

不同水分条件对乔松幼苗光合特性的影响

单增罗布¹ 琼 达² 旦增尼玛¹ 王玉婷¹ 谢欢欢¹ 仁增朗加¹ 格桑曲珍^{1*}

(1. 西藏自治区林木科学研究院, 西藏拉萨 850000; 2. 日喀则市林业技术服务中心, 西藏日喀则 857000)

摘要 为探究不同水分条件对乔松幼苗光合特性的影响, 本研究以两年生乔松幼苗为试验材料, 设置4个水分梯度处理: 对照 (CK, 90%土壤持水量)、轻度干旱 (LS, 70%土壤持水量)、中度干旱 (MS, 50%土壤持水量) 和重度干旱 (SS, 30%土壤持水量), 分析不同水分胁迫下幼苗光合参数的变化特征。结果表明: LS时净光合速率 (P_n) 显著高于其他处理组; 气孔导度 (G_s) 以LS组最高, SS时最低。各处理组胞间 CO_2 浓度 (C_i) 均呈现先降后升的日变化趋势, 其中LS组始终维持最高水平。蒸腾速率 (T_r) 日均值表现为 $LS > MS > CK > SS$, 其中LS组 T_r 最高, SS组仅为LS组的27.35%。水分利用效率 (WUE) 以LS组最优 ($4.749 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), 显著高于其他处理, MS组次之 ($4.230 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), CK和SS组较低。研究表明, 轻度干旱胁迫有利于提高乔松幼苗的光合和水分利用能力, 为乔松在轻度干旱区推广应用奠定了理论基础。

关键词 乔松; 不同水分条件; 光合特性; 水分利用

中图分类号: S791.24

文献标志码: A

文章编号: 2096-4781 (2026) 04-0479-08

DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2026.04.007

Effects of Different Water Conditions on the Photosynthetic Characteristics of Young *Pinus wallichiana* Seedlings

DANZENG Luobu¹, QIONG Da², DANZENG Nima¹, WANG Yuting¹, XIE Huanhuan¹,
RENZENG Langjia¹, GESANG Quzhen¹

(1. Xizang Institute of Forest Trees, Lasa, Xizang 850000, China; 2. Forestry Technology Service Center of Xigaze City, Rikaze, Xizang 857000, China)

Abstract: To investigate the effects of different water conditions on the photosynthetic characteristics of young *Pinus wallichiana* seedlings, this study used two-year-old *Pinus wallichiana* seedlings as the experimental material and set up four water stress gradient treatments: the control group (CK, 90% soil water holding capacity), the mild drought group (LS, 70% soil water holding capacity), the moderate drought group (MS, 50% soil water holding capacity), and the severe drought group (SS, 30% soil water holding capacity). The changes in photosynthetic parameters of the seedlings under different water stress conditions were analyzed. The results showed that the net photosynthetic rate (P_n) of the LS group was significantly higher than that of the other treatment groups; the stomatal conductance (G_s) was the highest in the LS group and the lowest in the SS group. The intercellular CO_2 concentration (C_i) of each treatment group showed a diurnal variation trend of first decreasing and then increasing, with the LS group maintaining the highest level. The daily average transpiration rate

收稿日期: 2025-10-21

作者简介: 单增罗布 (1986-), 男, 藏族, 西藏拉萨人, 本科, 助理工程师。研究方向: 主要从事林木种苗与植被恢复方面的研究。

通信作者: 格桑曲珍 (1978-), 女, 藏族, 西藏察隅人, 硕士, 高级工程师。研究方向: 主要从事森林培育与生态修复方面的研究。

基金项目: 西藏自治区科技计划项目 (XZ202401YD0026); 乔松繁育及露天栽培技术研究项目 (2021-5); 西藏自治区科技计划项目 (XZ202501YD0019); 国家林草局林草科技创新平台运行 (2022132305)。

(T_r) was $LS > MS > CK > SS$, and the T_r of the LS group was the highest, while that of the SS group was only 27.35% of the LS group. The water use efficiency (WUE) was the best in the LS group ($4.749 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), significantly higher than that of the other treatments, followed by the MS group ($4.230 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), and the CK and SS groups were lower. The study shows that mild drought stress is beneficial to improving the photosynthetic efficiency and water use ability of *Pinus wallichiana* seedlings. It has laid a theoretical foundation for the promotion and application of *Pinus wallichiana* in mild drought areas.

