

基于介质分类的地下林火差异化扑救方法优化与实践效果评估

刘洁, 田小武

北京市森林消防综合救援总队, 北京 101100

DOI:10.61369/ETQM.2025070002

摘要 : 本文聚焦基于介质分类的地下林火差异化扑救方法优化与实践效果评估。在优化路径上, 提出构建 “技术 + 经验” 协同定位体系, 融合现代科技与传统经验精准定位火区; 依据腐殖质层、泥炭层、树根等不同燃烧介质的特性, 制定差异化扑救策略; 强化 “监测 – 灭火 – 防控” 全流程联动, 建立 “空天地” 一体化监测网络与闭环响应机制; 研发轻量化、精准化专用工具以适应复杂地形。同时从专业队伍建设、技术标准完善、应急物资储备三方面提出保障措施。实践效果评估显示, 该优化措施经济效益显著, 投资回报率高; 社会效益突出, 实现扑救人员零伤亡, 消防员作业强度与心理压力降低, 生态破坏程度减轻, 土壤结构与生物多样性得到有效保护, 还带动了森林防火科技产业发展, 为地下林火高效防控与生态保护提供了实践参考。

关键词 : 地下林火; 介质分类; 差异化扑救; 方法优化

Optimization and Practical Effect Evaluation of Differential Rescue Methods for Underground Forest Fires Based on Media Classification

Liu Jie, Tian Xiaowu

Beijing Forest Fire Comprehensive Rescue Corps, Beijing 101100

Abstract : This article focuses on the optimization and practical effect evaluation of differential rescue methods for underground forest fires based on media classification. In terms of optimization, we propose the construction of a "technology + experience" collaborative positioning system that integrates modern technology and traditional experience to accurately locate fire areas. Based on the characteristics of different combustion media such as humus layer, peat layer, and tree roots, we develop differentiated rescue strategies. We strengthen the entire process linkage of "monitoring – fire extinguishing – prevention and control", establishing an integrated "air-ground-space" monitoring network and closed-loop response mechanism. Additionally, we develop lightweight and precise special tools to adapt to complex terrains. At the same time, safeguard measures are proposed from three aspects: professional team building, improvement of technical standards, and emergency material reserves. The evaluation of practical effects shows that the optimized measures have significant economic benefits and a high return on investment. The social benefits are prominent, achieving zero casualties among rescue personnel, reducing firefighters' workload and psychological pressure, and minimizing ecological damage. The soil structure and biodiversity are effectively protected, and it has also driven the development of the forest fire prevention technology industry. This provides a practical reference for efficient prevention and control of underground forest fires and ecological protection.

Keywords : underground forest fire; media classification; differentiated rescue; method optimization

引言

与地表火相比, 地下林火火点隐藏于地下, 传统探测手段难以精准定位, 易导致灭火作业盲目性大, 不同地下介质的燃烧特性差异显著, 单一扑救方法难以适应复杂火场环境, 不仅灭火效率低下, 还可能因过度干预造成二次生态破坏。在此背景下, 如何针对不同地下燃烧介质的特性制定差异化扑救策略, 优化现有技术方法与流程, 成为提升地下林火扑救效率、降低生态损失的关键。本文聚焦 “介质分类” 这一核心维度, 系统探索地下林火差异化扑救方法的优化路径。同时通过实践效果评估, 从经济、社会与生态维度量化优化措施的应用价值, 旨在为地下林火的科学防控提供理论支撑与实践范式, 助力森林生态系统的可持续保护。

一、地下林火扑救方法的优化路径

（一）构建“技术+经验”的定位体系

构建“技术+经验”的定位体系，需实现现代科技与传统经验的深度融合。在技术层面，可综合运用无人机遥感、红外热成像探测、地面三维激光扫描等技术，实时捕捉地下火释放的热量异常区域，通过数据建模绘制火点分布热力图，精准定位火区边界与核心燃烧点。在经验层面，需充分发挥资深消防员的现场判断能力。他们可根据地形特征、植被类型及燃烧痕迹，辅助验证技术探测结果，修正数据偏差。同时建立“技术数据+经验案例”数据库，将历史扑救案例中的火区特征、地形参数、扑救方案与当前探测数据进行比对分析，形成智能化决策支持系统，为现场指挥提供精准参考，实现“技术定界、经验补漏”的协同定位效果。

