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

白刺花光合生理对土壤水分的响应及光合生产力水分分级

黄娇 张艳 史常青 杨延东 袁旭 杨建英 周金星 张运晨

Photosynthetic physiological responses of *Sophora davidii* to soil moisture and the classification of soil moisture levels based on photosynthetic productivity

Huang Jiao, Zhang Yan, Shi Changqing, Yang Yandong, Yuan Xu, Yang Jianying, Zhou Jinxing, Zhang Yunchen

引用本文:
黄娇, 张艳, 史常青, 杨延东, 袁旭, 杨建英, 周金星, 张运晨. 白刺花光合生理对土壤水分的响应及光合生产力水分分级[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):62–72. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260087
Huang Jiao, Zhang Yan, Shi Changqing, Yang Yandong, Yuan Xu, Yang Jianying, Zhou Jinxing, Zhang Yunchen. Photosynthetic physiological responses of *Sophora davidii* to soil moisture and the classification of soil moisture levels based on photosynthetic productivity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):62–72. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260087

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260087

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

北京地区典型绿化树种水分利用效率及其影响因素
Water use efficiency and its influencing factors of typical greening tree species in Beijing region
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 44–54. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200293

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
Responses of growth and photosynthetic physiological characteristics of typical plants to drought stress in the dry–hot valley
北京林业大学学报, 2026, 48(7): 23–35. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260073

庐山日本柳杉水分利用效率对气候变化的响应
Response of water use efficiency of *Cryptomeria japonica* to climate change in Lushan Mountain, Jiangxi Province of eastern China
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 48–57. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220279

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

澜沧江中游东达山拉乌山植物群落垂直分布格局
Vertical distribution patterns of plant communities in the Dongda Mountain–Lawu Mountain, middle reaches of the Lancang River of western China
北京林业大学学报, 2026, 48(4): 36–45. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250452

荆条叶片最大水分利用效率的季节变化及其环境调控
Dynamics and environmental regulation of the maximum leaf water use efficiency of *Vitex negundo* var. *heterophylla* during growing season
北京林业大学学报, 2023, 45(6): 52–61. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220347

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260087

白刺花光合生理对土壤水分的响应及光合生产力水分分级

黄 娇[1] 张 艳[1] 史常青[1] 杨延东[2] 袁 旭[2]
杨建英[1] 周金星[1] 张运晨[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 华能澜沧江水电股份有限公司，云南 昆明 650214）

摘要:【目的】针对澜沧江干暖河谷水分受限的生境特征，本研究通过定量分析白刺花对土壤水分梯度的光合生理响应与限制阈值，并基于光合生产力构建水分分级体系，旨在为区域植被修复的精准水分管理提供理论依据。**【方法】**采用自然干燥法设置 5 个土壤相对含水量（RSWC）梯度（95%、80%、65%、50% 和 35%），通过称重法维持水分平衡并诱导植株达到生理稳态。利用 Li-6400XT 测定叶片光响应曲线与气体交换参数，运用非线性模型拟合光合参数对土壤水分的响应特征，并结合生理拐点构建水分与光合生产力分级体系。**【结果】**（1）随土壤水分亏缺加剧（RSWC ≤ 80%），白刺花最大净光合速率与表观量子效率总体呈下降趋势，其中在较低 RSWC 条件下下降明显。当 RSWC 由 80% 降至 35% 时，光补偿点由 27.95 升高至 38.88 μmol/（m^2·s），光饱和点由 1 423.72 降至 1 159.56 μmol/（m^2·s），光合有效利用区间显著缩减。在 RSWC 为 50% 和 35% 时，当光合有效辐射超过 1 200 μmol/（m^2·s）后白刺花表现出明显的光抑制现象。（2）净光合速率（P_n）与气孔导度随土壤水分降低呈先增加后降低的单峰趋势，均在 RSWC 为 80% 时达到最大值。白刺花气孔限制向非气孔限制的转变可能发生在 RSWC 为 35% ~ 50% 区间内，在 RSWC 由 80% 降至 50% 的过程中，P_n 下降主要受气孔因素限制；随着干旱加剧，在 RSWC 降至 35% 的过程中，胞间 CO_2 浓度由降转升、气孔限制值由升转降，表明随干旱程度加剧，非气孔限制作用增强。（3）P_n 与水分利用效率的理论峰值分别位于 RSWC75.6% 和 61.8% 处。在 RSWC 由 80% 降至 65% 的过程中，蒸腾速率（T_r）下降 26.1%，而 P_n 仅下降 1.1%，表明水分受限初期 P_n 与 T_r 对土壤水分降低的响应幅度存在差异。模型外推得到白刺花 P_n 的水分补偿点 RSWC 为 26.3%，并基于理论峰值、P_n 水分补偿点及光合限制方式转变区间等关键指标，将水分−光合生产力划分为无产无效水、低产低效水、中产高效水、高产稳效水及盈余低效水 5 个等级。**【结论】**白刺花在适度水分亏缺条件下能够维持较高的光合能力和水分利用效率，表现出对干暖河谷水分环境的适应能力。建议将 RSWC 50% 作为生态补水的参考预警值；模型外推得到的 RSWC 26.3% 可作为严重水分亏缺条件下的参考性生理阈值，其生态适用性需进一步试验验证。该量化体系为干暖河谷人工植被的稳定性评估提供了科学方案，对于解决该生境下植被修复水分精准管理具有重要的实践意义。

关键词：白刺花；澜沧江干暖河谷；气孔限制；水分利用效率；水分−光合生产力分级
中图分类号：S718.45；Q945.79 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)10−0062−11
引文格式：黄娇，张艳，史常青，等. 白刺花光合生理对土壤水分的响应及光合生产力水分分级［J］. 北京林业大学学报，2026，48(10)：62−72. Huang Jiao, Zhang Yan, Shi Changqing, et al. Photosynthetic physiological responses of *Sophora davidii* to soil moisture and the classification of soil moisture levels based on photosynthetic productivity［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 62−72.

Photosynthetic physiological responses of *Sophora davidii* to soil moisture and the classification of soil moisture levels based on photosynthetic productivity

Huang Jiao[1] Zhang Yan[1] Shi Changqing[1] Yang Yandong[2] Yuan Xu[2]
Yang Jianying[1] Zhou Jinxing[1] Zhang Yunchen[1]

收稿日期：2026−02−14 **修回日期：**2026−09−18
基金项目：国家重点研发计划（2024YFF1307805），澜沧江流域高寒区高陡边坡植被恢复及灌溉技术研究及示范项目（HY2024/S36），西藏自治区科技计划（XZ202501JX0012）。

第一作者：黄娇。主要研究方向：生态修复。Email：18629122070@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：张艳，副教授。主要研究方向：生态修复。Email：bltjzhangyan@bjfu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址：https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, Yunnan, China)