Key words: *Pinus wallichiana*; different water conditions; photosynthetic characteristics; water use

水分作为植物生长的重要环境因子之一,影响着植物的形态变化、生理生化及空间分布。在应对土壤水分亏缺时,植物会启动一系列复杂的生理响应机制,这些机制受到遗传背景的调控^[1-3]。干旱胁迫通常会抑制植物的高生长、地径扩展和根系伸长,导致叶干重下降、根干重上升,叶绿素合成受阻,光合能力减弱。但部分研究表明,油松等树种在干旱加剧时,短期内反而表现出更高的水分利用效率,仍能在干旱环境中维持较强的光合能力,这可能与其良好的抗逆性密切相关^[4,5]。

乔松(*Pinus wallichiana*)为暖温性针叶树种,自然分布于喜马拉雅山脉南侧。我国大面积分布的区域仅在西藏的吉隆沟、定结县陈塘沟、定日县绒辖乡、亚东县、洛扎县拉康乡和错那县勒布沟等^[6]。乔松作为西藏乡土常绿树种,树形挺拔、生态效益显著。西藏自治区林木科学研究院通过多年对乔松种子的收集与播种育苗,已成功在拉萨市苗圃温室内培育出上万株乔松营养袋苗,并将4-5 a生炼苗后的乔松大苗推广应用至拉萨周边多个山体进行造林应用。成功利用乔松恢复高原森林,对西藏生态屏障建设具有重要的意义。

国内外关于林木干旱胁迫下光合特性响应的研究虽已较多,但针对高海拔环境下有关树木干旱下的光合特性研究仍较少,乡土树种乔松在干旱胁迫下生长表现及光合适应能力不是很明确。本研究选择2 a生乔松幼苗为研究对象,通过测定不同水分胁迫下光合参数的变化,从日进程、光响应的角度分析不同水分亏缺程度对乔松幼苗光合特性的影响,并综合评估乔松幼苗对水分胁迫环境的生理适应能力,旨在为乔松幼苗生长过程寻求较为合适的土壤持水量,探讨其对不同干旱处理的适应能力,以期对西藏乡土树种乔松的人工高效繁育及种植管理提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设于西藏农牧大学林学试验基地苗圃(29°40'13" N, 94°20'12" E)。试验地属于高海拔温带半湿润气候带,海拔约为2 990 m。多年气候观测数据显示,该地区年均气温为7℃~16℃,年均降水650 mm,年太阳总辐射量5 460~7 530 MJ/m²,年均日照2 022 h,无霜期180 d^[7]。

1.2 试验设计

试验材料为2024年3月从西藏自治区林木科学研究院引入的一批2 a生乔松幼苗,选择长势优良、株高胸径相近一致的乔松幼苗移栽到直径为32 cm,高为28 cm的塑料花盆中,在定植缓苗两个月之后,于2024年5月20日开始控水试验。试验采用盆栽称重法控水,共设4组处理,每组20盆,4组水分梯度处理分别为:对照(CK, 90%土壤持水量)、轻度干旱(LS, 70%土壤持水量)、中度干旱(MS, 50%土壤持

