网络出版时间:2025-07-18 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.01.011

旱季补水施肥对轻木生长和叶片生理特征的影响

陈刚[1a],赵志娟[1a],李志琪[1a],段贵河[1a],文程敬[1a],杜官本[1b],刘友军[2],吴俊文[1a]

(1 西南林业大学 a 林学院;b 材料与化工学院,云南 昆明 650224;
2 勐腊县勐醒农场有限责任公司,云南 勐腊 666303)

[摘 要] 【目的】研究旱季补水施肥对轻木生长和叶片生理的影响,为提高旱季轻木人工林的生产力提供参考。【方法】2022 年 11 月到 2023 年 4 月,以云南省西双版纳勐腊县勐醒农场的 1 年生轻木为研究对象,在旱季设置无水无肥(CK)、有水无肥(W)、无水有肥(F)、有水有肥(WF)共 4 个处理,其中施肥是在试验前期(2022 年 12 月)和中期(2023 年 2 月)分 2 次共施加复合肥 500 g/株,每次 250 g/株;旱季补水是在 2022 年 11 月至次年 4 月每周进行 1 次滴灌,每次补水总量 1 000 L。每个处理 30 株轻木,进行 3 次重复,共计 360 株轻木。于 2023 年 4 月底旱季结束后从各标准地选择 9 株轻木标准木,测量 3 个重复,共计 27 株轻木的树高、胸径及其叶片光合、生理指标,分析旱季补水施肥对轻木生长的影响。【结果】①W 和 WF 处理轻木树高较 CK 处理显著增加了 10.84%和 14.67%,胸径显著增加了 25.19%和 35.26%。②WF 处理轻木叶片叶绿素 b、叶绿素 a+b、最大荧光(F_m)和最大光化学效率(F_v/F_m)均较 CK、W 和 F 处理显著增加,而 CK、W 和 F 处理间无显著差异。③WF 处理轻木叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)较 CK 处理分别显著增加了 51.98%,77.40%和 77.34%,较 W 处理增加了 20.57%,30.74%和 30.82%,旱季补水施肥显著增强了轻木光合作用。④F 处理轻木叶片的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性和丙二醛(MDA)含量较 CK 处理分别显著增加了 16.09%,20.41%和 15.58%,W 处理叶片的过氧化物酶(POD)、SOD、CAT 活性和 MDA、可溶性蛋白(SP)含量较 CK 处理分别显著减少了 23.75%,18.74%,26.47%,35.61%和 31.81%,表明受旱季干旱的影响,无水有肥处理会加剧轻木的干旱限制。⑤在 F 处理下,轻木叶片淀粉含量较 CK 显著下降了 25.59%,叶片可溶性糖/淀粉值较 CK 显著增加了 37.80%。⑥综合评价分析表明,4 个处理对轻木生长和叶片生理特征影响的优劣排名为:WF>W>CK>F。【结论】旱季补水施肥对轻木树高和胸径增长的促进效果最佳,其通过增加轻木叶片叶绿素含量,增强叶片的光合能力,同时降低叶片酶活性,以有效缓解季节性干旱对轻木人工林生长的限制,但旱季仅施肥不补水会加剧干旱对轻木生长的影响。

[关键词] 轻木;旱季干旱限制;补水施肥;光合特性;生理特征
[中图分类号] S753.53;S792.99 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)01-0109-11

Effects of water supplement and fertilization in dry season on growth and leaf physiological characteristics of *Ochroma lagopus*

CHEN Gang[1a], ZHAO Zhijuan[1a], LI Zhiqi[1a], DUAN Guihe[1a], WEN Chengjing[1a], DU Guanben[1b], LIU Youjun[2], WU Junwen[1a]

(1 a *College of Forestry*, b *College of Materials and Chemical Engineering*, *Southwest Forestry University*, *Kunming*, *Yunnan* 650224, *China*; 2 *Mengla County Mengxing Farm Liability Co. Ltd.*, *Mengla*, *Yunnan* 666303, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to study the effects of rehydration and fertiliser application in dry season on the growth and leaf physiology of *Ochroma lagopus*, in order to provide a reference for improving the productivity of *O. lagopus* plantation forests in dry season. 【Method】 From November 2022 to

[收稿日期] 2024-09-11 [修回日期] 2024-12-07
[基金项目] 国家自然科学基金项目(32071688)
[作者简介] 陈刚(1999—),男,湖南东安人,在读硕士,主要从事人工林培育研究。E-mail:15581475153@163.com
[通信作者] 吴俊文(1990—),男,云南昆明人,副教授,主要从事植物生理研究。E-mail:2569755639@qq.com

April 2023, the annual *O. lagopus* of Mengxing Farm in Mengla County, Xishuangbanna, Yunnan Province was taken as the research object. Four treatments were set up in the dry season: no water and no fertilizer (CK), water application without fertilizer (W), fertilizer application without water (F), and water and fertilizer application (WF). Fertilizer was applied in the early stage of the experiment (Dec. 2022) and the middle stage (Feb. 2023). A total of 500 g/plant of compound fertilizer was applied twice, 250 g/plant each time. Drip irrigation was conducted weekly (1 000 L per session) during the dry season from November 2022 to April 2023. In late April of 2023, following the dry season, nine sample trees of *O. lagopus* were selected from each sample plot. Height, diameter at breast height (DBH), and foliar photosynthetic/physiological parameters of 27 trees in three replicates were measured to evaluate the effects of dry-season supplemental irrigation and fertilization on *O. lagopus* growth.【Result】① *O. lagopus* tree height significantly increased by 10.84% and 14.67% and DBH significantly increased by 25.19% and 35.26% under W and WF treatments compared to CK treatment. ② The contents of chlorophyll b, chlorophyll a+b, maximum fluorescence (F_m) and maximum quantum yield of PSⅡ (F_v/F_m) in the leaves of *O. lagopus* under WF treatment were significantly higher than those of CK, W and F treatments, but there was no significant difference among CK, W and F treatments. ③ Compared with CK treatment, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s)and transpiration rate (T_r) of *O. lagopus* leaves in WF treatment significantly increased by 51.98%, 77.40% and 77.34%, respectively, and compared with W treatment, increased by 20.57%, 30.74% and 30.82%, respectively. Supplemental irrigation and fertilization in dry season significantly enhanced the photosynthesis of *O. lagopus*. ④ The activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT), as well as the malondialdehyde (MDA) content in *O. lagopus* leaves under the F treatment were significantly increased by 16.09%, 20.41%, and 15.58%, respectively, compared to the CK treatment. In contrast, under the W treatment, the activities of peroxidase (POD), SOD, and CAT, along with the contents of MDA and soluble protein (SP), were significantly decreased by 23.75%, 18.74%, 26.47%, 35.61%, 31.81% compared to the CK treatment. These results suggested that under drought conditions during the dry season, fertilization without water supply aggravates drought stress in *O. lagopus*. ⑤ Under F treatment, the starch content in the leaves of *O. lagopus* decreased significantly by 25.59% compared with CK, and the soluble sugar/starch value in the leaves increased significantly by 37.80% compared with CK. ⑥ The comprehensive evaluation analysis showed that the effects of four treatments on the growth and leaf physiological characteristics of *O. lagopus* were ranked as follows: WF>W>CK>F.【Conclusion】In the dry season, the effect of water supplement and fertilization treatment on promoting the growth of tree height and DBH of *O. lagopus* is the best. It could effectively alleviate the limitation of seasonal drought on the growth of *O. lagopus* plantation by increasing the chlorophyll content of *O. lagopus* leaves, enhancing the photosynthetic capacity of leaves, and reducing the enzyme activity of leaves. However, only fertilization without water supplement in the dry season would aggravate the negative effect of drought on the growth of *O. lagopus*.

