

# 基于暴雨内涝灾害情景推演的北京市应急救援方案评估与决策优化

孙超<sup>1</sup>, 钟少波<sup>1</sup>, 邓羽<sup>2</sup>

(1. 清华大学工物系公共安全研究院, 北京 100084; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所  
中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 城市自然灾害的情景推演与应急方案的动态预评估是优化应急决策的重要支撑。然而, 传统的应急救援方案评估往往基于有限信息进行时间片段式的情景推演并采用应急方案的灾后评估。本文在构建基于内涝水淹模型和多智能体城市路况模型的全链条、多维度灾害情景推演方案的基础上, 实施不同应急救援目标导向下多时间刻度的应急救援方案预评估, 重点从受损车辆规模和遭受安全威胁人数定量评估基于救援人数、救援时间和救援空间布局原则的应急方案优劣, 为灾害情景推演方案和应急决策优化提供了一种新的思路与解决方案。基于救援人数规模的应急方案表明, 救援力量将优先布局在风险指数高企的区域, 包括北蜂窝路、南蜂窝路、广莲路以及莲花桥等路段。在现实情况中及时参加的救援力量往往有限, 此类根据不同救援力量数量的空间指向将对最优的救援决策起到关键作用。同时, 研究也印证了救援力量多寡在应急事件处置中的基础性地位。基于救援启动时间的应急方案中得出, 最优的救援启动时间在 45 min 到 75 min 之间, 适时的救援启动可以有效规避过早启动导致的救援空间配置不当和过晚启动导致的救援失效两类问题。不同救援空间布局原则有着迥异的救援力量空间配置特点和最优运用条件。

**关键词:** 城市; 暴雨内涝; 情景推演; 应急方案评估; 决策优化

DOI: 10.11821/dlxb201705004

## 1 引言

气候变化背景下极端天气频发已经成为国际社会关注的全球性重大问题。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第五次评估报告<sup>[1]</sup>指出, 全球平均气温在过去 100 年内上升了 0.74 °C, 全球变暖使得夏天更热、冬天更暖。与此同时, 全球一半陆地面积遭受强降水的频率呈显著上升趋势, 直接增大了暴雨、内涝、海啸等极端天气事件的发生风险, 同时重点阐明了 7 个方面的科学问题, 尤其是对 21 世纪末 2 °C 的升温情景的相应措施。中国是一个自然灾害频发的国家, 如 1998 年长江流域的强降水, 2008 年南方的雪灾事件以及 2013 年北京“7·21”城市暴雨内涝等, 极端天气事件对国家经济建设、居民安全以及社会稳定造成严重影响。因此, 灾害预警与应急救援决策能力被视

收稿日期: 2016-03-29; 修订日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(91224004); 国家“十二五”科技支撑项目课题(2015BAK10B01, 2015BAK12B03)  
[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.91224004; National Science & Technology Pillar Program during the 12th Five-year Plan Period, No.2015BAK10B01, No.2015BAK12B03]

作者简介: 孙超(1986-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 研究方向为城市灾害情景推演、应急演练方案评估、应急决策优化。E-mail: slayergod@163.com

通讯作者: 邓羽(1985-), 男, 湖北恩施人, 博士, 副研究员, 主要研究城市发展与空间管治。E-mail: rain00788@163.com  
804-816 页

为政府公信力和公共服务能力的重要组成,也逐渐成为学界关注的热点问题<sup>[2-7]</sup>。

国内外学者从灾害系统和灾害推演角度提出了灾害情景推演模型与方案,如构建了基于系统动力学的突发事件模型<sup>[9]</sup>;基于元胞自动机的人员疏散推演模型<sup>[10]</sup>;基于情景依赖的“情景—沟通—合作—共识—行动”的应急决策动态模式<sup>[8, 11-13]</sup>,以及基于复杂网络的推演预警模型<sup>[14]</sup>。在灾害情景推演的基础上,采用AHP、ANP、TOPSIS、数值模拟法、多元统计等理论决策方法,评估应急方案并提出救援决策建议。诸如应用AHP法对县域尺度暴雨内涝风险评价<sup>[15]</sup>,应用ANP法对航空空管安全场景的评估<sup>[19]</sup>。利用多属性效用分析方法处理核事故的应急决策<sup>[23]</sup>。总体看来,既有研究多以定性、半定量和部分耦合3S技术发展起来的灾情推演系统<sup>[16-18, 20-22, 24]</sup>,主要利用有限信息进行时间片段式的情景推演和应急方案的灾后评估;尚缺乏统一的量化研究范式,没有充分发挥推演模型全链条、多维度的智能仿真和辅助决策功能。

