

大火巨灾的危害及应对策略

龚俊伟¹ 刘晓东^{1*}

(1. 北京林业大学生态与自然保护学院 北京 100083)

摘 要:气候变化和人类活动等因素导致全球大火巨灾发生频率增加,对生态和社会经济产生了巨大影响,现有火灾管理对策面临着越来越大的压力。本文在梳理总结全球典型大火巨灾事件的基础上,系统分析大火巨灾对人类和生态系统的影响,剖析气候变化和人类活动与大火巨灾事件之间的密切关系。本文基于中国的防火形势,客观分析我国面临的大火巨灾风险,提出提高公众火灾风险认知、加强森林—城镇交界域的火管理、提升消防救援队伍应对大火巨灾的能力、使用科学的决策支持系统和促进大火巨灾风险防控国际合作等防范应对策略,为科学高效防范大火巨灾风险提供参考。

关键词:大火巨灾;重大风险;气候变化;火管理;防范对策

The hazards and coping strategies of Megafire

Abstract: The increasing frequency of global Megafire, driven by climate change and human activities, profoundly impacts ecosystems and economies. Existing fire management measures are under growing pressure. This paper systematically analyzes the effects of Megafire on humans and ecosystems, emphasizing the close link between climate change, human activities, and fire events. Drawing from China's fire prevention and control context, we objectively assess the Chinese Megafire risk. We propose strategies to enhance public awareness, strengthen Wildland-Urban Interface management, improve fire rescue team capabilities, utilize scientific decision support systems, and foster international cooperation. This work serves as a valuable reference for effective fire catastrophe risk prevention.

Key words: Megafire; Major risks; climate change; fire management; preventive measures

大火巨灾往往发生在极端火灾天气条件下,表现出极端的火灾行为特征,持续时间长、过火面积大、火灾强度高,对森林草原资源、人民生命财产造成重大损失,对国家安全、生态安全、社会经济发展构成严重威胁。提升大火巨灾防控水平,最大限度地防范和控制大火巨灾事件的发生,不仅是保护国家森林资源安全,也是守牢美丽中国建设安全底线、巩固生态文明建设成果,促进人与自然和谐、绿色低碳发展的重要保障。我国总体上是一个火灾多发的国家,现有背景下的火灾管理面临着越来越大的压力,如何防范化解大火巨灾风险,已经成为了全球共同面对的难题。本文在梳理总结全球典型大火巨灾事件的基础上,分析大火巨灾的影响以及其与气候变化和人类活动之间的密切关系,客观分析我国面临的大火巨灾风险,提出防范应对策略,为科学高效防范大火巨灾风险提供参考。

1 全球大火巨灾概况

近年来,随着气候变化和人类活动的影响,大火巨灾在全球呈多发态势,发生频率和强度也在增加(表1)。2019年,除南极洲外的六大洲发生了大规模山火,俄罗斯过火面积达到1000万公顷,澳大利亚大火燃烧面积超1200万公顷(王博, 2020)。过去20年来,欧盟的野火造成的损失超过550亿欧元(Arango *et al.*, 2024)。2023年,美国夏威夷毛伊岛野火摧毁了2200多座建筑,约100人死亡,近6000人流离失所(Pelletier, 2023)。2023年加拿大极端林火事件排放二氧化碳高于加拿大过去22年林火产生二氧化碳排放量的总和(13.74亿吨),严重削弱森林生态系统碳汇功能(陆成宽, 2023)。其极端行为和影响往往是由大气和

火灾相互作用等宏观过程与风险认知不足、初始扑救不到位、强风多变、地形崎岖、可燃物含量低、可燃物负荷量大、可燃物连续性、景观连通性、准备不足等局部过程和条件间复杂的相互作用造成的(Tedim *et al.*, 2018)。

表 1 全球部分典型大火巨灾案例（1987-2023）
Table.1 Some typical cases of global megafire (1987-2023)

年份 Years	国家 Nation	大火巨灾名称 The name of Megafire	过火面积/hm ² Fire area/ha	伤亡情况 Casualty	经济损失 Economic loss
1987	中国	大兴安岭特大森林火灾	1300000	死亡人数 211 人；受伤人数 226 人	直接经济损失约 5 亿元； 间接损失达 69.13 亿元
2007	希腊	希腊森林大火	183987	至少 64 人死亡	12 亿欧元 (约合 16 亿美元)
2010	俄罗斯	俄罗斯森林大火	190000	500 多人受伤, 53 人在大火中丧生	直接经济损失可能达 150 亿美元,
2018	希腊	希腊雅典森林大火	8235	91 人遇难, 25 人失踪	\
2018	美国	美国加州营火	62053	死亡人数 85 人, 失踪 1 人；12 名居民和 5 名消防员受伤	共计约 4,220 亿美元
2019	巴西、玻利维亚	亚马孙热带雨林大火	1800000	至少造成 34 人死亡	\
2019—2020	澳大利亚	澳大利亚丛林大火	1800000	20 多人死亡	数十亿美元
2023	美国	美国夏威夷毛伊岛大火	878	死亡人数为 115 人, 但还有更多人下落不明	至少 80 亿~100 亿美元的损失

