

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240029

林火干扰对林分结构及植被更新影响研究进展

郑鑫^{1,2} 刘晏铭³ 司莉青⁴ 舒立福⁴ 陈锋⁵
王千雪^{1,2} 王烁^{1,2} 张吉利^{1,2}

(1. 国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 中国林业科学研究院寒温带林业研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 4. 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生态环境重点实验室, 北京 100091; 5. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083)

摘要: 林火是森林生态系统中重要的干扰因素。严重的森林火灾会破坏林分结构, 影响生态系统的稳定性, 但适度火干扰可以促进植被更新, 改变群落的演替动态, 并提高物种多样性。本文综述了林火干扰对林分结构和植被更新的影响研究进展, 特别是林火干扰对树木存活、林分结构及植被更新的影响。研究表明, 林火引起的树木死亡是影响林分结构和树种组成的关键因素; 林火干扰后植被群落的变化主要取决于火烧强度, 轻度火干扰对乔木层影响较小, 而重度火干扰则可能导致生态系统逆向演替。目前, 国内外研究主要关注不同林型、火强度、火烈度、季节以及不同过火类型等因素对林分结构和植被更新的影响, 尚缺乏林火干扰对树木生长和植被更新机制的长期连续研究。未来研究应重点关注以下几个方面: 基于固定样地连续监测, 研究不同林火干扰条件下林分结构和植被更新演替的长期动态; 完善采样数据集, 结合生物物理及生理过程建模, 构建更完整的预测体系, 以准确预测火后不同树种组成的林分树木生长状况; 深入探讨林火与其他扰动因子的交互作用机制, 分析其对林分结构的协同影响。研究结果将有助于深入理解林火干扰对林分结构和植被更新的影响, 推动该领域的发展。

关键词: 林火干扰; 树木死亡; 林分结构; 火后更新

中图分类号: S762; S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)01-0156-07

引文格式: 郑鑫, 刘晏铭, 司莉青, 等. 林火干扰对林分结构及植被更新影响研究进展 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 156-162. Zheng Xin, Liu Yanming, Si Liqing, et al. Research progress on effects of fire disturbance on stand structure and vegetation regeneration [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 156-162.

Research progress on effects of fire disturbance on stand structure and vegetation regeneration

Zheng Xin^{1,2} Liu Yanming³ Si Liqing⁴ Shu Lifu⁴ Chen Feng⁵
Wang Qianxue^{1,2} Wang Shuo^{1,2} Zhang Jili^{1,2}

(1. Harbin Research Institute of Forestry Machinery, National Forestry and Grassland Administration, Harbin 150086, Heilongjiang, China;

2. Research Center of Cold Temperate Forestry, Chinese Academy of Forestry, Harbin 150086, Heilongjiang, China;

3. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

4. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China;

5. School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Forest fire is an important disturbance factor in forest ecosystems. Severe forest fires can disrupt stand structure and impact the stability of ecosystem. Nevertheless, moderate fire disturbances can facilitate

收稿日期: 2024-01-28 修回日期: 2024-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271895)。

第一作者: 郑鑫, 助理研究员。主要研究方向: 森林防火。Email: 100113878@qq.com 地址: 150086 黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路 374 号。

责任作者: 司莉青, 助理研究员。主要研究方向: 森林防火。Email: liqing_si@caf.ac.cn 地址: 100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

vegetation renewal, modify succession dynamics of the community, and enhance species diversity. This article reviews the research advancements in the influence of fire disturbances on stand structure and vegetation renewal, particularly the effects of fire disturbances on tree survival, stand structure, and vegetation renewal. Research indicates that tree mortality induced by forest fires is a key element influencing stand structure and tree species composition. The alterations in vegetation communities following fire disturbances mainly hinge on the fire intensity. Light fire disturbances have limited influence on tree canopy layer, while intense fire disturbances might potentially lead to reverse succession of ecosystem. At present, both domestic and international studies primarily concentrate on the effects of factors such as different forest types, fire intensities, fire severities, seasons, and various types of burned areas on stand structure and vegetation renewal after fire disturbances. There is a deficiency of long-term continuous research on the growth and vegetation renewal mechanisms of trees under fire disturbances. In the future, relevant research should focus on the following aspects: based on the continuous monitoring of permanent sample plots, studying the long-term dynamic changes of stand structure and vegetation renewal and succession under different fire disturbance conditions. We specify and augment a more comprehensive sampling dataset, integrate biophysical and physiological process modeling, and construct a more comprehensive prediction system to precisely predict the post-fire growth of trees in forests composed of different tree species, thoroughly explore the relationship between forest fires and other disturbance factors, and analyze the interactive relationship between forest fires and forest stand structure. The research results will facilitate a better understanding and exploration of the mechanisms of fire disturbance on stand structure and vegetation renewal, thereby advancing the field.

