引文格式:魏自立,胡海,李思宇,等.森林火灾应急路径规划的MAD-ESPO方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2325-2338.DOI:10.13203/j.whugis20250125

Citation: WEI Zili, HU Hai, LI Siyu, et al. MAD-ESPO Method for Emergency Path Planning of Forest Fires[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(11):2325-2338.DOI:10.13203/j.whugis20250125

森林火灾应急路径规划的MAD-ESPO方法

魏自立[1,2] 胡 海[1,2] 李思宇[1,2] 韩超然[1] 任 福[1] 张涔聪[1]

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

2 自然资源部智能城市时空信息与装备工程技术创新中心,重庆,401120

摘 要:森林火灾的动态蔓延可视为一种动态障碍系统,其非线性扩散行为对应急救援路径的安全性及时效性构成挑战。现有路径规划方法难以实现火场演化进程与路径决策的时序匹配,导致避障失效。因此针对森林火灾动态蔓延环境下应急救援路径的时空避障难题,首先通过森林火灾蔓延模型构建动态障碍场;然后提出一种基于地图代数动态欧氏障碍空间的最短路径算法生成动态绕障距离场;最后在绕障距离场基础上实施路径抽取。最终实现了规划路径与火场扩散的时序匹配,在动态火场障碍场景下计算最优安全路径,同时划定极端风险区域。以"3·30"西昌森林火灾为原型构建火场动态障碍,对不同行进速度、不同安全阈值、人工动态障碍进行多场景对比实验,实验结果均表明,所提方法所规划最短路径结果可有效规避火场范围,划分极端风险区域,兼顾安全性与时效性。该研究为动态障碍环境下的应急救援提供了可解释性强、鲁棒性高的解决方案,在森林消防指挥系统中具有显著应用价值。

关键词:路径规划;动态障碍;距离变换;森林火灾

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-04-29

DOI:10.13203/j.whugis20250125 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2325-14

MAD-ESPO Method for Emergency Path Planning of Forest Fires

WEI Zili[1,2] *HU Hai*[1,2] *LI Siyu*[1,2] *HAN Chaoran*[1] *REN Fu*[1] *ZHANG Bocong*[1]

1 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Technology Innovation Center for Spatiotemporal Information and Equipment of Intelligent City, Ministry of Natural Resources, Chongqing 401120, China

Abstract: **Objectives**: The dynamic spread of forest fires can be regarded as a dynamic obstacle system, and its nonlinear diffusion behavior poses a challenge to the safety and timeliness of emergency rescue paths. The existing path planning methods are difficult to achieve temporal matching between the evolution process of the fire scene and path decision-making, resulting in obstacle avoidance failure or suboptimal route costs. **Methods**: Focused on the spatiotemporal obstacle avoidance problem of emergency rescue paths in the dynamic spread environment of forest fires, a dynamic obstacle field is constructed firstly through a forest fire spread prediction model. Then, based on this field and a static obstacle field, a map algebra dynamic euclidean space shortest path with obstacles algorithm is proposed to generate a dynamic obstacle avoidance Euclidean distance field and its corresponding source-point field. Finally, path extraction is implemented based on the obstacle avoidance distance field and source-point field. The timing matching between the planned path and the fire spread was achieved, and the optimal safe path was calculated in dynamic fire obstacle scenarios, while extreme-risk areas were delineated. **Results**: Using the "3·30" Xichang forest fire as a prototype, dynamic obstacles were constructed in the fire scene. Multi-scenario comparative experiments evaluated varied travel speeds and time safety thresholds, including cases with complex multi-ignition

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3005704);自然资源部智能城市时空信息与装备工程技术创新中心开放基金(STIEIC-KF202309)。

第一作者:魏自立,硕士生,研究方向为地图代数、GIS开发。1459209601@qq.com

通信作者:张涔聪,博士生。bocongzhang@whu.edu.cn

scenarios featuring artificially superimposed dynamic obstacles. The results show that the planned shortest path effectively avoided the fire-affected zones, with extreme-risk areas delineated through the dynamic obstacle avoidance distance field, while maintaining safety-timeliness trade-off balance. Critically, setting context-appropriate time safety thresholds can significantly mitigate fire exposure risks without compromising rescue path costs. **Conclusions:** This proposed method provides a highly interpretable and robust solution for emergency rescue in dynamic obstacle environments, achieving fire path timing matching through distance field with optimal safety threshold calibration, which has significant application value in forest fire command systems.

Key words: path planning; dynamic obstacles; distance transform; forest fire

森林火灾是一种发生范围广、不确定性强、应急救援较为困难的自然灾害[1-3]。其火场边界呈现高频动态跃迁特性:受风力突变、燃料分布不均和地形起伏影响,火线推进速度快,且蔓延方向呈现非线性突变,燃烧区面积增量巨大。以发生于2020-03-30T15:35:00时的西昌森林火灾为例,至4月2日12时明火被完全扑灭,历时68 h,峰值火线蔓延速度超10 km/h,24 h内过火面积超过1 000 hm^2。这种时空动态复杂性对火灾应急救援、疏散路径规划构成严峻挑战。因此,有必要面向火场蔓延机制与应急救援决策的实时需求,研究面向火场动态障碍的路径规划算法,实现物资运输与人员撤离路径动态避险的协同决策。

当前针对森林火灾路径规划问题的研究中,学者们主要采用粒子群优化[4]、遗传算法[5]和多目标调度策略[6],或通过改进A*算法引入多约束条件下的路径规划模型[7],但其本质仍是对静态障碍或低频动态场景的近似求解。此类问题可进一步抽象为面向欧氏障碍空间的最短路径规划(Euclidean space shortest path with obstacles, ESPO)[8-9],常用算法有A*算法、人工势场法、强化学习法等。

现有路径规划算法针对不同场景形成差异化技术路线:静态障碍环境中,A*算法通过启发式搜索平衡效率与最优性,衍生改进方法广泛应用于船舶航行[10]、自动引导车[11]、无人舰艇[12]、无人机[7]等场景;人工势场法则通过虚拟力场生成平滑路径,适配机器人[13-15]、无人车[16]与无人机[17]等需求;动态障碍环境下,D*(dynamic A*)[18]、LPA*(lifelong planning A*)[19]等增量式算法通过局部更新实现动态调整,适用于机器人[20-21]、虚拟人[22]、引导车[23]等场景中;强化学习通过环境交互与奖励机制优化策略,拓展至船舶航行[24-25]、城市洪水救援[26]、室内火灾应急疏散[27]、移动机器人[28-30]等路径规划场景中。然而,当面向森林火灾救援这类强动态耦合场景时,几类算法均存在理论局限性:A*算法难以适应火场时空动态障碍变化,人工势场法易陷入局部极小值,LPA*算法难以适应火场此类高频变化、增量巨大的动态障碍,D*算法可能因局部调整而忽略全局最优性。

面向火场、洪水淹没、极端洋流等障碍,这些障碍物会随时间变化而发生改变,导致空间内某位置的可通行状态未知,面向这类障碍物的最短路径求解,需在ESPO问题的基础上将空间障碍物赋予动态特征,因此,可将ESPO问题扩展为动态欧氏障碍空间最短路径(Euclidean space shortest path with dynamic obstacles, D-ESPO)问题。当前成熟的ESPO问题的算法如A*、BFS(breadth first search)、MA-ESPO(map algebra based ESPO)[31]等均可计算ESPO问题的最优解。但D-ESPO的核心矛盾在于障碍状态演化与路径执行过程的强时序关联性。现有算法(如D*、LPA*)通常基于静态障碍快照进行离散化重规划,未建立障碍变化与路径演变的动态映射模型。传统算法基于突变后的静态地图重新计算路径,容易陷入局部最优,如D*算法;或者对障碍变化的增量和频率作出约束,如LPA*算法。动态障碍路径规划需突破传统算法的静态时序假设,通过时空联合动态障碍建模与增量式协同计算,实现障碍演化与路径执行的动态匹配。

相比于会在同一位置反复随机处于可通行、不可通行状态随机动态障碍,火场动态障碍相对简单,其火势传播方向具有可预测性,障碍边界具有单向扩展性,即已燃区域不可逆转化为不可通行状态。在如今应急测绘技术[32]的支持下,可将火场障碍视为一类可预测的、高频变化的、增量巨大的动态障碍,发展适应动态蔓延火场的实时路径规划方法,快速生成最优安全路径,划分火场极端风险区域,降低消防人员受困风险与救灾物资消耗,实现“黄金救援期”内的人员伤亡与生态损失最小化。为此,本文针对森林火灾应急救援中火场动态障碍特性,

提出一种基于地图代数距离场的动态欧氏障碍空间最短路径算法(map algebra based D-EPSO，MAD-ESPO)，通过火势预测模型与时空耦合距离场的协同映射，在动态约束下实现理论最优安全路径的求解。

1　森林火灾救援场景下的路径规划

森林火灾作为典型突发性生态灾害，其灾后救援具有显著时空动态约束：初期物资的时效性投送直接决定火势控制与人员存活率，要求应急系统实现全局最优路径规划；火势进入指数蔓延阶段后，救援队伍行进速度与火势扩散速度形成博弈——部分区域在救援到达前已被火场覆盖形成极端危险区，强行救援将危及人员安全。现有研究虽具备火场蔓延预测模型，却难以有效解决三大核心问题：一是高频次、大范围的动态火场障碍难以转化为算法可解析的时空约束；二是缺乏对“出发即不可达”极端危险区域的识别能力，无法规避注定被火势阻断的无效救援路径；三是传统路径规划忽略火场扩散时序特征，导致规划路径存在行程冗余或中途阻断风险，无法求得路径最优解。

