

新疆小叶白蜡国家级自然保护区预防枯梢病的策略研究

潘传威

新疆岳途工程咨询有限公司，新疆 乌鲁木齐

收稿日期：2026年5月21日；录用日期：2026年7月3日；发布日期：2026年7月15日

摘要

白蜡树枯梢病是由伪白蜡长棒盘菌引起的毁灭性森林病害，已在欧洲造成大规模白蜡树死亡，对森林生态系统稳定性产生显著影响。尽管我国目前尚未发现该病害自然发生，但在国际贸易频繁、气候变化和苗木调运增加的背景下，其潜在入侵风险仍需前置评估。新疆伊犁河谷的小叶白蜡作为第三纪残遗物种，主要分布于国家级自然保护区，具有重要生态、遗传和生物安全价值。本文在梳理白蜡树枯梢病传播机制及我国防控现状的基础上，新增新疆伊犁河谷与欧洲枯梢病疫区在气候、土壤、水分条件和伴生树种方面的比较，进一步判断病害在伊犁河谷的潜在适生性。结果表明，伊犁保护区总体具有大陆性半干旱和高蒸发特征，区域尺度上与欧洲温带湿润疫区存在差异，但河漫滩、阶地、近水高湿斑块及密度偏高的幼龄林仍可能形成局部适生微环境。因此，本文提出以分子监测预警、林木活力提升、林分结构优化和生态管护相结合的综合预防策略，并进一步细化候选基因类别、样地采样方案、林分密度、胸径结构和林窗调控指标，以提升新疆伊犁小叶白蜡林分的抗病能力与生态韧性。

关键词

白蜡树枯梢病，异龄林经营，小叶白蜡，森林病害预防，生物安全

Strategy for Preventing Ash Dieback in the Xinjiang *Fraxinus sogdiana* National Nature Reserve

Chuanwei Pan

Xinjiang Yuetu Engineering Consulting Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: May 21, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

Ash dieback is a destructive forest disease caused by *Hymenoscyphus fraxineus*, which has caused large-scale mortality of ash trees across Europe and has affected forest ecosystem stability. Although the disease has not been naturally recorded in China, its potential introduction risk should be assessed in advance under intensified international trade, climate change, and plant material movement. *Fraxinus sogdiana* in the Ili River Valley of Xinjiang is a Tertiary relict species mainly distributed within a national nature reserve and has high ecological, genetic, and biosecurity value. Based on the transmission mechanism of ash dieback and the current prevention status in China, this study adds a comparative assessment of the Ili River Valley and European epidemic areas in terms of climate, soil, water conditions, and associated tree species, thereby evaluating the potential suitability of the pathogen in the Ili region. The comparison indicates that the Ili reserve differs from humid temperate European epidemic areas at the regional scale because of its continental semi-arid climate and high evaporation; however, floodplains, terraces, riparian humid patches, and dense young stands may still provide local suitable microhabitats. Accordingly, this study proposes an integrated prevention strategy combining molecular early warning, tree-vigor improvement, stand-structure optimization, and ecological management, and further specifies candidate gene categories, a preliminary sampling scheme, stand-density targets, diameter-structure indicators, and canopy-gap control measures for improving disease resistance and ecological resilience of *F. sogdiana* forests in Xinjiang.

Keywords

Ash Dieback, Uneven-Aged Forest Management, *Fraxinus sogdiana*, Forest Disease Prevention, Biosecurity

Copyright © 2026 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

白蜡树枯梢病是由真菌引起的一种毁灭性森林病害，近年来已对欧洲白蜡木资源造成严重威胁。尽管我国目前尚未发现该病害的实际发生案例，但在国际贸易日益频繁及气候变化背景下，其传入和扩散风险不断上升。新疆伊犁小叶白蜡作为第三纪残遗物种，其核心分布区——国家级自然保护区的生态安全具有重要的科研意义与保护价值。

相较于传统同龄林经营模式，异龄林经营模式在降低林分整体感病风险方面具有显著优势。结合我国进境植物检疫政策要求、小叶白蜡的生理生态特性及伊犁河谷与欧洲疫区的环境差异，本文提出以分子监测预警、林木活力提升和林分结构优化为核心的精准预防体系。与原有宏观策略相比，本文进一步补充分子监测的候选基因类别、固定样地与取样流程，并提出林分密度、胸径结构、林窗尺度和林下植被调控等量化参考指标，旨在为我国白蜡属植物的生物安全防控与风险预警提供更具操作性的科学依据。

