

# 树木非侵染性病害的发生原因与诊断

庄宇彤<sup>1,2</sup> 戴歆祎<sup>1</sup> 暴可心<sup>1</sup> 王小艺<sup>1\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091;  
2. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:** 树木非侵染性病害是由非生物胁迫因子引起的生理性病变, 其致病过程本质上是生态系统多因子互作驱动的生理失衡。系统整理了非侵染病害的典型病状: 变色、坏死、萎蔫、畸形、落花落果和流脂流胶, 并分析了这些病状与化学因素(营养失调、农药药害、环境污染、盐害)和物理因素(温度不适、水分失调、风害、光照异常)之间的致病关系, 揭示了非侵染性胁迫通过干扰树木根系功能和破坏冠层代谢, 显著降低树木的抗性阈值, 为病原和害虫的入侵提供了条件。此外, 基于树木发病的化学和物理因素分别构建了诊断框架, 并探讨了营养元素缺乏所诱发病症的时序变化规律及其典型症状的空间分布特征。非侵染性病害的防控应从被动的救治模式转向主动干预, 构建基于生态系统适应性的综合管理模式, 为应对气候变化和人类活动产生的复合胁迫提供理论支持。

**关键词:** 病状; 化学因素; 物理因素; 缺素症; 药害

中图分类号: S761; S766; S767 文献标识码: A 文章编号: 2097-5279(2025)03-0016-14

## The causes and diagnosis of non-infectious diseases in trees

ZHUANG Yutong<sup>1,2</sup> DAI Xinyi<sup>1</sup> BAO Kexin<sup>1</sup> WANG Xiaoyi<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Non-infectious tree diseases are physiological disorders caused by abiotic stress factors. The pathogenesis of these diseases is essentially a physiological imbalance driven by multi-factor interactions within the ecosystem. The typical symptoms of non-infectious diseases were summarized, including discoloration, necrosis, wilting, deformation, flower and fruit drop, and resin or gum exudation. The pathogenic relationships between these symptoms and chemical factors (nutrient imbalance, pesticide damage, environmental pollution and salinity) as well as physical factors (temperature extremes, water imbalance, wind damage and abnormal light conditions) were analyzed. The study elucidates how abiotic stressors compromise rhizosphere functionality and disrupt canopy photosynthetic metabolism, thereby lowering host resistance thresholds and creating entry points for pathogenic invasion. Additionally, this paper constructed diagnostic frameworks based on the chemical and physical factors contributing to tree diseases, while also investigating the temporal variation patterns of symptoms induced by nutrient deficiencies, along with the spatial distribution characteristics of their typical manifestations. For disease management, a paradigm shift from passive remediation to proactive ecosystem-based strategies is advocated, emphasizing the establishment of integrated ecosystem-resilience management frameworks to counteract compound stressors arising from climate change and anthropogenic activities.

**Keywords:** symptom; chemical factor; physical factor; nutrient deficiency symptom; pesticide damage

树木健康是生态系统稳定性的基础, 但在自然与人工生境中, 树木常面临多重胁迫。尽管虫害和生物病原侵染常被视为树木衰退的直接诱因, 但多数情况下, 干旱、污染和土壤劣化等非生物胁迫才是树木衰弱的始动因子 (Teshome et al., 2020)。此类非侵染性病害通过干扰树木生理代谢, 降低其抗逆阈值, 破坏树

体微生态系统的平衡, 为潜伏于树体内的病原菌增殖或次生病虫害暴发创造“机会窗口”, 最终导致不可逆的生态和经济损失。以俄罗斯诺里尔斯克的落叶松林衰退为例, 诺里尔斯克位于全球最大的镍铜钼矿床附近, 该地区是俄罗斯污染排放最严重的地方 (Kirdyanov, 2014; Takahashi et al., 2020)。19世纪

收稿日期: 2025-04-14; 修回日期: 2025-05-25。

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2024ZA009)。

\* 通信作者: 王小艺 (E-mail: xywang@caf.ac.cn), 研究员。

60年代空气污染导致落叶松大量死亡,19世纪80年代达到顶峰。1988—1993年,诺里尔斯克死亡森林的总面积估计为13390 hm<sup>2</sup>,且在距离诺里尔斯克工业中心85 km的偏远地区,也有大量西伯利亚落叶松 *Larix sibirica* Ledeb.死亡。诺里尔斯克在如今的空气污染水平下,这些森林难以实现自然恢复(Kirbyanov, 2014; Takahashi et al., 2020)。西澳大利亚州珀斯国王公园长期使用pH值高达8.4的碱性钻井水进行灌溉,致使土壤中锰元素生物有效性显著降低,红柳桉 *Eucalyptus marginata* Sm.和美叶桉 *Corymbia calophylla* Lindl.等乔木出现典型的缺锰性生理胁迫现象。受胁迫树木表现为非均匀型褪绿病状,叶脉间褪绿和黄化,同时伴随顶端枯梢和渐进式落叶,随后发展为整株死亡。该案例表明,灌溉水质引发的土壤碱化可通过干扰树木对必需微量元素的吸收,直接触发非侵染性营养障碍,并可能进一步削弱树木抗性,为次生性病虫害入侵提供条件(Grigg et al., 2009)。此外,繁忙的交通所引发的污染问题,对树木健康的影响同样不容忽视。在波兰,常见行道树刺槐 *Robinia pseudoacacia* L.叶片中钙、钠、铁、锌和铅等元素的含量显著增加,且叶片出现明显的失绿病状。同时,全球气候变暖促使许多原产于北美的植食性昆虫在波兰刺槐上为害,且分布范围呈现向北部扩展的趋势(Wilkaniec et al., 2021)。

在自然生态系统中,非侵染性病害与虫害及侵染性病害常形成复杂的互作网络,气候变化、极端天气及人类活动等因素往往成为此类互作关系的触发因子。环境胁迫不仅直接削弱树木抗性,还可能通过改变寄主生理状态间接增加虫害与病原物的侵害可能性,从而形成“胁迫—致病—衰弱”的恶性循环。美国西南部因常年干旱,在2002—2003年引发了大规模的科罗拉多果松 *Pinus edulis* Engelm.死亡。干旱导致枝干水势下降,树脂导管内压不足。当树脂运输受阻时,树脂中的单萜(monoterpenes)与倍半萜(sesquiterpenes)等抗虫物质无法有效抵达混点齿小蠹 *Ips confusus* LeConte.侵染部位,同时小蠹的共生真菌长喙壳菌属 *Ophiostoma* spp.可加速木质部栓塞进程,显著提高科罗拉多果松死亡率(Malone et al., 2025)。该案例揭示了干旱胁迫通过削弱树木的生物物理与化学防御机制,增强虫-菌协同致病效应的典型机制。类似的互作网络同样存在于病原微生物侵染过程中,荷兰高铍沉降区的欧洲黑松 *Pinus nigra* Arn.对松球壳孢菌 *Sphaeropsis sapinea* Fr.的易感性显著增加,最终引发树皮坏死(Kam et al., 1991)。在美国的人工林中,

北美短叶松 *Pinus banksiana* Lamb.和北美赤松 *Pinus resinosa* Ait.在遭遇冰雪灾害或齿小蠹 *Ips* spp.蛀食后,松球壳孢菌通过机械伤口快速定殖,导致大规模的树木死亡(Nicholls and Ostry, 1990)。这些案例表明,环境胁迫与生物因子可通过协同作用突破树木的防御体系,最终引起复合型灾害的暴发。

树木非侵染性病害作为森林健康的重要潜在威胁,不仅直接影响树木的生理代谢和抗逆性,而且通过破坏树体生态系统的稳态平衡,为潜伏病原的增殖或次生病原、害虫的侵染创造有利条件,促使复合型灾害的发生。当前,针对树木非侵染性病害的研究仍存在明显不足,尚未有学者对其进行系统性阐释。鉴于此,本文通过全面综述国内外研究进展,系统梳理树木非侵染性病害的病状及关键致病因子,并搭建诊断框架,旨在为该领域的基础理论完善与实践应用提供科学依据与支撑。

## 1 树木非侵染性病害的病状

树木的非侵染性病害是一类由非生物因子诱发的树木病害,其发生不具传染性,通常成片同步发生且发病部位无菌丝、孢子等病征,与侵染性病害存在本质区别(高又曼, 1958; 陈万权和陈剑平, 2022)。这类病害是由环境胁迫、营养失衡和化学毒害等非生物因素引发的树木生长异常现象。根据树木病理学对非侵染性病害的经典分类(许志刚, 2009; 叶建仁和田呈明, 2024),其主要病状可归纳为6类: 1) 变色。树木器官例如树叶均匀地整体变色,不同于侵染性病害斑驳、镶嵌状变色。2) 坏死。组织坏死但无菌脓、霉层等侵染性病征。3) 萎蔫。水分代谢严重受阻时出现系统性萎蔫,通常不见侵染性萎蔫伴有的维管束褐变。4) 畸形。长期胁迫会导致器官畸变。5) 落花落果。非生物因素导致的落花落果。6) 流脂流胶。由非生物胁迫直接引发的生理性流脂流胶,特征为胶体纯净透明、无病原物夹杂,但区别于侵染性病害症状的胶体混浊带菌丝。这6类病状系统揭示了非侵染性病害对树木不同组织器官和生理功能的渐进式破坏过程,为园林养护和林业生产中的诊断提供参考。

### 1.1 变色

遭受盐胁迫时,小帽桉 *Eucalyptus microcorys* F. Muell.叶肉细胞会异常增大,叶绿体的类囊体膜也会增大,同时叶绿体中几乎没有基粒,这些变化导致叶片的绿色变得比正常植株浅淡(Keiper et al., 1998)。2007年,日本山口县春季异常干旱、夏季异常干热,

