

中文引用格式:李华,陈鑫,益朋,等.基于改进 NSGA-II 的森林草原消防站多目标选址优化[J].中国安全科学学报,2026,36(3):171-177.

英文引用格式:LI Hua, CHEN Xin, YI Peng, et al. Research on multi-objective optimization of forest fire station site selection based on improved NSGA-II [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(3): 171-177.

基于改进 NSGA-II 的森林草原消防站 多目标选址优化*

李华¹副教授, 陈鑫¹, 益朋^{**1}讲师, 吴立舟²

(1 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055;

2 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

中图分类号: X928.7

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.1051

【摘要】 为提升灭火救援队伍的应急响应能力与森林草原火灾防控布局的整体效能,提出基于混合防火应急道路的森林草原消防站选址优化方法。通过八向倾点算法结合数字高程模型(DEM),构建混合防火应急道路网络,提高消防队伍前期预防与应急响应能力;采用改进非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 的位置分配模型优化消防站选址,确保资源合理配置并提升覆盖范围。结果表明:混合防火应急道路对整体区域覆盖率为 96.91%,对高风险区域覆盖率为 93.51%,优化结果有助于提高救援队伍应对复杂地形的能力。优化后的消防站布局变异系数为 0.26,能够保障消防队伍巡查与响应的能力。整体需求满意度为 0.86,可确保关键区域得到充分保护。

【关键词】 非支配排序遗传算法(NSGA-II); 森林草原; 消防站; 多目标; 选址优化; 位置分配

Research on multi-objective optimization of forest fire station site selection based on improved NSGA-II

LI Hua¹, CHEN Xin¹, YI Peng¹, WU Lizhou²

(1 School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 School of Safety Science and Engineering, Xi'an
University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to enhance the emergency response capability of the firefighting and rescue teams and the overall efficiency of the forest and grassland fire prevention and control layout, an optimization method for the site selection of forest and grassland fire stations based on hybrid fire prevention emergency roads was proposed. By combining the eight-direction tilt point algorithm with digital elevation model data, a hybrid fire emergency road network was constructed to enhance the fire brigade's early prevention and emergency response capabilities. Subsequently, the location allocation model of the improved NSGA-II was adopted to optimize the site selection of the fire station, ensuring the rational allocation of resources and expanding the coverage. The results show that the coverage rate of the hybrid fire prevention emergency

* 文章编号:1003-3033(2026)03-0171-07; 收稿日期:2025-09-10; 修稿日期:2025-12-13

** 通信作者:益朋(1987—),男,陕西西安人,硕士,讲师,主要从事安全与应急管理等方面的研究。E-mail:331092936@qq.com。

road in the overall area is 96.91%, and the coverage rate in the high-risk area is 93.51%, which improves the ability of the rescue team to deal with complex terrains. The optimized layout of the fire stations has a coefficient of variation of 0.26, ensuring the inspection and response capabilities of the teams. The overall demand satisfaction rate is 0.86, ensuring that the key areas are fully protected. The optimization model proposed in this study can provide a theoretical basis for the layout of forest and grassland fire prevention and control, improve the utilization rate of rescue resources, and promote the precise development of forest fire management.

Keywords: non-dominated sorting genetic algorithms II (NSGA-II); forest and grassland fires; fire station; multi-objective; site selection optimization; location allocation

0 引言

森林草原火灾是世界八大自然灾害之一,严重威胁生态安全与人民生命财产。近年来,国家通过《全国森林防火规划(2016—2025年)》进一步强化火源管控与预警体系建设,并明确了应急道路等基础设施的重要性。作为防灭火基础力量,森林草原消防队伍的建设与管理直接关系到火灾防控的整体成效。因此,研究因地制宜的火灾预防、应急处置与救援策略,对全面提升综合防控能力具有重要意义。