综上所述,基于灾害全链条的情景推演和多时间刻度的应急方案评估充分考虑了灾害情景的时间演化特性,是大幅提高决策者应急处置效率、优化应急决策方案的重要支撑。因此,本文以城市频发的暴雨内涝灾害为例,选择北京城区西二环与西四环之间区域为实证研究区,首先构建了耦合内涝水淹模型和多智能体城市路况模型的全链条、多维度的灾害情景推演方案;在此基础上,实施不同应急救援目标导向下多时间刻度的应急救援方案预评估,进而提出应急救援决策的优化建议,以期应急管理方法和理论研究的不断完善提供科学依据。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究区域与方案

**2.1.1 研究区域** 北京地处半湿润大陆季风气候,是华北地区降雨最多的地区之一。由于其降水分配不均,雨日少而极端雨量大,7月和8月间频发大到暴雨。而且,城市下垫面复杂的立体交通结构以及不尽完善的排水设施将增大暴雨内涝的发生机率与危害强度,从而对交通设施与居民出行安全造成较大威胁。由此,本文选择了北京市西二环到西四环之间包含莲花桥、北京西站、五棵松等交通热点以及多个立交桥设施近50 km<sup>2</sup>的区域作为研究区(图1)。

**2.1.2 研究方案** 暴雨内涝灾害的情景推演可以从孕灾环境、致灾因子、承灾载体3个角度来表达分析。其孕灾环境主要为全球气候变化和城市化进程加快;致灾因子为在热带气旋的驱动下所引发的暴雨,同时直接或间接作用于地表事物并产生负面影响,表现为灾害导致的道路内涝积水;承灾载体则是暴露于城市暴雨内涝灾害风险中的社会、经济和自然系统要素<sup>[25]</sup>。本文通过对致灾因子的内涝淹没的范围与深度进行定量模拟,结合了基于多智能体的道路承灾载体推演模型,耦合得到全链条、多维度的灾害情景推演及其应急方案预评估。

城市内涝模型主要通过城市气象数据结合降水统计模型,模拟出降雨并输出城市径流模型所需要的结果。然后通过城市地形、土地利用以及城市排水管网布局模拟出城市降雨径流的动力过程,从而计算出城市各条街道的实时淹没深度( $D$ )。道路动态推演模型则通过道路水深、路网结构以及车流量数据,对车辆行驶行为以及道路路况进行模拟,量化承灾载体的实时规模和空间分布特征。在此基础上,根据不同应急方案下承灾载体的暴露分析,综合考虑特定位置承灾载体的淹没深度( $D_i$ )和驶离对应道路的淹没时间( $T_i$ ),重点从受损车辆规模和遭受安全威胁人数定量评估基于救援人数、救援时间