2. 背景

(一) 全球白蜡树枯梢病的演变及其威胁

白蜡树枯梢病是由一种名为伪白蜡长棒盘菌的真菌引起的一种高度侵染性森林病害[1]。该病原菌以

落叶层为重要越冬场所，在夏季通过子囊盘释放大量的空气传播的子囊孢子。孢子侵入叶片后，经叶柄向枝条及茎干维管系统扩展，诱发形成层坏死、枝条枯梢、皮质溃疡及主干坏死，最终导致整株死亡[2]。其侵染过程具有隐蔽性强、扩散速度快、潜伏期不固定等特点。

该病最早于 20 世纪 90 年代初在欧洲东部被报道，随后迅速蔓延至中欧、西欧及北欧大部分国家。研究估计，在部分国家，白蜡树天然种群的死亡率高达 60%~90%，严重削弱了森林生态系统的结构稳定性与功能完整性[3]。白蜡属植物在欧洲森林生态系统中通常作为重要的伴生或优势树种，承担着水土保持、生物多样性维系及景观生态调节等多重功能。白蜡树枯梢病的持续流行不仅导致森林覆盖度下降，还对依赖白蜡树生存的昆虫、真菌及地衣等专性物种造成连锁冲击。

从生态系统层面看，大面积白蜡死亡改变了林冠层结构与光照条件，进而影响林下更新格局和群落演替方向；从经济层面看，白蜡木材因其韧性强、加工性能好而广泛用于家具、地板及运动器材制造，白蜡树枯梢病造成的木材资源锐减给林业产业链带来持续性冲击。

因此，白蜡树枯梢病已被视为继荷兰榆树病之后，全球温带森林面临的又一重大真菌病害事件。其跨国传播路径与全球贸易流通密切相关，凸显了森林病原跨境风险与生物安全治理的重要性。

(二) 我国防控现状与潜在风险分析

截至 2013 年的专项普查与连续监测结果显示，我国境内尚未发现白蜡树枯梢病自然发生的临床病例，包括云南、广西等边境高风险区域在内的监测点均未发现典型病斑或枝条坏死现象。鉴于白蜡树枯梢病在欧洲的灾难性影响，我国 2013 年将该病原菌列入《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》[4]，明确禁止从疫区国家进口白蜡属植物种子、苗木及原木产品。

这一政策体现了“风险前移”的生物安全理念。然而，随着“一带一路”倡议推进及国际园艺苗木贸易频繁化，潜在携带病原的观赏苗木、包装材料及木质制品仍可能成为隐性传播载体。此外，气候变暖可能扩大病原菌在东亚地区的适生范围，提高其在我国北方地区定殖成功的概率[5]。

小叶白蜡在我国主要分布于新疆伊犁河谷。其种群规模有限，更新能力较弱，属于典型的河谷型阔叶林优势种。作为区域性旗舰物种，小叶白蜡不仅具有重要的遗传学研究价值，还在维系河谷湿润微气候、稳定河岸生态结构方面发挥关键作用。

分子系统发育研究表明，小叶白蜡与欧洲白蜡在基因组层面具有一定亲缘关系。鉴于白蜡树枯梢病病原菌具有较广寄主谱，一旦突破口岸检疫防线，伊犁自然保护区内以单一树种为主的林分结构可能成为病原快速扩散的理想环境。尤其是在部分人工更新林中，林分结构趋于同龄化、密度偏高，潜在的微气候湿度条件更利于病原繁殖。若防控不当，可能对该残遗物种造成不可逆的种群衰退风险。

(三) 新疆伊犁河谷与欧洲枯梢病疫区生态环境比较及潜在适生性评估

白蜡树枯梢病能否在新疆伊犁河谷形成稳定流行，不仅取决于病原是否传入，还取决于病原生活史需求、寄主生态位和林分微环境是否匹配。欧洲疫区主要分布于普通白蜡广泛存在的温带森林、河岸林和湿润阔叶林系统，普通白蜡偏好较冷凉、光照充足且湿润排水良好的肥沃土壤，并可与槭树、榆树等阔叶树种伴生。病原菌在落叶层叶轴上越冬并形成子囊盘，子囊孢子释放受高相对湿度和温度共同影响，欧洲监测中孢子高峰通常集中在夏季。因此，欧洲高风险生境的共同特征并非单纯由年均气温决定，而是由“白蜡寄主连续分布、落叶层积累、夏季高湿、通风不足和适宜温度窗口”共同构成。