Abstract: [**Objective**] In view of the water-limited habitat characteristics in the dry-warm valley of the Lancang River, this study quantitatively analyzed the photosynthetic physiological responses of *Sophora davidii* across soil moisture gradients and determined its limitation thresholds. Based on these findings, a soil moisture classification system based on photosynthetic productivity was established to provide a theoretical basis for precise water management in regional vegetation restoration. [**Method**] Using a natural drying protocol, five relative soil water content (RSWC) levels (95%, 80%, 65%, 50%, and 35%) were established. Physiological homeostasis was induced via gravimetric moisture control. Leaf gas exchange and light-response curves were quantified using a Li-6400XT system. Nonlinear models were employed to characterize the response of photosynthetic parameters to soil moisture. A soil moisture classification system based on photosynthetic productivity was constructed using key physiological inflection points. [**Result**] (1) With the intensification of soil water deficit (RSWC ≤ 80%), the maximum net photosynthetic rate and apparent quantum yield of *S. davidii* generally declined, with pronounced reductions under lower RSWC conditions. As RSWC decreased from 80% to 35%, the light compensation point shifted from 27.95 to 38.88 μmol/(m^2·s), while the light saturation point decreased from 1 423.72 to 1 159.56 μmol/(m^2·s), substantially narrowing the effective light-utilization range. At 50% and 35% RSWC, pronounced photoinhibition was observed when photosynthetically active radiation exceeded 1 200 μmol/(m^2·s). (2) Both net photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance exhibited a unimodal response to declining soil moisture, peaking at 80% RSWC. The transition from stomatal to non-stomatal limitation in *S. davidii* may occur within the RSWC range of 35%–50%. As RSWC decreased from 80% to 50%, the decline in P_n was primarily driven by stomatal factors. As drought intensified and RSWC fell toward 35%, the intercellular CO_2 concentration shifted from decreasing to increasing, while the stomatal limitation value shifted from increasing to decreasing, suggesting an increasing contribution of non-stomatal limitation with increasing drought severity. (3) Theoretical optima for P_n and water use efficiency were identified at 75.6% and 61.8% RSWC, respectively. When RSWC decreased from 80% to 65%, the transpiration rate (T_r) decreased by 26.1%, whereas P_n decreased by only 1.1%, indicating that in the early stage of water limitation, the response magnitudes of P_n and T_r to decreasing soil moisture differed. The model-extrapolated water compensation point for net photosynthesis was 26.3% RSWC. Based on key indicators such as theoretical optima, the water compensation point for net photosynthesis, and the transition range of photosynthetic limitation, soil moisture availability and photosynthetic productivity were jointly categorized into five hierarchical grades: non-productive and ineffective water, low-productivity and low-efficiency water, moderate-productivity and high-efficiency water, high-productivity and stable-efficiency water, and surplus and low-efficiency water. [**Conclusion**] *S. davidii* maintained relatively high photosynthetic capacity and water-use efficiency under moderate soil water deficit, indicating its physiological adaptability to the water conditions of dry-warm valley habitats. We propose 50% RSWC as a reference early-warning value for supplemental irrigation, whereas the model-extrapolated value of 26.3% RSWC may serve as a reference physiological threshold under severe soil water deficit, and its ecological applicability requires further experimental validation. This quantitative framework provides a scientific approach for assessing the stability of planted vegetation in the dry-warm valley and has important practical significance for precise water management in vegetation restoration in this habitat.

Key words: *Sophora davidii*; dry-warm valley of the Lancang River; stomatal limitation; water use efficiency; soil moisture–photosynthetic productivity classification

全球气候变暖背景下，降水格局呈现显著的极端化与波动性特征，表现为降水间隔期延长、单次降水强度增加且更集中，导致土壤水分供应的不确定性显著提升[1]。特别是在水分作为关键限制因子的

生态脆弱区，降水格局变化会改变土壤有效水分状况，进而影响植被恢复与生态系统过程[2−3]。澜沧江干暖河谷德钦段受“焚风效应”影响，呈现温热高蒸发的气候特征。该区域性干旱气候与横断山区地貌耦合效应显著，在普遍大于 40°的坡度条件下，短历时强降水多转化为地表径流，加之土层浅薄，石砾含量高，降水入渗截留困难，进一步加剧了水分亏缺程度[4]。这种全球气候波动与区域生境特征共同导致的水分限制，使该区域的植被修复面临严峻的生理胁迫。

在此背景下，探明植物应对水分亏缺的生理调节机制是解决植被恢复限制的关键前提。植物对干旱胁迫的适应性主要表现为光合碳同化与蒸腾失水的生理权衡。气孔作为气体交换的核心单元，通过动态调控开闭状态以平衡水分散失与碳固定效率，其调节行为直接决定水分亏缺条件下植物的资源分配优先级[5−6]。已有研究表明，随着土壤水分亏缺加剧，植物气孔导度（G_s）、蒸腾速率（T_r）及净光合速率（P_n）总体呈下降趋势，但其响应幅度和变化模式存在物种差异[7−10]。不同植物在水分亏缺条件下的气孔调节策略存在显著异质性，这种差异反映了物种对极端生境的生理适应机制。气孔敏感型植物多采取保守的水分利用策略，在胁迫初期通过降低气孔导度减少蒸腾失水，有助于维持木质部水力安全，以降低导管空穴化风险，但该模式常以抑制 CO_2 摄入量及光合同化速率为生理代价[11]。相对而言，部分低气孔敏感性植物表现出更强的资源获取型特征，其气孔调节对水分下降的反应相对宽松，允许植株在水分亏缺初期维持较高水平的净光合速率，从而有利于维持碳同化。但随着干旱持续，这种调节方式也可能伴随叶片水势下降并增加水力失效风险[12]。两种策略的核心在于“水力安全保障”与“碳增益潜力”之间的动态权衡，其具体表现与水分亏缺程度及持续时间有关。因此，量化植物气体交换参数随土壤水分梯度的演变特征，并界定其光合限制类型的转换阈值，是解析该物种抗旱机理及评估其在干暖河谷生境修复中适应性的核心前提。

白刺花（*Sophora davidii*）作为横断山区干暖河谷分布最广泛的乡土优势灌木之一，也是植被恢复过程中的先锋树种[13−14]。以往研究多集中于生理指标的定性描述，如通过渗透调节、酶活性变化等评估其抗逆机制[15−16]，或从宏观层面开展潜在适生区预测与育苗技术优化等工作[17−18]。尽管现有成果奠定了白刺花的抗逆评价基础，但其气体交换参数随土壤水分梯度演变特征仍缺乏系统量化，导致生理拐点的判定依据不足，尤其是气孔限制向非气孔限制转化的具体水分阈值尚不明确。水分–光合生产力分级是基于植物光合生理指标及其关键水分阈值，对不同土壤水分条件下的水分有效性和光合生产力水平进行划分的量化评价方法[19−22]。相关研究通常以 P_n 表征植物的光合生产力水平，以水分利用效率（water use efficiency，WUE）表征水分利用状况，该体系已在毛竹（*Phyllostachys edulis*）、酸枣（*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*）、连翘（*Forsythia suspensa*）、黄刺玫（*Rosa xanthina*）等植物的相关研究中得到应用，而白刺花的相关分级研究仍较缺乏。

鉴于此，本研究通过盆栽控水试验，探究以下核心科学问题：（1）阐明白刺花气体交换参数随土壤水分梯度变化的响应特征；（2）定量识别白刺花由气孔限制向非气孔限制转换的临界水分阈值区间；（3）构建基于生理关键阈值的水分–光合生产力分级体系。研究结果旨在揭示白刺花在极端环境下的抗旱机理，并为干暖河谷植被恢复中的精准水分管理与人工干预策略提供理论支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验于北京市海淀区三顷园苗圃（40°00′46″N，116°20′42″E）进行。该区域海拔约为 50 m，属温带大陆性季风气候。试验时间为 2025 年 8 月下旬至 9 月中旬。为模拟自然失水过程，排除降雨干扰，试验于顶部遮雨且前后通风的透明防雨棚内展开。

1.2 试验材料

供试材料为白刺花。种子采自云南省迪庆藏族自治州德钦县佛山乡古水村，该采样点地处典型的澜沧江干暖河谷地带。种子于当年 4 月初经催芽处理后播种于规格为上口径 22.4 cm、底径 18.2 cm、高 20.8 cm 的花盆中。供试植株日龄为 145 ~ 150 d，平均株高为（40 ± 5）cm。

