

中文引用格式:杨倩,王飞跃,马波,等. 基于城市洪涝灾害应急救援的多主体协同仿真[J]. 中国安全科学学报,2025,35(6):165-173.
英文引用格式:YANG Qian, WANG Feiyue, MA Bo, et al. Multi-agent cooperation simulation for urban flood disaster emergency rescue[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 165-173.

基于城市洪涝灾害应急救援的多主体 协同仿真*

杨倩, 王飞跃**教授, 马波, 卢佳节, 王籽幻
(中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075)

中图分类号:X915.5 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1163
资助项目:湖南省自然科学基金面上项目资助(2025JJ50265);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助(kfj220402);中南大学研究生自主探索创新项目(2024ZZTS0476)。

【摘要】 为提高应急救援多主体协同绩效,针对城市洪涝灾害事件,梳理4种救援主体的网络关系和内部关联;结合多智能体理论,构建多主体交互协作框架;设计城市洪涝灾害应急救援多主体协同仿真模型,研究不同受灾情景下获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间的变化情况。结果表明:受灾程度、搜救范围、主导型救援主体能力值和主力型救援主体数量是影响救援协作水平的重要因素,增强主体搜救范围、提高主导型救援主体能力和加大主力型救援主体的投入有助于提升灾害应急救援的协同能力,受灾者获救比例升高。分析模型的鲁棒性和敏感性表明:合作范围对获救受灾者人数影响较小,搜救范围对获救受灾者人数和总救援时间存在显著的影响;主导型救援主体能力值和主力型救援主体数量2个参数都存在临界值,当超出临界值之后,救援效果将会趋于平稳。
【关键词】 城市洪涝灾害; 应急救援; 多主体协同; 多智能体理论; 救援效率

Multi-agent cooperation simulation for urban flood disaster emergency rescue

YANG Qian, WANG Feiyue, MA Bo, LU Jiajie, WANG Zihuan

(Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University,
Changsha Hunan 410075, China)

Abstract: In order to improve the coordination performance of multi-agents in emergency rescue, the network relationship and internal correlation of four agents were sorted out for urban flood disaster events. Combined with the multi-agent theory, the multi-agent interaction and cooperation framework was built. The multi-agent cooperative simulation model for urban flood disaster emergency rescue was designed. The changes in the number of rescued victims, average rescue time and total rescue time under different disaster scenarios were studied. Results show that the extent of the disaster, the scope of search, the ability of the dominant rescuer and the number of main rescuer are important factors influencing the level of rescue collaboration. Enhancing the scope of search, improving the ability of the dominant rescuer and increasing the investment of the main rescuer contribute to the improvement of the synergistic capacity of disaster emergency response, and the proportion of those affected by disasters who are rescued rises. The

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0165-09; 收稿日期:2025-02-14; 修稿日期:2025-04-14

** 通信作者:王飞跃(1977—),男,重庆人,博士,教授,主要从事城市公共安全与应急管理方面的研究。E-mail:wfy@csu.edu.cn。

robustness analysis shows that the scope of cooperation has a small effect on the number of rescued victims, and the scope of search has a significant effect on the number of rescued victims and the total rescue time. The sensitivity analysis shows that the ability of the dominant rescuer and the number of main rescuer both have a critical value. Once these the critical values are exceeded, the rescue effect will tend to be stabilized.

Keywords: urban flood disaster; emergency rescue; multi-agent cooperation; multi-agent theory; rescue efficiency

0 引言

近年来,全球气候变化和城市快速扩张,严重影响城市水文生态环境和对雨水的自然调蓄,城市洪涝灾害发生的频率和强度不断加大^[1-2]。据国家应急管理部发布 2023 年全国自然灾害基本情况,我国共发生 35 次区域性暴雨过程,全年洪涝灾害共造成 5 278.9 万人次不同程度受灾,因灾死亡失踪 309 人,洪涝灾害已成为威胁城市安全运行的主要问题^[3]。城市洪涝灾害应急救援是一项复杂的系统工程,具有持续时间长、救灾规模大、参战力量多等特点,呈现出多阶段、多主体特征^[4]。在应急救援活动中,多主体间的协同合作直接影响救援效率和质量^[5]。然而,近年来我国城市洪涝灾害的应急处置处置暴露出我国应急管理存在“碎片化”问题,如在“7·20”郑州暴雨灾害中,缺少统一指挥领导和有效组织动员^[6],救援主体差异化程度高,活动发展演化具有动态性、复杂性和多元性,导致多主体间的合作协同效应不佳,救援效率低下。因此,提高应急救援多主体间的合作协同效应和救援效率成为当前亟待解决的关键问题^[7]。

针对应急救援多主体协同问题,国内外学者进行了一些初步的研究。平健^[8]基于社会网络分析方法研究了组织间的合作关系,并建立了应急组织合作关系模型;LI Wen 等^[9]利用系统动力学方法分析了城市暴雨洪涝灾害下多主体应对的行为机制,并提出 6 种发展情景预测洪水韧性。多智能体理论能准确模拟多主体间的复杂交互关系,为研究城市洪涝灾害应急救援多主体协同提供有效的方法。赵金龙等^[10]针对公路危化品泄漏事故,构建了基于多智能体理论的应急协同救援框架,对比分析了无协同、局部协同和全局协同 3 种应急调度方案;EDRISSI 等^[11]通过多智能体优化探究了参与灾害管理机构之间的联系;BALL 等^[12]从多智能体角度建立了多主体协同决策体系。目前,针对应急救援多主体问题大多为定性研究,停留在理论分析层面,