在森林火灾救援场景中，救灾人员、消防物资等需在火场动态障碍的时空耦合约束下，规划出满足时效性要求的最优通行路径，其一，路径规划结果需确保行人车辆在通过任意路段时，该路段尚未被火场覆盖，即通行时刻 t_{pass} 早于火势到达时刻 t_{fire}；其二，路径利用需满足火场资源隔离原则，即车辆通过后该路段可被火势自然阻断，从而避免二次通行引发的救援资源浪费。本文针对上述场景求解出最优路径，并划分极端风险区域，解决思路如图 1 所示。

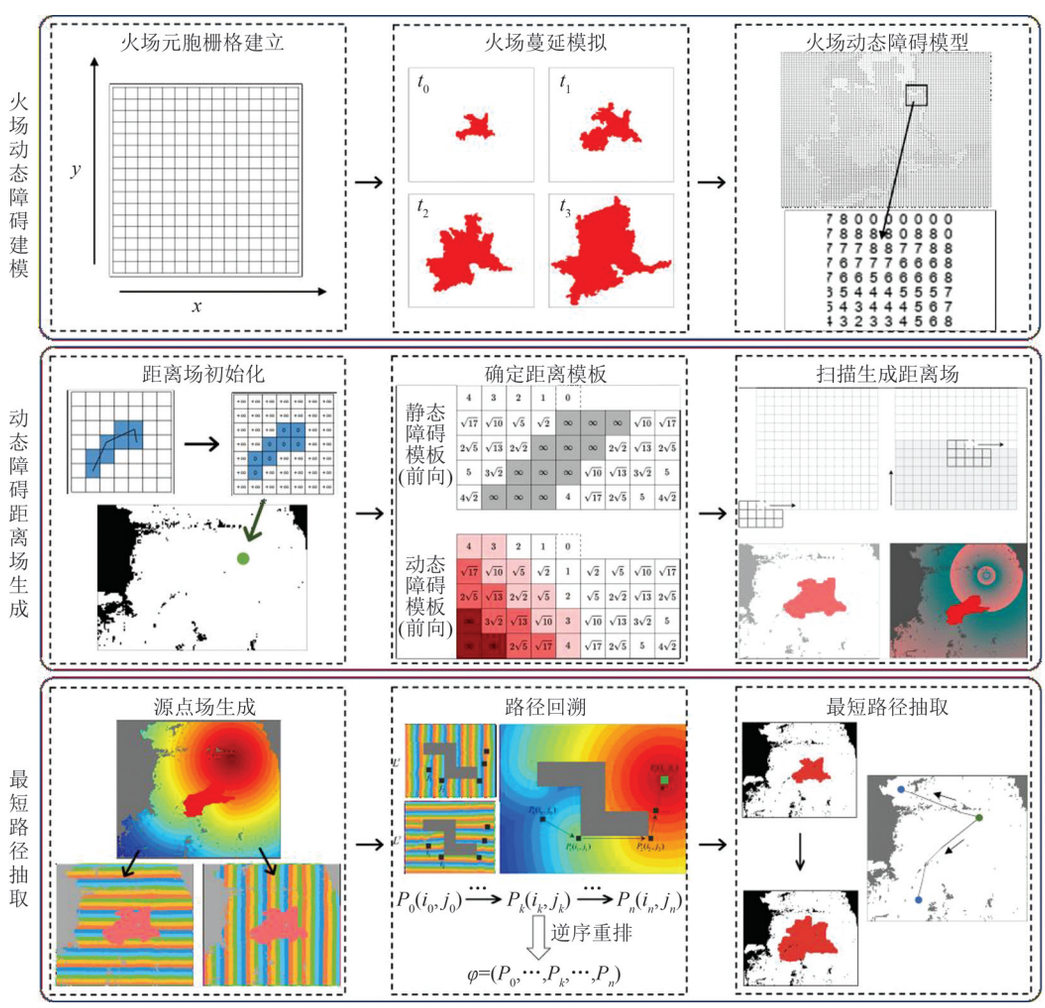


图 1　面向火场动态障碍的路径规划求解思路

Fig. 1　Path Planning Solution Approach for Dynamic Obstacles in Fire Scenes

动态障碍路径规划方法流程由火场动态障碍建模、动态障碍距离场生成以及路径抽取三步构成。第一步，基于文献[2]的元胞栅格系统模拟火场时空蔓延过程，根据某一时刻的火场燃烧状态判断空间单元是否燃烧，通过叠加各时刻燃烧状态栅格，标记各单元被火势覆盖的时间，构

建动态障碍模型。第二步,在MA-ESPO算法[31]基础上,设计了一种顾及火场障碍时序动态特征的局部路径成本度量方法,将其嵌入到距离变换中,提出MAD-ESPO算法,生成融合动态避障的距离场与源点场。第三步,在源点场中回溯各单元的最近距离来源点解析最短避障路径;同时通过校验各空间单元的对应最短到达时间与火场蔓延时间,同时给出救援中的极端危险区域(无法到达的目标位置集合)。

2 顾及时间特征的动态绕障路径规划方法

2.1 火场动态障碍建模

火场具有相对成熟的蔓延预测模型[2-3,33-34],可对火灾整体趋势做一定的模拟仿真,对火场范围进行预测,模型可根据原理分为三类[35]:以加拿大林火蔓延模型[36]和McArthur模型[37]为代表的经验模型,基于历史统计数据回归分析;以FIRESTAR[38]和Albini为代表的物理模型,依托燃烧学基本方程构建;以王正非模型[33]和Rothermel模型[39-40]为代表的半经验模型,整合经验参数与物理机制。这些模型共同揭示了林火蔓延受可燃物载量、气象梯度及地形曲率耦合驱动的动力学机制。基于火场蔓延模型的预测数据,火场范围可抽象为时空耦合的动态障碍系统:其空间维度表现为火线的非均匀推进,时间维度则反映为火场的分钟级扩散,是一类高频变化、增量巨大的动态障碍。

为实现森林火场的动态时序障碍建模,本文应用了文献[2]提出的火场蔓延模拟方法,该方法基于森林火灾知识元模型,综合考虑坡度、坡向、气温、风向、地表覆盖等环境因素,其模拟过程时间步长可调,空间分辨率可变,能较为准确地模拟林火扩散过程中的高时频、大面积的动态火场,符合本文MAD-ESPO方法的动态障碍建模需求。在已有数据基础上,采用30 m×30 m等间隔栅格对研究区域进行空间栅格化建模,构建具有环境响应特性的元胞栅格系统,依据数字高程模型、地表覆盖类型、归一化植被指数、气象参数等预设环境承灾体图层。在模拟蔓延过程中,燃烧状态层通过火焰单元燃烧状态S、已燃烧面积比率A、已燃烧时间t_{of}构成三元组(S, A, t_{of})动态记录元胞燃烧进程。通过设定起火点坐标,将起火点处元胞设为完全燃烧,并计算元胞周围八邻域的受影响燃烧面积,以固定时间步长σ迭代更新元胞燃烧状态,每个迭代周期生成二值化火障栅格。叠加各时刻火障栅格,对火场蔓延到每个空间单元的时间进行标记,可得到火场动态障碍栅格。整体建模过程如图2所示。

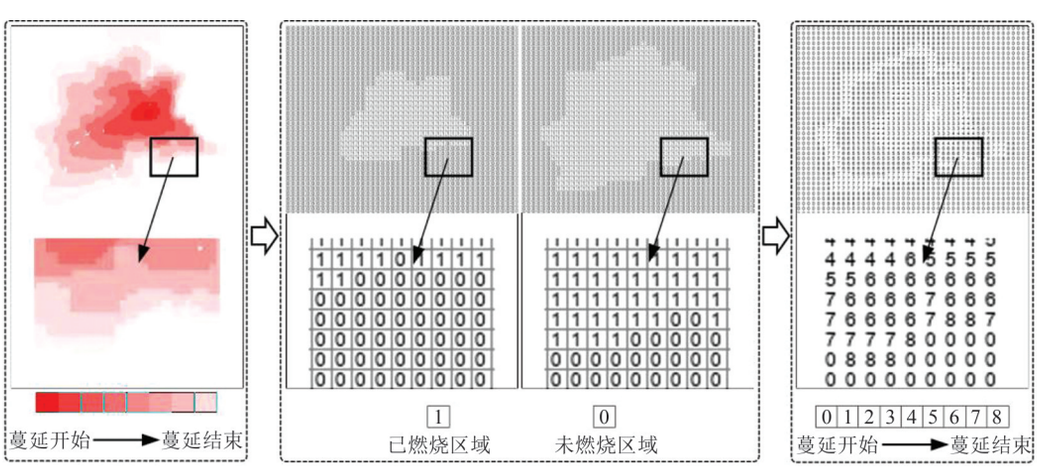


图2 火场蔓延动态障碍建模

Fig. 2 Modeling of Dynamic Obstacles in Fire Spread

将栅格文件记为R,$R_{i,j}$表示第i行第j列的栅格像元;I表示最终得到的火场动态障碍栅格,$I_{i,j}$为火场蔓延到$R_{i,j}$并使其成为不可通行栅格的时刻。进行火场蔓延模拟构建时序火障栅格库时,对处于完全燃烧状态的元胞,其障碍属性由可通行切换为不可通行,形成火障边界,其中活跃火区属性值为1,未燃烧区域属性值为0。假设在模拟起火后以时间步长σ进行n次迭代,火场由完全燃烧的元胞向周围元胞蔓延,构建包括n个不同时刻的火场蔓延栅格的时序火障栅格库。将各时刻火障栅格叠加,结果记为D,则火场动态障碍栅格I的取值规则如下:

$$I_{i,j}=\begin{cases}0, \text{永久障碍}\\ \infty, \text{非障碍}\\ \sigma(n-D_{i,j}), \text{动态障碍}\end{cases} \tag{1}$$