试验基质统一采用北京林业大学三顷园苗圃的沙壤土。基质配制比例按质量比计，即在每 1 kg 干土中添加 17.8 g 有机肥与 0.16 g 保水剂。每盆定额装载混合基质 4.58 kg。经测定，试验基质的田间持水量为 31%，容重为 1.15 g/cm^3，能够满足幼苗正常生长需求。

1.3 试验设计

试验采用自然干燥控水法，每个水分处理设置 5 盆植物作为生物学重复（n = 5）。试验共设置 5 个土壤相对含水量（relative soil water content，RSWC）梯度：95%、80%、65%、50%、35%。RSWC 为土壤质量含水量与田间持水量的比值，以百分数表示。各梯度水分波动范围严格控制在目标值的 ± 3% 以内。

为模拟干暖河谷由雨季进入旱季的自然失水过程，各处理供试植株通过自然干燥分别达到相应的预设水分梯度。当各试验植株达到预设水分梯度后，于每日 18：00 利用全盆称重法计算当日水分亏缺量并进行精准补水，使土壤水分含量维持在目标阈值区间内持续 3～5 d。待植株完成生理适应并进入稳态后，再进行指标测定。试验全过程利用全盆称重法监测，确保各梯度水分波动严格控制在设定阈值区间内。

1.4　测定指标

当 5 盆重复植株达到预设水分梯度后，选择晴朗无云的上午 9：00—11：30，在透明防雨棚内利用 Li-6400XT 便携式光合作用测定系统（LI-COR，USA）测定叶片光响应曲线及气体交换参数。从每盆重复中随机选取 1 株样本，每株选择 2 片生长健壮且发育一致的成熟叶片，每片叶片重复记录 3 次，取算术平均值作为该盆植株在当前水分梯度下的测定值。

测定过程中，利用人工红蓝光源控制叶室内光照强度。光合有效辐射（photosynthetically active radiation，PAR）梯度设定为 2 000、1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、100、50、0 μmol/（m^2·s）。澜沧江干暖河谷最热月均温为 23.7～24.7 ℃，年均相对湿度大于 53%[23]。本试验测定时，棚内空气温度为 27～29 ℃，Li-6400XT 叶室内相对湿度在 40%～50% 之间波动。叶室内 CO_2 浓度为大气背景浓度，气体流速设定为 500 μmol/s。每个 PAR 梯度下的平衡时间为 120～180 s，待气体交换参数稳定后，记录 P_n、G_s、胞间 CO_2 浓度（C_i）及 T_r 等生理指标。

为阐明气体交换参数随土壤水分梯度变化的响应特征，并定量识别由气孔限制向非气孔限制转换的临界水分阈值区间，统一选取 PAR 为 1 200 μmol/（m^2·s）时的气体交换参数进行分析。根据光响应曲线测定结果，该光合有效辐射水平接近白刺花叶片光饱和范围，因此选取该条件下的数据比较不同水分处理下的光合限制机制。

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} \tag{1}$$

$$L_s = 1 - \frac{C_i}{C_a} \tag{2}$$

式中：C_a 为环境 CO_2 浓度。通过联合分析 C_i 与 L_s 的变化趋势，以期界定气孔限制向非气孔限制转换的临界水分区间。

1.5　模型拟合

采用 Ye[24]提出的直角双曲线修正模型对不同土壤水分处理下白刺花叶片 P_n 光响应过程进行模拟，模型相关参数的生物学意义及计算方法参照叶子飘等[25]。

$$P_n = \alpha \frac{1-\beta I}{1+\gamma I} I - R_d \tag{3}$$

式中：I 为光合有效辐射（PAR）；α 为 I 趋近于 0 时光响应曲线的初始斜率，即表观量子效率（apparent quantum yield，AQY）；β 为光抑制项系数；γ 为光饱和项系数；R_d 为暗呼吸速率。

根据模型拟合结果，得到不同水分处理下光响应模型参数，进一步计算 AQY、光补偿点（light compensation point，LCP）、光饱和点（light saturation point，LSP）、最大净光合速率（maximum net photosynthetic rate，P_{nmax}）和 R_d 等光合特征参数。旨在评估不同土壤水分条件下白刺花的光能转化潜能及光照适应范围。

为构建基于生理关键阈值的水分-光合生产力分级体系，采用二次多项式回归方程拟合 P_n、WUE 与 RSWC 的非线性关系，通过求导计算理论峰值对应的水分阈值，通过定积分法计算试验水分范围内的平均响应水平，并反求其对应的水分阈值。综合理论峰值、水分补偿点及积分均值等多个关键生理阈值，进而对水分-光合生产力进行分级。

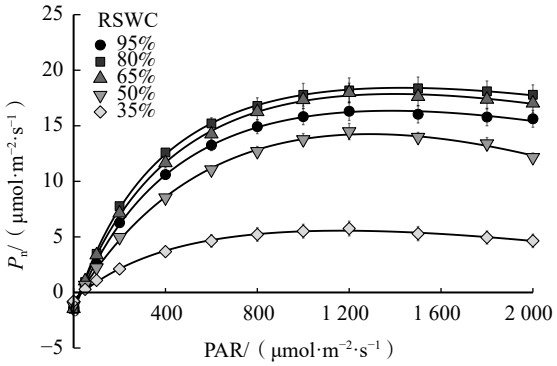
1.6　数据分析

利用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行统计分析。采用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验分别评价数据的正态性和方差齐性。在满足正态分布和方差齐性的条件下，以 RSWC 为单一因素进行单因素方差分析（one-way ANOVA），并采用 Tukey HSD 法进行多重比较，显著性水平设定为 α = 0.05。利用 R 4.2.0 软件进行光响应模型拟合，并对 P_n、WUE 与 RSWC 的关系进行回归分析及参数计算；图形采用 ggplot2 程序包绘制。

2　结果与分析

2.1　不同 RSWC 下白刺花叶片 P_n 的光响应特性

由图 1 可知，各水分处理下白刺花叶片的 P_n 随 PAR 的增加呈现先快速上升、后趋于平缓、继而微降的变化特征。为精准量化这一响应特征，本研究应用直角双曲线修正模型对该光响应曲线过程进行了拟合。结果（表 1）显示，各处理的拟合决定系数（R^2）均大于等于 0.996，表明该模型能够可靠表征白刺花 P_n 对 PAR 的响应规律。结合图 1 的曲线形态与表 1 的具体拟合参数可以进一步看出，P_n 随 RSWC 的增加呈现出明显的“先升后降”单峰演变趋势，并在 80% 时达到峰值。在 RSWC 为 35% 和 50% 条件下，PAR > 1 200 μmol/（m^2·s）后，白刺花均



PAR. 光合有效辐射；P_n. 净光合速率。下同。

图 1 不同 RSWC 下白刺花叶片 P_n 的光响应模拟曲线

Fig. 1 Simulated light-response curves of leaf P_n in *Sophora davidii* under different RSWC

表现出明显的光抑制现象，即 P_n 随 PAR 升高而逐渐降低；而在 RSWC80% 或 65% 环境下，P_n 在高光区保持稳定，表现出较强的光合稳态及强光适应性。