未将灾害特征与主体作用关系相连接,缺少城市洪涝灾害背景下多主体仿真模拟的专项研究。

鉴于此,笔者梳理分析了城市洪涝灾害事件下应急救援主体的网络关系,考虑实际救援场景,构建多智能体应急救援仿真模型,模拟城市洪涝灾害场景下的应急救援过程。分析模型的鲁棒性和敏感性,以验证模型的可行性和合理性。以期城市洪涝灾害应急救援策略的制定、资源的合理配置和多主体间协同效率的提高提供科学依据和决策支撑。

1 多主体关系分析

通过新华社、人民网和中国新闻网等主流媒体平台收集分析“7·20”郑州暴雨灾害应急救援的新闻报道,整理参与应急救援的主体网络关系。参照文献^[8,13],将城市洪涝灾害应急救援参与主体细分为主导型救援主体、主力型救援主体、辅助型救援主体和新闻媒体 4 大类。政府主体由于其强大的管理约束力在灾后应急响应中处于核心地位,属于主导型救援主体,包括国家应急指挥单位、地方政府等。主力型救援主体是坚持在救灾一线的救援主力军,包括由政府组织管理的医疗组织、消防队伍、军队、武警等。辅助型救援主体可补充救援力量,包括必需品提供方及非营利组织等。新闻媒体不直接参与应急救援活动,但可通过舆论手段引导公众,影响公众情绪。

4 类主体的作用关系如图 1 所示。主导型救援主体对其他 3 类主体有绝对的领导权,其他 3 类主体会向主导型救援主体进行反馈,保障应急救援行动的有效开展。当主力型救援主体力量不足时,辅助型救援主体通过需求反馈会为主力型救援主体提供帮助并进行服务反馈,2 个正负向反馈促进了应急救援行动的多主体高效协同^[14]。而新闻媒体一方面为救援主体传递消息,另一方面也受主导型救援主体的领导,主力型救援主体和辅助型救援主体为其维持秩序。4 类主体都不同程度地参与了整个应急救援行动,作用于救援任务对象,再从救援时间

和获救人数体现其救援效率。

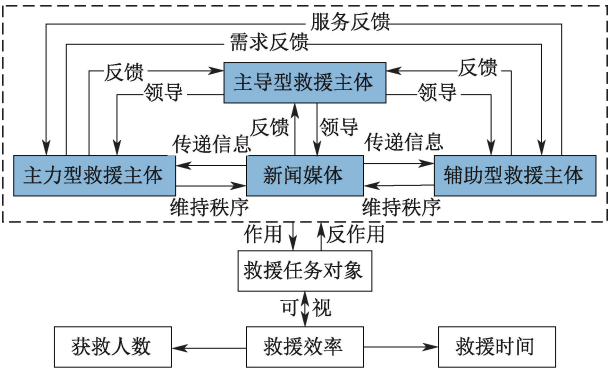


图1 应急救援主体关系

Fig. 1 Relationship diagram of emergency response subjects

2 多主体协同仿真模型

2.1 多主体交互协作框架

运用多智能体理论对救援现场中涉及的救援主体、受灾者和受灾环境等进行多主体建模,构建多主体交互协作框架,如图2所示。在该框架中,将受灾环境划分为具有积水或坍塌等现象的危险区域、转移安置灾民的安置点区域和正常区域。救援主体主要包括主导型、主力型和辅助型3类参与应急响应的救援主体和新闻媒体,受灾者主体表示困在危险区域内的受灾群众。在应急救援行动中,救援主体和受灾者主体都处于受灾环境内,彼此交互产生影响。