围绕科学构建火灾预防与应急救援体系及优化消防站布局问题,学界开展了诸多研究。例如:鲁义等^[1]分析了气候因子对森林火灾事故的影响;霍非舟等^[2]建立了一种基于需求等级与距离损失的联动消防站选址优化模型及多层级覆盖模型;TEJAS等^[3]为林业部门设计了消防救援无人机;WANG Zheng等^[4]提出一种兼顾时效性、公平性的应急物资多目标位置分配模型;王雅荣等^[5]总结了经典的离散选址与分配问题,包括P-中值模型、P-中心模型和覆盖模型3种,并分析了它们的优缺点;HE Junjie等^[6]探讨了消防站的多层次选址问题;GITI等^[7]构建了一个既能最大化火灾风险值覆盖,又能最小化新建消防站成本的多目标分层选址优化模型,并引入衰减函数反映距离对服务效果的影响。综上所述,现有研究在预警系统开发、空天地一体化指挥体系建设、无人机应用拓展以及消防站选址优化模型改进等方面取得显著成果。然而,在复杂地形条件下,特别是在高海拔、坡度陡峭、交通不便的林区或草原地带,如何科学规划防火应急道路网络,并在此基础上合理布局消防站,仍是当前防灭火工作的关键挑战。传统模型多基于理想化假设,常忽略复杂地形对应急通行效率的实际制约,严重影响火灾预防、应急救援以及整体扑救效能。

鉴于此,笔者拟结合地理信息系统(Geographic

Information System, GIS), 基于八向倾点算法(D8算法), 采用数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)呈现“无形”的防火应急道路;引进混合应急救援道路,改进基于非支配排序遗传算法II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithms II, NSGA-II)的位置分配模型,优化森林草原消防站选址;以四川木里藏族自治县为例,运用所提出的混合道路网络驱动的选址方法,提升消防队伍的快速响应能力,以期合理分配工作负载,提高整体服务覆盖率。

1 防火应急道路构建

1.1 评估方法

依据国家林草局规划院提出的森林火灾风险评估技术体系^[8],综合致灾危险性、承灾暴露度和承载体脆弱性,构建指标体系。基于GIS的熵值法确定指标权重,流程为:数据预处理与标准化;计算各地区指标占比;求取信息熵与冗余度;确定权重。具体计算步骤如下:

$$X_{ij}^* = \frac{\alpha(X_{ij} - \min\{X_{ij}\}) + (1 - \alpha)(\max\{X_{ij}\} - X_{ij})}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} \quad (1)$$

$$W_{ij}^* = \frac{X_{ij}'}{\sum_{i=1}^n X_{ij}'} \quad (2)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (W_{ij} \times \ln W_{ij}^*) \quad (3)$$

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (4)$$

式中: X_{ij}^* 为标准化后的火灾风险指标图层值; X_{ij} 为森林火灾风险指标图层值; α 为由指标本身的性质决定的参数,若为正向指标则 $\alpha = 1$,若为负向指标则 $\alpha = -1$; i 为年份; j 为指标; W_{ij}^* 为补0后的火灾

风险指标图层占比; X_{ij} 为补零后的火灾风险指标图层值; W_{ij} 为原始火灾风险指标图层占比; n 为像元数与年份的乘积; e_j 为火灾风险指标信息熵; W_j 为火灾风险指标权重。

1.2 防火应急道路

合理的森林道路网络可降低运输与环境成本,提升消防效率。崔荣凯等^[9]指出道路空间布局影响消防能力,建议引入新算法优化评价方法。然而,复杂环境下常规道路常难以有效支持救援。为此,结合 GIS 与 DEM 数据,采用 D8 算法模拟地表水流路径,通过比较中心像元与其 8 个邻域的高程确定水流方向,进而计算流量累积量、划分流域边界,最终提取出潜在的“无形”救援通道。防火应急道路构建流程如图 1 所示。针对森林草原腹地缺乏道路覆盖的区域,进一步利用 D8 算法提取分水岭网络,并将其与现有道路网络融合,构建混合型应急救援道路体系。基于集水区分割原理,将各集水区的最低高程点作为潜在通行节点,这一策略符合救援力量通常沿山谷或溪流推进的实战规律。