由表 1 可知，白刺花各光合特征参数随土壤水分梯度变化差异显著（$P < 0.05$）。AQY 随水分梯度递增呈先升后降趋势，于 RSWC 为 80% 时达到最大值（0.07），表明该水分条件下植株光能转化潜能最强；在 RSWC35% 或 95% 条件下，AQY 均显著降低，反映出极端水分条件下叶片的弱光利用能力受限。LCP 与 LSP 共同反映了植物的光照适应范围。随土壤水分降低，LCP 呈先降后升趋势，而 LSP 呈先升后降趋势。具体而言，在 RSWC 为 80% 处理下，白刺花 LCP 较低（27.95 μmol/(m^2·s)），且与 65% 处理差异不显著，同时具有较高的 LSP（1 423.72 μmol/(m^2·s)），表明此水分条件下植株对弱光的利用能力较强且光合有效利用区间较宽。而在 RSWC 为 35% 下，LCP 较 80% 处理显著升高至 38.88 μmol/(m^2·s)，LSP 降至最低值（1 159.56 μmol/(m^2·s)），表现为光合有效区间的双向收缩。最大净光合速率（P_{nmax}）随 RSWC 的增加呈先显著升高后缓慢下降的趋势。RSWC 为 80% 处理下的 P_{nmax} 最高（18.46 μmol/(m^2·s)），约为 35% 处理下的 3.3 倍。值得注意的是，RSWC80% 与 65% 时的 P_{nmax} 差异不显著（$P > 0.05$），表明白刺花在轻度水分亏缺下具有一定的生理弹性。R_d 随土壤水分的降低呈先升后降趋势，于 RSWC80% 时达到峰值，随后随水分亏缺的加剧而显著下降。在 RSWC 为 35% 条件下，R_d 下降至最低值（0.65 μmol/(m^2·s)）。

2.2 气体交换参数对土壤水分的临界响应及其限制模式判别

白刺花叶片各气体交换参数对土壤水分波动的敏感性及响应特征差异显著（表 2、图 2）。随 RSWC 的增加，P_n 与 G_s 均呈单峰演变趋势，且均在 RSWC 为 80% 的适宜水分条件下达到最大值，分别为 18.19 μmol/(m^2·s)和 0.25 mol/(m^2·s)。当 RSWC 为 95% 时，尽管光照与底物充足，但其 G_s 较 RSWC 为 80% 处理组显著下降了 34.4%（$P < 0.05$），P_n 回落至 16.31 μmol/(m^2·s)，表明过高水分条件下白刺花光合过程受到一定抑制。相比之下，蒸腾速率（T_r）随土壤水分的增加呈持续上升趋势，在 RSWC 为 95% 处理下达到峰值（7.26 mmol/(m^2·s)）。这种 P_n 下降与 T_r 上升的非同步响应，导致 WUE 在 RSWC95% 下较 RSWC80% 下显著降低（$P < 0.05$）。由图 2 可知，WUE 随 RSWC 的降低呈先升后降趋势，并在 RSWC65% 时达到峰值（4.52 μmol/mmol）。这表明在水分受限初期，白刺花 P_n 仍维持较高水平，而 T_r 降低，使 WUE 保持在较高水平。

为解析白刺花光合速率下降的内在限制机制，本研究通过分析 C_i 与气孔限制值（L_s）对土壤水分的响应特征（图 3），对光合限制模式进行了阶段性界定。在 RSWC 由 80% 降至 50% 的过程中，C_i 随水分亏缺而逐步下降，并在 RSWC 为 50% 处理下达到极小值（273.21 μmol/mol）；与此同时，L_s 显著升高并达到最大值（0.34，表 2）。这种“G_s 下降、C_i 降低、L_s 升高”的同步演变特征表明，该水分区间内，P_n 下降主要源于气孔开度减小造成 CO_2 扩散阻力增加，是

表 1 不同 RSWC 下白刺花光响应模型拟合参数

Tab. 1 Fitting parameters of leaf light-response models for *Sophora davidii* under different relative soil water contents

RSWC/%	AQY/（μmol·μmol^{-1}）	R_d/（μmol·m^{-2}·s^{-1}）	LCP/（μmol·m^{-2}·s^{-1}）	LSP/（μmol·m^{-2}·s^{-1}）	P_{nmax}/（μmol·m^{-2}·s^{-1}）	R^2
95	0.052 ± 0.002b	1.629 ± 0.028a	33.320 ± 1.300ab	1 380.200 ± 20.538a	16.360 ± 0.777ab	0.999
80	0.067 ± 0.004a	1.756 ± 0.042a	27.946 ± 0.847b	1 423.720 ± 12.281a	18.458 ± 1.045a	0.998
65	0.057 ± 0.002b	1.478 ± 0.035b	27.326 ± 0.760b	1 395.380 ± 19.493a	17.868 ± 0.868a	0.999
50	0.035 ± 0.002c	1.015 ± 0.027c	30.082 ± 1.023b	1 291.180 ± 6.947b	14.266 ± 0.595b	0.998
35	0.018 ± 0.002d	0.648 ± 0.019d	38.876 ± 3.620a	1 159.560 ± 20.318c	5.568 ± 0.658c	0.996

注：RSWC. 土壤相对含水量；AQY. 表观量子效率；R_d. 暗呼吸速率；LCP. 光补偿点；LSP. 光饱和点；P_{nmax}. 最大净光合速率；R^2. 决定系数。不同小写字母表示不同RSWC间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

表 2　不同 RSWC 下白刺花气体交换参数及水分利用效率

Tab. 2　Leaf gas exchange parameters and water-use efficiency of *Sophora davidii* under different relative soil water contents

RSWC/%	P_n/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	G_s/(mol·m^{-2}·s^{-1})	C_i/(μmol·mol^{-1})	T_r/(mmol·m^{-2}·s^{-1})	WUE/(μmol·mmol^{-1})	L_s
95	16.309 ± 0.831ab	0.162 ± 0.005c	311.922 ± 3.542b	7.255 ± 0.103a	2.254 ± 0.094c	0.245 ± 0.008b
80	18.186 ± 1.127a	0.247 ± 0.007a	336.285 ± 4.039a	5.406 ± 0.081b	3.368 ± 0.179b	0.187 ± 0.010c
65	17.981 ± 0.859ab	0.189 ± 0.007b	325.609 ± 3.369ab	3.996 ± 0.121c	4.517 ± 0.143a	0.212 ± 0.008bc
50	14.479 ± 0.729b	0.127 ± 0.004d	273.207 ± 3.725c	3.437 ± 0.082d	4.215 ± 0.147a	0.340 ± 0.009a
35	5.754 ± 0.662c	0.100 ± 0.005e	289.301 ± 6.616c	2.073 ± 0.188e	2.810 ± 0.210bc	0.299 ± 0.016a