水量)、重度干旱(SS, 30%土壤持水量)。为防止水分蒸发和渗漏, 试验期间花盆表面覆有保鲜膜, 底部密封处理。

1.3 光合指标测定和方法

控水2个月后, 选择3个不连续的典型晴天测定苗木光合日变化, 测定的光合参数包括净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)^[9]。采用Li-6800便携式光合作用测定系统, 每日8:00-18:00对各处理组随机选取的5株幼苗成熟叶片进行动态监测。由于叶片无法完全充满叶室, 测定后使用WinRHIZO根系分析系统扫描叶片, 精确测定实际叶面积, 并据此校正 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 等参数。水分利用效率(WUE)公式为:

$$WUE = P_n / T_r \quad (1)$$

光响应曲线测定条件为: 环境温度为20℃, CO_2 浓度为400 $\mu mol \cdot mol^{-1}$, 光照强度梯度设置为0~2 600 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (0、50、80、150、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800、2 000、2 200、2 400、2 600, 共16个梯度)。通过测定 P_n 绘制光响应曲线, 确定光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)及光合有效辐射(PAR)等光合特征参数。

1.4 数据处理

各项指标的测定重复5次, 原始数据使用Microsoft Excel 2016记录和整理, 采用SPSS 22.0进行单因素分析并检验差异显著性, 利用Origin 2021软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同干旱处理下乔松的瞬时光合特征

2.1.1 净光合速率

净光合速率(P_n)是衡量植物光合作用强度及碳同化能力的重要指标, 也常被用于评估其耐旱性。结果显示(图1), 不同水分处理下乔松幼苗的净光合速率日动态均表现为双峰曲线。各处理均在10:00出现第一高峰, 其中轻度干旱(LS)在10:00的光合速率为3.422 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; 至14:00达到全日最高值(LS为4.374 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), 该数值显著超过对照(CK)、中度干旱(MS)及重度干旱(SS)处理的同期测定值。LS组的净光合速率显著高于其余处理组。

由表1可知, 乔松幼苗平均 P_n 在LS最大, 达2.91 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; MS和CK日均 P_n 较LS时分别下降近21.65%和38.49%; SS日均 P_n 最小, 仅为LS的41.24%。

2.1.2 气孔导度

根据图2的气孔导度(G_s)日变化曲线分析, 所有处理(CK、LS、MS、SS)均表现出典型的双峰曲线。结果显示, G_s 在10:00达到全日最大值, 随后在14:00形成次高峰。比较不同处理发现, 轻度干旱(LS)和中度干旱(MS)条件下的气孔运动活跃度显著优于对照(CK)和重度干旱(SS)组, 其中LS表现出最强的气孔调节能力, SS在所有观测时段均维持最低的气孔导度水平。

由表1可知, 乔松幼苗的日均 G_s 的大小依次为LS > MS > CK > SS, 其具体数值分别为0.031 9、0.029 2、0.024 0、0.019 2 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。乔松幼苗日均 G_s 在LS时最大, MS和CK次之, 分别为LS的91.54%和75.24%

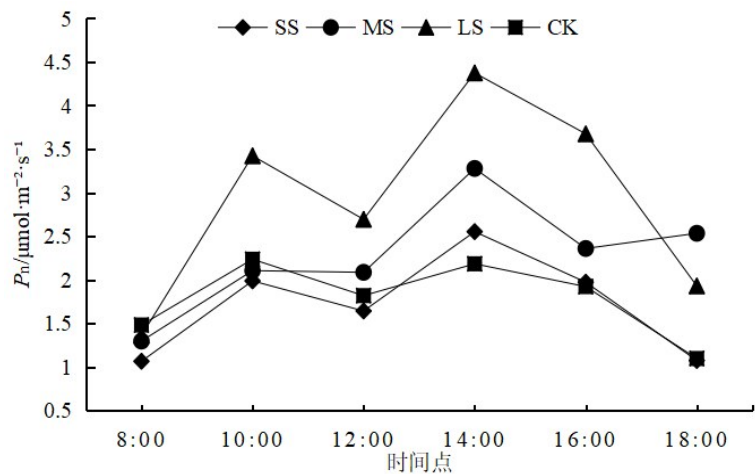


图1 不同水分条件下乔松幼苗的净光合速率 (P_n)