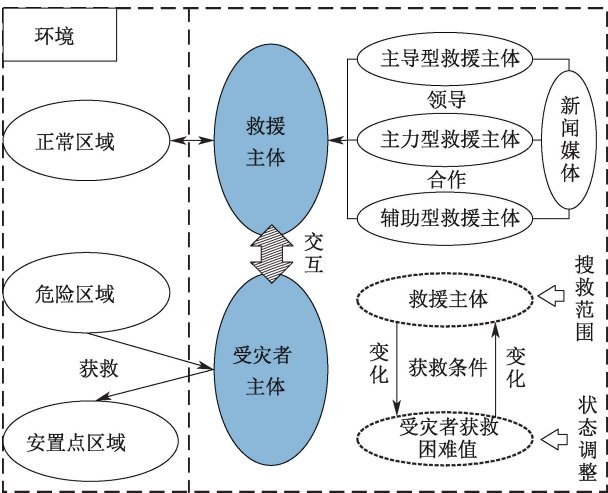


图2 多主体交互协作框架

Fig. 2 Multi-subject interaction framework

2.2 多主体协同仿真模型研究假设

1) 将受灾环境划分为 100×100 的网格区域,定义 2 个危险区域和 1 个安置点区域,区域间不互相

重合,并相距一定距离。

2) 主力型救援主体和辅助型救援主体直接实施救援,其他救援主体通过影响救援效率间接参与救援。

3) 主力型救援主体和辅助型救援主体在受灾环境平面位置内随机分布,以一定搜救范围同一时间开展救援行动。受灾者在危险区域平面位置随机分布,不具备移动属性。

2.3 受灾者属性

受灾者是指身处危险区域内不能互相营救、自救、只能等待救援的受灾群众。受灾者获救难度值代表受灾者此时生命体征和救援难度,根据获救难度值大小划分为容易获救的受灾者(60~40)、较容易获救的受灾者(80~60)和不容易获救的受灾者(100~80)。当受灾者获救难度为 100 时,代表受灾者已经死亡。当受灾者获救难度为 0 时,则表示受灾者已成功转移至安置点区域,不需要施救。区域内受灾者获救难度值的分布比例随受灾程度的不同而发生变化,见表 1。

表1 受灾者获救难度 d 与受灾程度 D 的关系

Table 1 Relationship between d and D %			
受灾者获救难度	100~80	80~60	60~40
重度受灾	70	20	10
中度受灾	10	70	20
轻度受灾	10	20	10

2.4 交互规则

2.4.1 应急救援主体间交互规则

救援场景中直接实施救援的为主力型救援主体和辅助型救援主体,而主导型救援主体和新闻媒体不参与直接救援行动,但会在一定程度上影响救援效率。新闻媒体作为信息传播的媒介,与模型系统的循环步数相关,将其设定为 1。参照文献[15],应急救援主体间仿真交互机制如图3所示。下式表示形成合作救援队伍后,合作救援队伍能力值和搜救范围的变化:

b₃ = b₁ + b₂ (1)

r₃ = r₁ + r₂ (2)

式中:b₁、b₂和 b₃ 分别为主力型、辅助型救援主体和合作救援队伍能力值;r₁、r₂和 r₃ 分别表示主力型、辅助型救援主体和合作救援队伍搜救范围。开启合作策略的约束条件,下式表示主导型救援主体能力值必须大于等于 30,能够较好地协调其他主体:

s. t. b_g ≥ 30 (3)

式中 b_g 为主导型能力值。下式指主力型救援主体和辅助型救援主体之间的距离必须在合作范围之内。

下式表示主力型救援主体和辅助型救援主体能力值必须大于 0,能正常开展救援:

$$b_1 > 0 \tag{4}$$

$$b_2 > 0 \tag{5}$$

$$|X_1 - X_2| \leq s \tag{6}$$

$$|Y_1 - Y_2| \leq s \tag{7}$$

式中: X_1 和 Y_1 、 X_2 和 Y_2 分别为主力型救援主体和辅助型救援主体空间位置的横纵坐标; s 为主力型救援主体和辅助型救援主体的合作范围。

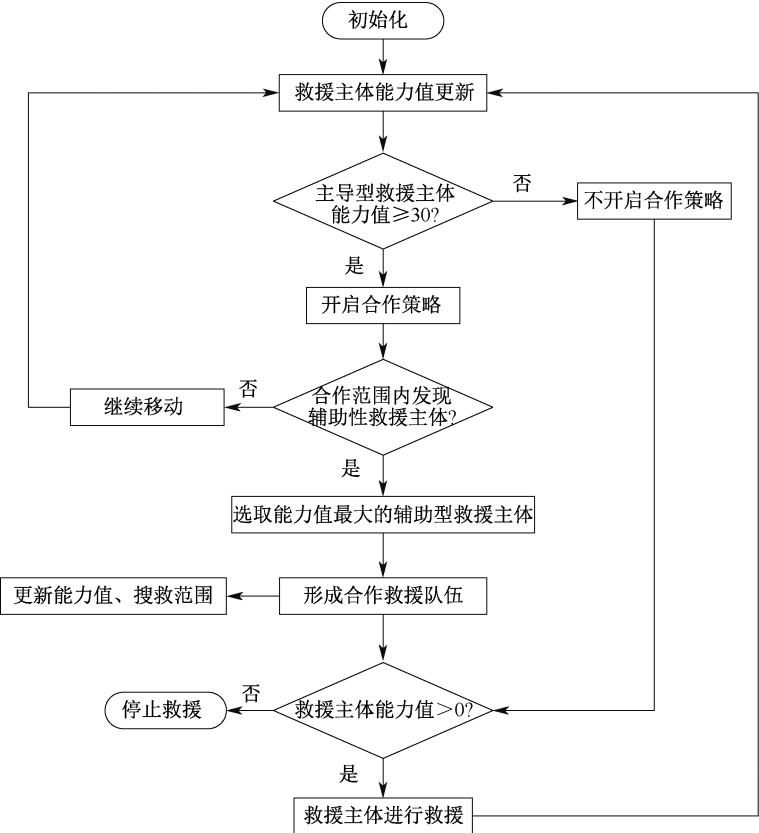


图 3 救援主体之间的仿真交互机制

Fig. 3 Simulation interaction mechanism between rescue subjects

2. 4. 2 救援主体与受灾者间交互规则

救援活动中,救援主体和合作救援队伍以搜救范围为主要移动依据。当在搜救范围内发现受灾者时,朝距离最近的受灾者方向移动进行施救。参照文献[7],救援主体与受灾者的仿真交互机制如图 4 所示。下式表示实施救援后,受灾者获救难度和救援主体能力值的变化:

$$d = 0 \tag{8}$$

$$b_e = b_e - 0.1 \tag{9}$$

式中: d 为受灾者获救难度值; b_e 为能力值的统称。救援主体对受灾者实施救援的约束条件如下:下式表示受灾者获救难度必须大于 0 小于 100,需要被救援:

$$s. \ t. \quad 100 > d > 0 \tag{10}$$

下式表示救援主体能力值大于受灾者获救难

度,救援主体具备实施救援的能力:

$$b_e > d \tag{11}$$

下式表示救援主体与受灾者之间的距离在救援主体搜救范围之内:

$$|X_0 - X_3| \leq b_e \tag{12}$$

$$|Y_0 - Y_3| \leq b_e \tag{13}$$

式中: X_0 和 Y_0 分别为受灾者空间位置的横纵坐标; X_3 和 Y_3 为合作救援队伍空间位置横纵坐标的统称。

3 多智能体应急救援仿真试验

3.1 问题描述

已知某地区发生洪涝灾害,大量群众被困,需要采取有效应急救援行动转移安置受灾群众。重点关注危险区域受灾程度、合作范围、搜救范围、主导型救援主体能力值和主力型救援主体数量对主体间协

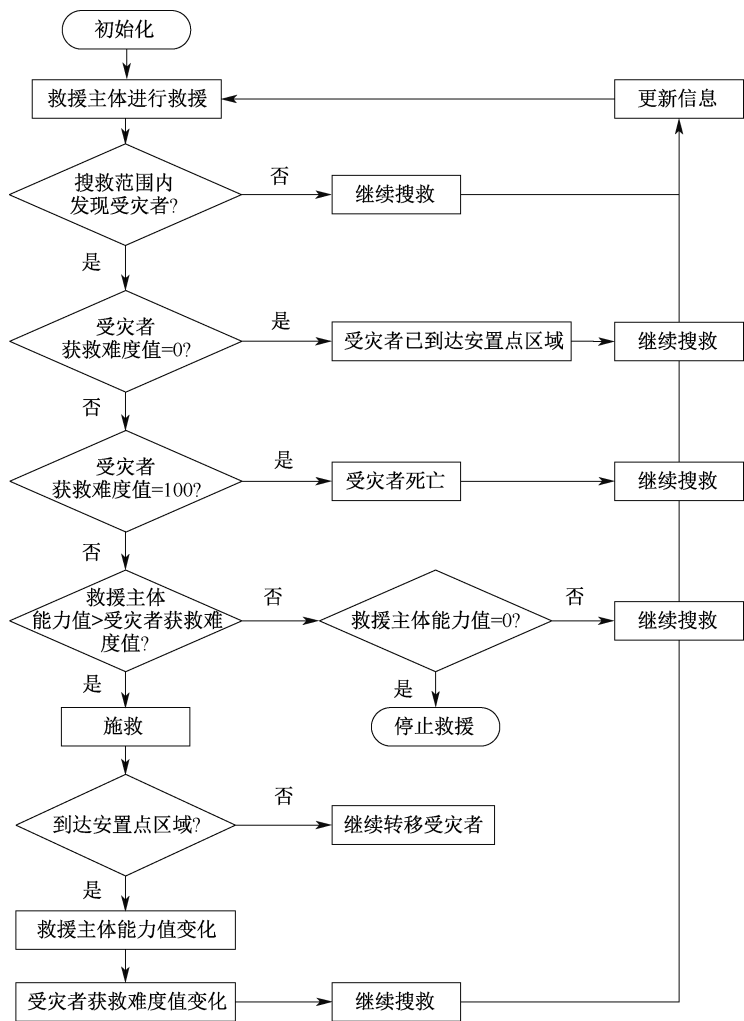


图 4 救援主体与受灾者的仿真交互机制

Fig. 4 Simulation interaction mechanism between rescue subjects and disaster victims

同救援的影响,协同绩效通过获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间体现。

3.2 参数设定

为充分体现应急救援过程,参照文献[7,14],假设以少救多的情景。采用 Netlogo 平台仿真城市洪涝灾害应急救援活动,初始参数见表 2。

表 2 仿真初始参数

Table 2 Initial parameters for simulation			
参数	初始值	参数	初始值
n_3	100	b_1	60
n_2	30	b_2	40
n_1	10	b_g	30
d	40~100	D	轻度
s	6	I	开启
r_1	20	r_2	15