2 大火巨灾的危害

火是一种地球系统过程，影响人类社区和基础设施、生态系统结构和功能以及局部到全球的碳循环(Yao *et al.*, 2024)。大火巨灾往往是更极端的条件的结果，如高可燃物负荷量，低湿度，高温和高风速。因此，大火巨灾通常可以引起生态系统结构和功能更剧烈的变化，造成比一般火灾影响范围更广、代价更大的后果(Leite *et al.*, 2015)。

2.1 造成巨大的生命安全与财产损失

许多学者讨论过野火的经济和社会后果(Rábade *et al.*, 2008)，包括人身伤害和死亡、文化和经济损失、社会破坏等，人类对地球上火灾发生与分布负有直接或间接的责任(Scott *et al.*, 2013)。大火影响了数以百万计的人类的健康，改变了国家和当地经济(Sullivan *et al.*, 2022)。根据统计，2019 年澳大利亚大火至少造成 34 人死亡，2020 年美国加利福尼亚州的大火造成 31 人死亡，数百人失踪。火灾产生大量的烟尘和有毒气体，会增加人类患哮喘、慢性阻塞性肺病、心脏病、中风等疾病的风险。Romanello 等人(2021)通过对 43 个国家共 749 个城市的森林火灾污染情况、每日平均 PM2.5 的浓度、相关死亡人数等情况的调查研究发现，全球每年有 3.3 万人因短期吸入森林火灾烟雾死亡。在美国，联邦、州和私人土地上的灭火成本已经从 1986 年的 2.02 亿美元上升到过去五年的平均 18 亿美元(Leite *et al.*, 2015)。野火蔓延到居住地，迫使人们逃离家园，导致流离失所、难民危机、社会不稳定等问题。因此，涉及森林—城镇交界域的火灾，更容易蔓延成为巨灾，造成更大的损失。

2.2 对生态系统功能影响巨大

大火巨灾导致的环境变异性会直接或间接地影响着动物群落的组成结构和生物多样性(王诗颖, 2022)。2019年9月开始的澳大利亚森林大火一直持续到2020年2月,过火面积达1146万 hm^2 ,烧死30亿只野生动物(吴月圆等, 2024)。这些物种对维持生态平衡和服务功能有重要作用,是生态系统中不可或缺的组成部分。火灾发生之后,植被发生更新和演替,火灾强度越大,演替所需的时间越长(李菁等, 2010)。除了对动植物的影响外,土壤侵蚀无疑是火灾造成的最明显、最剧烈的影响(Leite *et al.*, 2015)。火灾使森林土壤斥水性增强,燃烧高温(大于 300°C)使有机化合物蒸发,部分疏水性化合物冷凝于土壤表层,形成极强的疏水层,导致渗透率降低,地表截留体减少,从而增加地表径流和土壤侵蚀(刘发林等, 2019)。同时,也会改变土壤肥力和结构,影响土地利用效率,从而改变生态系统的结构和功能。火灾极大地改变了山坡的物理特征,使它们失去了植被和有机凋落物的保护层,并移除了阻挡沉积物的屏障。因此,在火灾期间和火灾之后,大量的地表物质被释放出来,并作为干流向下坡移动(Leite *et al.*, 2015)。大多数与火灾相关的质量破坏是与土壤中疏水性发展相关的泥石流(Debano *et al.*, 1998)。随着大火巨灾变得更加频繁,影响将会进一步加重。