Fig.1 Net photosynthetic rate of young *Pinus wallichiana* seedlings under different water conditions

表1 不同水分条件下乔松幼苗主要光合特征值的日均值

Tab.1 Daily average values of main photosynthetic characteristics of *Pinus wallichiana* seedlings under different water conditions

处理	$P_n/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$G_s/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$C_i/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$T_r/\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$WUE/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
SS	$1.71\pm0.58\text{b}$	$0.02\pm0.01\text{a}$	$277.52\pm47.13\text{a}$	$0.44\pm0.18\text{a}$	$3.98\pm0.63\text{ab}$
MS	$2.28\pm0.65\text{ab}$	$0.03\pm0.01\text{a}$	$309.07\pm52.02\text{a}$	$0.56\pm0.21\text{a}$	$4.23\pm0.73\text{ab}$
LS	$2.91\pm1.13\text{a}$	$0.03\pm0.01\text{a}$	$314.89\pm64.45\text{a}$	$0.61\pm0.22\text{a}$	$4.75\pm0.61\text{a}$
CK	$1.79\pm0.44\text{b}$	$0.02\pm0.01\text{a}$	$268.38\pm85.03\text{a}$	$0.49\pm0.14\text{a}$	$3.7\pm0.61\text{b}$

注：表中数据为均值±标准差，同一列不同小写字母表示显著性差异 ($P<0.05$)。

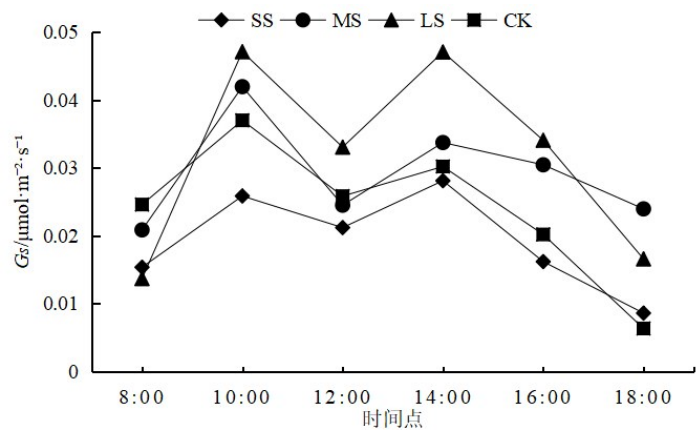


图2 不同水分条件下乔松幼苗的气孔导度 (G_s)

Fig.2 Transpiration conductance of young *Pinus wallichiana* seedlings under different water conditions

2.1.3 胞间CO₂浓度

由图3可知，不同水分条件下乔松幼苗的胞间CO₂浓度 (C_i) 均表现出递增而后下降趋势。随测定时间推移，各处理组 C_i 值先持续上升，达到峰值后缓慢下降；各处理 C_i 均在 14:00 达到峰值，之后缓慢降低。

从表1可以看出：乔松幼苗的日均 C_i 的大小依次为 $LS > MS > SS > CK$ ，其具体数值分别为 277.524、

309.073、314.888、268.382 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。CK 日均 C_i 为 LS 的 96.71%。本试验中 C_i 的日变化呈现早晚低、中午高的趋势,这与光合“午休”现象密切相关^[10]。

2.1.4 蒸腾速率

图4表明,各水分梯度处理组中乔松幼苗的蒸腾速率(T_r)日动态均表现为典型的单峰曲线模式。具体变化规律为:从早晨8时起,蒸腾作用强度随时间推移持续增强,至14时达到全日最高值后开始减弱,最终在18时降至最低水平。比较不同处理组的峰值蒸腾速率,不同干旱处理下乔松幼苗 T_r 最大峰值的大小依次为 $\text{LS} > \text{MS} > \text{SS} > \text{CK}$ 。其具体数值分别为0.911、0.821、0.773、0.709 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