Key words: *Ochroma lagopus*; dry season drought limit; water supplement and fertilization; photosynthetic properties; physiological characteristic

西双版纳地处热带季风气候区，降水量较为充沛，但时间上分配不均，降水主要集中在 5－10 月，11 月至翌年 4 月降水较少，存在季节性干旱。水分条件是决定我国大部分森林生产力水平的主导因素，降水量的大小会直接影响森林生物量[1]。土壤含水量和土壤养分也与植物生长、生产力联系紧密，土壤含水量是植物生产力的主要制约因素之一[2]。水、肥对植物的生长发育至关重要，无论是幼苗的早期生长还是成熟林的维持，水、肥均具有明显的促进作用[3]。有研究表明，氮素的转化会受到土壤水分含量变化的影响，而水分的利用效率则会受到氮肥水平的影响，水肥之间存在一定的耦合关系[4]。如

杨红青等[5]研究发现，水肥耦合有利于毛白杨（*Populus tomentosa*）的生长；乔一娜等[6]对毛竹（*Phyllostachys edulis*）的研究发现，合理的水肥管理有利于毛竹林的光合作用，进而有益于毛竹水分利用效率的提升。

光合作用为植物的生长发育和代谢活动提供能量。非生物胁迫通过改变叶片光合色素含量、光合参数，破坏光系统 PSⅠ、PSⅡ活性及光合电子传递过程和光能的吸收传递等进而影响光合作用的进行。在水分胁迫条件下，植物叶片光合作用和叶绿素荧光减弱，植物生长受到抑制[7]。谢丰璞等[8]对药用大黄（*Rheum officinale*）的研究发现，在干旱胁迫下其苗期叶片叶绿素含量降低。王志超等[9]对油茶（*Camellia oleifera*）苗木的研究发现，随着干旱程度的加深，叶片最小初始荧光呈上升趋势，净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率均呈下降趋势。WANG 等[10]对水稻（*Oryza satica*）和 GAO 等[11]对裸燕麦（*Avena chinensis*）的研究发现，在干旱条件下水稻和裸燕麦体内的丙二醛含量显著增加，与此同时超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性也显著升高。张榕[12]对黄芩（*Scutellaria baicalensis*）的研究表明，干旱处理下黄芩体内的抗氧化酶活性持续升高，说明植物可以通过提高抗氧化酶的活性来应对干旱胁迫下的损害。周维[13]的研究表明，施肥不仅能够促进格木的生长发育，提高叶绿素含量，增强光合作用，促进养分的积累，还能提高可溶性蛋白和可溶性糖含量而降低丙二醛含量以增强抗逆性。练芳松[14]对圆齿野鸦椿（*Euscaphis konishii*）幼苗的研究发现，在不同施肥处理中，氮肥对叶片丙二醛含量影响最大，随着施氮量增加丙二醛含量呈先降后升趋势；磷肥对叶片可溶性蛋白含量的影响最大，各磷肥处理间可溶性糖含量、过氧化物酶活性与丙二醛含量无显著性差异；钾肥对过氧化物酶活性影响最大，各钾肥处理间叶片生理指标均存在显著差异。陶秀花等[15]对红翅槭（*Aceraceae fabri*）幼树进行了配方施肥研究，发现钾肥含量固定时，增施氮肥、磷肥有利于红翅槭叶面积、叶绿素含量的增大。付晓凤等[16]的研究表明，施肥有利于海南风吹楠（*Horsfieldia hainanensis*）幼苗叶片渗透调节物质和叶绿素的积累，进而提高其抗逆性。

轻木（*Ochroma lagopus*）属木棉科常绿大乔木，是典型的热带速生用材树种，有生长速度快、密度低和生产周期短等优良特性[17]。目前，中国仅在云南西双版纳低海拔地区试种成功，但栽培管理技术尚不成熟，季节性干旱一定程度上影响了轻木人工林的生产力。余斐等[18]对桉树（*Eucalyptus*）幼龄林的研究发现，旱季补水能有效地缓解尾巨桉受到的季节性干旱胁迫。基于此，本研究以西双版纳勐腊县勐醒农场 1 年生轻木为研究对象，通过旱季补水施肥处理，比较分析不同处理轻木生长指标、叶片光合特性和酶活性的变化，探讨轻木对旱季补水和施肥两种措施的响应，以期了解轻木人工林对季节性干旱的响应机制，进而为提高轻木人工林的生产力提供重要参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于西双版纳自治州勐腊县勐醒农场（北纬 21°08′，东经 101°21′）。该区属热带季风气候区，干湿季分明，年温差小，基本无霜。年平均气温 18.6～21.9 ℃，年平时日照时数 1 800～2 300 h。年均降水量 1 200～1 700 mm，全年常被划分为旱（11－4 月）、雨（5－10 月）两季，其中雨季降水占全年降水的 85％以上。试验地土壤为红壤，pH 值为 4.28，有机质含量 23.6 g/kg，全氮含量 1.59 g/kg，全磷含量 0.32 g/kg，全钾含量 12.0 g/kg。

1.2　试验设计

2022 年 11 月－2023 年 4 月，以西双版纳勐腊县勐醒农场种植的 1 年生轻木作为研究对象。轻木人工林的种植密度为 3 m×5 m，株距为 3 m，行距 5 m。试验设置了 CK、W、F、WF 共 4 个处理，其中 CK 处理既不进行旱季施肥也不进行旱季补水，W 处理不进行旱季施肥但进行旱季补水，F 处理进行旱季施肥但不进行旱季补水，WF 处理既进行旱季施肥又进行旱季补水。旱季施肥是在试验前期（2022 年 12 月）和中期（2023 年 2 月）分 2 次共施加复合肥 500 g/株，每次 250 g/株；旱季补水是在 2022 年 11 月至次年 4 月每周进行 1 次滴灌，每次补水量为 1 000 L。每个处理 30 株轻木，3 次重复共计 360 株轻木。

试验用肥料为云南云天化股份有限公司生产的复合肥料，其 N、P、K 的质量比为 15∶15∶15，总养分≥45％，施肥方式为穴施，共穴施 2 个点，分别位于轻木两侧 15 cm 处，穴深度为 15 cm。