2.3 加速全球气候变暖

火灾对全球的碳循环产生重要影响,进而对气候变化产生重要作用(胡海清等, 2013)。可燃物燃烧排放的大量含碳温室气体是导致植被和土壤碳储量动态变化的重要途径,破坏了大气碳平衡,影响区域乃至全球碳循环(Cheng *et al.*, 2023)。通过这种方式,火灾的发生可能会加速碳循环中的正反馈循环,使遏制气温上升更加困难。泥炭地和热带雨林等生态系统中储存了大量无法回收的陆地碳。北极放大效应导致北极比世界其他地区更迅速地变暖,这导致永久冻土和冰川的加速融化,这些历史上的碳汇转变为大气中的碳净来源,进一步加速气候变化(Hugelius *et al.*, 2020)。由野火引起的永久冻土泥炭地进一步变暖和融化,会加速陷坑和热岩溶沼泽等危险景观特征的发展,对北极产生不利影响(Gibson *et al.*, 2018)。在巴西亚马逊的热带雨林地区,极端干旱年份的火灾排放量可能高于毁林排放量。亚马逊是世界上最大的热带雨林,包含了世界近一半的热带森林碳储量(Pan *et al.*, 2011),在全球气候调节中发挥着至关重要的作用。Berenguer 研究发现,燃烧过的森林比未受破坏的森林地表碳含量低近60%(Berenguer *et al.*, 2014),亚马逊地区的碳储存的减少也可能会产生显著的气候正反馈,从而进一步增加变暖趋势(Sullivan *et al.*, 2022)。

3 大火巨灾致灾因子解析

火灾是地球系统中的关键要素,将气候、人类和植被联系在一起。在全球变化背景下影响大火巨灾发生和火源分布的机制是复杂多样的,火灾的点燃、蔓延和影响取决于局部到区域尺度上的气候、植被结构和土地利用之间的相互作用。

3.1 气候变化增加了大火巨灾发生的可能性

大量研究表明,气候变化造成的有利火环境是林火发生的重要因素(Di Virgilio *et al.*, 2019; Halofsky *et al.*, 2020; Pausas, 2004)。火灾对气候变化高度敏感,气候变化不仅为火灾发生发展提供了直接的气象条件,导致了一系列环境条件的变化,其中包括更高的气温、更干燥的气候和更频繁的极端天气事件(Di Virgilio *et al.*, 2019; Moriondo *et al.*, 2006),同时,还为火灾发生提供了间接的可燃物条件和火源条件(胡海清等, 2013)。

气候变暖通过影响可燃物的燃烧性和量的积累影响火灾发生的频率和强度。气候变暖引起的气温上升,降雨格局的重新分配,风速的变化,空气相对湿度随气温升高降低,森林可燃物的蒸散发作用加强,直接影响可燃物的燃烧性(胡海清, 2005),促成林火发生的可燃物条件形成,增加了火灾的蔓延速度和火势,这种影响在降雨量减少的地区将变得更加严重(Moriondo *et al.*, 2006)。Halofsky 等基于历史记录、当前趋势和模拟建模的预测,持续的温暖和干燥条件将导致太平洋西北地区未来燃料湿度降低和火灾季节延长,与

20 世纪相比, 火灾的频率和范围可能会增加(Halofsky *et al.*, 2020)。气候和中短期天气影响燃料供应, 例如, 厄尔尼诺或南方涛动事件对澳大利亚、东南亚的火灾活动有重大影响(Lavorel *et al.*, 2007)。气候变暖导致干雷暴的频率和地点发生变化(胡海清, 2005; 胡海清等, 2013)。Michibata(2024)通过预测参数化模拟的温暖气候中闪电发生显著增加, 全球将面临更高的雷击火灾风险。

3.2 人为景观变化对全球火灾的影响

在世界范围内观察到的火灾发生的空间变异性强调了人类与火灾之间不可分割的关系, 因为人类将火灾分散到资源和条件通常不支持它的地区(Lavorel *et al.*, 2007)。通过在有利于火灾的时间窗口内点火或通过改变实际上“防火”的植被结构将火引入了富含可燃物的地区。由于人为影响的加剧, 许多过去很少发生火灾的地区现在正在燃烧(Cochrane, 2003)。在特大火灾景观中, 通常可以观察到森林条件的改变, 其变化是由广泛的作为或不作为造成的。在巴西和印度尼西亚, 由于密集采伐、清理土地和发展, 森林条件发生了变化。当原生树冠被移除, 剩余的收获碎屑被晒干时, 变得更加易燃。干燥的、密集排列的、均匀的空中和地面生物量为许多特大火灾提供了燃料, 一旦火灾发生, 可能会变得更加猛烈和难以控制。Kelley 等人(Kelley *et al.*, 2022)研究发现, 2019 年亚马逊地区火灾烧毁了约 90 万公顷雨林, 气象影响燃烧的概率非常小(6-7%), 而景观改造或人为点火是主要驱动因素。2020 年, 与北极圈大面积燃烧有关的西伯利亚热浪是第一个被证明在没有气候变化的情况下几乎不可能发生的事件, 如果没有人类的影响, 这种情况发生的可能性在 8 万年中只有一次, 气候变化使持续高温的可能性增加了至少 600 倍(Ciavarella *et al.*, 2021)。

