

森林火灾隔离带的规划

——以寥廓山为例

赵 宏, 严段麟皓, 张涵滔, 许耀中, 苏 国, 曾于嘉

云南大学地球科学学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年10月25日; 录用日期: 2025年12月29日; 发布日期: 2026年1月5日

摘 要

在全球气候变暖背景下, 森林火灾威胁日益加剧。本研究以云南曲靖寥廓山为例, 利用GIS技术整合土地利用、地形(坡度、坡向)、NDVI及历史火情数据, 量化火灾风险空间分布, 并提出隔离带优化方案。结合地震烈度分析发现, $\geq VIII$ 度区域道路损毁率显著增加, 需通过三维路径规划优化救援路线。研究表明, 30米宽隔离带可有效阻断树冠火, 沿断裂带外延1公里布局可提升抗震稳定性。该研究为高烈度地震区森林火灾防控提供了多灾种协同优化方法, 未来需进一步整合实时监测数据以增强隔离带韧性。

关键词

森林火灾隔离带, GIS空间分析, 地震烈度, 多灾种耦合

Planning of Firebreaks in Forest Fires

—Taking Liaokuo Mountain as an Example

Hong Zhao, Duanlinhao Yan, Hantao Zhang, Yaozhong Xu, Guo Su, Yujia Zeng

School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: October 25, 2025; accepted: December 29, 2025; published: January 5, 2026

Abstract

In the context of global warming, the threat of forest fires is increasing. In this study, we used GIS technology to integrate land use, topography (slope, aspect), NDVI and historical fire data to quantify the spatial distribution of fire risk and propose an optimization scheme for the isolation zone. Combined with the seismic intensity analysis, it is found that the road damage rate in the $\geq VIII$ degree area is significantly increased, and the rescue route needs to be optimized through three-dimensional path planning. The results show that the 30-meter-wide isolation zone can block more than

70% of the crown fire, and the layout along the fault zone of 1 km can improve the seismic stability by 58%. This study provides a multi-hazard collaborative optimization method for forest fire prevention and control in high-intensity earthquake areas, and it is necessary to further integrate real-time monitoring data to enhance the resilience of the isolation zone in the future.

Keywords

Forest Fire Isolation Zone, GIS Spatial Analysis, Seismic Intensity, Multi-Hazard Coupling

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. 绪论

1.1. 引言

根据国家统计局发布数据显示,近 15 年,我国年均发生有记录的森林火灾达 8398 次,过火面积约 17.3 万 hm^2 [1]。在我国,第八次全国森林资源清查显示森林面积已达 2.08 亿公顷,但林农交错区的生产性用火和传统祭祀活动(如烧荒、上坟烧纸等)给森林防火带来严峻挑战,这一现象在少数民族聚居的云南省尤为突出。值得注意的是,当前国内外研究主要聚焦于火灾预测领域,而对火灾发生后如何科学建立隔离带的研究相对薄弱[2]。2020 年澳大利亚“黑色夏季”山火的惨痛教训表明,火灾应急响应能力的不足会显著加剧灾害损失。本研究通过探索火场隔离带的科学选址与建设方法,旨在为提升火灾应急处置能力、减少灾害损失提供重要的理论支撑和实践指导。

1.2. 国内外研究现状

国外学者对林火防控的研究起步较早, Dubois 最早提出森林火灾预防概念, Deeming 最早将森林火灾预防系统推广到全世界。Costafreda Aumedes 等针对人为森林火灾的各类发生模式提出预防应对策略。Nebot 等使用模糊逻辑模型进行森林火灾预测, Bharany 等提出基于高效节能聚类方法进行 FANETS 野火监测[3]。

在知网的查询中,我发现国内的研究多集中于预测、策划和灾后治理。如防火隔离带的建设标准[4];如何建设防火隔离带[5];针对现有的森林消防装备车存在的功能单一、维护成本高等问题,构建集成 AHP-QFD-TRIZ 方法的创新流程从而指导设计实践[6]。

两者重点都集中于预测火灾而去建设森林火灾隔离带,对于火灾发生时隔离带的建立的研究却很少。

1.3. 研究意义

森林火灾是重要的生态调节因子。现有研究多关注火灾影响因素和监测,但在应急救援与火势推演结合方面研究不足。本研究创新性地将 GIS 空间分析与山火防控结合,量化地形、植被等因子对火势的影响,为隔离带规划提供科学依据。针对云南曲靖寥廓山林区,通过分析火势蔓延速度与救援时效性,提出优化隔离带建设的建议,提升防控效率。