种植于粗砂土、岩石山地及根系受限区域的景观树木受到显著的胁迫,日本四照花 *Cornus kousa* Burg. 叶片边缘与尖端坏死,冠层斑驳褪色(Wang et al., 2009)。此外,澳洲桉树 *Eucalyptus* spp. 等澳洲本土植物在罹患蒙杜拉黄化病(mundulla yellows)时,常见病状为未成熟叶片叶脉间的黄化现象,随后黄化逐渐扩展到成熟叶片,最终导致叶片脱落。该病害通常与土壤 pH 值和可溶性盐浓度过高密切相关(Czerniakowski et al., 2006; Luck et al., 2006)。2008年,中国南方发生特大冰暴,造成广西、广东和江西等地许多人工林树木的树冠、树干折断。同时,冻害也使得大量湿地松 *Pinus elliottii* Engelm.、火炬松 *Pinus taeda* L. 和桉树的形成层褐变(Zhou et al., 2011)。2010年,北京蟒山国家森林公园的辽东栎 *Quercus wutaishansea* Mary. 在高臭氧(O<sub>3</sub>)浓度环境下,叶片中间出现浅色斑块,叶缘呈黄色至褐色干枯状;而白皮松 *Pinus bungeana* Zucc. 的针叶自顶部向下干枯,叶色从深绿色变为红褐色或灰褐色(万五星等, 2013)。低温环境,特别是经历冻融循环和霜冻后,欧洲云杉 *Picea abies* (L.) H. Karst. 和欧洲赤松 *Pinus sylvestris* L. 等树种的针叶会由浅灰色转变为红棕色(Wulff, 1996; Ryyppö et al., 1997)。

### 1.2 坏死

在不同的环境胁迫下,树木坏死的表现形式有所差异。如在水涝胁迫下,油松 *Pinus tabulaeformis* Carr. 幼苗的须根和输导根会腐烂,并散发出明显的酒糟味(王巧等, 2015)。常见的城市行道树元宝枫 *Acer truncatum* Bunge. 易受日灼危害,最初的病状为外部树皮变成红褐色。随着损伤的加剧,树皮逐渐收缩、凹陷并最终开裂暴露出边材(Leers et al., 2017),呈现溃疡状。全球气候变化引发降水模式改变,许多地区的冬春季节内涝持续时间延长,夏季洪水发生频率增加,这种极端的水文环境对敏感性树种产生显著影响。在这种环境下,树木叶片容易出现水渍状坏死斑并脱落,树皮组织也会出现腐烂病状。同时,植株对真菌和昆虫病原体的抗性显著降低,最终可能导致整株枯死(Kreuzwieser and Rennenberg, 2014)。随着现代工业的快速发展,化石燃料燃烧产生的氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物(VOCs)排放量急剧增加,导致对流层臭氧本底浓度显著上升。加拿大南部和美国东北部的北美乔松 *Pinus strobus* L. 对此污染敏感,病状多见于初夏至仲夏,正在发育的幼嫩针叶上出现褪绿的斑点,进一步演化为粉红色病痕,随后扩展为褐色坏死带,最后整个针叶尖端坏死,

变为橙红色(Karnosky et al., 2007)。

### 1.3 萎蔫

萎蔫主要表现为叶片和枝条的枯死。在澳大利亚夏季炎热、干燥多风的气候条件下,若油橄榄树 *Olea europaea* L. 养护不当,常见叶尖和叶缘出现坏死及干枯现象。此外,水分胁迫还会导致橄榄果实失水,使果实表皮变得皱缩和粗糙(Sergeeva and Spooner-Hart, 2011)。夏季高温引发的水分胁迫会导致杨树 *Populus* spp. 树冠上层枝条出现早期衰退,具体表现为个别枝条枯萎、叶片变黄。同样,水分胁迫还会引发杨树木质部导管发生空气栓塞,最终导致大量树枝枯死(Rood et al., 2000)。由于冬季积雪较薄,土壤无法得到有效覆盖,美国北部阔叶树的根系遭受冻害。同时,夏季干旱进一步加剧了水分短缺,导致根系受损。最初,离树干最近的细枝枯死;随着病情扩展,枯死部位蔓延至树干,最终整个树冠全部萎蔫(Auclair et al., 2010)。伊朗灰红树林毗邻锡里克港,受船舶排放、工业废水等污染源胁迫,白骨壤 *Avicennia marina* Forsk. 根系和叶片中镍含量过高。这些重金属通过阻塞维管束运输系统抑制植物生长,导致白骨壤叶片从树冠层开始大面积枯萎;随着顶枯现象的持续加剧,最终导致全株叶片掉落,只剩下灰白色枝干(Kahnouj et al., 2023)。这些研究结果揭示了不同环境胁迫因子对树木生长与生存的显著影响,特别是在水分胁迫和污染环境,树木的萎蔫病状呈现不同的表现形式。

### 1.4 畸形

非侵染性病害导致的树木畸形可见于根、枝干和果实等部位。杨树遭遇霜冻时,树皮和木质部冻死的区域形成愈伤组织,进而可能引发瘤瘿或带状隆起。同时,杨树经历冻融循环后,常表现出树体溃疡等损伤病状,受害部位的组织肿胀可能进一步引发异常增殖,进而形成瘤状结构。此外,冻融循环还可能致溃疡或枝枯周围芽的异常增生,从而引起树皮、叶片和边材的生长发育不均(Zalasky, 1976)。当树木缺乏硼元素未及时补充时,顶梢可能会枯死,枯死点附近的休眠芽会异常萌发并最终死亡,形成密集的扫帚状丛枝。此外,缺硼还会致树木果实的外部或内部发生木栓化,初期表现为小而圆的水浸状斑点;随后这些斑点变干,形成棕色的海绵状病变。在干燥气候的影响下,这些坏死细胞进一步演变为软木塞状的病变,最终导致果实畸形(Nagy et al., 2011)。空气污染对木本植物的生长发育产生不良影响,如长期暴露于氟化物污染环境中的梨树 *Pyrus*

spp., 果实明显畸形。与清洁环境对照组相比, 污染组梨果单果质量显著降低, 且存在胚囊败育现象, 种子形成率不足2%(Kozłowski and Constantinidou, 1986)。

### 1.5 落花落果

树木的落花落果是多种内外因素协同作用的结果。春季霜冻可能对树木的繁殖器官造成损伤, 进而导致其内外形态出现异常。具体表现为花芽褐变、脱水并最终脱落, 抑制雌蕊的正常发育等。这些损伤会进一步影响果实的正常发育, 导致果实提前脱落(Rodrigo, 2000)。当环境温度超出树木生殖细胞发育的适宜范围时, 花朵脱落率会显著增加。以李树 *Prunus salicina* Lindl. 为例, 在 20℃ 处理下, 其落花落果率较 5、10 和 15℃ 时显著升高, 这是由于温度过高, 不适宜李树卵细胞的发育(Racskó et al., 2007)。随着全球气候异常变化, 冬季变暖, 扁桃 *Prunus dulcis* (Mill.) DA Webb、开心果 *Pistacia vera* L、胡桃 *Juglans regia* L 等温带树种的冷量需求无法得到满足, 导致这些树种生殖发育异常。具体表现为冷量亏缺导致裸枝形成、花芽短枝数量锐减, 进而引发花原基败育及发育阶段非正常脱落; 低温信号不足导致雌蕊细胞生长受抑, 表现为结构矮化; 坐果率下降且成熟期离散度增加, 严重削弱商品化生产潜力(Pope et al., 2015)。当橄榄树 *Canarium album* (Lour.) Raeusch. ex DC. 缺乏磷和氮元素时, 花朵发育成果实所需的营养不足, 导致花盛开 2 周后, 小果提前脱落(Erel et al., 2008)。若酸雨的 pH 值低于 3.0, 苹果 *Malus domestica* Borkh. 花瓣上会出现棕色坏死斑和红色病斑, 受损的花瓣会提前脱落。酸雨还会减少苹果叶片中的氮元素含量, 进而加剧叶片损伤, 并刺激果实早熟和异常脱落(Proctor, 1983)。

### 1.6 流脂流胶

由非侵染病害导致的流脂或流胶通常是树木在遭遇外界压力时的应激反应, 属于树木自我防御机制的一部分。然而, 持续的流胶现象可能会对树木的健康造成负面影响, 导致生长受阻甚至衰退。辐射松 *Pinus radiata* D. Don 等树种的流脂或流胶常发生在幼树的嫩弱树皮上, 特别是在人工修剪、间伐作业过程中, 或遭遇冰雹等恶劣自然条件时, 树皮容易受到物理创伤。这些伤口可能会导致树脂瘤的形成, 或者树皮皴裂, 从而暴露出树木纺锤形射线中的水平树脂导管。一旦树脂导管暴露, 树脂便会外渗, 或在树皮皮下形成树脂袋。这些现象主要发生在树皮较薄、较嫩的树木上, 并与外界环境的物理压力密切相关(Cown et al., 2011)。李树流胶病的发生通常与叶

片中氮含量过高、枝叶中钙和硼含量较低等营养失衡有关。发病初期, 李树会在皮孔处渗出淡黄色的透明胶质, 胶质凝结后变为红棕色; 病情进一步发展, 流胶部位的树皮和木质部会发生膨胀, 随后变色并腐烂; 如果流胶病发展到末期, 树木的生长会受到显著影响, 树体逐渐衰弱, 最终加速死亡(Ma et al., 2021)。此外, 夏季极端干旱也会导致流脂流胶, 影响树木健康。例如, 在干旱环境下, 欧洲云杉的木材干燥, 导致内部张力增加, 诱发裂缝的形成。这些裂缝中充满树脂, 不仅可以沿着低密度年轮延伸, 还可能深入木材的不同层次(Grabner et al., 2006)。

## 2 树木非侵染性病害的发生原因

### 2.1 化学因素

#### 2.1.1 植物营养失调

1) 营养缺乏。近年来, 关于缺素症的研究证实, 缺素症会影响树木的生理功能, 如光合作用减弱、酶活性异常等。在森林中, 大多数土壤都含有树木生长所需的基本营养物质。然而, 城市土壤条件往往不能满足这些需求, 导致人工移植的行道树、遮阴树等可能难以适应(Tattar, 1980; Patel, 2024)。过度施用化肥、不合理灌溉等人为因素导致土壤养分失衡, 使根部无法获得某些元素, 从而导致缺素症。此外, 营养元素的比例失调、某些营养元素之间存在拮抗作用、土壤理化性质不良(如酸碱度、温度、水分)等, 均会影响某些营养元素的吸收和利用(Chatzistathis, 2014)。当气候条件恶劣时, 如低温、干旱和多雨等, 会影响土壤养分的有效性和植物的吸收能力; 不当施用化肥或连续耕作的土地, 缺素问题会更加严重(Das et al., 2017)。大量元素缺乏通常导致植物生长发育的显著减缓或异常, 而微量元素缺乏则常表现为植物的生理功能障碍, 虽然缺量较少, 但其对植物的影响同样重要。

