

人为干扰与自然火灾累积效应对森林再生能力的影响研究

李飞龙

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

森林再生能力是维持森林生态系统稳定性和可持续发展的关键基础。在全球气候变化及人类活动持续增强的背景下, 森林生态系统受到多种干扰因素的共同影响, 其中人为干扰与自然火灾的累积效应尤为突出。本文在梳理国内外相关研究成果的基础上, 系统分析了人为干扰与自然火灾之间的交互作用机制, 并结合新疆地区森林生态系统特征, 对复合干扰条件下森林再生过程进行了综合分析。研究表明, 多重干扰不仅会改变森林群落结构, 还可能通过破坏生物遗产、影响种子来源以及改变微生境条件等途径降低森林再生能力。新疆天山和阿勒泰山森林地区近年来多次发生森林火灾, 在火灾与人为活动叠加影响下, 部分区域森林恢复过程明显延缓。为提升森林生态系统恢复能力, 应加强火灾监测与预防、减少人为干扰、保护关键生境以及推进近自然森林经营管理。研究结果可为干旱区森林生态系统保护与恢复提供参考。本文进一步增加了跨区域案例综合表与复合干扰概念框架, 并在讨论部分比较不同生态系统中再生失败机制的异同, 提出“干扰强度-生态记忆-再生环节阈值”响应假说, 以增强综述的系统性、可比性和理论解释力。

关键词

人为干扰, 自然火灾, 累积效应, 再生能力, 新疆森林

Study on the Cumulative Effects of Anthropogenic Disturbances and Natural Fire on Forest Regeneration Capacity

Feilong Li

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

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

Abstract

Forest regeneration capacity serves as a fundamental basis for maintaining the stability and sustainability of forest ecosystems. Against the backdrop of global climate change and intensifying human activities, forest ecosystems are increasingly subjected to multiple disturbances, among which the cumulative effects of anthropogenic disturbances and natural fires are particularly prominent. Building upon a comprehensive review of domestic and international research, this paper systematically analyzes the interaction mechanisms between anthropogenic disturbances and natural fires. Integrating the specific characteristics of forest ecosystems in Xinjiang, it provides a synthetic analysis of forest regeneration processes under compound disturbance regimes. The findings indicate that multiple disturbances not only alter forest community structure but also impair regeneration capacity by degrading biological legacies, compromising seed sources, and modifying microhabitat conditions. In the forested regions of the Tianshan and Altai Mountains in Xinjiang, recurrent wildfires in recent years—exacerbated by concurrent human activities—have significantly delayed forest recovery in certain areas. To enhance ecosystem resilience, strategies such as strengthening fire monitoring and prevention, minimizing anthropogenic disturbances, protecting critical habitats, and promoting close-to-nature forest management are recommended. These results offer valuable insights for the conservation and restoration of forest ecosystems in arid regions. Furthermore, this review incorporates a cross-regional case synthesis table and a conceptual framework for compound disturbances. The discussion section compares the mechanisms underlying regeneration failure across different ecosystems and proposes a response hypothesis termed “Disturbance Intensity-Ecological Memory-Regeneration Threshold”, thereby enhancing the systematic rigor, comparability, and theoretical explanatory power of this synthesis.

Keywords

Anthropogenic Disturbance, Natural Fire, Cumulative Effects, Regeneration Capacity, Xinjiang Forests

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

森林生态系统的长期稳定，在很大程度上取决于其天然更新过程，即通过幼苗定殖与幼树招募不断替换老龄林木的自我维持机制[1]。然而，随着土地利用强度的增加，现代森林正面临着由人为干扰(如线性基础设施、野生动物过密采食)与自然火灾交织而成的复合干扰压力。这种干扰的累积效应[2]并非简单的线性叠加，往往表现为加性、主导或深度的交互作用。例如，北美北方森林中地震线与野火的耦合会显著改变植被演替路径，而在某些湿地生境中甚至导致演替停滞。

干扰累积效应不仅改变了植被的组成，还通过削弱土壤种子库的抗性、破坏地形驱动的生物避难所，使森林的自我修复潜力面临严峻挑战。目前，针对单一干扰的研究已较为成熟，但在多重压力背景下定量评估森林的再生能力，仍是生态学研究的难点。因此，本文旨在整合不同生物地理区的实证数据，深入剖析人为干扰与自然火灾对森林更新的制约机制，为受损生态系统的功能恢复与精准管护提供理论支撑。

2. 研究背景与研究区特征

2.1. 研究背景与意义

在全球范围内,土地利用变化是导致陆地生物多样性下降和自然栖息地碎片化的主要驱动力[3]。成熟森林作为全球生物化学循环的核心,在缓解全球变暖中发挥着不可替代的作用。然而,干扰历史的复杂化使得单一干扰研究已不足以解释当前的群落动态。干扰累积效应已成为评估森林韧性的核心指标。理解这些压力如何通过加性或交互方式作用于再生过程,对于清偿“生态债”具有重要意义[4]。

2.2. 区域概况与干扰历史

为了全面剖析不同生物地理特征下干扰因子对森林生态系统的复合影响,本研究整合并系统梳理了北美、南美、欧洲及亚洲等多个典型区域的野外调查与长效监测数据。这些研究点不仅覆盖了从高纬度北方森林到热带雨林、从老龄成熟林到次生恢复景观的多种生态系统类型,更提供了一个多维度的“自然实验场”,用以揭示人为地震线、大型蹄类动物采食、土地利用变化与自然野火等压力因子在不同空间尺度上的加性、主导及交互效应。通过对比这些迥异环境下的群落演替路径与招募特征,我们得以深入探讨全球森林再生能力衰退的普适性规律及区域特化机制。以下内容将具体阐述各代表性区域的地理概况、干扰演变规律及其对天然更新机制的具体调制作用。

北美北方森林的演替动态深刻受干扰严重程度与频率的影响,历史上主要由野火驱动其结构、组成及生物多样性[5]。然而,近年来人为干扰显著增加了演替的复杂性,尤其是在加拿大阿尔伯塔省的阿萨巴斯卡油砂地区。该区域遭受了极为密集的线性干扰,即石油与天然气勘探形成的“地震线”,其密度高达 40 km/km²。这些宽度在 3 至 10 米之间的狭长清空带不仅导致森林破碎化,更对受威胁的北方林地驯鹿栖息地造成了严重退化。研究表明,地震线对土壤和植被的初始物理破坏导致了长期的再生延迟,特别是在泥炭地和过渡带森林中,由于土壤冷湿,黑云杉等生长缓慢物种的定殖可能延迟超过 30 年。当这些受损景观遭遇野火这一基础演替因子时,两者之间产生了复杂的叠加效应。野火可能通过消除地震线带来的微地形差异来加速部分物种的初期招募,但在水分条件极端的生境中,干扰耦合可能导致演替停滞或轨迹偏移。本研究通过对 293 条不同林型的地震线及其相邻森林进行层化抽样,揭示了从单一干扰向自然与人为复合干扰转变下,北方森林早期演替中乔木与高灌木招募的响应模式。

