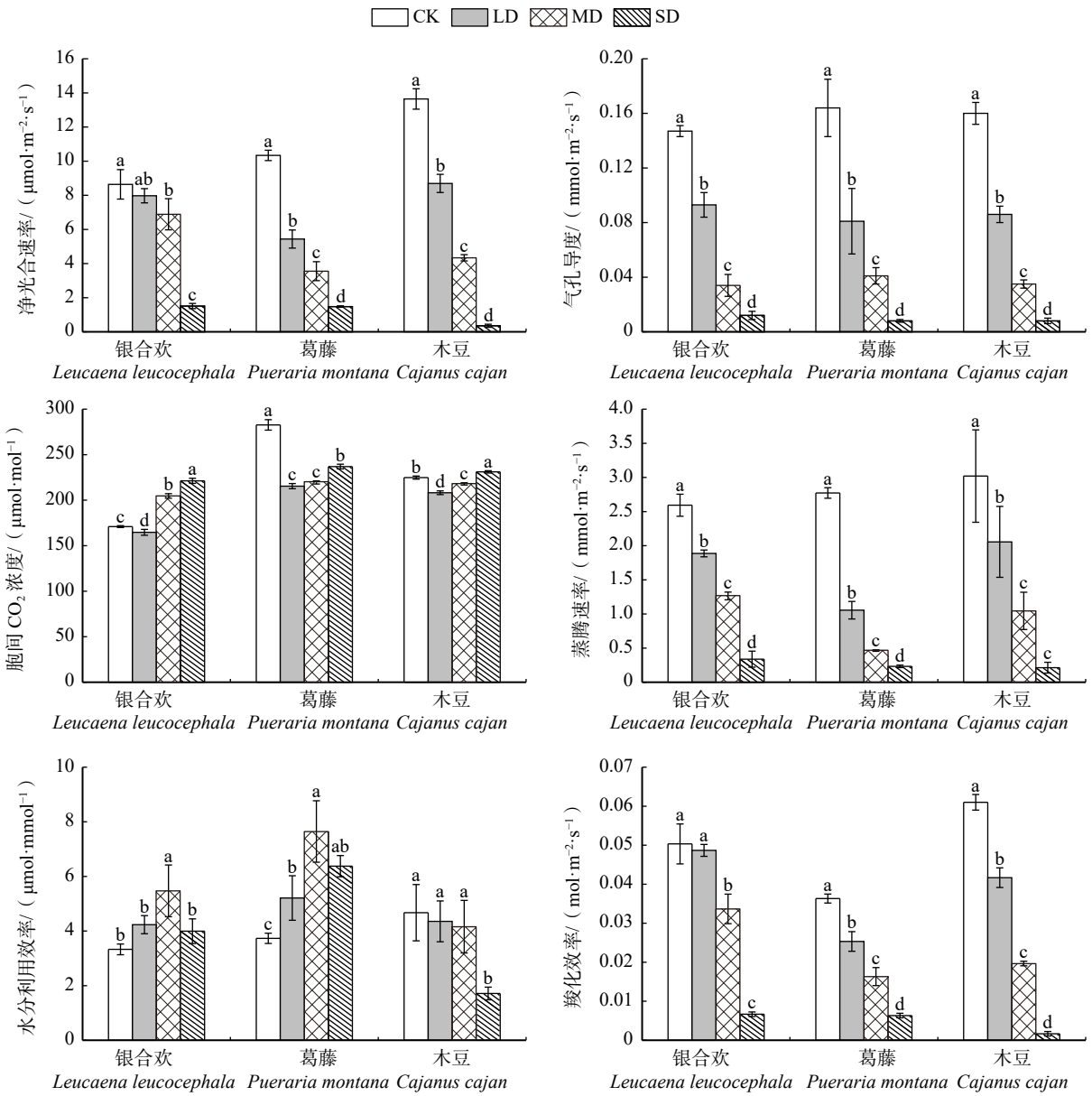


图 2 干旱胁迫下 3 种植物的叶片光合气体交换参数

Fig. 2 Leaf photosynthetic gas exchange parameters of three species under drought stress

差异不显著($P < 0.05$)。

3 种植物的叶片水分利用效率(WUE)表现出不同趋势(图 2)。木豆的 WUE 随干旱加剧持续下降，SD 处理下差异显著($P < 0.05$)；银合欢和葛藤在 LD、MD 处理下 WUE 显著升高，SD 处理则下降。银合欢的 WUE 较 CK 无显著差异，葛藤和木豆的 WUE 差异显著。3 种植物的羧化效率(CE)随干旱加剧持续下降($P < 0.05$)，银合欢 LD 处理较 CK 差异不显著，MD、SD 处理显著，葛藤和木豆的 CE 较 CK 显著下降，SD 处理达到最小值。与 CK 相比，3 种植物的降幅顺序为木豆(97.262%) > 银合欢(86.747%) > 葛藤(82.576%)。

由表 2 可知，3 种植物的初始荧光(F_o)随干旱加剧先升高后降低。银合欢和葛藤的 F_o 在 MD 处理下最大，而木豆在 LD 处理下最大。在重度干旱胁迫下，3 种植物的 F_o 均较 CK 显著变化($P < 0.05$)，银合欢和葛藤分别上升 9.568% 和 21.454%，木豆下降 17.790%。银合欢和木豆的 F_m 呈先上升后下降趋势，葛藤则持续下降，3 种植物的 F_m 均在 SD 处理下最小。与 CK 相比，降幅依次为银合欢(44.495%) > 木豆(35.695%) > 葛藤(22.116%)。木豆的 F_m 在 LD、MD 处理下较 CK 差异不显著，在 SD 处理下显著下降($P < 0.05$)。银合欢和葛藤的 F_m 在各处理下均显著低于 CK($P < 0.05$)。F_v 的变化趋势与 F_m 相同。干旱胁迫结束时，银合欢、葛藤、木豆的 F_v 分别下降 76.324%、57.710%、43.553%。葛藤的 PSII 潜在活性(F_v/F_o)从 CK 到 MD 呈下降趋势，在 MD 至 SD 处理下回升，但无显著差异($P < 0.05$)。银合欢和木豆