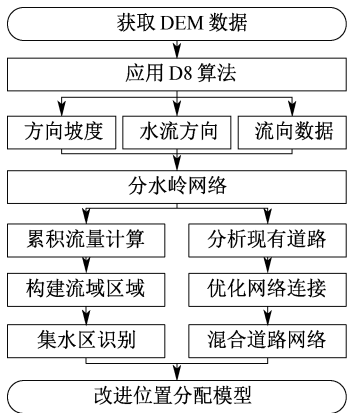


图 1 防火应急道路构建流程

Fig. 1 Flowchart of emergency fire prevention road construction

2 位置分配模型

2.1 现有模型的使用范围与局限性分析

当前广泛应用于应急设施选址优化的经典模型主要包括 P-中值模型、P-中心模型、覆盖模型等,这些模型已在城市消防站、医院、避难所等设施布局中广泛应用,具备成熟的理论基础和求解方法。然而,在高海拔、地形复杂的林区和草原环境中,其适用性面临以下挑战:

1) 忽略地形因素对真实通行能力的影响。多数模型以欧氏距离或路网距离计算可达性,未考虑坡

度、高程、植被等自然障碍对实际通行速度的影响,导致理论上的可达性与实地不可达之间存在矛盾。

2) 缺乏对混合救援路径的支持。忽视“防火应急道路与自然地形通道”相结合的混合通行模式,限制了偏远区域的救援可行性。

3) 种群初始化随机性强,收敛效率低。在 NSGA-II 等智能算法中,随机初始化易导致初始解分布不均,尤其在广袤山区易出现“空白区域”,增加无效搜索,延长计算时间。

4) 未充分考虑工作负载均衡性。多数模型聚焦覆盖率或响应时间,忽视各消防站任务负荷差异,可能导致部分站点超载而其他资源闲置,影响持续作战能力。

5) 静态服务范围假设。传统模型常设定固定的服务半径,但在山区,同一距离因坡度不同可能导致通行时间差异数倍以上,服务范围呈非对称、不规则形态。

综上,传统模型在复杂自然环境的适应性难以支撑科学、高效、公平的森林草原消防站布局决策。

2.2 改进位置分配模型

为提升森林火灾防控效率,YANG Juntao 等^[10]提出基于火灾风险空间分布的消防站选址方法,有效缩短救援响应时间。位置分配常涉及多目标冲突,难以通过单一目标优化实现全局最优,帕累托最优解集提供了一组权衡解,即无法在不恶化其他目标情况下改进任一目标。多目标优化问题 (Multi-Objective Problem, MOP) 旨在求得收敛性与多样性俱佳的近似帕累托前沿 (Pareto Front, PF)。本研究将森林草原消防站定义为承担特定区域防火灭火任务的站点,改进其服务范围与选址优化模型,并借鉴渐进式覆盖理念,依据区域等级差异,基于混合道路网络设定分级服务要求见下式,以验证优化方案可行性^[11]。

$$f_{rf}(d_{rf}) = \begin{cases} 1 & d_{rf} \leq R_r^k \\ \frac{1}{1 + \exp\left(5 - \frac{d_{rf} - (R_r^k + D)/2}{(R_r^k + D)/2}\right)} & R_r^k < d_{rf} < D \\ 0 & d_{rf} \geq D \end{cases}$$

(5)

式中: d_{rf} 为需求点 r 到设施点 f 的实际距离, m ; R_r^k 为森林草原火灾风险等级为 k 的需求点 r 的期望覆盖半径, m ; D 为设施点的最大覆盖半径, m ; $f_{rf}(d_{rf})$ 为森林草原火灾需求满意度。式(5)改进了

R_k^k 到 D 区间的衰减函数,实现从完全满意到不满意的平滑过渡,有助于避免满意度的突变,使得模型更加稳定,同时也更符合实际。模型改进过程流程(图2)如下:

1) 基于 D8 算法生成“无形”防火应急道路。利用 DEM 数据反向推演最优路径,构建虚拟通道,将自然地形特征转化为潜在救援路线,突破传统道路限制,提升偏远高风险区可达性与覆盖公平性。