使用上述动态火场障碍建模方法,可将高频变

化、增量巨大的林火扩散过程建模为动态火场障碍,准确反映火线前锋随时间扩散的状态,精确描述任意时刻的火场空间任意栅格单元是否可通行;同时,还可根据火灾情况灵活调整路径规划的时间粒度和空间粒度,为路径规划提供可预测的动态障碍。

2.2　动态绕障的障碍距离场生成

在构建同时承载空间分布与时间演变信息的火场动态障碍模型基础上,为实现路径规划过程对火场蔓延时序的有效响应,本文引入距离变换算法,将带有时空属性的火场障碍信息转化为可用于路径规划的成本距离场。距离场基于时间成本度量,最小化路径行进代价的同时顾及火场扩散风险,为后续路径提取模块提供支撑。

2.2.1　基本距离变换

距离变换是一种二值图像处理技术,它将二值图像中的像素区分为特征和背景两种类型,计算背景像素的距离值而产生一幅距离图像[31,41]。称所有可传播距离的实体的集合为实体集,记为E,最终得到的距离场记为F。距离变换利用距离模板进行局部距离累加与竞争,以累加和作为全局距离。距离模板是一组矩阵,记为T,$T_{i,j}$表示第i行第j列的模板单元到模板中心的距离,通常将其分为前向、后向两个子模板。

变换首先根据实体集初始化距离场,将实体栅格距离值设为0,背景栅格设为无穷大,得到初始距离场$F^{(0)}$,而后交替使用两类模板以相反顺序扫描,依次计算更新栅格距离值。记$F^{(s)}$为第s次扫描后的距离场,$F_{i,j}^{(s)}$表示扫描后$R_{i,j}$处的距离值。前向模板扫描时,从左下角从下往上逐行遍历,每行从左往右扫描;后向模板则从右上角从上往下逐行遍历,每行从右往左扫描。假设第s次扫描到$R_{i,j}$,记$U_{i,j}$为模板中心位于$R_{i,j}$时模板覆盖的所有栅格像元集合,距离变换将它们视为候选点,在其中搜索距离传播到$R_{i,j}$的最短路径中的上一个点,记为$R_{\tilde{i},\tilde{j}}$,可由以下公式得到

$$R_{\tilde{i},\tilde{j}}=\underset{R_{i',j'}\in U_{i,j}}{\arg\min}\left\{F_{i',j'}^{(s)}+T_{i'-i+r,j'-j+r}\right\}\tag{2}$$

根据$R_{\tilde{i},\tilde{j}}$处的距离与其到$R_{i,j}$的距离之和更新距离场$F_{i,j}^{(s)}\leftarrow F_{\tilde{i},\tilde{j}}^{(s)}+T_{\tilde{i}-i+r,\tilde{j}-j+r}$。每轮扫描后更换模板,直到完成第$s$次扫描时距离场不再变化,此时算法终止,最终所得距离场F满足$F=F^{(s-1)}=F^{(s)}$。

2.2.2　MAD-ESPO动态绕障方法

本方法对MA-ESPO算法中的距离度量与局部路径障碍判断规则做了改进,以适应火灾蔓延场景。度量方面,以时间作为成本距离,在扫描过程中向周围传播,得到从起始点到任意位置所需的最短时间;局部路径障碍判断方面,利用火场动态障碍,结合一定速度下行进时间与距离的函数关系实时判定局部通路上是否存在动态障碍,将火灾蔓延场景下的路径规划转化为距离变换动态绕障问题。

动态绕障过程中,在模板内搜索最优点时,仍以成本距离累加值最小为原则选择耗时最少的路线。将不可通行或已位于火场中的局部路径的时间成本置为无穷大,使其在模板内搜索、比较的过程中被筛除,从而选取出所有实时可通行局部路线中耗时最少的路线,实现动态绕障。因此,动态绕障的关键点在于如何判断模板内的局部路径在特定时段内是否存在被火烧到的风险,原则是起点到模板中心的时间与局部路线通行时间之和不大于火灾蔓延到该点的时间与时间安全阈值之和。

图3绘制了从实体E出发进行距离变换扫描时,在以蓝色栅格为中心的模板邻域内搜索路径时的两条候选路径ϕ_1与ϕ_2,其中绿色栅格为两条候选路径的起点。右上方红色栅格为图中所展示的区域内火灾最先蔓延到的栅格(假定到达ϕ_1与ϕ_2起点处的时间等于红色栅格起火时间),其邻近栅格中的数字表示火灾由红色栅格蔓延到该栅格所需的时间。图中右侧箭头处标注了从ϕ_1起点出发到路径上部分节点所需的时间,可看出沿ϕ_1行进能通过前3个栅格区域,但在红框标注的栅格内停留的200(700 − 500)个时间单位内,火灾已蔓延至该栅格,因此候选路径ϕ_1无法安全通行,需置ϕ_1通行时间为无穷,从而在比较候选路径开销时将其去除。

以ϕ_2为例说明局部路径成本计算的原理与过程。假设ϕ_2长度为$n+1$,沿途依次经过栅格R_{i_0,j_0},R_{i_1,j_1},…,R_{i_n,j_n},e_0和e_{n+1}分别为起点栅格R_{i_0,j_0}和终点栅格R_{i_n,j_n}的栅格中心点,对$1\leqslant k\leqslant n$,e_k表示ϕ_2离开栅格$R_{i_{k-1},j_{k-1}}$前往下一栅格时与其边界的交点。算法首先判断路径上是否存在静态障碍,若存在,则将该候选路径通行时间置为无穷,否则考虑火灾动态障碍。由于火场蔓延的不规则性,路径终点安全不能保证路径上每个时刻都安全(如候选路径ϕ_1上的红框栅格),为确保整段局部路径不被火灾动态障碍阻碍,须保证从路径上任意栅格离开前往下一个栅格或到达终点,也就是在任意e_k处,火场都未蔓延至该栅格(时间安全阈值缓冲区内)。即对所有$1\leqslant k\leqslant n+1$,下式

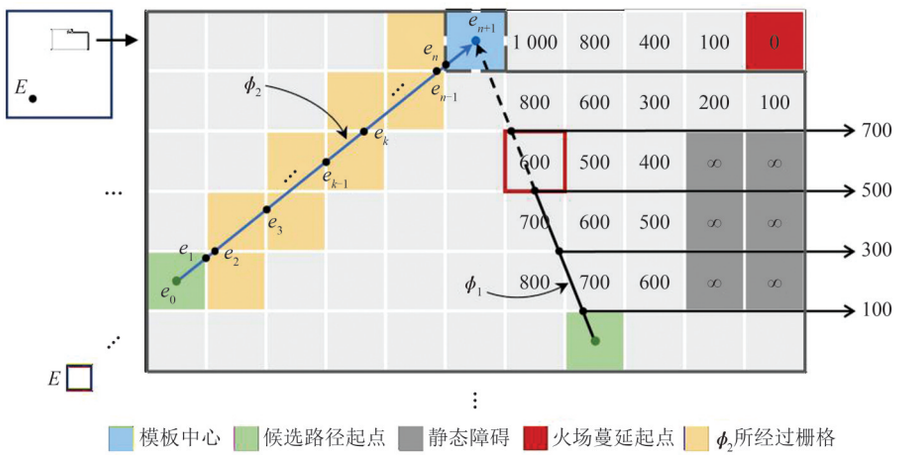


图3 火场动态障碍判断(前向模板)

Fig. 3 Fire Scenes Dynamic Obstacles Judgment (Forward Template)

$$F_{i_0,j_0}+\sum_{p=0}^{k-1}\frac{d(e_p,e_{p+1})}{v_p}+\Delta t\leqslant I_{i_{k-1},j_{k-1}} \tag{3}$$

成立。式中,$d(e_p,e_{p+1})$表示e_p与e_{p+1}间的距离;v_p表示R_{i_p,j_p}内的通行速度,可根据坡度、坡向等地形数据进行综合估计。对所有类似ϕ_2未受静态障碍与火灾动态障碍影响的局部候选路径,距离变换将以E到R_{i_0,j_0}的时间与ϕ_2的通行时间之和作为局部路径ϕ_2的成本距离,并据此在模板内选择最优候选点(即最优局部候选路径的起点)。算法完整流程如图4所示。

通过以上MAD-ESPO流程可以生成动态绕障距离场及其同步的源点场,如图5所示。源点场记录每个栅格的最近距离来源点(分为x轴与y轴两个方向,分别存储来源点的栅格行、列序号),即该栅格的距离值在传播过程中对应上游栅格的位置,支撑后续路径抽取。