表 2　干旱胁迫下 3 种植物的叶绿素荧光参数

Tab. 2　Chlorophyll fluorescence parameters of three species under drought stress

物种	处理	F_o	F_m	F_v	F_v/F_o	F_v/F_m
银合欢 *Leucaena leucocephala*	CK	463.333 ± 6.110d	1 250.333 ± 14.295b	787.000 ± 14.799b	1.699 ± 0.044a	0.629 ± 0.006a
	LD	579.333 ± 15.308b	1 518.333 ± 6.658a	939.000 ± 11.533a	1.622 ± 0.061b	0.618 ± 0.009a
	MD	625.667 ± 3.055a	919.333 ± 6.429c	293.667 ± 4.163c	0.469 ± 0.006c	0.319 ± 0.003b
	SD	507.667 ± 4.041c	694.000 ± 11.533d	186.333 ± 14.434d	0.367 ± 0.031d	0.268 ± 0.016c
葛藤 *Pueraria montana*	CK	568.667 ± 11.846b	1 433.333 ± 46.544a	864.667 ± 40.821a	1.521 ± 0.066a	0.603 ± 0.011a
	LD	698.667 ± 51.926a	1 305.667 ± 115.036b	607.000 ± 64.211b	0.867 ± 0.036b	0.464 ± 0.011b
	MD	738.667 ± 20.526a	1 119.333 ± 45.545c	380.667 ± 26.350c	0.515 ± 0.024c	0.340 ± 0.010c
	SD	690.667 ± 19.009a	1 116.333 ± 10.017c	365.667 ± 26.839c	0.529 ± 0.025c	0.328 ± 0.027c
木豆 *Cajanus cajan*	CK	618.333 ± 19.630c	2 027.333 ± 31.134ab	1 409.000 ± 15.620a	2.280 ± 0.061a	0.695 ± 0.006a
	LD	722.333 ± 12.220a	2 182.667 ± 173.903a	1 460.333 ± 182.719a	2.024 ± 0.282ab	0.667 ± 0.030ab
	MD	686.667 ± 20.232b	1 892.000 ± 36.428b	1 205.333 ± 56.660b	1.758 ± 0.132b	0.637 ± 0.018bc
	SD	508.333 ± 15.695d	1 303.667 ± 5.033c	795.333 ± 10.786c	1.741 ± 0.131b	0.610 ± 0.011c

注：F_o表示初始荧光，F_m表示最大荧光，F_v表示可变荧光，F_v/F_o表示PSII潜在活性，F_v/F_m表示PSII最大光化学效率。下同。

的 F_v/F_o 始终下降，木豆 LD、MD、SD 处理间差异不显著。SD 处理下，3 种植物的 F_v/F_o 均小于 CK，其中银合欢降幅最大（78.375%），木豆最小（23.640%）。3 种植物的 PSII 最大光化学效率（F_v/F_m）都随干旱加剧而下降。银合欢、葛藤、木豆的 F_v/F_m 值分别为 0.268 ~ 0.629、0.328 ~ 0.603、0.610 ~ 0.695。其中银合欢的 F_v/F_m 下降幅度最大（57.363%）。

2.4　3 种植物抗旱性的综合评价

相关性分析（图 3）显示，ΔH 与 P_n、G_s、T_r 及 F_m、F_v、F_v/F_o、F_v/F_m 之间存在极显著正相关（$P < 0.01$）。ΔH 与 P_n（$r = 0.73$）和 G_s（$r = 0.77$）相关性较强，表明株高与光合能力密切相关。RWC 与 ΔH、ΔD、P_n 和 G_s 呈极显著正相关（$P < 0.01$），而 WSD 与这些指标呈负相关。MDA、Pro 与 ΔH、ΔD、P_n、G_s、T_r 呈负相关，且 MDA 与 P_n、G_s 负相关最显著（$P < 0.01$），表明膜损伤可能抑制光合效率。P_n 与 G_s、T_r 呈极显著正相关（$P < 0.01$），而 WUE 与 T_r 呈显著负相关（$P < 0.05$）。F_v/F_o 与 F_v/F_m、F_v 与 F_m 之间的相关系数均为 0.98，表明两者相关性强。综合来看，3 种植物的耐旱指标存在一定的重合性，需通过主成分分析降维，避免相关性影响综合评价。