注: G_s. 气孔导度; C_i. 胞间CO_2浓度; T_r. 蒸腾速率; WUE. 水分利用效率; L_s. 气孔限制值。下同。

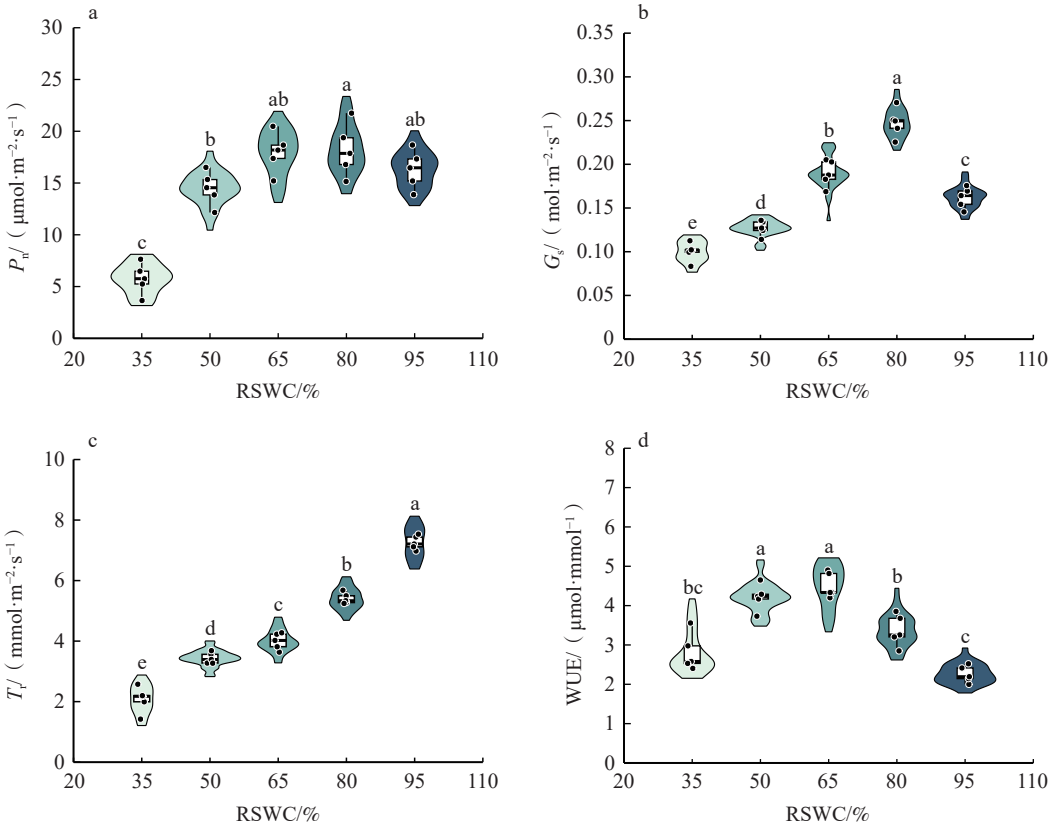


图 2　白刺花叶片气体交换参数对不同 RSWC 的响应特征

Fig. 2　Response characteristics of leaf gas exchange parameters to different RSWC in *Sophora davidii*

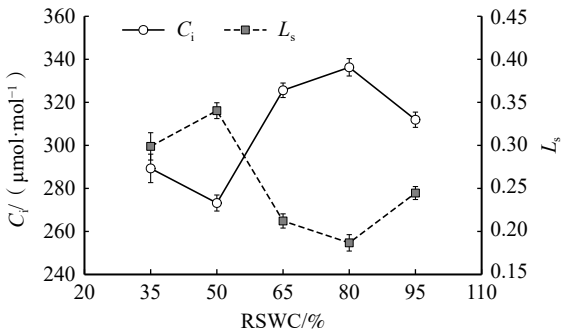


图 3　白刺花 C_i 与 L_s 对不同 RSWC 的响应特征

Fig. 3　Response characteristics of C_i and L_s to different RSWC in *Sophora davidii*

典型的气孔限制。而当 RSWC降至 35% 时，生理响应模式发生逆转，尽管此时 G_s 降至最低水平，C_i 由 50% 处理的 273.21 μmol/mol 升至 289.30 μmol/mol，呈回升趋势，而 L_s 由 0.34 降至 0.30，亦呈下降趋势。这种低气孔导度下 C_i 呈回升趋势且 L_s 下降的变化特征，提示随着干旱程度加剧，非气孔限制作用增强。

为进一步分析白刺花气孔限制向非气孔限制的转变特征，本研究对不同水分梯度下 P_n 与 G_s 的耦合关系进行了回归拟合(图 4)。由点阵分布可见，不同土壤水分范围内 P_n 与 G_s 的响应关系存在明显分异：当 RSWC ≥ 50% 时，P_n 随 G_s 增加呈显著线性相关，反映出较强的气孔协同调控特征；而当 RSWC 为 35% 时，P_n 与 G_s 的关系偏离线性。这一数理特征的变化与前述 C_i 和 L_s 的生理结果一致，共同表明白刺花气孔限制向非气孔限制的转变可能发

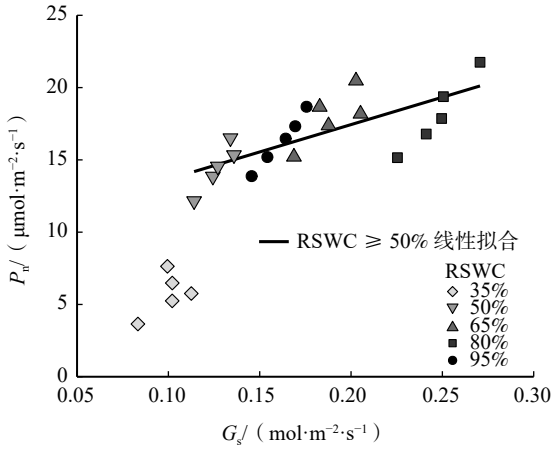


图 4 不同 RSWC 下白刺花 P_n 与 G_s 的协同响应特征

Fig. 4 Synergistic response characteristics of P_n and G_s in *Sophora davidii* under different RSWC

生在 RSWC 为 35% ~ 50% 区间内。上述变化反映了随干旱程度加剧白刺花光合限制方式的转变。

2.3 白刺花水分−光合生产力响应模型及分级

回归分析表明，白刺花叶片 P_n 和 WUE 对 RSWC 的响应均符合二次多项式模型，呈现明显的非线性变化特征（图 5）。令 x 表示 RSWC（%），则 P_n 和 WUE 与 x 的拟合方程分别为

$$P_n = -0.007\,778x^2 + 1.176\,576x - 25.574\,020 \quad (4)$$

$$\mathrm{WUE} = -0.002\,060x^2 + 0.254\,718x - 3.494\,475 \quad (5)$$

基于拟合方程的一阶导数属性，计算出 P_n 和 WUE 的理论峰值分别位于 RSWC 为 75.6% 和 61.8% 时。此时，P_n 达到理论最大值 18.92 μmol/(m²·s)，而 WUE 达到最大值 4.38 μmol/mmol。WUE 达到峰值时的 RSWC（61.8%）低于 P_n 达到峰值时的 RSWC（75.6%），表明白刺花净光合速率与水分利用效率达到最大值所对应的土壤水分条件存在差异。通过模型求根分析（$P_n = 0$），得到试验水分范围低值方向外推的净光合速率水分补偿点 RSWC 为 26.3%；由于该值低于本试验最低水分处理，其生态适用性仍需进一步验证。

为量化全水分梯度下的平均生理表现，本研究引入定积分均值公式评估白刺花在试验区间内的总体生理水平。

$$\overline{P_n} = \frac{1}{95-35}\int_{35}^{95}(-0.007\,778x^2 + 1.176\,576x - 25.574\,020)\mathrm{d}x \quad (6)$$

$$\overline{\mathrm{WUE}} = \frac{1}{95-35}\int_{35}^{95}(-0.002\,060x^2 + 0.254\,718x - 3.494\,475)\mathrm{d}x \quad (7)$$

经计算得出，P_n 和 WUE 的积分均值分别为 15.71 μmol/(m²·s)和 3.74 μmol/mmol。通过逆向求解回归方程，得到 P_n 维持在中等及以上水平（≥积分均值）的 RSWC 为 55.3% ~ 96.0%，其中 96.0% 略超出本试验最高水分处理；在试验范围内，对应区间为 55.3% ~ 95.0%，而 WUE 高效区间的 RSWC 为 44.2% ~ 79.4%。