在南美洲,森林生态系统正面临极端野火频率增加的严峻考验。在阿根廷中部山地,亚热带山地森林遭受了 2013 年“Calamuchita”特大火灾的重创,过火面积达 60,000 公顷[6]。这类高强度冠层火消耗了绝大部分地表植被,对生态系统韧性构成了巨大挑战。然而,地形驱动的“火灾避难所”在火烧景观中扮演了核心角色,它们保留了生物遗产,并作为森林再生的繁殖体源泉。研究发现,高质量避难所通常与地形平滑度、高海拔位置、高岩石覆盖率以及东向/北向坡面密切相关,这些因子通过切断燃料连续性和调节微气候,减缓了火灾严重程度。与此同时,巴西东部亚马逊热带雨林的“高地森林”正经历着由选择性砍伐、边缘效应和厄尔尼诺引发的极端干旱共同驱动的森林退化。在 Tapaj Arapiuns 采掘保护区,频繁爆发的人为诱导火灾已深入原始森林内部。尽管热带雨林的土壤种子库在面对首次火灾时表现出一定的抗火性,但其功能组成已发生显著漂移:耐阴的成熟林专家种(如桑科、樟科)严重缺乏,种子库迅速被短命先锋种和草本植物占据。这种“功能性贫瘠”意味着该区域森林的长期恢复高度依赖于外部未受灾源地的脊椎动物种子传播,而非自身的地下更新库。

欧洲成熟森林在调节生物地球化学循环和缓解气候变化中发挥着核心作用,但其天然更新能力正经历着广泛的衰退[7]。在英国境内跨度达 30 至 63 年的 16 个永久样点(如 Buckholt Wood、Lady Park Wood)的长效监测显示,成熟林的再生层正面临“再生失效”的风险。统计数据显示,过去 30 至 40 年间,小

树的招募率下降了,而幼树的死亡率却飙升了。这一趋势在包括栎属和欧洲赤松在内的多个优势树种中均有体现。尽管森林结构的自然成熟和郁闭度增加贡献了部分影响,但更深层次的驱动力来自多重外部压力的累积。暖冬导致了植物病原体(如栎属粉霉病、桤树枯萎病)严重程度的加剧,同时也改变了植物的抗逆性。此外,野生动物(特别是过度繁殖的鹿类)的采食压力已成为制约欧洲森林更新的关键瓶颈。在德国海彭海姆等地的实证研究中,利用无人机热成像技术精确记录到狍鹿密度超过 40 只/100 公顷,这种高强度的选择性采食导致具有高生态和林学价值的阔叶种(如枫木、橡木)在 20 至 130 厘米高度段的更新几乎停滞,使林分结构趋向同质化。

在中国东部恢复的温带森林景观中,森林覆盖率在经历 20 世纪的大规模砍伐后,通过保护残存片段、促进次生演替及大面积人工造林得到了显著回升[8]。然而,新建立的森林景观中物种群落的重新定殖模式表现出强烈的“区域特化性”[9]。基于对 159 个样地的步甲和植物调查,研究发现即便在物理连通的景观中,重定殖也并非来自广泛分布的泛化种,而是通过局部避难所幸存下来的森林特化物种进行缓慢招募。这反映出即便在森林 obliteration 后,局部微环境对生物多样性保留的重要意义,但也暗示了景观连通性不足可能带来的“生态债”清偿风险。与此形成对比的是,在塞浦路斯中部的半干旱布鲁提亚松疏林带,天然更新面临着极端干旱、高地表温度和过度放牧的双重压力。在这些缺乏野火干扰的“开敞”群落中,天然更新表现出极强的“促进作用”依赖性[10]。超过 90% 的幼苗必须在成年生长树或灌木(护土植物)的遮荫环境下才能成功建立,这些覆盖物通过降低土壤致死温 and 增加有机质,为松树幼苗提供了生存保障。一旦光照可见空域(VS 值)低于 0.2 的极度荫蔽或处于缺乏保护的裸地,天然更新将因物理胁迫或持续的家畜采食而彻底失败。

2.3. 研究方法

本研究遵循植被生态学、植物地理学及保护生物学的基本原理,通过整合多项科学考察数据,构建了从微观种子库到宏观景观尺度的综合监测体系。

在群落结构特征调查[11]方面,研究于各典型生物地理区设置了代表性的永久监测样地。乔木层样方统一设置为 20 m × 20 m,并在此基础上采用嵌套法设置灌木层样方(5 m × 5 m)与草本层样方(2 m × 2 m)。调查过程中,对样方内所有起测胸径(DBH) ≥ 3 cm 的乔木个体进行了逐一编号与定位,详细记录其种名、树高、胸径及冠幅等生长指标。物种鉴定工作由专家团队依据各地区的植物志与标本库完成,确保了分类学的准确性。

针对森林再生潜力的定量评估,本研究引入了基于人口统计学的人均速率估算法,重点关注幼树(5 cm ≤ DBH < 20 cm)与幼苗(DBH < 5 cm)的动态变化。年招募率与年死亡率(Mortality rate, M)的计算严格遵循 Kohyama 等[12]提出的离散时间公式,该模型通过 final-density-based 估算器显式校正了不同样地间不等的监测间隔,有效消除了时间尺度不一致带来的统计偏差。

在生物干扰监测的先进技术应用上,研究引进了无人机系统(UAS)热成像监测平台。利用 DJI Matrice 30T 飞行器搭载 640 × 512 像素的高灵敏度红外传感器,在 100~120 m 飞行高度下执行系统化的蛇形栅格航线。该技术能够在非侵入的前提下,利用动物个体与环境间的温差可靠探测大型蹄类动物(如鹿类、野猪)的密度与分布规律。通过激光测距仪与“精准点标记”功能,研究实现了热特征信号与高倍变焦影像的实时校核,极大提升了在复杂林分结构下监测野生动物采食压力的精确度。

为剖析环境因子对更新过程的物理调制作用,本研究采用了半球摄影技术进行光照分析。在每个样地及特定更新个体正上方 1.5 m 高度处拍摄全景半球照片,获取林冠郁闭度空间数据。通过 HemiView 专业分析软件计算可见天空占比,以此作为衡量林窗光照环境与地表有效太阳辐射接收量的核心指标。该方法能够精确捕捉干扰后林下微气候的变化,进而揭示光照利用效率与幼苗存活率之间的阈值关系。