2.3 路径抽取与不可达区域划分

动态绕障距离场生成得到了从实体集到任意栅格的最短距离(时间),为实现路径规划,还需进行路径抽取。本算法进行路径抽取无需利用梯度下降等启发式方法。在生成距离场时,栅格新距离值皆为模板覆盖区域内候选栅格竞争的结果,这一机制使得距离传播到任意位置的路径是可回溯的,对距离值不为无穷大的栅格,在以之为中心的模板区域内,必存在从实体到其最短路径中的上一个点。记录这些点的行列坐标即得到源点场,记x轴和y轴方向的源点场分别为L^x和L^y,每次更新距离值时向L^x和L^y中分别写入最优候选点的列序号与行序号。每轮扫描到$R_{i,j}$时,由式(2)得到最优候选点$R_{\tilde{i},\tilde{j}}$,更新距离值后,令$L^y_{i,j}\leftarrow\tilde{i}$与$L^x_{i,j}\leftarrow\tilde{j}$,重复扫描时以新最优

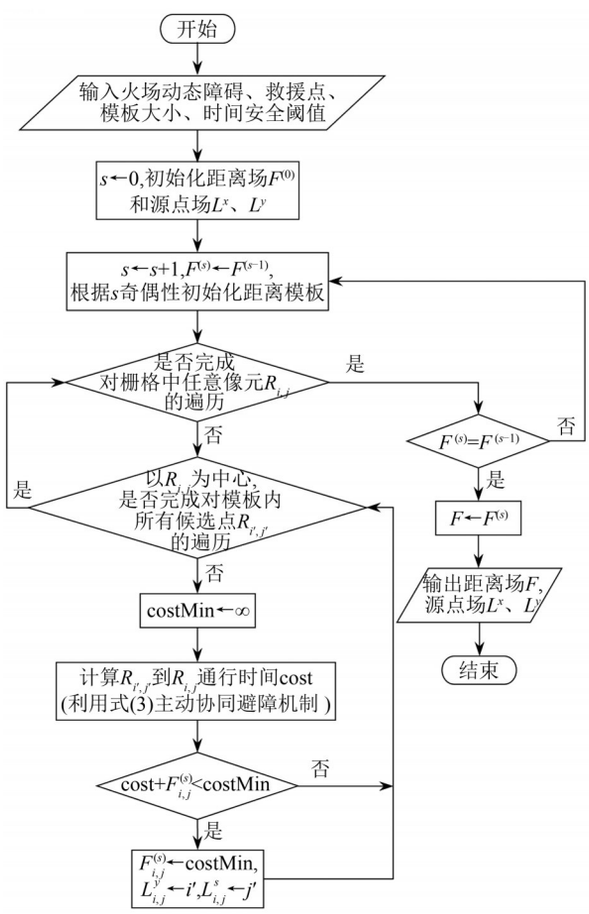
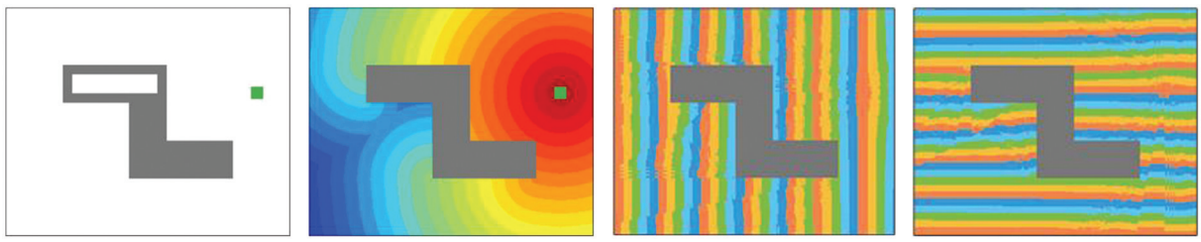


图4 MAD-ESPO动态绕障距离变换算法流程图

Fig. 4 Flowchart of MAD-ESPO Dynamic Obstacles Distance Transformation Algorithm

候选点行列号覆盖原有值。得到源点场后可进行路径抽取,对于任意给定终点,将其行列号代入源点场,提取出到其的最短路径中上一个点的坐标,将该点代入源点场继续回溯,直至回溯到任意实体栅格,过程如图6所示。将所有点逆序重排,即为从实体到终点的最短路径。



(a) 静态障碍与起点　(b) 距离场　(c) 源点场(x轴方向)　(d) 源点场(y轴方向)

图5　距离变换算法结果

Fig. 5　Results of Distance Transformation Algorithm

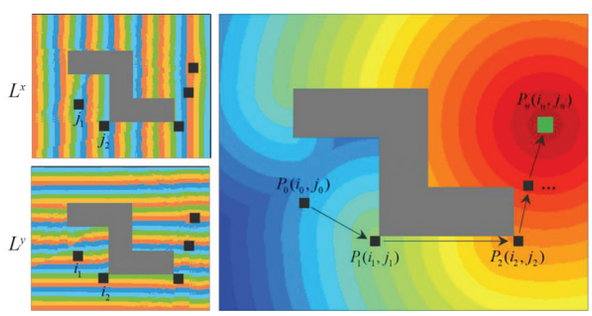


图6　基于源点场进行路径抽取

Fig. 6　Path Extraction Based on Source Point Field

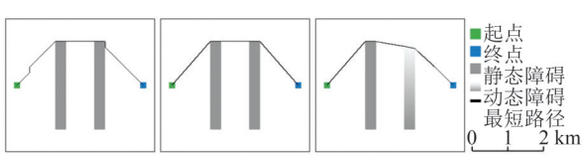
图6中，绿色栅格为起点，灰色部分为不可达区域，P_0为给定终点。首先判断P_0处距离是否为无穷大，若为无穷大则不可达，路径不存在；若不为无穷大，根据其行列号(i_0,j_0)从源点场中获取上一个点P_1的行列号$(i_1,j_1)\leftarrow(L^y_{i_0,j_0},L^x_{i_0,j_0})$。不断重复此步骤，直至不再出现新的栅格点。

获取最短路径的同时，动态火场路径规划问题中还存在一类特殊区域，即救援不可达区域，意味着对于从某个确定起点出发、具有确定行进速度的救援队伍，无论选取何种路径策略，都无法抵达的位置的集合。其中一部分是静态障碍或永久火场障碍，另一部分则是由于在救援队伍到达前已被火场覆盖，因而不可抵达。在MAD-ESPO方法中，对生成的距离场中所有距离值为无穷大的栅格，算法将它们的集合划定为不可达区域。不可达区域不代表某个时刻的火场边界，且与救援点位置无关，代表从起点出发全时间周期的最终可达性。不可达区域对火场应急救援有着重要意义，当救援点落在其中时，说明救援队伍在当前参数条件下无法安全施救，需提高救援队伍行进速度或尽早转移救援点。

3　实验与结果分析

3.1　简单障碍模拟实验

进行模拟实验，分别对比A*、MA-ESPO与MAD-ESPO算法的路径规划效果。实验统一采用空间分辨率为10 m的障碍栅格，设置相同的起点和终点，行进速度固定为0.24 m/s。针对A*与MA-ESPO算法，在起点与终点之间插入两段等宽、等高的条带状障碍，其中A*算法使用权重系数为1的标准A*，采用欧氏距离作为启发函数；MA-ESPO算法采用21×21大小的模板。针对MAD-ESPO算法，保持靠起点一侧的障碍条带不变，将终点侧的障碍条带转为动态障碍，令其从底部开始以0.178 m/s的速度匀速向上生长，直至填充整个条带区域。MAD-ESPO算法同样采用21×21大小的模板，时间安全阈值Δt设为0。3种算法所得最短路径可视化如图7所示。



(a) A*算法　(b) MA-ESPO算法　(c) MAD-ESPO算法

图7　不同算法最短路径可视化结果

Fig. 7　Visualization Results of Shortest Paths Using Different Algorithms

对比图7(a)、图7(b)，面对静态障碍时，A*算法与MA-ESPO算法都能取得较好结果。其中A*算法由于在八邻域内进行搜索，导致路径存在锯齿；MA-ESPO算法扩大了搜索范围，在模板内充分逼近最优方向，从而减小误差，图7(b)中利用21×21的模板所得路径已不呈现明显锯齿。图7(c)展示了MAD-ESPO算法面向动态障碍场景计算的最短路径，该路径充分利用了右侧动态障碍条带完全生成之前的时间窗口，越过左侧障碍后不再向东，而是向终点方向调整了角度，使路径总长度最短，其动态障碍距离场可视化如图8所示。

图9为图7(c)场景下绕过右侧动态障碍动态过程中的位置时序图，每张图标识了具体时刻(出发时间为00:00:00)以及目标在该时刻的行进位置及方向，其中d、h和l分别表示对应时刻从起点到达当前位置的路径长度、右侧动态障碍条

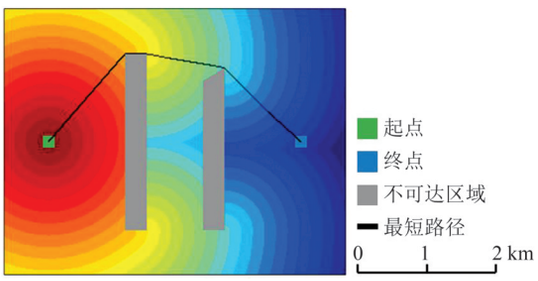


图8 MAD-ESPO动态障碍距离场

Fig. 8 MAD-ESPO Dynamic Obstacles Distance Field

带区域的高度和当前位置到动态障碍底部水平线的高度差。从图9中可以看出,该路径在调整角度时兼顾了距离与安全,其越过左侧障碍后顾及动态障碍的蔓延而改变方向;越过右侧动态障碍后,则直接朝终点方向沿直线行进,达到最短路径的效果。路径对动态障碍的规避也严格在障碍动态增长到该位置的最后一刻(如02:16:00)行进离开该位置,符合理论最短路径的表现。