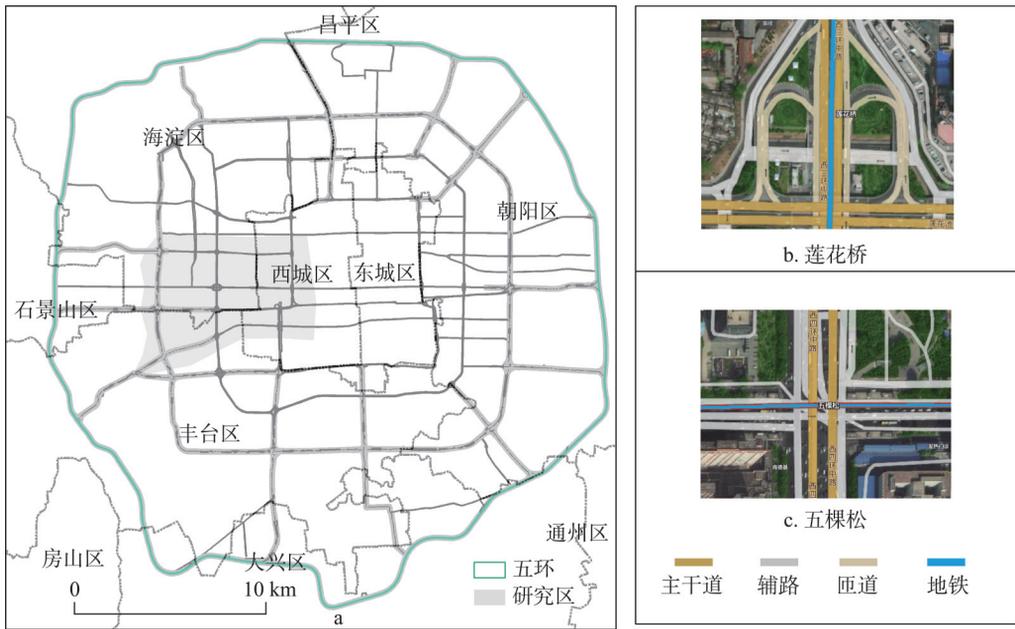


图1 研究区域  
Fig. 1 Research area

和救援空间布局原则的应急方案优劣，从而构建城市暴雨内涝灾害的应急决策研究范式。研究方案如图2所示。

2.2 城市暴雨内涝灾害的情景推演方案

2.2.1 城市内涝模型构建与场景模拟——致灾因子 致灾因子分析是灾害风险评估的重要组成部分，主要是对灾害的致灾因子的特征提取并进行模拟推演，从而获得灾害潜在的要素<sup>[26]</sup>。城市暴雨内涝灾害情景由美国环境署开发的降雨径流动力学仿真软件SWMM模

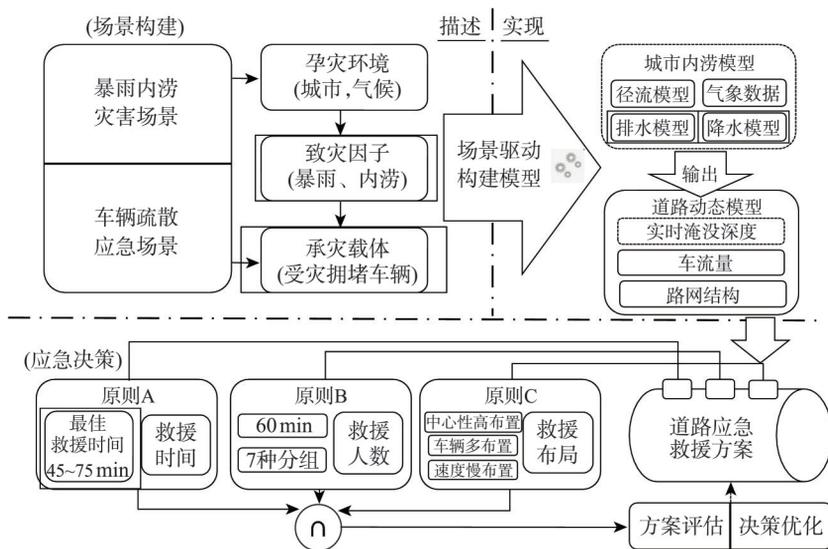


图2 研究总体方案  
Fig. 2 Research scheme

拟<sup>[27]</sup>。该软件可以满足城市的径流排水的模拟需要, 在SWMM中, 城市降雨径流过程的模拟主要考虑雨水在地面汇流的水文过程(公式(1))与雨水在由管道、渠道、蓄水设施、水处理设施组成的排水系统运动的水力学过程(公式(2)、(3))来实现<sup>[28]</sup>:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} \times S^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $V$ 是水流在明渠中的流速;  $n$ 是糙率;  $R$ 为水力半径(流体截面积与湿周长之比);  $S$ 为明渠坡度。

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} \right) + \frac{\partial h}{\partial s} = S - J_f \quad (3)$$

式中:  $Q$ 和 $A$ 分别为截面流量和截面面积;  $s$ 为距水道某固定断面沿流程的距离;  $t$ 为时间;  $g$ 为重力加速度;  $h$ 和 $v$ 分别为相应于 $s$ 处过水断面的水深和断面的平均流速;  $S$ 为底面坡度;  $J_f$ 为由于摩擦损失引起的能量比降。那么 $D_r$ 即为处于特定位置 $h_r$ 的承灾载体的淹没深度。

**2.2.2 城市路况推演模型构建与模拟——承灾载体** 城市路况推演模型是针对研究区内的承灾载体, 即行驶车辆的数量特征和空间分布特征进行定量模拟, 主要考虑道路的长度、宽度和路网拓扑等基本信息; 道路的初始积水情况, 由城市内涝模型模拟而来( $D$ ); 道路的车辆情况, 包括道路的车辆数量、车辆的初始目的地、进入研究区的外围车辆。

$t$ 时刻的车辆数目:

$$N_r(t+1) = N_r(t) + N_{r\_In}(t+1) - N_{r\_Out}(t+1) \quad (4)$$

式中:  $N_r$ 是 $t$ 时刻的车辆数目;  $N_{r\_In}$ 是进入研究区的外围车辆;  $N_{r\_Out}$ 是离开研究区到外围的车辆数目。基于此, 平均车速 $V_r(t)$ 与道路上的车流量以及水淹深度有关。在道路无积水时, 计算平均车速采用车辆跟驰模型<sup>[29]</sup>。即:

$$S = \alpha + \beta V + \gamma V^2 \quad (5)$$

式中:  $S$ 表示车辆平均间距, 可由道路长度 $L$ 、当前车辆 $N$ 以及车道数 $WN$ 估算;  $\alpha$ 表示车辆长度;  $\beta$ 表示人的反应时间;  $\gamma$ 表示跟驰车辆最大减速度的二倍倒数。那么, 特定位置承灾载体驶离对应道路的淹没时间 $T_r = L_r / V_r$ 。