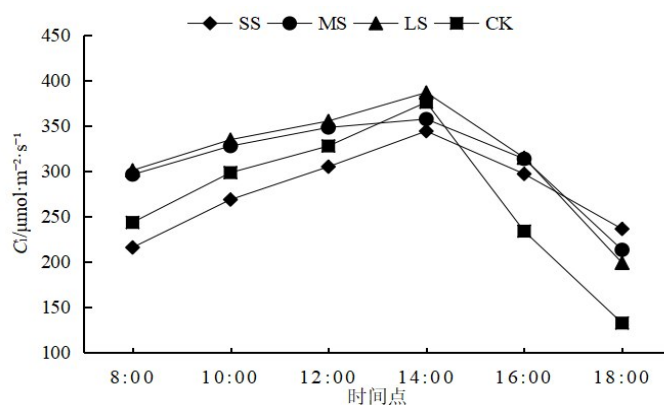


图3 不同水分条件下乔松幼苗的胞间 CO_2 浓度(C_i)

Fig.3 Intercellular CO_2 concentration of young *Pinus wallichiana* seedlings under different water conditions

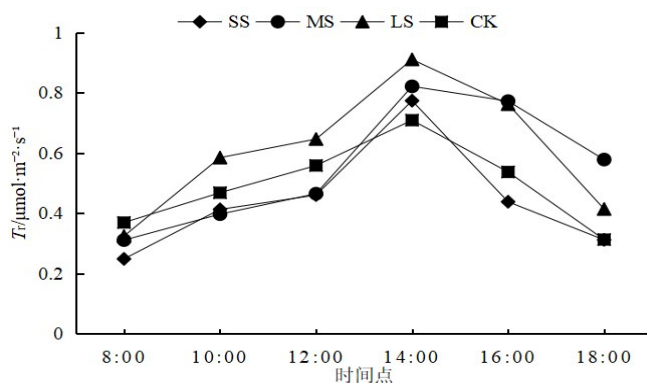


图4 不同水分条件下乔松幼苗的蒸腾速率(T_r)

Fig.4 Transpiration rate of *Pinus wallichiana* seedlings under different water conditions

从表1可以看出:乔松幼苗的日均 T_r 的大小依次为 $\text{LS} > \text{MS} > \text{CK} > \text{SS}$, 乔松幼苗日均 T_r 在 LS 时最大, MS 和 CK 次之, 分别为 LS 的 91.76% 和 81.05%, SS 时最小, 仅为 LS 时的 27.35%。

2.1.5 水分利用率

水分利用率 (WUE) 是评价植物光合性能和水分利用状况的重要指标。图5可知,各处理组的水分利用效率日变化曲线均表现为典型的单峰曲线,且在上午10时左右达到全日最大值。4种干旱处理10:00时植株 WUE 的大小为 $\text{LS} > \text{MS} > \text{SS} > \text{CK}$, 其具体数值分别为5.854、5.301、4.812、4.775 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

由表1可知, LS 处理表现出最高的 WUE , 平均为4.749 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 高于其他处理。MS 处理的 WUE 次之, 平均为4.230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。SS 和 CK 处理的 WUE 相对较低。高 WUE 意味着植物能以较少的水分消

耗固定更多的 CO_2 ，这在干旱或半干旱地区尤为重要。LS处理通过维持较高的光合速率和适度的蒸腾，实现了光合生产和水分消耗的较好平衡。

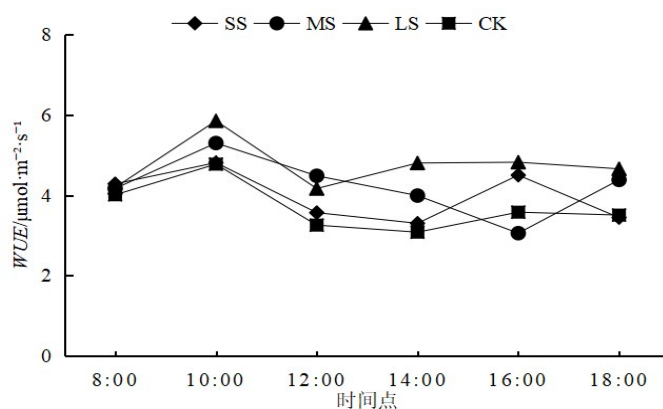


图5 不同水分条件下乔松幼苗的水分利用率 (WUE)