2) 融合构建混合救援道路。整合现有道路与 D8 生成的自然通道,构建混合网络,增强模型现实适应性。

3) 采用空间聚类策略初始化种群。在 NSGA-II 引入空间聚类,按风险密度布设初始站点,提升解的均衡性、空间聚焦性及算法收敛效率。

4) 构建多目标优化框架。以消防站数量(成本)、覆盖率(响应效能)与负载变异系数(Coefficient of Variation, CV)(均衡性)为目标,通过 NSGA-II 求解 PF,为多维度决策提供支持。

5) 设计智能交叉与针对性变异算子。交叉优先保留高风险区优势解;变异对未覆盖高风险区增点、删冗余、换站点,兼顾最大覆盖率与负载均衡。

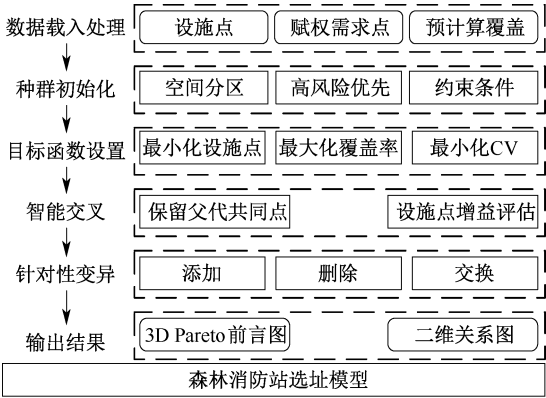


图2 模型改进流程

Fig.2 Model improvement flowchart

上述改进深度融合了 GIS 与智能算法,推动选址从“理想化”向“现实适应性”转变,为复杂地形下消防站布局提供可复制、可推广的科学方案。

3 防火应急道路分析

3.1 研究区域概况及数据处理

1) 研究区域概况。木里藏族自治县(图3)隶属四川省凉山彝族自治州,林地面积 1.02 万 km^2 , 占总面积的 77.42%,森林覆盖率 69.86%,活立木蓄积量 1.48 亿 m^3 。作为典型的高森林覆盖率县

域,木里生态资源丰富,但同时也被列为国家一级森林火险区,火灾风险极高。受暖温带半湿润季风气候影响,当地每年 11 月至次年 6 月为森林草原火灾高发期^[12]。在此背景下,森林草原消防站凭借其专业化扑救能力、复杂地形适应性及火情早期监测优势,在防灭火体系中发挥着不可替代的关键作用。

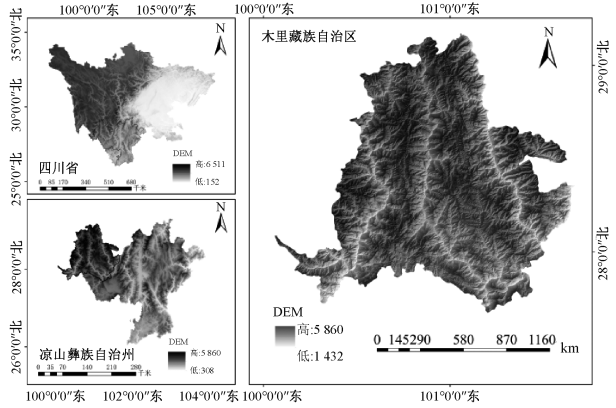


图3 研究区域范围

Fig.3 Scope of study area

2) 数据来源。数据包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、人口密度、重要基础设施、路网及水系数据、森林火险气象指数(Forest Fire Danger weather Index, FFDI)及 12.5 m DEM,行政边界与经纬度数据源自开放道路地图数据库(Open Street Map, OSM)。NDVI 基于 Google Earth Engine,利用 Landsat5/7/8 全年遥感数据经去云处理、时间序列插值与 Savitzky-Golay 滤波提取年度最大值^[13]。人口密度与基础设施数据来自《木里县年鉴》,并经 GIS 密度分析处理。河流湖泊由 OSM 提取并进行缓冲区分析。道路网络基于 OSM 数据结合实地调研资料进行了拓扑修正与优化。DEM 及坡度数据源自先进陆地观测卫星(Advanced Land Observing Satellite, ALOS)上的相控阵型 L 波段合成孔径雷达(Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar, PALSAR),经镶嵌、掩膜提取后通过 GIS 工具生成并分级。FFDI 基于国家气象科学数据中心数据,综合温度、湿度、风速、干旱等因素计算,用于火灾风险评估。上述指标经式(1)一式(4)计算,指标综合评估结果见表 1。