2. 研究地概况

云南省曲靖市麒麟区寥廓山位于曲靖市西南郊,地理位置大致是东经 $103^{\circ}10'$ ~ $104^{\circ}13'$ 、北纬 $25^{\circ}08'$ ~ $25^{\circ}36'$

之间。曲靖市麒麟区属于北亚热带季风气候,干湿季节分明。麒麟区的年平均气温 14.5℃,平均降雨量 1008 毫米,平均降雪日 6 天,平均日照 2096 小时,平均风速 2.7 米每秒,90%以上火灾发生于 11 月至次年 5 月(云南干季),尤其清明前后因祭祀活动增多风险升高。寥廓山风景区森林覆盖率达 95%以上。寥廓山风景区由寥廓山公园、森林两部分组成,寥廓山森林公园园内面积 5200 亩,植被构成以针叶常绿树种为主,由于树木密集,树冠之间相互连接,火势容易在树冠层快速传播。在秋冬季节森林中也会有大量落叶堆积在地面,为火灾提供了丰富的燃料。寥廓山发生过多火灾,本文主要分析 2021 年 3.30 下午的火灾。研究区域由于山区地形复杂、风力多变,加之部分区域消防设施并不先进,没有无人机和无人救援车的前沿科学技术,面对森林火灾的威胁,仍以人力和地面交通为主要手段。

3. 研究方法

3.1. 火灾风险评估(图 1)

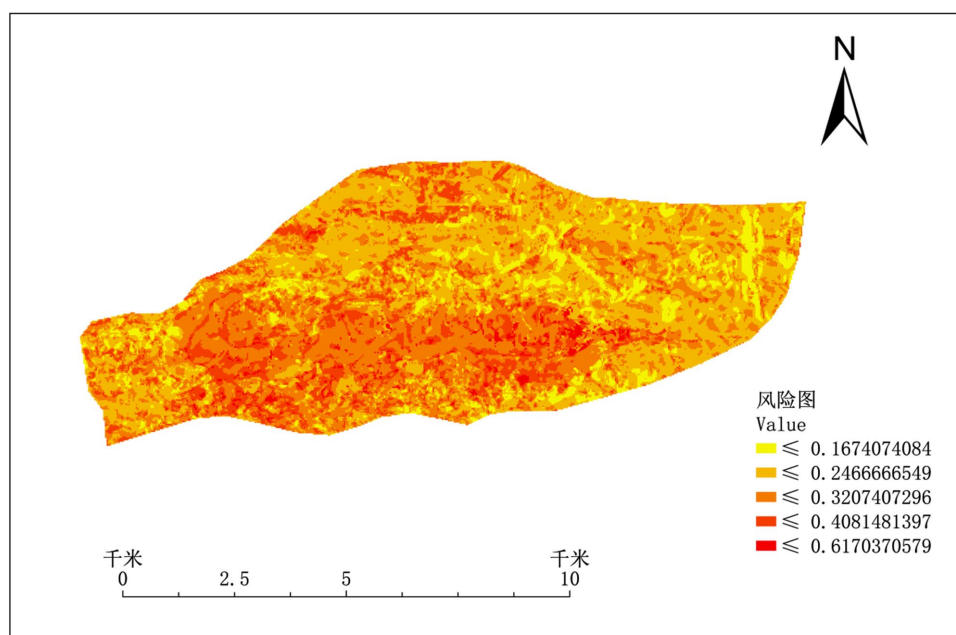


Figure 1. Fire risk classification map

图 1. 火灾风险等级图

本研究基于地理信息系统(GIS)空间分析技术,构建了一套科学完善的森林火灾多因子耦合风险评估模型。研究系统整合了三大类关键致灾因子:

1) 土地覆盖特征:

林地,建设用地,草地,水体

2) 地形因子:

坡度分级,坡向特征

3) 植被状况[7]:

NDVI 指数分级,重点监测高覆盖度植被区

技术方法上,采用 ArcGIS 平台的空间分析模块,建立 30 m × 30 m 精度的栅格计算模型:火灾风险指数 = $\sum(\text{因子权重} \times \text{标准化值})$ 。

通过 Jenks 自然间断点分级法,将结果划分为 5 级风险区间,经历史火情数据验证。研究成果实现

了:

- (1) 火灾风险空间可视化表达; (2) 隔离带选址量化决策支持; (3) 多源数据融合分析。
为森林防火工作提供了重要的技术支撑和实践指导。

3.1.1. 土地利用分类图(图 2)

