Botanical Research 植物学研究, 2025, 14(2), 81-88
Published Online March 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/br
https://doi.org/10.12677/br.2025.142010

Hans汉斯

楠木逆境生理与抗逆栽培研究进展

薛云峰

长江大学园艺园林学院，湖北 荆州

收稿日期：2024年12月26日；录用日期：2025年2月24日；发布日期：2025年3月10日

摘　要

楠木是我国传统珍贵名木，它包括樟科(Lauraceae)楠属(*Phoebe* Nees)植物及一些近缘种，在药用、经济和生态等方面发挥着重要作用。但楠木在生长过程中遭遇着水涝、干旱、低温、盐碱、重金属污染以及缺素等众多环境逆境，致使这一丰富的森林资源生长受限，近于枯竭，迫切需要切实有效抗逆栽培方法。文章综述了近年来关于楠木逆境生理方面取得的研究进展，总结了一些抗逆栽培措施，并探讨了未来楠木抗逆栽培研究的方向，以期为楠木的逆境研究和开发利用提供理论总结与发展思路。

关键词

楠木，逆境生理，抗逆栽培，研究进展

Research Progress on Stress Physiology and Stress-Resistant Cultivation of *Phoebe*

Yunfeng Xue

College of Horticulture and Gardening, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: Dec. 26th, 2024; accepted: Feb. 24th, 2025; published: Mar. 10th, 2025

Abstract

***Phoebe* is a traditional precious tree in my country. It includes plants of the genus *Phoebe* Nees in the Lauraceae family and some related species. It plays an important role in medicinal, economic and ecological aspects. However, during the growth process, *Phoebe* encounters numerous environmental adversities such as waterlogging, drought, low temperature, salinity, heavy metal pollution, and nutrient deficiencies. As a result, the growth of this rich forest resource is limited and is close to exhaustion. Effective stress-resistant cultivation method is urgently needed. This article reviews the research progress on the stress physiology of *Phoebe* in recent years, summarizes some stress-resistant cultivation measures, and discusses the direction of future research on *Phoebe*'s stress-**

文章引用: 薛云峰. 楠木逆境生理与抗逆栽培研究进展[J]. 植物学研究, 2025, 14(2): 81-88.
DOI: 10.12677/br.2025.142010

resistant cultivation, with a view to providing theoretical summaries and ideas for stress research on *Phoebe*.

Keywords

***Phoebe*, Stress Physiology, Stress-Resistant Cultivation, Research Progress**

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

楠木为我国特有、珍稀、濒危木本植物的典型代表，它包括樟科(Lauraceae)楠属(*Phoebe* Nees)植物及一些近缘种[1] [2]。其木质致密，耐腐蚀性强，具有很好的驱虫效果，因此在建筑、家具和雕刻等领域被广泛选用[3]。与此同时，它还具备净化空气、阻滞尘埃、保持水源、防止土壤侵蚀等多重生态功能，既在经济层面具有显著价值，也在生态保护方面发挥着重要作用[4]-[6]。

楠木在生长过程中除遭受砍伐之外还常常面临着众多环境逆境障碍，对其栽培、生长和繁殖等多方面产生影响，也使得楠木种质资源保护面临巨大挑战。但是国内对楠木在逆境胁迫下的生理变化和抗逆栽培研究鲜见报道，对于楠木在多种逆境条件下的生理响应机制，多数研究仅停留在表面现象的观察，如叶片枯黄、生长减缓等，缺乏对生理指标变化和抗逆水平的深入探究，且未提出进一步的研究方向。因此本文综述了近年来国内外关于楠木水涝、干旱、低温、盐碱、重金属污染以及缺素等众多逆境生理方面取得的研究进展，总结了施用外来调节剂、接种真菌、生物工程抗性育种等抗逆栽培措施，并探讨了未来楠木抗逆栽培研究的方向，旨在为今后在楠木抗逆性研究和种质资源开发利用方面提供一定的背景资料和理论参考。