植物在干暖生境下的适应性本质上是光合碳获益与水耗散之间的权衡。本研究进一步表明，白刺花净光合速率与水分利用效率达到最大值所对应的 RSWC 存在差异，分别为 75.6% 和 61.8%（图 5）。进一步比较发现，当 RSWC 由 80% 降至 65% 时，白刺花 P_n 与 T_r 的变化幅度存在明显差异。与 RSWC 为 80% 的处理相比，65% 处理下 P_n 仅下降 1.1%，而 T_r 下降 26.1%。这一变化表明，在水分受限初期，白刺花 P_n 变化较小，而 T_r 的下降幅度较大，从而维持了较高的 WUE。这种以极低碳损换取高额水分增益的非线性响应模式，反映了白刺花在水分受限初期采取了高效率碳同化策略。基于上述关键生理阈值，包括 P_n 水分补偿点、光合限制方式转变区间以及 P_n 和 WUE 理论峰值，本研究对不同土壤水分条件下的水分−光合生产力进行分级（表 3），为澜沧江干暖河谷植被的精准补水策略提供量化参考。

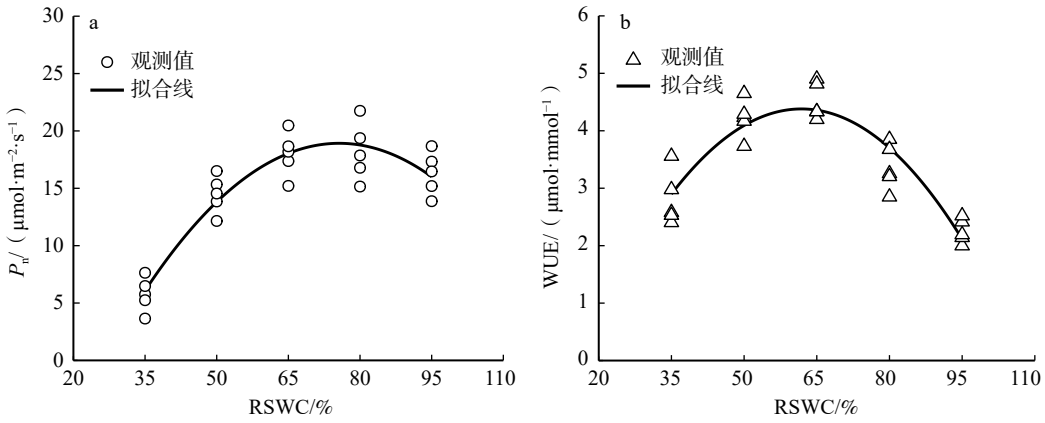


图 5 白刺花 P_n 与 WUE 对 RSWC 的非线性响应模型

Fig. 5 Nonlinear response models of P_n and WUE to RSWC in *Sophora davidii*

表 3　基于白刺花光合生理响应的水分–光合生产力分级

Tab. 3　Joint classification of soil moisture availability and photosynthetic productivity based on the photosynthetic physiology of *Sophora davidii*

水分–光合生产力等级	RSWC区间	划分依据
I 无产无效水	≤ 26.3%	RSWC不高于P_n水分补偿点对应的土壤含水量, $P_n \leq 0$
II 低产低效水	(26.3% ~ 50.0%]	RSWC介于P_n水分补偿点对应含水量至推算的转变区间上界(RSWC=50%); P_n低于其积分均值, WUE逐步升高
III 中产高效水	(50.0% ~ 61.8%]	RSWC介于50%至WUE峰值对应的含水量; WUE高于其积分均值
IV 高产稳效水	(61.8% ~ 79.4%]	覆盖P_n峰值(RSWC=75.6%); P_n与WUE均不低于各自积分均值
V 盈余低效水	> 79.4%	WUE低于其积分均值, 水分利用效率降低

3　讨　　论

3.1　白刺花对土壤水分亏缺的光响应调控特征

白刺花在适宜水分条件下表现出较强的光合能力, 有利于其碳积累和生长。在 RSWC 为 80% 时, 白刺花 P_{nmax} 达 18.46 μmol/(m^2·s), 高于金沙江干热河谷希蒙得木(*Simmondsia chinensis*)(10.276 ~ 11.206 μmol/(m^2·s))的测定值[26], 表明白刺花在本试验条件下具备较高的光合碳同化能力。同时 AQY 达 0.07 μmol/μmol, 处于余甘子(*Phyllanthus emblica*)不同种源 AQY 分布范围(0.058 4 ~ 0.074 5 μmol/μmol)的中上水平[27]。这种较高的光能捕获与转化能力, 有利于其在水分适宜期内实现高效的物质积累, 为其在群落竞争中占据有利地位提供了保障。

水分亏缺驱动的光响应幅宽收缩, 反映了植株对资源获取与风险规避的生理权衡。随着 RSWC 由 80% 转向 35%, 白刺花 LSP 显著下调, 而 LCP 呈现受迫性升高。这种“高补低饱”的响应模式导致其光合有效利用区间在 RSWC 为 35% 下发生明显压缩。段爱国等[28]对干热河谷主要植被恢复树种的研究表明, 不同树种的 LCP 和 LSP 存在明显差异, 其 LCP 和 LSP 分别分布于 14 ~ 37 μmol/(m^2·s)和 1 015 ~ 1 648 μmol/(m^2·s)的范围内。本研究中白刺花在不同水分条件下 LCP 和 LSP 发生明显变化, 表明土壤水分变化能够进一步影响其光适应范围。

严重水分亏缺条件下的高 PAR 抑制现象, 进一步反映了白刺花对水分与光照条件的响应特征。赵广等[29]对干热河谷 3 种典型植被恢复树种的研究表明, 不同树种在高 PAR 条件下表现出明显的光响应差异, 辣木(*Moringa oleifera*)和银合欢(*Leucaena leucocephala*)具有较高的光饱和点, 表现出较强的强光利用能力。本研究中, RSWC 为 35% 时, 白刺花 R_d 降至 0.65 μmol/(m^2·s), P_{nmax} 降至 5.57 μmol/(m^2·s), 且在 PAR > 1 200 μmol/(m^2·s)后 P_n 明显下降, 表明严重水分亏缺条件下其高光利用能力受到抑制。

3.2　白刺花光合限制因子的阈值效应与生理转折

准确判别光合作用受阻的转换节点, 是解析植物耐旱极限与适应策略的核心。本研究结果表明, 白刺花气孔限制向非气孔限制的转变可能发生在 RSWC 为 35% ~ 50% 区间内。在 RSWC 由 80% 降至 50% 的过程中, P_n 的下降主要由 G_s 的降低主导, 并伴随 C_i 同步下降。这一响应模式符合气孔限制的经典模型, 表征植株主要通过气孔调节维持水分平衡[30]。当 RSWC 由 50% 降至 35% 时, G_s 进一步降低, 而 C_i 由下降转为回升。这种低气孔导度下 C_i 呈回升趋势的变化特征提示非气孔限制作用增强, 这可能与 Rubisco 活性下降或光合电子传递受抑等生理过程有关[31]。