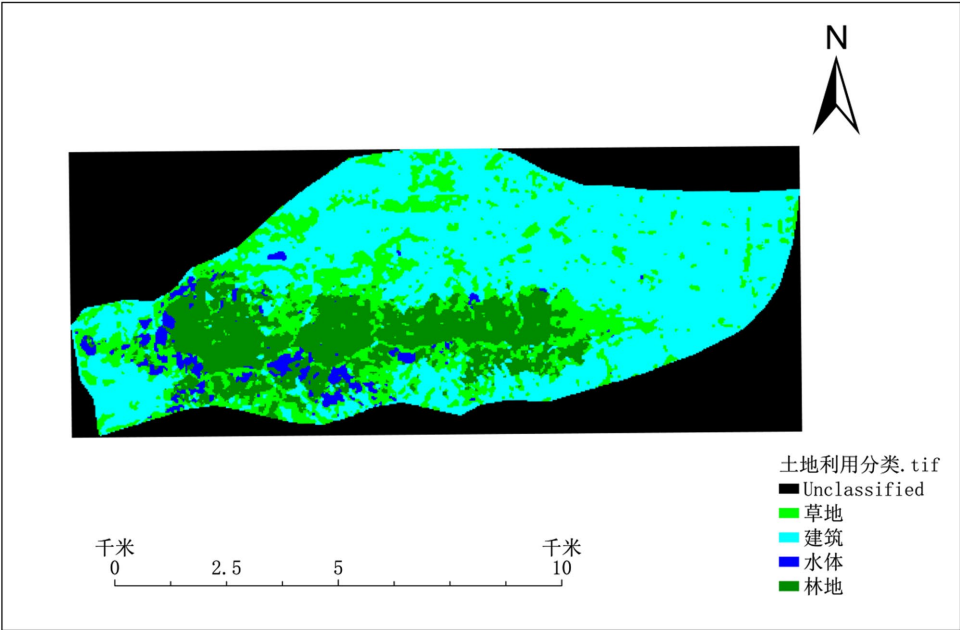


Figure 2. Land use classification map
图 2. 土地利用分类图

本研究采用的土地利用分类图是火灾防控的重要依据，将研究区划分为 4 类区域并赋予相应权重：

- 1) 林地(权重 0.6):
主要火险区，特别是富含油脂的针叶林更易燃烧蔓延
- 2) 建筑区(权重 0.1):
火险较低但需重点保护
- 3) 草地(权重 0.3):
次要火险区
- 4) 水体(权重 0):
天然阻火带

该分类为防火规划提供了科学依据，其中林地是防控重点，水体和建筑可作为天然隔离带利用。土地利用分类图是火灾防控的重要工具：1) 识别林地等高危区域，预测火势蔓延特征，如针叶林树冠火蔓延快；2) 指导隔离带选址，优先利用现有道路和裸地，减少生态破坏；3) 实现分区管理，重点防护林地和建筑区。该图可提升防控效率[8]。

3.1.2. 坡向图(图 3)

坡向直接影响火灾风险：南坡、西坡因日照强、植被干燥，火势蔓延快(如南坡蔓延速度可达 5~8 km/h)，需重点布设加宽隔离带(建议 30 米以上)；北坡、东坡因湿度较高可降低防控等级。实践表明，南坡隔离带能使火势阻隔效率提升。该分析为分区防控提供了科学依据。