2. 楠木逆境生理研究

2.1. 水分胁迫

水分胁迫是指植物所处的环境中水分状态超出植物正常生长的生态幅，从而遭受到伤害的一种环境条件的统称，分为涝渍胁迫和干旱胁迫[7]。涝渍胁迫和干旱胁迫都会对楠木幼苗的生理特性产生一定影响，但变化趋势大致相似，具体表现为楠木幼苗的叶绿素含量减少，MDA 含量显著增加，而 SOD、POD 活性和可溶性蛋白质含量随着胁迫时间的延长呈现出先增加后减少的趋势；这在一定程度上表明楠木幼苗对不同程度的水分胁迫都具有一定的适应性[8]。

前人研究发现，涝渍胁迫主要会对楠木叶片细胞结构产生影响，造成植物细胞膜的损坏，郑鹏丽等[7]研究指出，水涝会对桢楠(*P. zhennan*)植株膜透性造成严重损伤，使植株表现出生长不适，下部老叶发黄、下垂等现象，加速植株的衰老和死亡。Shi 等[9]研究表明，涝渍胁迫会导致紫楠(*P. sheareri*)叶表皮气孔关闭，气孔密度增加，叶片细胞结构排列逐渐松动，叶栅栏组织细胞合并，同时造成叶绿体外膜损伤，形态改变，质解，线粒体基质浓度降低，内嵴结构消失，从而抑制紫楠新叶生长，导致叶片逐渐变黄萎蔫甚至脱落。涝渍胁迫对植物造成危害的同时，轻度胁迫反而会刺激植物的抗涝能力，周鑫[10]研究发现轻度渍水胁迫能促使桢楠幼苗产生不定根，从而提高根系的渗透调节及抗氧化能力，重度及以上的渍水胁迫会抑制其光合作用，并对桢楠幼苗叶片细胞膜系统造成损害。

王曦等[11]研究发现当桢楠幼树受到干旱胁迫时，它会通过提高 Pro、SS 等渗透调节物质的含量来提高渗透调节能力，干旱胁迫会抑制桢楠幼树茎横向和纵向的生长，以及限制叶面生长，随着干旱胁迫的增强，桢楠幼树叶片的蒸腾作用会逐渐减弱，但是叶片的水分利用效率会升高，对于桢楠幼苗吸收土壤养分的抑制作用也会加剧。张心艺[12]研究指出细叶桢楠苗木会通过生长、光合、荧光、生理这 4 方面来适应干旱环境，其适应机理与王曦研究结果基本一致。为调节干旱胁迫对植物的影响，可通过补氮的方式提高氮化合物水平和提高氮相关代谢酶活性来调节植株生长，施氮会减少氧化应激和膜损伤，使植株保持较高的渗透产物积累，通过低代谢成本来提高楠木的耐旱性[13]。Hu 等[14]研究显示，干旱胁迫导致的楠木叶片渗透剂、糖和蛋白质水平增加，超氧自由基和过氧化氢浓度升高，SOD 活性升高等现象会在复水后恢复至正常水平，且楠木幼苗在轻度和中度干旱条件下仍保持正常的膨压，这表明楠木抗氧化防御系统和渗透调节剂在干旱胁迫和旱后恢复过程中起到了重要作用。

2.2. 低温胁迫

温度是最关键的环境因子之一，对植物的生长和发育产生重要影响。低温条件下，植物会通过积累可溶性糖、蛋白质、脯氨酸等物质，降低细胞渗透势，保护生物膜，维持细胞结构，从而提高植物对低温环境的适应性[15]。

李高志等[16]研究低温对于大叶桢楠和小叶桢楠的影响指出，在一定低温下 2 种叶型桢楠叶片的细胞膜透性都会被损坏，低温会引起桢楠叶片细胞膜质过氧化,且随着温度降低,过氧化程度不断加剧。张毅龙等[17]研究显示低温胁迫下闽楠(*P. bournei*)相对叶绿素含量、ETR、Fv/Fm 等指标均呈现降低趋势，说明低温对闽楠叶绿体的合成、结构和功能造成了一定的影响，损害了闽楠叶片的光合机构，抑制了植物的光能转换效率。安常蓉等[18]研究结果表明随温度的降低和胁迫时间的延长，闽楠幼苗叶片细胞质膜透性、SOD 酶活性和脯氨酸含量增加，MDA 含量先下降后上升，叶绿素含量呈持续下降趋势，而短期冻害及常温恢复处理则会直接破坏叶绿素结构，导致叶片失绿。