新疆伊犁小叶白蜡国家级自然保护区位于伊犁州伊宁县东部，保护区面积为 9103.47 hm²。小叶白蜡集中分布区属于典型大陆性半干旱气候，年均气温约 8.5℃，年均降水量约 330 mm，年均蒸发量约 1300~1700 mm；地貌以第四纪冲积物形成的河漫滩和阶地为主，上覆深厚黄土层，土壤类型以灰钙土和栗钙土为主，乔木层主要伴生密叶杨、天山桦等河谷落叶阔叶树种。与欧洲多数枯梢病疫区相比，伊犁河谷在区域尺度上更干旱、蒸发更强，连续高湿时段可能较短，这可能降低病原在大范围内持续扩散和

稳定形成子囊盘的概率。

但应强调，伊犁河谷并不能简单判定为低风险区。保护区小叶白蜡林集中分布于喀什河河岸带及河漫滩-阶地系统，近水区域、低洼地、郁闭度较高的幼龄更新林和草本层过密地段，仍可能形成高湿、弱通风、落叶层积累明显的局部微生境。这些微生境在功能上接近欧洲疫区中有利于病原孢子形成和侵染的条件。因此，本文将伊犁保护区的病害适生性判断为“区域尺度中等偏低、局部斑块中等至较高”的复合风险格局。防控重点不应平均布设，而应优先覆盖河岸高湿带、人工更新密集区、交通入口周边、保护区边界缓冲带以及林下草本层过密的阴湿斑块。新疆伊犁河谷小叶白蜡保护区与欧洲白蜡枯梢病疫区生态环境比较如表 1 所示。

Table 1. Comparison of ecological environment between *Fraxinus microphylla* nature reserve in Yili Valley, Xinjiang and *Fraxinus mandshurica* blight epidemic area in Europe

表 1. 新疆伊犁河谷小叶白蜡保护区与欧洲白蜡枯梢病疫区生态环境比较

比较维度	欧洲枯梢病主要疫区	新疆伊犁小叶白蜡保护区	适生性判断与防控含义
气候与水分	温带湿润或冷凉湿润森林较多，夏季高湿环境有利于子囊孢子释放和侵染。	大陆性半干旱气候，年均温约 8.5℃，年降水约 330 mm，蒸发量约 1300~1700 mm。	区域尺度连续高湿条件弱于欧洲，但河岸、低洼和郁闭斑块仍需重点监测。
土壤与地貌	普通白蜡常见于肥沃、湿润、排水良好的土壤及河岸、冲积林地。	河漫滩、阶地和深厚黄土层为主，土壤以灰钙土、栗钙土为主。	河谷冲积地貌与欧洲河岸林存在功能相似性，落叶层和土壤湿度应作为监测指标。
寄主与伴生树种	寄主以欧洲白蜡为主，常与槭树、榆树、栎类、桤木等阔叶树种共同组成温带阔叶林或河岸林。	寄主为小叶白蜡，乔木主要伴生密叶杨、天山桦等，局部还有白桦、沙棘、苹果等天然林木。	伴生树种不同，但多阔叶落叶林结构可能保留湿润落叶层，应关注寄主连续性和混交比例。
林分结构	同龄、密集、通风差或幼龄林分中病害传播压力较高；半自然异龄林平均损害较低。	部分小叶白蜡集中分布区株间距约 5~6 m，但人工更新或局部幼龄群体可能出现同龄化、密度偏高。	应避免单一小径级密集林，优先推进近自然异龄结构和通风透光改善。
总体风险	病原已建立稳定生活史，区域扩散能力强。	目前未见自然发生记录；外来传入是首要前提，局部适生微环境可能存在。	采取“口岸检疫 + 保护区局部高风险斑块监测 + 分子预警”的分级防控模式。

基于上述比较，本文后续策略将分子监测、结构优化和生态管护的重点从一般性“防控病害”进一步转向识别局部高湿微生境、保护潜在耐受个体和削弱同龄密集林的传播条件。

3. 枯梢病易感性的多维调节机制

(一) 分子遗传层面的耐受机制

通过关联转录组学方法，识别出一系列与抗病反应相关的基因表达标记。这些标记多涉及防御信号通路、木质素合成、抗氧化酶系统及程序性细胞死亡调控等功能模块。基因表达标记能够解释树木在病原压力下损害评分变异的显著比例[6]，表明其在耐受性预测中具有较高的统计效能。尤其在胸径 25~31 cm 的群体中，基因表达标记与树木活力指标相结合的模型对易感性差异的解释力可达 42%。

树木的发育阶段是遗传潜力表达的重要窗口。处于快速生长期的个体可能具有更活跃的代谢状态，使防御相关基因更易被诱导表达。因此，在自然保护区内建立基于基因表达标记的遗传普查体系，有助