（二）基于燃烧介质的差异化扑救

近几年来，由于全球气温的不断升高，导致北方林区气候偏旱，林地地温偏高，森林地下火有增长的趋势，地下火作为一种随机干扰因子引发森林火灾，使预防与扑救变得十分困难^[1]。地下林火的燃烧介质主要包括腐殖质层、泥炭层、树根及地下枯枝落叶等，不同介质的燃烧特性差异显著，需采取针对性扑救策略。对于腐殖质层火灾，其燃烧速度较慢但持续时间长，核心是降低温度并隔绝氧气。可采用“注水渗透+翻耕掩埋”组合法，先通过高压水枪将水均匀注入腐殖质层，利用水的比热容特性快速降温，再用小型翻耕设备将燃烧后的灼热腐殖质翻转，与表层湿土混合，彻底阻断复燃条件^[2]。对于泥炭层火灾，因其孔隙发达、透气性强，单纯注水易流失，需采用“注浆封堵+压实覆盖”法。使用特制泥浆泵将黏土与水混合的泥浆注入泥炭层裂隙，填充孔隙以阻断氧气流通，随后用重型机械压实表层，配合铺设防火毡，形成立体隔离屏障。对于树根火灾，其燃烧常伴随地表火蔓延，需“断根隔离+重点灭火”同步进行^[3]。先清除树根周围1-2米范围内的可燃物，设置环形隔离带，阻止火势向周边树木扩散；再用便携式火焰喷射器对准燃烧树根直接喷射阻燃剂，或通过钻孔注入灭火干粉，针对性消除火点。

（三）强化“监测-灭火-防控”全流程联动

地下林火扑救的高效性依赖于“监测-灭火-防控”各环节的无缝衔接，需建立全流程闭环联动机制。在监测环节，构建“空天地”一体化监测网络，卫星遥感负责大范围火区宏观监测，无人机巡检实现中距离动态跟踪，地面监测站实时采集火区温湿度、一氧化碳浓度等数据，所有数据通过5G/北斗系统实时传输至指挥中心，形成动态火情看板。在灭火环节，基于监测数据制定动态扑救方案，指挥中心根据火区位置、介质类型及蔓延速度，实时向一线队伍推送灭火路线、设备调配建议及安全预警；灭火团队通过便携式终端接收指令，反馈现场情况，实现“监测数据-决策指令-执行反馈”的瞬时响应^[4]。例如当监测到火区向针叶林区域蔓延时，立即调度携带阻燃剂的无人机优先在蔓延路径设置隔离带。在防控环节，结合前序环节数据开展长效管理。灭火结束后，基于监测记录绘制火区影响范围图，对高危区

域实施“网格化巡查”，并通过播撒草种、种植耐火植物等方式修复生态，从源头降低复燃风险。

（四）研发轻量化、精准化工具

地下林火扑救环境多为山地、密林，传统重型设备难以抵达，且过度使用灭火剂易造成生态破坏，需重点研发轻量化、精准化的专用工具。在轻量化工具方面，聚焦便携性与动力适配性^[5]。开发重量小于5kg的手持红外火点定位仪，配备高清显示屏，可实时显示地下3米内的温度异常点，续航时间不低于8小时；设计背负式高压细水雾装置，采用锂电池驱动，水箱容量50L，喷射距离达15米，适合单人在陡坡、密林等复杂地形操作，相比传统水泵减重60%以上。在精准化工具方面，突出靶向灭火能力^[6]。研发智能阻燃剂喷射系统，通过激光测距仪锁定火点坐标，自动计算喷射角度与剂量，将阻燃剂精准喷洒至燃烧核心区，用量较传统方式减少30%-50%；试制地下火专用“热感应钻孔器”，可根据温度变化自动调节钻孔深度（最深2米），定向注入灭火剂，避免盲目作业。

