

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202505001

复杂地形场景下的低当量核武器爆炸 应急撤离路径规划

王存友¹, 王朝阳¹, 杨力¹, 宋嘉悦¹, 李幻婷¹, 方晟², 李新鹏^{1*}, 陈义学¹

(1. 华北电力大学 核科学与工程学院, 北京 102206;

2. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 为减少在遭受低当量核武器打击后应急撤离人员的辐射暴露, 针对复杂地形场景下低当量核武器打击场景, 研究开发了基于A*算法的辐照剂量最小和通行时间最短的路径规划模型。通过模拟假想复杂地形下的核爆事故, 结合气象预报模式WRF、风场诊断模型CALMET和烟团扩散模型SPUFF的剂量结果以及精细的路网信息, 开展3个不同区域撤离点到医疗点的路径规划, 验证了该方法的有效性。通过假想每条路径上发生路径损坏的位置, 验证了该方法在发生突发事件后的可靠性。结果表明: 对于3个不同区域的撤离点, 该方法均能规划出辐照剂量最小和通行时间最短的撤离路径, 并且在初始路径发生损坏后, 也能重新规划出合适的撤离路径。此外, 在路径规划过程中, 分别计算了未防护、佩戴面罩防护和面罩加铅衣防护3种情况下的累积剂量, 结果显示面罩加铅衣防护可显著降低累积剂量, 相比未防护或单独佩戴面罩防护分别减少约91%和89%。

关键词: A*算法; 复杂地形场景; 核武器爆炸; 路径规划; 累积剂量

中图分类号: TL732

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)05-0001-13



听语音
与作者互动
聊科研

Emergency Evacuation Path Planning for Low-Yield Nuclear Weapon Explosion in Complex Terrain Scenarios

WANG Cunyou¹, WANG Zhaoyang¹, YANG Li¹,
SONG Jiayue¹, LI Huanting¹, FANG Sheng²,
LI Xinpeng^{1*}, CHEN Yixue¹

(1. School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China;

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

收稿日期: 2025-01-04

修回日期: 2025-03-20

录用日期: 2025-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(12275152); 国家自然科学基金青年基金(12105103); 北京市自然科学基金杰出青年基金(JQ23011); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2024MS045)

第一作者: 王存友(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事核科学与技术研究。E-mail: 120222212042@ncepu.edu.cn

***通信作者:** 李新鹏(1993—), 男, 讲师, 主要从事核科学与技术研究。E-mail: lixp2020@ncepu.edu.cn

引用格式: 王存友, 王朝阳, 杨力, 等. 复杂地形场景下的低当量核武器爆炸应急撤离路径规划[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39, (5): 1-13. WANG Cunyou, WANG Zhaoyang, YANG Li, et al. Emergency evacuation path planning for low-yield nuclear weapon explosion in complex terrain scenarios[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (5): 1-13.

ABSTRACT: To reduce the radiation exposure of personnel in emergency evacuation after low-yield nuclear weapon strikes, a path planning model based on the A* algorithm with the minimum irradiation dose and shortest passage time was proposed for low-yield nuclear weapon strikes in complex terrain scenarios. The effectiveness of the method was verified by carrying out path planning from evacuation points to medical points in three different areas by simulating a hypothetical nuclear explosion accident in complex terrains. It combined the dose results of the meteorological forecasting mode WRF, the wind field diagnostic mode CALMET and the puff dispersion model SPUFF, as well as the detailed road network information. The method's reliability after an unexpected accident was verified by hypothesizing the location of path damage on each path. The results show that the method can plan the evacuation paths with the minimum irradiation dose and the shortest traveling time for the evacuation points in the three different areas. It can also replan appropriate evacuation paths after the initial paths are damaged. In addition, The cumulative dose for unprotected, masked, and mask-and-lead-suit scenarios are calculated during the path planning process. The results show that in the mask-and-lead-suit scenario, the cumulative dose is significantly reduced by approximately 91% and 89%, respectively, compared with unprotected and masked scenarios.

KEYWORDS: A* algorithm; complex terrain scenario; nuclear weapon explosion; path planning; cumulative dose

核武器是人类有史以来制造和拥有的最强大的武器^[1],以 B61-12 型制导核弹为代表的低当量战术核武器^[2],凭借其小型化、高隐蔽性等特征,有可能被用作报复核威慑的手段^[3]。核武器爆炸瞬间会释放出巨大的能量,产生强烈的冲击波、高温和辐射,对环境造成巨大损害^[4]。一旦发生核武器爆炸事故,确保区域内工作人员的安全疏散至关重要。然而,核武器爆炸产生的放射性物质的迁移会受到气象条件和复杂地形的影响^[5],形成高度异质化的放射性分布形势。因此,需要制定科学有效的应急救援路线,以确保应急人员顺利开展工作。

路径规划在应急救援路线的制定中起着至关重要的作用,其核心在于路径搜索算法的设计^[6]。路径搜索算法有很多,且特点各不相同。根据算法自身的优缺点,其适用范围和领域也不尽相同。目前,关于低当量核武器爆炸场景下的路径规划研究较少,但国内外针对放射性环境下的路径规划方法做了许多研究。Alzalloum^[7]提出一种基于 Dijkstra 算法和 Bellman-Ford 算法的路径优化方法,该方法考虑障碍物的影响,通过计算辐射剂量场中的最短路径,以减少工作人员的辐射暴露;Liu 等^[8]提出一种基于粒子群算法的放射性环境路径规划方法,结合辐射剂量和距离,通过优化工作人员在辐射环境中的行走路径,减少辐射暴露;

Wang 等^[9]提出一种结合混沌优化算法的改进粒子群优化算法,能减少因节点距离太长产生的误差,并且当节点数较多时,该方法明显优于传统的粒子群优化算法;Xie 等^[10]提出一种改进的蚁群优化算法,结合混沌优化算法,引入信息素差异化更新策略和局部搜索优化策略,优化放射性环境下的多目标巡检路径规划,有效提升了传统蚁群优化算法在多目标路径规划中的效率和稳定性;周怀芳等^[11]提出一种基于混合蚁群算法的车辆路径规划方法,结合模糊网络和累积辐射剂量计算模型,提高算法全局寻优能力和局部搜索能力,解决了核事故下应急车辆路径规划问题;Yan 等^[12]提出一种基于遗传算法和可变邻域搜索算法的应急疏散路径优化方法,结合人口分布、车辆信息、集合点和安置点等信息,优化疏散路径,解决了核电厂外应急疏散路径优化问题。然而,上述方法虽然各有优势,但均未考虑复杂地形对污染物扩散的影响,无法很好地适用于复杂地形场景。

近年来,结合核电站周围简化的路网信息,同时考虑道路阻力的路径规划方法被用于核应急场景中。其中,Tang 等^[13]提出一种在严重核事故情况下,用于场外应急疏散的多目标疏散路径优化方法,结合大气扩散模型、改进的蚁群算法和道路阻力模型,为核事故的早期应急响应提供决策支持;Pei 等^[14]提出一种基于最小集体剂量的路

径规划方法, 结合累积剂量计算的Dijkstra算法和考虑道路阻力的均衡模型, 优化了核事故下的疏散路径; Xiao等^[15]提出一种混合基因灰狼优化算法, 结合辐射环境和道路网络, 优化突发核事故下的人员疏散路径, 以最小化辐射剂量, 解决了传统遗传算法在路径规划中的收敛速度较慢等问题。然而, 上述方法忽略了突发状况对通行速度和累积剂量的影响, 并且未结合实际详细的路网信息进行路径规划。