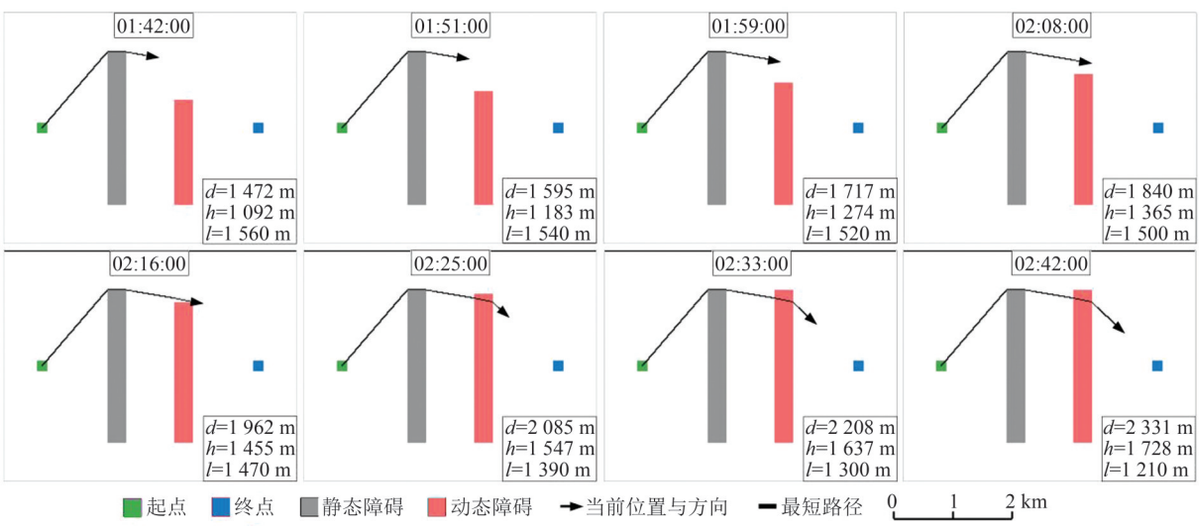


图9 MAD-ESPO右侧动态障碍附近部分时序图

Fig. 9 Partial Time Series Diagrams Near the Dynamic Obstacles on the Right Side of MAD-ESPO

3.2 “3·30”西昌森林火灾仿真实验

以2020年“3·30”西昌森林火灾为例,使用文献[2]的方法从2020-03-30T15:35:00火灾发生开始模拟,使用空间栅格分辨率为30 m,元胞状态迭代时间单元步长为1 min,获得火场蔓延结果及火场动态障碍模型,如图10和表1所示。

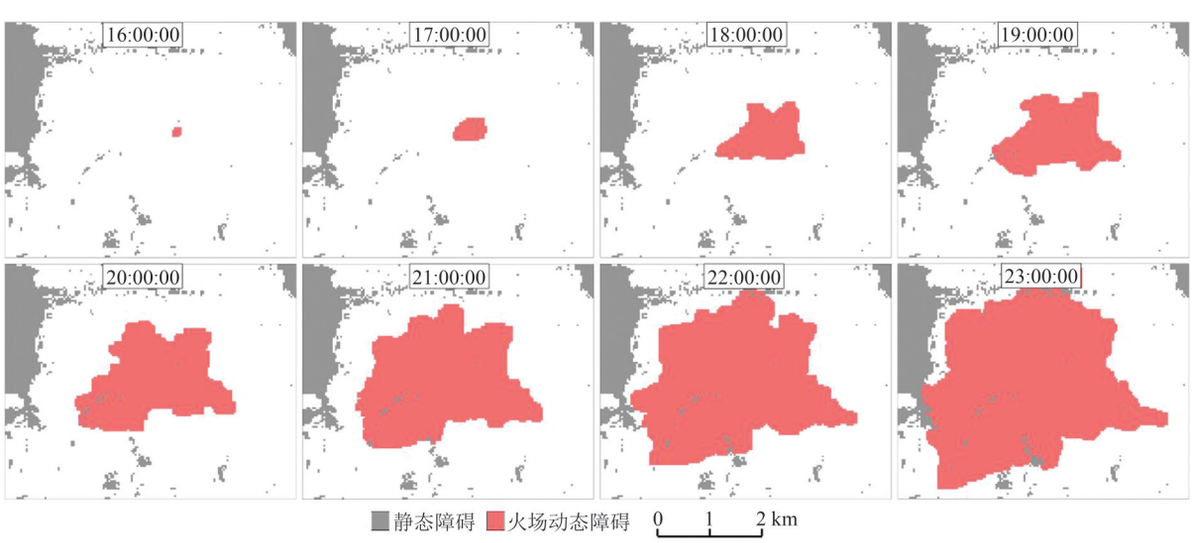


图10 “3·30”西昌森林火灾动态障碍

Fig. 10 Dynamic Obstacles of the “3·30” Xichang Forest Fire

针对上述动态障碍,假设队伍从物资点(27.840 88°N,102.241 85°E)出发,前往待救援点救援(27.815 97°N,102.222 66°E),在不同条件下进行实验模拟,求解最优路线。

表1　模拟蔓延过火面积变化

Table 1　Simulate the Spread of Buring Areas Changes

时间	火场蔓延面积/km²	同比增长比率/%	燃烧面积占比/%
16:00:00	0.022		0.126
17:00:00	0.167	659.09	0.957
18:00:00	0.880	426.95	5.047
19:00:00	1.685	91.48	9.664
20:00:00	2.770	64.39	15.885
21:00:00	4.321	55.99	24.780
22:00:00	5.980	38.39	34.294
23:00:00	8.113	35.67	46.526

3.2.1　不同行进速度下的路径规划

不同救援队伍的行进速度存在差异,对于不同的行进速度,所得到的最优解也不同。对于较高的行进速度,队伍能够更快到达火灾尚未蔓延的空间单元,从而减少绕行障碍的面积并缩短救援路径长度。基于此,实验设定时间安全阈值Δt为0,通过插值得到空间分辨率为3 m的火场动态障碍影响场,行进速度从0.16 m/s以0.01 m/s为步长递增,分析速度变化对最优路径的影响,包括最优路径的长度、达到救援点的总时间,以及不可达区域的总面积。采用21×21大小的模板进行MAD-ESPO变换与路径抽取,部分结果如图11及表2所示。

图11对比了行进速度分别为0.16、0.20和0.24 m/s时的最短路径和通行情况,可以发现,不同行进速度下MAD-ESPO绕障路径的选取可根据火场变化的时序特征动态调整。速度较低时,因无法快速到达火场尚未蔓延到的区域,需绕行更远的距离以规避火场障碍。如速度为0.16 m/s时,先从东侧绕过火场再前往救援点;速度增大到0.20 m/s时,改为从北侧绕过火场,绕行距离缩短;速度为0.24 m/s时,路径方向接近朝救援点的直线方向,路程和时间进一步缩短。结合图12及表2可知,行进速度对于路径规划结果影响显著,随着速度增大,不仅通行所需总时间缩短,可选择更短的路线,不可达区域面积也极大缩小。

3.2.2　不同时间安全阈值下的路径规划及极端危险区判定

时间安全阈值Δt作为算法的参数之一,控制着路径与火场之间的安全距离,确保队伍走过空间单元后,至少经过Δt时间,火场才蔓延到该位置。Δt较大时,所得救援路径在同一时刻会与火场边界保持更远距离,此时往往需绕过更大的障碍面积,路径也相应变长,甚至导致救援点落入不可达区。为确保安全,需要根据实际要求上调Δt,如在§3.2.1的实验中,由于将Δt设为0,导致路径紧贴火场动态边界,具有较高风险,特别在速度为0.16 m/s时,若沿其规划路径前往救援,救援队伍在即将到达救援点时存在被火场吞没的可能性,救援行动风险增大。

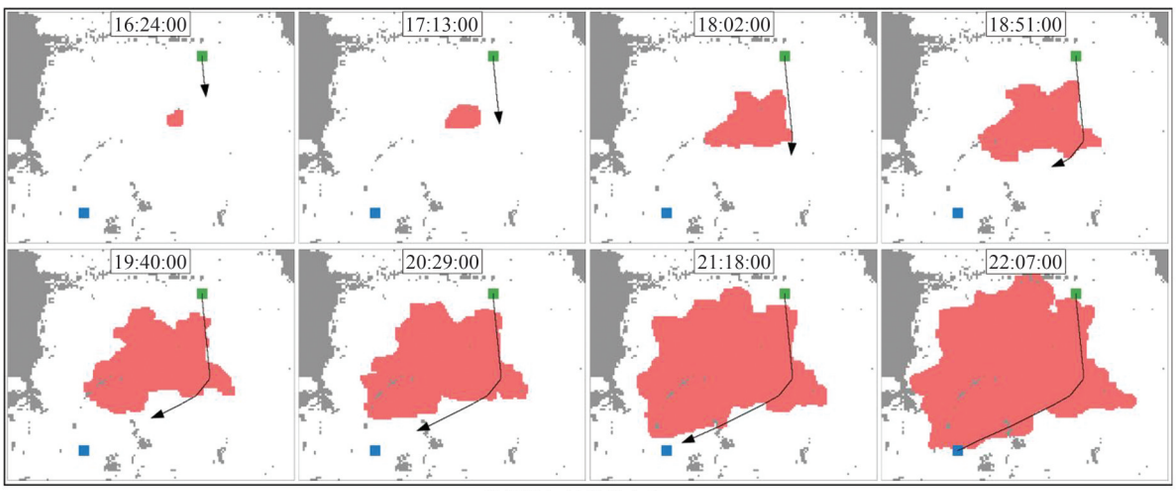
为比较不同阈值对救援路径的影响,实验设定Δt_1、Δt_2和Δt_3分别为0、30和60 min,行进速度为0.24 m/s,空间分辨率为3 m。在相同环境条件下采用21×21大小模板进行路径规划,以分析不同安全策略下的路径长度、总时间及可达性,评估实际应用中的可行性和安全性,结果如图13及表3所示。