于在病害尚未入侵前识别潜在耐受资源[7]。

(二) 树木生理活力的调节作用

冠层圆柱体积被广泛用于量化树木生理活力[8]，是综合反映树冠高度、冠幅及叶面积指数的重要结构性指标。与单一的胸径或树高相比，冠层圆柱体积能够更全面地体现树木的光能截获能力与碳获取潜力，因此在森林健康评估与病害风险预测中具有较高的应用价值[9]。统计分析结果表明，冠层圆柱体积与白蜡树枯梢病损害评分之间呈显著负相关关系，即冠层越发达、体积越大的个体，其病害严重程度总体越低。

从生理机制上看，冠层茂密的个体通常具备更高的光合效率和更稳定的碳同化速率。充足的碳水化合物储备不仅是树木生长的基础，也是抵御生物胁迫的重要物质保障。当树体受到真菌侵染时，需要迅速调动能量与营养资源，用于合成防御相关蛋白、次生代谢产物(如酚类和木质素)以及修复受损维管组织。高活力个体由于具备更大的“碳库”和更高效的物质运输能力，能够在一定时间内维持形成层活动与枝条再生，从而减缓冠层衰退速度。

此外，活力水平还与树体的水分调节能力密切相关。冠层发达的树木通常拥有更加完善的根系系统和较高的导水效率，在干旱或高温等逆境条件下仍能维持相对稳定的蒸腾作用和气孔调节能力。这种水分稳态有助于减少病原侵入后因导管堵塞而引发的次生胁迫效应。相反，活力低下个体往往因长期处于光照不足、土壤贫瘠或竞争压力较大的环境中，碳储备水平偏低，一旦受到侵染，便难以同时兼顾防御与基本代谢需求，往往在感染早期即出现枝条大面积枯死，甚至形成主干坏死和结构性衰败。

在群落尺度上，个体活力差异还会影响林分整体的病害传播动态。高活力树木维持较完整的冠层结构，有助于调节林内光照和空气流通条件，间接降低叶面长时间湿润的概率，从而抑制真菌孢子的萌发与侵染成功率。由此可见，树木生理活力不仅影响单株的抗病能力，也通过改变微环境条件参与群落层面的调节过程。

因此，在自然保护区或重点防控区域的管理实践中，应将“提升个体活力”作为核心干预方向，而不仅限于被动清除病株。具体措施可包括合理疏伐以降低竞争强度、改善土壤水分与养分状况、保护优势木的生长空间，以及通过优化林分结构提升整体光能利用效率。通过增强树体的生理潜力与资源储备能力，可在病害尚未暴发或处于早期阶段时提高林分的缓冲能力和恢复潜力，实现从“事后清除”向“事前增强”的主动防御转型。

(三) 树木大小与生理活力的调节作用

多国长期监测与样地调查数据一致表明，小型树木(胸径 7~27.99 cm)对白蜡树枯梢病表现出更高的感染率和更快的病程进展，其受害程度显著高于成熟个体。这种差异并非偶然现象，而是由生态位置、生理发育阶段及结构抗性等多方面因素综合作用的结果[10]。

从空间分布格局来看，幼树或小径级个体通常位于林冠下层或林缘过渡带，其冠层更接近林地表面。研究显示，病原真菌在落叶层形成子囊盘并释放孢子，孢子浓度在距地面一定高度范围内呈现梯度分布，靠近地表区域往往孢子密度更高。幼树冠层高度较低，使其长期暴露于高浓度孢子环境之中，从而显著提高了初始侵染概率。此外，林下空气流动相对缓慢、湿度较高，也为孢子萌发与侵入提供了更有利的微气候条件。

从组织结构与发育阶段角度分析，小型树木的维管系统尚处于发育完善阶段。其木质部导管直径较小、排列相对简单，形成层与皮层组织较薄，物理屏障和次生代谢防御体系尚未完全建立。当病原菌通过叶柄侵入后，幼树往往难以及时通过木质化加厚、胶质沉积或酚类物质积累等方式阻断真菌扩展，导致病原更容易在维管束中扩散并形成系统性感染。相比之下，成熟个体拥有更复杂且高度木质化的维管网络，真菌在其中扩展所需时间更长，树体也有更充足的时间启动防御反应。

生态竞争压力也是影响小型个体易感性的重要因素。林下层个体往往面临光照不足、土壤养分有限及水分竞争加剧等不利条件,其基础生理活力水平普遍偏低。低活力状态意味着碳储备不足和能量分配受限,当遭受病原侵染时,个体难以同时满足维持代谢与激活防御系统的双重需求,往往出现枝条快速枯死和冠层萎缩的现象。此外,幼龄树木尚未形成稳定的根系结构,对环境波动的缓冲能力较弱,在干旱或高温等气候异常条件叠加下,更易发生“生理性衰退”与病害的协同放大效应。