在地下更新潜力的实验研究中，通过温室发芽试验对土壤种子库进行了深度解析。研究于样地内随机采集深度为 0~5 cm、面积为 20 cm × 20 cm 的表层土壤样本。样本转运至受控温室后铺设于带有蛭石层的排水托盘中，在 50%遮荫条件下维持土壤湿润，并进行了为期 6 个月的持续监测。试验期间每 3 个月进行一次翻土扰动以破除种子休眠，逐日记录萌发幼苗的种类、数量及演替策略(如短命先锋种或长命树种)，从而评估森林在经历火烧或人为干扰后的地下生物遗产保留状态。

在完成研究方法说明后，本文首先将各区域案例进行横向归纳，再进入具体机制分析。这样处理的目的，是把分散在不同生物地理区的实证研究转化为可比较的证据链：表 1 用于呈现案例层面的基础信息和核心结果，表 2 进一步将这些案例提炼为不同复合干扰类型及其对应的再生受限环节。

Table 1. Comprehensive comparison of key information of complex interference cases
表 1. 复合干扰案例的关键信息综合比较

地理位置与森林类型	主要干扰因子	复合方式	对再生的核心影响 (量化指标)	关键机制	文献来源
加拿大阿尔伯塔省阿萨巴斯卡油砂区；北方泥炭地与高地森林	地震线性清理、土壤扰动、自然野火	在泥炭地表现为加性效应，在山地森林中火灾具有较强主导效应	烧后地震线内林木及高灌木再生密度可达 101,695 株/hm ² ，但进入更高层级的幼树招募中位数仍为 0	线性干扰破坏微地形与土壤水文；火灾短期释放空间，但冷湿土壤和营养限制导致演替停滞	[2] [5]
阿根廷中部山地 Calamuchita；亚热带山地森林	高强度特大火灾、地形与燃料连续性差异	火灾压力与地形避难所形成缓冲/拮抗关系	高质量火灾避难所多与高海拔、平滑地形和 82%~92%岩石覆盖相关	岩石覆盖中断燃料连续性，坡向与海拔调节微气候，保留活体种源和生物遗产	[6]
巴西东部亚马逊 Tapajós-Arapiuns；高地热带雨林	选择性砍伐、边缘效应、干旱、人为诱导火灾	协同效应，表现为火灾与退化背景共同降低长期恢复潜力	土壤种子库平均萌发密度约 837.5 粒/m ² ，草本植物丰度增加 8%、短命先锋种增加 4%	种子库密度保持但功能组成贫瘠；成熟林大种子和脊椎动物传播种缺失，长期恢复依赖外部源地	[4]
英国半自然成熟林；阔叶与针阔混交成熟林	暖冬、植物病原体扩散、鹿类采食、林冠结构变化	协同效应，气候-病原-采食共同压低更新成功率	近 30~40 年内小树招募率下降 46%，幼树死亡率上升 90%，幼木密度缩减约 70%	暖冬提高病原体越冬与传播概率；采食压力切断幼树向小树阶段的过渡	[7]
德国海彭海姆森林；欧洲成熟林更新层	高密度狍鹿采食与林下更新结构差异	生物干扰对幼树生长阶段形成强选择性过滤	狍鹿密度超过 40 只/100 hm ² 时，20~130 cm 高度段更新个体受强采食限制	采食线导致枫木、橡木等高价值阔叶树种难以突破幼树阶段，林分趋向同质化	[13]
中国东部恢复温带森林；次生恢复景观	历史砍伐、景观破碎化、局部生境丧失	干扰遗留效应与局部避难所共同决定重定殖	55%的步甲物种和 66.4%的植物物种仅在单一区域出现	森林特化种主要依赖微型避难所幸存并缓慢扩散，重定殖具有显著区域特化性	[3] [8]

由表 1 可见，不同区域的复合干扰类型存在明显差异，但均通过改变种源供给、微生境质量和幼树招募过程影响森林再生能力。其中，北美地震线 - 野火案例突出线性干扰与火灾的加性效应及生境基质限制；英国成熟林案例突出气候变暖、病原扩散与野生动物采食之间的协同效应；亚马逊和南美山地森林案例则强调土壤种子库功能退化与火灾避难所保护的重要性。

在表 1 完成案例层面的横向比较后，表 2 进一步从机制层面对这些证据进行概括。该表不再按区域排列，而是按复合干扰的作用方式进行分类，分别对应加性、协同、拮抗/缓冲、主导效应和阈值转换等类型，并将其影响落实到种子库、幼苗定殖和幼树生长三个再生环节。

Table 2. Influence matrix of interaction between human disturbance and natural fire on forest regeneration link
表 2. 人为干扰与自然火灾交互作用对森林再生环节的影响矩阵

交互类型	判定标准	种子库影响	幼苗定殖影响	幼树生长影响	典型与管理含义
加性效应	两类干扰的影响方向相同，综合结果近似等于单独效应之和	降低局部种子输入，或在火后促进先锋种短期积累	增加裸地与光照，但可能同步提高水分胁迫	在土壤限制强的泥炭地中仍难以形成有效招募	加拿大泥炭地地震线+野火显示高密度再生但招募中位数为 0；管理上需同步修复水文和微地形[2] [5]
协同效应	两类干扰共同作用强于单独作用之和，常导致阈值越界	种子库由成熟林物种转向先锋种和草本种	病原、干旱或高温使幼苗死亡率升高	采食与病害共同阻断幼树进入小树阶段	英国成熟林中招募率下降 46%、幼树死亡率上升 90%；管理上需同时控制病原、采食和微气候压力[7]
拮抗/缓冲效应	一种因子削弱另一种因子的负效应，或为恢复保留生态记忆	避难所保存活体种源和局部种子输入	护士植物或岩石地形降低温度和水分胁迫	保留更新核心区，维持局部补充种源	阿根廷山地火灾避难所和塞浦路斯护士植物均显示缓冲作用；管理上应保护避难所和促进性植被结构[1] [6]
主导效应	某一强干扰因子掩盖另一因子的影响，决定短期更新方向	强火烧后先锋种占据种子库和萌发层	强光条件短期促进先锋树种定殖	若后续竞争或采食压力过强，可能转为停滞	高地森林中火灾可短期掩盖线性干扰负效应；管理上需区分短期密度恢复与长期结构恢复[2]
阈值转换	干扰强度或频率超过生态记忆承载范围，恢复轨迹发生偏移	成熟林专家种缺失，种子库功能同质化	幼苗只在特定光照或遮荫阈值内存活	幼树长期停留在采食线以下或灌丛阶段	当 $VS < 0.2$ 或采食压力超过承载阈值时，更新可能失败；管理上应建立阈值监测和主动补植机制[10] [12] [13]