## 2.3 内涝灾害的风险评测与应急救援方案评估

**2.3.1 内涝灾害的暴露分析与风险评测** 根据淹没深度( $D$ )与淹没时长( $T$ )综合评测承灾载体的暴露性和特定道路区域的风险指数。当淹没深度低于0.15 m时, 车辆损坏可忽略不计; 当车辆在淹没深度高于0.15 m低于0.4 m累积淹没30 min以上, 车辆轻微损坏; 当车辆在淹没深度高于0.4 m低于0.8 m的累积淹没30 min以上, 车辆严重损坏; 当车辆在淹没深度高于0.8 m的累积淹没30 min以上, 车辆严重损坏, 且乘车人员的生命安全遭到威胁<sup>[30-31]</sup>。在此基础上, 根据特定道路内车辆空间位置和道路积水状况, 计算 $t$ 时刻道路内所有车辆驶出的风险指数 $R_t$ :

$$R_t = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{r \in Path(V_i(t))} D_r(t) \times T_r(V_i(t)) \quad (6)$$

式中:  $N_t$ 表示 $t$ 时刻道路上的总车辆数;  $Path(V_i(t))$ 表示车辆 $N_i$ 预计行驶的路径;  $D_r(t)$ 表示 $t$ 时刻道路 $r$ 的积水深度;  $T_r(V_i(t))$ 表示车辆 $V_i$ 通过道路 $r$ 所需要的时间。

**2.3.2 应急救援方案与评估** 在城市暴雨内涝的灾害场景下, 应急救援力量一方面可以有效疏导路段车辆, 加快车辆行驶速度, 从而避免拥堵的产生; 另一方面, 可以对“严重

损坏”的车辆实施救援，保护乘车人员的生命安全。应急救援配置可采用基于救援人数规模的应急方案、基于救援启动时间的应急方案和基于不同救援空间布局原则的应急方案。本文针对100年重现期降雨场景，采用蒙特卡洛模拟方法，分别对以上3类不同的应急方案进行多时间刻度的动态预评估，重点从受损车辆规模和遭受安全威胁人数定量评估应急方案优劣。基于救援人数规模的应急方案主要考虑救援人数在5人组至35人组区间的变化；基于救援启动时间的应急方案主要考虑救援启动时间在30 min至120 min的区间变化；基于不同救援空间布局原则的应急方案主要采用以下3种救援空间布局原则：原则A布置在道路中心性最高的路段；原则B布置在平均车速最慢的路段；原则C布置在车辆数量最高的路段。

### 3 城市暴雨内涝灾害的情景构建与推演

#### 3.1 城市暴雨内涝仿真

从空间分布上看(图3)，50年重现期降雨下，道路积水的高危区并不明显。100年重现期降雨下，高危区主要分布在西二环和月坛南街交叉路段、广安门北街和天宁寺南街交叉路段以及西三环与广安路交叉路段。其中广安门北街与天宁寺前街最高积水深度达到0.4 m。200年重现期降雨下，高危区又增加了三里河路和月坛南街交叉路段，梅市口东路与西四环、莲花池西路交叉路段。