Key words: forest fire disturbance; tree mortality; stand structure; post fire update

近年来,森林火灾发生的频次和面积明显增多,气候变化引发的极端高温与干旱天气给树木的生长发育和森林生态系统的稳定带来更多的不确定性^[1]。林火作为全球树木死亡和更新的关键驱动因素,不仅对水质、大气等环境产生即时影响,还会在火后恢复过程中持续影响林分的年龄和径级结构,以及森林生态系统的生物多样性和景观格局^[2]。例如,在火干扰频发的大兴安岭林区,寒冷干燥的气候使得树木生长缓慢,针叶凋落物比例较高,可燃物在林下大量聚积且分解缓慢,一旦发生重、特大森林火灾,整个生态系统将受到毁灭性的影响^[3]。

火干扰对不同森林可燃物类型的影响程度不同。过火后林分的树种组成、径级结构以及年龄结构等指标会在空间上发生相应的变化,进而影响森林生态系统的稳定性。树木死亡是火灾限制生态系统生产力、影响资源可利用性、改变植被结构和组成的关键因素^[4]。尽管林火造成树木死亡的研究十分重要,然而当前对其潜在机制的了解仍然不足。这种认知上的缺口限制了我们对火灾导致的树木死亡率的准确预测,以及对林火驱动对全球碳循环反馈的评估、未来火灾格局的推断,并阻碍了实施适当管理措施以增强森林应对野火的恢复能力。因此,本文基于国内外研究成果,深入探讨火干扰对树木存

活、林分结构以及植被更新的影响,并提出相应的管理建议,以促进森林生态系统的可持续发展。

1 林火扰对树木存活的影响

林火造成的树木死亡是影响林分结构和树种组成的重要因素^[5],同时也是限制生态系统生产力、影响资源可利用性,并改变植被的结构和组成。随着全球气候变暖,森林火灾的频率和规模将呈上升趋势,火干扰对林分结构的影响也将更加复杂。目前的研究主要集中于树木死亡率的预测模型^[6],如林火发生前进行样地调查来预测树木死亡率,林火发生后估算火灾的严重程度,评估林分结构的变化^[7]。

1.1 林火造成树木死亡的原因分析

植物和生态系统对火灾的反应可分为直接火灾效应和间接火灾效应。间接火灾效应(即二阶火灾效应)是指直接火灾效应与其他因素(如火灾后气候和昆虫)相互作用而产生的综合影响,通常发生在火灾后的数天至数年内。间接死亡率可能受火灾前的竞争、干旱和疾病压力,以及火灾后条件(如树皮甲虫数量增加)的共同影响。尽管大多数树木死亡源于火灾的直接影响,但间接影响常常导致大树死亡,并可能占火灾造成的森林生物量损失的很大比例^[8]。树木直接死亡的机制是通过热传递到树冠、茎和根组

织,导致形成层坏死。热传递通过对流、传导和辐射发生,这些过程均会导致树木损伤甚至死亡。当温度达到 60 ℃ 时,组织会立即坏死。而长期土壤加热会降低粗贮藏根中的非结构性碳水化合物浓度,从而导致树木径向生长在短期内减缓。这种影响至少会持续 10 年。此外,在干旱条件下,防御性树脂管道减少,对树木的径向生长产生负面影响^[9]。如果树冠、茎和根组织全部死亡,树木将不可避免死亡。即使树木的部分组织受到损伤,这些损伤在与其他因素的交互作用下,也可能导致树木死亡。然而,这些复杂的相互作用和间接效应尚未被纳入现有的过程模型中。

1.2 林火导致树木死亡影响及预测探讨

由于树木死亡率受到多种因素的复杂交互影响,预测因延迟效应引起的树木死亡率不如预测直接由火灾导致的树木死亡率那样直接和准确^[10]。韩大校等^[11]通过将森林火灾行为与树冠、树干和树根的加热过程相结合,探讨了火灾后树木死亡的潜在生物学机制和影响因素。研究认为,评估和预测火灾后树木死亡率最可行有效的方法包括独立指标变量、综合评级指标和统计经验模型,而未来的研究方向可能转向基于过程的生物物理学模型。