注: n_1 、 n_2 、 n_3 分别为主力型、辅助型救援主体和受灾者数量。 D 表示受灾程度; I 表示是否开启合作策略。

3.3 仿真结果分析

3.3.1 不同受灾程度场景分析

在 3 种不同受灾程度的救援场景下,以获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间为救援效率指标,得到受灾程度与救援效率指标的关系,如图 5 所示。当救援场景属于轻度受灾时,最后稳定的平均救援时间达到 38.3 min,整个过程可从危险区域救出 69%的受灾者。由于救援人数的增加,其总救援时间相比于中度受灾和重度受灾大幅度提高。中度受灾时,由于受灾者的获救难度大部分依然集中在 80 以下,获救受灾者人数的变化幅度不大,对救援活动的影响稍小。但当处于重度受灾时,获救受灾者人数稳定时间提前,且被成功救助的受灾者比例减小,最后只能达到 47%,并且平均救援时间更慢。随着救援场景中受灾程度的加深,救援主体间的协同难度加大,受灾程度对救援效率产生负面影

响,其中,受灾程度为重度时,对获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间的影响最大。因此,在实际救援工作中应高度重视重度受灾情况,提前做好充分的救援准备和资源调配。

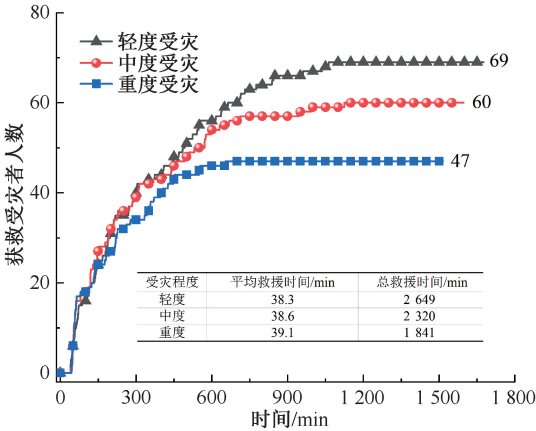


图5 受灾程度与获救受灾者人数、平均救援时间的关系
Fig. 5 Relationship between degree of disaster, number of rescued victims and average rescue time

3.3.2 不同合作范围场景分析

由于洪涝灾害发生的突发性、破坏性和救援主体间的差异性,当出现夜晚救援、通信中断等极端情况时,救援主体合作范围的减少是不可避免的。合作范围对合作时间和获救受灾者的影响如图6所示。图中以合作范围为自变量,从2~10以0.5的间距递增,一共开展17轮仿真模拟,每轮重复100次,取平均值。所有辅助型救援主体开启合作的时间和获救受灾者人数作为因变量,探究模型中不同合作范围场景下合作时间和救援效率的变化情况。当其他参数不变时,合作范围的增加会促进救援主体在较短时间内迅速开启合作策略,合作时间随合作范围的增加而不断减小,尤其在合作范围增加至3.5时,其减小幅度最大,而不同合作范围场景下的获救受灾者人数变化波动不大。这是因为救援队伍随着合作范围的扩大,可及时获取更远处的支援信息,迅速开展合作行动。但灾害发生具有复杂性和不确定性,受灾区域的救援难度可能并不会由于合作范围的增加而显著降低。说明合作范围的增加直接显著影响开启合作策略时间,但对整个应急救援行动最后的获救人数影响较小。

3.3.3 不同搜救范围场景分析

救援队伍的搜救范围不仅取决于受灾区域环境和受灾程度,还受救援时间和物资设备供给的影响,其具有动态变化性。搜救范围对获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间的影响如图7所示。图

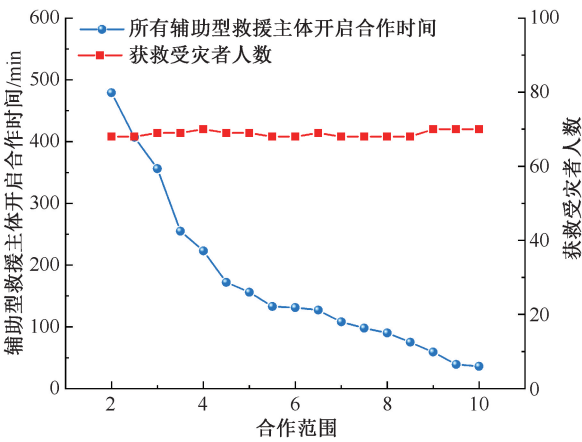


图6 合作范围对合作时间和获救受灾者人数的影响
Fig. 6 Impact of scope of cooperation on duration of cooperation and number of victims rescued

中以搜救范围为自变量,从5~40以5的间距递增,一共开展8轮仿真模拟,每轮重复100次,取平均值。获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间为因变量,探究不同搜救范围场景下救援效率的变化情况。当搜救范围较小时,可能由于救援主体很难精确定位受灾者位置,施救困难,获救受灾者人数和总救援时间较低,平均救援时间波动较大。随搜救范围的增加,获救受灾者人数和总救援时间呈现出相同的发展趋势,先迅速增加后趋于平稳。搜救范围大于30时,救援行动圆满完成,受灾者获救比例达到100%,救援效率指标保持稳定。搜救范围的扩大使更多救援主体和资源可以参与救援,增加救援主体与受灾者接触的机会,从而提高救援效率。但搜救范围存在极限点,当扩大到一定程度后,搜救范围将不再影响各救援效率指标,可能是因为大部分容易救援的受灾者已经成功获救,而少部分未获救的受灾者往往处于更加危险或难以到达的位置,救援难度加大,不会因为搜救范围的扩大而出现显著变化。