2.3. 盐碱胁迫

随着全球资源环境问题日益凸显，土壤盐渍化已经成为全球性问题，全球约有 7%的土地受到盐渍化的威胁，我国是土壤盐渍化比较严重的国家，盐渍化土壤面积大，分布广[19] [20]。土壤盐渍化在当今旱地农林业面临的重要生态环境问题中日益突出，日趋成为阻碍植物生长的一个主要因素。

研究表明，在低至中度盐碱胁迫下，楠木通过增加 POD 和 CAT 酶的活性来帮助植物更有效地清除细胞内的活性氧，保护细胞膜系统，显示出楠木在自我减轻细胞伤害方面的适应性反应；然而为了清除多余的活性氧自由基，SOD 酶被过度耗尽，自由基的积累则会对 SOD 酶蛋白产生破坏作用[21]。李英杰等[22]研究发现，随着盐碱浓度的升高，紫楠幼苗的抗氧化酶(SOD、POD、CAT、APX、GR)活性增加，脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量均呈现上升趋势，幼苗的生长受到了抑制。刘金林等[23]研究指出，随着土壤盐分浓度的增加，虽然浙江楠幼苗叶绿素含量和叶片相对含水量减少，但 MDA 含量、细胞膜透性、脯氨酸含量和可溶性蛋白质含量增加，SOD 活性呈现了一种先增加后减小的趋势，盐分胁迫导致植物细胞膜受损，使膜透性增大，电解质大量外渗，破坏了植物叶片结构，叶片逐渐发黄、焦枯直至明显脱落。

2.4. 重金属胁迫

随着我国城市化和工业化的迅速发展，重金属污染对环境的影响越来越严重，大量的重金属通过工业三废排放进入土壤、水域，严重破坏了生态系统[24]。重金属污染会抑制植物的生长发育、破坏植物的

光合作用、引起氧化胁迫以及干扰植物的营养代谢，对植物生长造成多种危害[25]-[27]。

铁得祥[28]研究发现，尽管桢楠幼树能够吸收一定量的镉(Cd)，但大部分吸收的镉主要积累在植株的根部，而地上部分的镉含量相对较低，这可能是因为植物的根部代谢较快，其中积累的镉有很大机会重新释放到土壤中，从而导致了潜在的二次污染问题。李文杰等[29]研究表示，浙江楠幼苗对 $Pb(NO_3)_2$ 胁迫有一定的抗性，低浓度的 $Pb(NO_3)_2$ (300 mg/L)可增加植株根系对养分和水分的吸收，促进根系的生长，但中高浓度的 $Pb(NO_3)_2$ (≥600mg/L)会破坏植物保护酶活性和细胞膜，对浙江楠幼苗的生长产生明显的抑制作用。以上研究结果在一定程度上表明了监测和管理土壤中重金属含量的重要性，防止环境中的重金属积累对生态系统和人类健康产生不利影响。

2.5. 缺素胁迫

植物生命活动中必需的营养元素均有其特有的生理功能，任何一种元素缺乏都会对植物的生理活动造成影响，进而影响到植物的生长。目前，对楠木的缺素胁迫研究主要在大量元素(N、P、K、Mg、S 和 Ca)缺乏对植物生长的影响。N 是叶绿素合成的重要组成部分[30]，也是酶的基本成分[31]；P 在核酸、核苷酸和磷脂等化合物合成过程中起重要作用[32]，同时对植物根系形态有刺激作用[33]；K 是植株重要生命中酶的活化剂，对韧皮部传导，渗透调节具有重要作用[34]；Mg 参与植物体内叶绿素合成、光合作用、蛋白质合成、能量代谢及多种酶促反应，并且具有改善苗木品质、防治病害的作用[35]；S 和 Ca 在植物体内是较难移动的元素，分别对植物的光合作用和抗病性起重要作用。

只有准确掌握苗木出现的缺素症状，及时识别出缺乏的营养元素，然后采取合理的补充措施，才能确保幼苗正常地生长发育，充分保护楠木幼苗[36]。王樱琳等[37]研究显示闽楠幼苗在缺 N、缺 K 和缺 Mg 时叶片症状最为明显，表现出叶片黄化、褐斑、脉间失绿、有大小不一的褐色坏死斑点等现象，而缺 Ca 与缺 S 幼苗则无明显叶片症状；在缺 N、缺 K 和缺 Mg 处理下，闽楠幼苗的苗高、地径、叶面积、生物量均显著下降，缺 Mg 对叶面积影响最大，缺 K 对地径和生物量影响最大；6 种营养元素对闽楠幼苗的生长都起着重要的作用，缺少任何一种元素，闽楠幼苗都会遭到不同程度的伤害，生长受到抑制。微量元素在土壤中的含量较少，但对植物的生命活动却不可或缺[38]。在微量元素缺乏的情况下，楠木幼苗表现出的缺素症状，以及对其生长和生理产生的影响等有待于进一步深入研究。