2) 营养过量。过量施肥会导致土壤养分不均衡, 并引起植物对某些元素的吸收和代谢障碍(Uçgun and Altindal, 2021)。例如, 施用过量的氮肥会影响树木的光合作用、降低导水率, 影响树木的正常代谢功能和对营养元素的吸收(De Vos et al., 2007; Sperling et al., 2019)。与植物需求相比, 过量的养分供应会导致负面后果, 如树木生长过旺、产量下降、果实表皮颜色变化、花朵败育以及叶片和果实上真菌病害的发生率增加等(Martin et al., 2004; Huber and Jones, 2013; Brunetto et al., 2015)。

3) 营养比例失调。营养比例失调是由于某些营

养元素缺乏,而其他营养元素过量(Lal, 2009)。这些营养元素不仅要以植物能够吸收和利用的形式存在,而且相互之间的比例必须保持平衡,满足植物的需求(Day et al., 1993; Karthika et al., 2018)。施肥比例失衡会导致土壤中氮、磷、钾等主要营养元素浓度异常,破坏养分供应平衡,进而抑制树木的生长发育。长期失衡还会破坏土壤理化性质,增大根系腐烂风险,降低树木抗病虫害能力,甚至造成不可逆的生长停滞或死亡(Banov et al., 2020)。此外,气候条件和大气污染等因素也可能导致土壤中营养成分比例的变化(Bulbovas et al., 2020)。

### 2.1.2 农药药害

除草剂对树木的伤害可能来自处理区域内液态化学物质的漂移,这些物质可能漂移到附近的非靶标植物上(Meade, 1977; Feucht, 1988; Brain et al., 2017)。颗粒状的除草剂施用于土壤后,在浇水时,除草剂也可能被非靶标植物的根系吸收(Mendes et al., 2022)。此外,颗粒剂中有时会存在细小的粉尘,这些粉尘同样可能引发类似液体除草剂应用时产生的漂移伤害。实际上,颗粒剂中自带的除草剂粉尘,可能比液体制剂产生的雾气漂移扩散的更远,持续时间也 longer。施用到土壤中的除草剂,无论是液态还是颗粒状,都有可能发生淋溶现象。淋溶量取决于土壤类型、坡度、产物的水溶性以及降雨或灌溉量(Fait et al., 2010)。除草剂对树木的影响取决于使用的化学物质的性质。常见的药害症状包括新生枝条和叶片生长扭曲、叶脉间的萎黄、叶片变色以及迅速坏死等(Mduma et al., 2015)。

杀虫剂对树木的影响主要取决于其类型、浓度及施用方式。过量或不当使用化学杀虫剂可能破坏树木的生理机能。如部分广谱杀虫剂(如氧化乐果、敌敌畏等)会抑制光合作用,损伤叶片组织;内吸性杀虫剂若被过量吸收,可能干扰树木的激素平衡,影响树木生长(唐光辉, 2001)。部分杀虫剂还会残留于土壤中,影响根系微生物群落,从而削弱树木对养分的吸收能力(Baweja et al., 2020)。此外,过度使用植物生长调节剂,也会对树木的生长产生负面影响。

### 2.1.3 环境污染

1) 土壤污染。农药、化肥、有机肥料、化学品、放射性废物、生活垃圾和动物尸体等都会造成土壤污染(Mishra et al., 2016)。土壤污染以复杂的方式影响着植物的生长,除了对植物代谢直接产生毒害作用外,负责获取光照、水和养分等资源的植物组织的

发育也会受到影响,进而导致可用于植物生长的资源间接减少(Delerue et al., 2022)。在重金属污染的土壤中生长的树木,表现出明显的发育迟缓、叶片变小以及大面积组织坏死和褪绿斑点,同时叶片中个别重金属的浓度比未污染土壤中生长的树木叶片高出几十倍(Fernandes and Henriques, 1989)。对树木直接产生灾难性影响的污染物相对较少,但大部分长期且持续的毒害会导致树木组织受损,严重抑制树木生长(Dickinson et al., 1991)。

2) 大气污染。树木也可以作为监测空气污染的生物指标(Okx and Stein, 2000)。大气污染物通过2种途径影响生态系统:一是直接损害树木叶片及生理功能;二是通过干湿沉降进入土壤,引发土壤酸化、重金属积累、微生物群落失衡和肥力下降,最终威胁农林生态系统的稳定性和可持续性(Tzvetkova et al., 1996; Lorenz et al., 2010)。在工业区,生产过程中排放的有毒气体,如二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、三氧化硫(SO<sub>3</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和臭氧(O<sub>3</sub>)等,在空气中含量过高易使树木受害(Emberson et al., 2001)。SO<sub>2</sub>通过气孔进入叶片干扰代谢,在较高浓度SO<sub>2</sub>胁迫下,植株各发育阶段的光合色素含量均显著下降(Wali et al., 2004)。此外,大气中的SO<sub>2</sub>可进一步形成酸雨,导致土壤酸化,这些胁迫可能会显著抑制植物生长,表现为叶片数减少、叶面积缩小、茎根伸长受限以及花果数量下降(Wali et al., 2004; Siegwolf et al., 2022)。汽车尾气(含SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>等)对植物的污染最常见的表现为坏死和褪绿,初期表现为小而不规则的灰绿色区域,呈水浸样外观,系叶肉细胞崩解所致,随后这些区域干燥并形成棕红色至黑色的斑点(Joshi and Swami, 2007)。果实也因大气污染物的影响而出现坏死斑点。道路污染环境中的树木叶片表现出黄化症状,这一现象可归因于SO<sub>2</sub>诱导的叶绿素降解或细胞膜损伤(Joshi and Swami, 2007)。

### 2.1.4 盐害

1) 土壤盐碱化。植物受盐胁迫是一个复杂的过程,它通过限制养分吸收和破坏离子平衡,引发植物在生理、组织、细胞和分子水平上的变化(Gupta and Huang, 2014; Arif et al., 2020)。高盐会导致几种类型的植物胁迫,包括养分吸收改变,尤其是K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等离子的吸收;有毒离子,尤其是Na<sup>+</sup>的积累;渗透胁迫和氧化胁迫(Verslues et al., 2006; Abbasi et al., 2016)。盐害降低了土壤植物系统中水的渗透势,阻碍了根系对水分的吸收。该过程增加了渗透调节相关的能量消耗,导致根系生长和发育受到抑制(Dmuchowski

et al., 2022)。盐胁迫会导致茎和叶大量减少, 最终导致树木的地上部生物量减少。

2) 融雪剂盐害。以氯化钠(NaCl)、氯化钙(CaCl<sub>2</sub>)、氯化镁(MgCl<sub>2</sub>)、氯化钾(KCl)等氯盐为主要成分的融雪剂, 在我国北方地区已导致严重的环境污染问题(赵莹莹, 2006)。例如, 2010年春季北京天安门广场周边油松行道树大规模死亡, 研究证实直接原因是冬季过量施撒融雪剂导致根系周围50 cm范围内土壤严重盐渍化, 其中靠近人行道一侧土壤的氯离子、钠离子含量显著超标(彭海平, 2010)。当盐雾通过交通或风力传播并沉积在植物表面时, 植物细胞水分外渗, 导致脱水反应, 表现为叶片和茎部干枯(Sarkar et al., 2023)。盐分的积累显著提高了土壤的盐浓度, 从而增加了土壤的渗透压, 导致植物根部难以吸收水分。水分长时间供应不足, 会引起植物细胞脱水, 影响正常的生理功能, 最终导致植物萎蔫、黄化甚至死亡。盐分会降低植物的代谢活性, 抑制RNA和蛋白质的合成(Sobhanian et al., 2011; Hao et al., 2021)。盐离子在植物组织中的积累也会降低植物的抗冻性和耐旱性(Sucoff et al., 1976; Maas, 1985)。

## 2.2 物理因素

### 2.2.1 温度不适

1) 冻害。冰冻是限制植物生长、发育和分布的主要环境因素(Pearce, 2001)。在大多数情况下, 当温度降至冰点时, 植物组织的细胞间隙与细胞壁会率先结冰(Xin and Browse, 2000); 若降温速度过快, 细胞内部便会形成冰晶, 这会直接破坏细胞的原生质结构, 最终导致细胞死亡(Pearce, 2001; Palta and Weiss, 2018)。持续的低温会使植物的生长发育受到影响, 表现为幼苗发育不良、叶片黄化、叶片扩展受限和枯萎。远低于冰点的温度会导致植物代谢效率下降、植物组织死亡(Yadav, 2010)。冰冻胁迫主要使树木细胞脱水和塌陷, 通过形成大冰晶破坏细胞器和组织结构, 同时冻融过程引发树木渗透压失衡和膜系统损伤(Verslues et al., 2006)。

2) 热害。高温对植物构成严重威胁, 短暂或持续的极端高温会引起植物一系列的形态结构、生理生化变化, 从而影响植物的生长发育(Wahid et al., 2007; Aslam et al., 2022)。光合作用对高温胁迫极其敏感, 往往在其他细胞功能受损之前受到抑制(Mathur et al., 2014)。长期在35~40℃高温下, 树木可能会发生损伤或死亡。当温度升至45℃及以上时, 树木的光合速率会降低, 呼吸速率会持续升高, 导致呼吸消耗超过光合积累, 从而加速树体碳水化合物的耗竭。这

种碳失衡将抑制其生长发育, 极端高温下细胞可在数分钟内发生不可逆损伤或死亡(Kozlowski, 1985; Wahid et al., 2007)。高温对植物造成的直接伤害包括细胞内蛋白质变性和聚集、细胞膜被破坏以及器官组织受到损伤(Camejo et al., 2005); 间接或缓慢的热损伤包括叶绿体和线粒体中酶的失活、蛋白质合成的抑制、蛋白质降解和膜完整性的丧失(Howarth, 2005)。高温胁迫会造成树木发芽率降低、幼苗畸形、幼苗活力差、叶发育减慢和叶面积减小等负面影响(Hasanuzzaman et al., 2013; Teskey et al., 2015)。在冬季, 埋设于地下的供暖管道可能因热量外泄导致周围土壤温度异常升高, 进而对邻近树根造成热害。热胁迫会增强树木的根系呼吸作用, 加速碳水化合物消耗。局部高温会抑制根系吸水功能, 加剧冬季的生理干旱。严重时, 部分细胞因高温直接坏死, 进而导致根尖萎缩或侧根死亡。