3.3.4 不同主导型救援主体能力值场景分析

主导型救援主体虽不直接参与应急救援活动,但能够影响其他救援主体,发挥整体规划协调作用。主导型救援主体能力值对救援效率的影响如图8所示。图中主导型救援主体能力值从0~100以10的间距递增,一共开展11轮仿真模拟,每轮重复100次,取平均值。由于每次仿真模拟的受灾者和救援主体位置随机分布,救援主体对灾情了解不充分,救援行动存在一定的盲目性,平均救援时间波动性较大。由图8可知:主导型救援主体能力值对平均救援时间影响较小。而获救受灾者人数和总救援

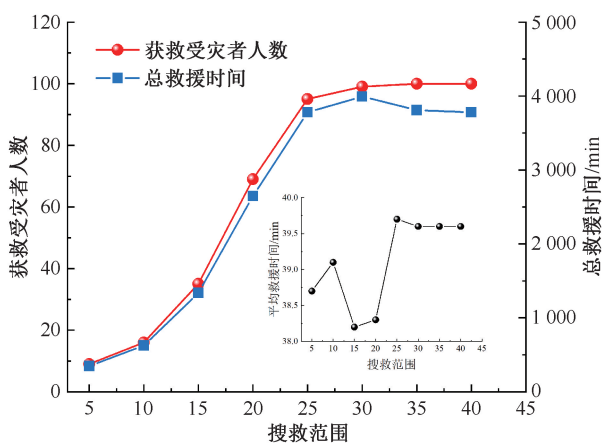


图 7 搜救范围对获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间的影响

Fig. 7 Impact of rescue scope on number of rescued victims, average rescue time and total rescue time

时间先随着主导型救援主体能力值的增加而提高,当主导型救援主体能力值到达 30 时,开启合作策略,救援主体之间的协同作用得到大幅提升。持续增加主导型救援主体能力值,获救受灾者人数和总救援时间增长逐渐平稳,变化幅度较小,表明救援主体之间已基本全部形成合作,新增的合作行为减少,对救援效率指标影响较小。

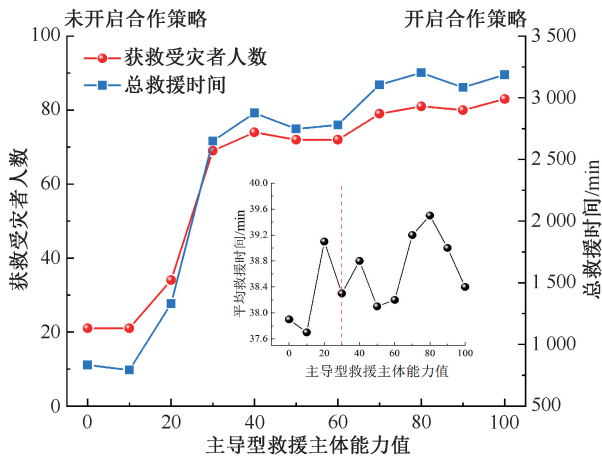


图 8 主导型救援主体能力值对获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间的影响

Fig. 8 Influence of the ability value of leading rescuer on number of rescued victims, average rescue time and total rescue time

3.3.5 不同主力型救援主体数量场景分析

在应急救援行动中,主力型救援主体往往奋战在救灾一线,对救援效率起重要作用。主力型救援主体数量对救援效率的影响如图 9 所示。图中主力型救援主体数量从 10~100 以 10 的间距递增,一共

开展 10 轮仿真模拟,每轮重复 100 次,取平均值。由图 10 可知:主力型救援主体数量与平均救援时间关联度较小,而获救受灾者人数和总救援时间先随着主力型救援主体数量的增加而增加,主力型救援主体数量达到 60 时,两者变化幅度降低,趋于稳定。主力型救援主体数量在一定程度上影响整个救援行动的效率质量,当主力型救援主体过少时,受灾区域内的救援力量不足,且与辅助型救援主体间的协同合作减弱,获救的受灾者比例较小。当主力型救援主体数量逐渐增加后,在一定合作范围内,增加开启合作策略的机会,缩短了主体间形成合作救援队伍的时间,救援效率指标得到提升。

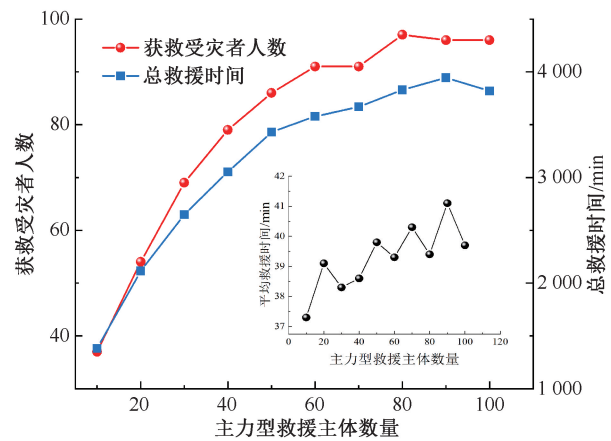


图 9 主力型救援主体数量对获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间的影响

Fig. 9 Influence of number of main rescuers on number of rescued victims, average rescue time and total rescue time