表1 森林火灾分析评价指标体系及其权重

Table 1 Question type settings for accident investigation question-and-answer tasks

因素	图层	要素	权重
承灾暴露程度	易燃性	NDVI	0.054 1

续表 1

因素	图层	要素	权重
承载体脆弱性	脆弱性	人口密度	0.046 2
		重要基础设施	0.005 3
致灾危险性	水源可达性	河流湖泊	0.455 8
	交通网络可达性	道路网络	0.236 8
	森林火险气象	FFDI	0.162 6
	地形特征	高程	0.025 4
		坡度	0.013 8

3.2 防火应急道路分析

基于木里县实际情况评估火险,采用自然断点法划分等级(图 4)。该方法通过寻找数据“最佳分割点”,迭代优化类内与类间方差,实现在最小化类内方差的同时最大化类间方差,从而揭示数据内在分布特征。利用 GIS 将连续风险指标划分为显著差异类别,不仅增强了地图的可视化效果与空间可读性,也更清晰地凸显了火灾风险的空间分异格局。结果显示,研究区整体火灾风险偏高且分布不均,是火灾频发且难控于初期的主因。因此,选取 2019 年雅砻江镇立尔村(火灾 1)与 2023 年三桷垭乡鸡毛店村(火灾 2)2 起雷击火灾为例。二者均发生于海拔 3 000 m 以上区域,具有典型的地形与气候致灾特征^[14-15]。

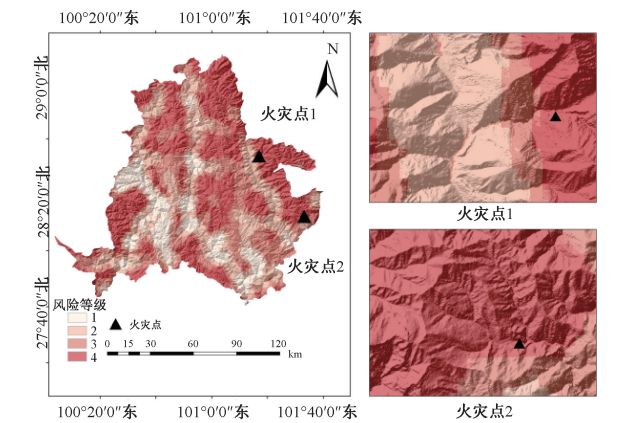


图 4 木里县火灾综合风险等级与火灾点
Fig. 4 Comprehensive fire risk levels and fire points in muli county

考虑到木里区域内大部分森林和草原具有较为开阔、平坦的地形条件,同时应急预案及防火规划中均强调救援通道与防火区域的距离控制,以应急救援道路 3 000 m 范围做缓冲区分析,原道路缓冲区如图 5a 所示。基于原始道路网络计算得木里县道路网密度为 0.001 47 km/ha,以防火应急道路 3 000 m 覆盖面积除以区域面积得到覆盖率为

72.88%,以防火应急道路 3 000 m 高风险区域覆盖面积除以高风险区域面积得到高风险区域覆盖率仅 41.05%。为进一步提升偏远区域可达性,基于 ALOS PALSAR 卫星 12.5 m DEM 数据,采用 D8 算法提取地表水流路径,进而识别出沟谷、山坳等潜在自然通行走廊,这些地貌单元通常构成消防人员与装备在无路区域的实际行进通道。结合现有道路网构建混合道路网络(图 5b),全县覆盖率达 96.91%,高风险区覆盖率达 93.51%。该方法提供了多条替代通行路线,提升了救援适应性,兼顾现有道路与自然路径,降低了新建成本与生态扰动,提高了资源利用率。混合道路网密度达 0.006 03 km/ha,后续可据此择优建设防火应急道路或辅助隔离带。