综上所述, 目前能结合实际路网信息且考虑突发情况的路径规划方法较少。因此, 本文针对假想的核武器爆炸事故场景, 应用气象研究与预报(weather research and forecasting, WRF)模式-加州气象(California meteorological, CALMET)模型-拉格朗日分裂烟团(splitting puff, SPUFF)扩散模型, 在复杂地形场景下开展不同时刻放射性物质的扩散模拟, 结合详细的路网信息, 基于A*算法研究开发了不同区域的撤离点至医疗点的最短时间和最小暴露剂量的路径规划模型, 并且在路径发生损毁后能重新规划出最优路线。该方法能考虑防护装备对路径上累积剂量的影响, 最大限度地保证应急撤离和救援过程中工作人员和救援人员的生命安全。

1 研究基础

1.1 WRF 模式

WRF是一种先进的中尺度预报模式, 采用可压非静力模式和Arakawa-C网格, 并结合了先进的数值方法和资料同化技术。其采用改进的物理过程参数方案, 支持多重嵌套, 具备从数米到数千公里尺度预报精度的天气模拟能力^[16]。

污染物在大气环境中扩散传输速度受复杂多变的气象条件影响, 影响放射性核素扩散的气象要素主要包括风、降水、大气垂直运动和稳定度等^[17]。高级研究版WRF(advanced research WRF, ARW)的动力学框架采用可压缩、非静力平衡欧拉方程组求解关键气象要素。ARW垂直方向上采用地形追随质量的坐标^[18], 可表示为

$$\eta = (p_m - p_{mt}) / \mu \quad (1)$$

式中: η 值随高度而变化, 在地面为1, 在模式顶部为0; p_m 为气压的静力分量; p_{mt} 为模式顶层气压; $\mu = p_{ms} - p_{mt}$, p_{ms} 为模式近地面层气压。在水平方向上采用Arakawa-C网格系统, $\mu(x, y)$ 表

示单位空间 (x, y) 空气柱的质量, 则变量的通量形式可表示为^[16, 19]

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \mu \mathbf{v} = (U, V, W) \\ \Omega = \mu \bar{\eta}_s \\ \Theta = \mu \theta_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{V}$ 、 Ω 、 Θ 分别为 $\mathbf{v}$ 、 $\bar{\eta}_s$ 、 θ_r 的通量形式^[16, 19-21]; $\mathbf{v} = (u, v, w)$ 为2个水平方向和垂直方向上的协变速度; U 、 V 、 W 分别为 u 、 v 、 w 的通量形式; $\bar{\eta}_s$ 为逆变垂直速度; θ_r 为位温。

1.2 CALMET 模型

CALMET模型采用两步法生成三维网格化诊断风场^[22], 具体步骤如下。

Step1 通过输入高空气象数据, CALMET模型首先会生成初始风场, 并根据地形运动学效应、坡度流以及阻挡效应进行调整。此外, 在地形运动学效应调整中, 应用三维散度最小化程序修正水平风场, 以满足质量守恒的要求^[22-26]。

$$\frac{dm}{dx} + \frac{dn}{dy} + \frac{dh}{dz} < \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

式中: m 、 n 、 h 分别为空间 x 、 y 、 z 方向的风速分量; $\varepsilon_{\max}$ 为散度设定的最大值。

Step2 CALMET模型通过反距离法将测量数据引入Step1中生成的风场, 随后进行平滑以及O'Brien调整^[24]。最后, 再次应用三维散度最小化程序, 以得到最终风场。

1.3 SPUFF 扩散模型

在CALMET模型生成的诊断风场基础上, 通过释放连续的Gauss烟团, 利用SPUFF扩散模型, 针对可变释放率源项进行局地尺度大气扩散, 以模拟放射性或非放射性的气体或气溶胶在大气中的迁移轨迹。该模型具备烟团分裂功能, 已经过复杂核电厂址风洞实验的验证^[25]。SPUFF扩散模型通过对周围烟团的空气活度浓度或空气质量浓度贡献求和来计算网格点 (x, y, z) 的空气活度浓度或空气质量浓度, 均以 $C_{air}(x, y, z)$ ^[25, 27]表示。

$$C_{air}(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \frac{Q_r(i) \Delta T}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \delta_h^2(i) \delta_v(i)} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - x_c(i))^2}{\delta_h^2(i)} + \frac{(y - y_c(i))^2}{\delta_h^2(i)} \right] \right\} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(z - z_c(i))^2}{\delta_v^2(i)} \right] + \exp \left[-\frac{(z + z_c(i))^2}{2\delta_v^2(i)} \right] + \exp \left[-\frac{(2z_{mixh} - z_c(i))^2}{2\delta_v^2(i)} \right] \right\} \quad (4)$$

式中： N 为释放烟团的总个数； $Q_i(i)$ 为第 i 个烟团的释放率； ΔT 为烟团释放的时间间隔； $(x_c(i), y_c(i), z_c(i))$ 为第 i 个烟团的中心坐标； $\delta_h(i)$ 和 $\delta_v(i)$ 分别为第 i 个烟团水平和垂直扩散参数； z_{mixh} 为混合高度。

1.4 剂量率计算模型

个人有效剂量计算主要包括放射性核素烟羽浸没外照射、地面沉积外照射和吸入内照射^[28-29]。

1) 烟羽 γ 外照射剂量

某核素的烟羽 γ 外照射剂量可表示为

$$H_{air\gamma} = \psi \times D_{air\gamma} \quad (5)$$

式中： $H_{air\gamma}$ 为空气中核素 γ 外照射当量剂量； ψ 为近地面空气中核素的时间积分浓度； $D_{air\gamma}$ 为核素单位时间积分浓度所致 γ 外照射剂量。

2) 吸入烟羽内照射剂量

某核素吸入烟羽内照射剂量可表示为

$$H_{inh} = \psi \times B \times D_{inh} \quad (6)$$

式中： H_{inh} 为吸入烟羽内照射待积有效剂量或甲状腺待积当量剂量； B 为人的呼吸率； D_{inh} 为吸入单位活度核素所致的待积有效剂量或甲状腺待积当量剂量。

3) 地面沉积核素 γ 外照射剂量

某核素地面沉积核素 γ 外照射剂量可表示为

$$H_{depy} = C_g \times D_{depy} \quad (7)$$

式中： H_{depy} 为地面沉积核素所致外照射剂量当量； C_g 为地面沉积核素表面比活度； D_{depy} 为放射性核素的地面外照射剂量转换因子。

1.5 A*算法

A*算法是一种以Dijkstra和BFS为基础的启发式遍历搜索算法^[30-31]，主要运用于已知环境的静态路网中^[32-33]，能够弥补传统遍历搜索算法计算量大、效率低的缺点^[34-35]，更好地完成路径规划任务。其流程如图1所示^[33, 36]，基本原理如下。

A*算法从起始点出发进行路径规划，逐渐扩展周围的邻近节点。通过特定的代价公式计算从起始点到当前节点的代价以及从当前节点到目标节点的代价。在所有节点中，将代价最小的节点作为当前最优节点，并继续以此节点为基础进行搜索，直到找到目标点，最终生成一条从起始点到目标点的路径^[37-38]。A*算法在搜索过程中会以当前节点周围的8个相邻节点作为计算目标，将相邻节点的状态定义为未检查、待检查和已检查3种，待检查的节点存放在openList中，已检查的

节点存放在closeList中，A*算法在节点 n 处的代价函数^[38-39]为

$$F(n) = G(n) + H(n) \quad (8)$$

式中： $F(n)$ 为从起始点开始必须经过当前节点 n 到目标点的代价估计； $G(n)$ 为从起始点到当前节点 n 的实际代价； $H(n)$ 为从当前节点 n 到目标点的估计代价。

