

干旱胁迫对阔叶木本植物光合能力影响的研究进展

王静榕

浙江师范大学生命科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2025年2月24日; 录用日期: 2025年3月19日; 发布日期: 2025年3月26日

摘要

在全球气候变化背景下干旱胁迫对阔叶木本植物光合能力的影响日益引起关注。研究表明, 干旱胁迫的增强不仅改变了生态系统的碳收支与水循环, 也显著影响了植物的光合作用效率。这些影响主要通过气孔的关闭、叶绿素含量的降低以及光合电子传递链的阻碍体现出来, 导致净光合速率和气孔导度的下降。但不同物种对干旱胁迫的敏感性与适应能力各异, 部分植物能够通过提高水分利用效率、调整光合色素含量及优化电子传递路径来缓解此类逆境的负面效应。此外, 阔叶木本植物表现出多层面的适应策略, 包括叶片解剖结构的重塑、气孔的精细调节、光合色素的动态平衡以及抗氧化系统的激活, 以维护其光合活性并增强抗旱能力。为深入探讨干旱胁迫与植被光合功能之间的关系, 建议结合气体交换测定、叶绿素荧光成像、代谢组学分析及遥感技术等方法, 提升研究的精确度。然而, 现有文献对水力特性如何调控光合作用尚缺乏系统性探讨, 长期监测数据亦显不足。未来研究可考虑整合同位素示踪技术、代谢重塑机理及机器学习模型, 以深入理解植物在干旱条件下的耐受机制, 并提升在全球变化大背景下的植被光合功能预测能力。

关键词

干旱胁迫, 光合作用, 气孔, 光合色素, 叶绿素荧光

Research Progress on the Effect of Drought Stress on the Photosynthetic Capacity of Broad-Leaved Woody Plants

Jingrong Wang

College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Feb. 24th, 2025; accepted: Mar. 19th, 2025; published: Mar. 26th, 2025

文章引用: 王静榕. 干旱胁迫对阔叶木本植物光合能力影响的研究进展[J]. 林业世界, 2025, 14(2): 126-133.
DOI: 10.12677/wjf.2025.142015

Abstract

The impact of drought stress on the photosynthetic capacity of broad-leaved woody plants has garnered increasing scholarly attention, particularly in relation to global climate change. Research indicates that intensified drought stress not only disrupts the carbon balance and hydrological cycle within ecosystems but also significantly diminishes the photosynthetic efficiency of plants. Such effects are primarily evidenced by the closure of stomata, the reduction in chlorophyll content, and the impairment of the photosynthetic electron transport chain, all of which contribute to a decline in net photosynthetic rate and stomatal conductance. Nevertheless, different species exhibit varying degrees of sensitivity and adaptability to drought stress, with some plants capable of alleviating the adverse effects of such conditions through enhanced water use efficiency, adjustments in photosynthetic pigment concentrations, and optimization of electron transport pathways. Furthermore, broad-leaved woody plants demonstrate a range of adaptive strategies, including the remodeling of leaf anatomy, precise regulation of stomatal function, dynamic balance of photosynthetic pigments, and the activation of antioxidant systems, to sustain their photosynthetic activity and improve their tolerance to drought. To thoroughly investigate the relationship between drought stress and vegetative photosynthetic function, it is advisable to employ a combination of gas exchange measurements, chlorophyll fluorescence imaging, metabolomics analysis, and remote sensing techniques to enhance the precision of the research. Nonetheless, there remains a paucity of systematic examination concerning the regulatory role of hydraulic properties in photosynthesis within the existing literature, and long-term monitoring data is also inadequate. Future investigations might consider integrating isotope tracer technology, metabolic remodeling mechanisms, and machine learning models to gain a more profound understanding of the tolerance mechanisms of plants under drought conditions, as well as to refine the prediction of vegetative photosynthetic functions in the context of global change.