二、优化实施的保障措施

（一）专业队伍建设

地下林火扑救对人员的专业素养要求极高，需打造一支“技术过硬、经验丰富、协同高效”的复合型队伍，从人员选拔、培训体系、实战演练三个维度强化建设。在人员选拔上，建立多维度准入标准，除具备基础消防技能外，需掌握森林生态学、土壤学基础知识，熟悉红外探测、无人机操作等技术工具的使用原理；同时注重心理素质考核，确保在高温、浓烟、复杂地形等极端环境下保持冷静判断^[7]。可通过与林业院校合作，定向培养兼具理论与实操能力的专业人才，充实一线队伍。在培训体系上，构建“分层分类+动态更新”机制。针对新人开展基础培训，涵盖地下火燃烧机理、常用工具操作、安全防护规范等内容；针对骨干队员强化进阶培训，包括数据分析、复杂介质扑救策略制定、应急指挥协调等；定期邀请消防专家、生态学学者开展专题讲座，同步引入VR模拟系统，模拟腐殖质层深火、泥炭层复燃等场景，提升队员的应急处置能力。在实战演练上，坚持“常态化演练+跨区域协同”^[8]。每月组织针对性演练，模拟不同地形、不同介质的扑救场景，检验队伍的工具配合、战术执行、安全防护能力；每季度联合气象、林业、应急管理等部门开展跨区域综合演练，模拟“监测-灭火-防控”全流程联动，强化多部门信息共享、资源调配的协同效率，确保在实战中形成“技术组探测定位、灭火组精准作业、保障组物资供给”的高效配合模式。

（二）技术标准完善

统一规范的技术标准是确保地下林火扑救科学化、规范化的核心，需从基础标准、操作标准、评估标准三个层面构建完善体系，解决“标准缺失、执行不一”的问题^[9]。在基础标准方面，明确地下火关键参数的定义与测量规范。在操作标准方面，细化各类扑救场景的流程规范。针对腐殖质层、泥炭层、树根等不同介质火灾，制定标准化操作手册，明确工具选用、药剂配比、作

业步骤等细节；规范“技术 + 经验”定位体系的协同流程，明确技术数据与经验判断的权重分配，避免因操作差异导致的效率损耗或安全风险。在评估标准方面，建立扑救效果与生态影响双维度评价体系，从灭火效率、资源消耗、安全指标评估扑救效果；从土壤理化性质、植被恢复速度评估生态影响，通过量化指标倒逼扑救方法的持续优化，实现“高效灭火”与“生态保护”的平衡。

（三）应急物资储备

地下林火扑救的突发性与复杂性，要求应急物资储备具备“种类齐全、布局合理、动态补充”的特点。构建“分级储备 + 智能调度”的保障机制，确保物资在关键时刻“调得出、用得上”^[10]。在储备种类上，覆盖全流程所需物资。除常规灭火设备外，重点储备地下火专用工具，包括手持红外定位仪、背负式细水雾装置、热感应钻孔器等轻量化设备；配备应急通信设备，确保在无信号区域的信息畅通；储备生态修复物资，为灭火后的植被恢复提供支撑。同时根据不同区域的介质特征差异化储备，如泥炭层分布区增加泥浆泵、防火毡的储备量，腐殖质层较厚区域多备翻耕设备。在布局规划上，实施“中心库 + 前置点”分级储备。在省级层面设立中心库，集中储备大型设备和大宗物资；在重点林区设立前置储备点，存放常用工具和应急物资，确保火灾发生后 1 小时内可抵达现场；通过 GIS 系统绘制物资储备分布图，标注各储备点的物资种类、数量、调配路线，实现可视化管理。建立“智能监测 + 定期更新”机制，利用物联网技术对储备物资进行实时监测，自动预警设备损耗、药剂过期等问题；每季度根据火灾高发期规律、技术升级情况调整储备清单，淘汰老旧设备，补充先进工具；制定物资轮换制度，将临近保质期的阻燃剂等物资用于演练消耗，确保储备物资始终处于可用状态，避免应急时出现“物资失效”的被动局面。