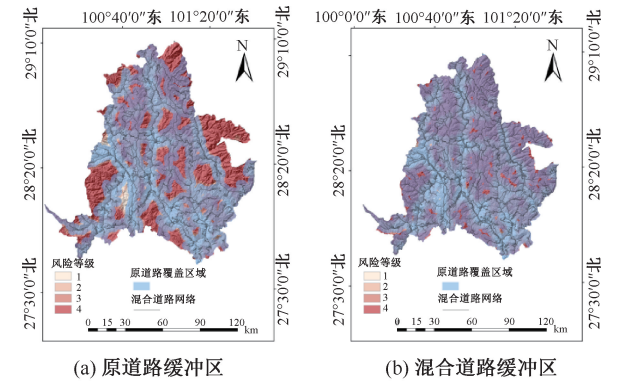


图 5 防火应急道路 3000m 缓冲区域覆盖图
Fig. 5 Coverage map of the 3,000-meter buffer zone for fire prevention and extinguishing roads

火灾 1 的发生地点远离既有防火应急道路,其直线距离约为 4 589 m,导致初期救援响应严重受限。相比之下,火灾 2 位于既有防火应急道路 3 000 m 服务半径内,距最近道路仅约 103 m,地方灭火救援队伍抵达后得以迅速疏散周边居民并高效开展扑救作业。2 起火灾点的道路覆盖情况分别如图 6 与图 7 所示。采用本文构建的混合防火应急道路网络进行优化,火灾 1 至最近应急道路的距离可缩短至约 334 m,显著降低通行难度与响应时间。对于火灾 2,其至最近 2 段应急道路的直线距离分别约为 68 和 103 m,形成了多路径可达格局,不仅提升了救援可达性,也为战术部署提供了更灵活的选择空间。

4 森林草原消防站多目标选址优化

火灾 1 爆发初期,最初规模属于较大火灾。该火灾由雷击引发后,州、县 2 级政府迅速启动应急预

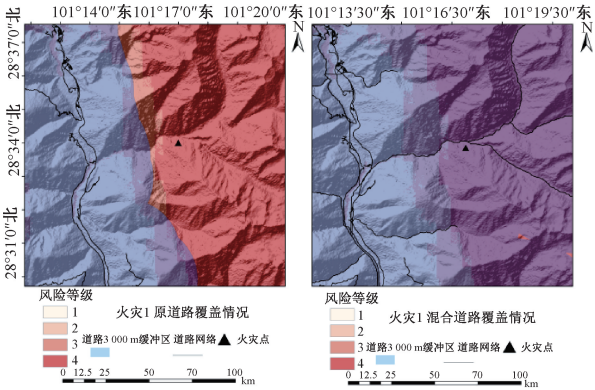


图 6 火灾点 1 道路覆盖情况

Fig. 6 Road coverage situation of fire point 1

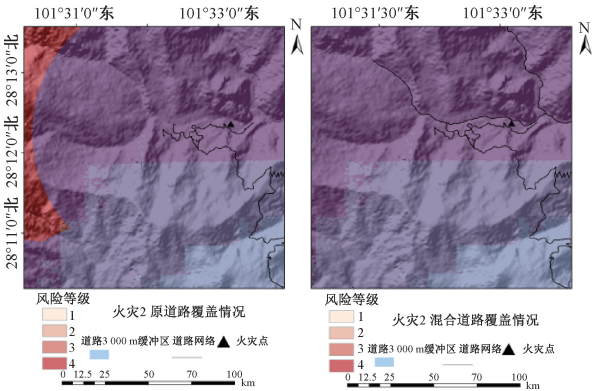


图 7 火灾点 2 道路覆盖情况

Fig. 7 Road coverage situation of fire point 2

案,调动森林消防凉山支队西昌大队及当地专业救援力量共同参与灭火行动。然而,由于起火点位于高海拔区域,伴随快速且多变的风速以及极为陡峭的地形,许多地段缺乏成形道路,这些因素显著增加了灭火工作的复杂性和难度。