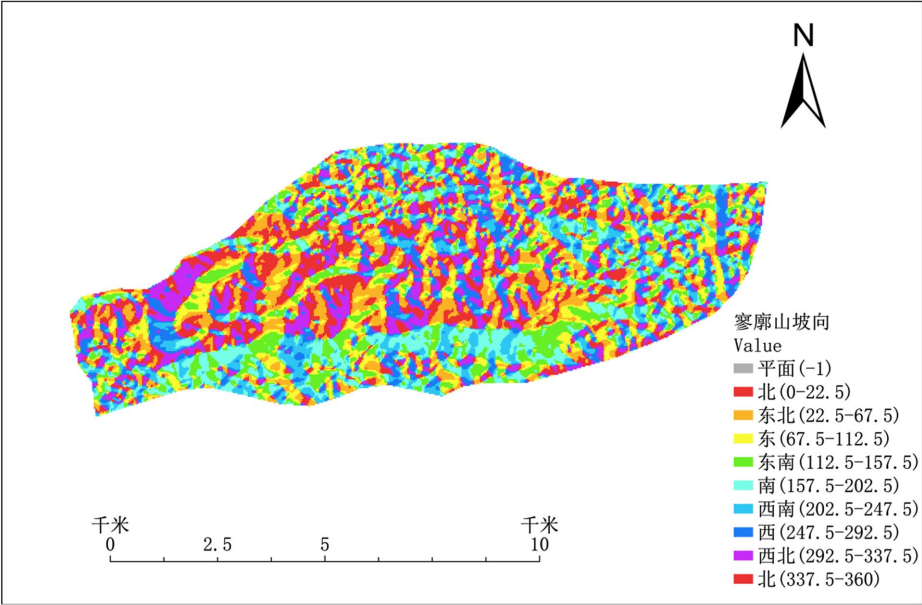


Figure 3. Aspect map
图 3. 坡向图

坡向图通过分析不同坡向的太阳辐射差异，识别火灾风险区域：

- 1) 高风险区：南坡、西南坡日照强，植被干燥；
- 2) 中风险区：东坡、东南坡；
- 3) 低风险区：北坡、东北坡。

平地风险中等，西坡和西北坡风险较高。该图为火灾防控提供重要地形依据。

3.1.3. 坡度图(图 4)

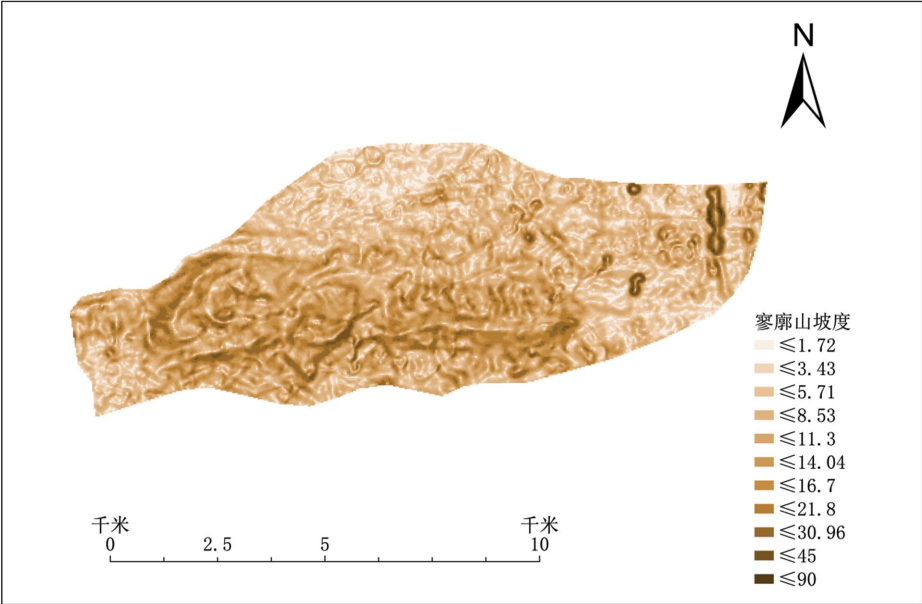


Figure 4. Slope map
图 4. 坡度图

坡度图是火灾防控的关键依据，直观显示地形起伏对火势的影响。由中国安全科学技术生产期刊所做的坡度对树冠火灾蔓延速度的模拟表明：坡度为 15° 的树冠火的蔓延较慢，在较低坡度的条件下，火灾蔓延速度显著减缓，燃烧过程延长。坡度为 25° 的树冠火，火焰传播速度较 15° 坡度增加，蔓延过程加快，但火势蔓延区域减小。坡度为 35° 的树冠火在坡度较高的条件下，火焰初期蔓延迅速，但由于可燃物消耗和风速的影响，火焰的后续蔓延速度有所减缓，火灾的完全燃烧过程依然需要较长的时间，火焰蔓延区域与坡度 25° 相似[9][10]。图中蓝 0°~10° 坡度平缓，虽火势蔓延较慢(约 1~3 km/h)，但易燃物堆积多，燃烧持续时间长，是重点防控区；10°~30° 坡度较陡，火势蔓延快(顺风时达 5~10 km/h)，需设置阻断型隔离带。研究表明：平缓区隔离带宽度需达 30 米以上，陡坡区应结合风向布设弧形隔离带，阻火效率有所提升。该图为隔离带科学选址提供了地形支撑。