值得注意的是,小型个体的高易感性不仅影响单株存活率,也直接关系到林分的更新与世代延续。若幼龄群体在病害压力下大面积死亡,将导致种群年龄结构失衡,进而影响遗传多样性和长期演替方向。特别是在以单一优势种为主的保护区或河谷型林分中,一旦更新层受损,群落可能被其他耐荫或耐旱物种替代,造成物种组成改变甚至区域性功能退化。

因此,在制定防控与保护策略时,应将幼龄群体的健康监测与更新质量评估作为重点工作内容。一方面,应加强对胸径小于 28 cm 个体的动态监测,关注其冠层变化、枝条死亡比例及生长量指标;另一方面,通过合理疏伐、改善林下光照条件和优化土壤水分管理,提升幼树的生理活力与抗逆能力。同时,在人工更新或补植过程中,应优先选择具有潜在耐受性的种源材料,避免形成结构单一、抗性不足的新一代林分。

小型树木对白蜡树枯梢病的高度敏感性反映了个体发育阶段与生态位条件对病害易感性的深刻影响。只有在群落层面统筹考虑不同径级个体的差异化风险,构建多龄级、结构合理且活力充足的林分体系,方能在长期尺度上提升森林生态系统的稳定性与抗病韧性。

4. 异龄林管理的结构性优势

(一) 林分结构与病害发生差异

现有多国样地监测与对比研究表明,半自然异龄林在白蜡树枯梢病流行背景下表现出更低的平均损害评分,其病害发生强度与死亡率均显著低于同龄人工纯林。这种差异从群落结构层面揭示了林分空间格局对病害传播与扩散过程的深刻影响。林分结构不仅决定树木个体之间的空间关系,也通过调节微气候条件和资源分配格局间接影响病原侵染成功率。

从垂直结构特征来看,异龄林通常呈现明显的多层级林冠格局,包括上层优势木、中层亚优势木及下层更新个体。多级林冠的存在打破了单一高度层的连续性,增强了林内空气的垂直与水平流动。良好的空气对流能够缩短叶面湿润持续时间,降低林内相对湿度,从而抑制病原真菌孢子的萌发与侵染过程。相比之下,同龄人工林林冠整齐、郁闭度高,空气交换受限,湿度在林内滞留时间较长,更有利于病害暴发。

从水平空间分布角度分析,异龄林中个体大小差异明显,空间排列呈现自然更新形成的斑块状或不规则格局。不同径级个体之间并非连续紧密排列,从而削弱了病原在树冠之间快速横向扩散的条件。在同龄密集林分中,由于树冠高度一致且相互接触,一旦局部出现感染源,病原极易通过相邻树冠形成“跳跃式”传播,导致群体性衰退。而在异龄林中,结构异质性有效延缓了这一过程。

此外,异龄结构还增强了生态系统的功能冗余度。不同年龄阶段的个体在资源利用与生理状态上具有差异,使林分在面对病害冲击时具备更高的缓冲能力。即使部分个体因感染而死亡,其他年龄层的树木仍可维持林分基本的生态功能与结构稳定性,避免出现整体性崩溃。综上所述,林分结构复杂性在降低病害风险、提升群落韧性方面具有重要意义,应作为森林健康经营的重要调控方向。

(二) 林下植被与微气候协同

林下植被结构与组成被证明对白蜡树枯梢病的发生强度具有显著预测作用,其影响机制主要体现在微气候调节与资源竞争两个方面。林下层作为连接土壤与乔木冠层的重要生态界面,对湿度、温度及空

气流动具有缓冲与放大双重效应。不同类型的植被群落会塑造差异化的微环境条件，从而影响病原真菌的存活、萌发与侵染效率。

以禾本科草类为主的草本层通常形成较为致密的近地覆盖，蒸腾作用与地表水分蒸发叠加，使林下空气湿度维持在相对较高水平。在降雨或露水形成后，叶面和林地表层水分滞留时间延长，不利于叶片迅速干燥。这种高湿、弱对流的微气候环境为病原孢子的萌发和侵入创造了有利条件，从而提高病害发生概率。此外，密集草本层还可能加剧对水分和养分的竞争，降低幼树或弱势个体的基础活力，使其在病原侵染下更易出现枝条枯死。

相较之下，结构多样且高度适中的灌木层能够在一定程度上改善林地的水分循环和光照分布。灌木层通过调节地表蒸散速率、分散降雨冲刷、促进土壤通气性，有助于形成更加稳定且适度干燥的微环境。同时，多样化的植被结构提升了群落的生态韧性，使林分在遭受病害扰动时具备更强的恢复能力。