为解决抗旱性综合评价中多指标量纲不统一和信息重叠的问题，本研究对各耐旱指标进行相对化处理（表 3）。

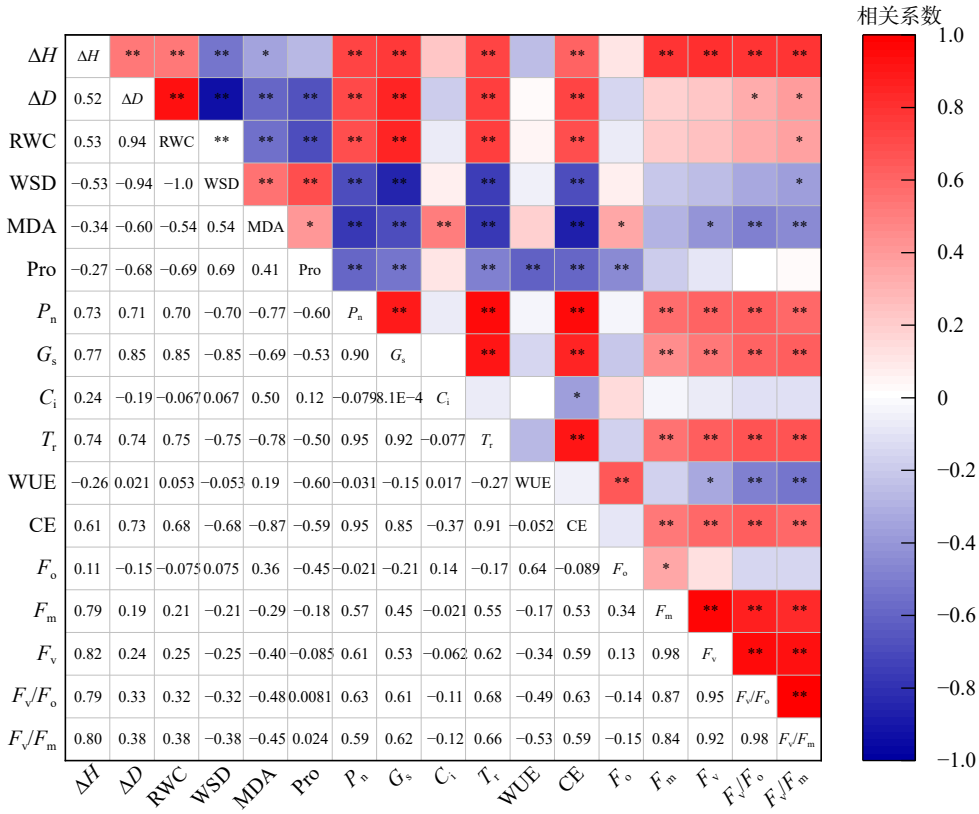
主成分分析共提取 4 个主成分，特征值分别为 9.123、3.217、2.122 和 1.368，方差贡献率分别为 53.664%、18.923%、12.480% 和 8.044%，累计方差贡献率为 93.111%，表明前 4 个主成分能有效概括原始变量的信息（表 4）。PC1 在株高相对增长量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、羧化效率等指标上具有较高正载荷，而在水分亏缺和丙二醛含量上表现为较高负载荷。PC2 在脯氨酸含量、最大荧光、可变荧光、PSII 潜在活性及最大光化学效率等指标上具有较高正载荷，而在叶片相对含水量和水分利用效率上具有较高负载荷。PC3 在初始荧光、叶片水分利用效率和最大荧光等指标上具有较高载荷。PC4 在胞间 CO_2 浓度上具有较高正载荷。各主成分中载荷较高的指标存在差异，表明不同指标在抗旱性综合评价中的贡献程度不同。

从表 5 可知，葛藤的 D 值最大（2.569），银合欢次之（1.858），木豆最小（0.940），表明 3 种豆科植物的抗旱性顺序为葛藤 > 银合欢 > 木豆。具体表现为葛藤在 Z_1 和 Z_2 得分 ⩾ 0.5，银合欢在 Z_1 得分 ⩾ 0.5，木豆在 Z_2 得分 ⩾ 0.5。从各抗旱综合指标（Z_1~Z_4）的得分来看，不同植物在各主成分上的贡献存在显著差异。

3　讨　　论

3.1　水分调控与根系策略差异

水分维持能力是植物适应干旱胁迫的重要基础。已有研究[29]表明，随着 PEG 浓度增加，粉葛（*Pueraria montana* var. *thomsonii*）幼苗虽出现叶片下垂、皱缩等胁迫反应，但仍能通过一系列生理调节适应干旱环境，表明葛藤类植物具有较强的耐旱潜力。本研究中，葛藤在干旱胁迫下仍能保持较高的相对含水量（RWC）和较低的叶片水分亏缺指数（WSD），表明其可能通过降低蒸腾耗水、优化水分分配等方式维持组织水分平衡。该结果与李绍家等[30]在云南



ΔH 表示株高增长量；ΔD 表示地径增长量；RWC 表示叶片相对含水量；WSD 表示水分饱和亏缺；MDA 表示丙二醛；Pro 表示脯氨酸；P_n 表示净光合速率；G_s 表示气孔导度；C_i 表示胞间 CO_2 浓度；T_r 表示蒸腾速率；WUE 表示水分利用效率；CE 表示羧化效率。红色表示正相关，蓝色表示负相关。*表示显著相关（$P<0.05$）；**表示极显著相关（$P<0.01$）。下同。

图 3　3 种植物耐旱指标的相关性分析

Fig. 3　Correlation analysis of drought resistance indices in three species

表 3　3 种植物各耐旱指标的相对值

Tab. 3　Relative values of drought resistance indices for three species

指标	银合欢 *Leucaena leucocephala*	葛藤 *Pueraria montana*	木豆 *Cajanus cajan*	指标	银合欢 *Leucaena leucocephala*	葛藤 *Pueraria montana*	木豆 *Cajanus cajan*
ΔH	0.359	0.342	0.491	T_r	0.130	0.084	0.071
ΔD	0.290	0.464	0.268	WUE	1.200	1.709	0.366
RWC	0.549	0.613	0.595	CE	0.135	0.171	0.025
WSD	3.216	3.418	1.882	F_o	1.096	1.215	0.822
MDA	1.769	1.518	2.021	F_m	0.555	0.779	0.643
Pro	11.871	1.450	53.669	F_v	0.237	0.423	0.564
P_n	0.175	0.143	0.026	F_v/F_o	0.216	0.348	0.687
G_s	0.083	0.049	0.052	F_v/F_m	0.426	0.543	0.878
C_i	1.294	0.838	1.028				