1.3　样品采集与指标测定

1.3.1　树高和胸径测量　于 2023 年 4 月底旱季结束后，从每个标准地中选取代表平均胸径和树高的

9 株轻木作为标准木,3 个重复共计 27 株树。使用测高器测量树高(H),用胸径围尺测量胸径(DBH)。

1.3.2 *叶绿素荧光和光合参数测定* 选择晴朗无云的天气,在各标准地选择 9 株轻木,用高枝剪剪取树冠向阳面枝条,然后迅速将其插入水桶中,防止离体枝条水分的散失,用便携式光合测定仪 Li-6800 测定不同处理轻木叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔限制值(L_s);在枝条上选取 3 片生长健康的成熟叶片,暗适应 30 min 后,用 Handy PEA 连续激发式荧光仪,测定叶绿素荧光参数(初始荧光(F_0)和最大荧光(F_m))并计算 PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m)。

1.3.3 *叶绿素和非结构性碳含量测定* 在每个标准地内随机选取 9 株具代表性的标准木,用高枝剪采集树冠中部阳面叶片。叶片样品做好标记后带回实验室,清洗干净,立即放入烘箱 120 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至质量恒定,用磨样机粉碎后过孔径 0.150 mm(100 目)筛,分别装入密封袋内保存,供后期叶绿素和非结构性碳含量的测定。取部分经乙醇提取后用分光光度法测定叶绿素 a 和叶绿素 b 含量,使用浓 H_2SO_4-苯酚法测定非结构性碳水化合物(NSC)及可溶性糖(SS)和淀粉(ST)含量。

1.3.4 *酶活性及渗透调节物质含量测定* 在各标准地分别采集 9 株轻木顶端新鲜叶片,立即放入液氮罐冷冻保存后带回实验室,使用试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性及丙二醛(MDA)、可溶性蛋白(SP)和脯氨酸(PRO)含量。

1.4 数据处理

运用 Excel 2010 对试验数据进行统计与分析,在 SPSS 27 中采用最小显著性差异法完成数据差异性分析以及主成分分析和综合得分计算,利用 Origin 2021 进行箱线图、相关性热图的绘制。主成分分析时用 SPSS 27 对数据进行标准化处理,综合评价得分的计算公式为:

$$Y_1=0.99X_1+0.84X_2+0.91X_3+0.83X_4+0.88X_5-0.83X_6+0.93X_7+0.86X_8+0.98X_9+0.94X_{10}+0.87X_{11}-0.98X_{12}+0.98X_{13}-0.70X_{14}-0.88X_{15}-0.87X_{16}-0.78X_{17}-0.93X_{18}-0.80X_{19}+0.42X_{20}+0.85X_{21}+0.89X_{22}-0.74X_{23};$$

$$Y_2=0.01X_1+0.25X_2+0.38X_3+0.55X_4+0.46X_5+0.56X_6+0.35X_7+0.51X_8+0.18X_9+0.31X_{10}-0.14X_{11}-0.17X_{12}+0.20X_{13}+0.68X_{14}+0.41X_{15}+0.50X_{16}+0.62X_{17}+0.32X_{18}+0.52X_{19}+0.89X_{20}-0.40X_{21}+0.44X_{22}+0.52X_{23};$$

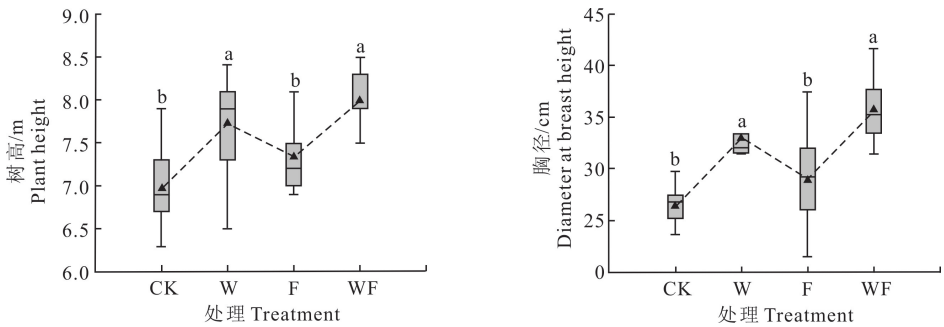
$$Y=0.75Y_1+0.20Y_2。$$

式中:Y 为综合得分;Y_1 为主成分 1 得分;Y_2 为主成分 2 得分;X_1 为树高;X_2 为胸径;X_3 为叶绿素 a 含量;X_4 为叶绿素 b 含量;X_5 为叶绿素 a+b 含量;X_6 为 F_0 值;X_7 为 F_m 值;X_8 为 F_v/F_m 值;X_9 为 P_n;X_{10} 为 G_s;X_{11} 为 C_i;X_{12} 为 L_s;X_{13} 为 T_r;X_{14} 为 MDA 含量;X_{15} 为 PRO 含量;X_{16} 为 SOD 活性;X_{17} 为 CAT 活性;X_{18} 为 POD 活性;X_{19} 为 SP 含量;X_{20} 为 SS 含量;X_{21} 为 ST 含量;X_{22} 为 NSC 含量;X_{23} 为 SS/ST 值。

2 结果与分析

2.1 旱季补水施肥对轻木树高和胸径的影响

旱季补水施肥后,轻木树高和胸径的变化如图 1 所示,表明各处理对旱季轻木的生长均具有一定的促进作用,但不同处理间存在一定差异。



不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters represent significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 旱季补水施肥对轻木树高和胸径的影响

Fig. 1 Effects of supplemental irrigation and fertilization on height and DBH of *Ochroma lagopus* in dry season

图 1 显示,W 和 WF 处理轻木的树高分别较 CK 显著增加了 10.84%和 14.67%($P<0.05$),WF

处理树高较 F 处理显著增加了 8.94%（$P<0.05$）；W 和 WF 处理轻木的胸径较 CK 显著增加了 25.19%和 35.26%（$P<0.05$），WF 处理胸径较 F 处理显著增加了 23.26%（$P<0.05$）。综上可知，旱季补水和补水施肥处理均有利于轻木胸径增加和树高生长。

2.2　旱季补水施肥对轻木叶片叶绿素含量和荧光特性的影响

旱季补水施肥对轻木叶片叶绿素含量和荧光特性的影响如图 2 所示。图 2 显示，WF 处理轻木叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a＋b 含量均最高，其中叶绿素 a 含量较 F 处理显著增加了 148.18%（$P<0.05$），叶绿素 b 含量较 CK、W 和 F 处理分别显著增加了 63.16%，59.95%和 88.70%（$P<0.05$），叶绿素 a＋b 含量较 CK、W 和 F 处理分别显著增加了 66.36%，59.76%和 53.47%（$P<0.05$）。W 和 WF 处理轻木叶片的 F_0 较 F 处理分别显著降低了 28.42%和 18.85%（$P<0.05$）；WF 处理轻木叶片的 F_m 较 CK、W 和 F 处理分别显著增加了 15.67%，12.25%和 22.80%（$P<0.05$），F_v/F_m 较 CK、W 和 F 处理分别显著增加了 13.12%，11.01%和 15.47%（$P<0.05$）。综上所述，旱季补水施肥处理能显著增加了轻木叶片的叶绿素含量，增强其光合作用效率。