结合表 1 和表 2 的归纳可知，线性干扰与火灾的耦合效应既取决于干扰类型，也受到泥炭地、高地森林等生境基质的调节。

3. 人为干扰与火灾对植被特征的累积影响

3.1. 线性干扰与火灾的交互作用

在北美北方森林(加拿大阿尔伯塔省)，地震线作为一种典型的人为线性干扰，不仅造成了森林物理景观的破碎化，更深刻改变了地表的微生境特征。这些宽度介于 3 至 10 米之间的狭长清除带，通过机械操作改变了微地形与土壤含水量，尤其在泥炭地和过渡带森林中，冷湿的土壤条件显著抑制了如黑云杉等生长缓慢树种的早期定殖，导致其天然再生过程可能产生超过 30 年的显著延迟。

当此类已经受损的景观遭遇自然野火这一基础演替因子时,生态系统展现出了复杂的累积效应。研究发现,在泥炭地森林中,地震线与野火之间表现出明显的“加性效应”。统计数据显示,火灾显著刺激了早期演替物种的爆发,使得烧后地震线内的林木及高灌木再生密度剧增,平均达到了 101,695 株/公顷,远高于未受干扰的原始林。

然而,这种密度的激增并未转化为有效的林分修复潜力,反而揭示了一种演替陷阱。尽管再生数量庞大,但在泥炭地的地震线生境中,幼树成功招募进入更高层次的中位数密度依然为零。这意味着,虽然火灾在短期内消除了地震线的部分微地形差异并促进了萌蘖,但由于土壤冷湿及营养限制的持续存在,森林仍处于“演替停滞”状态,无法顺利从灌丛阶段过渡到幼龄林阶段。

相比之下,在水分条件较好的高地森林中,火灾的主导效应更为明显,它能够通过增加光照利用率刺激颤杨等先锋树种的招募,从而在一定程度上掩盖线性干扰的负面影响。这种区域特化性的响应模式强调了在评估人为干扰与自然灾害的交互作用时,必须充分考虑生境基质的差异。这种长期存在的招募瓶颈不仅威胁到森林结构的完整性,也为北方林驯鹿等敏感物种的栖息地修复带来了持久的挑战。

3.2. 生物干扰与环境压力的叠加驱动

在欧洲成熟森林生态系统中,大型有蹄类野生动物的采食压力已演变为一种关键的场址改变因子,对植被结构及森林的再生能力产生了深远影响。长期监测数据表明,这种生物干扰并非独立存在,而是与环境压力相互交织,构成了森林更新失败的复合驱动力。

首先,高密度的有蹄类动物种群对特定树种造成了显著的招募瓶颈。以德国海彭海姆森林为例,利用无人机(UAS)热成像技术的精准监测显示,当狍鹿的分布密度超过 40 只/100 ha 时,森林下层的更新结构发生了剧烈震荡。这种高压采食具有显著的高度选择性,主要集中在 20~130 cm 的关键高度段,这也是有蹄类动物最易触及的采食范围。在此高度范围内,具有高度生态与林学价值的树种,如桤叶枫和无梗花楸,其更新密度呈现断崖式下降,甚至在部分样区完全消失。相比之下,仅有少量如欧洲赤松等耐受性较强的个体能突破该采食线,导致林分结构趋向严重的同质化。

其次,生物干扰与气候波动(尤其是暖冬现象)产生的叠加效应进一步侵蚀了森林的自我修复潜力。这种协同作用在英国成熟林的长期研究中得到了实证:在过去 30 至 40 年间,小树的招募率下降了 46%,而幼树的死亡率却飙升了 90%。研究发现,最冷月平均气温的升高与招募率的下降存在显著相关性。暖冬不仅直接改变了植物的物候,更通过缓解低温约束,显著提高了白粉病、蜜环菌以及桤树枯萎病等植物病原体的越冬存活率与传播速率。在招募阶段,幼苗不仅要应对高强度的采食压力,还要面对因病原体爆发而显著增加的易感性,这种“内外夹击”的压力累积导致了大规模的更新失败。

最后,这种干扰累积效应不仅改变了当前的物种组成,还削弱了森林应对未来气候挑战的适应能力。重复性的采食不仅通过去除顶芽导致幼树畸形或生长停滞,还会消耗其根部的淀粉储备,使其在面对极端干旱或病害侵袭时缺乏必要的抗性资源。这种生物与非生物压力的深层交互,使得受损森林的再生过程不仅是密度的减少,更是遗传多样性与功能多样性的丧失,对全球变化背景下森林生态系统的长期稳定性构成了严峻挑战。

3.3. 落组成与物种周转特征

干扰累积效应不仅改变了森林的物理结构,更深刻地重塑了群落的物种组成与周转模式。调查发现,在受人为干扰明显的南亚热带常绿阔叶林(如广东佛冈观音山省级自然保护区)中,植被表现出极强的次生性特征。在海拔 100~850 m 的地带性植被中,虽然华润楠、鹅掌柴和蕈蕨等物种在重要值上占据优势,但群落结构失衡显著。实测数据显示,成年大树在群落中的比例极低,例如在木荷 + 罗浮柿 + 红

楠林中,胸径大于 40 cm 的个体仅占极少数,而大量比例为 20 cm 以下的幼树,这反映了长期人为干扰后森林仍处于早中期的次生演替阶段。

在中国恢复的温带森林景观中,物种的重新定殖模式进一步揭示了干扰对生物多样性的深远影响。针对步甲群落与维管植物的对比研究表明,新形成的森林林分并非如传统预期般由广泛分布的“泛化种”(Generalists)占据,而是表现出高度的区域特化性。这一发现明确排除了“广泛分布泛化种”假说,证明即便在物理连通的森林景观中,物种周转依然剧烈。研究显示,高达 55% 的步甲物种和 66.4% 的植物物种仅在单个研究区域内发现,这种极高的 β -多样性说明森林专家种并未在干扰中彻底灭绝。

这种高度区域化的招募模式强调了“生物遗产”(Biological legacies)与局部避难所(Refugia)在复合干扰环境下的核心价值。当地森林专家种主要依靠在景观破碎化过程中幸存的微型避难所(Microrefugia)得以存续,并在干扰压力缓解后缓慢扩散。这种机制的成功运作在很大程度上取决于干扰的持续时间;例如,中国森林从大规模砍伐到重新建立的周期相对较短,使得许多物种在“生态债”(Extinction debt)被完全清偿前就实现了回迁。