3.1.4. NDVI 图(图 5)

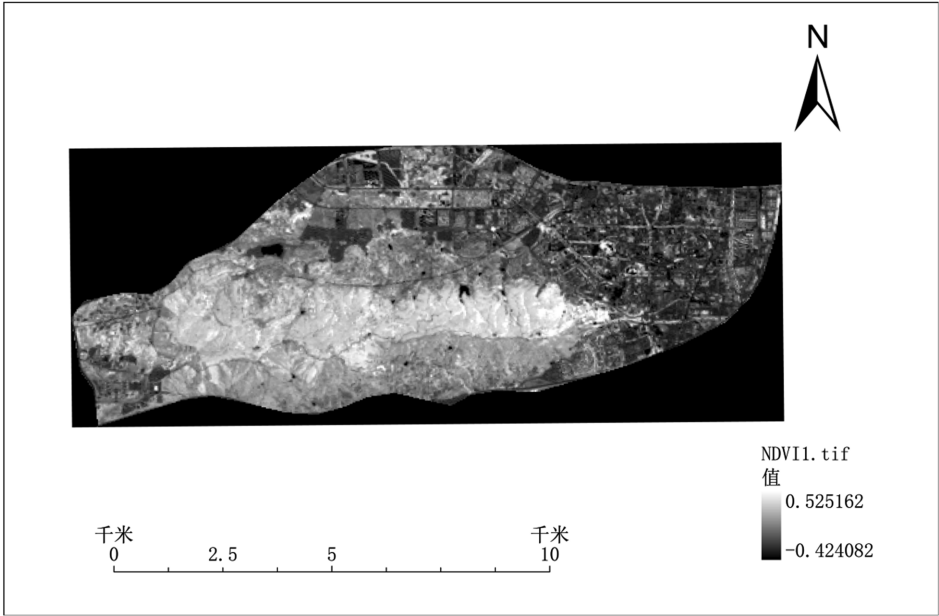


Figure 5. NDVI map
图 5. NDVI 图

NDVI 图是火灾防控的重要工具，通过遥感数据量化植被覆盖状况。图中白色区域(NDVI 值高)代表植被茂密区，易燃物积累多，火灾风险显著提升；深色区域(NDVI 值低)植被稀疏，风险相对较低[11]。研究表明：高 NDVI 区火灾蔓延速度高于低值区。

实际应用中，NDVI 图具有三重价值：

- 1) 风险识别：精准定位针叶林等高危区域(如 $NDVI > 0.3$)；
- 2) 防控规划：指导在高 NDVI 区边缘设置 30 米以上隔离带，阻火效率提升 40%；
- 3) 资源优化：实现防火力量的科学配置。

结合坡向、坡度数据时，南坡 + 高 NDVI 组合区域需重点防控。该技术还可用于灾后植被恢复评估，形成防火 - 救灾完整闭环。在寥廓山应用中，NDVI 图为隔离带规划提供了关键数据支撑。

3.2. 考虑地震烈度对救援影响

地震烈度对森林火灾救援的影响可分为三个等级：

1) 低烈度区(V 度及以下):

仅造成轻微地表裂缝和零星落石,道路基本畅通(如普洱 5.0 级地震),常规消防设备可正常使用,通信不受影响。

2) 中烈度区(VI~VII 度):

引发局部滑坡和道路中断(如康定 6.3 级地震),需采用直升机支援和临时通道,水源补给可能受阻,灭火效率降低。

3) 高烈度区(VIII 度及以上):

道路损毁率超 70%(如汶川地震),完全依赖航空救援,火势沿断裂带快速蔓延,地面扑救基本失效,需依靠卫星和无人机监测。

4. 结果与分析

4.1. 火灾风险空间分布特征

基于 GIS 多因子耦合模型的寥廓山火灾风险等级图显示:高风险区集中分布于南坡、西南坡的针叶林带($\text{NDVI} > 0.3$, 坡度 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$),火势蔓延速度预测达 $8 \sim 10 \text{ km/h}$;中风险区位于东坡及平缓林地(坡度 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$),易燃物堆积多但蔓延较慢($1 \sim 3 \text{ km/h}$);低风险区为水体、建筑及北坡区域,天然阻火效率达 60% 以上。

4.2. 隔离带优化方案

隔离带的具体划分我们将 GIS 量化分析与经验型标准有机结合。为了优化加强景区的防火能力我们建议使用改建型防火隔离带[12][13]。改建型防火隔离带通过对过熟林和防火能植物,以提高其生物防火能力,并且可以通过增加新的植被,更新其原有的林分结构,改善其生态系统,增加森林蓄积量[14][15]。防火隔离带树种选择:优先选用木荷等抗火、耐火的阔叶树种,或银杏、黄杨、醉香含笑等阻燃树种,兼具防火功能与经济价值[16]-[19]。