### 2.2.2 土壤水分失调

1) 旱害。干热的气候通常会导致急性或慢性干旱胁迫。当树木受到干旱胁迫时, 其光合速率和蒸腾速率会降低, 从而引发一系列的生理生化变化, 同时外部形态也会随之改变(Seleiman et al., 2021)。植物营养生长期缺水的明显病状是株高降低、叶片萎蔫、叶片数量和面积发生变化。株高的降低主要是由于干旱条件下细胞扩增减少、叶片有丝分裂受损、脱落增加(Yang et al., 2021)。干旱失水最显著的影响是树木新陈代谢受损, 进而导致植株生长缓慢甚至死亡(Park et al., 2013)。

2) 涝害。过度灌溉草地会引起土壤pH值、氧化还原电位和氧水平等重要土壤理化性质的改变(Ashraf, 2012), 导致树木根系呼吸功能受限, 同时严重削弱其营养元素的吸收能力。当水涝严重到枝干和叶片淹没在水中时, 植物的光合作用会受到限制, 生长发育也会受到影响(Yeung et al., 2018)。淹水胁迫会抑制树木的生理功能, 导致树木不同部位的碳水化合物等代谢物含量显著波动, 严重时可致其死亡(Kreuzwieser and Rennenberg, 2014)。洪水退去后, 已适应低氧暗环境的植株暴露于空气中, 骤然增强的光照与富氧条件将引发次生胁迫: 高光强导致氧化损伤, 而功能失调的根系则引发水分吸收障碍, 最终加剧植株失水死亡(Maurel et al., 2010; Yeung et al., 2018; Manghwar et al., 2024)。

### 2.2.3 风害

树种差异、树龄或个体大小、营林措施、地形条件、土壤特性及既往干扰等因素, 均可影响灾害性

大风造成的损害空间格局、严重度及后续恢复进程 (Everham et al., 1996)。同时,区域长期风力条件会显著影响树木的生长、形态发育和生理过程,乃至森林生态系统的整体功能 (Gardiner et al., 2016)。

#### 2.2.4 光照不适

1) 日灼。当光照强度超过植物的最佳光合作用水平时,可能会引发多种生理问题 (Lal and Sahu, 2017)。日灼通常发生在较高的太阳辐射强度、较高的空气温度、较低的相对湿度以及较高海拔的环境中 (Munné-Bosch and Vincent, 2019)。树木受到日灼伤害后,通常表现为叶片或树皮被灼伤、变色、干枯和脱落 (Sanzani et al., 2012)。日灼的严重程度与环境因素(如太阳辐射强度、气温、湿度和海拔等)以及树种的适应能力密切相关 (Schrader et al., 2003)。

2) 阴害。阴害是指上层乔木冠层遮蔽导致下层树木(如幼树、小树)因光照不足而出现生长受抑、形态畸变及生理代谢紊乱的现象,是妨碍森林更新的主要生态因子之一。作为森林天然更新的主要限制因子,阴害会引发植株产生典型的避阴综合征 (Shade avoidance syndrome),具体表现为:叶片变薄、比叶面积增大以捕获更多光能;叶绿素含量升高但光合效率下降;茎干细弱、节间伸长(徒长现象),抗折性降低;侧芽萌发受抑,冠层结构简化;根系生物量分配减少,细根周转率下降 (Gommers et al., 2013; Liu et al., 2021)。研究发现,阴害通过调控光信号(如 phyB-PIF 通路)抑制生长素极性运输,导致发育可塑性失衡 (Pierik and de Wit, 2014)。长期阴蔽还会加速

老叶脱落、寿命缩短,形成自疏现象 (Kaelke et al., 2001)。上层树冠截获光合有效辐射(PAR),导致下层光照强度常低于补偿点,迫使幼树处于碳负平衡状态;冠层对光谱的过滤作用显著降低了红光与远红光比值(R/FR),这种光质变化激活了光敏色素信号传导途径,促使幼树茎干出现异常伸长现象;此外,遮蔽区高湿低温环境抑制根系活力并增加病害发生的风险 (Valladares et al., 2016; Poorter et al., 2019)。

### 3 树木非侵染性病害的诊断

#### 3.1 常见化学诱因导致的病状

化学因素是树木非侵染性病害的重要诱因,主要包括农药药害、土壤污染、大气污染、营养失调、土壤盐碱害以及融雪剂盐害等。不同的化学因素引发的病害病状存在显著差异(表1),这一特征为树木健康的诊断与防治提供了重要依据。在化学因素引发的树木非侵染性病害中,营养失调导致的病状最为复杂且多样(丛日晨等, 2017)。缺乏不同营养元素会在树木的叶片、枝干、花果及根系等部位表现出特异性病状(表2)。当缺乏氮、磷、钾等大量元素时,病状大多先出现在老叶上。例如,缺氮可导致叶片黄化和植株矮小,缺磷使叶色暗绿且边缘焦枯,而缺钾则常表现为叶尖和叶缘坏死 (Zhao et al., 2001; 徐梦莎, 2016)。与此不同,缺乏钙、镁、锰、锌、硼、钼、铁、铜和硫等中微量元素时,病状多发生在新生组织上。例如,缺钙会导致幼叶卷曲并坏死,缺镁则表现为叶脉间黄化,缺铁使嫩叶呈现网纹状失绿 (Simon,

表1 由常见的化学因素引起的树木非侵染性病害病状

Tab. 1 Symptoms of non-infectious diseases in trees caused by common chemical factors

发病原因 Causes	典型病状 Typical symptoms	参考文献 References
除草剂药害 Herbicide phytotoxicity	初期叶脉出现褪绿斑块或斑纹,后期斑块连接成片,呈褐色;叶片出现褪绿、萎蔫、干枯。后期叶片全部枯死、皱缩和脱落;嫩梢变黑死亡	Brain et al., 2017; Mduma et al., 2015
杀虫剂药害 Insecticide phytotoxicity	枝梢顶芽枯死,顶茎端无侧枝,树木无生长点	唐光辉, 2001; Baweja et al., 2020
土壤污染 Soil pollution	叶芽枯死不放叶,或嫩叶顶梢枯萎;枝细叶黄,易落花落果	Mishra et al., 2016; 丛日晨等, 2017; Delerue et al., 2022
大气污染 Air pollution	前期叶片逐渐褪绿,叶片内卷,叶小稀疏;后期叶片发软萎蔫,叶片呈水渍状,灰白色或浅褐色,干燥后叶片皱缩,提前脱落	Joshi and Swami, 2007; Banerjee et al., 2019; Siegwolf, 2022
缺素症 Plant nutrient deficiency	生长迟缓,叶片出现特定变色或畸形,病状从老叶或新叶开始,依元素移动性不同而异	Chatzistathis, 2014; Das et al., 2017; 高国平等, 2018; 丛日晨等, 2017
营养过量 Nutrient toxicity symptoms	树木生长过旺;根尖坏死、侧根减少;病状与缺素症相似,多从老叶边缘或叶尖开始	Martin et al., 2004; Brunetto et al., 2015; 丛日晨等, 2017
营养比例失调 Plant nutrient imbalance	多种元素缺乏或过量的病状共存,并伴随生长失衡	Lal, 2009; 丛日晨等, 2017; Karthika et al., 2018; Banov et al., 2020
土壤盐碱害 Soil salinity and sodicity hazards	叶片萎蔫、枯黄、脱落;枝条干枯,易落花落果	Gupta and Huang, 2014; Arif et al., 2020; Dmurchowski et al., 2022
融雪剂盐害 Environmental hazards from road deicing salts	一春季萌发的小叶或嫩芽回抽;靠马路侧树冠部分枝条焦枯或死亡,而靠人行道一侧叶片生长正常,整个树冠叶片呈“阴阳头”	Hao et al., 2021; Sarkar et al., 2023

表2 树木常见的缺素病状

Tab. 2 Common nutrient elements deficiency symptoms in trees

营养元素 Nutrient elements	典型病状 Typical symptoms	参考文献 References
氮N	枝干矮小; 叶小而窄, 淡绿至黄色; 花序小; 果实小; 发病早期老叶或底部叶片黄化	Stewart et al., 2001; Xing and Wu, 2014; 徐梦莎, 2016; Das et al., 2017; 文滨滨, 2022
磷P	枝干生长迟缓、矮小; 叶色暗绿或灰绿色, 无光泽, 叶边或叶缘枯焦, 新叶小而窄、稀疏, 侧芽休眠或死亡; 花易落; 果实结实不良; 根细弱而长; 老叶最早表现出病状	Stewart et al., 2001; 郭盛磊等, 2005; Xing and Wu, 2014; 徐梦莎, 2016; Das et al., 2017
钾K	生长迟缓, 小枝枯死; 叶尖和叶边缘枯焦, 出现褐色坏死组织斑点; 根细弱, 常呈褐色; 老叶先表现出病状, 叶尖出现褪绿黄化, 严重时叶片卷曲皱缩、叶尖和叶沿坏死	Zhao et al., 2001; 徐梦莎, 2016
钙Ca	幼叶卷曲而脆弱, 叶中有坏死组织; 果实顶部腐烂; 根尖和生长点细胞逐渐死亡, 导致组织腐烂; 新生组织先表现出病状, 叶尖发黄, 后向叶缘扩展, 叶片比健叶狭长	Simon et al., 2010; 刘亚林, 2020; 林姜岑等, 2023
镁Mg	叶片失绿, 叶肉变黄而叶脉仍保持绿色, 叶片的早衰与脱落; 老组织先表现出病状, 老叶沿主脉出现不规则黄斑, 然后黄斑不断扩大; 发病后期只剩叶尖和叶基仍为绿色, 叶基部的绿色区呈倒“V”形	Guo et al., 2015; 林姜岑等, 2023
锰Mn	枝条顶枯; 叶片的主脉和侧脉附近为深绿色, 呈带状, 叶脉间为浅绿色; 叶片薄, 中部老叶呈现褐色小斑点, 散布于整个叶片, 叶软下垂; 树冠背阴叶片更为常见; 根细而弱; 新生组织先表现出病状	Someya et al., 2014; 孙小娜, 2022
锌Zn	枝干向阳面退绿病状明显, 数量较多; 叶丛生成簇状或叶变小, 嫩叶上出现叶脉间退绿成网状花叶病; 老叶先表现出病状	崔闯, 2021; Saurav, 2022; Banov et al., 2020
硼B	新芽丛枝, 顶部生长受抑制, 枯枝多; 易落花落果; 根尖生长点停止生长, 侧根大量发生, 形成簇生状; 新生组织先表现出病状, 叶片黄化, 叶脉发黄并伴木栓化肿大、表皮开裂。发病后期叶片叶柄断裂、卷曲、枯焦、脱落	Huber and Jones, 2013; 刘亚林, 2020; Banov et al., 2020
钼Mo	叶片具有水渍状黄斑, 逐渐扩大; 叶较小, 叶脉间失绿, 有坏死斑点, 且叶边缘焦枯, 向内卷曲; 新生组织先表现出病状	Kaiser et al., 2005; Huber and Jones, 2013; 韦司棋和李愿, 2015
铁Fe	幼叶失绿呈黄白色; 新梢嫩叶发病变薄黄化, 叶脉呈明显绿色网状; 发病早期嫩叶受害, 老叶正常, 叶片黄化, 但叶脉仍呈绿色, 脉纹清晰可见, 呈网状; 后期全叶变为黄色至黄白色, 失去光泽, 叶缘变褐色和破裂, 并可使全株叶片均变为橙黄色至白色	Li and Lan, 2017; 崔闯, 2021; Banov et al., 2020
铜Cu	新梢生长曲折呈“S”型, 幼嫩枝梢表面有胶状凸起, 凸起内有褐色胶质物; 新生组织先表现出病状; 叶片生长缓慢, 呈现蓝绿色, 幼叶缺绿; 发病后期叶片出现枯斑, 最后死亡脱落	Yamasaki et al., 2008; 唐孟泉等, 2019
硫S	叶片呈均匀黄绿色至黄色; 沿叶脉同步黄化, 有干枯现象; 新生组织先表现出病状	王倩雅等, 2016; Narayan et al., 2023