干热河谷对瓦氏葛藤（*Haymondia wallichii*）的研究结果一致，也与校亮等[31]、王家宜等[32]关于干热河谷环境中葛藤适应性的研究相符。银合欢同样表现出较强的水分调控能力。在重度干旱胁迫下，银合欢地上部分生长受抑程度居中，说明其在水分受限条件下仍能维持一定生长。王兴荣等[33]、石磊琦等[34]、韩姣姣等[35]认为，银合欢具有兼性深根性，可有效吸收深层土壤水分，从而缓解表层土壤干旱对地上部分生长的限制。同时，ABA 介导的保守型水分利用策略可促进根系吸水并调节叶片蒸腾，有利于维持较高的 RWC 和较低的 WSD，保障光合器官和生长点的水分供应[36−37]。这也在一定程度上解释了银合欢能够在干热河谷地区较稳定生长，并在不同强度干旱胁迫下表现出较强适应性的原因。相比之下，已有研究发现，木豆具有一定的深根性和根际水分调节能力[38−40]，但本研究中木豆地径增长在重度干

表 4　3 种植物不同指标的主成分荷载矩阵及累计贡献率

Tab. 4　Principal component loading matrix and cumulative contribution rates of different indices for three species

指标	主成分				指标	主成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4		PC1	PC2	PC3	PC4
ΔH	0.821	0.297	0.302	0.288	WUE	−0.200	−0.676	0.580	−0.223
ΔD	0.791	−0.477	−0.159	0.151	CE	0.917	−0.151	−0.079	−0.281
RWC	0.785	−0.487	−0.079	0.245	F_o	−0.086	−0.171	0.931	−0.187
WSD	−0.785	0.487	0.079	−0.245	F_m	0.672	0.521	0.488	−0.169
MDA	−0.748	0.141	0.401	0.383	F_v	0.734	0.589	0.294	−0.139
Pro	−0.521	0.728	−0.369	0.136	F_v/F_o	0.779	0.598	0.040	−0.067
P_n	0.929	−0.130	0.054	−0.050	F_v/F_m	0.778	0.579	0.008	−0.003
G_s	0.937	−0.159	−0.103	0.219	特征值	9.123	3.217	2.122	1.368
C_i	−0.152	0.106	0.369	0.842	方差贡献率	53.664	18.923	12.480	8.044
T_r	0.952	−0.044	−0.105	0.056	累计贡献率	53.664	72.587	85.067	93.111

表 5　不同植物多指标综合评价与评分排序

Tab. 5　Comprehensive evaluation and ranking results of different plants based on multiple indices

物种	抗旱综合指标值				综合评分（D值）	排序
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4		
葛藤 *Pueraria montana*	1.817	0.525	0.166	0.061	2.569	1
银合欢 *Leucaena leucocephala*	1.476	0.324	0.083	−0.025	1.858	2
木豆 *Cajanus cajan*	0.039	0.851	−0.022	0.072	0.940	3
权重	0.576	0.203	0.134	0.086		

旱胁迫下受到明显抑制，说明其水分补偿作用在高强度干旱条件下存在一定限制。杨艳鲜等[41]在干热河谷环境下开展的木豆品种研究也表明，木豆可通过根系吸水维持一定生长，但在持续干旱条件下，其适应能力受水分供给强度和品种差异的影响较大。因此，木豆更倾向于依赖水分获取来维持生理活动，但在长期或重度干旱胁迫下，难以完全抵消地上部分的蒸腾损失。与木豆相比，葛藤在干旱条件下表现出更强的组织水分维持能力；而与银合欢相比，葛藤的适应机制更侧重于水分分配与生理调节。

3.2　渗透调节与膜稳定性差异

渗透调节和膜稳定性是植物抵御干旱胁迫的重要细胞生理基础。本研究表明，3 种植物在渗透调节物质积累和膜脂过氧化程度方面存在差异。葛藤在干旱胁迫下脯氨酸积累不显著，说明其渗透调节可能主要依赖可溶性糖等物质的积累，这与邵怡若等的研究结果一致[42]。与金钟藤（*Merremia boisiana*）的比较研究也表明，葛藤在干旱条件下抗氧化能力相对较弱，MDA 含量较高，说明其膜脂过氧化程度加剧[43]。因此，葛藤的耐旱性并非主要依赖较强的抗氧化防御能力，而更可能通过水分维持、可溶性糖调节和光合适应等综合机制实现。银合欢在重度干旱胁迫下脯氨酸（Pro）含量显著增加，说明其可通过伤[44−45]。同时，银合欢 MDA 含量增幅相对较小，表明其膜脂过氧化程度较低，细胞膜稳定性较好。李明等[46]学者研究认为，银合欢较高的不饱和脂肪酸比例及较完善的抗氧化酶系统有助于清除过量活性氧，减轻膜脂损伤。干热河谷植物研究也表明，SOD、CAT 等抗氧化酶系的协同作用，是植物维持膜稳定性并适应干旱环境的重要机制[47−49]。因此，较强的膜保护能力是银合欢在干旱胁迫下保持相对稳定生长的重要生理基础。木豆在干旱胁迫下也出现脯氨酸积累，并伴随 LEA 蛋白及萜类代谢途径等抗逆响应，但本研究中其 MDA 含量在重度干旱下升幅较大，表明膜脂过氧化加剧，细胞膜系统受损明显[50]。这说明木豆虽具有一定的渗透调节和抗逆代谢响应能力，但这些调节作用不足以完全缓解重度干旱造成的细胞脱水和膜损伤。因此，膜稳定性不足可能是限制木豆在高强度干旱胁迫下维持生长的重要原因。