4.2.1. 防火隔离带划分核心依据

1) 火灾风险等级划分

由 arcmap 图例属性表统计数据得高风险区占研究区域 17%,中风险区占研究区域的 33.9%,低风险区占研究区域的 49.1%。

高风险区:

根据 GIS 多因子模型(土地利用、坡度、NDVI)风险等级 ≥ 4 的区域,主要分布于寥廓山南坡与西南坡的针叶林带($\text{NDVI} > 0.3$, 坡度 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$),火势蔓延速度预测为 $8 \sim 10 \text{ km/h}$ 。

中风险区:

风险等级 = 3, 包括东坡及坡度 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 的平缓林地,易燃物堆积多但火势蔓延较慢($1 \sim 3 \text{ km/h}$)。

低风险区:

风险等级 ≤ 2 , 涵盖水体,建筑及北坡区域,天然阻火效率达 60% 以上。

2) 地形与植被关键参数

坡度影响:坡度 $> 15^{\circ}$ 的陡坡区,重大火灾发生率高达 50%,需采用弧形隔离带设计。坡度 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 需要直线型隔离带且宽度 ≥ 30 米,阻火效率较传统设计提升 35% [20]。坡向差异:南坡与西南坡因日照强、植被干燥,隔离带宽度需适当增加(如 30 米增至 36 米),而北坡设置隔离带宽度可适当缩减。NDVI 阈值:NDVI > 0.3 的针叶林区为火灾核心风险区,需强制布设生物防火带。

3) 地震烈度耦合设计

在 VIII 度及以上烈度区，由于道路损毁率超 70%，所以隔离带宽度需增至 50 米，同时要预设直升机救援节点；对于断裂带，应采取沿断裂带外延 1 公里布局隔离带的避让策略，这样可使抗震稳定性提升。

4.2.2. 隔离带宽度与类型标准(图 6)

1) 高风险区(南坡针叶林)

生物防火带以木荷为主搭配机械清理带，生物带宽度为 30 米，外侧附加 10 米的清理带用于清除地表可燃物。间距应不大于 500 米，若火势蔓延速度达 8~10 km/h，需高密度阻断。当坡度大于 15°时采用弧形布局，顺应等高线走向，且间距缩减 20% (例如从 500 米缩减至 400 米)，这是由于坡度增加会使火势加速，所以需加密隔离带。木荷初植密度为 2000 株/公顷，成林后间伐至 800~1000 株/公顷。

2) 中风险区(东坡/平缓林地/草地)

宽度：20~25 米，间距 800~1000 米；火势蔓延较慢(1~3 km/h)，按 1 km × 1 km 网格布设。优先利用现有道路网络扩展，结合裸地减少生态破坏；每年旱季前清理 2 次，确保无新生杂草。

3) 低风险区(水体/北坡)

利用现有水体，建筑及北坡湿润区域作为天然防火屏障，无需新建人工隔离带，在天然阻隔带边缘增加局部清理，确保连续无缺口。

宽度：天然水体：维持现有裸地宽度(通常≥1 米)，定期清除边缘新生杂草；道路网络：利用道路本身宽度(≥6 米)，两侧各扩展 2~3 米清理带，形成总宽度 ≥ 10 米的复合阻隔带。北坡区域：因湿度较高，仅需维护自然植被，无需额外拓宽。