Fig.5 Water use efficiency of *Pinus wallichiana* seedlings under different water conditions

2.2 P_n -PAR光响应曲线

图6为不同水分处理下乔松幼苗的光响应特征。结果表明，各处理组的光响应曲线形态相似，但其光合效能存在差异，各处理在光合有效辐射 (PAR) $0 \sim 600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内，净光合速率随光强增强呈稳步上升趋势，其中轻度干旱组 (LS) 处理的上升幅度最为显著，对照组 (CK) 次之，中度干旱组 (MS) 与CK组增幅相近，三者均优于重度干旱 (SS) 处理。当PAR增至 $600 \sim 1\,600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，各处理组的 P_n 上升速率明显减缓，光合增幅趋于平缓。当PAR为 $1\,600 \sim 2\,600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，乔松幼苗 P_n 值增加缓慢并基本趋于稳定，表明已达到LSP。乔松幼苗在LS处理下PAR变化的影响程度最大，而SS处理下PAR影响程度最小。

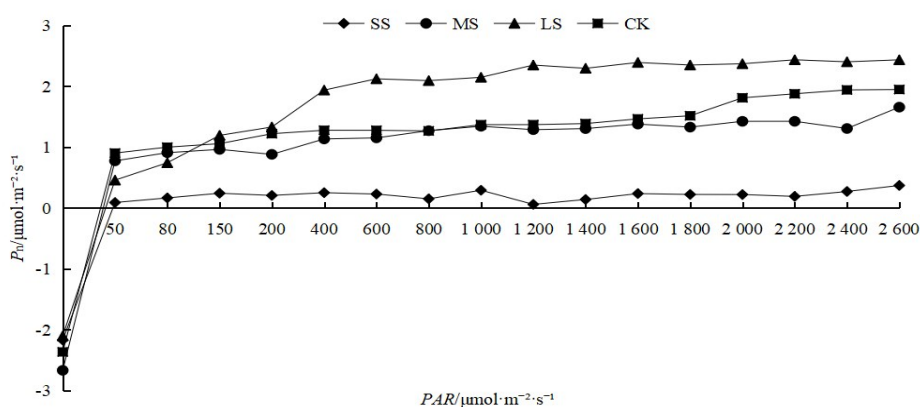


图6 不同水分条件下乔松幼苗的光响应曲线

Fig.6 Light response curves of young *Pinus wallichiana* seedlings under different water conditions

当PAR增至 $600 \sim 1\,600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，各处理组的 P_n 上升速率明显减缓，光合增幅趋于平缓。当PAR为 $1\,600 \sim 2\,600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，乔松幼苗 P_n 值增加缓慢并基本趋于稳定，表明已达到LSP。乔松幼苗在LS处理下PAR变化的影响程度最大，而SS处理下PAR影响程度最小。

由图6可知,本研究测得的光响应曲线呈现典型的非线性特征,可分为3个明显区段:光限制区、过渡区和光饱和区。在低光强下 ($0 \sim 600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), P_n 随光强增加而线性上升,此时光强是光合作用的主要限制因子。

当光强增至 $600 \sim 1\,600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 上升速率减缓,进入过渡区。 LSP 约为 $1\,600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。高于此光强时 P_n 基本保持稳定,说明光合已达到最大。当光饱和点为 $1\,600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,4种干旱处理植株 LSP 的大小为 $LS > CK > MS > SS$, 其具体数值分别为2.391、1.464、1.379、0.236 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 值得注意的是, LS 处理的 LSP 显著高于其他处理,表明不同干旱处理条件下的乔松幼苗在同种光强条件下植物的光饱和点不同。乔松幼苗受到水分胁迫后,叶片 LSP 会上升。到达 LCP 时,4种干旱处理时光强大小为 $CK > SS > MS > LS$ 。