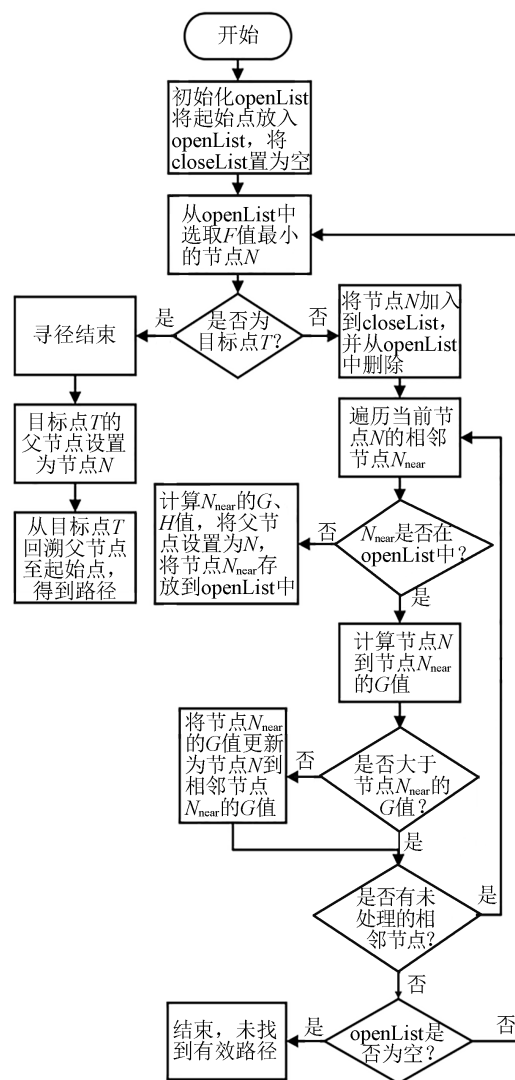


图1 A*算法路径规划流程

Fig. 1 Flowchart of path planning of A* algorithm

2 场景与参数设定

某假想复杂地形场景的二维和三维地形如图2所示。其中，4个释放点位于不同的区域。撤离点C所处区域周围的山较多，地形比较复杂，撤离点A和B所处的区域地形较为平坦。为了防止医疗点被放射性物质污染，医疗点设置在释放点上风向且位于烟羽扩散范围之外。此外，考虑到人员

和车辆的通行便利, 医疗点位于地形平坦的区域^[40]。通过模拟该场景发生核武器爆炸事故, 结合气象模型 WRF、风场诊断模型 CALMET 和烟团扩散模型 SPUFF 的剂量结果以及精细的路网信息, 开展 3 个不同位置的撤离点到医疗点的时间最短和辐射剂量最小的路径规划, 以及当路径发生损毁后最优路径的重新规划。此外, 在路径规划过程中考虑不同防护装备对人员通行时累积剂量的影响。

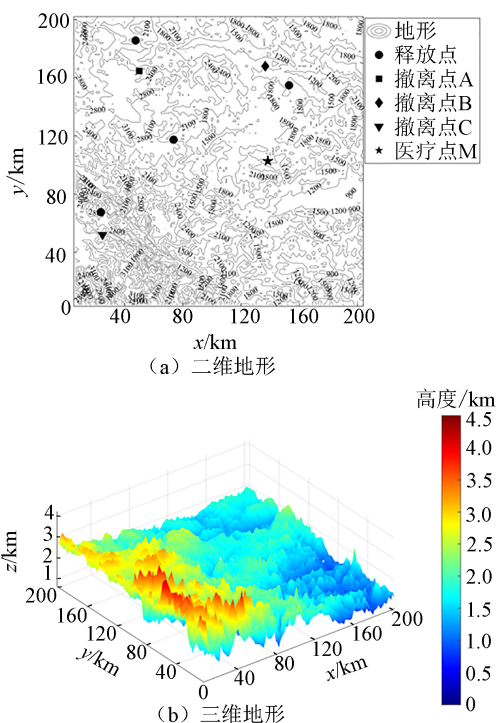


图 2 假想场景的二维和三维地形示意

Fig. 2 Two and three-dimensional terrain schematics of the hypothetical scenario

2.1 WRF 模式设置

使用的 WRF 模式版本为 4.3, 模式中心为 34.035°N , 105.196°E , 水平方向采用单层模拟, 气象场的计算域设置为 $600\text{ km} \times 600\text{ km}$, 网格尺寸为 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$, 4 种气象数据的模拟时段设置为国际标准时间 2024 年 10 月 10 日 00:00~2024 年 10 月 12 日 00:00, 输出时间步长设置为 1 h。

2.2 CALMET 模型设置

针对某复杂地形场景, 风场以及扩散场的计算域均设为 $200\text{ km} \times 200\text{ km}$ 的正方形区域, 网格尺寸设为 2 km 。CALMET 模型输入的地形和土地类型数据来自中国科学院计算机网络中心地理空间数据云平台和欧洲航天局^[41-42], 4 个释放点的经纬度分别为 $(34.788^{\circ}\text{N}, 104.581^{\circ}\text{E})$ (44,

184)、 $(34.509^{\circ}\text{N}, 105.730^{\circ}\text{E})$ (149, 153)、 $(34.174^{\circ}\text{N}, 104.866^{\circ}\text{E})$ (70, 115) 和 $(33.723^{\circ}\text{N}, 104.327^{\circ}\text{E})$ (20, 66), 每组后面括号中的数字为以计算域左下角为原点的相对坐标。3 个撤离点的经纬度分别为 $(34.599^{\circ}\text{N}, 104.608^{\circ}\text{E})$ (46, 163)、 $(34.628^{\circ}\text{N}, 105.553^{\circ}\text{E})$ (133, 166) 和 $(33.582^{\circ}\text{N}, 104.341^{\circ}\text{E})$ (21, 50)。医疗点的经纬度为 $(34.040^{\circ}\text{N}, 105.569^{\circ}\text{E})$ (134, 101)。

2.3 SPUFF 模型设置

计算域设置为 $200\text{ km} \times 200\text{ km}$, 网格尺寸设为 2 km 。释放源项类型为体源。认为烟团 1 min 全部释放并考虑了释放气体的干湿沉积效应^[43]。释放的核素包括 ^{95}Nb 、 ^{99}Mo 、 ^{103}Ru 等。每个释放点处都假想发生当量为 50 kt 的核武器爆炸, 模拟 B61-12 型核弹的最大当量, 事故后污染范围广、扩散情况复杂。GB 18871—2002^[44]中要求可防止剂量为 50 mSv 时应当组织撤离。工作人员应根据现场情况决定是否及时撤离, 释放的某一核素在发生 50 kt 爆炸后的放射性活度为 $50 \times 1.45 \times 10^{23} f \lambda \text{ Bq}$ ^[45]。其中, f 为裂变产额, λ 为衰变常数。扩散模拟时间设置为 48 h, 模型输出时间步长设置为 10 min。

2.4 路网信息

根据不同等级的道路, 设置不同的行进速度。参考公路工程技术标准 (JTG B01—2014), 将道路类别分为城市一级道路、城市二级道路、城市三级道路、城市四级道路、乡道、县道、省道、国道、高速, 将行进速度分别设置为 80 km/h、50 km/h、40 km/h、30 km/h、25 km/h、35 km/h、70 km/h、80 km/h、100 km/h^[46]。该复杂地形的路网信息如图 3 所示, 信息来源于 Open-Street-Map 官网。