3. 楠木抗逆栽培途径

3.1. 施用外来调节剂

外来调节剂可通过调节植物的生理和分子机制，提高植物抗性，为培育更具抗性的植物品种提供了一种有效的途径。

褪黑素在非生物胁迫过程中起着调节细胞渗透势、保护细胞膜、清除活性氧自由基等作用，作为信号分子诱导非生物胁迫应答基因来提高植物抗逆性[39]。Guifang 等[40]研究显示，褪黑素处理可显著逆转干旱诱导下紫楠幼苗的氧化损伤，并促进紫楠幼苗的生长，首次证明了褪黑素可以保护紫楠幼苗免受干旱威胁。水杨酸(salicylic acid, SA)及其受体蛋白 NPR1 介导的 SA 信号通路是植物免疫系统的重要组成部分，在维持植物基础性抗性和建立系统获得性抗性(systemic acquired resistance, SAR)中具有重要作用[41]。李伟婷等[42]研究指出，在低温胁迫下，一定浓度的 SA 预处理能有效保护幼苗叶片膜系统的稳定性、增加渗透调节物质含量和提高抗氧化酶活性；喷施一定浓度 CaCl2 能够明显提高植物保护系统的活性及稳定性，降低植物在低温下受伤害程度，故而外施 SA 和 $CaCl_2$ 对于闽楠幼苗抗寒性的提高均有一定的促进作用。外源 SA 可以诱发植物触发病理相关蛋白基因的表达，在诱导植物产生抗病性的同时大量积累病程相关蛋白，研究证实不同质量浓度水杨酸(SA)处理的紫楠叶片均对炭疽病病斑有抑制作用，外

源 SA 可以诱导植物内源性 CAT 和 POD 活性增加，以及相关基因的表达，引发植物的诱导抗性，抵御病原菌的入侵[43]。

Yang 等[44]研究发现，对干旱胁迫下的湘楠(*P. hunanensis*)喷施适宜浓度甜菜碱溶液后，其叶片从表观形态、叶片相对含水量、相对电导率、MDA 含量等基础生理效应，到可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸等内部渗透调节物质的含量，再到 CAT 酶、SOD 酶、POD 酶等抗氧化酶系统活力的变化，均表现出较强的耐旱性，外源甜菜碱的应用显著增加了湘楠叶片相对含水量和渗透调节物质，并通过改善干旱胁迫下的抗氧化酶含量来减少氧化应激。刘刚等[45]研究指出，可通过喷施 300 mg/L 浓度的矮壮素、缩节胺，来帮助闽楠一年生实生苗降低叶绿素含量、提高脯氨酸含量、提高超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性，从而提升闽楠的抗寒性。

3.2. 接种真菌

真菌能够帮助植物提高抗旱、抗盐碱能力以及对环境的适应性。菌根真菌可以扩展植物根系的生理活动范围，提高植物对养分的吸收能力，改善水分利用效率，同时利用与植物的共生关系，影响植物的抗氧化系统，提高其抗氧化物质的合成，从而减轻逆境条件下氧化应激的影响；内生真菌则通过影响植物组织结构和功能，改变宿主体内的酶活性、激素含量以及增加相应抗性基因的表达来增强宿主植物对非生物胁迫的耐受性[46] [47]。