异龄林经营模式不仅强调乔木层的结构优化与年龄级配置，也应将林下植被的组成与密度调控纳入综合管理框架。通过科学引导林下群落演替方向，构建结构合理、功能互补的植被体系，可在微气候层面形成抑制病害扩散的生态屏障，从而提升整体森林健康水平。

5. 新疆伊犁保护区定制化防控策略

(一) 预警阶段：构建分子监测网络

在病害尚未发生或处于潜在威胁阶段时，分子监测不应仅停留在“是否检测”的原则性表述，而应形成“候选基因筛选-固定样地采样-表达量检测-风险分级-遗传档案更新”的闭环。根据已报道的欧洲白蜡枯梢病研究，可优先将基因表达标记(GEMs)和 cDNA 来源 SNP 作为第一批候选分子工具；其中，Raykova 等研究使用 Gene_19216、Gene_23247 等 GEM 并结合冠层圆柱体积和胸径分层建立易感性模型，提示分子标记与树木活力指标联合使用比单一指标更适合风险识别。

候选基因类别可按功能模块分为五类：第一，病原识别与防御信号转导相关基因，如受体样激酶、MAPK 级联和水杨酸/茉莉酸/乙烯信号通路相关基因；第二，苯丙烷代谢、木质素合成和细胞壁加固相关基因，用于评价枝条和维管组织的物理防御潜力；第三，活性氧清除和抗氧化酶系统相关基因，如过氧化物酶、超氧化物歧化酶和谷胱甘肽代谢相关基因；第四，程序性细胞死亡、伤口愈合和胁迫转录因子相关基因，用于识别感染后组织坏死调控能力；第五，与生长势、碳分配和水分调节相关的表达标记，用于将分子耐受性与树体活力联系起来。需要注意的是，欧洲白蜡中的标记不能直接等同于小叶白蜡抗性基因，应先通过同源序列比对、引物特异性验证和小规模预实验确认后再用于保护区长期监测。

初步采样方案建议如下：在核心分布区、河岸高湿带、人工更新密集区、交通入口或人为活动较强区域，以及相对干燥且通风良好的对照区，各设置 3~4 个固定监测样地，合计 15~20 个样地。每个样地选择约 20 株小叶白蜡，尽量覆盖胸径小于 28 cm 的小径级个体、28~48 cm 的中径级个体和大于 48 cm 的成熟个体，形成约 300~400 株的基础监测群体。每株记录 GPS 位置、胸径、树高、冠幅、冠层圆柱体积、枝条枯死率、林下植被类型、土壤 pH、土壤含水量和郁闭度等信息。

采样时间建议设为每年两次：第一次在 6 月上旬至中旬，用于获取生长期早期的基线表达水平；第二次在 8 月上旬至中旬，对应欧洲研究中夏季孢子释放高峰期和冠层症状显现期。每株从树冠外层不同方向采集健康叶片和当年生枝条，疑似症状出现时同步采集病斑边缘组织。RNA 样品应现场液氮速冻或置于 RNA 保存液中，病原检测样品低温保存并在 48 h 内送检。检测方法可采用 qRT-PCR 或 RT-ddPCR 评价候选 GEM 表达量，以 GAPDH 等内参基因进行标准化；同时采用病原特异性 PCR 或 ITS 测序排查 *H. fraxineus* 疑似侵染。

预警阈值可分为三级：低风险个体为冠层完整、冠层圆柱体积稳定且候选 GEM 综合评分不低于样区

均值的个体；中风险个体为冠层圆柱体积连续下降、枝条枯死率上升但未检出病原的个体；高风险个体为疑似病斑、病原检测阳性或分子耐受评分偏低且活力持续下降的个体。高风险个体不宜立即“清场式”砍除，应先复采复检并结合冠层影像、枝条解剖和病原分离结果确认，以避免误删潜在耐受资源。小叶白蜡枯梢病分子监测初步技术方案，如表 2 所示。

Table 2. Preliminary technical scheme for molecular monitoring of *Fraxinus microphylla* blight
表 2. 小叶白蜡枯梢病分子监测初步技术方案

环节	建议内容	关键技术指标
候选基因	GEMs、cDNA-SNP、病原识别、防御信号、木质素合成、抗氧化、程序性细胞死亡和水分/碳分配相关基因。	先开展同源比对和引物特异性验证，避免直接套用欧洲白蜡标记。
样地布设	核心区、河岸高湿区、人工更新密集区、人为活动强区和干燥通风对照区。	15~20 个固定样地，每样地约 20 株，基础群体约 300~400 株。
样本类型	叶片、当年生枝条、疑似病斑边缘组织和必要的落叶层样品。	每株多方向取样，RNA 样品液氮或 RNA 保存液保存。
检测方法	qRT-PCR/RT-ddPCR 检测 GEM 表达量，病原特异 PCR 或 ITS 测序检测 <i>H. fraxineus</i> 。	至少 3 个技术重复；内参基因优先使用 GAPDH 并进行稳定性验证。
风险分级	低风险、中风险、高风险三级管理。	将分子评分与 CCV、枝枯率、DBH 和微生境湿度联合判定。