Keywords

Drought Stress, Photosynthesis, Stomata, Photosynthetic Pigments, Chlorophyll Fluorescence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,全球气候变化加剧,导致干旱发生的频率和强度显著增加[1],已成为威胁生态系统稳定性和农业可持续发展的关键因素[2]。干旱胁迫不仅影响植物的生长与分布[3],还可能改变生态系统的碳收支[4]-[6]、水循环[7]和生物多样性[8]。阔叶木本植物在生态系统中扮演着重要角色,不仅能够固碳,提高森林碳汇能力,还有助于水土保持和维持生物多样性[9]。然而,干旱胁迫会显著影响其生理功能[10],特别是光合作用这一核心生命活动[11]。光合作用是植物生长与生态系统物质循环的基础[12],其效率直接影响植物的生长和抗逆性。干旱胁迫通过影响气孔调节[13]、叶片光合色素含量[14]及光合电子传递[15]等途径,降低净光合速率和气孔导度,最终影响植物的生存与适应能力。因此,光合能力是衡量植物生长及抗逆性的关键指标。探讨干旱胁迫下阔叶木本植物生存策略与维持机制,对准确预测与评估未来气候变化背景下阔叶木本植物碳水循环及碳汇功能具有重要意义。已有大量研究探讨了干旱胁迫对植物光合作用的影响,主要集中在气孔关闭和光合色素的降解等方面。然而,干旱对阔叶木本植物光合能力的

多层次调节机制仍未得到系统性总结。与现有研究相比,本研究的创新点在于通过全面分析阔叶木本植物在干旱条件下的光合调节机制,结合气体交换、叶绿素荧光、光合色素含量等多个指标,从解剖结构、气孔调节、光合作用电子传递、抗氧化系统等多个维度深入探讨了干旱胁迫对植物光合能力的影响。此外,本研究还系统总结了干旱胁迫对不同物种的影响差异,为阔叶木本植物的抗旱机制提供了新的视角。

2. 干旱胁迫对阔叶木本植物光合能力的影响

光合作用在阔叶木本植物的生存与繁衍中起着至关重要的作用。这一过程通过光合色素的介导,将光能转化为化学能,以合成有机化合物,进而为其生长、发育和代谢提供能量。阔叶木本植物的广泛叶面积优化了光能捕获效率,增强了其在不同光照条件下的适应能力。此外,光合作用所产生的氧气不仅支持自身的呼吸需求,还对生态系统中的其他生物体提供了必需的呼吸来源,同时促进了碳循环和生态平衡。在环境变化与气候适应性方面,光合作用的效率直接影响了阔叶木本植物的生长速率与生物量积累,从而在碳汇功能和生态系统服务中扮演着不可或缺的角色。

干旱胁迫是指植物在水分供应不足的环境条件下所经历的生理和生化反应。已有许多研究表明,干旱胁迫会显著降低阔叶木本植物的光合速率。如,云南蓝果树(*Nyssa yunnanensis*)受干旱胁迫影响,净光合速率、气孔导度显著降低,胞间 CO_2 浓度明显升高[16]。冯潇等人对3种玉兰幼苗进行研究,发现干旱导致气孔关闭,切断了外界向叶绿体提供 CO_2 的途径[17],引起光合速率的下降[18]。

此外,一些研究发现干旱胁迫对阔叶木本植物的光合速率影响不显著甚至促进光合速率,如李民青等人的研究表明乔木状沙拐枣枝干光合速率随干旱时间的延长未发生显著变化[19]。郭华等通过分析滴灌水分调控处理对苹果的影响表明,轻度干旱胁迫有助于苹果光合速率和蒸腾速率的提高[20];高钊惠对小叶杨幼苗的研究表明重度干旱下功能叶氮含量上升,净光合速率上升[21]。

干旱胁迫对阔叶木本植物的光合作用能力的影响表现为一个复杂的生理生态机制,不仅体现在光合速率的显著下降,还包括对叶绿素荧光特性的显著改变[22],以及水力特性[23]、叶片发育[24]和光合色素合成与降解[25]等多方面的影响。这些胁迫因素可能导致光合通量的调控机制失衡,进而引发与光合作用相关的代谢途径重塑,影响植物的整体生长、发育进程及其生态适应潜力的发挥。这种生态生理响应的连锁反应体现了植物在面对干旱胁迫时的复杂适应策略。