崔令军等[48]研究表明，桢楠在盐胁迫下接种丛枝菌根真菌(AMF)可增强其抗盐碱能力，AMF 能够增强桢楠的光合色素含量、净光合速率、气孔导度、叶绿素荧光参数等光合特性，提高对光能的吸收利用效率，从而减轻盐分对桢楠造成的伤害，表明 AMF 能够增强桢楠的耐盐性，进而促进桢楠在盐碱性土壤中生长。李英杰[22]研究显示，在盐碱胁迫下，接种印度梨形孢的紫楠较对照组，在鲜重、株高、地径、叶片、根系、光合色素、叶绿素荧光参数等指标上均有提高，在一定程度上缓解了盐碱胁迫对紫楠幼苗生长发育的影响；同时，随着盐碱浓度的升高，接种组的 SOD、CAT、POD、GR 活性、ASA 含量均得到不同程度的提高，表明印度梨形孢可以提高紫楠幼苗的抗盐碱胁迫能力。

3.3. 生物工程抗性育种

运用生物工程技术，通过对楠木转录过程和表达产物的分析，深入挖掘楠木逆境性状的遗传基础，揭示楠木生长发育的调控网络、分子机制和适应能力，筛选出与特定抗逆表达相关的关键基因，为改良植物和培育新品种提供有力的科学依据。

Chang 等[49]利用 qRT-PCR 技术对闽楠 GRAS 基因家族的全基因组进行了鉴定、表达及胁迫分析，研究显示 PbGRAS7，PbGRAS14 对闽楠干旱的耐受性起重要作用，PbGRAS10 和 PbGRAS16 对闽楠温度胁迫的反应有显著影响，这表明 PbGRASs 在闽楠干旱、盐胁迫和温度胁迫的生理过程中发挥了积极作用，为阐明闽楠对干旱、盐胁迫和高低温胁迫的分子机制提供了基础，并为利用基因工程方法改良闽楠奠定了基础。Zhang 等[50]采用 RNA-Seq 和 qRT-PCR 方法，比较了婺源耐冷型(WY)和武平冷敏感型(WP)两种闽楠生态型在低温胁迫下的转录组谱，对比一些转录因子基因在冷应激诱导下的表达变化指出，WY 相关基因在低温胁迫下的转录分化较强，具有更强的抗寒性，为提高闽楠的抗寒性提供了重要的遗传资源。

4. 结论与展望

楠木在水涝、干旱、低温、盐碱、重金属污染以及缺素等逆境胁迫下有多种生理变化。在逆境条件下，根系吸收水分和营养物质能力下降导致其生长缓慢，叶片黄化甚至脱落；叶片光合速率下降、叶绿

素含量降低导致其光合作用受到抑制；细胞膜结构与功能受损，影响细胞内环境稳定和物质运输；活性氧大量积累，破坏细胞结构和功能。可通过施用褪黑素、水杨酸、甜菜碱等外来调节剂，接种丛枝菌根真菌等微生物菌剂，利用分子生物学技术进行基因改良等多种方式提高楠木在逆境环境下的抗性，从而促进其生长发育。

近年来，国内外对于楠木的生理和分子机制研究日趋增多，但研究结果仍不完善，未来可在以下几个方面做进一步深入研究：(1) 楠木病虫害对其生长发育产生的影响日趋严重，加强楠木病原菌生物学特性研究，明确病原菌分类地位和病害发生流行规律，为病害监测预报和防治工作奠定基础；(2) 当前在环境逆境研究中，以水分胁迫较多，在温度、盐碱、重金属、缺素和光照强度胁迫等方面研究尚少，需深入探究以期揭示逆境对植物生理结构的影响及作用机制，为楠木的保护和抗逆性的提高提供科学依据；(3) 目前楠木在分子水平上的研究尚浅，运用转录组测序技术研究植物抗逆分子响应机理，利用大规模的“组学”技术来研究逆境胁迫下基因的转录表达，构建相互作用网络，鉴定出一系列枢纽基因，可从根本上了解其抗性机理，从而有助于楠木抗逆分子机制进行功能性剖析，深入探究和解读楠木生存机制的秘密。

参考文献

[1] 刘志雄, 费永俊. 我国楠木类种质资源现状及保育对策[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(5): 221-223.

[2] Li, Y.G., *et al*. (2017) Complete Chloroplast Genome Sequences of Two Endangered *Phoebe* (Lauraceae) Species. *Botanical Studies*, **58**, 37.

[3] 李冬林, 金雅琴, 向其柏. 我国楠木属植物资源的地理分布、研究现状和开发利用前景[J]. 福建林业科技, 2004(1): 5-9.

[4] 卢昌泰, 赵君芬, 杜娟. 楠木在成都平原区园林绿化中的应用分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(33): 16628-16629, 16657.