3.3 管理水平和应急能力决定了火灾的处置效果

火灾发生后, 良好的应急能力则在灾害中发挥着关键作用, 包括火灾预警系统、应急预案、紧急疏散方案等, 对于减少灾害损失具有重要意义。美国政府建立了城市灾害应急管理体系, 设立了联邦紧急事务管理署和联邦紧急事务管理委员会, 是世界上第一个实施政府应急能力评价的国家(孙亚敏等, 2023)。然而, 在 2023 年夏威夷毛伊岛火灾过程中, 虽事发突然、交通不便等客观原因存在, 但美国的应急管理体制并没有发挥应有的作用, 政府险情预判和准备不足、前期预警失灵、协调机制不畅、现场处置低效(李强, 2023), 造成了巨大的生命和财产损失。因此, 提升管理水平和应急能力是预防和应对大火巨灾的关键。

4 我国未来的大火巨灾风险

全球尺度上, 气候变化正在增加许多地区发生火灾的可能性。IPCC 第六次评估报告指出, 在一些地区, 有利于森林火灾的天气正在变得更加频繁, 并且将随着全球变暖的加剧而继续增加(Masson-Delmotte *et al.*, 2021)。联合国环境规划署和全球资源信息数据库——挪威阿伦达尔中心(GRID-Arendal)发布的报告指出, 预计气候变化和土地用途的改变将导致野火发生得更加频繁和猛烈。到 2030 年, 全球范围内极端火灾的数量将增加 14%, 到 2050 年底将增加 30%, 截至本世界末将增加 50%(Sullivan *et al.*, 2022)。在世界各地, 气候、土地利用和土地管理实践以及人为活动正在发生变化, 因此, 许多地区发生野火的风险也在变化, 以前没有发生过火灾的地区, 风险正在增加。我国存量隐患和增量风险交织, 面对着大火巨灾的极大挑战。

据统计, 2001-2022 年间, 全国共发生森林草原火灾 128758 次, 受害森林总面积为 150.75 万公顷, 累计经济损失达 28.8 亿元。当前, 受全球气候变化影响, 高温、干旱、大风等极端天气增多, 多年前全面禁止的天然林商业性采伐政策使得林区近年来可燃物载量逐年增加, 人口基数大导致火灾源头管控难度大。近年作为世界性森林防火研究难题的雷击火普遍存在于大兴安岭北部原始林区、新疆阿尔泰、四川西部等区域(孙阳阳等, 2023; 吴月圆等, 2024)。闫鹏等(2021)结合森林资源分布状况综合研判, 我国森林火灾重大风险主要集中在东北内蒙古原始林区和西南高山原始林区。同时, 集中连片人工林区、森林-城镇交界域、

边境森林草原区域大火巨灾风险也不容小觑。自然条件和社会人文因素叠加,使得我国大火巨灾风险增加,全球气候变化背景下我国森林草原防火面临严峻形势。

5 防范化解大火巨灾风险的对策

有效的野火管理是一个复杂的多方面过程,包含主动和被动的办法。被动性涉及对火灾发生后的反应,重点是扑灭火灾,而不是解决其根本原因,相较之下,主动性旨在预防火灾发生和影响(Arango *et al.*, 2024)。为防范大火巨灾风险,必须从预防到抑制和恢复的所有野火管理方面采用更具弹性的方法

5.1 提高公众火灾风险认知

风险认知(Perception of Risk)是指个体对存在于外界环境中的各种客观风险的感受和认识。大量关于风险的研究和实践经验已经证明了风险认知对人们行为的重要性。个体差异、期望水平、信息的影响、风险特征性质、自愿性程度和教育程度等都会影响个体风险认知水平(Siegrist *et al.*, 2020)。提高公众对火灾风险的认知需要综合考虑心理、社会、文化、技术等多种因素,并采取多种途径进行干预和教育。应该广泛开展教育和宣传活动,如举办讲座、制作宣传资料,向公众传达火灾的危害性和防范措施,提高公众对火灾风险的认识,普及防火知识,增强自我防范意识。利用媒体和网络平台发布相关信息,增强公众的关注度。此外,政府部门应该提供可靠的信息资源、建立激励机制以及持续监测和评估公众认知水平。