类似的由气孔限制向非气孔限制的转变在其他木本植物中亦有报道。新疆枣树(*Ziziphus jujuba*)幼果期在 RSWC 低于 48.89% 时, P_n 下降的主要限制因素由气孔因素转为非气孔因素[32]; 杨树无性系在 RSWC 低于 40% 时, 也表现出由气孔限制向非气孔限制转变的特征[33]。本研究中白刺花的推定转变区间为 RSWC 35% ~ 50%, 与上述研究结果具有一定可比性, 说明不同木本植物在水分亏缺加剧过程中可能存在相似的光合限制转换规律。本研究进一步发现, 当 RSWC 由 80% 降至 65%时, 白刺花 P_n 仅下降 1.1%, 而 T_r 下降 26.1%, 表明水分受限初期蒸腾对土壤水分降低的响应幅度大于光合碳同化。类似的水分调节特征在其他木本植物中亦有报道, 例如油松(*Pinus tabuliformis*)在干旱条件下气孔导度下降而 WUE 升高[34]; 邬鹏等[35]研究发现, 干热河谷典型植物在干旱加剧过程中 P_n、G_s 和 T_r 总体下降, 其中部分植物在轻、中度干旱条件下 WUE 升高。这种响应可能有助于植物在水分受限初期减少水分损失, 同时维持一定的碳同化能力。

3.3　白刺花水分–光合生产力分级与精准管护策略

针对干暖河谷生态修复中植被建植成活率低、管护缺乏量化依据的问题, 本研究基于 P_n 和 WUE 对土壤水分的响应特征及关键生理阈值, 构建了水

分−光合生产力分级体系。该体系可为白刺花不同水分条件下的生长促进、水分利用效率维持、胁迫预警和低水分调控提供参考。在建植初期或 6—8 月的雨季集中期，管护策略应聚焦于高产稳效区间，即 RSWC 高于 61.8% 且不超过 79.4%。此时应充分利用白刺花在 P_n 峰值（RSWC 为 75.6% 附近）的高效同化能力，加速生物量建植。进入 9 月至次年 5 月的旱季养护期，策略应调整为中产高效模式，即 RSWC 高于 50.0% 且不超过 61.8%。利用其 WUE 理论峰值（RSWC 为 61.8% 时）的特性，通过适度亏缺灌溉在维持光合同化的前提下，大幅减少蒸腾耗水。

在精准管护实践中，白刺花气孔限制向非气孔限制的转变可能发生在 RSWC 为 35% ~ 50% 的区间内，可将该区间作为水分管理的参考预警范围。模型外推得到的 P_n 水分补偿点为 RSWC 26.3%，可作为严重水分亏缺条件下的参考性生理阈值。在该水分水平下，模型预测叶片净光合速率接近 0，表明叶片净碳同化能力受到严重限制。由于 RSWC 26.3% 低于本试验设置的最低水分处理，其实际生理效应及生态适用性仍需通过更低水分梯度试验进一步验证。结合澜沧江干暖河谷旱季降水匮乏且蒸发强度较大的环境特征，植被恢复过程中应加强土壤水分监测。当 RSWC 接近 50% 时，可根据植株生长状况和土壤水分变化适时补水，使土壤水分维持在中产高效水或高产稳效水区间。对于 RSWC 接近模型外推水分补偿点的情况，应及时采取水分调控措施，但具体补水量和补水频率仍需结合田间试验进一步确定。

此外，针对河谷区水分供应不稳定的生境特点，生态修复可考虑结合水分调控与基质改良措施。在穴植施工中，可探索通过施加有机肥和保水剂改善土壤持水条件，并结合土壤水分监测开展适时补水。相较于植株出现严重水分胁迫后再进行补水，该模式可依据白刺花光合生理响应确定的参考阈值，结合土壤水分动态监测判断补水时机，并以中产高效水或高产稳效水区间作为调控目标，以期减轻持续水分亏缺对光合同化的不利影响，兼顾幼苗生长需求与水分利用效率，为造林初期幼苗的水分管理提供科学依据。

4 结　　论

本研究基于盆栽控水试验，通过非线性模型分析，系统阐明了澜沧江干暖河谷先锋灌木白刺花对土壤水分梯度的生理响应特征，得出如下主要结论。

（1）拟合模型显示，白刺花 P_n 与 WUE 的理论峰值分别位于 RSWC 为 75.6% 和 61.8% 处，二者达到最大值所对应的土壤水分条件存在差异。当 RSWC 由 80% 降至 65% 时，P_n 仅下降 1.1%，而 T_r 下降 26.1%，表明二者对土壤水分降低的响应幅度存在差异。

（2）白刺花气孔限制向非气孔限制的转变可能发生在 RSWC 为 35% ~ 50% 区间内。当 RSWC≥ 50% 时，P_n 与 G_s 呈较明显的线性关系；在 RSWC 由 80% 降至 50% 的过程中，光合下降主要受气孔因素限制；当 RSWC 由 50% 进一步降至 35% 时，G_s 维持在较低水平，而 C_i 呈回升趋势，非气孔限制作用增强。该转变区间反映了随着水分亏缺的加剧，白刺花光合限制方式由以气孔调节为主逐渐向非气孔因素限制转变。

（3）构建了基于关键生理阈值的水分−光合生产力分级体系。综合 P_n 水分补偿点、P_n 和 WUE 理论峰值及光合限制方式转变区间等关键阈值，将不同土壤水分条件划分为“无产无效水、低产低效水、中产高效水、高产稳效水、盈余低效水”5 个等级，反映了不同水分条件下白刺花的水分−光合生产力特征。

（4）基于光合生理响应提出了白刺花水分管理的参考阈值。建议将 RSWC 50% 作为生态补水的参考预警值，以降低光合限制方式发生转变的风险；模型外推得到的 RSWC 26.3% 可作为严重水分亏缺条件下的参考性生理阈值，但不宜直接作为个体死亡界限。相关阈值的田间适用性仍需进一步验证。

参 考 文 献

[1] Knapp A K, Beier C, Briske D D, et al. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems [J]. BioScience, 2008, 58(9): 811−821.

[2] Zhang C C, Wang Y Q, Jia X X, et al. Variations in capacity and storage of plant-available water in deep profiles along a revegetation and precipitation gradient [J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124401.

[3] 周贵尧, 周灵燕, 邵钧炯, 等. 极端干旱对陆地生态系统的影响: 进展与展望 [J]. 植物生态学报, 2020, 44(5): 515−525.
Zhou G Y, Zhou L Y, Shao J J, et al. Effects of extreme drought on terrestrial ecosystems: review and prospects [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(5): 515−525.

[4] 汪健. 澜沧江中游干旱河谷荒漠植被研究 [D]. 昆明: 西南林业大学, 2013.
Wang J. Study on desert vegetation in the dry valley of the middlestream Lancangjiang River [D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2013.

[5] McDowell N G. Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality [J]. Plant Physiology, 2011, 155(3): 1051−1059.

[6] 张红霞, 贾荣亮, 赵鹏善, 等. 荒漠植物逆境生理生态学研究进

展 [J]. 中国沙漠, 2025, 45(3): 72−79.
Zhang H X, Jia R L, Zhao P S, et al. A review of the stress physiology and ecology of desert plants [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(3): 72−79.

[7] 甘菲菲, 招礼军, 霍灿灿, 等. 光照和水分对四季米仔兰幼苗生长的影响 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 439−446.
Gan F F, Zhao L J, Huo C C, et al. Effects of light and water availability on the growth of *Aglaia duperreana* seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(2): 439−446.

[8] 常乐乐, 范子晗, 梁昊枫, 等. 干旱胁迫对甘草幼苗光合特性及根系吸水的影响 [J]. 草业科学, 2024, 41(2): 382−393.
Chang L L, Fan Z H, Liang H F, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and root water absorption of *Glycyrrhiza uralensis* [J]. Pratacultural Science, 2024, 41(2): 382−393.