3 讨论与结论

3.1 干旱对乔松幼苗光合性能的影响

本试验以乔松幼苗为对象,揭示了水分胁迫强度与光合性能间的关系。随着干旱胁迫程度的加剧,乔松幼苗的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 以及水分利用效率 (WUE) 等光合特征参数均发生明显变化,乔松幼苗的 P_n 和 G_s 呈现先升高到达第一峰值之后缓慢降低,再升高到达第二峰值随后再次下降的规律。 T_r 和 C_i 呈现升高后降低趋势。 P_n 和 G_s 均表现出明显的双峰曲线。各处理组中光合指标随着干旱胁迫的加剧均呈现下降趋势,大小为 $LS > MS > CK > SS$, 表明干旱会抑制乔松的光合作用,相比较而言,轻度干旱下乔松的气孔导度较大,光合作用较为充分,使其净光合速率达到最大,此时水分利用效率较高。对玉米 (*Zea mays*) 类似的研究同样表明,光合速率和蒸腾速率随着土壤湿度的逐步降低呈现先升高后下降的趋势^[11]。

在植物适应干旱胁迫的过程中,气孔调节机制发挥着关键的生理作用^[12]。作为植物体与外界环境进行气体交换的主要通道,气孔结构直接或间接调控植物的光合作用和蒸腾作用^[13]。当水分不足时,气孔往往部分关闭或全部关闭^[14], LS 处理之所以表现出最优的光合性能,可能是因为在该水分条件下植被本身足够有效驱动光合作用,不会引起明显的光抑制或气孔过度关闭。

乔松幼苗在 LS 组和 MS 组处理时的水分利用效率 (WUE) 明显高于 SS 组处理,表明在苗木快速生长期,合理充足的水分供应能够极大地促进乔松幼苗的生长,并有利于加强苗木的光合作用、提高水分利用率,该结论与贺军奇等人对桃 (*Prunus persica*) 树的研究结果相似^[15]。试验结果表明,在不同程度干旱胁迫处理下,乔松幼苗的光合作用相关指标会有不同,轻度干旱处理组 (LS) 的相关光合指标高于其余3组,其变化趋势与红花玉兰 (*Yulania sprengeri*)^[16]、水竹 (*Phyllostachys heteroclada*)^[17] 及马尾松 (*Pinus massoniana*)^[18] 的“适度干旱促光合、重度干旱抑光合”结论一致,表明该响应模式在不同物种间具有普适性。

3.2 光强对乔松幼苗光合性能的影响

光合作用是植物代谢的物质基础,其强弱变化会直接影响植被的光合特性^[19]。植株对不同环境的自身适应能力以及自身适应性均会明显影响植物的光合特性^[20]。研究表明,过强光强会抑制植物光合作用^[21]。光响应曲线显示,乔松幼苗 P_n 随 PAR 增强先增加后趋于平缓。光强约为 $1\,600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时最有

利于乔松幼苗光合作用的进行。

光响应曲线显示,在LS组时苗木的光补偿(LCP)值较小;在CK组时最大。 LCP 值能反映植物叶片利用弱光的能力, LCP 值越低表示植物叶片利用弱光的能力就越强^[22],可见在LS组处理时乔松幼苗对弱光的利用能力提高。 LSP 值能反映植物叶片利用强光的能力,本研究中各干旱胁迫处理下乔松幼苗的 LSP 值差异不大,说明不同干旱胁迫程度与乔松幼苗利用强光的能力关系较小,在一定光强下乔松幼苗光合作用容易达到饱和。在露地生产中,植物育苗和栽培一定程度上会受到光照的影响,进而影响植物生长发育,植物水分减少,光合作用可能会降低。