4 模型鲁棒性和敏感性评价

4.1 鲁棒性分析

鲁棒性分析是评估模型在面对可能出现的不利情况或干扰时可靠性和适应性的一种方法。当改变模型的一些初始参数,进行多轮仿真试验,可通过线性回归斜率公式评价模型的鲁棒性^[16]:

$$y = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i) (E_i - \bar{E}_i)}{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (14)$$

式中: y 为鲁棒性分析指标值; x_i 为模型初始设定的参数,如合作范围和搜索范围等; $\bar{x}_i$ 为选取参数的平均值; E_i 为此时的救援效率指标,如获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间等; $\bar{E}_i$ 为救援效率指标的平均值。

鲁棒性分析主要选取研究参数为合作范围和搜救范围。当改变合作范围时,救援主体合作时间的鲁棒性分析指标为 -47.3 ,相伴概率为 8.89×10^{-6} ,说明模型中合作时间在合作范围的变化下受到显著影响。通常由于洪涝灾害发生后出现的供电中断、通信网络中断、公共交通中断的“三断”现象,救援活动初期救援主体无法获取充足的灾情信息,主体间的协同合作受到影响,合作范围减小,那么形成合作救援队伍的时间会延长。图6中,获救受灾者人数一直维持在70左右,其鲁棒性分析指标值为 0.09 ,不显著,持续增加合作范围对救援效率指标的影响较小,救援效果相对稳定。当改变搜救范围时,获救受灾者人数和总救援时间的鲁棒性指标值为 0.12 和 4.77 ,且在 0.01 的显著水平下是显著的,说明搜救范围的增加对获救受灾者人数和总救援时间起到正向影响,但当搜救范围增加到一个临界值时,救援效果将会保持稳定。

4.2 敏感性分析

敏感性分析是评估模型输出结果对输入参数变化敏感程度的一种方法。多主体仿真模型中选取参数的变化会对救援效率指标产生影响,分析敏感性的主要研究参数为主导型救援主体能力值和主力型救援主体数量。主导型救援主体能力值、主力型救援主体数量与获救受灾者人数的关系如图10和图11所示。由图10可知:主导型救援主体能力值与获救受灾者人数之间的函数关系图呈现出一个logistic函数曲线,决定系数 R^2 达到 0.98133 ,拟合效果较好。表明在救援行动中,主导型救援主体虽不直接参与救援,但其对主力型救援主体和辅助型

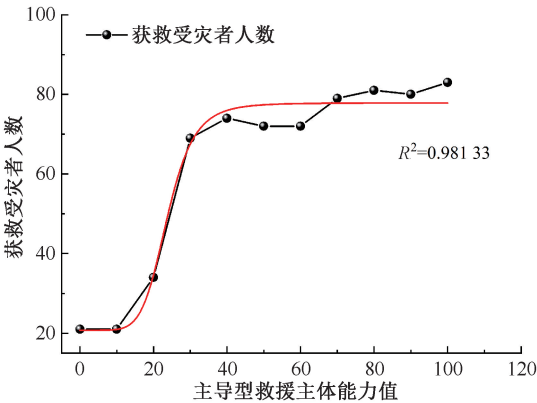


图10 主导型救援主体能力值与获救受灾者人数的关系

Fig. 10 Relationship between ability value of leading rescuer and number of rescued victims

救援主体的协同合作起到至关重要的作用,要充分发挥主导型救援主体的协调效应,提高救援过程整体协作的高效性。由图11可知:主力型救援主体数量与获救受灾者人数之间的函数关系呈现出一个二次曲线的形状,决定系数 R^2 达到 0.94428 ,拟合效果较好。表明在合作救援过程中,投入越多的主力型救援主体参与救援,会加大主体间协同合作的可能性,增强救援队伍的整体合力,实现最佳的救援效果,但投入的数量存在一个临界值,临界值之后救援效果就会趋于稳定。

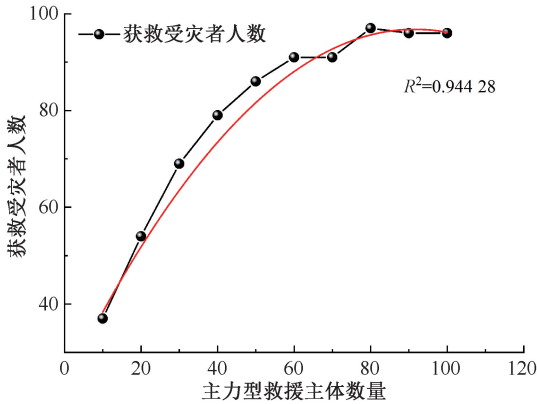


图11 主力型救援主体数量与获救受灾者人数的关系
Fig. 11 Relationship between number of main rescues and the number of rescued victims