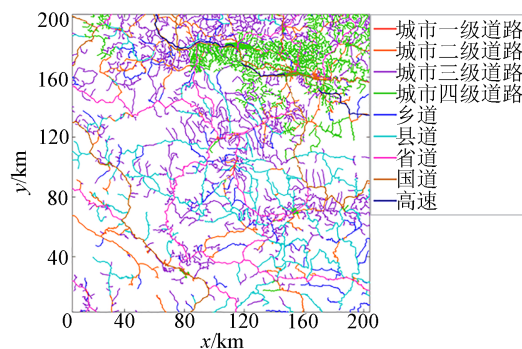


图 3 某复杂地形场景的路网信息

Fig. 3 Road network information of a complex terrain scenario

2.5 防护措施

防护措施主要包括穿戴呼吸道防护器材、皮肤防护器材和服用碘。本文主要考虑面罩和铅衣的防护效率,其中,面罩主要对吸入内照射有防护作用,铅衣主要对外照射有防护作用。面罩的防护效率参考核化生防护大辞典^[47]和呼吸防护自吸过滤式防毒面具(GB 2890—2022)^[48]中提到的防毒面具的防护性能,将其设置为95%。铅衣的防护效率参考李卓琳等^[49]和X射线防护服国家标准(GB 16757—1997)^[50]中提到的对于X射线的屏蔽效率,将其设置为90%。

3 结果分析

图4展示了2024年10月10日8:00的总剂量率,该时间为发生核武器爆炸后,开始路径规划的时间。以总剂量率结果结合实际路网信息进行路径规划,并且考虑了剂量随时间累积的情况。4个释放点由于地形的影响,周围区域的剂量差异明显,对于地形比较复杂的区域,烟羽扩散会受到山的阻挡,导致释放点周围的区域剂量较大。而地势较为平坦的区域,烟羽扩散区域更广,释放点周围区域的剂量相对较小。当发生核武器爆炸时,工作人员需要先前往附近的撤离点,再撤离到医疗点,在撤离点附近3 km的区域内需要以4 km/h的速度步行到附近的道路,然后乘车到达医疗点,车速根据道路的分级设定。

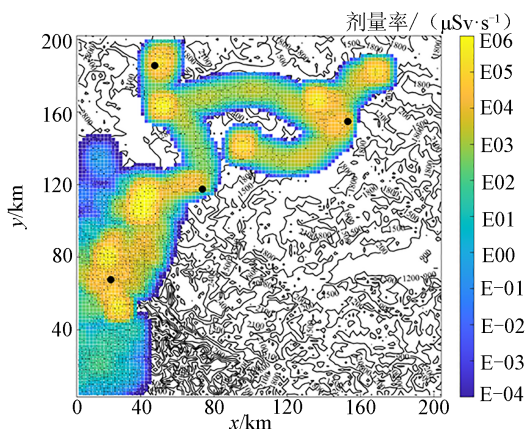


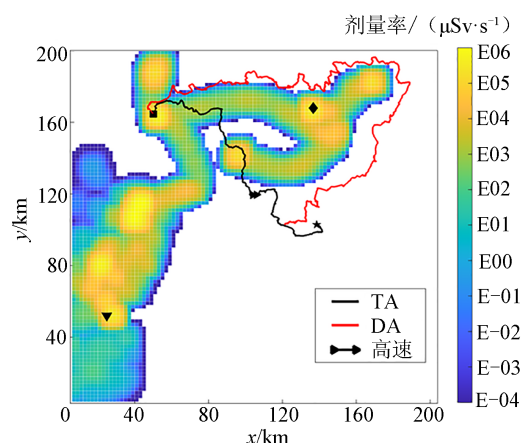
图4 2024年10月10日8:00总剂量率

Fig. 4 Total dose rate at 8:00 on October 10, 2024

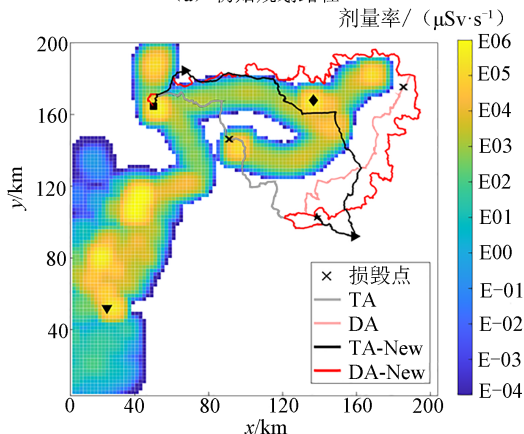
3.1 撤离点A至医疗点M的路径规划结果

图5(a)展示了撤离点A到医疗点M时间最短(TA)和剂量最小(DA)的路径,撤离点A位于高剂量区域的边缘位置。DA是绕行整个烟羽

的外围到达医疗点,TA则穿过剂量高的区域到达医疗点。图6(a)、(b)展示了TA和DA的通行时间和采取3种防护措施时的累积剂量,TA采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为113.68 mSv、96.89 mSv和10.48 mSv,通行时间为11 355.39 s。DA采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为89.64 mSv、76.16 mSv和8.25 mSv,通行时间为33 503.23 s。DA的通行时间约为TA的3倍,而TA中3种防护措施累积剂量都对应大于DA。因此,DA是通过牺牲通行时间达到剂量最小的目的,TA则以牺牲通行过程中吸收剂量大小达到通行时间最短的目的。DA中3种防护措施累积剂量在达到最大值之后会保持不变,因为此时路径位于烟羽的扩散范围之外,3种剂量都为零。TA中3种防护措施在累积剂量达到稳定后一段时间会再次上升,最后保持不变,是因为TA会穿过剂量为零的区域再次进入高剂量区域。



(a) 初始规划路径



(b) 重新规划路径

图5 撤离点A到医疗点M时间最短和剂量最小路径

Fig. 5 Paths with the shortest time and the minimum dose from evacuation point A to medical point M