[9] Kong X, Liu Z, Fu W G. Effects of different soil moisture contents on photosynthesis of lettuce [J]. Agricultural Science, 2023, 5(2): p1.

[10] 王琰, 陈建文, 狄晓艳. 不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7031−7038.
Wang Y, Chen J W, Di X Y. Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine(*Pinus tabulaeformis* Carr.) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7031−7038.

[11] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought [J]. New Phytologist, 2008, 178(4): 719−739.

[12] Attia Z, Domec J C, Oren R, et al. Growth and physiological responses of isohydric and anisohydric poplars to drought [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(14): 4373−4381.

[13] 金振洲. 滇川干暖河谷种子植物区系成分研究 [J]. 广西植物, 1998, 18(4): 313−321.
Jin Z Z. Study on the floristic elements of seed plant in the dry-warm valleys of Yunnan and Sichuan [J]. Guihaia, 1998, 18(4): 313−321.

[14] 左艳洁, 戍国标, 王崇云, 等. 澜沧江中上游河谷植被的群落数量分类和谱系结构 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2665−2677.
Zuo Y J, Shu G B, Wang C Y, et al. Quantitative classification and phylogenetic structure of vegetation in valley of the middle and upper reaches of Lancang River [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(9): 2665−2677.

[15] 吴丽芳, 魏晓梅, 蔡建. 白刺花幼苗抗旱与耐寒协同响应的生理生化评价 [J]. 热带作物学报, 2023, 44(10): 2051−2059.
Wu L F, Wei X M, Cai J. Physiological and biochemical evaluation of synergistic responses in drought and cold tolerance of *Sophora davidii* seedlings [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(10): 2051−2059.

[16] 董祥, 郝俊, 陈秋生, 等. 喀斯特地区白刺花营养物质和酚类物质的含量动态 [J]. 草业科学, 2019, 36(2): 450−457.
Dong X, Hao J, Chen Q S, et al. The dynamic variations in nutrient and phenolic content in *Sophora davidii* in a Karst region of Guizhou Province [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(2): 450−457.

[17] 王露露, 伊力哈木·亚尔买买提. 基于 MaxEnt 模型的中国特有灌木物种白刺花的潜在适生区预测 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3114−3124.
Wang L L, Yilihamu Y M. Prediction of potential suitable areas for a Chinese endemic shrub *Sophora davidii* using the MaxEnt Model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(10): 3114−3124.

[18] 吴丽芳, 魏晓梅, 陆伟东, 等. 不同收获期白刺花种子活力及干热胁迫对幼苗生长发育的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(16): 94−98.
Wu L F, Wei X M, Lu W D, et al. Effects of seed vigor at different harvesting time and drought-heat stress on growth and development of *Sophora davidii* seedlings [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(16): 94−98.

[19] 景雄, 范少辉, 蔡春菊, 等. 基于光合特性的毛竹实生苗土壤水分有效性及生产力分级 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3088−3097.
Jing X, Fan S H, Cai C J, et al. Classification of soil water availability and productivity of Moso bamboo(*Phyllostachys edulis*)seedlings based on photosynthetic characteristics [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(10): 3088−3097.

[20] 杨锐. 土壤干旱胁迫程度及时间对酸枣光合作用的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
Yang R. Effect of soil drought stress degree and duration on photosynthesis of *Ziziphus jujuba* [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018.

[21] 郎莹, 汪明. 春夏两季连翘光合作用的土壤水分阈值效应及生产力分级 [J]. 林业科学, 2016, 52(2): 38−46.
Lang Y, Wang M. Threshold effect of photosynthesis in *Forsythia suspense* to soil water and its photosynthetic productivity grading in spring and summer [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(2): 38−46.

[22] 张淑勇, 夏江宝, 张光灿, 等. 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级 [J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2519−2528.
Zhang S Y, Xia J B, Zhang G C, et al. Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic productivity classification [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2519−2528.

[23] 余昱. 金沙江、澜沧江干暖河谷灌草丛群落特征研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2018.
Yu Y. Study on the shrub-grass communities in dry warm valley of Jinsha and Lancang River [D]. Kunming: Yunnan University, 2018.

[24] Ye Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. Photosynthetica, 2007, 45(4): 637−640.

[25] 叶子飘, 康华靖. 植物光响应修正模型中系数的生物学意义研究 [J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2012, 33(2): 51−57.
Ye Z P, Kang H J. Study on biological significance of coefficients

in modified model of photosynthesis-irradiance [J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2012, 33(2): 51−57.

[26] 李晓清, 高捍东, 曹小军, 等. 金沙江干热河谷希蒙得木的光合特性 [J]. 浙江林学院学报, 2007, 24(3): 302−307.
Li X Q, Gao H D, Cao X J, et al. Photosynthetic characteristics of *Simmondsia chinensis* in the arid-hot valley of the Jinsha River [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2007, 24(3): 302−307.

[27] 袁建民, 何璐, 杨晓琼, 等. 干热河谷区 3 个种源余甘子的光响应曲线特性研究 [J]. 江西农业学报, 2020, 32(3): 55−60.
Yuan J M, He L, Yang X Q, et al. Light response curve of photosynthesis of three *Phyllanthus emblica* provenances in dry-hot valley of Jinsha River [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2020, 32(3): 55−60.

[28] 段爱国, 张建国, 何彩云, 等. 干热河谷主要植被恢复树种干季光合光响应生理参数 [J]. 林业科学, 2010, 46(3): 68−73.
Duan A G, Zhang J G, He C Y, et al. Characteristic parameters of light response of photosynthesis of main tree species for vegetation restoration in dry season in dry-hot river valley [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(3): 68−73.

[29] 赵广, 金杰, 韩学琴, 等. 干热河谷旱季 3 种典型植被恢复树种光合生理特征 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(1): 81−86.
Zhao G, Jin J, Han X Q, et al. Photosynthetic characteristics of three typical trees for vegetation restoration in dry season of dry-hot valley [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(1): 81−86.

[30] 关义新, 戴俊英, 林艳. 水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制 [J]. 植物生理学通讯, 1995(4): 293−297.
Guan Y X, Dai J Y, Lin Y. Stomatal and non-stomatal limitation of photosynthesis in plant leaves under water stress [J]. Plant Physiology Communications, 1995(4): 293−297.

[31] Flexas J, Medrano H. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited [J]. Annals of Botany, 2002, 89(2): 183−189.

[32] 付优, 马英杰. 不同土壤水分对枣树幼果期光合特性的影响研究 [J]. 节水灌溉, 2019(8): 54−58,63.
Fu Y, Ma Y J. Effects of different soil moisture on photosynthetic characteristics of jujube at young fruit stage [J]. Water Saving Irrigation, 2019(8): 54−58,63.

[33] 乔滨杰, 王德秋, 高海燕, 等. 干旱胁迫下杨树无性系苗期光合与气孔形态变异研究 [J]. 植物研究, 2020, 40(2): 177−188.
Qiao B J, Wang D Q, Gao H Y, et al. Photosynthetic and stomatal morphological variation of poplar clones in seedling stage under drought stress [J]. Bulletin of Botanical Research, 2020, 40(2): 177−188.

[34] 法蕾, 吴迪, 马淑敏, 等. 干旱对油松人工林生长和光合特性的影响 [J]. 陆地生态系统与保护学报, 2025, 5(3): 35−42.
Fa L, Wu D, Ma S M, et al. The impact of drought on the growth and photosynthetic characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2025, 5(3): 35−42.

[35] 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 P, Wang D, Chen C, 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.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 孟 平）