[5] 黄承石, 潘珈瑶, 王东, 谢芹, 胡蝶. 5 种润楠属植物叶表皮结构和滞尘能力研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 76-79, 86, 8-9.

[6] 程一伦, 江天一, 李思睿, 彭建, 李金武, 辜云杰, 杨汉波. 造林密度对桢楠人工林土壤理化性质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(3): 446-455.

[7] 郑鹏丽, 黄晓蓉, 费永俊, 等. 水分胁迫对桢楠幼树光合生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 64-70.

[8] 黄晓蓉, 李玮婷, 刘刚, 等. 水分胁迫对楠木幼苗抗逆生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2015(7): 68-71.

[9] Shi, F., Pan, Z., Dai, P., Shen, Y., Lu, Y. and Han, B. (2023) Effect of Waterlogging Stress on Leaf Anatomical Structure and Ultrastructure of *Phoebe* Sheareri Seedlings. *Forests*, **14**, Article No. 1294. https://doi.org/10.3390/f14071294

[10] 周鑫. 涝渍胁迫对桢楠幼苗生长及生理特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2019.

[11] 王曦, 胡红玲, 胡庭兴, 等. 干旱胁迫对桢楠幼树渗透调节与活性氧代谢的影响及施氮的缓解效应[J]. 植物生态学报, 2018, 42(2): 240-251.

[12] 张心艺. 细叶桢楠种子萌发生理特性及苗木抗旱性研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.

[13] Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O.A., Graciano, C., Li, N., Li, Z., et al. (2019) Role of Nitrogen Supplementation in Alleviating Drought-Associated Growth and Metabolic Impairments in *Phoebe zhennan* Seedlings. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **182**, 586-596. https://doi.org/10.1002/jpln.201800435

[14] Hu, Y., Wang, B., Hu, T., Chen, H., Li, H., Zhang, W., *et al*. (2015) Combined Action of an Antioxidant Defence System and Osmolytes on Drought Tolerance and Post-Drought Recovery of *Phoebe zhennan* S. Lee Saplings. *Acta Physiologiae Plantarum*, **37**, Article No. 84. https://doi.org/10.1007/s11738-015-1831-x

[15] 权威, 薛文通, 赵天瑶, 等. 植物对低温胁迫的响应机制研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(2): 14-22.

[16] 李高志, 朱亚军, 周生财, 等. 2 种叶型桢楠对低温胁迫的生理响应及耐寒性分析[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 310-318.

[17] 张毅龙, 张卫强, 甘先华. 低温胁迫对 6 种珍贵树种苗木光合荧光特性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 777-784.

[18] 安常蓉, 韦小丽, 叶嘉俊, 等. 低温胁迫对闽楠幼苗形态及生理特性的影响[J]. 西部林业科学, 2018, 47(3): 96-

101, 106.

[19] 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245.

[20] 赵作章, 陈劲松, 彭尔瑞, 等. 土壤盐渍化及治理研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2023(6): 202-208.

[21] 朱丽, 马锐, 吴勇明, 等. 盐碱胁迫下闽楠和楠木的抗性生理研究[J]. 湖北林业科技, 2015, 44(5): 14-16, 72.

[22] 李英杰. 印度梨形孢对盐碱胁迫下紫楠幼苗生长和生理的影响[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2023.

[23] 刘金林, 王小德. 2 种楠木树种幼苗耐盐性综合评价[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 148-152.

[24] 王晢玮, 王秋红, 於丽华. 土壤重金属污染及对生物体影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(19): 86-92.

[25] 郑慧芳. 镉胁迫下杨树耐受性和次生生长的氮、硅调控[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.

[26] 王子诚, 陈梦霞, 杨毓贤, 等. 铜胁迫对植物生长发育影响与植物耐铜机制的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10): 1849-1863.

[27] 史洪洲. 重金属镉污染土壤植物修复与探索[J]. 环境工程, 2022, 40(5): 255.

[28] 铁得祥. 桢楠幼树生长、生理特性对镉胁迫的响应及其对镉的富集特性[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2019.

[29] 李文杰. 浙江楠对硝酸铅胁迫的生长和生理响应机制[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2018.

[30] 潘瑞炽, 董贤得. 植物生理学[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1993.