基于混合防火应急道路改进 NSGA-II 位置分配模型,遵循统筹规划、合理布局与创新发展、效能优先的基本原则,设定 3 项优化目标:最小化消防站数量(降低成本)、最大化覆盖率(提升响应效能)、最小化 CV(均衡工作负载)。改进模型在成本、覆盖与负载均衡间实现最优权衡,获得优化结果并绘制如图 8 所示的 PF。该三维 PF 直观反映了 3 个目标之间的相互制约关系,清晰揭示了解集的空间分布特征,为决策者高效、精准地遴选最优方案提供可视化支持。分析表明:在确保整体覆盖率与高风险区域覆盖率均超过 90%的前提下,PF 中各方案的 CV 值稳定维持在 0.3 左右,随设施数量变化波动较小;同时,各需求单元的平均服务满意度均高于 0.86。综合考虑木里县的地形条件、生态敏感性及经济社会承载能力,最终确定的森林草原消防站优化选址

方案如图 9 所示。

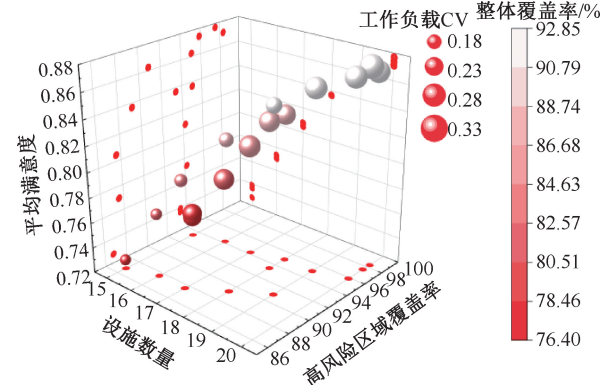


图 8 三维 pareto 前沿解

Fig. 8 Three-dimensional pareto frontier solution

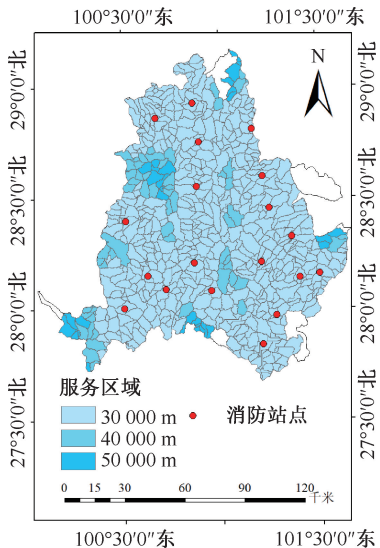


图 9 木里县森林草原消防站选址优化结果

Fig. 9 Optimization results of the site selection for the forest fire station in Muli county

基于渐进式覆盖理念验证优化方案,计算该方案森林草原消防站工作负荷的标准差与平均值的比值,即方案的 CV 为 0.26,表明各站点任务分配较为均衡,降低了地方森林草原消防队伍在开展巡查巡护、火源管控和火灾隐患排查整治等预防工作的难度,同时经式(5)计算得到整体平均需求满意度 $f_{qf}(d_{qf})$ 为 0.86,较好地满足了全区域的应急灭火救援需求。得益于混合道路网络的引入,救援队伍在复杂崎岖地形中的实际行进距离显著缩短,不仅提升了抵达火场的通达性与作业安全性,也使得应急力量能够在更短时间内高效部署至关键区域。

5 结 论

1) 基于 D8 算法与 DEM 数据构建的混合防火

应急道路网络能够显著提升复杂地形可达性,覆盖研究区整体的 96.91%、高风险区域的 93.51%,有效验证了利用自然地形通道弥补现有道路网络覆盖盲区的可行性。

2) 改进的 NSGA-II 选址优化模型通过引入空间聚类初始化、智能交叉与针对性变异策略,在最小

化设施数量的同时,可兼顾高覆盖率和低工作负载变异系数,有效平衡成本、效能与公平性。

3) 所构建的融合地形特征与多目标优化的消防站选址优化框架,可为山地林区防火布局提供科学决策支持,后续可结合轻量化数据处理方法,增强模型在多变环境与数据受限地区的实用性。