3.3　光合维持能力与生长响应差异

光合系统对干旱胁迫的响应直接影响植物生长维持能力。葛藤在干旱胁迫下净光合速率（P_n）和最大光化学效率（F_v/F_m）虽有所下降，但仍可通过气孔调节和光合保护机制缓解胁迫损伤，维持基本的光

合作用，这与卢广超等[51]的研究结果一致。结合本研究中葛藤较好的水分保持能力和生长表现可知，其耐旱性来源于水分调控、渗透调节和光合维持等多种机制的协同作用。银合欢在轻度和中度干旱胁迫下水分利用效率（WUE）升高，F_v/F_m 下降幅度适中，说明其能够通过气孔调控减少水分损失，同时保持光系统 PSII 的相对稳定[52−54]。这种光合作用稳定性与水分利用策略之间的协调，使银合欢在干热河谷环境中既能耐受水分限制，又能维持一定的生长潜力，体现出典型的“保守型”耐旱策略。值得注意的是，木豆在重度干旱胁迫下胞间 CO_2 浓度（C_i）及 F_v/F_m 的下降幅度相对较小，表明其光系统仍具有一定稳定性，碳同化过程尚能维持[55]。但与此同时，木豆 MDA 含量显著升高，地径增长受到明显抑制，说明其光合结构虽保持相对稳定，但膜系统损伤加剧及水分供应不足限制了光合产物向生长积累的有效转化。因此，仅依靠单一光合指标难以全面评价木豆的耐旱能力，还需结合膜稳定性和生长指标进行综合判断。

3.4 耐旱策略综合比较及生态意义

综合分析表明，葛藤主要通过水分调控、可溶性糖渗透调节和光合维持等途径适应干旱胁迫，在短期及中度干旱条件下具有较强的生长维持能力。银合欢则表现出典型的“保守型”耐旱策略，能够通过深根吸水、气孔调控、脯氨酸积累和膜稳定性维持等方式保持水分平衡及光系统稳定，从而在干热河谷环境中实现较为稳定的生长。木豆主要表现为以水分获取为主的适应方式，虽能在一定程度上维持光合功能，但在持续或高强度干旱胁迫下，其膜系统受损较为明显，生长受到较大限制，综合耐旱能力相对较低。与干热河谷生态系统的相关研究相比，本研究结果总体一致，表明 3 种植物的耐旱策略在一定程度上具有区域适用性。同时需要指出的是，本研究是在受控条件下开展的，土壤类型、温度、光照等环境因子相对单一，研究结果的推广仍需在自然条件下进一步验证。未来可结合长期定位观测，进一步分析不同植物耐旱机制的稳定性及其生态适应意义。

4 结 论

干旱显著抑制了 3 种植物的株高和地径增长量，其中木豆的株高抑制幅度最小，葛藤最显著；而地径对干旱的响应呈现不同的物种顺序，葛藤的地径抑制最小，木豆最强。随着干旱加剧，3 种植物叶片相对含水量下降，水分饱和亏缺值上升。木豆脯氨酸（Pro）含量变化幅度较大，其渗透调节作用更突出；银合欢丙二醛（MDA）含量最低，其细胞膜稳定性较好。光合作用方面，干旱导致净光合速率与蒸腾速率整体下降，其中木豆降幅最大，银合欢最小；葛藤的气孔导度降幅最大，其气孔限制可能更为显著。综合生长、生理与光合作用指标可知，抗旱性由强到弱依次为：葛藤 > 银合欢 > 木豆。总体来看，木豆虽在渗透调节等单项指标上具有一定优势，但其生长与光合过程对干旱的响应更强烈，综合表现相对较弱。因此，在干热河谷区耐旱植物选择与植被恢复应用中，建议葛藤为首选物种，银合欢为伴生物种。

参 考 文 献

[1] 杨佳伟, 戴薛, 辜忠春, 等. 4 种不同根型树种对干旱胁迫的生理响应差异：基于光合−荧光−渗透调节的协同分析 [J]. 生态学报, 2026, 46(5): 2654−2667.
Yang J W, Dai X, Gu Z C, et al. Differences in physiological responses to drought stress among four tree species with different root types: a synergistic analysis based on photosynthesis-fluorescence-osmosis regulation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(5): 2654−2667.

[2] Oguz M C, Aycan M, Oguz E, et al. Drought stress tolerance in plants: interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages [J]. Physiologia, 2022, 2(4): 180−197.

[3] Zhang Y, Xu J, Li R, et al. Plants' response to abiotic stress: Mechanisms and strategies [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(13): 10915.

[4] 梁青兰, 韩友吉, 乔艳辉, 等. 干旱胁迫对黑杨派无性系生长及生理特性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 81−89.
Liang Q L, Han Y J, Qiao Y H, et al. Effects of drought stress on the growth and physiological characteristics of Sect. *Aigeiros* clones [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 81−89.

[5] 张冰彬, 张琳琳, 于明含, 等. 油莎豆的抗旱性评价及抗旱生理机制研究 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(4): 107−115.
Zhang B B, Zhang L L, Yu M H, et al. Evaluation of drought resistant ability and physiological mechanism in drought resistance of *Cyperus esculentus* var. *sativus* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(4): 107−115.