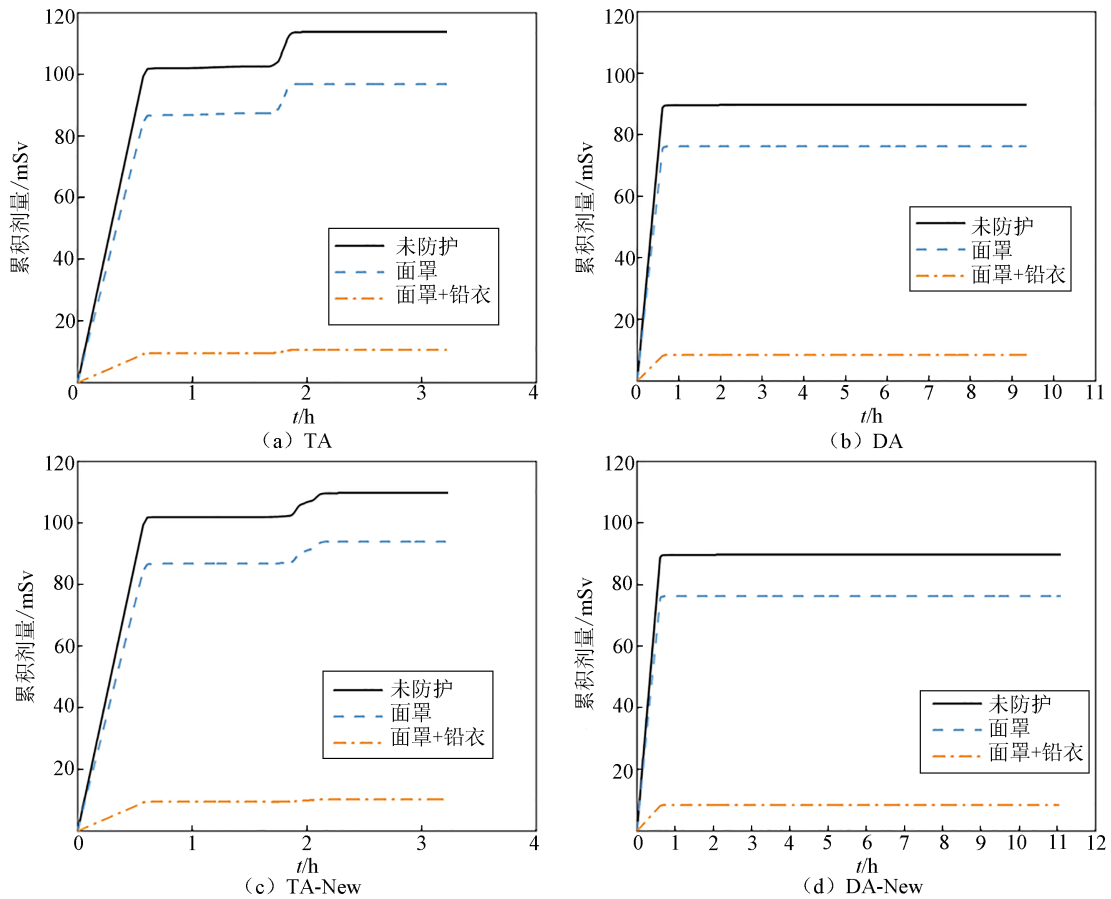


图6 撤离点A到医疗点M不同路径采取3种不同防护措施的累积剂量

Fig. 6 Cumulative doses of different paths from evacuation point A to medical point M with three different protective measures

在发生核武器爆炸后,及时地规划出剂量最小的路径,能确保工作人员撤离时吸收的剂量最小,而时间最短的路径,能确保人员生命受到严重威胁时,救援人员能够更快抵达,保证工作人员的生命安全。在应急撤离和救援的过程中采用外照射和内照射同时防护的方法,能够最大程度减少人员的受照剂量。

核武器爆炸后,人员在撤离过程中,还会受到普通炸弹的打击导致通行道路损毁。因此,在发生道路损毁后需要及时规划出最优的道路,图5(b)展示了发生道路损毁后,重新规划的时间最短(TA-New)和剂量最小(DA-New)的路径,损毁点的经纬度分别为(34.692°N, 106.086°E)(181, 173)和(34.433°N, 105.055°E)(87, 144)。其中,TA的损毁点在剂量较高的区域,DA的损毁点在剂量为零的区域。图6(c)、(d)展示了TA-New和DA-New的通行时间和采取3种防护措施时的累积剂量,TA-New采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为

109.65 mSv、93.90 mSv和10.14 mSv,通行时间为11 532.88 s。DA-New采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为89.64 mSv、76.16 mSv和8.25 mSv,通行时间为39 718.92 s。TA-New相对于TA通行的时间更长,但TA-New 3种防护措施下的累积剂量相对更小,因为TA-New的通行距离更长,且穿过有剂量区域的路段为高速行车段,而TA的高速行车段在剂量为零的区域,穿过有剂量区域的路段为中速行车段或低速行车段。因此,TA-New在有剂量区域停留的时间更短。DA-New的通行时间比DA更长,但DA-New的3种防护措施下的累积剂量与DA相等,因为DA的损毁点位于剂量为零的区域,并且损毁后重新规划的部分路径仍位于剂量为零的区域,因此,不会影响累积剂量的大小。TA-New和DA-New中均为采取面罩加铅衣的防护措施时累积剂量相对最小。

在发生核武器爆炸后,人员在通行过程中,当规划道路发生道路损毁或发生突发情况从而会影响

道路的通行时,重新规划出最优路径能够保证撤离和救援工作的顺利进行,防止救援和撤离时间的过度浪费,保证工作人员和救援人员的安全。

3.2 撤离点B至医疗点M的路径规划结果

图 7 (a) 展示了撤离点B到医疗点M时间最

短(TB)和剂量最小(DB)的路径,撤离点B位于高剂量区域的中心位置,DB绕行整个烟羽的外围到达医疗点,TB则穿过剂量高的区域。图 8 (a)、(b) 展示了TB和DB的通行时间和采取3种防护措施时的累积剂量,TB采取无防护、面罩防护和

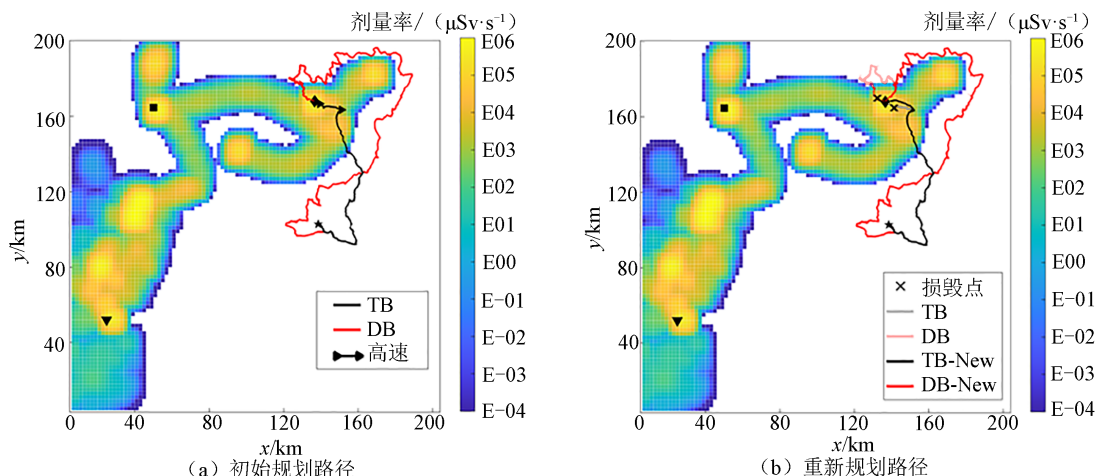


图 7 撤离点B到医疗点M时间最短和剂量最小路径

Fig. 7 Paths with the shortest time and the minimum dose from evacuation point B to medical point M