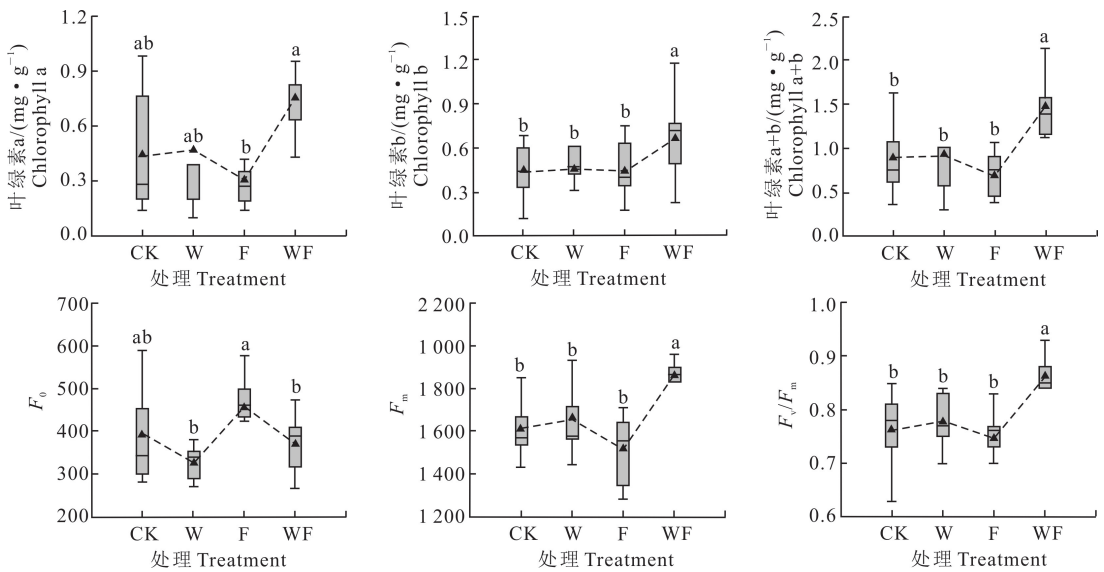


图 2　旱季补水施肥对轻木叶片叶绿素含量和荧光特性的影响

Fig. 2　Effects of supplemental irrigation and fertilization on chlorophyll content and fluorescence characteristics of *Ochroma lagopus* leaves in dry season

2.3　旱季补水施肥对轻木光合特性的影响

旱季补水施肥对轻木光合特性的影响如图 3 所示。图 3 显示，WF 处理轻木叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率最高，其中净光合速率分别较 CK 和 F 处理显著增加了 51.98%和 75.91%（$P<0.05$），气孔导度较 CK、W 和 F 处理分别显著增加了 77.40%，30.74%和 84.64%（$P<0.05$），蒸腾速率较 CK、W 和 F 处理分别显著增加了 77.34%，30.82%和 126.71%（$P<0.05$）。轻木叶片胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率均以 F 处理最低，其中叶片胞间 CO_2 浓度较 CK 显著降低了 14.42%（$P<0.05$），而 W 和 WF 与 CK 处理间无显著差异。W 处理轻木叶片的气孔限制值较 F 处理显著降低了 45.67%（$P<0.05$），WF 处理的气孔限制值分别较 CK 和 F 处理显著降低了 19.99%和 26.03%。综上所述，旱季补水施肥处理能显著增强轻木叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率，但仅补水处理对轻木叶片的净光合速率无显著增强作用，仅施肥处理则会显著降低轻木叶片的胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率。

2.4　旱季补水施肥对轻木叶片抗氧化酶活性及渗透调节物质的影响

旱季补水施肥对轻木叶片相关抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响如图 4 所示。图 4 显示，F 处理轻木叶片的超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）活性和丙二醛（MDA）含量分别较 CK 显著增加了 16.09%，0.41%和 15.58%（$P<0.05$）。WF 处理轻木叶片的过氧化物酶（POD）活性和可溶性糖蛋白（SP）含量分别较 CK 显著减少了 18.40%和 15.16%（$P<0.05$）。W 处理轻木叶片的 POD、

SOD、CAT 活性及 MDA、SP 含量分别较 CK 显著减少了 23.75%，18.74%，26.47%，35.61% 和 31.81%($P<0.05$)。旱季补水、施肥及二者共同处理均会导致脯氨酸(PRO)含量降低，但与 CK 无显著差异。综上所述，旱季补水处理能显著降低轻木叶片过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性及丙二醛、可溶性蛋白含量，旱季施肥处理显著增加轻木叶片的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性和丙二醛含量，这表明旱季补水能缓解干旱对轻木生长的影响，而施肥会加剧干旱对其生长的限制。

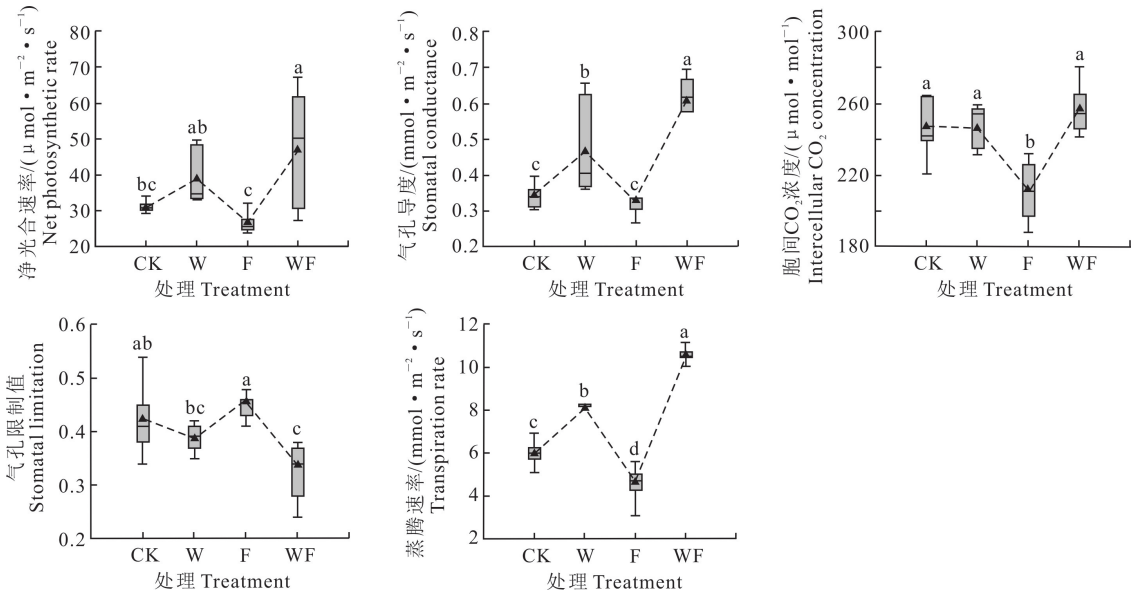


图 3 旱季补水施肥对轻木光合特性的影响

Fig. 3 Effects of supplemental irrigation and fertilization on photosynthetic characteristics of *Ochroma lagopus* in dry season