[6] 曾子弘, 张哲文, 孙永江, 等. 沙棘形态和光合系统对干旱、盐碱及其复合胁迫的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1): 88−101.
Zeng Z H, Zhang Z W, Sun Y J, et al. Response of *Hippophae rhamnoides* morphology and photosynthetic system to drought, salt alkali and their combined stress [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 88−101.

[7] 白思璐, 周明涛, 刘志敏, 等. 干旱胁迫对护坡植物柠条生理特性的影响 [J/OL]. 生态学报, 2026,39 (9): 1−13[2026−05−05]. https://doi.org/10.20103/j.stxb.202507051746.
Bai S L, Zhou M T, Liu Z M, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of slope protection plant *Caragana*

korshinskii[J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 39(9): 1−13 [2026−05−05]. https://doi.org/10.20103/j.stxb.202507051746.

[8] 黄榆婷, 杨源通, 朱洁怡, 等. 不同土壤水分下香樟幼苗生长生理响应与抗旱机制 [J/OL]. 生态学杂志, 1−11[2026−05−05]. https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20260131.1345.002.
Huang Y T, Yang Y T, Zhu J Y, et al. Physiological responses and drought resistance mechanisms of *Cinnamomum camphora* seedlings under different soil moisture[J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 1−11[2026−05−05]. https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20260131.1345.002.

[9] 冯潇, 田玲, 尹群, 等. 3 种玉兰幼苗生长和生理特性对干旱胁迫的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9): 57−67.
Feng X, Tian L, Yin Q, et al. Response of growth and physiological characteristics of three *Magnolia* spp. seedlings to drought stress [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9): 57−67.

[10] 钟湧, 高磊, 彭新华. 南方红壤区季节性干旱研究进展 [J]. 土壤, 2025, 57(6): 1313−1322.
Zhong Y, Gao L, Peng X H. Review of seasonal drought in the red soil region of southern China [J]. Soils, 2025, 57(6): 1313−1322.

[11] 张伦, 张宇龙, 夏振尧, 等. 干热河谷区高陡岩质边坡生态修复效果评价 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(12): 3636−3646.
Zhang L, Zhang Y L, Xia Z Y, et al. Evaluation of ecological restoration effect of high-steep rocky slopes in dry-hot valley region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(12): 3636−3646.

[12] Xiong D H, Zhou H Y, Yang Z, et al. Slope lithologic property, soil moisture condition and revegetation in dry-hot valley of Jinsha River [J]. Chinese Geographical Science, 2005, 15(2): 186−192.

[13] Feng J, Chen G, Duan X, et al. Time-lag and accumulation responses of vegetation to precipitation in the Jinsha River dry-hot valley at multiple spatial-temporal scales [J]. Journal of Hydrology, 2025, 661(Part A): 133605.

[14] Lin Y M, Cui P, Ge Y G, et al. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation succession stages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River [J]. Ecological Engineering, 2014, 62: 13−26.

[15] 马焕成, 伍建榕, 郑艳玲, 等. 干热河谷的形成特征与植被恢复相关问题探析 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2020, 40(3): 1−8，197.
Ma H C, Wu J R, Zheng Y L, et al. Discussion on the formation characteristics of dry-hot valley and related problems of revegetation [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020, 40(3): 1−8 , 197.

[16] 龙会英, 张德, 朱红业, 等. 元谋干热河谷豆科牧草的引种试验 [J]. 草业科学, 2011, 28(8): 1485−1490.
Long H Y, Zhang D, Zhu H Y, et al. Introduction experiment of leguminous forages in the dry and hot valley of Yuanmou region [J]. Pratacultural Science, 2011, 28(8): 1485−1490.

[17] 郑霞, 王延周, 王郝为, 等. 不同葛藤品种藤蔓的生长特性与饲用品质研究 [J]. 草地学报, 2018, 26(2): 409−413.
Zheng X, Wang Y Z, Wang H W, et al. A study on the growth characteristics and evaluation of forage nutritional quality of the vine in different kudzu (*Pueraria thomsonii* Benth.) varieties [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(2): 409−413.

[18] 张尚云, 高洁, 傅美芬, 等. 金沙江干热河谷恢复植被与造林技术研究 [J]. 西南林学院学报, 1997, 17(2): 3−9.
Zhang S Y, Gao J, Fu M F, et al. A study on vegetational restoration and silvicultural techniques in the dry-hot valley of the Jinsha River [J]. Journal of Southwest Forestry College, 1997, 17(2): 3−9.

[19] 闫春娟, 王昌陵, 孙旭刚, 等. 不同时期水分胁迫对大豆根系特性及产量的影响 [J]. 节水灌溉, 2024(8): 43−52.
Yan C J, Wang C L, Sun X G, et al. Effect of water stress in different phases on root characteristics and yield of soybean [J]. Water Saving Irrigation, 2024(8): 43−52.

[20] 马沈轲, 王春梅, 赵春林, 等. 西北干旱半干旱地区节水增汇植物种类筛选 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8): 122−131.
Ma S K, Wang C M, Zhao C L, et al. Screening of water-saving and sink-enhancing plant species in arid and semi-arid regions of Northwest China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8): 122−131.

[21] 谭景晨, 赵丽丽, 张淑炜, 等. 干旱胁迫对葛藤种苗生理特性的影响 [J]. 农业与技术, 2020, 40(22): 17−20.
Tan J C, Zhao L L, Zhang S W, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of kudzu vine seedlings [J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(22): 17−20.