5.2 加强森林—城镇交界域的火管理

森林—城镇交界域(Wildland-Urban Interface, WUI)是建筑物和野外植被相遇或混合的区域(何春洋等, 2024)。在过去的几十年里,WUI已成为美国,加拿大,澳大利亚以及许多欧洲国家的野火政策和管理的核心关注点(Chen *et al.*, 2024)。但是,与野火相比,我们对WUI火灾的了解十分有限,随着人口增长,WUI加速扩张,已扩展到野火风险较高的区域,居民和建筑物火灾风险随之增加,为WUI的火管理带来了严峻挑战(Pausas *et al.*, 2009; Radeloff *et al.*, 2018; 田晓瑞等, 2023)。随着WUI扩张导致的野火点火率增加,将在更容易火势蔓延的植被中引发更多野火,导致更广泛的火灾和更严重的火灾行为。2018年,野火席卷天堂镇,造成至少85人死亡,超过18000座建筑被毁(Syphard *et al.*, 2019)。在美国,尤其是加州,WUI的比例很高(李伟克等, 2022)。WUI的增长和气候变化共同将使现有的野火问题变得更加复杂。对WUI进行综合的风险评估将为不同特征的WUI制定相应的火管理对策提供理论和技术支持,是防止未来野火灾害的关键(田晓瑞等, 2023)。风险评估需要系统考虑地理、气候、植被、人口密度等因素,以确定潜在的火灾风险和对周边社区的威胁(Calkin *et al.*, 2014)。结合城市规划和设计原则开展可燃物管理和火管理(限制建筑物的密度和类型、规定植被清理和修剪标准、制定火灾季节性限制等)以减少经济和生态破坏性火灾的上升风险,提高WUI社区对野火的适应能力。另外,各区域需要制定应急计划,并进行定期演练以应对野火威胁。预防WUI区域的大火巨灾风险需要长期投入,并加强公众意识和参与(Calkin, Cohen, Finney, Thompson, 2014)。我国的WUI界面约35万平方公里(Chen *et al.*, 2024),人口和建筑密度大、人为活动频繁、火灾破坏性强、影响范围广(何春洋等, 2024)。目前我国的交界域火灾研究还处于初期阶段,没有明确定义WUI区域范围的标准,火管理难度大。未来,应明确我国交界域分布和火灾发生的特征,完善适合我国国情的交界域标准,深入探究WUI火蔓延模型、可燃物管理技术、可靠的火灾风险评估方法和风险减缓技术,建立WUI火灾预防扑救体系,以提高WUI对火灾的适应能力(田晓瑞等, 2023; 王秋华等, 2024)。

5.3 提升消防救援队伍应对大火巨灾的能力

随着火灾发生频率和规模的不断上升,火灾扑救难度加大。提升救援队伍应对巨灾能力,首先需要加强队伍培训。火灾事故具有极强的复杂性及危险性,具有大量的不安全、不确定因素,因此火灾救援人员应具备较强的应急处置能力和心理素质,通过持续性高强度的心理训练和技能培訓可以在其开展救援工作时规避负面心理,高效发挥救援能力(丁腾龙, 2024; 许超亚, 2023)。其次,应制定完善应急预案,明确各部门职责和分工,确保在火灾发生时能够快速响应并采取有效应对措施。要强化政策支持,注重发挥市场机制作用,引导企业围绕森林火灾监测感知、评估研判、预测预警、综合防控、应急扑救等关键核心技术,加强消防装备研发推广,重点发展新型灭火指挥通信、智能无人灭火、轻型智能工程机械等装备,推进实战应用,提高防灭火机械化、科技化、信息化水平(闫鹏等, 2021),进而提高消防队员的工作效率和安全性。当发生大面积森林火灾时,仅仅依靠森林消防队伍无法快速完成火灾扑灭任务,专业扑救力量严重不足,需要动员多种灭火力量协同战斗(诸伟, 2020)。应积极探索建立并完善城市和森林消防队伍深度合作作战体系,立足辖区特点整合专业力量、融合消防队伍管理、强化业务技能训练、构建立体化作战指挥系统,促进当地城市和森林消防力量有效分工合作、协同应对解决火灾风险(杨琦琦, 2022)。

5.4 使用科学的决策支持系统

管理者需要解决与燃料管理、火灾预防、探测、抑制潜在破坏性野火以及使用计划烧除相关的复杂决策,以在火灾对易燃景观的有益和有害的社会、经济和生态影响之间实现适当的平衡,通常处于相当大的不确定性下。因此,在考虑功能和经济效益的同时,选择火灾管理策略至关重要(Sakellariou *et al.*, 2017)。在全球范围内,森林火灾管理者对决策支持系统(Decision Support Systems, DSS)的使用越来越广泛,这增强了预防和扑灭森林火灾的能力,同时保护了人民生命和财产安全。在美国,使用基于数据库管理系统和数学/经济算法的决策支持系统,该系统的关键在于 DSS 在其数据库中纳入了一定数量的与特定火灾事件相对应的预处理场景,能够在实时监控、管理和扑灭火灾事件的过程中节省资源并提高扑灭类似火灾事件的有效性(Sakellariou *et al.*, 2017)。在加拿大地区主要使用基于火灾行为模拟器的决策支持系统,主要有确定性火灾模拟软件 Farsite (deterministic fire simulation software)、确定性火灾模拟模型 Prometheus (deterministic fire simulation model) 和模拟并推算特大火灾发生概率的火灾模型 Burn-P3。我国比国外发达国家起步较晚,现已有一些单位从事森林火灾管理信息系统的研究,如开发了地理信息和资源信息系统、建立了卫星防火监测网、开展了森林防火的内业建设等,重点进行火险预测预报系统、监测系统、林火跟踪定位系统、地理与资源信息系统、辅助决策系统、通讯信息系统等 6 个系统的现代化建设(田勇臣, 2008)。在决策系统的支持下制定合理的扑火方案,实现扑火力量的最优配置,缩短扑火出动时间,提高扑火效率,把森林火灾造成的损失尽可能地减少到最低限度。系统的建立和使用将极大地提高森林防火管理的效率和现代化水平,进一步提高森林防火决策的科学性、合理性。