目前,大多数关于森林火灾引起的树木死亡率的研究忽略了密度依赖性^[12],通常在建模时将树木视为空间中的独立个体。然而,密度通过两种途径影响火灾引起的树木死亡:一是通过影响当地的火灾行为,二是通过与邻近树木的竞争。竞争限制了对地上和地下资源的获取,增加了环境胁迫,从而间接提高了火灾引起的树木死亡率。据文献记载,竞争导致灾后树木死亡率增加,在相同的火灾伤害水平下,生长较慢的树木比生长较快的树木更容易死亡^[13]。另外,火灾后树木密度和竞争的减少可以增加资源的可用性,以补偿对幸存树木造成的短期影响^[14]。然而,有研究表明火灾造成的伤害会降低树木未来几年的生长^[15],降低生产力,并增加树木在下次火灾中死亡的可能性。通过依赖密度的模型进行进一步研究,可以确定火灾前和火灾后的竞争相互作用如何影响死亡率。在美国西部的研究发现,通过结合树木的形态特征,如胸径和树皮厚度,可以准确预测树木死亡与林火的关系^[16]。通常火灾后树木死亡率与树木胸径大小呈显著负相关,与树木的烧伤程度呈显著正相关^[17]。研究发现,树冠的烧伤程度和树皮厚度对树木的死亡率影响显著,这两类指标也是决定火后林分结构和组成的关键因素。随着火后树木死亡率的增加,有可能使森林发生逆行演替,逐渐退化为灌丛和草甸^[18]。由于树木死亡的直

接影响,森林生态系统功能也会发生改变,这与林火强度、地理位置、林龄、立地条件、病虫害等因素有关^[19]。Logistic 回归模型是当前预测火后树木死亡率研究中最广泛应用的方法,有助于火后抢救性采伐、生态修复等计划的制定,对林分结构与生态系统演替的长期预测具有指导意义^[20]。

2 火干扰对林分结构的影响

由于人为干扰和自然因素等方面的影响,林分结构存在各种各样的问题。维持合理的林分结构有助于实现森林资源的稳定发展,增加物种多样性,发挥森林的多功能性,从而提高森林的可持续经营能力。林分格局的变化引起包括冠层光环境在内的物理现象的变化,如积雪积累和融化、土壤理化性质和风速等。同时,林下植物的丰富度、组成、多样性、凋落物沉积以及土壤微生物群落也会对林分内树木空间格局的变化作出响应^[21]。森林火灾的发生导致大量树木死亡,直接改变林分的水平结构;林火导致小径级树木死亡,林下植物组成和生长状况以及空间分布等方面发生变化,从而影响林分的垂直结构。因此,研究火干扰对林分结构的影响,对于制定林火后森林恢复方案具有重要意义。

2.1 火后林分组成和结构的改变

林分结构通过影响可燃物分布、湿度和火-大气相互作用,从而也影响火灾行为,并对树木造成直接伤害^[22]。本文所指的林分结构主要是指林分的空间结构,包括水平结构和垂直结构。林分水平结构是指林木间的配置状况或水平格局,包括林木的分布格局、树种混交度、林木个体的大小;林分垂直结构是指森林高度上的层次性,即构成林分的植物个体在垂直空间上的配置方式^[23]。火干扰对林分分布和水平结构的影响是一个长期过程,不同树种对火灾严重程度的反应不同,特别是在平均繁殖力和幼苗存活率方面。这些对火灾严重程度的反应差异反过来会影响火灾后的再生密度和结构发育。通常,森林火灾不会造成所有树木死亡,大径级树木通常能在火灾中存活,从而使得林分结构复杂,树径范围广。然而,火灾过后会在地面上留下厚厚的烧焦有机物,这种基质会对树种补充和幼苗早期生长产生负面影响。相比之下,重特大森林火灾往往导致大多数树木死亡,可能导致较低结构复杂度的密集林分再生^[24]。

研究表明,重度火干扰会改变大兴安岭兴安落叶松(*Larix gmelinii*)优势树种的分布,主要表现为抑制兴安落叶松林分更新、减少林内生物多样性、降低林分密度;相比之下,中度和轻度火干扰对兴安落叶