此外,植物群落与无脊椎动物群落之间的强耦合关系决定了物种周转的轨迹。结构方程模型(SEM)分析证实,植被组成的区域变化是步甲群落周转的关键预测因子,其解释力甚至超过了地理距离与海拔梯度。这意味着,如果人为干扰导致了植被同质化,那么依赖于特定植物结构与微气候的特化动物群落将面临系统性崩溃。因此,在复合干扰景观中,保护那些零星分布且具有高度物种特化性的局部生境,对于维持区域生物多样性及生态系统的完整性具有至关重要的意义。

4. 森林再生能力的响应规律与限制机制

4.1. 再生动态指标演变

通过对英国境内的 9 个成熟林研究站点、16 个永久监测样地进行跨越 30 至 63 年的长效追踪,本研究发现,这些森林生态系统的天然更新能力在近几十年间呈现出“断崖式”下跌的态势。这种衰退不仅表现在更新密度的绝对下降,更通过招募率与死亡率这两个核心人口统计学指标的剧变得到了实证。

在林分结构的垂直演替中,小树($5\text{ cm} \leq d < 20\text{ cm}$)的招募受阻已成为普遍现象。统计数据显示,自 20 世纪 80 年代以来,该尺寸级树木的年均招募率在 8 个站点中平均下降了 46%。除了苏格兰克雷盖拉希的一处桦木林表现出招募增加外,其余绝大多数半自然成熟林均面临严重的招募瓶颈。这种招募受阻直接导致了森林层次结构的断层,使得老龄林木凋亡后缺乏足够的后续梯队进行补充。

林分底层幼木($d < 5\text{ cm}$)的存活压力急剧上升,死亡率呈现激增态势。长期监测记录到,幼木的年均死亡率在过去 3 至 4 个十年间飙升了 90%。在某些特定样地,如丹德尔斯林和丹尼林,自 1995 年以后记录的所有新生幼木及此前存活的个体在 2022 年复查时几乎全部死亡。受此影响,直径小于 5 cm 的幼木密度在全英范围内缩减了约 70%,预示着该区域森林未来可能陷入“更新停滞”的风险。

值得注意的是,这种同步性的衰退在排除结构成熟因素后依然显著存在。按照传统的演替理论,森林成熟导致的林冠郁闭度增加和断面积提升会自然抑制底层光照,从而降低更新成功率。然而,本研究的 GLMM 模型分析显示,衰退最严重的招募瓶颈往往出现在原本最适合更新的中低密度林窗区域(断面积介于 $5\sim 15\text{ m}^2/\text{ha}$)。这意味着林冠闭合等自然演替过程已不足以解释如此大规模的再生失效,森林系统已受到更深层次外部因子的调制。

综合分析表明,外部累积干扰的影响已显著超出了森林系统的自调节阈值。其中,气候变暖与病原体爆发的协同效应被认为是关键推手。冬季最冷月气温的显著升高与招募率下降呈正相关。暖冬不仅扰乱了植物生理节律,更关键的是减轻了低温对白粉病、蜜环菌及桤树枯萎病等植物病原体的制约,导致

病害在幼苗阶段的爆发强度和致死率大幅增加。此外,长期处于高位的野生动物(尤其是鹿类)采食压力进一步剥夺了耐阴树种的生存机会。这种由气候波动、病虫害侵染与生物采食压力交织构成的复合压力,使得英国成熟林在生物地理尺度上表现出一致的再生能力衰退,对森林生态系统的长期韧性与碳汇功能的稳定性构成了严峻挑战。

4.2. 土壤种子库的抗性与恢复局限

亚马逊高地森林的实证研究揭示了森林地下“更新库”在干扰下的双重响应特征:即物理密度的稳定性和功能组成的严重退化。调查数据显示,该区域土壤种子库平均萌发密度高达 837.5 粒/m²,部分样本甚至超过 1000 粒/m²。研究发现,野火干扰(无论是单次还是两次过火)对种子库的总体密度和物种丰富度并未产生显著的抑制作用,这表明热带雨林的土壤种子库在面对初期火灾时具有较强的物理抗火性。

然而,种子库在物理层面上的“韧性”掩盖了其功能维度的深刻损伤,表现为一种“功能性贫瘠”。无论是在未受火烧的原始林还是火烧后的群落中,土壤种子库均表现出极高的物种同质化特征,仅有极少数光需求高的先锋种占据主导地位——其中 2 至 3 个物种即贡献了超过 80% 的种子总量。关键的发现是,土壤种子库中完全缺乏成熟林特有的专家物种,尤其是那些在原始林中占据核心地位、由脊椎动物传播的大种子耐阴树种,如桑科、樟科、五加科和柿科。

这种地下更新潜力与地上群落组成的严重脱节,根源于成熟林物种的生理特征与演替策略。绝大多数成熟林专家物种具有中大型种子(长度 > 1.5 cm),且多为顽拗性种子,这类种子在落入地表后会立即萌发或由于极高的含水量而对高温极其敏感,无法长期在土壤中休眠。此外,地表种子还面临严重的脊椎动物和昆虫采食压力。相比之下,能够进入种子库的通常是小粒径、长寿命的先锋种种子,它们能迅速被枯落物覆盖并进入土层,从而躲避火灾引起的剧烈升温。

干扰进一步加速了种子库向低功能状态的偏移。数据表明,火灾导致草本植物丰度增加了 8%,短命先锋种种子数量增加了 4%,而灌木和脊椎动物传播种子的比例则显著下降。这种“分类学同质化”和“功能同质化”意味着,火灾后的森林早期演替主要由土壤种子库驱动,但长期的功能恢复——即向高生物量、高多样性的成熟林演替——则高度依赖于外部源地的种子输入。

在现代破碎化的景观背景下,这种再生机制的局限性预示着严重的功能性灭绝风险。森林再生的完整性取决于外部未受损森林源地的存在以及与其共生的脊椎动物传播者(如哺乳动物和大体型鸟类)的迁徙。如果景观连通性由于人为干扰(如线性地震害线或持续采食)持续受损,或者由于过度狩猎导致食果动物群落崩溃(空林现象),受损森林将失去获取“生物遗产”的途径。这与南美亚热带山地森林中强调的地形驱动型“火灾避难所”的作用相呼应:避难所不仅是活体植株的保存地,更是支撑区域森林更新的唯一“遗传泵”。因此,若不优先保护这些关键的源地和生物扩散通道,单一依靠自然种子库的森林将面临不可逆转的演替轨迹偏移,最终退化为低功能的灌草群落。