2010; Guo et al., 2015; Li and Lan, 2017)。此外, 某些元素缺乏的病状具有典型性特征。例如, 缺硼会导致新芽丛枝或根尖簇生, 缺锌则可引发小叶簇生, 而缺铜则会使新梢生长畸形并出现胶状凸起(Yamasaki et al., 2008; Huber and Jones, 2013; Saurav, 2022)。鉴于不同缺素病状可能具有相似性, 因此需要结合具体病状特征进行准确鉴别。

### 3.2 常见物理诱因导致的病状

引起树木非侵染性病害的物理因素主要包括冻害、热害、旱害、涝害、风害、日灼以及阴害等。物理因素导致的病害病状在不同胁迫条件下表现出显著差异(表3)。各类物理因素对树木的影响机制不同, 由此导致的病害病状也各具特点, 不同的病状为树木生长环境的评估及灾害防控提供了宝贵的诊断依据。

冻害通常发生在极端低温后, 低温对植物细胞造成直接损伤, 导致组织失水、叶片变黄或枯萎, 严

重时可能导致全株死亡(Xin and Browse, 2000; Yadav, 2010)。热害则主要发生在高温环境中, 过高的温度促使植物蒸腾作用过于剧烈, 水分供应不足, 表现为叶片焦枯、萎蔫, 甚至新梢受损(Wahid et al., 2007; Aslam et al., 2022)。旱害是指长时间缺水导致的生理干旱, 通常表现为叶片卷曲、枯黄, 严重时可能导致生长停滞或植株死亡(Park et al., 2013; Seleiman et al., 2021)。涝害主要发生在土壤过度积水的情况下, 根系缺氧, 容易引发根腐病, 病状表现为叶片发黄、枝条枯死(Maurel et al., 2010; Manghwar et al., 2024)。风害通常是指强风对树木造成的机械性损伤, 包括叶片和枝条易折断, 长时间的强风还可能导致树木的根系松动或脱落(Everham and Brokaw, 1996)。日灼是强烈阳光照射导致植物叶片过度蒸发水分或遭受紫外线损伤的现象, 常见的病状为叶片边缘焦枯, 甚至出现斑点状或条纹状的变色(Sanzani et al., 2012)。阴害是由于树木过于密集或遮蔽光照不足, 导致树

表3 由常见物理因素引起的树木非侵染性病害病状

Tab. 3 Symptoms of non-infectious diseases in trees caused by common physical factors

发病原因 Causes	典型病状 Typical symptoms	参考文献 References
冻害 Freezing injury	叶完全变褐色或者从尖端向下逐渐变褐色, 顶芽坏死, 不萌发; 枝条干枯, 甚至整个植株死亡; 嫩枝、叶片萎蔫、变黑和死亡; 树干纵向开裂、干枯或片状脱落; 土壤与根系分离; 苗木根系外露, 似被拔出, 倒伏死亡	Xin and Browse, 2000; Yadav, 2010; 高国平等, 2018
热害 Heat injury	叶片下垂, 表现失水状态, 温度降低后又恢复正常状态, 严重时新发枝条失水干枯死亡; 受地下管线影响也会导致树木根系遭受热害, 造成叶片稀疏, 严重时翌年春季萌芽后死亡	Wahid et al., 2007; 丛日晨等, 2017; 高国平等, 2018; Aslam et al., 2022
旱害 Drought damage	病状由地上部向下发展, 以脱水干燥为特征, 如干枯、裂皮。树木顶梢叶片先出现枯黄、卷曲、焦边、落叶等病状; 叶片厚度正常, 但叶片偏小, 叶柄硬实; 树皮干裂, 枝条梢部枯萎; 根系干枯、萎缩, 须根死亡, 根尖变褐色; 植株矮小, 叶片稀疏, 呈现干枯状	Park et al., 2013; 丛日晨等, 2017; 高国平等, 2018; Seleiman et al., 2021
涝害 Waterlogging Injury	病状由地下部向上发展, 以缺氧腐烂为特征, 如根腐、霉斑等。树冠下部老叶片先出现萎蔫, 早期叶片不发黄, 但萎蔫或下垂; 后期老叶变黄, 叶柄绵软; 树皮松软, 可能出现流胶; 根系腐烂(缺氧导致), 变黑、发臭, 须根脱落; 植株萎蔫, 但土壤湿润, 呈现闷烂状	Maurel et al., 2010; Yeung et al., 2018; 高国平等, 2018; Manghwar et al., 2024
风害 Wind damage	风倒、风折、损伤	Everham et al., 1996; 高国平等, 2018
日灼 Sunscauld	发病初期叶片出现褪绿斑块; 后期病斑变白, 叶片焦枯; 严重时树干条状开裂、干枯、死亡	Sanzani et al., 2012; 丛日晨等, 2017; 高国平等, 2018
阴害 Shade avoidance syndrome	树冠枝叶稀疏, 内膛部分枝条枯死; 植株矮小, 枝细, 偏冠	丛日晨等, 2017; 高国平等, 2018; Poorter et al., 2019

木生长受限, 表现为枝叶细弱、黄化, 叶片小且稀疏 (Poorter et al., 2019)。这些物理因素引发的非侵染性病害不仅对树木的生长发育产生不同程度的影响, 也为树木的健康管理提供了重要的指示。通过识别和分析不同物理因素引发的病状特征, 可以有效指导树木生长环境的评估、灾害的预测及防控策略的制定, 从而提升树木健康管理的科学性和针对性。

#### 4 展望

非侵染性病害常通过削弱树势, 为次生病原物的侵染提供有利条件, 进而形成“非生物胁迫-树势衰退-生物侵染”的复合病害链 (Grigg et al., 2009)。这种病害的交互作用导致树木病状呈现出叠加效应, 进一步模糊了病因判定的界限。因此, 未来的研究应着重开发多维度的诊断工具, 如生理指标检测与遥感监测等, 以便准确区分病害类型并量化其危害规模和程度, 为树木健康管理提供更加精确的诊断依据。

非侵染性病害可引发组织结构破坏(如导管栓塞、细胞坏死等)或长期代谢紊乱(如光合系统受损、激素失衡等), 即使采取补救措施, 树木的生理功能也难以完全恢复 (Teskey et al., 2015)。此外, 由极端气候事件, 如持续干旱、异常冻害等引发的病害, 往往导致大范围的生理性损伤且难以修复。这一特性决定了非侵染性病害的防控策略应从被动修复转向主动预防。具体而言, 应通过早期干预来消除或缓

解胁迫源, 如改善土壤条件、优化水分管理等, 而不是依赖事后救治。针对干旱胁迫, 采取覆盖保墒、选择耐旱树种等措施可以有效降低风险 (高国平等, 2018)。此外, 建立基于气候预测和生理监测的早期预警系统, 帮助识别高风险林分并实施预防性保护是非常重要的。未来的研究重点应关注非侵染性病害的阈值效应与累积损伤机制, 明确不同胁迫因子的临界干预时机, 从而为非侵染性病害防控提供更加科学和系统的指导。

当前, 树木非侵染性病害的诊断仍主要依赖对病状观察, 并据此对潜在诱因进行初步推断。随着科学技术的不断发展, 诊断体系正加速向多维度技术融合的精准化方向发展, 通过整合高光谱成像、分子标记物检测及人工智能预测模型, 有望实现从“症状归因”到“病因溯源”的根本性转变。在遥感技术领域, 尤其是高光谱遥感和激光扫描技术, 已应用于树木健康监测。该技术主要通过分析叶片、枝干等部位的光谱数据, 有效识别非侵染性病害的初步症状 (Barka et al., 2018; Ecke et al., 2022)。此外, 分子生物学技术也为非侵染性病害诊断提供了新的途径。借助基因表达谱分析和分子标记技术, 可以更准确地鉴定由环境因素引起的树木病害, 结合便携式 qPCR (quantitative real-time PCR) 设备实现重金属污染等诱因的精准溯源 (Harfouche et al., 2014; Zhao et al., 2020)。另外, 基于大数据和人工智能的诊断模型逐渐显现优势。利用树木生长环境、气候条件以

及历史发病数据,构建多因素预测模型,为林木非侵染性病害诊断提供了更加精确的支持(Lausch et al., 2018)。总体而言,随着技术手段不断创新,树木非侵染性病害的诊断正在向着更加高效、精准和综合化的方向迈进,为园林绿化和森林管理提供更为科学的决策依据。

树木非侵染性病害的诊断与防控涉及植物生理学、森林培育学、森林生态学、森林病理学、土壤学和气象学等多个学科。准确识别非侵染性病害要求综合评估环境胁迫因子、树木生理响应以及生态系统反馈机制等复杂过程(Teskey et al., 2015)。然而,当前我国高等教育体系中尚未设立专门的植物非侵染性病害学科方向,导致具备多学科背景的专业人才匮乏,这一问题直接影响生产实践中病害管理的有效性。由于缺乏系统的诊断知识的培训,基层工作者常常将非侵染性病害误判为侵染性病害,进而错误使用杀菌剂或杀虫剂(叶建仁和田呈明, 2024)。这种误诊不仅贻误了治疗时机、浪费了人力物力,还可能因不当干预而加重对树木的生理胁迫。例如,在盐碱地区,融雪剂导致的叶缘焦枯常被误诊为病原感染,从而导致无效的化学防治措施和不可逆的树势衰退。