5 结论

1) 通过系统梳理救援主体网络关系,明确4大类型救援主体及其之间的作用关系,为探究应急救援多主体协同机制提供基础。设计构建城市洪涝灾害多主体仿真模型,系统模拟了应急救援过程。

2) 基于多智能体理论的应急救援仿真模拟,发现受灾程度对救援效率影响显著,当受灾程度为重度时,对获救受灾者人数、平均救援时间和总救援时间的影响最大。极端情况下,合作范围的变化对获救受灾者人数影响较小,而搜救范围变化对获救受灾者人数和总救援时间有正向作用。主导型救援主体能力值、主力型救援主体数量分别与获救受灾者人数存在logistic函数关系和二次函数关系,存在一个临界值。

3) 城市洪涝灾害呈现复杂性、连锁型和突发性,发展特点与周围环境直接相关,不同灾害情景涉及不同受灾区域和救援主体,上述模型选取的参数会因不同灾害场景存在差异。在未来的研究工作中,需要注重收集救援案例的实际数据校正模型参数,提高模型的合理性和适用性。

参 考 文 献

- [1] LIAO Xinli, XU Wei, ZHANG Junlin, et al. Analysis of affected population vulnerability to rainstorms and its induced floods at county level: a case study of Zhejiang Province, China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 75: DOI:10.1016/j.ijdrr.2022.102976.
- [2] 宋英华, 韩保帅, 郭晨. 考虑洪涝灾害风险的县域应急避难场所选址模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4):191-198.
SONG Yinghua, HAN Baoshuai, GUO Chen. Location selection model of emergency shelter considering risk of flood disaster in county[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4):191-198.
- [3] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布 2023 年全年自然灾害基本情况[EB/OL]. (2024-01-20). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475697.shtml.
- [4] LI Lele, CHAO Jinlong, ZHAO Deyi, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of rainstorm and risk assessment of rainstorm disasters in Shanxi province from 1957 to 2019[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5):689-699.
- [5] LI Wen, JIANG Rengui, WU Hao, et al. A new two-stage emergency material distribution framework for urban rainstorm and flood disasters to promote the SDGs [J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 114: DOI: 10.1016/j.scs.2024.105645.
- [6] 中华人民共和国应急管理部. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[EB/OL]. (2022-01-21). <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/202201/P020220121639049697767.pdf>.
- [7] 唐健, 郭海湘, 龚承柱, 等. 基于拍卖机制的灾害多主体合作搜救仿真研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(1): 180-190.
TANG Jian, GUO Haixiang, GONG Chengzhu, et al. Simulation research of disaster multi-agent cooperative search and rescue based on auction mechanism[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(1):180-190.
- [8] 平健. 基于 Netlogo 的政府应急组织合作关系演化趋势仿真研究[J]. 软科学, 2018, 32(2):124-129.
PING Jian. The simulation research of cooperation evolution trend between government emergency organizations based on Netlogo[J]. Soft Science, 2018, 32(2):124-129.
- [9] LI Wen, JIANG Rengui, WU Hao, et al. A system dynamics model of urban rainstorm and flood resilience to achieve the sustainable development goals[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 96:DOI:10.1016/j.scs.2023.104631.
- [10] 赵金龙, 袁杰, 赵荣华, 等. 危化品公路泄漏多主体应急协同调度系统[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(8): 116-121.
ZHAO Jinlong, YUAN Jie, ZHAO Ronghua, et al. Multi-Agent emergency cooperative dispatching system for dangerous chemicals leakage on highways[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(8):116-121.
- [11] EDRISSI A, POORZAHEDY H, NASSIRI H, et al. A multi-agent optimization formulation of earthquake disaster prevention and management[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 229(1):261-275.
- [12] BALL D R, DESHMUKHA, KAPADIA N. An options-based approach to coordinating distributed decision systems[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 240(3):706-717.
- [13] 喇蕊芳, 张在旭, 张旭, 等. 基于 NetLogo 的地震救援多主体协同仿真研究[J]. 华北地震科学, 2021, 39(4): 19-27.
LA Ruifang, ZHANG Zaixu, ZHANG Xu, et al. Multi-agents collaborative simulation study of earth-quake rescue based on NetLogo[J]. North China Earthquake Sciences, 2021, 39(4):19-27.
- [14] 白鹏飞, 谭小虎, 侯蕊芳. 社会网络视角下地质灾害应急处置合作关系[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 207-216.
BAI Pengfei, TAN Xiaohu, HOU Ruifang. Geohazard emergency response partnerships from a social network perspective[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4):207-216.
- [15] 张朝潮. Robocup 救援仿真系统中的多 Agent 合作方法研究[D]. 广州:广东工业大学, 2013.
ZHANG Chaochao. Research of cooperation method of multi-agentin Robocup rescue simulation [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- [16] FARINELLI A, GRISETTI G, IOCCHI L, et al. Design and evaluation of multi agent systems for rescue operations[C]. Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), 2003: 3 138-3 143.

作者简介: 杨倩 (1999—),女,贵州贵阳人,博士研究生,主要研究方向为城市公共安全、应急救援路径规划。E-mail:yangqian_13@csu.edu.cn。