4.3. 环境因子对更新的物理与生物调制

环境因子通过复杂的物理与生物机制,深度调制着干扰后森林生态系统的天然更新过程,其中促进作用、光照阈值及地形避难所发挥了核心的调控功能。在极端严酷的生境下,物种间的促进作用成为更新成败的决定性因素。以塞浦路斯中海拔半干旱布鲁提亚松疏林为例,研究发现超过 90% 的幼苗并非在开阔地建立,而是通过由成年松树或低矮灌木形成的“护土植物”遮荫机制得以存续。这种生物调制机制通过物理手段降低了地表的极端高温(常高于土壤致死温度),并有效增加了表层土壤的有机质含量和养分水分,从而抵消了长期干旱干扰对幼苗招募的负面影响。这一发现有力支撑了生态学中的应激梯度假说,即在逆境生境中,物种间的正向促进作用将取代竞争成为群落重构的主导力量。

光照环境作为天然更新的“硬约束”因子，存在着明确的物理量化阈值。利用半球摄影技术分析发现，可见天空占比对布鲁提亚松的天然更新具有严格的限制：当 VS 值低于 0.2 的极度荫蔽环境时，更新个体几乎绝迹，这表明该物种在人为干扰导致的林冠结构失衡中表现出强烈的避荫反应。尽管该树种在建立初期表现出一定的光照适应广度(VS 值范围 0.2~0.9)，但随着个体发育，其光需求显著增加，VS 值维持在 0.45 左右(如中等生产力样地)更有利于更新群落的稳定。这种光利用效率的阈值效应不仅决定了林窗内更新的空间格局，也为通过营林干预(如疏伐调整林冠开阔度)促进森林再生提供了精准的数据支撑。

在应对特大火灾等剧烈自然干扰时，地形驱动的物理避难所为森林留存了关键的“遗传火种”。针对南美洲亚热带山地森林的研究首次刻画了高质量火灾避难所的拓扑特征：这些区域并非随机分布，而是集中于地形平滑、高海拔位置以及岩石覆盖率极高的地段。其中，岩石覆盖(其在高质量避难所中占比达 82%~92%)发挥了至关重要的物理屏障作用，通过中断易燃燃料的连续性，保护了避难所内的种子源不被大火吞噬。此外，由于东向和北向坡面在下午受到的日照辐射较少、蒸发量较低，这些特定的地形微生境极易演化为高质量的更新源地，在干扰后持续向周边受损区域输送繁殖体，从而保障了整个景观尺度上的生物多样性存续与生态功能恢复。

5. 讨论

5.1. 不同生态系统中再生失败机制的异同

从比较结果看，不同森林生态系统的再生失败均可归结为“繁殖体来源受限、幼苗建立受限和幼树晋级受限”三个连续环节，但主导机制在不同生态系统之间存在明显差异。北美北方森林的关键限制在于线性干扰造成的微地形和水文改变，即使火后短期萌发密度较高，冷湿土壤和泥炭地营养限制仍会使幼树难以进入更高生长层级。热带雨林的主要问题并非种子库数量不足，而是种子库功能组成退化，成熟林专家种和大种子脊椎动物传播种缺失，使恢复高度依赖外部未受损源地。欧洲成熟林的再生失败则更多体现为生物压力和气候压力叠加：暖冬增强病原体存活与传播，鹿类采食切断 20~130 cm 高度段幼树的生长通道，最终导致招募率下降和死亡率上升。半干旱地中海型松林的限制机制又不同，其幼苗定殖高度依赖护土植物、遮荫和适宜光照阈值。由此可见，复合干扰下的再生失败并非单一过程，而是由“地下种子库 - 地上种源 - 微生境 - 幼树晋级”链条中最薄弱环节决定。

共同性方面，各案例均说明生物遗产和生态记忆是森林韧性的核心基础。无论是南美山地森林的火灾避难所、中国恢复温带森林中的微型避难所，还是亚马逊森林对外部源地和脊椎动物传播者的依赖，都表明受损森林能否恢复，取决于干扰后是否仍保留足够的种源、活体植株和功能传播网络。差异性方面，寒温带和北方森林更容易受土壤温湿条件、泥炭地水文和线性破碎化控制；热带森林更容易出现功能性种子库贫瘠和传播网络断裂；欧洲成熟林则表现为采食、病原和气候变暖的协同限制。因此，管理措施不能简单套用同一恢复模式，而应针对主导限制环节进行分区诊断。

5.2. 复合干扰下森林再生响应的理论假说与概念模型

基于本文综述证据，可提出“干扰强度 - 生态记忆 - 再生环节阈值”假说：森林在复合干扰下的再生响应取决于干扰强度、干扰频率和生态记忆保留程度三者之间的平衡。当干扰强度较低且避难所、种子库和传播者网络仍然存在时，森林表现为延迟恢复，即更新密度或速度降低，但演替方向基本保持。当人为干扰与火灾、采食、病原或干旱形成协同效应，并导致某一关键环节越过阈值时，系统进入再生瓶颈阶段，如幼苗能萌发但无法定殖，或幼树长期无法突破采食线。当多个环节同时受限，且外部种源与生态记忆不足时，森林将发生轨迹偏移，可能由乔木优势群落转向灌丛、草本或低功能次生群落。

该假说可概括为三个判断命题：第一，若种子库仍具备功能多样性且外部种源连通，复合干扰的影响多表现为恢复延迟；第二，若幼苗微生境或幼树晋级阶段受到单一强限制，系统表现为阶段性招募瓶颈；第三，若种子库功能贫瘠、避难所丧失、传播者缺位且采食或病原压力持续存在，则再生过程将发生方向性偏移。图 1 所示概念框架可作为后续实证研究的分析模板，即分别量化种子库、幼苗定殖和幼树生长三个环节，并检验加性、协同和拮抗效应在不同生态系统中的相对贡献。