图13为3种时间安全阈值下的路径规划结果与不可达区域(即极端危险区域),保持速度及其他条件不变时,缩小Δt将缩小不可达区域,也因此缩短路径长度。从表3数据可知,随着Δt增大,救援路径长度与不可达面积皆增大,但相比于不可达区域面积的变化,路径长度变化并不显著;总时间的增量同样小于Δt值的变化量,这是因为提前规避火场的开销较小,往往只需绕过一小部分区域即可保证满足安全阈值。从结果来看,为算法设置恰当的时间安全阈值是合适的做法,可以在不显著增加路径长度和通行时间的情况下提高路径的安全性,但需注意时间安全阈值对不可达区域影响较大,尤其在行进速度较低时,过高阈值可能导致救援点落入不可达区域内,因此该参数需要根据现场条件灵活调整。

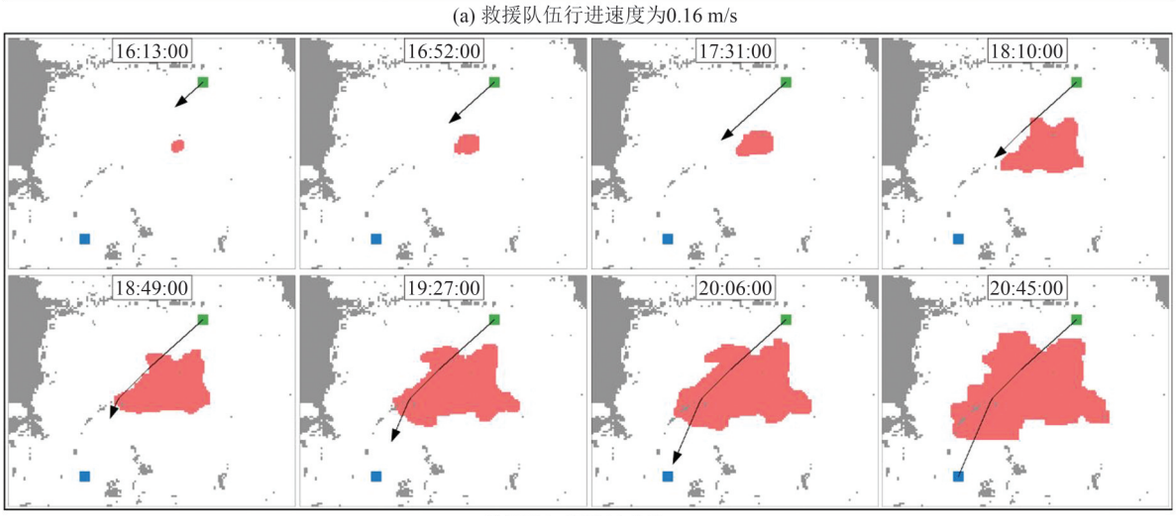
3.2.3　多火源动态障碍场景路径规划

在实际情况中,森林火灾可能因为其飞火导致多个起火点,形成多火源动态障碍场景。本实验通过人为添加虚拟火场障碍,分析本文方法在多火源场景下的综合效果。实验在真实起火点到救援物资点与救援点之间各添加一个模拟起火点,两处模拟火点起火后,火场边界以规则圆形向外扩张,与原火场一同构成多火源动态障碍场景。原始西昌森林火场记为f_0,起点侧的火场记为f_1,在救援队伍出发时即开始蔓延,初始速度为0.28 m/s,终点侧的火场记为f_2,在救援队伍出发后3 000 s后开始蔓延,初始速度为0.3 m/s,具体参数如表4所示。

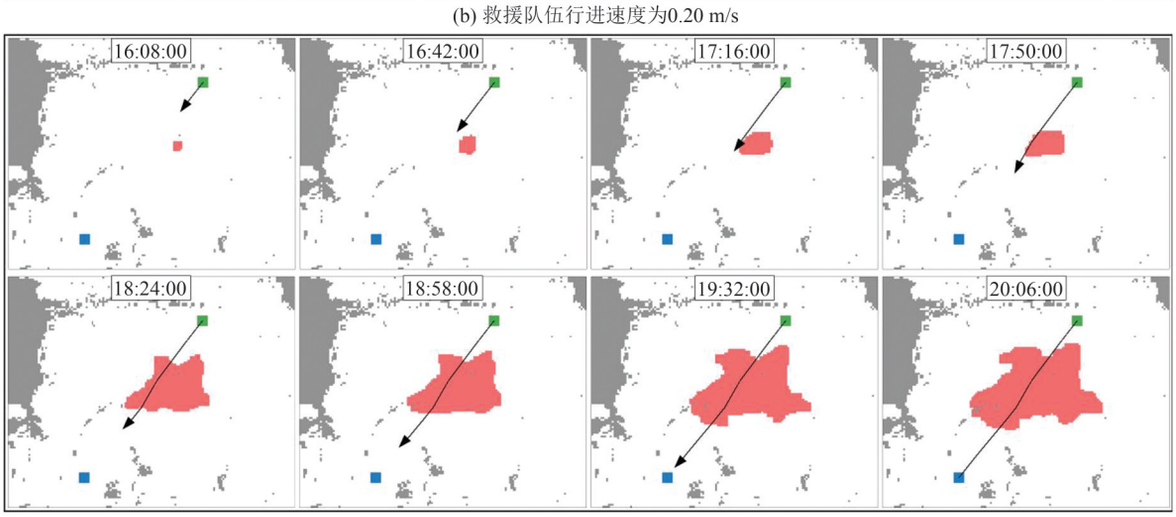
实验设定时间安全阈值Δt为0,行进速度为0.24 m/s,空间分辨率为3 m,得到不同时刻火场蔓延范围与沿最短路径通行拟到达的位置如图14所示,不可达区域如图15所示。



(a) 救援队伍行进速度为0.16 m/s



(b) 救援队伍行进速度为0.20 m/s



(c) 救援队伍行进速度为0.24 m/s

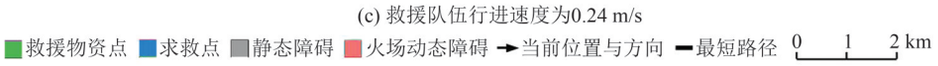


图11 不同行进速度下的最短路径比较

Fig. 11 Comparison of Shortest Paths at Different Travel Speeds

在图14中,最短救援路径先从东南侧绕过位于起点附近火场f_1,然后向西南方前行,绕过火场f_0后再向南方规避终点附近火场f_2,最终沿直线抵达终点。结合图15可知,路径大体上仍沿着从起点到终点的直线朝西南方,在规避火场障碍时有3次较明显的方向转折,皆发生在不可达区域边界处,符合最短路径实际效果。同时,实验设置多火源时令火场f_2延迟蔓延,从结果看算法依然将该火场纳

表 2　不同行进速度下的最短路径数据比较

Table 2　Comparison of Shortest Path Data at Different Travel Speeds

行进速度/(m·s^{-1})	路径长度/m	总时间/min	不可达面积/km^2
0.16	3 768	392.54	1.823
0.18	3 353	310.47	0.946
0.20	3 258	271.52	0.559
0.22	3 230	244.73	0.316
0.24	3 196	221.95	0.165

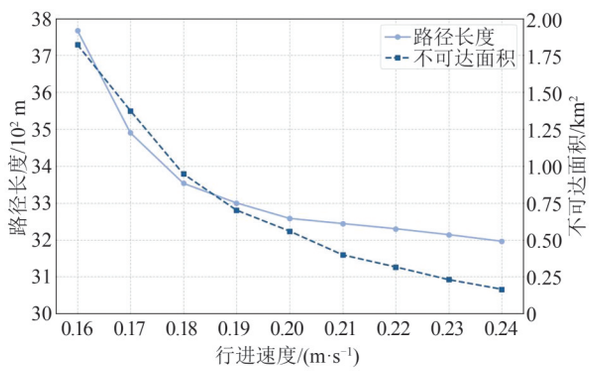


图 12　不同行进速度下的最短路径数据比较

Fig. 12　Comparison of Shortest Path Data at Different Travel Speeds

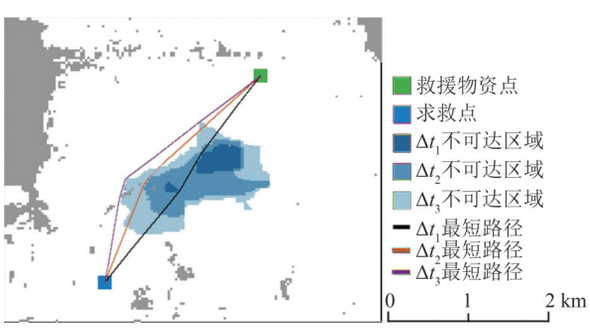


图 13　不同时间安全阈值下的最短路径

Fig. 13　Shortest Path Under Different Time Safety Thresholds

表 3　不同时间安全阈值下的最短路径数据比较

Table 3　Comparison of Shortest Path Data Under Different Time Safety Thresholds

Δt/min	路径长度/m	总时间/min	不可达面积/km^2
0	3 196	221.95	0.165
30	3 270	227.08	0.718
60	3 399	236.02	1.323