[22] 李登峰, 冯秋红, 胡宗达, 等. 金沙江干热河谷新银合欢 (Leucaena leucocephala) 的光合与荧光特征干湿季对比研究 [J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4105−4113.
Li D F, Feng Q H, Hu Z D, et al. Comparative study on photosynthetic physiological and chlorophyll fluorescence characteristics of *Leucaena leucocephala* in wet and dry season, Jinsha River dry-hot valley, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4105−4113.

[23] 魏一凡, 杨清, 宋治华, 等. 干旱胁迫对木豆叶片的影响及机理验证 [J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(9): 36−45.
Wei Y F, Yang Q, Song Z H, et al. Effects of drought stress on *Cajanus cajan* leaves and mechanism verification [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(9): 36−45.

[24] 穆寅生, 张鸽香, 李立婷, 等. 4 种毛茛科植物对干旱胁迫的光合生理响应及抗旱性评价 [J]. 中国野生植物资源, 2024, 43(6): 37−43.
Mu Y S, Zhang G X, Li L T, et al. Photosynthesis physiological response and drought resistance evaluation of four Ranunculaceae species under drought stress [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2024, 43(6): 37−43.

[25] 戴文静, 丁彦芬, 赵泯, 等. 干旱胁迫对 3 种紫堇属植物生理及光合特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2025, 53(12): 164−174.
Dai W J, Ding Y F, Zhao Y, et al. Effects of drought stress on physiological and photosynthetic characteristics of three species

of *Corydali* [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(12): 164−174.

[26] 肖姣娣. 3 种刺篱植物对干旱胁迫的生理生化响应 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2015, 43(7): 155−160.
Xiao J D. Physiological and biochemical responses of three spiny plants to drought stress [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(7): 155−160.

[27] 胡衍平, 刘卫东, 庞文胜, 等. 水分胁迫对山乌桕幼苗生长及生理生化的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 62−72.
Hu Y P, Liu W D, Pang W S, et al. Effects of water stress on the growth, physiological and biochemical characteristics of *Sapium discolor* seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(8): 62−72.

[28] 路之娟, 张永清, 张楚, 等. 不同基因型苦荞苗期抗旱性综合评价及指标筛选 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3311−3322.
Lu Z J, Zhang Y Q, Zhang C, et al. Comprehensive evaluation and indicators of the drought resistance of different genotypes of *Fagopyrum tataricum* at seedling stage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(17): 3311−3322.

[29] 高昆, 石义妃. 干旱胁迫对粉葛幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49(8): 153−157.
Gao K, Shi Y F. Effects of drought stress on the growth and physiological characteristics of *Pueraria loba* seedlings [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(8): 153−157.

[30] 李绍家, 侯开卫, 刘凤书, 等. 几种紫胶虫优良寄主树的自然分布概况及耐旱性与水分生理 [J]. 林业科学研究, 1997, 10(5): 70−75.
Li S J, Hou K W, Liu F S, et al. Natural distribution overview and drought tolerance and water physiology of several excellent host trees of lac beetles [J]. Forest Research, 1997, 10(5): 70−75.

[31] 校亮, 熊东红, 张宝军, 等. 葛藤覆被下干热河谷冲沟沟岸土壤水热变化特征 [J]. 生态学报, 2018, 38(2): 646−656.
Xiao L, Xiong D H, Zhang B J, et al. Effect of kudzu coverage on soil moisture and temperature in the gully bank of the dry-hot valley region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 646−656.

[32] 王家宜, 余涵霞, 赖玉芳, 等. 入侵杂草薇甘菊与本地植物粉葛对水分胁迫的生理响应 [J]. 生物多样性, 2017, 25(12): 1267−1275.
Wang J Y, Yu H X, Lai Y F, et al. Physiological response of the invasive weed *Mikania micrantha* and the native species *Pueraria lobata* var. *thomsonii* to water stress [J]. Biodiversity Science, 2017, 25(12): 1267−1275.

[33] 王兴荣, 张彦军, 李玥, 等. 干旱胁迫对大豆生长的影响及抗旱性评价方法与指标筛选 [J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(1): 49−56.
Wang X R, Zhang Y J, Li Y, et al. Effects of drought stress on growth and screening methods and indexes for drought-resistance in soybean [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(1): 49−56.

[34] 石磊琦, 刘梓钰, 王超俊, 等. 水分和土壤微生物对干热河谷山合欢和银合欢生长性状的影响 [J]. 广西植物, 2024, 44(11): 2125−2140.
Shi L Q, Liu Z Y, Wang C J, et al. Effects of water and soil microorganisms on the growth traits of *Albizia kalkora* and *Leucaena leucocephala* in a dry-hot valley [J]. Guihaia, 2024, 44(11): 2125−2140.

[35] 韩姣姣, 段旭, 赵洋毅. 金沙江干热河谷不同植被坡面土壤水分时空分布特征 [J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 121−129.
Han J J, Duan X, Zhao Y Y. Spatial and temporal variability of soil moisture on slope land of different vegetation of dry-hot valley in Jinsha River [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 121−129.

[36] Jiang H, Zeng Y Y, Liu X D, et al. Rooting for survival: ABA-mediated hormonal integration driving primary root elongation under drought stress [J]. Journal of Plant Ecology, 2026, 19(2): 1.

[37] 唐立松, 张建龙, 李彦, 等. 植物对土壤水分变化的响应与控制性分根交替灌溉 [J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 90−93.
Tang L S, Zhang J L, Li Y, et al. Response of plants to the change of soil moisture content and the controlled alternative partial root-zone irrigation [J]. Arid Zone Research, 2005, 22(1): 90−93.