针对树木非侵染性病害诊断和治理中存在的难点,未来应重点推动以下几个研究和方向:1)环境胁迫因子的互动机制与早期诊断技术研究。深入研究非侵染性病害与树木生理响应之间的动态关系,确立关键生理指标的反应阈值,探讨不同胁迫因子之间的协同或拮抗效应,建立树木健康诊断生化指标体系;开发早期诊断方法,为及时干预提供科学依据。2)抗逆性树种筛选与遗传改良。系统评估不同树种及其品种对非生物胁迫的耐受性差异,挖掘关键抗逆基因和分子标记;结合传统育种和分子育种技术,培育适应气候变化和逆境环境的新品种,提升树木的固有抗性。3)多组学技术整合与致病机制深度解析。系统应用基因组学、转录组学、蛋白质组学和代谢组学等多组学技术,全面解析非生物胁迫下树木从基因表达、蛋白功能到代谢网络的级联反应;深入研究环境信号感知、传递及下游生理响应的动态分子网络,精准识别关键调控基因、蛋白及代谢物;开发基于组学标志物的早期、精准诊断技术,为揭示非侵染性病害的本质规律和靶向防控策略提供坚实的分子基础。4)树木生态适应性防控体系构建。构建基于生态系统的综合防控策略,包括土壤改良、水分管理和近自然经营等措施;重点研发低成本、易

于推广的实用技术,以适应不同立地条件和管理需求。5)加强跨学科人才培养。建立树木医生、树木医学和树木医院等学科体系与应用体系;推动林学、土壤学、植物生理学、生态学和环境科学等学科的深度融合,在高校和科研机构设立专门学科专业和研究方向,培养兼具基础理论和实践能力的专业人才;加强基层技术培训,提升一线从业者的诊断与防控水平。通过在上述领域的突破性研究,有望构建起完善的树木非侵染性病害防控体系,增强我国森林生态系统应对气候变化的适应能力。

综上所述,树木非侵染性病害的病状表现具有复杂性和多样性。相同的病因在不同树种中可能引发不同的病状,而同一树种在不同立地条件下也可能表现出不同的受害特征。这种病状差异不仅体现了植物对环境胁迫的适应性和可塑性,也为精准诊断带来了极大的挑战。鉴于篇幅限制,本文未能对所有树木非侵染性病害所表现的病状进行全面列举和深入分析。本文总结的典型病状类型及其与主要环境因子的关联关系,有望为林业工作者提供有价值的初步诊断参考。未来的研究应进一步融合分子标记、生理指标等现代技术手段,构建更为精准和高效的诊断技术体系。

## 参 考 文 献

- 埃·高又曼. 1958. 植物侵染性病害原理[M]. 北京: 农业出版社: 1-2.
- 陈万权, 陈剑平. 2022. 中国植物保护百科全书: 植物病理卷(第4册)[M]. 北京: 中国林业出版社: 1867.
- 丛日晨, 李廷明, 弓清秀. 2017. 树木医生手册[M]. 北京: 中国林业出版社.
- Cong R C, Li Y M, Gong Q X. Tree doctor handbook[M]. Beijing, China Forestry Publishing House. (in Chinese)
- 崔闯. 2021. 矿质元素氮、铁、锌缺乏对槟榔幼苗生长发育的影响[D]. 海口: 海南大学.
- Cui C. 2021. Effects of nitrogen, iron and zinc deficiency on the growth and development of *Areca* seedlings[D]. Haikou: Hainan University. (in Chinese)
- 高国平, 高拓, 王月, 等. 2018. 辽宁树木病害图志-非侵染性病害[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社.
- Gao G P, Gao T, Wang Y, et al. Illustrations of trees diseases in Liaoning area[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press. (in Chinese)
- 郭盛磊, 阎秀峰, 白冰, 等. 2005. 落叶松幼苗光合特性对氮和磷缺乏的响应[J]. 应用生态学报, 16(4): 589-594.
- Guo S L, Yan X F, Bai B, et al. 2005. Responses of larch seedling's photosynthetic characteristics to nitrogen and phosphorus deficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 16(4): 589-594. (in Chinese)
- 林姜岑, 王子豪, 王子琨, 等. 2023. 钙、镁缺乏对香蕉幼苗生长及养分吸收的影响[J]. 中国果树, 65(5): 70-75, 83.
- Lin J C, Wang Z H, Wang Z, et al. 2023. Effects of calcium and magnesium

- deficiency on banana seedling growth and nutrient absorption[J]. *China Fruits*, 65(5): 70–75, 83. (in Chinese)
- 刘亚林. 2020. 硼钙缺乏及外源 L-纳米天冬氨酸钙对枳壳砧木根系生长影响的初步机制[D]. 武汉: 华中农业大学.
- Liu Y L. 2020. The preliminary mechanism of the effect of boron and calcium deficiency and exogenous calcium L-aspartate nanoparticles on the root growth of Trifoliolate Orange[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University. (in Chinese)
- 彭海平. 2010. 融雪剂对天安门广场行道树油松的危害分析[J]. *河北林业科技* (6): 5–10.
- Peng H P. 2010. Analysis the harm of snowmelt agent on *Pinus tabulaeformis* next to the Tiananmen square[J]. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, (6): 5–10. (in Chinese)
- 孙小娜. 2022. 微量元素在柑橘根系形态建成中的作用机制研究[D]. 赣州: 赣南师范大学.
- Sun X N. 2022. Study on the mechanism of action of trace elements in the formation of *Citrus* root morphology[D]. Ganzhou: Gannan Normal University. (in Chinese)
- 唐光辉. 2001. 30% 敌畏·氧乐注干液剂对木本植物的药害机理及药效研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- Tang G H. 2001. Study on the mechanism and efficacy of 30% dichlorvos and dimethoate injection on woody plants[D]. Yangling: Northwest A & F University. (in Chinese)
- 唐孟泉, 黄佳欢, 陈瑾元, 等. 2019. 植物的铜稳态研究综述[J]. *江苏农业科学*, 47(10): 305–311.
- Tang M Q, Huang J H, Chen J Y, *et al.* 2019. Research progress on copper homeostasis in plants: A review[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 47(10): 305–311. (in Chinese)
- 万五星, 夏亚军, 张红星, 等. 2013. 北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害[J]. *生态学报*, 33(4): 1098–1105.
- Wan W X, Xia Y J, Zhang H X, *et al.* 2013. The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(4): 1098–1105. (in Chinese)
- 王倩雅, 张莹, 袁朝杰, 等. 2016. 植物和藻类应对硫缺乏的生理生化响应[J]. *植物生理学报*, 52(1): 28–36.
- Wang Q Y, Zhang Y, Yuan C J, *et al.* 2016. Physiological and biochemical response of plants and algae in response to deprivation sulfur[J]. *Plant Physiology Journal*, 52(1): 28–36. (in Chinese)
- 王巧, 刘秀梅, 王华田, 等. 2015. 干旱和水涝胁迫对幼龄油松生长及光合作用的影响[J]. *中国水土保持科学*, 13(6): 40–47.
- Wang Q, Liu X M, Wang H T, *et al.* 2015. Effects of drought and waterlogging on growth and photosynthesis of potted young *Pinus tabulaeformis* Carr[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 13(6): 40–47. (in Chinese)
- 韦司棋, 李愿. 2015. 钼元素在植物体内效应的研究[J]. *资源节约与环保* (3): 252.
- Wei S Q, Li Y. 2015. Study on the effect of molybdenum in plants[J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, (3): 252. (in Chinese)
- 文滨滨. 2022. 苹果 MdNAC4 调控氮缺乏诱导的叶片衰老机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学.
- Wen B B. 2022. Molecular mechanism of MdNAC4 regulating leaf senescence induced by nitrogen deficiency in Apple[D]. Taian: Shandong Agricultural University. (in Chinese)
- 徐梦莎. 2016. 叶片氮、磷、钾含量在甜仁杏童期向成年期转变中的生理作用[D]. 北京: 中国林业科学研究院.
- Xu M S. 2016. The physiological role of N, P, K in sweet kernel apricot leaf during transition from juvenile stage to adult[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry. (in Chinese)
- 许志刚. 2009. 普通植物病理学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社: 5–10.
- 叶建仁, 田呈明. 2024. 林木病理学 [M]. 4 版. 北京: 中国林业出版社: 76–80.
- 赵莹莹. 2006. 化学融雪剂的环境影响探讨研究[D]. 长春: 东北师范大学.
- Zhao Y Y. 2006. Investigation and study on effect of chemical deicing salt for environment[D]. Changchun: Northeast Normal University. (in Chinese)
- Abbasi H, Jamil M, Haq A, *et al.* 2016. Salt stress manifestation on plants, mechanism of salt tolerance and potassium role in alleviating it: A review[J]. *Zemdirbyste-Agriculture*, 103(2): 229–238.
- Arif Y, Singh P, Siddiqui H, *et al.* 2020. Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, (156): 64–77.
- Ashraf M A. 2012. Waterlogging stress in plants: A review[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 7(13): 1976–1981.
- Aslam M A, Ahmed M, Hassan F U, *et al.* 2022. Impact of temperature fluctuations on plant morphological and physiological traits[M]// *Building Climate Resilience in Agriculture: Theory, Practice and Future Perspective*. Cham: Springer International Publishing: 25–52.
- Auclair A N D, Heilman W E, Brinkman B. 2010. Predicting forest dieback in Maine, USA: A simple model based on soil frost and drought[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(4): 687–702.
- Banerjee S, Banerjee A, Palit D, *et al.* 2019. Assessment of vegetation under air pollution stress in urban industrial area for greenbelt development[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10): 5857–5870.
- Banov M, Rousseva S, Pavlov P. 2020. Sustainable management and restoration of the fertility of damaged and contaminated lands and soils[M]//Meena R. *Soil Health Restoration and Management*. Singapore: Springer.
- Barka I, Luke P, Bucha T, *et al.* 2018. Remote sensing-based forest health monitoring systems—case studies from Czechia and Slovakia[J]. *Central European Forestry Journal*, 64(3/4): 259–275.
- Baweja P, Kumar S, Kumar G. 2020. Fertilizers and pesticides: Their impact on soil health and environment[M]//Bhoopander G, Ajit V. *Soil Health*. Cham: Springer International Publishing: 265–285.
- Brain R A, Perine J, Cooke C, *et al.* 2017. Evaluating the effects of herbicide drift on nontarget terrestrial plants: A case study with mesotrione[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36(9): 2465–2475.
- Brunetto G, De Melo G W B, Toselli M, *et al.* 2015. The role of mineral nutrition on yields and fruit quality in grapevine, pear and apple[J]. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37(4): 1089–1104.
- Bulbovas P, Camargo C Z S, Ferreira M L, *et al.* 2020. Anthropogenic interferences in the nutritional status of tree species growing in urban and peri-urban Atlantic forest remnants[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 50: 126642.
- Camejo D, Rodríguez P, Angeles Morales M, *et al.* 2005. High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility[J]. *Journal of Plant Physiology*, 162(3): 281–289.
- Chatzistathis T. 2014. Micronutrient deficiency in soils and plants[J]. *Journal*