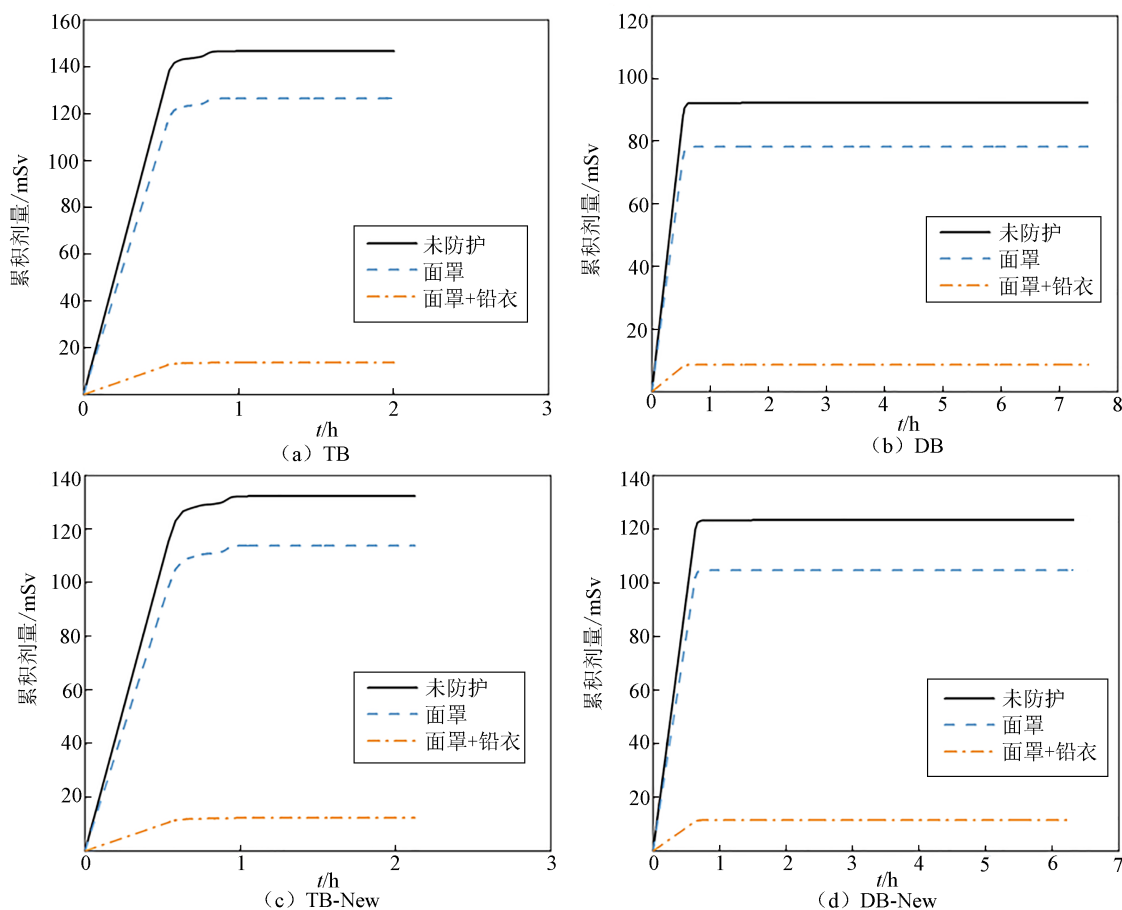


图 8 撤离点B到医疗点M不同路径采取3种不同防护措施的累积剂量

Fig. 8 Cumulative doses of different paths from evacuation point B to medical point M with three different protective measures

面罩加铅衣防护的累积剂量分别为 146.59 mSv、126.30 mSv 和 13.59 mSv, 通行时间为 7 012.06 s。DB 采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为 92.18 mSv、78.11 mSv 和 8.48 mSv, 通行时间为 26 965.99 s。DB 的通行时间大于 TB, 但 3 种防护措施累积剂量均对应小于 TB。

图 7 (b) 展示了道路损毁后, 重新规划的时间最短 (TB-New) 和剂量最小 (DB-New) 的路径, 损毁点的经纬度为 (34.646° N, 105.506° E) (128, 168) 和 (34.433° N, 105.055° E) (87, 144)。其中, TB 和 DB 的损毁点都位于剂量较高的区域。图 8 (c)、(d) 分别展示了 TB-New 和 DB-New 的通行时间以及采取 3 种防护措施时的累积剂量。TB-New 采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为 132.23 mSv、113.78 mSv 和 12.25 mSv, 通行时间为 7 435.85 s; DB-New 采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为 123.28 mSv、104.65 mSv 和 11.35 mSv, 通行时间为 22 771.72 s。TB-New 的通行时间大于 TB, 但累积剂量对应小于 TB, 是因为 TB 步行时的累积剂量为 133.92 mSv, 显著高于 TB-New 步行时的累积剂量 115.27 mSv。由于 TB 中因损毁不能通行的部分路径为高速行车段, 而 TB-New 这部分路段为低速或中速行车段, 因此, TB-New 乘车段的累积剂量大于 TB 乘车段。DB-New 的通行时间小于 DB, 但 DB-New 的累积剂量大于 DB, 是因为 DB-New 相比 DB 减少了部分道路的绕行, 但 DB-New 在烟羽中的停留时间更长。TA-New 和 DA-New 中采取面罩加铅衣的防护措施时累积剂量最小, 3 种防护措施的累积剂

量均在达到最大值之后保持不变。

3.3 撤离点 C 至医疗点 M 的路径规划结果

图 9 (a) 展示了撤离点 C 到医疗点 M 时间最短 (TC) 和剂量最小 (DC) 的路径。撤离点 C 位于地形复杂的区域, TC 和 DC 在烟羽中的路径几乎相同。图 10 (a)、(b) 展示了 TC 和 DC 的通行时间和采取不同防护措施时的累积剂量, TC 采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为 81.65 mSv、77.33 mSv 和 7.94 mSv, 通行时间为 12 614.19 s。DC 采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为 66.39 mSv、63.74 mSv 和 6.50 mSv, 通行时间为 20 046.91 s。DC 的通行时间大于 TC, 但 3 种防护措施的累积剂量均对应小于 TC。TC 和 DC 采取面罩加铅衣的防护措施的累积剂量最小, 并且 3 种防护措施的累积剂量在达到最大值之后保持不变。图 9 (b) 展示了发生道路损毁后, 重新规划的时间最短 (TC-New) 和剂量最小 (DC-New) 的路径, 损毁点的经纬度为 (33.687° N, 104.820° E) (65, 61) 和 (33.602° N, 105.511° E) (129, 52)。TC 和 DC 损毁点的位置都位于剂量为零的区域内。图 10 (c)、(d) 展示了 TC-New 和 DC-New 的通行时间和采取 3 种防护措施时的累积剂量。TC-New 采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为 81.65 mSv、77.33 mSv 和 7.94 mSv, 通行时间为 13 521.37 s。DC-New 采取无防护、面罩防护和面罩加铅衣防护的累积剂量分别为 66.39 mSv、63.74 mSv 和 6.50 mSv, 通行时间为 18 674.13 s。TC-New 和 DC-New 相较于 TC 和 DC 累积剂量没有发生变化, 是因为损毁点的位置

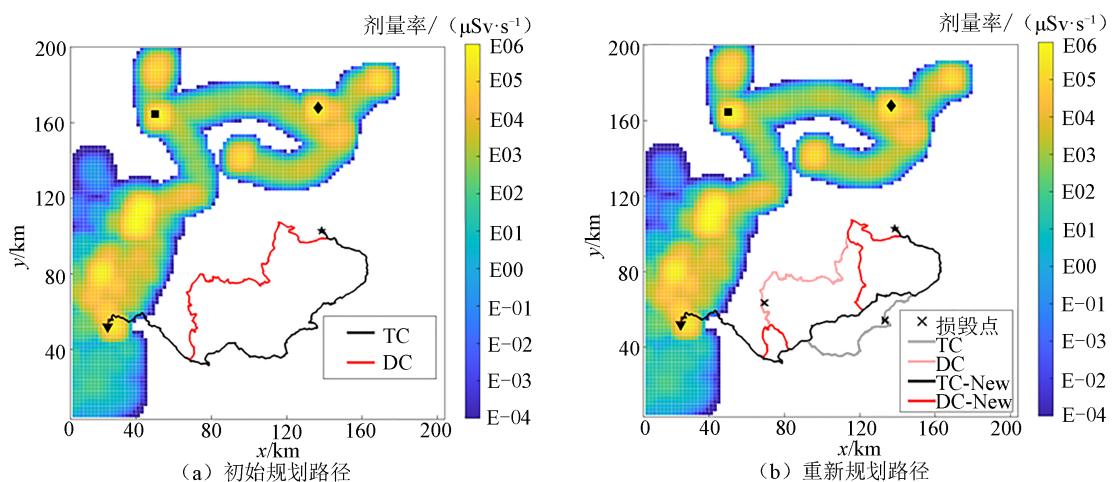


图 9 撤离点 C 到医疗点 M 时间最短和剂量最小路径

Fig. 9 Path with the shortest time and the minimum dose from evacuation point C to medical point M