[38] 王琼, 宋桂龙, 韩烈保, 等. 5 种野生护坡植物的抗旱综合性评价 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2008, 37(2): 153−157.
Wang Q, Song G L, Han L B, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 5 wild plant species applied to slope eco-engineering [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition), 2008, 37(2): 153−157.

[39] Singh D, Mathimaran N, Boller T, et al. Deep-rooted pigeon pea promotes the water relations and survival of shallow-rooted finger millet during drought-despite strong competitive interactions at ambient water availability [J]. PLoS ONE, 2020, 15(2): e0228993.

[40] Gupta D, Regon P, Mai H J, et al. Transcriptional regulation reveals potent drought tolerance mechanisms in contrasting genotypes of *Cajanus cajan* (L.) Millspaugh [J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 1287.

[41] 杨艳鲜, 方海东, 潘志贤, 等. 云南元谋干热河谷区旱坡地不同生态农业模式土壤水分差异性分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 248−252.
Yang Y X, Fang H D, Pan Z X, et al. Variability in soil moisture under four eco-agricultural models on dry slope land in Yuanmou dry-hot valley [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 248−252.

[42] 邵怡若, 许建新, 薛立, 等. 5 种绿化树种幼苗对干旱胁迫和复水的生理响应 [J]. 生态科学, 2013, 32(4): 420−428.
Shao Y R, Xu J X, Xue L, et al. Physiological responses of five greening seedlings to drought stress and rewatering [J]. Ecological Science, 2013, 32(4): 420−428.

[43] 李玲, 徐志防, 韦霄, 等. 金钟藤和葛藤在干旱与复水条件下的生理比较 [J]. 广西植物, 2008, 28(6): 806−810.
Li L, Xu Z F, Wei X, et al. Physiological compare *Merremia boisiana* with *Pueraria lobata* under drought stress and rewatering conditions [J]. Guihaia, 2008, 28(6): 806−810.

[44] 陈坤荣, 周蛟. 薪炭林树种对 PEG 诱导水分胁迫的生理反应 [J]. 西南林学院学报, 1994, 14(3): 149−154.
Chen K R, Zhou J. Physiological rsponse of fuelwood tree species

to PEG-induced water stress [J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 1994, 14(3): 149−154.

[45] 商成慧, 周泽宇, 崔文雪, 等. 大豆脯氨酸积累相关基因家族鉴定及干旱胁迫表达分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(6): 1793−1806.
Shang C H, Zhou Z Y, Cui W X, et al. Identification and expression analysis of proline accumulation related gene families in soybean under drought stress [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(6): 1793−1806.

[46] 李明, 王根轩. 干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响 [J]. 生态学报, 2002, 22(4): 503−507.
Li M, Wang G X. Effect of drought stress on activities of cell defense enzymes and lipid peroxidation in *Glycyrrhiza uralensis* seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 503−507.

[47] Zhi Q Q, Chen Y, Hu H, et al. Physiological and transcriptome analyses reveal tissue-specific responses of leucaena plants to drought stress [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 214: 108926.

[48] 陈少瑜, 郎南军, 贾利强, 等. 干旱胁迫对坡柳等抗旱树种幼苗膜脂过氧化及保护酶活性的影响 [J]. 植物研究, 2006, 26(1): 89−93.
Chen S Y, Lang N J, Jia L Q, et al. Effects of drought stress on lipid peroxidation and activity of defense enzymes of *Dodonaea viscosa, Leucaena leucocephala* and *Tephrosia candida* seedlings [J]. Bulletin of Botanical Research, 2006, 26(1): 89−93.

[49] 崔凯, 李昆, 孙永玉, 等. 云南元谋干热河谷地区 6 种植物种子的抗逆生理特性 [J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(11): 55−58.
Cui K, Li K, Sun Y Y, et al. Physiological characteristics of stress-resistance for seeds of six species of plants in Yuanmou dry and hot valley of Yunnan [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(11): 55−58.

[50] 许翩翩, 王建柱. 边坡先锋植物木豆的抗旱性 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(20): 1−3，7.
Xu P P, Wang J Z. Drought resistance research for slope pioneer plant *Cajanus cajan* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(20): 1−3, 7.

[51] 卢广超, 许建新, 薛立, 等. 干旱胁迫下 4 种常用植物幼苗的光合和荧光特性综合评价 [J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7872−7881.
Lu G C, Xu J X, Xue L, et al. Comprehensive evaluation on photosynthetic and fluorescence characteristics in seedlings of 4 drought resistance species [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7872−7881.

[52] Song X, Zhou G, He Q, et al. Stomatal limitations to photosynthesis and their critical water conditions in different growth stages of maize under water stress [J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106330.

[53] Page M T, Parry M A J. Shining light on photosynthesis [J]. Journal of Experimental Botany, 2025, 76(12): 3243−3246.

[54] 程爽, 李卓琳, 胡海玲, 等. 植物光系统Ⅱ(PSⅡ)应答非生物胁迫机理研究进展 [J]. 生物技术通报, 2023, 39(12): 33−42.
Cheng S, Li Z L, Hu H L, et al. Research progress in the mechanism of plant photosystem II(PSII) responsing to abiotic stress [J]. Biotechnology Bulletin, 2023, 39(12): 33−42.

[55] 段爱国, 杨文忠, 张建国, 等. 苗木离体叶片水分状况的叶绿素荧光参数定量诊断 [J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(4): 529−537.
Duan A G, Yang W Z, Zhang J G, et al. Fluorescence parameters for drought stress diagnosis in detached leaves of ten tree species [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2010, 27(4): 529−537.

（责任编辑　李　契
责任编委　赵秀海）