基于乔松2 a生幼苗光合日变化和光响应的测定结果,分析得到轻度水分胁迫可有效增强乔松幼苗的光合能力,提升乔松幼苗的光能利用效率。乔松幼苗在轻度干旱和中度干旱时的水分利用能力显著高于重度干旱处理,表明在幼苗生长期合理充足的水分供应能够极大地促进乔松幼苗的生长,并有利于提高乔松苗木的光合作用效率和水分利用率。

参考文献:

- [1] Fernandez R J, Reynolds J F. Potential growth and drought tolerance of eight desert grasses: lack of a trade off[J]. *Oecologia*, 2000, 123(1): 90-98.
- [2] Remorini D, Massai R. Comparison of water status indicators for young peach trees[J]. *Irrigation Science*, 2003, 22(1): 39-46.
- [3] 王强, 陈存根, 钱红格, 等. 水分胁迫对6种苗木光合生理特性的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(02): 144-149.
- [4] Burgess O S S. Measuring transpiration responses to summer precipitation in a Mediterranean climate: a simple screening tool for identifying plant water-use strategies[J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 127(3): 404-412.
- [5] 金思雨, 彭彰登. 刺槐和油松干旱胁迫响应研究进展[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(4): 79-91.
- [6] 马云飞, 周光信, 王晓帆, 等. 中国西藏南部乔松林自然更新特征及影响因子[J]. 西部林业科学, 2023, 52(3): 17-24+40.
- [7] 幸福梅, 柳文杰, 张兴强, 等. 不同施肥方式对巨柏苗木生长及光合作用的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(5): 880-887.
- [8] 赵晓英, 任继周, 王彦荣, 等. 3种锦鸡儿种子萌发对温度和水分的影响[J]. 西北植物学报, 2005(2): 211-217.
- [9] 幸福梅, 王玉婷, 李生茂, 等. 不同温度对巨柏幼苗光合及生根的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(1): 102-108.
- [10] 高园, 李霞, 魏少博, 等. 植物光合午休研究进展[J]. 作物学报, 2025, 51(9): 2253-2265.
- [11] 张文丽, 张彤, 吴冬秀, 等. 土壤逐渐干旱下玉米幼苗光合速率与蒸腾速率变化的研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 72-75.
- [12] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰. 植物应对干旱胁迫的气孔调节[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4333-4343.
- [13] 刘梦龙, 魏健, 任姿蓉, 等. 气孔研究进展: 从保卫细胞到光合作用[J]. 生命科学, 2024, 36(10): 1289-1304.
- [14] Damour G, Simonneau T, Cochard H, et al. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2010, 33: 1419-1438.
- [15] 贺军奇. 土壤水势与桃树生命互作过程试验研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2008.
- [16] 王延双, 方文, 王欣彤, 等. 水淹胁迫对红花玉兰苗木生长和生理生化特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1): 35-45.
- [17] 金艺. 水淹胁迫下水竹的生理响应及适应性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- [18] 张金凤, 陈佩珍, 孙晓波, 等. 干旱对马尾松幼苗光合作用及相关生理的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(1): 32-38.
- [19] Ji D, Li Q, Guo Y, et al. NADP⁺ supply adjusts the synthesis of photosystem I in Arabidopsis chloroplasts[J]. *Plant Physiol*, 2022, 189(4): 2128-2143.
- [20] 郭喜军, 谢军红, 李玲玲, 等. 氮肥用量及有机无机肥配比对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 806-816.
- [21] 罗蛟, 丁新宇, 徐燕妮, 等. 生长光强对黄瓜叶片光合机构活性影响研究[J]. 植物生理学报, 2022, 5(9): 1790-1800.
- [22] 王欢利, 曹福亮, 刘新亮, 等. 高温胁迫下不同叶色银杏嫁接苗光响应曲线的拟合[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(2): 14-20.