3. 阔叶木本植物应对干旱胁迫的光合调节机制

阔叶木本植物在面临干旱胁迫时,通过一系列复杂而精细的光合调节机制,以适应水分缺乏的环境。然而,关于其光合作用降幅的成因,学术界存在不同观点,Teskey 等认为干旱胁迫下植物光合作用水平下降以气孔关闭引起 CO_2 供应受阻的气孔因素为主[26];刘孟雨等则主张以叶肉细胞光合活性降低的非气孔因素为主[27],而裴斌等研究则表明是气孔与非气孔因素共同作用的结果[11]。实际上,植物的适应性调节机制涵盖了解剖结构的适应性变化、生理过程的调控、光合色素的动态调节,以及抗氧化防御系统的激活等多个层面,可能是这些因素的协同作用导致其综合响应。

3.1. 解剖结构

许多阔叶木本植物在长期干旱环境下会表现出叶片形态的变化,如叶片变小、叶片增厚、角质层加厚以及保水组织的发达[28]。这些结构上的调整有助于减少水分的散失,提高水分利用效率,并增强植物的抗旱能力。例如,角质层的增厚可以降低水分蒸散,减少非气孔途径的水分流失。但也不绝对,如尚佳州对杨树幼苗进行研究,发现碧玉杨在干旱胁迫下叶片变小,但叶片变薄,这是水分亏缺导致叶片细胞分裂和生长受阻,细胞减小所致[29]。此外,一些植物的叶片会发生卷曲,以减少叶片暴露面积,从而

降低水分蒸腾速率。如何芳兰等人发现植物遭受旱胁迫后，叶片失水严重，细胞质受损，叶绿素降解，继而叶片会皱缩、卷曲、发黄甚至凋零[30]。

3.2. 气孔调节

干旱胁迫引发的水分亏缺会导致气孔关闭，以减少水分散失。植物通过调节气孔导度来在光合 CO_2 吸收和水分保存之间取得平衡。在这一过程中，植物内源性激素，尤其是脱落酸(ABA)，在干旱响应中发挥着关键作用[31]。ABA 能够迅速积累并传导信号，促进气孔关闭，减少水分蒸散，并在一定程度上维持光合速率。同时，一些研究表明，不同植物种类对 ABA 的敏感度不同[32] [33]，这也导致其气孔响应的差异。

3.3. 光合色素的调节

植物会通过增加或优化光合色素含量来提高光合效率。干旱胁迫条件下，叶绿素含量可能下降，但部分植物能够增加类胡萝卜素的含量，以帮助抵御光氧化损伤。类胡萝卜素在光保护过程中起到重要作用，它们可以通过散射多余的光能或协助清除活性氧，防止光合机构受到损害。李阳等人的研究表明，叶绿素含量可作为植物对干旱胁迫反应的生理标志，其在干旱条件下的显著下降主要源于光合色素的加速降解及叶绿体结构的破坏[34]。李芳兰等人的研究表明干旱胁迫通过抑制叶绿素的生物合成并促进其降解，导致叶绿素含量急剧减少，从而影响植物的光合作用效率及其生存能力[35]。此外，一些植物通过调整叶绿素 a/b 比值来优化光合光捕获能力，提高其在干旱环境下的光合适应性。

3.4. 光合作用的电子传递和能量调控

在光合作用的电子传递和能量调控方面，干旱胁迫可能引发非光化学猝灭(NPQ)机制的增强，以减少光抑制的影响。NPQ 主要通过叶黄素循环和叶绿素荧光调节来缓冲过量光能，防止光系统 II (PSII) 受到损伤。这种能量分配策略使植物能够在干旱条件下避免因光能利用效率下降而导致的光氧化损伤。张永强等的研究结果显示，干旱条件下，冬小麦的 Fv/Fm、Fv/Fo、Fs 和 T1/2 等生理参数显著下降，指示干旱胁迫使得 PSII 质子醌库(PQ 库)的容量减小，进而抑制 PSII 的初始光能转化效率和潜在活性。这表明干旱胁迫直接影响光合作用中的电子传递和二氧化碳同化过程[36]。