松林分结构的影响不显著,反而在一定的程度上促进其更新过程^[25]。基于此,王鼎等^[26]对内蒙古大兴安岭兴安落叶松林轻度火烧迹地进行了研究,得出轻度火干扰更利于植被更新与演替。地表火具有显著的林分稀疏作用,能够降低林木个体间的竞争强度,促进林下植物多样性的变化,并改变林分的水平结构。喻泓等^[27]根据林火特征、林分结构、空间格局、植物多样性等方面,综合论述了针对呼伦贝尔沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林的生产经营管理意见。研究表明,在火干扰作用下,樟子松林的稀疏程度高于自然状态,火干扰具有类似于人工抚育间伐的效果。

林火发生频率和强度影响森林群落的物种组成和结构。如林火发生频率低、强度高易形成序列演替,林火发生频率高、强度低则易形成异龄林分。火干扰后植被群落变化主要取决于火烧强度。轻度火干扰对乔木层影响较小,虽然对林下植被有破坏作用,但一定程度上有利于改善林地环境,增加次生灌丛生物多样性,促进生态系统的平衡与稳定;而重度火干扰则可能导致生态系统的逆向演替^[28]。Stoddard等^[29]对美国亚利桑那州松柏和针阔混交林火后生态系统研究发现,林火与气候条件的相互作用会加速林分结构的变化与更新,影响树木死亡、物种更新和森林组成。在火烧后的15年内,不同程度的火灾导致的林木死亡率几乎相同,高温和干旱等气候因素也是林木二次死亡的主要因素。目前,国内关于火后树木死亡的研究较为有限,主要集中在火后树木死亡率模型和影响树木个体死亡的因素^[30],缺乏对于过火林分结构方面的探索研究,需要结合不同干扰强度进一步分析。

2.2 林分结构调整对林火行为的影响

林分结构影响地表火转化为树冠火的概率,因此,林分结构是决定火灾行为、火灾严重程度和森林生态系统对干扰的抵抗力和恢复力的重要因素。研究表明,树木空间格局会影响细小可燃物(林下植被和凋落物)和火行为,进而影响未来的植被生长和可燃物积累^[31]。火灾频发的森林特征是由空地、单棵树和树冠相邻的树丛3种元素组成的镶嵌型结构。这种镶嵌结构通常在小于0.4 hm²的尺度上表现,但有时会扩展到4 hm²的尺度,尤其是在低等和中等严重火灾的区域。频繁的火在开放林地中具有关键作用,因为反复的火灾不仅塑造了树木的空间排列,还通过火灾引起的树木死亡,触发了生态系统中必不可少的树木补充机制。

森林抚育直接关系到林分的防火性能。合理的抚育措施能提高林分质量和生物防火特性,抚育间伐

可以使得郁闭度大幅度降低,通过修枝和割灌,重点降低局部地段的可燃物连续性,改变林分的垂直结构,避免地表火发展为树冠火。张运生等^[32]对华山松(*Pinus armandii*)林和柏木(*Cupressus funebris*)林森林抚育前后发生树冠火的危险性进行研究,提出地表可燃物载量降低、枝下高增加可以有效降低树冠火的发生概率。高敏等^[33]对侧柏林抚育间伐与森林火险的研究表明,中度间伐可以有效降低潜在火行为,避免连续型树冠火的发生。朱敏^[34]对北京西山林场油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)3种林型可燃物进行调查,结果表明,低强度疏伐不但没有降低火行为强度,反而有所增加,高强度疏伐可以有效地降低森林火灾发生概率,但保留木大量减少。因此在调整林分结构时,可选择中度疏伐,既能有效防止林火的发生,也能达到营林抚育的目的。