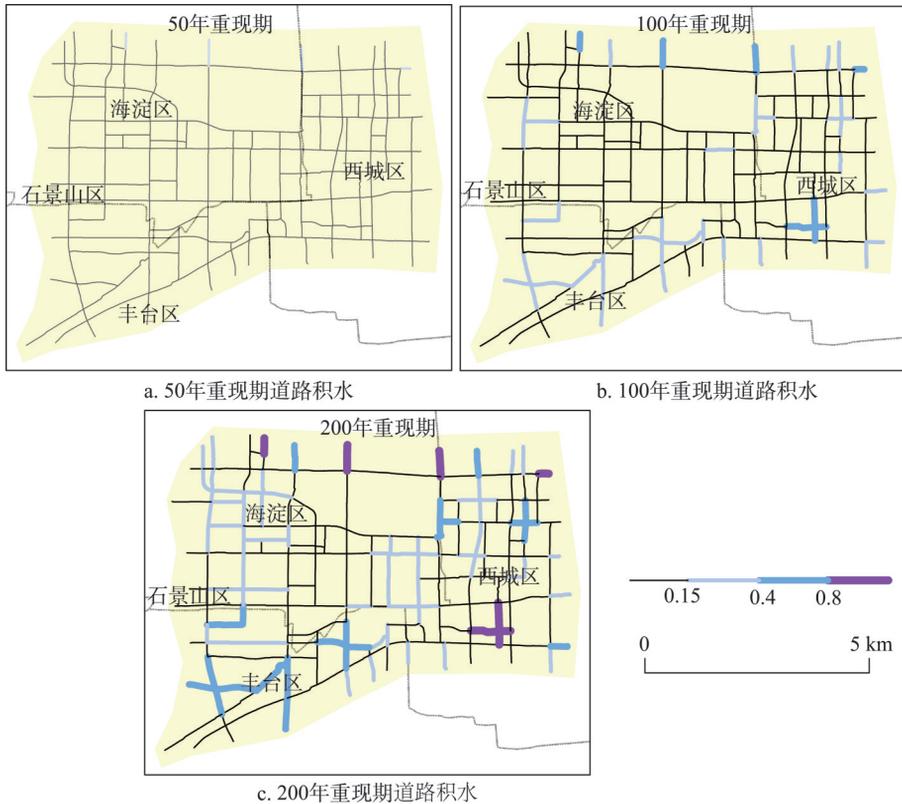
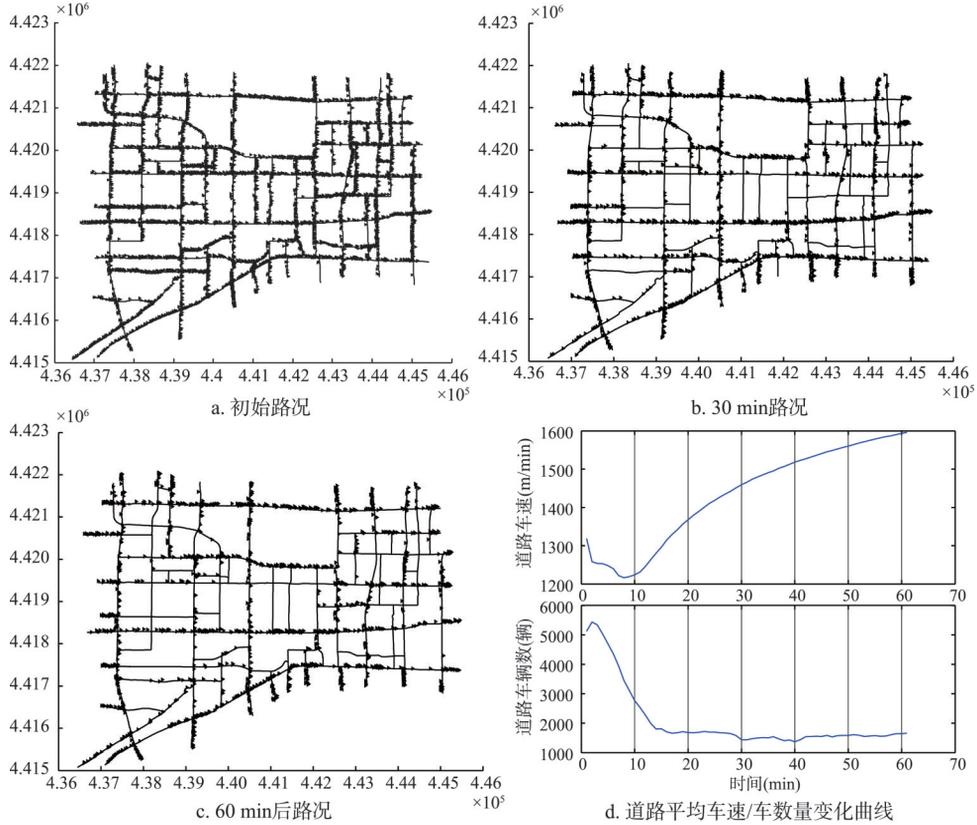


图3 研究区域道路最高积水空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of the road water-logging of the research area

### 3.2 城市路况仿真

通过设置道路上初始车数量、目的地（随机出口）以及外围驶入车辆，可以模拟出无降水状态下研究区道路的车辆行驶情况。图4a中给出了初始车辆数为40辆/min，外围进入车辆最高为20辆/min的模拟效果；图4b、4c分别给出了30 min和60 min后的路况动态推演效果；图4d展示了在该路况动态推演下的道路平均车速和车辆总数的变化情况。道路平均车速在8 min时最小，说明模型运行至8 min时，道路上车辆较为集中，造成了局部拥堵。车辆总数在13 min前呈显著下降趋势，说明研究区内驶出车辆数大于驶入车辆数。由此，在10 min左右时局部拥堵逐步疏散，道路平均车速也显著上升。