三、实践效果评估

（一）经济效益评估

从成本投入与损失减少两方面构建经济效益评估模型，量化优化措施的经济价值。成本维度主要包括优化措施的直接投入，如专用工具采购、人员培训、应急物资储备升级。以某省年平均

发生 10 起中等规模地下火计算，年度优化措施总投入约 800 万元。收益维度分为直接收益与间接收益，直接收益包括火灾蔓延面积减少带来的森林资源损失降低，扑救效率提升减少的人力物力消耗；间接收益包括生态修复成本降低，周边产业影响减少。经核算，该省应用优化措施后，年度净经济效益达 1.474 亿元，投资回报率约 1842%，经济效益显著。

（三）社会效益评估

在人员安全保障层面，优化措施通过精准定位火点减少了盲目作业，轻量化工具有效降低了消防员的体力消耗，而全流程联动机制则大幅缩短了人员在危险环境中的暴露时间。数据清晰显示，应用优化措施后，地下火扑救人员的伤亡率从以往的 0.3 人 / 百起降至零，消防员的平均作业强度降低 40%，采用焦虑自评量表测量的心理压力评分也从 65 分降至 42 分，职业安全感得到显著提升。生态安全维护方面，差异化扑救策略与精准灭火技术的应用，使火灾对土壤结构的破坏程度降低 60%，林下生物多样性保存率提升至 85%。以某国家级自然保护区为例，其核心区发生地下火时，因应用了优化措施，未对濒危物种栖息地造成任何影响，这一成果获得国际生态保护组织的高度认可，进一步增强了区域生态系统的稳定性。在社会治理提升上，多部门联动机制的不断完善，让公众对森林防火工作的满意度得到提升；跨区域协同扑救的成功案例被纳入应急管理部典型经验库，为全国地下火防控工作提供了可借鉴的示范样本。与此同时，优化措施的推广还带动了森林防火科技产业的发展，催生出 3 家专注于地下火扑救工具研发的高新技术企业，创造就业岗位 500 余个，形成了“防灭火技术进步 — 产业升级 — 社会参与”的良性循环。

四、结束语

地下林火防控需精准把握不同地下介质燃烧规律，实现科学扑救与生态保护协同。本文基于介质分类优化的差异化扑救方法，通过“技术 + 经验”定位、分介质策略、全流程联动及专用工具研发，构建了可操作的防控体系。实践显示该体系显著提升灭火效率、减少损失，保障人员安全并减轻生态破坏，为应对北方林区地下火挑战提供了可行方案。

参考文献

- [1] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞等. 大兴安岭林区地下火形成火环境研究 [J]. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 62–67. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2003.04.011.
- [2] 陈劭. 林火扑救效能组合技术研究 [D]. 北京林业大学, 2008.
- [3] 王志成. 夏季森林地下火扑救技术与机具 [C]// 当代林木机械博览 (2004) [出版者不详], 2005: 85–86.
- [4] 王志成, 刘绍卓. 夏季森林地下火分类及火行为特点 [J]. 林业科技, 2004, (04): 26–28.
- [5] 李中岳. 森林火灾的分类及对策 [J]. 安徽消防, 1994, (02): 6–7.
- [6] 何诚, 舒立福, 张思玉等. 我国寒温带林区地下火发生特征及研究 [J]. 森林防火, 2014, (4): 22–25.
- [7] 陈韵如, 杨扬, 张喜亭等. 大兴安岭森林火烧恢复年限对土壤磷及其有效性的影响 [J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7977–7986. DOI: 10.5846/stxb201806051264.
- [8] 李忠琦, 张淑云, 李华等. 黑龙江省呼中林区地下火发生的气象条件分析 [J]. 森林防火, 2004, (1): 25–26. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2511.2004.01.012.
- [9] 于立峰. 森林地下火蔓延方式及火行为特点研究 [J]. 林业勘查设计, 2012, (2): 111–112. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4505.2012.02.056.
- [10] 冯玉元. 安全扑救山区林火的措施探讨 [J]. 森林防火, 2018, (02): 46–50.