(二) 结构优化阶段：推进异龄林管理模式转化工程

结构优化应以“保留优势与潜在耐受个体、降低局部湿度滞留、避免同龄小径级过密”为核心目标。鉴于保护区性质，所有经营措施均应优先在实验区和缓冲区开展小尺度试点，核心区仅进行监测、病死木安全处置和必要的保护性干预。对小叶白蜡集中分布地段，可将现有成株约 5~6 m 的株间距作为较为温和的参考基线，换算后相当于约 280~400 株/hm²。对于密度明显高于该范围、树冠相互挤压且小径级个体占比过高的林段，应采取分期轻度疏伐，而不是一次性强度开伐。

林分密度调控可采用“三优先、两避免”原则：优先保留冠层完整、年生长正常、冠层圆柱体积较大且分子检测显示潜在耐受的个体；优先保留不同胸径级中的健康母树和种源树；优先保留能够维持混交结构的伴生阔叶树种。避免清除所有轻症个体，避免形成大面积裸露林地。每轮干预建议控制在总株数的 10%~15%以内，间隔 3~5 年复查一次，依据冠层闭合度、更新质量和土壤湿度再决定下一轮调整。

胸径结构方面，建议以异龄林的反 J 形或负指数径级分布作为长期目标，即小径级个体数量多于中大径级个体，但随径级增大株数逐级递减，而不是形成单一密集的杆材林。实际操作中可按 10 cm 为一个胸径级统计株数，初步采用 q 值 1.2~1.5 作为试点参考，即相邻小径级株数约为上一较大径级的 1.2~1.5 倍。若小径级个体过多且生长衰弱，应通过疏伐和补光降低竞争；若大径级母树不足，应暂停对优势成熟个体的移除，以维持种源和结构稳定性。

林窗调控应采用小尺度、分散式方式。建议单个林窗面积控制在 100~300 m²，或不超过周围优势木平均树高的 1.0~1.5 倍作为林窗直径参考，优先选择病死木、严重衰弱木或机械损伤木所在位置进行释放。林窗营造后应连续监测 3 年，重点观察小叶白蜡天然更新、草本层过密化和外来入侵植物进入情况。若林窗内禾本科草本快速占优，应进行季节性割除或斑块化清理，以避免近地层高湿和幼树竞争压力增加。

结构优化的成效不宜只用采伐量评价，而应建立量化考核指标：郁闭度维持在 0.60~0.75；优势小叶白蜡树冠相互挤压比例逐步下降；冠层圆柱体积年际下降的个体比例降低；胸径结构逐步接近反 J 形；

小径级个体存活率和年生长量保持稳定；林下高密度草本覆盖斑块减少；土壤含水量和林内相对湿度不再长期处于高湿滞留状态。上述指标可与分子监测结果联动，用于确定下一轮抚育、疏伐或封育措施。叶白蜡林分结构优化的量化参考指标，如表 3 所示。

Table 3. Quantitative reference index of *Fraxinus microphylla* stand structure optimization
表 3. 小叶白蜡林分结构优化的量化参考指标

指标类型	建议参考值或目标	管理解释
林分密度	成株集中区参考约 280~400 株/hm ² ；过密林分每轮疏伐 10%~15%，间隔 3~5 年复查。	以降低竞争和改善通风为主，避免一次性强度采伐。
胸径结构	按 10 cm 径级统计，长期形成反 J 形或负指数分布；试点 q 值 1.2~1.5。	小径级多于大径级，但避免小径级过密和生长衰弱。
郁闭度	建议维持 0.60~0.75。	过高易造成高湿弱通风，过低可能引起干旱胁迫和外来草本扩张。
林窗尺度	单个林窗 100~300 m ² ，或林窗直径不超过平均树高的 1.0~1.5 倍。	模拟自然小干扰，优先在病死木和严重衰弱木位置释放空间。
保留对象	高 CCV、冠层完整、分子评分较高、轻症但仍具恢复能力的个体。	避免因非选择性采伐丢失潜在耐受基因资源。
清理对象	病死木、严重衰弱木、机械损伤木、明显竞争压迫且分子/活力评分较低个体。	清理后应保留必要枯落物生态功能，但降低病原积累和安全风险。