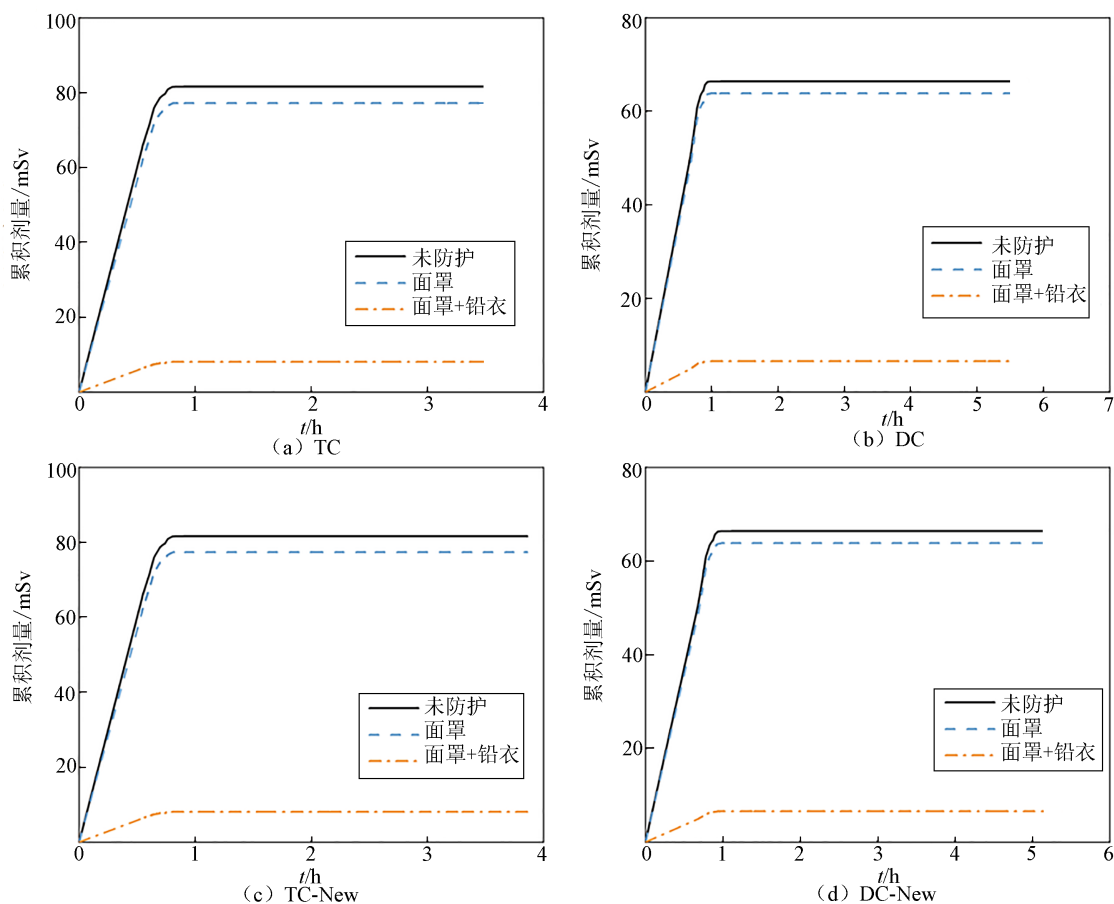


图 10 撤离点 C 到医疗点 M 不同路径采取 3 种不同防护措施的累积剂量

Fig. 10 Cumulative doses of different paths from evacuation point C to medical point M with three different protective measures

对通行过程中在烟羽中的停留时间没有影响。3 种防护措施的累积剂量均在达到最大值后保持不变。

4 结论

本文基于 A* 算法研究开发了适用于复杂地形场景的低当量核武器爆炸场景的路径规划模型。该方法能应用 WRF、CALMET、SPUFF 计算的不同时刻的扩散结果，并结合当地的路网信息，规划出时间最短和剂量最小的路径。为了验证该模型的有效性与可靠性，选取了 3 个不同区域的撤离点 A、B、C，开展了到医疗点 M 的路径规划，并假想了每条路线上发生道路损坏的位置。此外，在路径规划的过程中，还考虑了不同防护装备对路径上累积剂量的影响，主要结论如下。

1) 对于 3 个不同的撤离点，该算法都能规划出时间最短和剂量最小的路径。其中，时间最短的路径以通行时间最短为目的，剂量最小的路径

则绕行了整个烟羽的外围，以减少人员受到的辐射照射。当发生道路损坏后，该算法能够规划出时间最短和剂量最小的新路径。

2) 对于每一条路径，采取面罩加铅衣的防护措施累积剂量均为相对最小，相比未防护或单独佩戴面罩，分别减少了约 91% 和 89%。

参考文献

- [1] REN Y S, ZHANG G M, ZHENG J X, et al. An integrated solution for nuclear power plant on-site optimal evacuation path planning based on atmospheric dispersion and dose model[J]. Sustainability, 2024, 16(6): 2458.
- [2] 杨益, 李晓军, 王坤. B61-12 型制导核弹研发动态及特点分析[J]. 防护工程, 2018, 40(2): 67-71.
YANG Y, LI X J, WANG K. The research development and characters analyzing of B61-12 guided nuclear bomb[J]. Protective Engineering, 2018, 40(2): 67-71.

- [3] KRASNO J E, SZELI E. Banning the bomb: the treaty on the prohibition of nuclear weapons[M]. Colorado: Lynne Rienner Publishers, Inc., 2021: 4–5.
- [4] WESTING A H. Environmental consequences of nuclear warfare[J]. *Environmental Conservation*, 1982, 9(4): 269–272.
- [5] LITO M. Treaty on the prohibition of nuclear weapons[J]. *International Legal Materials*, 2018, 57(2): 347–357.
- [6] LIU L X, WANG X, YANG X, et al. Path planning techniques for mobile robots: review and prospect[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 227: 120254.
- [7] ALZALLOUM A Q. Application of shortest path algorithms to find paths of minimum radiation dose [D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010: 4–9.
- [8] LIU Y K, LI M K, XIE C L, et al. Path-planning research in radioactive environment based on particle swarm algorithm[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, 74: 184–192.
- [9] WANG Z, CAI J J. The path-planning in radioactive environment of nuclear facilities using an improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 326: 79–86.
- [10] XIE X W, TANG Z H, CAI J J. The multi-objective inspection path-planning in radioactive environment based on an improved ant colony optimization algorithm[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2022, 144: 104076.
- [11] 周怀芳, 张华, 霍建文, 等. 基于混合蚁群算法的核应急车辆疏散路径规划[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2023, 41(6): 67–80.
- ZHOU H F, ZHANG H, HUO J W, et al. Vehicle evacuation route planning in nuclear emergencies based on hybrid ant colony algorithm[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2023, 41(6): 67–80.
- [12] YAN J, ZHANG J M, CAO Q, et al. Research on simulation of emergency evacuation outside nuclear power plants based on genetic algorithm and variable neighborhood search algorithm[C / OL]. 2024 31st International Conference on Nuclear Engineering. (2024-08-04) [2025 -02-15]. <https://asmedigitalcollection.asme.org/ICONE/proceedings/ICONE31/88254/V005T05A014/1208125>.
- [13] TANG Z H, XIE X W, CAI J J, et al. An optimization method of multi-objective evacuation path for off-site emergency under severe nuclear accidents[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 174: 109170.
- [14] PEI Q Y, HAO L J, CHEN C H, et al. Minimum collective dose based optimal evacuation path-planning method under nuclear accidents[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 147: 107644.
- [15] XIAO D, LI J X, ZHANG Z X, et al. Optimization of personnel evacuation routes for sudden nuclear accidents based on hybrid genetic-grey wolf optimizer algorithm[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2025, 57(3): 103223.
- [16] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the advanced research WRF model version 4[J]. *National Center for Atmospheric Research*, 2019, 145: 550.
- [17] 费建芳, 王鹏飞, 程小平, 等. 日本大地震福岛核污染物扩散传输区域模拟研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(2): 271–282.
- [18] 王佳. WRF 模式在调节大气降水的数值试验研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008: 8.
- WANG J. Numerical experiment research of regulating the atmospheric precipitation by WRF model [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008: 8.
- [19] 李幻婷, 杨力, 宋嘉悦, 等. 四种气象数据在福岛核事故 ^{137}Cs 扩散模拟中的适用性[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(11): 6025–6035.
- LI H T, YANG L, SONG J Y, et al. Applicability of four types of meteorological data to Fukushima nuclear accident ^{137}Cs simulations[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(11): 6025–6035.
- [20] 唐智洪. 严重事故下放射性核素的大气环境扩散迁移与公众应急响应研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 22–23.
- TANG Z H. Atmospheric dispersion transport of radionuclides and public emergency response study under severe accidents[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022: 22–23.
- [21] 徐慧燕. “菲特”台风暴雨物理过程三维 WRF 模拟与定量分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 14–18.
- XU H Y. Quantitative analysis of physical process related to typhoon Fitow torrential rainfall: based on three-dimensional WRF model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 14–18.
- [22] SCIRE J S, ROBE F R, FERNAU M E, et al. A user's guide for the CALMET meteorological model[M]. USA: Earth Tech, Inc., 2000: 35–36.