4.5 促进大火巨灾风险防控国际合作

大火巨灾对人类健康和环境影响和威胁是空前的,其严峻形势已超出一个国家的处理能力。同时,一国的野火管理不善可能会影响邻国,新的野火管理政策应充分考虑跨国层面的影响(Arango *et al.*, 2024)。火作为具有多维社会与环境影响的全球力量,特别是火灾对全球气候变化和对碳循环的影响等问题对可持续发展造成了严重风险,是全球共同面临的问题(李剑泉等, 2009)。毗邻两国机构复杂度高,联动性差,衔接困难,责任重叠、重复;共同管理的跨境公共交通服务发展薄弱,当涉及应急管理时,边界两侧互联互通和流动性的障碍大;同时,不同国家在连接性和数字服务以及云服务和大数据的使用方面存在差异(Arango *et al.*, 2024)。上述问题将给相关国家带来不同领域、资源与利益相关的系列挑战,开展国际合作,采取协调一致的全球行动,对遏制大火巨灾事件发生至关重要。在联合国、欧洲经济委员会、联合国粮农组织、国际劳工组织的林火专家组和其他联合国组织和区域性组织的参与下,已经开展了许多林火国际合作

项目,如东南亚烟雾管理项目、地中海国家林火合作项目、波罗的海地区合作项目及美国、加拿大和俄罗斯之间的合作项目等(李剑泉等,2009),未来应该进一步针对大火巨灾预测和防控等世界性难题,克服合作中的有关限制,研究构建风险识别、预警预测和防控技术体系。

6 结语

未来的气候变化和人类活动等因素将持续影响火灾的发生频率和强度,基于韧性的角度,火灾防治的目标应是在长期反应性和主动性之间找到可持续的平衡。因此,应该充分认识新的火灾形势,重新考虑管理对策,在火灾预防、扑救和火后恢复方面投入大量政治和财政支持,加强全球应对气候变化的合作,以有效应对大火巨灾问题。