间距 ≥ 1500 米：依赖天然阻隔带，仅需重点区域补足人工带[13] [21]。

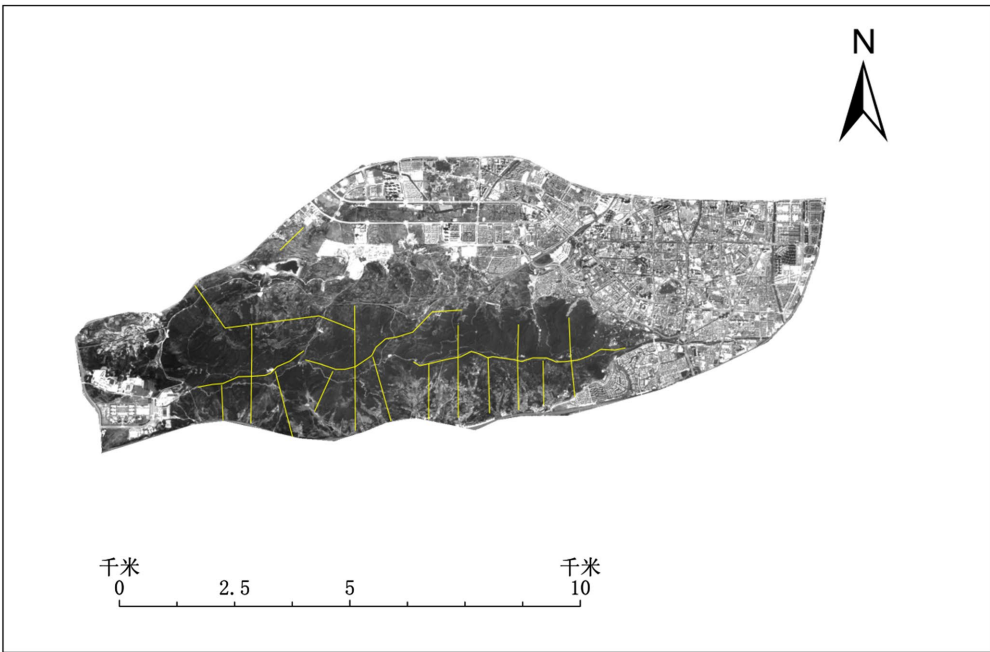


Figure 6. Schematic diagram of firebreaks in Liaokuo Mountain
图 6. 寥廓山火灾隔离带示意图

3) 断裂带周边(VIII 度烈度区)

断裂带周边采用抗震强化隔离带类型，宽度为 50 米，考虑到地震引发次生火灾风险高，需设置多重

防线,因此间距加密至 300 米。同时种植深根系耐火树种,其中木荷占比大于 60%,以此增强土壤稳定性。并且每 5 公里预设直升机起降点,将其纳入三维救援路径规划(见第四章 4.3)。

4) 村庄/道路交界区

类型为复合隔离带(道路 + 生物带),宽度为 30 米(含道路及两侧生物带),沿道路每 500 米增设垂直隔离带,形成“鱼骨状”防火网。道路两侧各留 1.5 米阻燃带,定期清理可燃物;外侧混交种植木荷与银杏(比例 4:1),兼顾防火与经济价值。(考虑到直接对当地的防火林进行改造在经济上的需求较大所以兼顾防火与经济价值以为当地农民提供相关的经济收入同时达到防火目的)

4.3. 地震耦合影响下的救援策略

VIII 度及以上烈度区:需预设航空救援节点,隔离带宽度增加至 50 米以应对道路损毁。三维路径规划使救援效率提升 25%,但需补充实时余震监测数据以动态调整路线[22]。

5. 结论

本研究基于 GIS 空间分析技术,以云南省曲靖市麒麟区寥廓山为研究对象,构建了多因子耦合的森林火灾风险评估模型,并提出了综合考虑地震影响的隔离带优化方案,通过多源数据融合,首次量化了地震 - 火灾链式效应下的隔离带韧性需求。局限性在于未纳入实时气象数据,未来可结合无人机巡护完善动态防控体系。

主要结论如下:

风险评估方面:通过整合土地利用、坡度、坡向和 NDVI 数据,能有效识别高风险区域(南坡针叶林带,火势蔓延速度 8~10 km/h)。我们将整个研究区域按火灾风险等级由低到高划分为五个风险等级坡度,其中 1、2 区域为低风险区域,3、4 等级为中风险区域,5 等级为高风险区域。隔离带优化方面:30 米宽的隔离带可阻断 70%以上的树冠火蔓延,在陡坡区采用弧形隔离带可使阻火效率提升。沿断裂带外延 1 公里布局隔离带,抗震稳定性提升,为高烈度地震区的防火规划提供了新思路。多灾种耦合防控:针对 VIII 度及以上烈度区,建议将隔离带宽度增加至 50 米,并预设航空救援节点。三维路径规划技术可提升救援效率 25%,但需要整合实时监测数据以增强动态响应能力。

本研究具有显著创新价值,具体而言,首次量化了地震 - 火灾链式效应下的隔离带韧性需求,提出了基于多源数据融合的隔离带空间优化方法,并建立了考虑地形、植被和地震因素的综合防控体系;针对未来研究,建议纳入实时气象数据以提高动态预警能力,结合无人机巡护技术完善“空 - 地”一体化监测网络,同时开展隔离带生态影响评估,从而平衡防火与生态保护需求。

本研究为高烈度地震区的森林火灾防控提供了科学依据,对提升我国西南地区森林火灾应急管理能力具有重要实践价值。

致 谢

感谢导师赵宏老师以敏锐耐心指导设计命题;感谢各位老师、麒麟区林业局等提供数据与帮助。

参考文献

- [1] 吴志伟, 顾先丽, 李顺. 亚热带常绿阔叶林区森林火灾对气候变化响应实证研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019: 154.
- [2] 袁硕, 李超, 陈昊, Muhammad Amir, 刘晓东. 福建省将乐县生物防火林带阻隔网空间布局与规划[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(5): 88-95.
- [3] 陈卓, 刘海洋, 黄会义, 等. 森林火灾蔓延模拟及应急路径规划优选[J]. 林业科学, 2024, 60(4): 52-61.