3.5. 抗氧化系统的调控

干旱胁迫通常会导致活性氧(ROS)的积累，而过量的 ROS 可能会损伤细胞膜、蛋白质和 DNA，从而影响光合器官的功能。为了缓解氧化胁迫，植物会上调抗氧化酶系统，如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等[10] [37] [38]。这些酶类的增强能够有效清除 ROS，维持细胞稳态，保护光合机构免受氧化损伤。干旱条件可能引发类囊体膜的脂质过氧化，进一步加剧光合电子传递链的损伤，从而降低光合效率。当植物遭受水分胁迫时，细胞内的光合电子传递链及酶代谢发生紊乱，活性氧的积累显著增加。Fridovich 提出的生物自由基伤害理论表明，植物体内产生的大量自由基能引发膜脂过氧化或脱脂作用，破坏细胞膜系统，从而对植物造成损伤[39]。此外，一些研究发现，干旱胁迫还可能影响植物的碳代谢过程。例如，植物可能通过增加渗透调节物质(如脯氨酸、可溶性糖和甜菜碱等)的积累，提高细胞内水势，增强水分保持能力[40]。这些渗透调节物质不仅有助于细胞维持水分平衡，还能稳定蛋白质和膜结构，提高抗逆性。

综上，阔叶木本植物在干旱胁迫下展现出多层次的光合调节机制，从解剖结构的适应到生理生化的调控，这些调节策略的协同作用有助于植物在水分受限环境下维持光合活性。深入研究这些调节机制，不仅有助于理解植物如何应对干旱压力，也可为抗旱作物的选育、森林生态系统的管理以及生态恢复提

供理论依据。

4. 研究方法与技术进展

干旱胁迫对植物光合能力的影响研究涉及多个层面的测定方法和技术进展,主要包括气体交换测定、叶绿素荧光分析、光合色素含量测定等传统方法,同时结合代谢组学、稳定同位素分析及遥感监测等现代技术,以提高研究的精准度和广度。

4.1. 气体交换参数测定与叶绿素荧光分析

气体交换参数的测定是研究干旱胁迫下光合能力变化的基础方法,主要使用便携式光合测定系统(如 LI-6400XT、CIRAS-3)测定净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)等关键参数[41][42]。通过这些指标可以评估干旱对叶片光合碳同化能力及水分利用效率(WUE)的影响。

叶绿素荧光技术可用于评估光系统 II (PSII)和光系统 I (PSI)的活性,以及电子传递链的状态[43]。常用的参数包括最大光化学效率(Fv/Fm)、实际光化学效率(ΦPSII)及非光化学淬灭(NPQ)。近年来,结合光诱导曲线(OJIP-test)分析干旱胁迫对 PSII 受体侧电子传递的影响已成为重要手段[44]。

4.2. 叶片光合色素含量测定

采用高效液相色谱(HPLC)或光谱分析法测定叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量[45],以评估干旱对光合色素的影响。光合色素含量的变化可反映植物适应干旱的策略,如叶片结构调整或抗氧化机制的激活。

4.3. 代谢组学与稳定同位素分析

光合代谢组学通过非靶向或靶向代谢组学技术(如 GC-MS、LC-MS)检测光合碳代谢产物的变化[46],揭示干旱胁迫对碳同化及糖代谢的影响。此外,稳定同位素技术(¹³C 和 ¹⁸O 标记)可用于追踪干旱胁迫下 CO₂ 固定及碳分配的动态变化[47]。