入了预测与规划中，在绕过火场f_0后向南方调整角度以规避f_2，体现了本文方法针对多火点场景

表 4　多火源模拟火场参数

Table 4　Multi Fire Source Simulation Fire Field Parameters

火场	起火点位置	起火时间	平均蔓延速度/(m·s^{-1})
f_0	(27.832 8°N, 102.238 1°E)	15:35:00	0.031
f_1	(27.836 9°N, 102.239 6°E)	15:35:00	0.034
f_2	(27.822 6°N, 102.227 3°E)	16:25:00	0.052

从全时间周期进行规划的能力，可有效面对全局的动态障碍进行路径规划，为多火点场景下的全局最优路径规划提供了可靠的技术实现路径。

4　结　语

本文针对森林火灾动态障碍空间下的应急救援路径规划问题，提出一种基于地图代数距离场的动态欧氏障碍空间最短路径算法，在森林火灾应急救援场景中展现出显著的时空协同避障能力。基于元胞栅格蔓延模型构建的火场动态障碍模型，能够将火场动态障碍的时空耦合特征嵌入路径成本计算，在距离变换算法中实现火险情况与通行时间的联合优化，解决了传统算法在时空避障方面的4个关键问题：

1）利用火场蔓延预测模型，通过时间、空间维度的离散化将连续变化障碍转化为火场动态障碍模型，解决了火场动态障碍建模问题；

2）引入时间安全阈值，实现应急救援路径风险可控；

3）对于给定救援物资点、行进速度，划分危险区范围，实现对救援力量的有效保护；

4）顾及全局动态障碍空间的路径规划，面向火场类全局动态障碍进行有效避障。

实验表明，本文方法在“3·30”西昌森林火灾案例中可实现面向火场动态障碍空间的路径规划，使救援人员及物资在不被火烧的情况下到达救援目标点。本文方法为处理洪水、飓风等具有可预测特征的动态灾害场景提供了普适性方法，针对D-ESPO问题，实现了火场类特殊障碍条件下路径规划的理论最优解。

目前，本文方法对于随机障碍、多救援目标及三维场景的适用性尚有局限，后续研究可继续把三维、随机动态障碍的时空通行成本添加进来予以计算，并结合实际地形、可燃物等环境要素提高算法在实际火灾应急场景下的实用性。

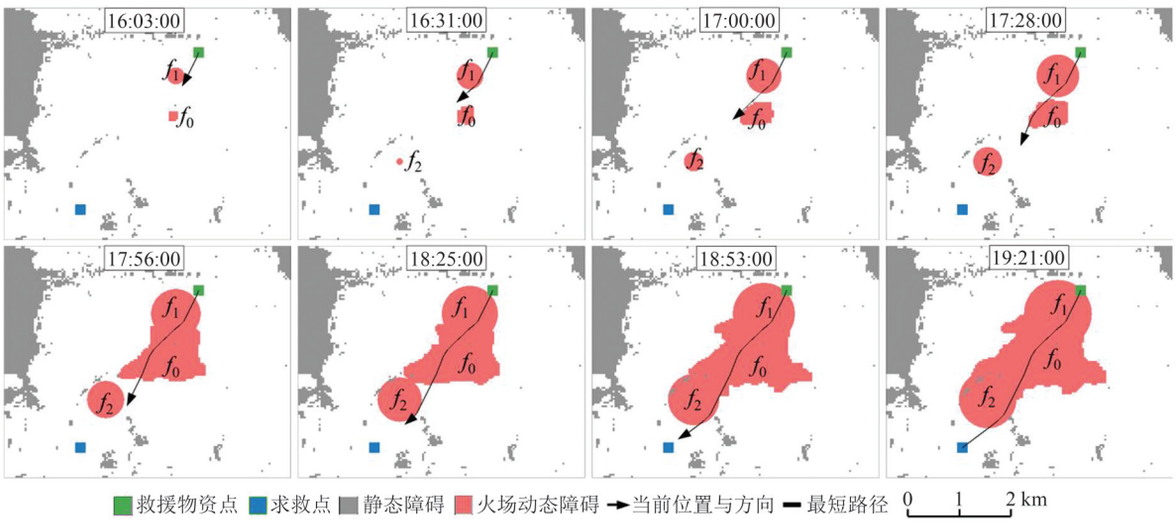


图14 多火源最短路径规划

Fig. 14 Shortest Path Planning for Multiple Fire Sources

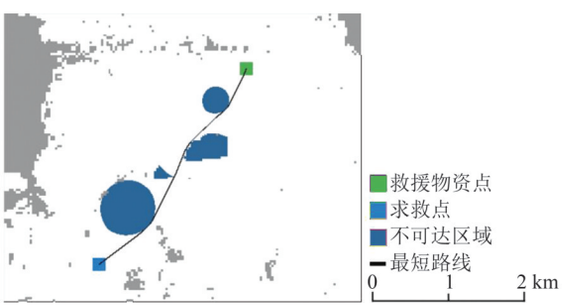


图15 多火源最短路径与不可达区域

Fig. 15 Shortest Path and Unreachable Area with Multiple Fire Sources

参 考 文 献

[1] 杨福龙,曹佳,白夜. 基于元胞自动机的林火蔓延三维模拟仿真研究[J]. 计算机工程与应用,2016,52(19):37-41.
YANG Fulong, CAO Jia, BAI Ye. Study on Simulation of Three Dimensional Simulation of Forest Fire Spread Based on Cellular Automaton[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(19): 37-41.

[2] 韩超然,李霖,任福. 森林火灾应急救援情景演化Web三维模拟:以四川省西昌市泸山"3.30"森林火灾为例[J]. 时空信息学报,2024,31(4):541-552.
HAN Chaoran, LI Lin, REN Fu. Web-Based 3D Simulation of the Emergency Rescue Scenario Evolution for Forest Fires—A Case Study of the "3·30" Forest Fire in Lushan, Xichang City, Sichuan Province [J]. *Journal of Spatiotemporal Information*, 2024, 31(4): 541-552.

[3] 张玉春,叶子群,高云骥,等. 森林火灾燃烧蔓延预测模型及预报平台研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):1137-1149.
ZHANG Yuchun, YE Ziqun, GAO Yunji, et al. Forest Fire Burning Spread Prediction Model and Forecasting Platform[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(6): 1137-1149.

[4] HAGHRAH A A, GHAEMI S, ALI BADAMCHIZADEH M. Modeling and Solving Multi-objective Path Planning Problem for Cooperative Cable-Suspended Load Transportation Considering the Time Variable Risk[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 11704-11719.

[5] REN Y P, TIAN G D. Emergency Scheduling for Forest Fires Subject to Limited Rescue Team Resources and Priority Disaster Areas[J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 11(6): 753-759.

[6] 王路兵,吴鹏,胡鹏,等. 资源受限下森林火灾应急救援多目标调度优化[J]. 运筹与管理,2023,32(1):60-66.
WANG Lubing, WU Peng, HU Peng, et al. Multi-objective Optimization for Forest Fires Emergency Rescue Scheduling with Resource Constraints [J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(1): 60-66.

[7] 宋睿,朱培,张剑高,等. 面向高原森林火灾的灭火无人机路径规划[J]. 科学技术与工程,2024,24(34):14863-14870.
SONG Rui, ZHU Pei, ZHANG Jiangao, et al. Path Planning of Fire Fighting UAV for Plateau Forest Fires[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(34): 14863-14870.

[8] ROHNERT H. Shortest Paths in the Plane with Convex Polygonal Obstacles[J]. *Information Processing Letters*, 1986, 23(2): 71-76.

[9] Preparata F P, Shamos M I. Computational Geome-

try: An Introduction[M]. New York: Springer-Verlag, 2012.

[10] 薛刚,张志安,胡琼. 基于气象环境下改A*算法的船舶实时航线规划[J]. 自动化与仪表,2025,40(3):54-58.
XUE Gang, ZHANG Zhian, HU Qiong. Real-time Route Planning of Ships Based on Improved A* Algorithm in Meteorological Environment[J]. *Automation & Instrumentation*, 2025,40(3): 54-58.

[11] 陈一馨, 段宇轩, 刘豪, 等. 基于障碍密度优先策略改进A*算法的AGV路径规划[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(2): 26-34.
CHEN Yixin, DUAN Yuxuan, LIU Hao, et al. Improved a Algorithm for AGV Path Planning Based on Obstacle Density Prioritization Strategy[J]. *Journal of Zhengzhou University* (*Engineering Science*), 2025, 46(2): 26-34.