- [23] LIU Y, LI H, SUN S D, et al. Enhanced air dispersion modelling at a typical Chinese nuclear power plant site: coupling RIMPUFF with two advanced diagnostic wind models[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, 175: 94-104.
- [24] 杨力, 王存友, 陈义学, 等. 四种拉格朗日粒子浓度计算方法的评估——箱式计数法、高斯核、均匀核和抛物线核[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(7): 3404-3415.
- YANG L, WANG C Y, CHEN Y X, et al. Evaluation of four Lagrangian particle concentration calculation methods-box counting, gaussian kernel, uniform kernel and parabolic kernel[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(7): 3404-3415.
- [25] 杨力, 张钰杰, 方晟, 等. 气态放射性核素扩散模拟研究——分裂烟团模型的验证与应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(12): 2019-2030.
- YANG L, ZHANG Y J, FANG S, et al. Research on the simulated dispersion of Gaseous radionuclides: validation and application for splitting puff dispersion model[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(12): 2019-2030.
- [26] YANG L, FANG S, ZHUANG S H, et al. Atmospheric ^{137}Cs dispersion following the Fukushima Daiichi nuclear accident: local-scale simulations using CALMET and LAPMOD[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, 195: 110137.
- [27] DONG X, ZHUANG S H, FANG S, et al. Site-targeted evaluation of SWIFT-RIMPUFF for local-scale air dispersion modeling around Sanmen nuclear power plant based on multi-scenario wind tunnel experiments[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 164: 108593.
- [28] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 核事故应急情况下公众受照剂量估算的模式和参数: GB/T 17982—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [29] 刘爽. 核设施事故排放气载放射性污染物扩散模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017: 28-32.
- LIU S. Simulation study on diffusion of airborne radioactive contaminants in nuclear accident[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017: 28-32.
- [30] MARTINS O O, ADEKUNLE A A, OLANIYAN O M, et al. An improved multi-objective A-star algorithm for path planning in a large workspace: design, implementation, and evaluation[J]. *Scientific African*, 2022, 15: e01068.
- [31] KURANT M, MARKOPOULOU A, THIRAN P. On the bias of BFS[EB/OL]. (2010-04-10) [2025-02-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1004.1729>.
- [32] JU C Y, LUO Q H, YAN X Z. Path planning using an improved A-star algorithm[C]//2020 11th International Conference on Prognostics and System Health Management. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 23-26.
- [33] 刘好. 基于优化Astar与MPC的自动驾驶车辆路径规划研究[D]. 南京: 东南大学, 2019: 17-19.
- LIU H. Research on autonomous vehicle path planning based on improved A* and MPC[D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 17-19.
- [34] OU Y Q, FAN Y X, ZHANG X L, et al. Improved A* path planning method based on the grid map[J]. *Sensors*, 2022, 22(16): 6198.
- [35] CHATZISAVVAS A, DOSSIS M, DASYGENIS M. Optimizing mobile robot navigation based on A-star algorithm for obstacle avoidance in smart agriculture[J]. *Electronics*, 2024, 13(11): 2057.
- [36] 朱建林. 自动驾驶中基于Astar算法的路径规划研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023: 8-10.
- ZHU J L. Research on path planning based on A-star algorithm in autopilot[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2023: 8-10.
- [37] CANDRA A, BUDIMAN M A, HARTANTO K. Dijkstra's and A-star in finding the shortest path: a tutorial[C]//2020 International Conference on Data Science, Artificial Intelligence, and Business Analytics (DATABIA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 28-32.
- [38] WANG R L, LU Z Z, JIN Y F, et al. Application of A* algorithm in intelligent vehicle path planning[J]. *Mathematical Models in Engineering*, 2022, 8(3): 82-90.
- [39] 柏鸿喜. 复杂场景中的多约束实时A-star路径规划算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023: 25-28.
- BAI H X. Research on real-time A-star path planning algorithm with multi-objective in complex scenarios[D]. Xi'an: Xidian University, 2023: 25-28.
- [40] 于家欢, 王海峰, 张晓峰. 核电厂场外应急洗消站选址方法与建设规范研究[J]. *核安全*, 2021, 20(5): 100-106.
- YU J H, WANG H F, ZHANG X F. Study on site selection method and construction specification of nuclear power plants off-site emergency decontamination station[J]. *Nuclear Safety*, 2021, 20(5): 100-106.
- [41] Geospatial Data Cloud site, Computer Network In-

- formation Center, Chinese Academy of Sciences. Terrain data [EB/OL]. (2015-08-15) [2024-11-18]. <http://www.gscloud.cn/sources/details/421?pid=302>.
- [42] European Space Agency (ESA). Global land cover maps [EB/OL]. (2009-06-15) [2024-11-18]. http://due.esrin.esa.int/page_glob-cover.php.
- [43] LI X P, SONG J Y, ZHANG Y J, et al. Adaptive center constraint for joint release rate estimation and model correction: multi-scenario validation against wind tunnel experiments[J]. Progress in Nuclear Energy, 2024, 177: 105413.
- [44] 国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [45] BURNETT J L, MILEY H S, MILBRATH B D. Radionuclide observables during the integrated field exercise of the comprehensive nuclear-test-ban treaty[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2016, 153: 195-200.
- [46] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准: JTG B01—2014[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [47] 杨永革.《核化生防护大辞典》出版发行[J]. 国防, 2000(6): 17.
- [48] 国家安全生产监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 呼吸防护 自吸过滤式防毒面具: GB 2890—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [49] 李卓琳, 牟文英, 丁玉梅. 医用防辐射服研究现状及发展趋势[J]. 中国塑料, 2022, 36(9): 193-201. LI Z L, MOU W Y, DING Y M. Research status and development trend of medical radiation protective clothing[J]. China Plastics, 2022, 36(9): 193-201.
- [50] 国家技术监督局. X射线防护服: GB 16757—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- (编辑: 于福兴)