注：道路上每辆车根据自己当前位置、目标位置以及路况信息选择最短/最快/最优路径行驶的动态过程。  
 $N=40, N\_Inflow=20$ , Beijing\_1954投影坐标系, 横纵坐标单位为m

图4 研究区域路况模型

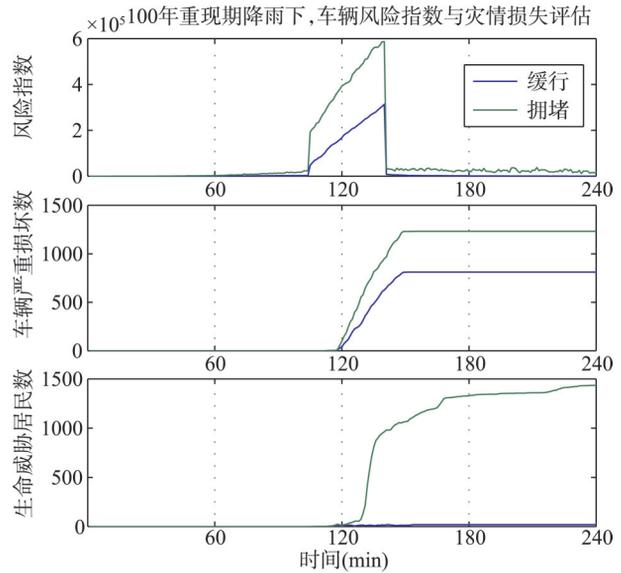
Fig. 4 Road condition model of the research area

### 3.3 城市暴雨内涝灾害的情景推演

本节分别对100年暴雨重现期缓行场景和拥堵场景的车辆疏散状况进行动态推演，重点分析研究全域的风险指数变化特征及其区域分异现象，为应急决策方案的制定提供风险认知基础。图5展示了不同暴雨重现期缓行场景和拥堵场景的风险指数与车辆损失情况的时序变化。从100年重现期来看，风险指数在105 min时开始显著增大，且拥堵场景下的风险指数显著大于缓行场景下的风险指数。风险指数上升直至140 min时，开始陡然下降，这与积水深度的时序变化具有同步性。与风险指数变化相比较，车辆损坏情况约有10~15 min的滞后性，从120 min起也显著上升。拥堵场景下的车辆严重损坏数约为缓行场景的1.5倍，而遭受生命威胁的居民数量则远远大于缓行场景。随后，车辆损坏

数上升至 150 min 后保持稳定，而拥堵场景下遭受生命威胁的居民数量依然在上升。

图 6 展示了 100 年降雨重现期不同场景下特定道路最大风险值的空间分布。100 年重现期降雨的缓行场景下 (图 6a)，研究区北部路段风险值相对较大，以阜成路为主要风险道路，与其交叉路段包括西三环路，三里河路等达到了较高的风险值，尤其是西三环北部路段风险值高达 5 级。研究区中部的复兴路与西三环路也是 3 级风险的路段。而在 100 年重现期降雨拥堵场景下 (图 6b)，阜成路与西三环交叉路段则成为风险最高的地区，风险级别均高达 4 级以上。此外，研究区中部的玉渊潭南路、复兴路以及莲花池东路也有部分路段达到 4 级风险，三里河路以东路段达到 3 级风险。



注：计时时间为暴雨发生时刻。

图 5 研究区 100 年降雨重现期风险指数与灾情损失评估的时序变化

Fig. 5 The sequential variation of risk index and loss evaluation under the 100 rain recurrence interval of the research area

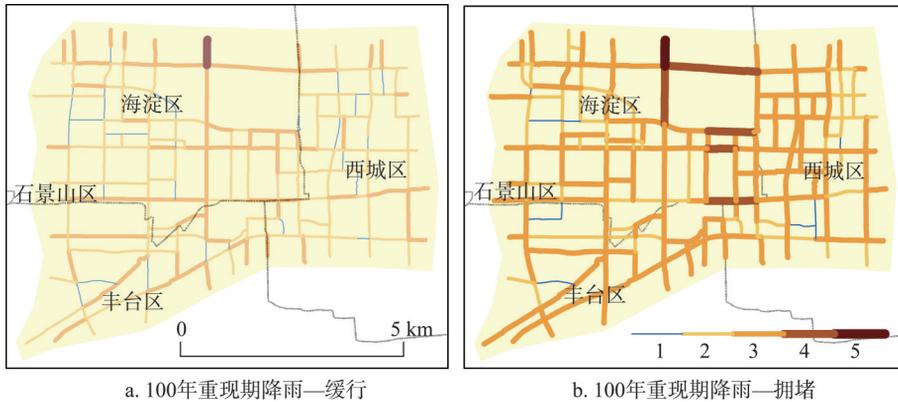


图 6 研究区 100 年降雨重现期不同场景下最大风险指数的空间分布

Fig. 6 The sequential variation of the largest risk index of different scenarios under the 100 rain recurrence interval of the research area