- of Agricultural Science, 15(3): 45–60.
- Cown D J, Donaldson L A, Downes G M. 2011. A review of resin features in *Radiata* pine[J]. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 41: 41–60.
- Czerniakowski B, Crnov R, Smith I W, *et al.* 2006. Soil properties associated with the tree decline ‘Mundulla Yellows’ [J]. *Plant and Soil*, 285(1): 197–206.
- Das S K, Avasthe R K, Yadav A. 2017. Secondary and micronutrients: deficiency symptoms and management in organic farming[J]. *Innovative Farming*, 2(4): 209–211.
- Day A D, Ludeke K L. 1993. Plant nutrients[M]//Plant nutrients in desert environments. Berlin, Heidelberg: Springer: 3–8.
- De Vos B, Huvenne H, Messens E, *et al.* 2007. Nutritional imbalance caused by nitrogen excess is correlated with the occurrence of watermark disease in white willow[J]. *Plant and Soil*, 301(1): 215–232.
- Delerue F, Scattolin M, Attea O, *et al.* 2022. Biomass partitioning of plants under soil pollution stress[J]. *Communications Biology*, 5: 365.
- Dickinson N M, Turner A P, Lepp N W. 1991. Survival of trees in a metal-contaminated environment[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 57(1): 627–633.
- Dmochowski W, Brągoszewska P, Gozdowski D, *et al.* 2022. Strategies of urban trees for mitigating salt stress: A case study of eight plant species[J]. *Trees*, 36(3): 899–914.
- Ecke S, Dempewolf J, Frey J, *et al.* 2022. UAV-based forest health monitoring: A systematic review[J]. *Remote Sensing*, 14(13): 3205.
- Emberson L D, Ashmore M R, Murray F, *et al.* 2001. Impacts of air pollutants on vegetation in developing countries[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 130(1): 107–118.
- Erel R, Dag A, Ben-Gal A, *et al.* 2008. Flowering and fruit set of olive trees in response to nitrogen, phosphorus, and potassium[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 133(5): 639–647.
- Everham E M, Brokaw N V L. 1996. Forest damage and recovery from catastrophic wind[J]. *The Botanical Review*, 62(2): 113–185.
- Fait G, Balderacchi M, Ferrari F, *et al.* 2010. A field study of the impact of different irrigation practices on herbicide leaching[J]. *European Journal of Agronomy*, 32(4): 280–287.
- Fernandes J C, Henriques F S. 1989. Metal contamination in leaves and fruits of holm-oak (*Quercus rotundifolia* Lam. ) trees growing in a pyrites mining area at Aljustrel, Portugal[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 48(3): 409–415.
- Feucht J R. 1988. Herbicide injuries to trees—symptoms and solutions[J]. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 14(9): 215–219.
- Gardiner B, Berry P, Moulia B. 2016. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage[J]. *Plant Science*, 245: 94–118.
- Gommers C M M, Visser E J W, St Onge K R, *et al.* 2013. Shade tolerance: When growing tall is not an option[J]. *Trends in Plant Science*, 18(2): 65–71.
- Grabner M, Cherubini P, Rozenberg P, *et al.* 2006. Summer drought and low earlywood density induce intra-annual radial cracks in conifers[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21(2): 151–157.
- Grigg A, Close D C, Lambers H, *et al.* 2009. Ecophysiology of *Eucalyptus marginata* and *Corymbia calophylla* in decline in an urban parkland[J]. *Austral Ecology*, 34(5): 499–507.
- Guo W L, Nazim H, Liang Z S, *et al.* 2015. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem[J]. *The Crop Journal*, 4(2): 83–91.
- Gupta B, Huang B R. 2014. Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization[J]. *International Journal of Genomics*, 2014: 701596.
- Hao S H, Wang Y R, Yan Y X, *et al.* 2021. A review on plant responses to salt stress and their mechanisms of salt resistance[J]. *Horticulturae*, 7(6): 132.
- Harfouche A, Meilan R, Altman A. 2014. Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement[J]. *Tree Physiology*, 34(11): 1181–1198.
- Hasanuzzaman M, Nahar K, Alam M M, *et al.* 2013. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5): 9643–9684.
- Howarth C J. 2005. Genetic improvements of tolerance to high temperature[M]//Ashraf M, Harris P J C. Abiotic stresses: plant resistance through breeding and molecular approaches. New York: Howarth Press Inc: 277–300.
- Huber D M, Jones J B. 2013. The role of magnesium in plant disease[J]. *Plant and Soil*, 368(1): 73–85.
- Joshi P C, Swami A. 2007. Physiological responses of some tree species under roadside automobile pollution stress around city of Haridwar, India[J]. *The Environmentalist*, 27(3): 365–374.
- Kaelke C M, Kruger E L, Reich P B. 2001. Trade-offs in seedling survival, growth, and physiology among hardwood species of contrasting successional status along a light-availability gradient[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(9): 1602–1616.
- Kahnouj V F, Rezaei M, Mahdavi R, *et al.* 2023. Effects of dieback on the vegetative, chemical, and physiological status of mangrove forests, Iran[J]. *Journal of Arid Land*, 15(11): 1391–1404.
- Kam M D, Versteegen C M, Van Den Burg J, *et al.* 1991. Effects of fertilization with ammonium sulphate and potassium sulphate on the development of *Sphaeropsis sapinea* in Corsican pine[J]. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 97(5): 265–274.
- Karnosky D F, Skelly J M, Percy K E, *et al.* 2007. Perspectives regarding 50 years of research on effects of tropospheric ozone air pollution on US forests[J]. *Environmental Pollution*, 147(3): 489–506.
- Kaiser B N, Gridley K L, Ngaire B J, *et al.* 2005. The role of molybdenum in agricultural plant production[J]. *Annals of Botany*, 96(5): 745–754.
- Karthika K S, Rashmi I, Parvathi M S. 2018. Biological functions, uptake and transport of essential nutrients in relation to plant growth[M]. Mirza Hasanuzzaman, Masayuki Fujita, Hirotsuke Oku. Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance. Singapore: Springer Singapore: 1–49.
- Keiper F J, Chen D M, De Filippis L F. 1998. Respiratory, photosynthetic and ultrastructural changes accompanying salt adaptation in culture of *Eucalyptus microcorys*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 152(4/5): 564–573.
- Kiryanov A V, Myglan V S, Pimenov A V, *et al.* 2014. Die-off dynamics of Siberian larch under the impact of pollutants emitted by Norilsk enterprises[J]. *Contemporary Problems of Ecology*, 7(6): 679–684.
- Kozłowski T T, Constantinidou H I A. 1986. Responses of Woody Plants to Environmental Pollution[J]. *Forestry Abstracts*, 47(1): 5–51
- Kozłowski T T. 1985. Tree growth in response to environmental stresses[J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 11(4): 97–111.
- Kreuzwieser J, Rennenberg H. 2014. Molecular and physiological responses of