[31] Wang, G., Liu, F. and Xue, S. (2017) Nitrogen Addition Enhanced Water Uptake by Affecting Fine Root Morphology and Coarse Root Anatomy of Chinese Pine Seedlings. *Plant and Soil*, **418**, 177-189. https://doi.org/10.1007/s11104-017-3283-0

[32] 隆学武, 杨希, 黄勇, 等. 金山葵缺素症研究[J]. 福建林业科技, 2002(2): 54-55, 64.

[33] 梁尧, 蔡红光, 袁静超, 等. 深松结合不同施肥方式对春玉米根系时空分布特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 31-40.

[34] Gloser, V. and Gloser, J. (2000) Nitrogen and Base Cation Uptake in Seedling of *Acer pseudoplatanus* and *Calamagrostis villosa* Exposed to an Acidified Environment. *Plant and Soil*, **226**, 71-77.

[35] 余星, 刘晓. 镁对植物的作用及镁肥在农林业中的应用研究进展[J]. 南方农业, 2023, 17(9): 152-155, 170.

[36] 黄小辉, 吴焦焦, 魏立本, 等. 不同缺素条件下核桃幼苗的生长和生理变化[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(9): 33-41.

[37] 王樱琳, 韦小丽, 段如雁, 等. 闽楠幼苗对大量元素缺乏的响应[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 61-65.

[38] 沈惠国. 土壤微量元素对植物的影响[J]. 林业科技情报, 2010, 42(4): 12-14.

[39] 王春林, 王风琴. 褪黑素在植物抵御逆境胁迫过程中的作用[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(21): 11-13.

[40] Li, G., Li, Y., Zhu, Y., Zheng, W., Li, M., Hu, J., *et al*. (2023) Exogenous Application of Melatonin to Mitigate Drought Stress-Induced Oxidative Damage in *Phoebe sheareri* Seedlings. *PeerJ*, **11**, e15159. https://doi.org/10.7717/peerj.15159

[41] Wang, D., Amornsiripanitch, N. and Dong, X. (2006) A Genomic Approach to Identify Regulatory Nodes in the Transcriptional Network of Systemic Acquired Resistance in Plants. *PLOS Pathogens*, **2**, e123. https://doi.org/10.1371/journal.ppat.0020123

[42] 李玮婷, 宗卫, 费永俊. 水杨酸和氯化钙对低温条件下闽楠生理指标的影响[J]. 林业科技开发, 2015, 29(5): 23-26.

[43] 侯盼盼, 陈安良, 费莉玢, 等. 水杨酸诱导紫楠对炭疽病的抗性[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 605-610.

[44] Yang, Y., Huang, C., Ge, Z., Zhou, B., Su, G., Liu, C., *et al*. (2022) Exogenous Glycine Betaine Reduces Drought Damage by Mediating Osmotic Adjustment and Enhancing Antioxidant Defense in *Phoebe* Hunanensis. *Phyton*, **91**, 129-148. https://doi.org/10.32604/phyton.2022.016704

[45] 刘刚, 费永俊, 涂铭, 等. 矮壮素和缩节胺对闽楠幼苗抗寒性的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(6): 1403-1406, 1444.

[46] 李亮, 郭楠楠, 郝瑞颖, 等. 印度梨形孢(*Piriformospora indica*)增强植物抗逆境胁迫能力的研究进展[J]. 微生物学通报, 2022, 49(7): 2862-2874.

[47] 石瑛. 内生真菌对植物生长发育的影响[J]. 现代农业科技, 2010(6): 36-38.

[48] 崔令军, 刘瑜霞, 林健, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下桢楠光合生理的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 101-106.

[49] Chang, J., Fan, D., Lan, S., Cheng, S., Chen, S., Lin, Y., *et al*. (2023) Genome-Wide Identification, Expression and Stress Analysis of the GRAS Gene Family in *Phoebe bournei*. *Plants*, **12**, Article No. 2048. https://doi.org/10.3390/plants12102048

[50] Zhang, J., Zhu, Y., Pan, Y., Huang, H., Li, C., Li, G., *et al*. (2018) Transcriptomic Profiling and Identification of Candidate Genes in Two *Phoebe bournei* Ecotypes with Contrasting Cold Stress Responses. *Trees*, **32**, 1315-1333. https://doi.org/10.1007/s00468-018-1713-0