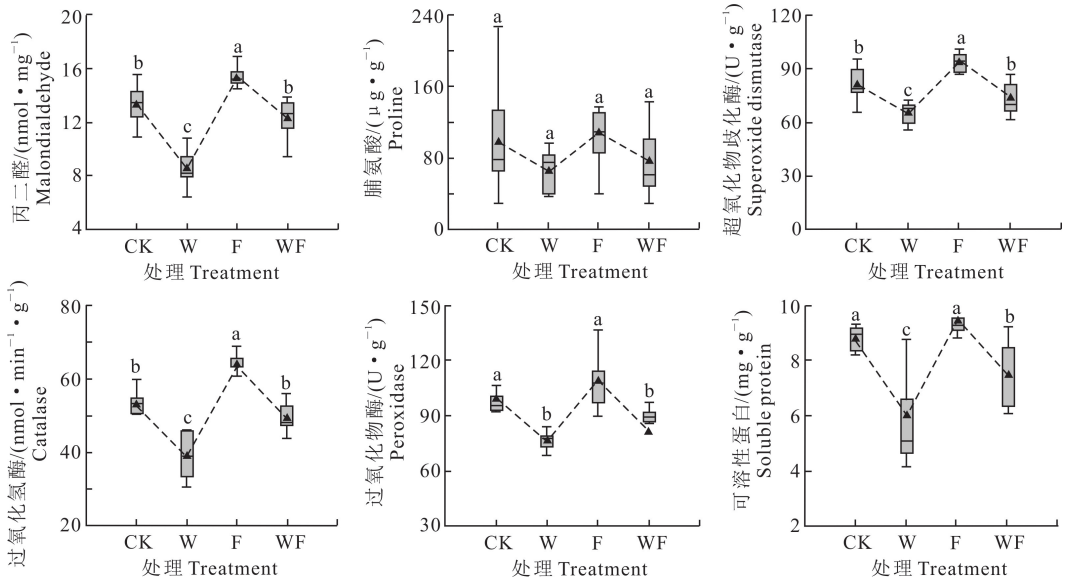


图 4 旱季补水施肥对轻木叶片抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响

Fig. 4 Effects of supplemental irrigation and fertilization on antioxidant enzyme activity and osmotic adjustment substances content in leaves of *Ochroma lagopus* in dry season

2.5 旱季补水施肥对轻木叶片可溶性糖、淀粉及非结构性碳水化合物含量的影响

图 5 显示，旱季补水施肥处理后轻木叶片的可溶性糖和非结构性碳水化合物含量均无显著差异。F 处理轻木叶片的淀粉含量较 CK 显著下降了 25.59%($P<0.05$)，而 W 和 WF 处理与 CK 无显著差异($P>0.05$)；各处理轻木叶片的可溶性糖/淀粉值以 F 处理最高，较 CK 显著增加了 37.80%($P<$

0.05)，而其他处理与 CK 均无显著差异($P>0.05$)。

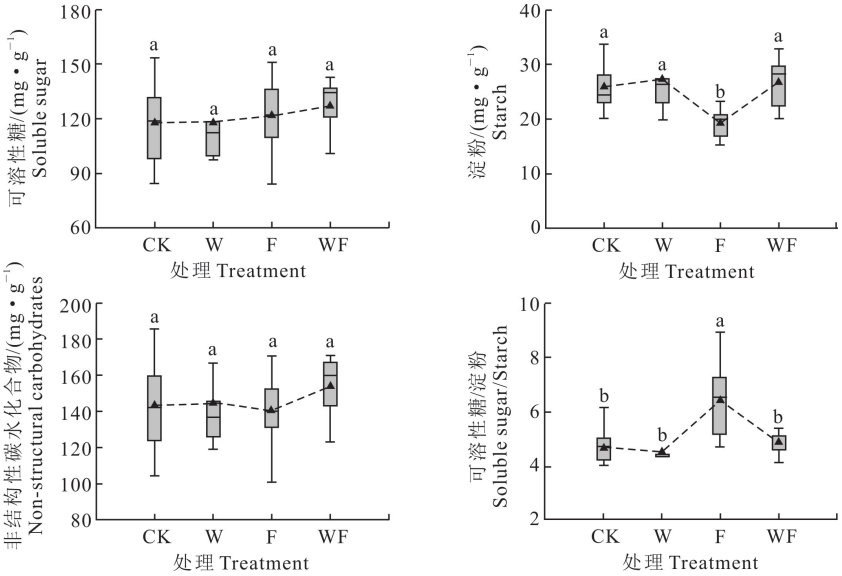
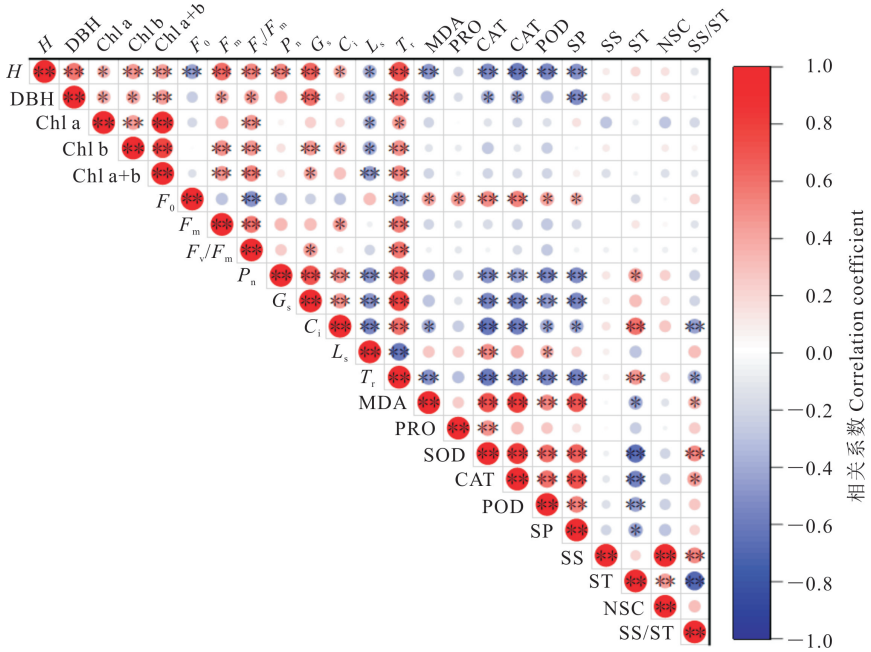