### 4 城市暴雨内涝灾害的应急决策与方案评估

#### 4.1 基于救援人数决策的方案评估

救援人数规模在应急事件处置中具有基础性作用，但是由于灾害事件的突发性和救援力量原始配置的区域差异性，特定灾害情景下可迅即参与救援的规模往往有限<sup>[33-35]</sup>。因此，基于不同的救援人数限定的灾害损失模拟和方案评估对优化救援空间配置决策具有重要参考价值。本次方案评估设定救援人数分别取 5、10、15、20、25、30 和 35 组，救援启动时间为 60 min。随着救援人数的增多，灾害损失显著下降，从 5 组时 1800 人遭受

生命威胁降至35组时500人以下。由此可见,救援资源的规模是提升应急处置成效的基础性保障。

图7展示了不同救援参与人数限定下,救援力量的空间配置格局。当救援资源较少,不多于10组时(图7a、7b),路网的中部路段是主要的救援布局区,包括北蜂窝路、南蜂窝路、广莲路以及莲花桥等路段;当救援力量增加到20人组时(图7d),除了路网中部以外,也包括了北部以及西南部外围路段:阜成路,西南四环,三环北部路段等;当救援力量较为充沛时(图7e、7f),主要布置在莲花桥附近的莲花池东、西路以及三环上。此外,包括阜成门内大街、复兴门内大街及其大成路等易引发拥堵的道路也布