[12] 李泓雨,徐海祥,余文曌,等. 基于改进A算法的无人艇编队路径规划[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2025,49(3):604-610.
LI Hongyu, XU Haixiang, YU Wenzhao, et al. Path Planning for Unmanned Surface Vehicle Formation Based on Improved A Algorithm[J]. *Journal of Wuhan University of Technology* (*Transportation Science & Engineering*), 2025,49(3):604-610.

[13] 徐正宇,贾小林,顾娅军,等. 基于引力势能修正的快速行进树路径规划算法[J]. 计算机应用研究,2025, DOI:10.19734/j.issn.1001-3695.2024.11.0478.
XU Zhengyu, JIA Xiaolin, GU Yajun, et al. Fast Marching Tree Algorithm Based on Gravitational Potential Energy Correction[J]. *Application Research of Computers*, 2025, DOI: 10.19734/j. issn. 1001-3695.2024.11.0478.

[14] 李永超, 胡世琦. 自主式乒乓球捡球机器人避障路径规划算法[J]. 机械设计与制造, 2025, DOI: 10.19356/j. cnki. 1001-3997.20250318.058.
LI Yongchao, HU Shiqi. Obstacle Avoidance Path Planning Algorithm for Autonomous Table Tennis Ball-Picking Robot[J]. *China Industrial Economics*, 2025, DOI: 10.19356/j. cnki. 1001-3997.20250318.058.

[15] 邓冬冬, 许建民, 孟寒, 等. 基于蚁群算法与人工势场法融合的移动机器人路径规划[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 1-16.
DENG Dongdong, XU Jianmin, MENG Han, et al. Mobile Robot Path Planning Based on the Fusion of Ant Colony Algorithm and Artificial Potential Field Method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(2): 1-16.

[16] 高爱云,吕元博,付主木,等. 基于改进人工势场的自适应采样轨迹规划[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025,DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241071.
GAO Aiyun, LÜ Yuanbo, FU Zhumu, et al. Adaptive Sampling Trajectory Planning Based on Improved Artificial Potential Field[J]. *Journal of Jilin University* (*Engineering and Technology Edition*), 2025,DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241071.

[17] 广鑫, 耿增显. 基于离散粒子群算法的集群无人机飞行路径规划[J]. 现代电子技术, 2025, 48(4): 119-122.
GUANG Xin, GENG Zengxian. Clustering UAV Flight Path Planning Based on DPSO[J]. *Modern Electronics Technique*, 2025, 48(4): 119-122.

[18] STENTZ A. Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, CA, USA, 2002.

[19] KOENIG S, LIKHACHEV M, FURCY D. Lifelong Planning A[J]. *Artificial Intelligence*, 2004, 155(1/2): 93-146.

[20] 秦旭, 黄晓华, 马东明, 等. 基于改进D*算法的巡检机器人路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(6): 10-13.
QIN Xu, HUANG Xiaohua, MA Dongming, et al. Path Planning of Inspection Robot Based on Improved D Algorithm[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2022(6): 10-13.

[21] 张贺, 胡越黎, 王权, 等. 基于改进D*算法的移动机器人路径规划[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(11): 73-74.
ZHANG He, HU Yueli, WANG Quan, et al. Path Planning of Mobile Robot Based on Improved D* Algorithm[J]. *Industrial Control Computer*, 2016, 29(11): 73-74.

[22] 李生, 李明宇, 方舟, 等. 基于改进LPA*算法的虚拟人路径规划[J]. 装备制造技术, 2022(8): 82-84.
LI Sheng, LI Mingyu, FANG Zhou, et al. Virtual Human Path Planning Based on Improved LPA* Algorithm[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2022(8): 82-84.

[23] 刘嘉琪, 刘善慧, 任慧冉, 等. 融合LPA*和DWA算法的导向辊生产车间AGV组合路径规划方法研究[J]. 中国造纸, 2024, 43(6): 175-184.
LIU Jiaqi, LIU Shanhui, REN Huiran, et al. A Combined Path Planning Method Based on LPA* and DWA Algorithms for AGV in the Guided Roller Production Workshop[J]. *China Pulp & Paper*, 2024, 43(6): 175-184.

[24] 张一博, 高丙朋. 基于深度强化学习的AUV路径规划研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2025, 57(1): 53-62.
ZHANG Yibo, GAO Bingpeng. Research on AUV Path Planning Based on Deep Reinforcement Learning[J]. *Journal of Northeast Normal University* (*Natural Science Edition*), 2025, 57(1): 53-62.

[25] 詹天碧,冯辉,徐海祥,等.基于噪声DQN的智能船舶全局路径规划方法[J].大连海事大学学报,2025,51(1):43-53.
ZHAN Tianbi, FENG Hui, XU Haixiang, et al. The Intelligent Ship Global Path Planning Method Based on Noise-DQN[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2025, 51(1): 43-53.

[26] LI J, ZHANG X H, LI Y F, et al. Prediction of Fire Spread Based on Geographical Cellular Automata[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1575(1): 012058.

[27] 洪妍灵,江辉仙,张明锋.火灾环境交互条件下应急疏散路径最优决策算法[J].福建师范大学学报(自然科学版),2025,41(2):65-73.
HONG Yanling, JIANG Huixian, ZHANG Mingfeng. A Study on the Optimal Decision Algorithm for Emergency Evacuation Paths Under Fire Environment Interaction[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2025, 41(2): 65-73.

[28] 温天飞,高宇,王全,等.融合快速遍历随机树和Q强化学习的煤矿轮式机器人路径规划关键技术[J].煤矿安全,2025,56(3):233-241.
WEN Tianfei, GAO Yu, WANG Quan, et al. Key Technologies for Path Planning of Coal Mine Wheeled Robots Integrating Fast Traversal Random Trees and Q-Reinforcement Learning[J]. *Safety in Coal Mines*, 2025, 56(3): 233-241.

[29] 潘琦涛,赵岳生,甘育国.基于改进Q-Learning算法的机器人路径规划[J].物联网技术,2025,15(3):82-86.
PAN Qitao, ZHAO Yuesheng, GAN Yuguo. Robot Path Planning Based on Improved Q-Learning Algorithm [J]. *Internet of Things Technologies*, 2025, 15(3): 82-86.

[30] 耿华,冯涛.基于改进Q-learning算法智能仓储AGV路径规划[J].现代信息科技,2025,9(2):171-175.
GENG Hua, FENG Tao. AGV Path Planning Based on Improved Q-Learning Algorithm in Intelligent Warehouse[J]. *Modern Information Technology*, 2025, 9(2): 171-175.

[31] 杨传勇,胡海,胡鹏,等.欧氏障碍空间的最短路径问题解法[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(12):1495-1499.
YANG Chuanyong, HU Hai, HU Peng, et al. Solution of Euclidean Shortest Path Problem Space with Obstacles[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1495-1499.

[32] 刘纪平,王琢璐,徐胜华,等.人工智能时代下的应急测绘[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):1029-1041.
LIU Jiping, WANG Zhuolu, XU Shenghua, et al. Emergency Surveying and Mapping in the Era of Artificial Intelligence[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(6): 1029-1041.

[33] 王正非.山火初始蔓延速度测算法[J].山地研究,1983,1(2):42-51.
WANG Zhengfei. The Mesurement Method of the Wildfire Initial Spread Rate[J]. *Journal of Mountain Research*, 1983, 1(2): 42-51.

[34] 田玉萍,金成宇,王斌,等.基于改进的王正非模型结合元胞自动机的林火蔓延预测[J].中南林业科技大学学报,2024,44(5):14-25.
TIAN Yuping, JIN Chengyu, WANG Bin, et al. Forest Fire Spread Prediction Based on Improved Wang Zhengfei Model Combined with Cellular Automata[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2024, 44(5): 14-25.

[35] 康庆江.林火蔓延研究进展[J].林业勘查设计,2022,51(3):27-32.
KANG Qingjiang. Research Progress on Forest Fire Spread[J]. *Forest Investigation Design*, 2022, 51(3): 27-32.

[36] ELHAG M, BOTEVA S. The Canadian Versus the National Forest Fire Danger Rating Systems Tested in Mediterranean Forests Fire Crete, Greece [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(4): 4973-4983.

[37] KHASTAGIR A, JAYASURIYA N, BHUYIAN M A. Assessment of Fire Danger Vulnerability Using McArthur's Forest and Grass Fire Danger Indices [J]. *Natural Hazards*, 2018, 94(3): 1277-1291.

[38] MORVAN D, LARINI M. Modeling of One Dimensional Fire Spread in Pine Needles with Opposing Air Flow[J]. *Combustion Science and Technology*, 2001, 164(1): 37-64.

[39] 耿道通,宁吉彬,李兆国,等.基于Rothermel模型的红松人工林地表可燃物蔓延速率及参数修正[J].北京林业大学学报,2021,43(11):79-88.
GENG Daotong, NING Jibin, LI Zhaoguo, et al. Spread Rate and Parameter Correction of Surface Fuel in Pinus Koraiensis Plantation Based on Rothermel Model[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(11): 79-88.

[40] ROTHERMEL R C. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires[R]. General Technical Report, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1983.

[41] 张青年.一种顾及障碍物的欧氏距离变换方法[J].中山大学学报(自然科学版),2013,52(1):130-135
ZHANG Qingnian. Euclidean Distance Transform by Raster Scan in Obstacle Space[J]. *Acta Scientiarum Cientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2013, 52(1): 130-135