图 5　旱季补水施肥对轻木叶片可溶性糖、淀粉及非结构性碳水化合物含量的影响

Fig. 5　Effects of supplemental irrigation and fertilization on soluble sugar, starch and non-structural carbohydrates content in leaves of *Ochroma lagopus* in dry season

2.6　轻木生长和叶片生理特征的相关性分析

轻木生长和叶片生理特征之间的相关性分析结果见图 6。由图 6 可以看出，轻木树高(H)与胸径(DBH)、Chl b、Chl a+b、F_m、F_v/F_m、G_s、T_r、P_n 呈极显著正相关($P<0.01$)，与 Chl a 和 C_i 呈显著正相关($P<0.05$)，与 L_s 呈显著负相关($P<0.05$)，与 F_0、MDA 和 SP、SOD、CAT 和 POD 呈极显著负相关($P<0.01$)。胸径(DBH)与 Chl a、Chl b、Chl a+b、F_m、F_v/F_m 呈显著正相关($P<0.05$)，与 G_s、T_r 呈极显著正相关($P<0.01$)，与 L_s、MDA 含量、SOD 和 CAT 呈显著负相关($P<0.05$)，与 SP 含量呈极显著负相关($P<0.01$)。



“*”表示显著相关($P<0.05$)；“**”表示极显著相关($P<0.01$)。

“*”indicates significant correlation($P<0.05$)；“**” indicates extremely significant correlation($P<0.01$).

图 6　轻木生长指标和叶片生理特征指标间的相关性分析

Fig. 6　Correlation analysis between growth indexes and leaf physiological characteristics indexes of *Ochroma lagopus*

2.7 综合评价分析

对轻木树高、胸径、叶绿素含量及荧光特性、光合特性、酶活性和非结构性碳水化合物等指标进行主成分分析,共提取 2 个主成分,其中第 1 主成分(Y_1)的方差贡献率为 74.65%,第 2 主成分(Y_2)的方差贡献率为 20.21%,累计方差贡献率为 94.86%,可以反映轻木在旱季补水施肥处理下的生长状况(表 1)。其中主成分 Y_1 由树高、胸径、叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b、F_m、F_v/F_m、P_n、G_s、C_i、T_r、淀粉和 NSC 等指标组成,主成分 Y_2 由 F_0、MDA、SOD、CAT、POD、SP、可溶性糖和可溶性糖/淀粉值等指标组成。

表 1 轻木生长及生理指标的主成分分析

Table 1 Principal component analysis of growth and physiological indicators of *Ochroma lagopus*

指标 Index	第 1 主成分 The first principal component	第 2 主成分 The second principal component	指标 Index	第 1 主成分 The first principal component	第 2 主成分 The second principal component
树高 Plant height	0.99	0.01	MDA	−0.70	0.68
胸径 Diameter at breast height	0.84	0.25	PRO	−0.88	0.41
叶绿素 a Chlorophyll a	0.91	0.38	SOD	−0.87	0.50
叶绿素 b Chlorophyll b	0.83	0.55	CAT	−0.78	0.62
叶绿素 a+b Chlorophyll a+b	0.88	0.46	POD	−0.93	0.32
F_0	−0.83	0.56	SP	−0.80	0.52
F_m	0.93	0.35	可溶性糖 Soluble sugar	0.42	0.89
F_v/F_m	0.86	0.51	淀粉 Starch	0.85	−0.40
P_n	0.98	0.18	NSC	0.89	0.44
G_s	0.94	0.31	可溶性糖/淀粉 Soluble sugar/Ssarch	−0.74	0.52
C_i	0.87	−0.14	特征值 Eigenvalue variance	17.17	4.65
L_s	−0.98	−0.17	方差贡献率/% Variance contribution rate	74.65	20.21
T_r	0.98	0.20	累计方差贡献率/% Accumulated variance contribution rate	74.65	94.86

由表 2 可知,旱季补水处理和补水施肥处理的综合得分均高于对照处理,各处理对轻木生长和叶片生理生化特征的影响依次表现为 WF>W>CK>F,这表明在旱季对轻木人工林进行补水和补水施肥处理,有利于轻木应对旱季干旱环境,促进其生长。

表 2 旱季轻木补水补肥处理的主成分得分和综合得分

Table 2 Principal component scores and composite scores of different supplemental irrigation and fertilization treatments of *Ochroma lagopus* in dry season

处理 Treatment	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	综合得分 Aggregate score	排名 Ranking
CK	−1.71	−0.81	−1.44	3
W	2.16	−2.62	1.09	2
F	−4.90	1.17	−3.43	4
WF	4.45	2.25	3.81	1

3 讨 论

3.1 旱季补水施肥对轻木生长的影响

树高和胸径是衡量树木生长是否良好的重要标准,可直观反映树木的生长状况[19-22]。本研究中,旱季补水和旱季补水施肥处理对轻木树高和胸径的增大均有显著促进作用,且均优于旱季施肥处理,这与余斐等[18]对桉树(*Eucalyptus uorphylla*)幼龄林的研究结果一致,表明水分是影响轻木旱季生长的主要限制因素。徐建霞等[23]的研究发现,施氮肥能显著提高新银合欢(*Leucaena leucocephala*)幼苗对干旱的适应性,但施肥量过多(超过 1.72 g/株)会加剧幼苗的水分利用难度,与本研究结果基本一致。因此,旱季对轻木人工林进行补水施肥可在一定程度上缓解干旱对轻木生长的限制,提升轻木林的生产力。

3.2　旱季补水施肥对轻木叶片光合特性的影响

光合作用是植物生长发育的物质来源，叶绿素有吸收、分散和传递光量子的作用，环境改变会影响植物叶绿素含量及叶绿素荧光参数，从而影响光合作用的进行。叶绿素是构成集光复合体和光合单位的主要成分，叶绿素 a 和 b 作为主要色素分子，承担着光能的吸收和传递作用，其含量直接影响植物叶片光合作用的强弱[24]。本研究中，叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 与轻木树高、胸径存在显著正相关性。旱季补水施肥处理轻木叶片的叶绿素 b 和叶绿素 a+b 含量较未施肥未补水处理均有显著增加，这表明旱季施肥结合补水能显著提高轻木叶片的叶绿素含量，进而提高轻木的光合产量，促进轻木生长。当外界条件发生变化时，植物体内叶绿素荧光参数的变化可以反映植物对环境的响应机制[25]。本研究中，旱季施肥处理轻木叶片的 F_0 最大，而 F_m、F_v/F_m 最低，这可能是因为施肥能有效丰富土壤养分，促进轻木生长，但是水分未得到补充，干旱对其生长的限制作用加剧，因此其对轻木生长的促进效果不如旱季补水和旱季补水施肥处理明显。