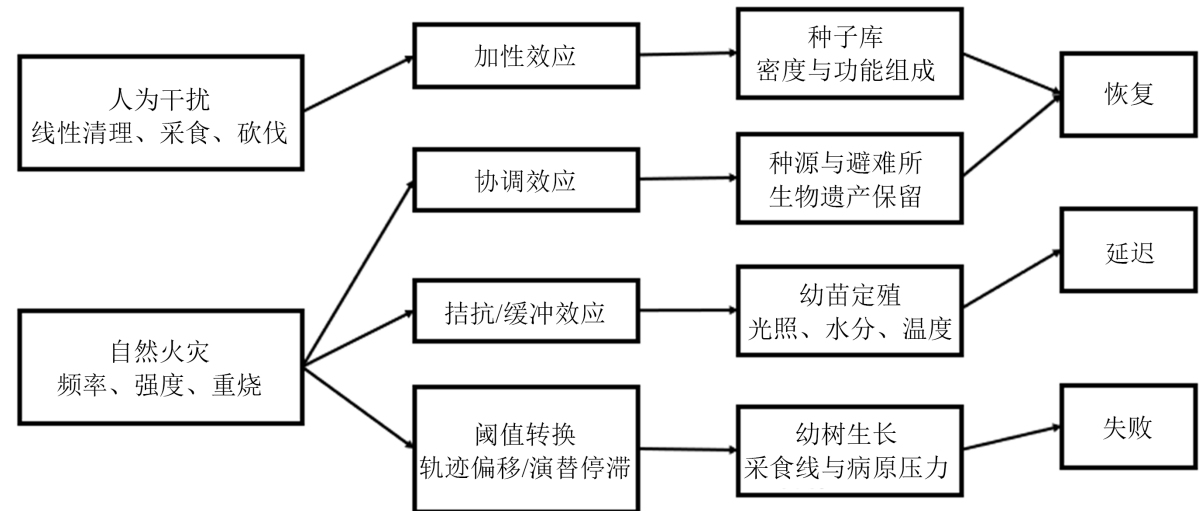


Figure 1. Conceptual framework of the interaction between human disturbance and natural fire affecting forest regeneration
图 1. 人为干扰与自然火灾交互作用影响森林再生的概念框架

5.3. 知识空白与未来研究方向

当前研究仍存在四方面知识空白。第一，复合干扰研究多集中于个别案例，缺乏跨气候带、跨森林类型的统一指标体系，导致不同研究之间难以进行定量比较。未来应统一记录火烧强度、干扰历史、种子库功能组成、幼苗密度、幼树晋级率、采食强度和病原压力等核心指标。第二，对交互作用类型的识别仍偏定性，未来需要通过长期样地、结构方程模型、贝叶斯层级模型或实验操控设计，区分加性、协同、拮抗和主导效应。第三，地下种子库、地上种源和动物传播网络之间的耦合关系研究不足，尤其缺少对“空林化”、传播者减少和外部源地距离的综合评估。第四，管理干预的阈值尚不清晰，例如有蹄类动物密度、林窗光照、VS 值、火灾重现间隔和补植密度等指标需要结合地区树种和生境条件进一步校准。

未来研究可从三个方向推进：一是建立复合干扰长期监测网络，将遥感、无人机热成像、样地调查和种子库实验结合起来，形成从景观到个体的多尺度证据链；二是开展干扰组合实验，例如设置火烧强度、采食排除、人工补种和林窗调控的交叉处理，以直接检验再生瓶颈所在环节；三是构建面向管理的风险分级模型，将生物遗产保留度、关键树种更新率、采食压力和微气候阈值纳入同一预警框架，为封育、补植、猎控和防火规划提供可操作依据。

5.4. 本综述的局限性

本综述仍存在一定局限。首先，文献来源以已发表的典型案例和长期样本的研究为主，可能存在发表偏倚，即显著结果或极端案例更容易被纳入，而恢复成功但影响较弱的案例相对不足。其次，案例代表性仍有限，虽然涵盖北方森林、热带雨林、欧洲成熟林和半干旱松林，但对非洲、西亚和中亚干旱区森林的实证证据覆盖不足，因此结论不宜直接外推到所有森林类型。第三，不同研究使用的再生指标并

不完全一致,有的强调种子库密度,有的强调幼苗存活率、幼树招募率或物种组成变化,这会影响综合比较的精度。第四,部分案例的干扰历史较复杂,火灾、采食、病原、气候波动和土地利用变化往往同时存在,现有资料难以完全分离单一因子的因果效应。因此,本文提出的概念模型应被视为解释框架和假说工具,仍需后续长期监测和实验研究进一步验证。

6. 结论与建议

6.1. 结论

总体而言,本文修改后形成了“案例综合比较-交互机制归纳-概念模型构建-管理策略转化”的逻辑链条。综合表明,复合干扰对森林再生的影响具有阶段性和阈值性:种子库功能退化会削弱潜在更新来源,幼苗微生境恶化会降低定殖成功率,而采食、病原或水分胁迫则会限制幼树晋级。只有在保护避难所和生物遗产的基础上,同时降低人为干扰强度并开展针对性修复,森林系统才可能从“再生延迟”重新转向“结构恢复”。

通过对不同生物地理区森林生态系统的深入剖析,得出了一系列关于干扰响应与天然更新机制的关键结论。首先,研究证实了人为干扰与自然火灾的累积效应是导致森林再生失效的核心诱因。这种复合压力并非简单的线性叠加,而是往往表现为复杂的加性或交互作用,例如在北美北方森林中,人为地震线的物理破坏与周期性野火相结合,在泥炭地生境中造成了显著的演替停滞,即便烧后幼苗密度激增,也难以转化为有效的招募。与此同时,英国成熟林长达数十年的监测数据为全球森林韧性敲响了警钟,记录到的招募率大幅下降(46%)和幼树死亡率激增(90%)表明,当气候变暖、病原体扩散与野生动物采食压力多重交织时,森林生态系统的自维持机制将面临崩溃风险。这种同步性的衰退意味着干扰累积效应正在全球尺度上侵蚀成熟林的结构完整性。

其次,本研究强调了生物避难所在决定干扰景观生物价值中的决定性作用。在受损森林的恢复过程中,重定殖模式并非如传统预期的那样由广泛分布的泛化种主导,而是表现出高度的区域特化性。中国温带森林的实证研究表明,森林专家种和特化步甲群落主要依靠在景观破碎化中幸存的微型避难所得以保留,这直接驳斥了“广泛分布泛化种”假说。进一步的地形分析显示,高质量的火灾避难所通常分布在地形平滑、高海拔以及岩石覆盖率极高的区域,这些区域通过中断燃料连续性保护了生物遗产,成为干扰后物种回迁的唯一源头。因此,森林恢复的成功与否,本质上取决于局部避难所中特化种群的存续状态,而非泛化种的迁入。

最后,技术赋能的精准监测已成为应对随机性干扰、预防再生失败的必要前提。传统的样地调查在处理大规模、随机发生的生物干扰(如野生动物采食)时表现出明显局限,而引入无人机(UAS)热成像技术则为野生动物与森林再生的动态关联提供了新的量化手段。研究发现,当大型蹄类动物密度超过临界阈值(如 40 只/100 ha)时,特定高度段(20~130 cm)的敏感树种更新会发生系统性中断。此外,通过半球摄影技术对光照环境(如 VS 值阈值)的精确控制,结合对微气候调节机制(如护士植物的促进作用)的理解,可以为受损生态系统的恢复提供科学的营林指南。综上所述,未来的森林管理必须从被动监测转向基于先进技术的证据支撑管理,通过优先保护生物遗产源地并实施针对性的生物干预,方能保障森林生态系统的长期韧性与可持续性。