4.4. 遥感监测与高光谱成像

遥感监测技术结合无人机(UAV)和卫星遥感数据,可在大尺度上评估植被光合能力变化。高光谱成像技术(如叶绿素荧光遥感、叶片反射光谱分析)可用于早期检测干旱胁迫下叶片光合损伤的程度[48]。

5. 结论与展望

5.1. 研究结论

本研究系统地阐述了干旱胁迫对阔叶木本植物光合能力的影响,并提出了干旱条件下植物光合作用调节的多层次机制。研究表明,阔叶木本植物通过解剖结构的适应性变化、气孔调节、光合色素优化、电子传递调控和抗氧化防御等多种方式应对干旱胁迫。尽管当前的研究已取得显著进展,但对木质部水力特性与光合能力的关系仍缺乏深入探讨,未来研究应结合气孔动态、木质部导水率等参数,进一步揭示干旱胁迫下水力与光合作用的协同作用。此外,利用代谢组学、同位素示踪等技术,结合机器学习算法,可以进一步提升对干旱胁迫下光合能力变化的预测能力。通过这些研究,能够为阔叶木本植物的抗旱机制、森林生态系统管理和抗旱作物选育提供理论支持。

5.2. 研究不足与展望

尽管近年来对干旱胁迫影响植物光合能力的研究取得了显著进展,但仍然存在以下问题:目前研究

较多关注气孔对光合速率的影响,而对木质部水力特性如何调控光合能力的研究较少。干旱条件下,水力限制可能比气孔限制对光合作用影响更显著。虽然已有研究探讨了干旱胁迫对碳同化产物积累的影响,但关于代谢重塑(如糖代谢、次生代谢物积累)如何调控植物耐旱性仍不明确。大部分研究仍集中在个体或叶片水平,缺乏群落或生态系统尺度上的长期监测数据,限制了对植物耐旱机制的综合理解。

未来可结合叶片水势、气孔动态模拟和木质部导水率等参数,探讨干旱胁迫下水力与光合过程的协同作用。可利用同位素示踪与代谢组学技术,解析不同光合产物(如可溶性糖、有机酸等)在干旱胁迫下的积累与分配模式。结合机器学习算法,分析遥感数据、基因组信息及环境因子,构建预测干旱胁迫下光合能力变化的数学模型。利用遥感与野外观测相结合的方法,监测不同植被类型在长期干旱背景下的光合能力演变及其对全球变化的响应。