参 考 文 献

- 丁腾龙. 2024. 消防救援队伍灭火设备及救援能力提升的路径探析. 中国设备工程(08): 192-194.
- 何春洋, 杨 溢, 王秋华, 等. 2024. 美国野外—城市交界域火灾研究及借鉴. 世界林业研究.
- (He C Y, Yang Y, Wang Q H, et al. 2024. A Study of Wildland-Urban Interface Fires in the United States and Lessons Learned. World Forestry Research. [in Chinese])
- 胡海清. 2005. 林火生态与管理 [M]. 北京: 中国林业出版社.
- 胡海清, 魏书精, 孙 龙, 等. 2013. 气候变化、火干扰与生态系统碳循环. 干旱区地理, 36(01): 57-75.
- (Hu H Q, Wei S J, Sun L, et al. 2013. Interaction among climate change, fire disturbance and ecosystem carbon cycle. Arid Land Geography, 36(01): 57-75. [in Chinese])
- 李剑泉, 刘世荣, 李智勇, 等. 2009. 全球变暖背景下的森林火灾防控策略探讨. 现代农业科技(20): 243-246.
- (Li J Q, Liu S R, Li Z Y, et al. 2009. Studies on Controlling Strategy for Forest Fire under the Global Warm Climate. Modern Agricultural Science and Technology(20): 243-246. [in Chinese])
- 李 菁, 石 娟, 齐 鹏, 等. 2010. 不同火灾强度下森林植被的自然恢复. 生态科学, 29(03): 193-199.
- (Li J, Shi J, Qi P, et al. 2010. The effect of fire intensity on the natural rehabilitation of forest vegetation. Ecological Science, 29(03): 193-199. [in Chinese])
- 李 强. 2023. 美国毛伊岛火灾应急救援的教训及对我们的启示. 水上安全(15): 118-120.
- 李伟克, 舒立福, 王明玉, 等. 2022. 美国加州森林火灾时空分布及其管理策略分析. 陆地生态系统与保护学报, 2(1): 31-42.
- (Li W K, Shu L F, Wang M Y, et al. 2022. Analysis on Spatial and Temporal Distribution and Management Strategy of Wildfires in California, USA. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2(1): 31-42. [in Chinese])
- 刘发林, 陈小伟, 曾素平, 等. 2019. 火干扰对森林土壤斥水性的影响研究进展. 生态学报, 39(05): 1846-1852.
- (Liu F L, Chen X W, Zeng S P, et al. 2019. Progress of the effects of fire disturbance on forest soil water repellency. Acta Ecologica Sinica, 39(05): 1846-1852. [in Chinese])
- 陆成宽. 2023. 应将林火碳排放纳入全球碳核算体系//. 科技日报: 1.
- 孙亚敏, 王卷乐. 2023. 美国夏威夷州毛伊岛山火应对情况及教训启示. 中国减灾(19): 32-35.
- 孙阳阳, 李 岩. 2023. 森林雷击火防控技术研究. 森林防火, 41(1): 1-4.
- (Sun Y Y, Li Y. 2023. Study on Forest Lightning Fire Prevention and Control Technology. Journal of Wildland Fire Science, 41(1): 1-4. [in Chinese])
- 田晓瑞, 宗学政, 王明玉. 2023. 野外-城市交界域的火管理研究进展. 林业科学, 59(6): 149-158.
- (Tian X R, Zong X Z, Wang M Y. 2023. A Review of Recent Progress in Fire Management of Wildland-Urban Interface. Scientia Silvae Sinicae, 59(6): 149-158. [in Chinese])
- 田勇臣. 2008. 森林火灾扑救智能决策支持系统研究//: 北京林业大学.
- (Tian Y C. 2008. Studies on Intelligent Decision and Support System//: Beijing Forestry University. [in Chinese])
- 王 博. 2020. 河北辽河源自然保护区油松林火烧迹地植被恢复研究//: 北京林业大学.
- (Bo Wang. 2020. Study on the restoration of Pinus tabulaeformis stand burned area in Liaohe source nature reserve, Hebei//: Beijing Forestry University. [in Chinese])