6.2. 管理与建议

基于不同生物地理区干扰响应与天然更新机制的研究结果,本研究提出以下针对性的森林管理与修复对策:

1. 实施精准管护与物理隔离策略。研究证实,大型蹄类动物(如鹿类)的过度采食已成为森林再生失

效的主要生物限制因子,尤其是在有蹄类密度超过 40 只/100 ha 的区域,幼树面临严重的招募瓶颈。因此,在野生动物采食压力突出的林区,必须建立物理围栏以有效阻隔动物接触,确保目标树种(如具有高林学价值的橡木、枫木)的发育高度能够顺利超过 130 cm 的“采食线”。对于保护区内的极度珍稀或更新极其困难的物种,如软荚红豆和桫欏,应建立“点对点”的精准监测与保护档案,通过减少干扰和监测天然更新的有效性来促进重点保护植物的发育。在被评估为再生潜力较低的重度灾区,应由被动恢复转为主动补植,引入外部未受损源地的关键物种以补齐群落功能短板。

2. 优先划定并保护地形驱动的生物避难所。地形特征是决定大火后生物遗产能否存续的关键,高质量的火灾避难所通常集中在地形平滑、高海拔以及岩石覆盖率极高(如 82%~92%)的地段。这些岩石覆盖区通过中断燃料的连续性,形成了天然的防火屏障,保护了避难所内的种子源不被大火吞噬。在制定长期的造林、封育及防火计划时,森林管理部门应优先将这些具有优越坡向(如受辐射较少的东向坡)和地形特征的地段划定为“种子库保护核心区”。这些避难所不仅是活体植株的保存地,更是支撑周边受灾景观规模化修复的唯一“遗传泵”,对于维持区域生物多样性具有不可替代的价值。

3. 构建动态监测体系并实施自适应狩猎管理。传统的样地调查已难以应对随机性干扰的复杂影响,应推广利用无人机搭载高分辨率红外热成像传感器(如 DJI Matrice 30T)进行年度野生动物普查。这种非侵入式技术能够精确量化有蹄类动物的密度与空间分布热点,为管理决策提供高时空分辨率的数据支持。管理部门应根据基于现场调查计算出的“更新指数”——即综合考量单次和多次采食损害的量化指标——来动态调整年度狩猎配额或森林经营计划。当监测显示更新指数超出系统承载阈值时,应及时加强生物干扰管控,以缓解动物采食对森林韧性的侵蚀。

4. 开展针对气候波动的“前瞻性修复”与光照管理。暖冬和气候极端事件正通过加剧植物病原体(如白粉病、枯萎病)的传播速度,显著提高幼苗在招募阶段的死亡率。在这种背景下,单纯依赖林冠闭合后的自然演替往往会导致耐阴性较差或抗逆性弱的物种消失。林业实践中应引入“自适应林学”手段,在林窗边缘提前通过选择性疏伐来调整光照环境,确保光照可见空域维持在物种生长的适宜阈值内(如 0.2~0.9 之间)。这种人为的微气候调节能够增强林下幼树的生理抗逆性,抵消由于暖冬带来的病害压力及干旱干扰的负面影响,从而在环境波动的挑战下保障森林生态系统的长期稳定。

参考文献

- [1] Fyllas, N.M., Dimitrakopoulos, P.G. and Troumbis, A.Y. (2008) Regeneration Dynamics of a Mixed Mediterranean Pine Forest in the Absence of Fire. *Forest Ecology and Management*, **256**, 1552-1559. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.046>
- [2] Sutherland, C.M. and Nielsen, S.E. (2025) Early Succession across Boreal Forest Transitions after Linear Disturbance and Wildfire. *Forests*, **16**, Article 1333. <https://doi.org/10.3390/f16081333>
- [3] 李木子. 全球森林正面临同质化威胁[N]. 中国科学报, 2026-02-11(002).
- [4] Johnstone, J.F., Allen, C.D., Franklin, J.F., Frelich, L.E., Harvey, B.J., Higuera, P.E., *et al.* (2016) Changing Disturbance Regimes, Ecological Memory, and Forest Resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **14**, 369-378. <https://doi.org/10.1002/fee.1311>
- [5] Dabros, A., Pyper, M. and Castilla, G. (2018) Seismic Lines in the Boreal and Arctic Ecosystems of North America: Environmental Impacts, Challenges, and Opportunities. *Environmental Reviews*, **26**, 214-229. <https://doi.org/10.1139/er-2017-0080>
- [6] Argibay, D.S., Cingolani, A.M., Sparacino, J., Suárez, R., Hensen, I. and Renison, D. (2025) First Characterization of Megafire Refugia in a South American Subtropical Mountain Forest. *Forests*, **16**, Article 1705. <https://doi.org/10.3390/f16111705>
- [7] Cintra, B.B.L., Bergamin, R.S., Mailes, R., Brien, R., Luna, E., MacKenzie, A.R., *et al.* (2026) Decline in Regeneration Capacity in Mature Forests across Great Britain. *Forest Ecology and Management*, **603**, Article ID: 123468. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123468>
- [8] 刘思雨, 李春环, 潘玉梅, 等. 温带森林不同演替阶段外生菌根树种优势对幼苗更新的影响[J]. 生物多样性,

- 2025, 33(9): 38-51.
- [9] 吴嘉, 王俊, 姚坤存, 等. 降水格局变化与磷添加对热带森林树种幼苗光合生理特征的影响[J/OL]. 热带亚热带植物学报: 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/44.1374.Q.20260210.1753.004>, 2026-06-23.
- [10] 闫梦云, 彭双云, 蔡发鹏, 等. 寒温带森林火后恢复轨迹及其对气候因子的响应[J/OL]. 水土保持学报: 1-11. <https://link.cnki.net/doi/10.13870/j.cnki.stbxb.2026.03.011>, 2026-06-23.
- [11] 梁少湖, 梁样红. 广东佛冈观音山省级自然保护区植被类型分析[J]. 现代农业科技, 2026(3): 115-119.
- [12] Kohyama, T.S., Kohyama, T.I. and Sheil, D. (2018) Definition and Estimation of Vital Rates from Repeated Censuses: Choices, Comparisons and Bias Corrections Focusing on Trees. *Methods in Ecology and Evolution*, **9**, 809-821. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12929>
- [13] Jordan-Fragstein, C.C., Müller, M.G., Bielefeld, N., Georgi, R. and Friedrich, R. (2025) Assessing Wildlife Impact on Forest Regeneration through Drone-Based Thermal Imaging. *Forests*, **16**, Article 1787. <https://doi.org/10.3390/f16121787>