通过上述改进,未来研究可在生理、生态及模型模拟等多个层面深入理解干旱胁迫对阔叶木本植物光合能力的影响,并为森林生态系统管理和抗旱育种提供理论支持。

参考文献

- [1] Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., *et al.* (2010) A Global Overview of Drought and Heat-Induced Tree Mortality Reveals Emerging Climate Change Risks for Forests. *Forest Ecology and Management*, **259**, 660-684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- [2] 李玉恒, 张铃悦, 黄惠倩, 等. 北方农牧交错区农户干旱风险感知及其适应策略研究: 以陕西省榆阳区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(5): 1201-1210.
- [3] Budak, H., Kantar, M. and Yucebilgili Kurtoglu, K. (2013) Drought Tolerance in Modern and Wild Wheat. *The Scientific World Journal*, **2013**, Article ID: 548246. <https://doi.org/10.1155/2013/548246>
- [4] Wang, Q., Yang, Y., Liu, Y., Tong, L., Zhang, Q. and Li, J. (2019) Assessing the Impacts of Drought on Grassland Net Primary Production at the Global Scale. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 14041. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50584-4>
- [5] Green, J.K., Seneviratne, S.I., Berg, A.M., Findell, K.L., Hagemann, S., Lawrence, D.M., *et al.* (2019) Large Influence of Soil Moisture on Long-Term Terrestrial Carbon Uptake. *Nature*, **565**, 476-479. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0848-x>
- [6] Schwalm, C.R., Anderegg, W.R.L., Michalak, A.M., Fisher, J.B., Biondi, F., Koch, G., *et al.* (2017) Global Patterns of Drought Recovery. *Nature*, **548**, 202-205. <https://doi.org/10.1038/nature23021>
- [7] 翁白莎, 严登华. 变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 309-316.
- [8] 魏娜, 仇亚琴, 甘泓, 等. WWF 水风险评估工具在中国的应用研究——以长江流域为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(3): 502-512.
- [9] 唐星林, 周本智, 周燕, 等. 基于 FvCB 模型的几种草本和木本植物光合生理生化特性[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1482-1488.
- [10] 李天翔, 肖亚琴, 曹基武, 等. 干旱对不同种源花榈木幼苗生长及生理生化的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(12): 86-96.
- [11] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [12] 许大全. 新编光合作用学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2022.
- [13] Corak, N.K., Otkin, J.A., Ford, T.W. and Lowman, L.E.L. (2024) Unraveling Phenological and Stomatal Responses to Flash Drought and Implications for Water and Carbon Budgets. *Hydrology and Earth System Sciences*, **28**, 1827-1851. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1827-2024>
- [14] 王露露, 王晓林, 刘喆宇, 等. 干旱胁迫训练对党参多糖积累及抗旱性的影响[J]. 中国中药杂志, 2025, 50(3): 672-681.
- [15] Shi, C., Fu, Y., Guo, Y., Ma, Y., Li, S., Lin, J., *et al.* (2022) Comparative Effects of Water Potential Stress Induced by Salt, Alkali and Drought on Photosynthetic Electron Transport and Apparatus in *Hordeum jubatum* Seedlings. *Crop & Pasture Science*, **74**, 324-333. <https://doi.org/10.1071/cp22202>
- [16] 张珊珊, 康洪梅, 杨文忠, 等. 干旱胁迫下 amf 对云南蓝果树幼苗生长和光合特征的影响[J]. 生态学报, 2016,