- 王秋华, 王 劲, 李晓娜, 等. 2024. 森林—城镇交界域火灾研究进展. 南京林业大学学报(自然科学版): 1-14.
- (Wang Q H, Wang J, Li X N, et al. 2024. Advances on research of wildland-Urban interface fires. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition): 1-14.[in Chinese])
- 王诗颖. 2022. 雷电火灾下森林生态模型的仿真研究//: 贵州大学.
- 吴月圆, 舒立福, 王明玉. 2024. 近年澳大利亚森林火灾综述. 温带林业研究, 7(1): 42-46.
- (Wu Y Y, Shu L F, Wang M F. 2024. A Review of Forest Fires in Australia in Recent Years. Journal of Temperate Forestry Research, 7(1): 42-46.[in Chinese])
- 许超亚. 2023. 森林消防队伍应对大火巨灾能力研究. 森林防火, 41(3): 63-65.
- (Xu. C Y. 2023. Research on the Ability of Forest Fire Brigade to Cope with Large Fire Disasters. Journal of Wildland Fire Science, 41(3): 63-65.[in Chinese])
- 闫 鹏, 赵彦飞. 2021. 新发展阶段我国森林大火巨灾风险对策研究. 今日消防, 6(9): 4-7.
- (Yan P, Zhao Y F. 2021. Study on countermeasures of forest fire catastrophe risk in china in the new development stage. Fire Protection Today, 6(9): 4-7.[in Chinese])
- 杨琦琦. 2022. 建立城市和森林消防队伍深度融合作战体系的探索. 中国消防(S1): 105-107.
- 诸 伟. 2020. 城市消防队伍参与森林火灾扑救的分析. 消防界(电子版), 6(16): 38-39.
- Arango E, Jiménez P, Nogal M, et al. 2024. Enhancing Infrastructure Resilience in Wildfire Management to Face Extreme Events: Insights From the Iberian Peninsula. Climate Risk Management, 44: 100595.
- Berenguer E, Ferreira J, Gardner TA, et al. 2014. A Large-Scale Field Assessment of Carbon Stocks in Human-Modified Tropical Forests. Global Change Biology, 20(12): 3713-3726.
- Calkin DE, Cohen JD, Finney MA, et al. 2014. How Risk Management Can Prevent Future Wildfire Disasters in the Wildland-Urban Interface. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(2): 746-751.
- Chen B, Wu S, Jin Y, et al. 2024. Wildfire Risk for Global Wildland–Urban Interface Areas. Nature Sustainability, 7(4): 474-484.
- Cheng Y, Luo P, Yang H, et al. 2023. Fire Effects On Soil Carbon Cycling Pools in Forest Ecosystems: A Global Meta-Analysis. Science of the Total Environment, 895: 165001.
- Ciavarella A, Cotterill D, Stott P, et al. 2021. Prolonged Siberian Heat of 2020 Almost Impossible without Human Influence. Clim Change, 166(1-2): 9.
- Cochrane MA. 2003. Fire Science for Rainforests. Nature, 421(6926): 913-919.
- Debano LF, Neary DG, Ffolliott PF. 1998. Fire Effects On Ecosystems. John Wiley & Sons.
- Di Virgilio G, Evans JP, Blake SAP, et al. 2019. Climate Change Increases the Potential for Extreme Wildfires. Geophysical Research Letters, 46(14): 8517-8526.
- Gibson CM, Chasmer LE, Thompson DK, et al. 2018. Wildfire as a Major Driver of Recent Permafrost Thaw in Boreal Peatlands. Nature Communications, 9(1): 1-9.
- Halofsky JE, Peterson DL, Harvey BJ. 2020. Changing Wildfire, Changing Forests: The Effects of Climate Change On Fire Regimes and Vegetation in the Pacific Northwest, Usa. Fire Ecology, 16(1).
- Hugelius G, Loisel J, Chadburn S, et al. 2020. Large Stocks of Peatland Carbon and Nitrogen are Vulnerable to Permafrost Thaw. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(34): 20438-20446.
- Kelley DI, Mathison C, Burton C, et al. 2022. Likely Future (S) of Global Wildfires//Copernicus Meetings.
- Lavorel S, Flannigan MD, Lambin EF, et al. 2007. Vulnerability of Land Systems to Fire: Interactions Among Humans, Climate, the Atmosphere, and Ecosystems. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 12(1): 33-53.
- Leite F, Bento-Gonçalves A, Vieira A, et al. 2015. Mega-Fires Around the World: A Literature Review. Wildland Fire—a Worldwide Reality. New York, Nova Science Publishers: 15-33.
- Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change, 2(1): 2391.
- Michibata T. 2024. Significant Increase in Graupel and Lightning Occurrence in a Warmer Climate Simulated by Prognostic Graupel Parameterization. Scientific Reports, 14(1).
- Moriondo M, Good P, Durao R, et al. 2006. Potential Impact of Climate Change On Fire Risk in the Mediterranean Area. Climate Research, 31(1): 85-95.
- Pan Y, Chen JM, Birdsey R, et al. 2011. Age Structure and Disturbance Legacy of North American Forests. Biogeosciences, 8(3): 715-732.

- Pausas JG. 2004. Changes in Fire and Climate in the Eastern Iberian Peninsula (Mediterranean Basin). *Climatic Change*, 63(3): 337-350.
- Pausas JG, Keeley JE. 2009. A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life. *Bioscience*, 59(7): 593-601.
- Pelletier J. 2023. Maui Wildfires of August 8, 2023 Maui Police Department Preliminary After-Action Report.
- Rábade JM, Aragonese C. 2008. Social Impact of Large-Scale Forest Fires//. Second International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: A Global View: 23-34.
- Radeloff VC, Helmers DP, Kramer HA, et al. 2018. Rapid Growth of the Us Wildland-Urban Interface Raises Wildfire Risk. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(13): 3314-3319.
- Romanello M, McGushin A, Di Napoli C, et al. 2021. The 2021 Report of the Lancet Countdown On Health and Climate Change: Code Red for a Healthy Future. *The Lancet*, 398(10311): 1619-1662.
- Sakellariou S, Tampekis S, Samara F, et al. 2017. Review of State-of-the-Art Decision Support Systems (Dsss) for Prevention and Suppression of Forest Fires. *Journal of Forestry Research*, 28(6): 1107-1117.
- Scott AC, Bowman DM, Bond WJ, et al. 2013. *Fire On Earth: An Introduction*. John Wiley & Sons.
- Siegrist M, Árvai J. 2020. Risk Perception: Reflections On 40 Years of Research. *Risk Analysis*, 40(S1): 2191-2206.
- Sullivan A, Baker E, Kurvits T, et al. 2022. Spreading Like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires.
- Tedim F, Leone V, Amraoui M, et al. 2018. Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts. *Fire (Basel, Switzerland)*, 1(1): 9.
- Yao Q, Jiang D, Zheng B, et al. 2024. Anthropogenic Warming is a Key Climate Indicator of Rising Urban Fire Activity in China. *National Science Review*.