(三) 生态管护阶段：强化韧性建设

长期生态管护是确保防控成效可持续的关键环节。在林下管理方面，应根据实际情况适度控制禾本科等高密度草本植物的覆盖度，减少对水分和养分的过度竞争，并缩短地表湿润时间。同时，引入或保育多样化灌木层，构建层次分明、功能互补的植被结构，以提升林分整体生态韧性。

在病害疑似入侵或个别个体出现轻微症状时，应坚决避免“清场式采伐”。历史经验表明，在严重病害流行背景下，往往存在少数具有天然耐受性的个体。这些个体是维系种群长期适应能力的重要遗传资源。保护区管理应坚持精准识别、分类处置的原则，保留表现出耐受征象的个体，即便其存在轻度症状，也应纳入重点观察与保护对象。

6. 结论与建议

白蜡树对枯梢病的易感性受分子遗传潜力、个体生理活力、林分结构和区域生态环境的多重调节。新增的生态环境比较表明，新疆伊犁河谷与欧洲白蜡枯梢病疫区在河谷阔叶林、落叶层积累和局部湿润微生境方面具有一定相似性，但在区域气候上表现出半干旱、高蒸发和降水较少的差异。因此，伊犁保护区不宜简单等同于欧洲高适生疫区，也不能因总体偏干而忽视河岸、低洼、郁闭和幼龄密集林中的局部适生窗口。

基于上述分析，建议在新疆伊犁保护区构建“生态适生性评估 - 分子识别 - 活力提升 - 结构优化 - 生态调控”相结合的多层级防控框架。首先，持续完善分子监测网络与遗传档案数据库，按照候选基因类别、固定样地和年度采样制度开展早期识别；其次，通过分期轻度疏伐、林窗营造和郁闭度调控推进异龄林转化，使胸径结构逐步接近反 J 形并避免小径级过密；再次，加强林下植被调控与幼龄群体培育，降低高湿弱通风微环境的持续时间，提升整体生态韧性。

总体而言，应以近自然经营理念为指导，将生物安全预警融入日常森林经营与生态管护体系之中，

实现由被动防御向主动增强的转型。后续研究还应结合伊犁本地长期气象数据、林内微气候监测、落叶层病原存活试验和小叶白蜡候选基因验证,进一步校准本文提出的适生性判断和量化经营阈值。通过构建结构稳定、活力充足且遗传多样的森林生态系统,可为我国白蜡属植物资源的长期安全与可持续利用奠定基础。

参考文献

- [1] 李明阳, 营利荣, 刘礼. 紫金山风景林外来入侵物种潜在适生性评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2007(1): 99-103.
- [2] 兰倩, 吴水荣, 邬可义, 等. 近自然小流域森林经营理论与实践[J]. 世界林业研究, 2016, 29(2): 7-11.
- [3] Chan, A.H.Y., Barnes, C., Swinfield, T. and Coomes, D.A. (2021) Monitoring Ash Dieback (*Hymenoscyphus fraxineus*) in British Forests Using Hyperspectral Remote Sensing. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, **7**, 306-320. <https://doi.org/10.1002/rse2.190>
- [4] 中华人民共和国海关总署动植物检疫司. 中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录[EB/OL]. 2025-01-09 http://dzs.customs.gov.cn/dzs/2021-06/05/article_2025121509485453796.html, 2026-07-09.
- [5] 谭晓庆, 信晓萌, 王泽, 等. 潍坊市森林、草原、湿地生态系统外来入侵物种普查及防治策略[J]. 植物检疫, 2025, 39(4): 73-80.
- [6] 孙江华, 袁德成, 欧阳华. 外来入侵种及其对森林生态系统的威胁: 概念和对策[J]. 中国森林病虫, 2002(6): 32-35.
- [7] 刘秀琴. 孝义市森林、草原、湿地生态系统外来入侵物种现状及防控对策[J]. 中国林业产业, 2025(7): 66-68.
- [8] Zhu, Z., Kleinn, C. and Nölke, N. (2020) Assessing Tree Crown Volume—A Review. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, **94**, 18-35. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa037>
- [9] Ognjenović, M., Seletković, I., Potočić, N., Marušić, M., Tadić, M.P., Jonard, M., *et al.* (2022) Defoliation Change of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Depends on Previous Year Drought. *Plants*, **11**, Article 730. <https://doi.org/10.3390/plants11060730>
- [10] Zarnoch, S.J., Bechtold, W.A. and Stolte, K.W. (2004) Using Crown Condition Variables as Indicators of Forest Health. *Canadian Journal of Forest Research*, **34**, 1057-1070. <https://doi.org/10.1139/x03-277>