- 36(21): 6850-6862.
- [17] 侯立伟, 鲁绍伟, 李少宁, 等. 城市绿化灌木耐旱性评价及灌溉制度研究进展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(1): 45-51.
- [18] 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.
- [19] 李民青, 周孝明, 王双龙, 等. 干旱胁迫下乔木状沙拐枣枝干光合对水力性状与叶片光合的影响[J]. 植物生态学报, 2024, 48(11): 15-24.
- [20] 郭华, 秦聪, 石美娟, 等. 苹果幼树生理指标对土壤水分调控的响应研究[J]. 节水灌溉, 2021(6): 43-47.
- [21] 高钊惠. 干旱及复水对小叶杨幼苗生长和碳氮代谢的影响[D]: [硕士学位论文]. 晋中: 山西农业大学, 2022.
- [22] 潘彩玲. 4 个奇楠沉香品系嫁接苗早期生长与干旱胁迫生理响应研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2024.
- [23] 张志山, 韩高玲, 霍建强, 等. 固沙灌木柠条锦鸡儿和中间锦鸡儿木质部导水与叶片光合能力对土壤水分的响应[J]. 植物生态学报, 2023, 47(10): 1422-1431.
- [24] 王明国, 王雅婷, 刘开琳, 等. 干旱胁迫对核桃幼苗光合作用的影响[J]. 防护林科技, 2025(1): 47-50.
- [25] 柴成武, 王方琳, 赵鹏, 等. 干旱胁迫对沙蒿叶片水分含量、光合特性及抗氧化酶的影响[J]. 西北林学院学报, 2025, 40(1): 42-50.
- [26] Teskey, R.O., Fites, J.A., Samuelson, L.J. and Bongarten, B.C. (1986) Stomatal and Nonstomatal Limitations to Net Photosynthesis in *Pinus taeda* L. under Different Environmental Conditions. *Tree Physiology*, 2, 131-142. <https://doi.org/10.1093/treephys/2.1-2-3.131>
- [27] 刘孟雨, 陈培元. 水分胁迫条件下气孔与非气孔因素对小麦光合的限制[J]. 植物生理学通讯, 1990, 26(4): 24-27.
- [28] 马常钦. 水曲柳雌雄株复叶功能性状对不同生境的响应[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- [29] 尚佳州. 氮添加下不同抗旱性杨树幼苗的碳-氮关系响应机理研究[D]: [硕士学位论文]. 晋中: 山西农业大学, 2023.
- [30] 何芳兰, 赵明, 王继和, 等. 几种荒漠植物种子萌发对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 100-106.
- [31] 游丽霞, 刘慢慢, 赵韦颖, 等. 珠海淇澳岛红树林凋落物产量动态及碳氮储量[J/OL]. 生态学杂志, 2024: 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20241129.0850.002.html>, 2025-02-01.
- [32] Toupes, H.S., Cochetel, N., Deluc, L. and Cramer, G.R. (2022) Absciscic Acid Metabolism Pathways Differ between Grapevine Species, Leaves, and Roots during Water Deficit. *OENO One*, 56, 125-137. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.4.5483>
- [33] Li, S., Liu, S., Zhang, Q., Cui, M., Zhao, M., Li, N., et al. (2022) The Interaction of ABA and ROS in Plant Growth and Stress Resistances. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 1050132. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1050132>
- [34] 李阳, 齐曼·尤努斯, 安萍. 渗透胁迫对新疆大果沙枣幼苗叶片膜脂过氧化及膜保护酶的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2005, 28(2): 47-50.
- [35] 李芳兰, 包维楷. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应[J]. 植物学通报, 2005, 22(S1): 118-127.
- [36] 张永强, 毛学森, 孙宏勇, 等. 干旱胁迫对冬小麦叶绿素荧光的影响[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(4): 17-19.
- [37] 吴雨桦, 周燕, 李丕军, 等. 五个核桃品种对干旱胁迫的生理生化响应[J]. 四川林业科技, 2024, 45(4): 26-37.
- [38] 鲍佳美. 施氮和干旱胁迫对蒙古栎幼苗生理生态特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [39] 张木清, 余松烈. 水分胁迫下蔗叶活性氧代谢的数学分析[J]. 作物学报, 1996, 22(6): 729-735.
- [40] 耿晓东, 岳继飞, 刘英, 等. ‘豫济’山桐子幼苗生长对干旱胁迫的响应[J/OL]. 经济林研究, 2025: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1117.S.20250122.1049.002.html>, 2025-02-01.
- [41] 李少卡, 张世青, 颜彩缤, 等. 干旱胁迫诱导菠萝蜜裂皮病发生的生理基础研究[J]. 中国热带农业, 2024(2): 35-43.
- [42] 郝玄瑞, 姜妍, 王宇倩, 等. 杨树 PtoXTH34 基因过表达提高烟草抗旱性[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 63-71.
- [43] 高登涛. 苹果矮化砧木 m9t337 对干旱胁迫响应机制及预警指标体系建立[D]: [博士学位论文]. 石河子: 石河子大学, 2022.
- [44] 孙宜, 孙猛, 王扬, 等. 3 个紫薇品种形态和生理特性对干旱胁迫的响应[J]. 贵州农业科学, 2023, 51(12): 93-102.

-
- [45] 彭心雨, 邵陈禹, 李鑫, 等. 干旱协同遮阴对红茶和白茶滋味香气的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 275-283.
- [46] Huang, X., Chu, G., Wang, J., Luo, H., Yang, Z., Sun, L., *et al.* (2023) Integrated Metabolomic and Transcriptomic Analysis of Specialized Metabolites and Isoflavonoid Biosynthesis in *Sophora alopecuroides* L. under Different Degrees of Drought Stress. *Industrial Crops and Products*, **197**, Article 116595. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116595>
- [47] 王东清, 马丽慧, 张蕾蕾. 干旱风沙区不同林龄柠条锦鸡儿水分利用特征研究[J]. 贵州农业科学, 2024, 52(11): 109-115.
- [48] 程强, 刘雨欣, 杨涵青, 等. 面向作物干旱胁迫诊断的表型成像技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 1-11.