3 火干扰对植被更新的影响

生态系统对火灾干扰的响应,特别是火灾后的植被更新,是火灾生态学的核心问题^[35]。前人的研究揭示了对火灾后森林更新的关键因素包括火灾严重性、地形与土壤条件、火灾前的植被组成以及物种的生活史策略。森林火灾通过影响开花、种子传播、发芽、种苗建植和植物死亡率等生长发育环节,进而改变植物群落的物种组成;此外,火灾还通过抑制某些物种并促进其他物种的繁殖,影响植被的结构和演替格局的变化。林火还可能通过杀死幼苗和树苗的茎组织,或将土壤加热至足以摧毁土壤表面附近的根和种子来影响森林更新^[36]。森林火灾对植被的直接影响会导致植被物种数量、物种类型和生物多样性在短期内减少,但随着时间的推移,森林植物的恢复与群落的演替将使多样性逐渐恢复至正常水平。森林火灾对植物群落多样性的影响主要与火灾的强度有关。低强度林火有助于提高群落物种丰富度;高强度林火则可能影响上层树木,破坏土壤种子库;而在中等强度的森林火灾干扰下,植物群落多样性最高,这也与“中度干扰假说”相一致^[37]。

3.1 火后幼苗更新

有研究发现,火干扰显著影响了树木的死亡率和更新机制。火灾后,森林中普遍缺少幼苗,但多次过火后的地块会繁衍出茂盛的新芽^[38]。不同强度的森林火灾,其火烧迹地幼苗数量、芽库数量和种类差异较大。火烧迹地上的芽库数量通常占优势,且主要由萌发能力较强的植物组成^[39]。林火发生后,灌木减少,林下植被单一化,进一步增强了林分的同质

化。在高强度森林火灾发生后,即便是耐火树种或适应性较强的树种组成的林分也会发生变化^[29]。在遭受严重火灾的林地中,幼苗的死亡率明显更高^[40]。国内外许多学者研究了不同林型、火强度、火烈度、不同季节以及过火类型对幼苗更新的影响。不同火烧强度、火烧烈度对幼苗更新有一定影响。有研究表明,兴安落叶松幼苗的更新情况与火强度成反比,火强度越低,兴安落叶松幼苗的更新指数越大,更新效果最好;火强度越高,更新效果越差,不利于幼苗更新^[41]。西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)、西伯利亚红松(*Pinus sibirica*)在中烈度火干扰后更新数量最多,而西伯利亚云杉(*Picea obovata*)和疣枝桦(*Betula pendula*)在弱烈度火干扰后更新数量最多^[42]。郭秋菊等^[43]对美国3个长叶松(*Pinus palustris*)林原始主要分布区域的幼苗更新进行了研究,分析了不同季节的计划火烧对长叶松幼苗不同生长时期的影响。研究发现,冬季火干扰后,幼苗密度和基径级均为最大值。大兴安岭火烧迹地的研究表明,火干扰促进了植被更新,更新苗呈聚集分布。随干扰强度的增加,更新速度逐渐减缓。火干扰后,喜光植物柴桦(*Betula fruticosa*)、兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、柳兰(*Chamerion angustifolium*)等侵入,增加了林下植被多样性^[44]。不同恢复年份后的群落多样性指数表现出草本层>灌木层>乔木层的趋势。群落物种总数随着恢复时间的推移逐渐增多,这种变化趋势主要体现在草灌层^[26]。此外,也有研究表明,树龄大于60年的林分,其幼苗数量显著高于树龄小于25年的林分,但林下植被更新却无显著差异^[45]。

3.2 火后种子更新与恢复

林火发生后,耐火树种的更新能力极强,主要通过种子更新。火灾后,土壤种子库具备较强的再生能力,这与火灾前林分的林龄以及火灾过程中球果的开裂情况密切相关。司宏敏等^[46]对云南松(*Pinus yunnanensis*)林不同过火类型后的自然更新进行了研究,结果表明云南松能够抵御地表火的发生,但林冠火会导致其死亡。通过计划火烧可以达到更新目的并促进生态系统平衡,其中火烧强度引起的林分结构变化对这一过程至关重要^[47]。通常,重度火烧后的更新通常会延迟或根本不会发生,而在中低强度火干扰下,森林更新主要依赖种子,更新往往集中在幸存树附近的区域^[48]。在美国西部,林火管理更侧重于通过计划火烧恢复林分结构和更新物种^[17]。最新研究表明,发生严重森林火灾后,靠近枯木的地方建立更新的可能性更高,进一步证实了枯木对火灾后森林更新的促进作用^[49]。