参 考 文 献

- [1] 鲁义,周钦云,邵淑珍,等. 气候因子对我国森林火灾的影响及预测[J]. 中国安全科学学报,2023,33(12):53-59.
LU Yi,ZHOU Qinyun,SHAO Shuzhen,et al. Influence and prediction of climatic factors on forest fires in China[J]. China Safety Science Journal,2023,33(12):53-59.
- [2] 霍非舟,胡宸希,雷鹏,等. 面向风险水平的多层级覆盖消防站选址优化[J]. 灾害学,2025,40(2):178-184.
HUO Feizhou, HU Chenxi, LEI Peng, et al. Risk level-oriented optimization of multi-level coverage fire station location[J]. Journal of Catastrophology,2025,40(2):178-184.
- [3] RATHOD T, PATIL V, HARIKRISHNAN R, et al. Multipurpose deep learning-powered UAV for forest fire prevention and emergency response[J]. HardwareX, 2023, 16: DOI:10.1016/j.ohx.2023.e00479.
- [4] WANG Zheng, LENG Longlong, DING Junjie, et al. Study on location-allocation problem and algorithm for emergency supplies considering timeliness and fairness[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 177: DOI:10.1016/j.cie.2023.109078.
- [5] 王雅荣,赵海鹏,周慰涛,等. 整合多因素影响的消防站布局优化实践[J]. 消防科学与技术,2024,43(4):551-556.
WANG Yarong,ZHAO Haipeng,ZHOU Weitao,et al. Practice of optimizing the layout of urban fire stations by integrating multiple factors[J]. Fire Science and Technology,2024,43(4):551-556.
- [6] HE Junjie, GUAN Xin, LU Houjun, et al. Research on multi-objective hierarchical site selection coverage of fire station[J]. PloS One, 2024, 19(12): DOI:10.1371/journal.pone.0309731.
- [7] KHOSHAMOOZ G. A new fuzzy location-based approach for fire station site selection in Tehran[J]. Applied Geomatics, 2024, 16(4): 987-1001.
- [8] 蒋春颖,杨雪清,张国丽,等. 森林火灾风险评估技术体系探讨[J]. 林业资源管理,2023(2):17-26.
JIANG Chunying, YANG Xueqing, ZHANG Guoli, et al. Discussion on the technical system of forest fire risk assessment[J]. Forestry Resources Management,2023(2):17-26.
- [9] 崔荣凯,钱良辉,王秋华. 森林道路网络的消防功能评价研究进展[J]. 世界林业研究,2023,36(6):32-37.
CUI Rongkai, QIAN Lianghui, WANG Qiu Hua. Research progress in firefighting function evaluation for forest road network[J]. World Forestry Research,2023,36(6):32-37.
- [10] YANG Juntao, GUO Kai, DAI Yuqing, et al. Spatial layout siting method for fire stations based on comprehensive forest fire risk distribution[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 49: DOI:10.1016/j.csite.2023.103243.
- [11] CHEN Yulong, YAO Jing, WANG Shaohua, et al. Location optimization of urban fire stations considering the variations in fire service demands: a bi-objective coverage model[J]. International Journal of Digital Earth, 2025, 18(1): DOI:10.1080/17538947.2025.2454386.
- [12] 黎书会,吴艳,孙志东,等. 凉山州 15 种主要经济树种的防火性能[J]. 应用生态学报,2024,35(1):203-211.
LI Shuhui,WU Yan,SUN Zhidong, et al. Fire resistance of 15 main economic tree species in Liangshan Prefecture, Sichuan,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(1):203-211.
- [13] YANG Jilin, DONG Jinwei, XIAO Xiangming, et al. Divergent shifts in peak photosynthesis timing of temperate and alpine grasslands in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: DOI:10.1016/j.rse.2019.111395.
- [14] 凉山州木里县雅砻江镇立尔村发生森林火灾[EB/OL]. (2019-04-16). http://www.lsz.gov.cn/xxgk/zdlyxxgk/zhsgjy/yjcz/201904/t20190402_590666.html.
- [15] 凉山州公安局. 木里县“5·27”森林火灾起火原因情况通报[EB/OL]. (2023-05-31). <https://www.scfzbs.com/yw/202305/58904400.html>.



作者简介: 李 华 (1979—),女,陕西西安人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事企业风险评估与安全管理、建筑安全监测与监控、公共安全与应急管理方面的研究。E-mail: lihua@xauat.edu.cn。