- trees to waterlogging stress[J]. *Plant, Cell & Environment*, 37(10): 2245–2259.
- Lal N, Sahu N S. 2017. Management strategies of Sun burn in fruit crops-a review[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(6): 1126–1138.
- Lal R. 2009. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition[J]. *Food Security*, 1(1): 45–57.
- Lausch A, Borg E, Bumberger J, *et al.* 2018. Understanding forest health with remote sensing, part III: Requirements for a scalable multi-source forest health monitoring network based on data science approaches[J]. *Remote Sensing*, 10(7): 1120.
- Leers M, Moore G M, May P B. 2017. The effects of paving surfaces and planting orientation on street tree growth and trunk injury[J]. *Arboricultural Journal*, 39(1): 24–38.
- Li W F, Lan P. 2017. The understanding of the plant iron deficiency responses in strategy I plants and the role of ethylene in this process by omic approaches[J]. *Frontiers in Plant Science*, 8: 40.
- Liu Y, Jafari F, Wang H Y. 2021. Integration of light and hormone signaling pathways in the regulation of plant shade avoidance syndrome[J]. *ABIOTECH*, 2(2): 131–145.
- Lorenz M, Clarke N, Paoletti E, *et al.* 2010. Air pollution impacts on forests in changing climate[J]. *Forest and Society—Responding to Global Drivers of Change*, 25: 55–74.
- Luck J E, Crnov R, Czerniakowski B, *et al.* 2006. Investigating the presence of biotic agents associated with mundulla yellows[J]. *Plant Disease*, 90(4): 404–410.
- Ma X L, Liu X F, Xiang P W, *et al.* 2021. Effects of the contents of mineral elements on gummosis in *Prunus salicina* lindl[J]. *HortScience*, 56(5): 568–571.
- Maas E V. 1985. Crop tolerance to saline sprinkling water[J]. *Plant and Soil*, 89(1): 273–284.
- Malone S C, Thompson R A, Chow P S, *et al.* 2025. Water, not carbon, drives drought-constraints on stem terpene defense against simulated bark beetle attack in *Pinus edulis*[J]. *The New Phytologist*, 245(1): 318–331.
- Manghwar H, Hussain A, Alam I, *et al.* 2024. Waterlogging stress in plants: Unraveling the mechanisms and impacts on growth, development, and productivity[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 224: 105824.
- Martín P, Delgado R, González M R, *et al.* 2004. Colour of ‘tempranillo’ grapes as affected by different nitrogen and potassium fertilization rates[J]. *Acta Horticulturae*, (652): 153–160.
- Mathur S, Agrawal D, Jajoo A. 2014. Photosynthesis: Response to high temperature stress[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 137: 116–126.
- Maurel C, Simonneau T, Sutka M. 2010. The significance of roots as hydraulic rheostats[J]. *Journal of Experimental Botany*, 61(12): 3191–3198.
- Mduma H S, Mkindi M, Karani A, *et al.* 2015. Major signs and symptoms caused by biotic and abiotic agents on plants in the tropical Africa[J]. *International Journal of Scientific Research*, 6: 750–759.
- Meade J A. 1977. Herbicide injury to trees[J]. *Journal of Arboriculture*, 3(9): 167–168.
- Mendes K F, Mielke K C, D’Antonino L, *et al.* 2022. Retention, absorption, translocation, and metabolism of herbicides in plants[M]. *Applied Weed and Herbicide Science*. Cham: Springer International Publishing, 157–186.
- Mishra R K, Mohammad N, Roychoudhury N. 2016. Soil pollution: Causes, effects and control[J]. *Van Sangyan*, 3(1): 1–14.
- Munné-Bosch S, Vincent C. 2019. Physiological mechanisms underlying fruit sunburn[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 38(2): 140–157.
- Nagy P T, Kincses I, Nyéki J, *et al.* 2011. Importance of boron in fruit nutrition[J]. *International Journal of Horticultural Science*, 17(1/2): 39–44.
- Narayan O P, Kumar P, Yadav B, *et al.* 2023. Sulfur nutrition and its role in plant growth and development[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1): 2030082.
- Nicholls T H. 1990. *Sphaeropsis sapinea* cankers on stressed red and jack pines in Minnesota and Wisconsin[J]. *Plant Disease*, 74(1): 54.
- Okx J P, Stein A. 2000. Use of decision trees to value investigation strategies for soil pollution problems[J]. *Environmetrics*, 11(3): 315–325.
- Palta J P, Weiss L S. 2018. Ice formation and freezing injury: An overview on the survival mechanisms and molecular aspects of injury and cold acclimation in herbaceous plants[M]// Paul H L. *Advances in Plant Cold Hardiness*. Boca Raton: CRC Press: 143–176.
- Park Williams A, Allen C D, Macalady A K, *et al.* 2013. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality[J]. *Nature Climate Change*, 3(3): 292–297.
- Patel V V, Vishwakarma S, Gangwar R. 2024. Urban tree selection and management strategies for climate adaptation[M]// Hukum S. *Urban Forests, Climate Change and Environmental Pollution*. Cham: Springer Nature Switzerland: 391–415.
- Pearce R S. 2001. Plant freezing and damage[J]. *Annals of Botany*, 87(4): 417–424.
- Pierik R, de Wit M. 2014. Shade avoidance: Phytochrome signalling and other aboveground neighbour detection cues[J]. *Journal of Experimental Botany*, 65(11): 2815–2824.
- Poorter H, Niinemets Ü, Ntagkas N, *et al.* 2019. A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance[J]. *New Phytologist*, 223(3): 1073–1105.
- Pope K S, Dose V, Da Silva D, *et al.* 2015. Nut crop yield records show that budbreak-based chilling requirements may not reflect yield decline chill thresholds[J]. *International Journal of Biometeorology*, 59(6): 707–715.
- Proctor J T A. 1983. Effect of simulated sulfuric acid rain on apple tree foliage, nutrient content, yield and fruit quality[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 23(2): 167–174.
- Rackó J, Leite G B, Petri J L, *et al.* 2007. Fruit drop: The role of inner agents and environmental factors in the drop of flowers and fruits[J]. *International Journal of Horticultural Science*, 13(3): 13–23.
- Rodrigo J. 2000. Spring frosts in deciduous fruit trees: Morphological damage and flower hardiness[J]. *Scientia Horticulturae*, 85(3): 155–173.
- Rood S B, Patiño S, Coombs K, *et al.* 2000. Branch sacrifice: Cavitation-associated drought adaptation of riparian cottonwoods[J]. *Trees*, 14(5): 248–257.
- Ryppö A, Sutinen S, Mäenpää M, *et al.* 1997. Frost damage and recovery of Scots pine seedlings at the end of the growing season[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(9): 1376–1382.
- Sanzani S M, Schena L, Nigro F, *et al.* 2012. Abiotic diseases of olive[J]. *Journal of Plant Pathology*, 94: 469–491.
- Sarkar A K, Sadhukhan S. 2023. Impact of salinity on growth and development

- of plants with the central focus on glycophytes: an overview[J]. *Bulletin of Environmental Pharmacology and Life Sciences*, 12: 235–266.
- Saurav B. 2022. Role of zinc in management of plant diseases: A review[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1): 2194483.
- Schrader L, Zhang J, Sun J. 2003. Environmental stresses that cause sunburn of apple[J]. *Acta Horticulturae*, (618): 397–405.
- Seleiman M F, Al-Suhaibani N, Ali N, *et al.* 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects[J]. *Plants*, 10(2): 259.
- Sergeeva V, Spooner-Hart R. 2011. Diseases and disorders associated with environmental stress in sustainable olive chards in Australia[J]. *Acta Horticulturae*, 924: 145–150.
- Siegwolf R T W, Savard M M, Grams T E E, *et al.* 2022. Impact of increasing CO<sub>2</sub>, and air pollutants (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) on the stable isotope ratios in tree rings[M]//Danny M, Neil J L. *Stable Isotopes in Tree Rings*. Cham: Springer International Publishing: 675–710.
- Simon E W. 2010. The symptoms of calcium deficiency in plants[J]. *New Phytologist*, 80(1): 1–15.
- Sobhanian H, Aghaei K, Komatsu S. 2011. Changes in the plant proteome resulting from salt stress: Toward the creation of salt-tolerant crops?[J]. *Journal of Proteomics*, 74(8): 1323–1337.
- Someya K, Shimizu Y, Horiguchi, K. 2014. Soil and plant nutrition diagnosis of leaf spot on safflower caused by a deficiency of manganese[J]. *Journal of the Science of Soil & Manure Japan*, 85(6): 515–518.
- Sperling O, Karunakaran R, Erel R, *et al.* 2019. Excessive nitrogen impairs hydraulics, limits photosynthesis, and alters the metabolic composition of almond trees[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 143: 265–274.
- Stewart A J, Chapman W, Jenkins G I, *et al.* 2001. The effect of nitrogen and phosphorus deficiency on flavonol accumulation in plant tissues[J]. *Plant, Cell & Environment*, 24(11): 1189–1197.
- Sucoff E, Hong S G, Wood A. 1976. NaCl and twig dieback along highways and cold hardiness of highway versus garden twigs[J]. *Canadian Journal of Botany*, 54(19): 2268–2274.
- Takahashi M, Feng Z Z, Mikhailova T A, *et al.* 2020. Air pollution monitoring and tree and forest decline in East Asia: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 742: 140288.
- Tattar T A. 1980. Non-infectious diseases of trees[J]. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 6(1): 1–4.
- Teshome D T, Zharare G E, Naidoo S. 2020. The threat of the combined effect of biotic and abiotic stress factors in forestry under a changing climate[J]. *Frontiers in plant science*, 11: 601009.
- Teskey R, Wertin T, Bauweraerts I, *et al.* 2015. Responses of tree species to heat waves and extreme heat events[J]. *Plant, Cell & Environment*, 38(9): 1699–1712.
- Tzvetkova N, Kolarov D. 1996. Effect of air pollution on carbohydrate and nutrients concentrations in some deciduous tree species[J]. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 22(1): 53–63.
- Uçgun K, Altindal M. 2021. Effects of increasing doses of nitrogen, phosphorus, and potassium on the uptake of other nutrients in sweet cherry trees[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(11): 1248–1255.
- Valladares F, Laanisto L, Niinemets Ü, *et al.* 2016. Shedding light on shade: Ecological perspectives of understorey plant life[J]. *Plant Ecology & Diversity*, 9(3): 237–251.
- Verslues P E, Agarwal M, Katiyar-Agarwal S, *et al.* 2006. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status[J]. *The Plant Journal*, 45(4): 523–539.
- Wahid A, Gelani S, Ashraf M, *et al.* 2007. Heat tolerance in plants: An overview[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3): 199–223.
- Wali B, Mahmooduzzfar, Iqbal M. 2004. Plant growth, stomatal response, pigments and photosynthesis of *Althea officinalis* as affected by SO<sub>2</sub> stress[J]. *Indian journal of plant physiology*, 9(3): 224–233.
- Wang F, Yamamoto H, Ibaraki Y. 2009. Responses of some landscape trees to the drought and high temperature events during 2006 and 2007 in Yamaguchi, Japan[J]. *Journal of Forestry Research*, 20(3): 254–260.
- Wilkaniec A, Borowiak-Sobkowiak B, Irzykowska L, *et al.* 2021. Biotic and abiotic factors causing the collapse of *Robinia pseudoacacia* L. veteran trees in urban environments[J]. *PLoS One*, 16(1): e0245398.
- Wulff A. 1996. Changes in ultrastructure of *Picea abies* needles following severe long - term winter frost[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 11(1/4): 327–335.
- Xin Z, Browse J. 2000. Cold comfort farm: The acclimation of plants to freezing temperatures[J]. *Plant, Cell & Environment*, 23(9): 893–902.
- Xing D K, Wu Y Y. 2014. Effect of phosphorus deficiency on photosynthetic inorganic carbon assimilation of three climber plant species[J]. *Botanical Studies*, 55(1): 60.
- Yadav S K. 2010. Cold stress tolerance mechanisms in plants. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3): 515–527.
- Yamasaki H, Pilon M, Shikanai T. 2008. How do plants respond to copper deficiency?[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 3(4): 231–232.
- Yang X Y, Lu M Q, Wang Y F, *et al.* 2021. Response mechanism of plants to drought stress[J]. *Horticulturae*, 7(3): 50.
- Yeung E, van Veen H, Vashisht D, *et al.* 2018. A stress recovery signaling network for enhanced flooding tolerance in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(26): e6085–e6094.
- Zalasky H. 1976. Frost damage in poplar on the prairies[J]. *The Forestry Chronicle*, 52(2): 61–64.
- Zhao D L, Oosterhuis D M, Bednarsz C W. 2001. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants[J]. *Photosynthetica*, 39(1): 103–109.
- Zhao J M, Zhou M, Meng Y. 2020. Identification and validation of reference genes for RT-qPCR analysis in switchgrass under heavy metal stresses[J]. *Genes*, 11(5): 502.
- Zhou B Z, Gu L H, Ding Y H, *et al.* 2011. The great 2008 Chinese ice storm: Its socioeconomic-ecological impact and sustainability lessons learned[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(1): 47–60.