4 研究展望

目前,国内对林分结构已有一定量的研究,并形成了一套较为完整的研究体系。然而,相对于国外,我国建立的预测系统模型尚不健全,尤其是过火后林分结构的研究,并且研究年限较短,大多局限于3年之内的样本数据,未来林分变化仍不确定。今后应明确并扩充更健全的采样数据集,林分指标的收集是预测树木死亡的基础,对于应用最为广泛的Logistic模型,结合所扩充的数据集,包括生物物理及生理过程建模将创造出的一套新的更完整的预测体系,可更准确的预测不同树种不同林分火后树木死亡率。在林火干扰对林分结构和植被更新的印象研究方面,应重点关注长期动态监测与研究,深入探讨交互作用机制以及加强火后恢复与管理研究。目前我国选取的指标大体局限于气象因子与地形因子上,应适当借鉴国外,依据特定情况,可根据林火与各项扰动因子的作用关系,深入探究林火与林分结构的交互关系。这些研究将有助于全面理解火干扰对林分结构和植被更新的影响,为制定有效的林火管理策略提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] Hurteau M D, Robards T A, Stevens D, et al. Modeling climate and fuel reduction impacts on mixed-conifer forest carbon stocks in the Sierra Nevada, California[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 315: 30-42.
- [2] Bond W J, Wilgen B V. Fire and the evolutionary ecology of plants[M]// *Fire and plants*. Netherlands: Springer, 1996: 123-147.
- [3] Eckdahl J A, Kristensen J A, Metcalfe D B. Climatic variation drives loss and restructuring of carbon and nitrogen in boreal forest wildfire[J]. *Biogeosciences*, 2022, 19(9): 2487-2506.
- [4] Dantas V D L, Hirota M, Oliveira R S, et al. Disturbance maintains alternative biome states[J]. *Ecology Letters*, 2016, 19: 12-19.
- [5] Dietze M C, Moorcroft P R. Tree mortality in the eastern and central United States: patterns and drivers[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3312-3326.
- [6] 王烁, 韩大校, 王千雪, 等. 林火对兴安落叶松天然林树木存活与林分结构影响的研究[J]. *温带林业研究*, 2022, 5(3): 48-52. Wang S, Hang D X, Wang Q X, et al. Study on the effect of forest fire on tree survival and stand structure in Larch natural forest[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2022, 5(3): 48-52.
- [7] Hood S, Bentz B. Predicting postfire douglas-fir beetle attacks and tree mortality in the northern rocky mountains[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(6): 1058-1069.
- [8] van Mantgem P J, Stephenson N L, Knapp E, et al. Long-term effects of prescribed fire on mixed conifer forest structure in the Sierra Nevada, California[J]. *Forest Ecology and Management*,