干旱胁迫主要通过影响植物的净光合速率（P_n）进而影响光合作用[26]。邓平等[27]研究发现，随着干旱胁迫程度加深，青冈栎（*Cyclobalanopsis glauca*）幼苗 G_s、T_r、P_n 和 C_i 显著降低，L_s 显著增加，说明气孔限制是导致其 P_n 降低的主要原因。本研究中，轻木叶片 L_s 与 P_n、G_s、C_i 和 T_r 存在极显著负相关关系，轻木叶片 P_n、C_i 和 G_s 均以旱季施肥处理最低，而其 L_s 却最高；旱季补水和补水施肥处理的 L_s 较 CK 和旱季施肥处理均有所下降，而 P_n、G_s、C_i 和 T_r 均有所上升，这表明旱季补水和补水施肥均能够有效缓解水分对轻木生长的影响，而仅施肥反而会加剧干旱对轻木的影响。因此，在旱季对轻木人工林进行施肥时，需要同步补充水分。

3.3　旱季补水施肥对轻木叶片抗氧化酶活性和渗透物质含量的影响

在干旱条件下，植物会通过调节抗氧化物酶活性的高低来维持正常生理生化活动。本研究中，SOD 和 CAT 活性与轻木树高和胸径之间存在显著负相关关系，POD 活性与轻木树高之间存在显著负相关关系。在旱季补水和旱季补水施肥处理中，轻木的 SOD、CAT 和 POD 活性均低于对照和旱季施肥处理，且均以旱季施肥处理最高，旱季补水和旱季补水施肥能够缓解干旱对轻木的伤害，但仅在旱季施肥则会加重干旱胁迫对轻木的影响，这表明轻木可通过提高保护酶活性来响应干旱胁迫，这与刘旭等[28]对麻栎（*Quercus acutissima*）幼苗的研究结果一致。MDA 含量反映了细胞膜脂质受到活性氧自由基氧化带来的损害，同时也反映了植物抗逆性和细胞自我修复能力的强弱，PRO 和 SP 等渗透调节物质是维持细胞渗透势平衡的一种适应对策，其值的升高反映了植物对干旱胁迫的响应[29]。本研究中，旱季施肥处理轻木的 MDA 和 SP 等渗透调节物质含量均高于其他处理，表明轻木面对干旱胁迫下的施肥处理时，其自身需要通过产生大量的渗透物质来平衡体内与外界环境水势及盐离子的影响，减少水分流失，降低干旱的影响。

3.4　旱季补水施肥对轻木叶片可溶性糖和淀粉含量的影响

水分是植物生长发育的主要生态限制因子，其对植物的光合作用、呼吸过程及形态等生理生态变化具有十分重要的影响，植物通常需要较高的可溶性糖水平维持细胞渗透压，以抵御干旱胁迫。淀粉是植物的主要储能物质，可溶性糖/淀粉值反映了植物体内可溶性糖和淀粉之间的转化关系[30]。本研究中，旱季施肥处理轻木叶片的淀粉含量均低于其他处理，可溶性糖/淀粉值显著高于其他处理，这可能是轻木叶片将淀粉转化成可溶性糖来降低自身水势，以适应外部干旱环境的影响。除此之外，在面对环境变化时，植物的碳分配策略会发生相应的改变，淀粉作为长期存储的化合物，可能在器官间发生了转移。因此，后续研究中有必要进一步对轻木各器官间的联系展开分析。

4　结　论

通过旱季补水和旱季补水施肥处理，可以不同程度地增加轻木叶片的叶绿素含量，增强叶片的光合能力，促进光合产物的分配，同时降低叶片的抗氧化酶活性，有效缓解季节性干旱对轻木人工林生长的限制，促进轻木树高和胸径的增长，其中以旱季补水施肥处理效果最佳，旱季仅施肥处理反而会加剧干旱对轻木生长的限制。因此，在轻木人工林的生产实践中，可通过补水施肥措施来提高旱季轻木林的生产力。

[参考文献]

[1]　刘世荣，郭泉水，王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究[J]. 生态学报，1998，18(5)：478-483.
LIU S R，GUO Q S，WANG B. Prediction of net primary pro-

ductivity of forests in China in response to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica,1998,18(5):478-483.

[2] 蔡学彩,李镇清,陈佐忠,等.内蒙古草原大针茅群落地上生物量与降水量的关系[J].生态学报,2005,25(7):1657-1662.
CAI X C,LI Z Q,CHEN Z Z,et al. The relationship between aboveground biomass and precipitation on *Stipa grandis* steppe in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(7):1657-1662.

[3] WANG A Y,WANG M,YANG D,et al. Responses of hydraulics at the whole-plant level to simulated nitrogen deposition of different levels in *Fraxinus mandshurica*[J]. Tree Physiology,2016,36(8):1045-1055.

[4] DRIESSCHE R,THOMAS B R,KAMELCHUK D P. Effects of N,NP,and NPKS fertilizers applied to four-year old hybrid poplar plantations[J]. New Forests,2008,35(3):221-233.

[5] 杨红青,王亚飞,贾黎明.短轮伐期毛白杨 S86 纸浆林生长对沟灌水肥耦合的响应[J].北京林业大学学报,2023,45(3):68-78.
YANG H Q,WANG Y F,JIA L M. Response of pulp plantation growth of *Populus tomentosa* S86 in short rotation period to coupling of water and fertilizer in furrow irrigation[J]. Journal of Beijing Forestry University,2023,45(3):68-78.

[6] 乔一娜,刘凯,邓智文,等.不同水肥耦合处理下毛竹光合特性[J].热带作物学报,2020,41(11):2253-2258.
QIAO Y N,LIU K,DENG Z W,et al. Photosynthetic characteristics of *Phyllostachys edulis* under different water and fertilizer coupling treatment[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2020,41(11):2253-2258.

[7] 庞进平,王永生.油菜幼苗光合及叶绿素荧光参数对干旱胁迫的响应及其抗旱性分析[J].西北植物学报,2023,43(2):276-284.
PANG J P,WANG Y S. Photosynthetic and chlorophyll fluorescence responses of rape seedlings to drought stress and its drought resistance evaluation[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2023,43(2):276-284.

[8] 谢丰璞,王楠,高静,等.干旱及复水循环对苗期药用大黄叶片光合碳同化功能和光化学活性的影响[J].西北植物学报,2023,43(11):1872-1887.
XIE F P,WANG N,GAO J,et al. Effects of drought and rewatering cycle on photosynthetic carbon assimilation function and photochemical activity of *Rheum officinale* Baill. leaves at seedling stage[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2023,43(11):1872-1887.

[9] 王志超,何之龙,陈永忠,等.油茶'湘林 210'抗干旱特性研究[J].中南林业科技大学学报,2024,44(1):37-48.
WANG Z C,HE Z L,CHEN Y Z,et al. Study on drought resistance characteristics of 'Xianglin 210' *Camellia oleifera* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(1):37-48.

[10] WANG X P,LIU H L,YU F L,et al. Differential activity of the antioxidant defence system and alterations in the accumulation of osmolyte and reactive oxygen species under drought stress and recovery in rice (*Oryza sativa* L.) tillering[J]. Scientific Reports,2019,9(1):1-11.