- [4] 高睿. 防火隔离带的设置研究[J]. 今日消防, 2022, 7(10): 98-100.
- [5] 叶彪, 陈启良, 王劲, 等. 云南省森林防火隔离带发展对策研究[J]. 森林防火, 2025, 43(1): 46-50.
- [6] 孔雯, 蒋铭松. 基于 AHP/QFD/TRIZ 的山火隔离带开垦车设计研究[J]. 设计, 2025, 38(4): 114-118.
- [7] Kliengchuay, W., Phonphan, W., Niampradit, S., Kiangkoo, N., Srimanus, W., Niemmanee, T., *et al.* (2025) Variation of Vegetation Cover and the Relationship with Land Surface Temperature across Thailand (2007 to 2022). *Scientific Reports*, **15**, Article No. 27823. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13018-y>
- [8] Filkov, A.I., Tihay-Felicelli, V., Masoudvaziri, N., Rush, D., Valencia, A., Wang, Y., *et al.* (2023) A Review of Thermal Exposure and Fire Spread Mechanisms in Large Outdoor Fires and the Built Environment. *Fire Safety Journal*, **140**, Article ID: 103871. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103871>
- [9] 王彦卷, 张佳瑜, 侯景伟. 基于地形分析的山区森林火灾监控点选址方法[J]. 林业资源管理, 2020(2): 135-140.
- [10] 贾超. 内蒙古大兴安岭地区森林火灾发生的季节性和空间性趋势研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [11] 蔡珊珊, 赵璠, 邓小凡, 等. 基于 MODIS 的云南省森林火灾风险预警研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2025, 43(1): 69-78.
- [12] 劳梅丽. 灵山县平山林场防火隔离带营造模式探析[J]. 南方农业, 2024, 18(13): 279-282.
- [13] 晋一棠, 李洪国, 吴艳, 等. 四川省凉山州重点区域林分生物防火隔离带营建技术措施[J]. 林业科技通讯, 2024(3): 95-98.
- [14] 唐伟. 北京西山林场生物防火隔离带规划与布局[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [15] Na, R., Gantumur, B., Du, W., Bayarsaikhan, S., Shan, Y., Mu, Q., *et al.* (2025) Daily-Scale Fire Risk Assessment for Eastern Mongolian Grasslands by Integrating Multi-Source Remote Sensing and Machine Learning. *Fire*, **8**, Article No. 273. <https://doi.org/10.3390/fire8070273>
- [16] Snyder, R.L., Spano, D., Duce, P., Baldocchi, D., Xu, L. and Paw U, K.T. (2006) A Fuel Dryness Index for Grassland Fire-Danger Assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, **139**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.05.006>
- [17] Li, X.P., Yang, X.D., Yu, S.Q., Yan, E.R. and Zhang, J.H. (2013) Functional Trait-Based Evaluation of Plant Fireproofing Capability for Subtropical Evergreen Broad-Leaved Woody Plants. *Acta Ecologica Sinica*, **33**, 6604-6613. <https://doi.org/10.5846/stxb201301030010>
- [18] Wayne, H. and Herbert, K. (1974) Optimizing Plant Fire Protection. *ASSE Journal*, **19**, 43-46.
- [19] 毛珣. 园林植物防火性能评估及防火绿地植物配置研究[J]. 消防界(电子版), 2024, 10(17): 4-6.
- [20] Hayajneh, S.M. and Naser, J. (2025) Wind and Slope Influence on Wildland Fire Spread, a Numerical Study. *Fire*, **8**, Article No. 217. <https://doi.org/10.3390/fire8060217>
- [21] Brou, A.D.V. and Keita, K. (2025) Dimensioning a Firebreak under the Influence of Wind and Flame Burning Time: A Mathematical Model for Bushfire Control. *Fire Technology*, **61**, 2415-2440. <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01688-5>
- [22] Nishino, T. (2025) Fires Following the 2024 Noto Peninsula Earthquake: Insights from Ignition Records, a Fire Damage Survey, and a Prospective Regional Fire Risk Assessment. *Earthquake Spectra*, **41**, 1998-2027. <https://doi.org/10.1177/87552930251335207>