- 2011, 261: 989–994.
- [9] Slack A W, Zeibig-Kichas N E, Kane J M, et al. Contingent resistance in longleaf pine (*Pinus palustris*) growth and defense 10 years following smoldering fires[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 364: 130–138.
- [10] Kane J M, Varner J M, Metz M R, et al. Characterizing interactions between fire and other disturbances and their impacts on tree mortality in western US Forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 405: 188–199.
- [11] 韩大校, 韦睿, 王晓红, 等. 林火导致树木死亡的作用机制和影响因素的研究进展 [J]. *林业科学*, 2020, 56(7): 151–162.
- Han D X, Wei R, Wang X H, et al. Progress on the mechanisms and influencing factors of tree mortality caused by forest fire: a review[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(7): 151–162.
- [12] Grayson L M, Progar R A, Hood S M. Predicting post-fire tree mortality for 14 conifers in the Pacific Northwest, USA: model evaluation, development, and thresholds[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 399: 213–226.
- [13] Nesmith J, Das A, O'hara K, et al. The influence of pre-fire tree growth and crown condition on post-fire mortality of sugar pine following prescribed fire in Sequoia National Park[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, 45(7): 910–919.
- [14] Alfaro-Sánchez R, Camarero J J, Sánchez-Salguero R, et al. Post-fire aleppo pine growth, C and N isotope composition depend on site dryness[J]. *Trees*, 2016, 30: 581–595.
- [15] Spark S A M, Smith A M, Talhelm A F, et al. Impacts of fire radiative flux on mature *Pinus ponderosa* growth and vulnerability to secondary mortality agents[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 26: 95–106.
- [16] Miller J D, Safford H D, Crimmins M, et al. Quantitative evidence for increasing forest fire severity in the Sierra Nevada and southern Cascade Mountains, California and Nevada, USA[J]. *Ecosystems*, 2009, 12(1): 16–32.
- [17] Keyser T L, Medaniel V L, Klein R N, et al. Short-term stem mortality of 10 deciduous broadleaved species following prescribed burning in upland forests of the Southern US[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 27(1): 42–51.
- [18] Millar C I, Stephenson N L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance[J]. *Science*, 2015, 349: 823–826.
- [19] Ganio L M, Progar R A. Mortality predictions of fire-injured large Douglas-fir and ponderosa pine in Oregon and Washington, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 390: 47–67.
- [20] 陈宝麟, 戴安然. 大兴安岭森林火灾树木死亡率建模与预测 [J]. *现代经济信息*, 2017(8): 339–340.
- Chen B L, Dai A R. Modeling and prediction of tree mortality rate in forest fires in the Greater Khingan Mountains[J]. *Modern Economic Information*, 2017(8): 339–340.
- [21] Pimont F, Dupuy J L, Linn R R, et al. Impacts of tree canopy structure on wind flows and fire propagation simulated with FIRETEC[J]. *Annals of Forest Science*, 2011, 68: 523–530.
- [22] Stephens S L, Mciver J D, Boerner R E J, et al. The effects of forest fuel-reduction treatments in the United States[J]. *Bioscience*, 2012, 62(6): 549–560.
- [23] McElhinny C, Gibbons P, Brack C, et al. Forest and woodland stand structural complexity: its definition and measurement[J]. *Forest Ecology & Management*, 2005, 218: 1–24.
- [24] Amoroso M M, Daniels L D, Bataineh M, et al. Evidence of mixed-severity fires in the foothills of the Rocky Mountains of west-central Alberta Canada[J]. *Forest Ecology & Management*, 2011, 262: 2240–2249.
- [25] 孙家宝. 火干扰后大兴安岭兴安落叶松林群落动态研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- Sun J B. The dynamic study on plant community of *Larix gmelinii* in Daxing'an Mountain after fire disturbance[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010.
- [26] 王鼎, 王梓璇, 冯倩倩, 等. 兴安落叶松林植物物种组成及多样性对轻度火干扰的响应 [J]. *林业资源管理*, 2017(3): 80–85, 103.
- Wang D, Wang Z X, Feng Q Q, et al. Study on species composition and diversity of mild burned phytocoenosis after different regeneration years[J]. *Forest and Grassland Resources Research*, 2017(3): 80–85, 103.
- [27] 喻泓, 杨晓晖, 慈龙骏. 内蒙古呼伦贝尔沙地不同樟子松林竞争强度的比较 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 250–255.
- Yu H, Yang X H, Ci L J. Comparison of competition intensity between different camphor pine forests in Hulunbuir Sandy Land, Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 250–255.
- [28] 杨一, 王懿祥, 白尚斌, 等. 临安次生灌丛植物多样性对林火烈度空间异质性的响应 [J]. *生态学报*, 2016, 36(14): 4438–4446.
- Yang Y, Wang Y X, Bai S B, et al. Effects of spatial heterogeneity of forest fire severity on plant diversity in a secondary shrub community in Linan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(14): 4438–4446.
- [29] Stoddard M T, Huffman D W, Fulé P Z, et al. Forest structure and regeneration responses 15 years after wildfire in a ponderosa pine and mixed-conifer ecotone, Arizona, USA[J]. *Fire Ecology*, 2018, 14(2): 1–12.
- [30] 王千雪, 刘晏铭, 王烁, 等. 过火林分树木死亡率及对林分空间结构的影响预测 [J]. *陆地生态系统与保护学报*, 2023, 3(5): 41–47.
- Wang Q X, Liu Y M, Wang S, et al. Prediction of post-fire tree mortality and its effects on forest spatial structure[J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2023, 3(5): 41–47.
- [31] Mitchell R J, Hiers K. J, O'brien J, et al. Ecological forestry in the Southeast: understanding the ecology of fuels[J]. *Journal of Forestry*, 2009, 107: 391–397.
- [32] 张运生, 舒立福, 赵凤君, 等. 森林抚育对滇中地区潜在树冠火的影响 [J]. *森林工程*, 2023, 39(5): 1–10.
- Zhang Y S, Shu L F, Zhao F J, et al. Effects of forest tending on potential crown fires in central Yunnan[J]. *Forest Engineering*, 2023, 39(5): 1–10.
- [33] 高敏, 任云卯, 周晓东, 等. 抚育间伐对西山林场侧柏林冠层可燃物特征及潜在火行为的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(8): 56–65.