[11] GAO W Y,ZHANG Y J,FENG Z,et al. Effects of melatonin on antioxidant capacity in naked oat seedlings under drought stress[J]. Molecules,2018,23(7):1580-1580.

[12] 张榕.干旱胁迫对黄芩黄酮类成分含量的影响、机制及其应用[D].上海:复旦大学,2010.
ZHANG R. Impacts,mechanisms and possible application of water deficit onlevel of flavonoids content in *Scutellaria baicalensis* georgi[D]. Shanghai:Fudan University,2010.

[13] 周维.氮磷钾配比施肥对格木幼苗生长及光合特性影响的研究[D].南宁:广西大学,2016.
ZHOU W. Research on growth and photosynthetic characteristcs of *Erythrophleum fordh* seeding under different NPK fertilization[D]. Nanning:Guangxi University,2016.

[14] 练芳松.施肥对圆齿野鸦椿生长与生理指标的影响[J].亚热带农业研究,2021,17(3):158-164.
LIAN F S. Effects of fertilization treatments on growth and physiological indicators of *Euscaphis konishii* Hayata[J]. Subtropical Agriculture Research,2021,17(3):158-164.

[15] 陶秀花,黄焱辉,胡美蓉,等.不同配方施肥对红翅槭幼树生长的影响[J].中国农学通报,2017,33(30):27-31.
TAO X H,HUANG Y H,HU M R,et al. Effects of different fertilization formulas on growth of *Aceraceae fabri* seedling [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2017,33(30):27-31.

[16] 付晓风,王莉姗,朱原,等.不同施肥处理对海南风吹楠幼苗生长及生理特性影响[J].植物科学学报,2018,36(2):273-281.
FU X F,WANG L S,ZHU Y,et al. Effects of different fertilization treatments on the growth and physiological characteristics of *Horsfieldia hainanensis* Merr. seedlings[J]. Plant Science Journal,2018,36(2):273-281.

[17] BORREGA M,AHVENAINEN P,SERIMAA R,et al. Composition and structure of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood [J]. Wood Science and Technology,2015,49(2):403-420.

[18] 余斐,张水云,华雷,等.旱季补水对桉树幼龄林叶片非结构性碳水化合物的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(5):42-48.
YU F,ZHANG S Y,HUA L,et al. Effects of dry season irrigation on leaf unstructured carbohydrates in *Eucalyptus* young forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(5):42-48.

[19] 周强,黄桂华,张绍祥,等.肥料施肥对不同柚木无性系早期生长的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(7):6-10.
ZHOU Q,HUANG G H,ZHANG S X,et al. Response of early growth of different *Tectona grandis* clones to different fertilizer application[J]. Journal of Northeast Forestry University,2022,50(7):6-10.

[20] 刘成尧,肖建冬,吴俊文,等.水淹胁迫对轻木幼苗生长和碳氮磷化学计量特征的影响[J/OL].西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(10):1-9(2025-04-08)[2025-06-10]. https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.10.006.

LIU C Y，XIAO J D，WU J W，et al. Effects of waterlogging stress on the growth and carbon，nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of *Ochroma lagopus* seedling[J/OL]. Journal of Northwest A&F University（Nat Sci Ed）2025，53（10）：1-9（2025-04-08）[2025-06-10]. https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.10.006.

[21] 文程敬，吴俊文，刘元玺，等. 氮对轻木人工林生长及碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2025，53（6）：37-47.
WEN C J，WU J W，LIU Y X，et al. Effects of nitrogen on the growth and C，N and P stoichiometric characteristics of *Ochroma pyramidale* plantations[J]. Journal of Northwest A&F University（Nat Sci Ed），2025，53（6）：37-47.

[22] 文程敬，吴俊文，赵志娟，等. 轻木人工林生长及根和土壤养分含量对氮添加的响应[J/OL]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2025，53（12）：1-13（2025-06-15）[2025-06-20]. https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.12.006.
WEN C J，WU J W，ZHAO Z J. et al. Growth，root and soil nutrient content of *Ochroma lagopus* plantations in response to nitrogen addition[J/OL]. Journal of Northwes A&F University（Nat Sci Edi），2025，53（12）：1-13（2025-06-15）[2025-06-20]. https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.12.006.

[23] 徐建霞，王建柱，李磊，等. 施肥对新银合欢幼苗抗旱适应性的影响[J]. 环境工程，2016，34（S1）：997-1002，1007.
XU J X，WANG J Z，LI L，et al. The influence of fertilization on drought resistance adaptability of *Leucaena leucocephala* seedings[J]. Environmental Engineering，2016，34（S1）：997-1002，1007.

[24] VOITSEKHOVSKAJA O V，TYUTEREVA E V. Chlorophyll b in angiosperms：functions in photosynthesis，signaling and ontogenetic regulation[J]. Journal of Plant Physiology，2015，189：51-64.

[25] VERENA J L，INGO E. Relationship between leaf optical properties，chlorophyll fluorescence and pigment changes in senescing *Acer saccharum* leaves[J]. Tree Physiology，2016，36（6）：694-711.

[26] GHOTBI-RAVANDI A A，SHAHBAZI M，SHARIATI M，et al. Effects of mild and severe drought stress on photosynthetic efficiency in tolerant and susceptible barley（*Hordeum vulgare* L.）genotypes[J]. Journal of Agronomy and Crop Science，2014，200（6）：403-415.

[27] 邓平，吴敏，林丁，等. 干旱-复水对桂西北喀斯特地区青冈栎幼苗叶片光合能力、叶绿素荧光和显微结构的影响[J]. 西北植物学报，2024，44（1）：63-76.
DENG P，WU M，LIN D，et al. Effects of drought-rehydration on photosynthetic capacity，chlorophyll fluorescence，and microstructure of *Cyclobalanopsis glauca* seedling leaves in Karst Area of Northwest Guangxi[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2024，44（1）：63-76.

[28] 刘旭，罗桂杰. 干旱胁迫对麻栎幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 北方农业学报，2019，47（2）：11-14.
LIU X，LUO G J. Effects of water stress on growth and physiological characteristics in *Quercus acutissima*[J]. Journal of Northern Agriculture，2019，47（2）：11-14.

[29] 曾露婧，王国华. 干旱及复水对荒漠绿洲过渡带一年生草本植物生长及生理特性的影响[J]. 草业学报，2024，33（5）：41-57.
ZENG L J，WANG G H. Effects of drought stress and rehydration on the growth and physiological characteristics of annual herbaceous plants from a desert-oasis ecotone[J]. Acta Prataculturae Sinica，2024，33（5）：41-57.

[30] 刘元玺，王丽娜，吴俊文，等. 云南松幼苗非结构性碳水化合物对干旱胁迫的响应及其激素调控[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2024，52（1）：60-70.
LIU Y X，WANG L N，WU J W，et al. Response of non-structural carbohydrates of *Pinus yunnanensis* seedlings to drought stress and the hormonal regulation mechanism[J]. Journal of Northwest A&F University（Nat Sci Ed）2024，52（1）：60-70.

（责任编辑：温晓平）