- Gao M, Ren Y M, Zhou X D, et al. Effects of thinning on canopy characteristics and potential crown fire behavior of *Platyclusus orientalis* in Xishan Forest Farm of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(8): 56–65.
- [34] 朱敏. 北京西山林场主要林分疏伐前后潜在火行为及碳储量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- Zhu M. Research on potential surface fire behavior and carbon storage of major forest types in Beijing Xishan Forest Farm[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [35] Forrester E J, Donoghue M J, Smith M D. Convergent phylogenetic and functional responses to altered fire regimes in mesic savanna grasslands of North America and South Africa[J]. New Phytologist, 2014, 203: 1000–1011.
- [36] Balch J K, Massad T J, Brando P M, et al. Effects of high frequency under storey fires on woody plant regeneration in southeastern Amazonian forests[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B-biological Sciences, 2013, 368: 20120157.
- [37] 陈峰. 林火干扰对落叶松林物种多样性和地上生物量的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- Chen F. Study on forest fire on understory vegetation diversity and biomass of *Larix gmelinii* burned area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [38] Svátek M, Rejžek M, Kvasnica J, et al. Frequent fires control tree spatial pattern, mortality and regeneration in Argentine open woodlands[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 408: 129–136.
- [39] 李安定, 彭熙, 张建利. 喀斯特山区森林火灾后火烧迹地植物更新库研究[J]. 贵州科学, 2014, 32(1): 40–46, 57.
- Li A D, Peng X, Zhang J L. Study on plant regeneration bank in burned land after forest fire in karst areas[J]. Guizhou Science, 2014, 32(1): 40–46, 57.
- [40] Andres S E, Powell J R, Rymer P D, et al. Fire severity and the post-fire soil environment affect seedling regeneration success of the threatened *Persoonia hirsuta* (Proteaceae)[J]. Austral Ecology, 2022, 47(6): 1248–1259.
- [41] 焦小梅, 张秋良, 魏玉龙, 等. 大兴安岭火烧迹地幼苗更新及空间分布格局[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 38–44.
- Jiao X M, Zhang Q L, Wei Y L, et al. Seedling regeneration and spatial distribution pattern in the burning land of Greater Khingan Range[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 42(1): 38–44.
- [42] 张帆, 潘存德, 李贵华, 等. 火后喀纳斯泰加林乔木更新数量与质量变化[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 455–462.
- Zhang F, Pan C D, Li G H, et al. Quantity and quality change of edificators regeneration in Kanas Taiga after fire disturbance[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(3): 455–462.
- [43] 郭秋菊. 择伐和火干扰对长叶松幼苗更新的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- Guo Q J. Effects of selection and prescribed fire disturbances on longleaf pine seedling regeneration[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2014.
- [44] 孟勳. 大兴安岭火烧迹地植被-土壤协同恢复机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- Meng M. The collaborative mechanism of vegetation-soil restoration in burned are of Daxing'anling[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [45] Aguiar F C, Rodrigues C, Pin A J P, et al. Regeneration of riparian and maritime pine forests after a large wildfire on the largest public forest of Portugal[J]. Forests, 2021, 12: 477.
- [46] 司宏敏, 余娇娥, 吴雪涛, 等. 两种过火类型对云南松林损伤及火后自然更新的研究[J]. 西部林业科学, 2019, 48(1): 7–11, 17.
- Si H M, Yu J E, Wu X T, et al. The damage and post-fire regeneration of *Pinus yunnanensis* under two different fire intensity[J]. Journal of West China Forestry Science, 2019, 48(1): 7–11, 17.
- [47] Arthur M A, Blankenship B A, Schörgendorfer A, et al. Changes in stand structure and tree vigor with repeated prescribed fire in an Appalachian hardwood forest[J]. Forest Ecology and Management, 2015, 340: 46–61.
- [48] Malone S L, Fornwalt P J, Battaglia M A, et al. Mixed-severity fire fosters heterogeneous spatial patterns of conifer regeneration in a dry conifer forest[J]. Forests, 2018, 9(1): 45.
- [49] Lingua E, Marques G, Marchi N, et al. Post-fire restoration and deadwood management: microsite dynamics and their impact on natural regeneration[J]. Forests, 2023, 14: 1820.

(责任编辑 范娟
责任编辑委 臧润国)