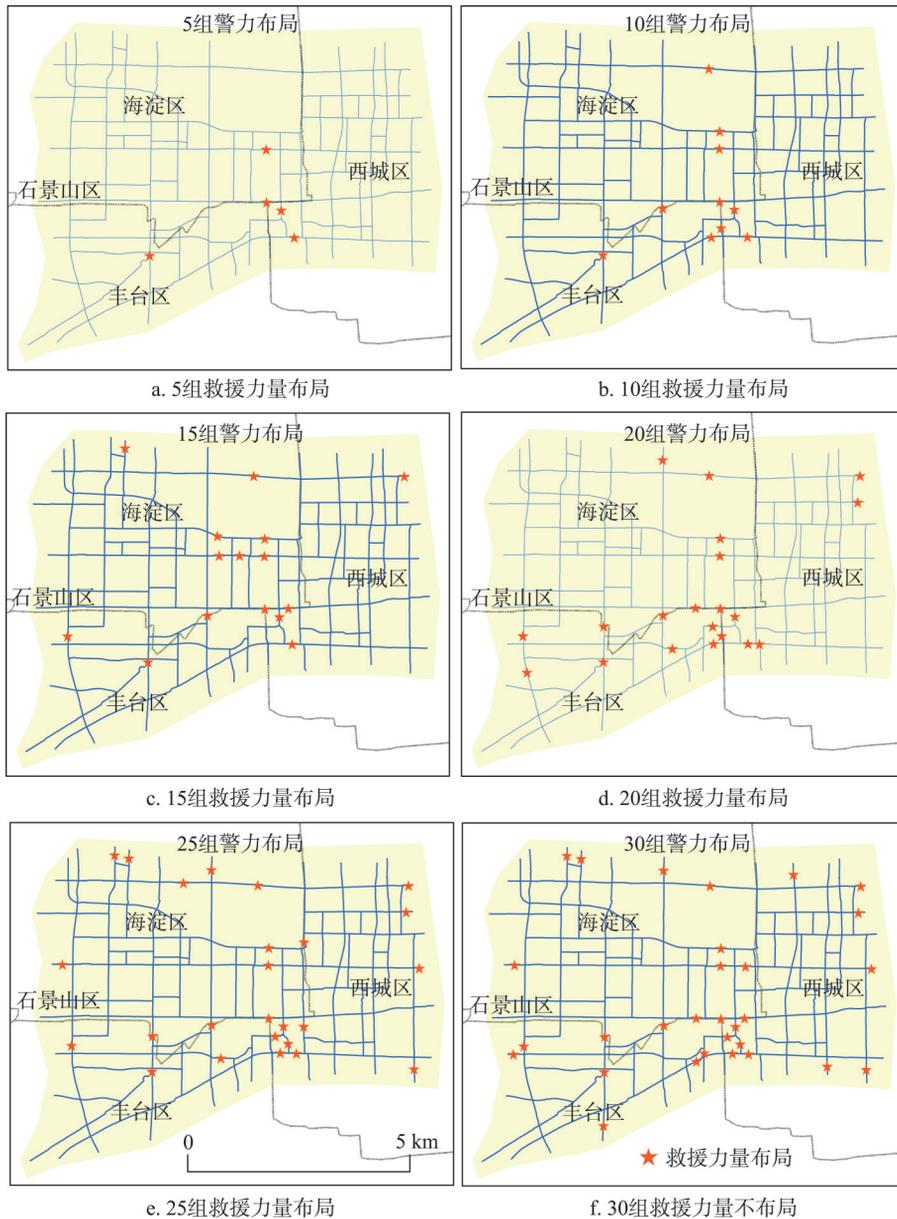


图7 研究区救援力量布局模拟

Fig. 7 The rescue forces distribution of the research area

置了救援力量。总体看来，救援力量将优先布局在风险指数高企的区域，随着救援力量的增多，将显著减少承灾载体的高风险区域，进而提升应急处置成效。

### 4.2 基于救援启动时间决策的方案评估

在不同的救援启动时间限定下对灾害损失进行了评估。本次方案设定救援人数为20人组，救援布局采用优先布置在车辆数量最多路段的原则。图8a展示了生命受威胁人数随救援启动时间的变化曲线，可以看到最优的救援启动时间在45 min到75 min之间。由此可见，过早启动救援并不能直接降低灾情损失。救援启动时间过早，不能准确把握重灾路段所在位置，难以将救援力量部署在相应道路上。救援启动时间过晚则使路段造成拥堵，难以疏解，车辆提前遭受严重损失，导致救援失效。此外，对比风险指数（图8b）可以看出，当救援启动开始于风险指数显著上升前15 min时（90 min以前），灾情损害能降低至较低范畴；一旦车辆风险指数显著变高以后，如救援启动时间超过105 min，疏导行为就会过晚而导致灾害损失陡增。因此，适时的救援启动可以有效规避过早启动导致的救援空间配置不当和过晚启动导致的救援失效两类问题。

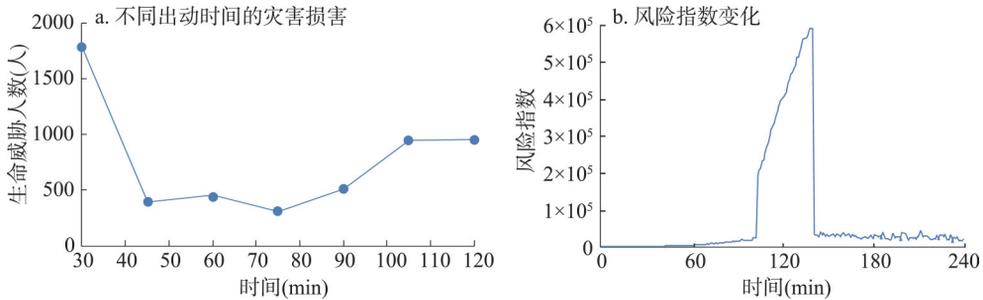


图8 研究区救援力量时间参数配置

Fig. 8 The time parameter configuration of rescue forces of the research area

### 4.3 基于不同救援空间布局原则的方案评估

救援空间布局与实时路况密切相关，不同的救援布局原则将产生迥异的空间布局方案和风险程度。基于道路中心性的布局原则依托于研究区域的路网结构，基于路段平均车速和车辆数量的布局原则均是针对道路动态情况模拟布局。本文设定救援力量为20人组，救援启动时间为75 min，分别针对以上3种救援空间布局原则进行模拟对比与方案评估（图9，图10）。

原则A主要将救援力量布置在路网中部，主要包括玉渊潭南路、三里河东里、白云路以及莲花池东路。这种布局策略相对保守，虽然可以保证居民生命威胁数量维持在较低范围，但整体损失的车辆最多。此外，由于没有全面考虑实时路况，难以有效支撑灾害动态演变下的应急决策。

原则B主要将救援力量布置在路网北部接近出口的路段以及中部三环以东的路段，包括阜成路、展览馆路、西三环、玉渊潭南路、南蜂窝路、广莲路附近等，这些路段一方面在交通枢纽（北京西站、莲花桥附近）或路宽较窄的出口或小路上（展览馆路、玉渊潭南路），车速相对较慢；另一方面，也是积水深度容易达到0.4 m以上的路段。因此，该原则布局下的车辆严重损失是最少的。但由于该原则仅考虑了道路速度情况，未考虑车辆较多路段的风险指数可能更大，忽略了部分车辆密集且积水较深的路段（如西三环南部的阜成路，玉渊潭南路中段等），因而遭受生命威胁的居民数量相对较多。该原则对积水不深的快速出逃场景更为适合。

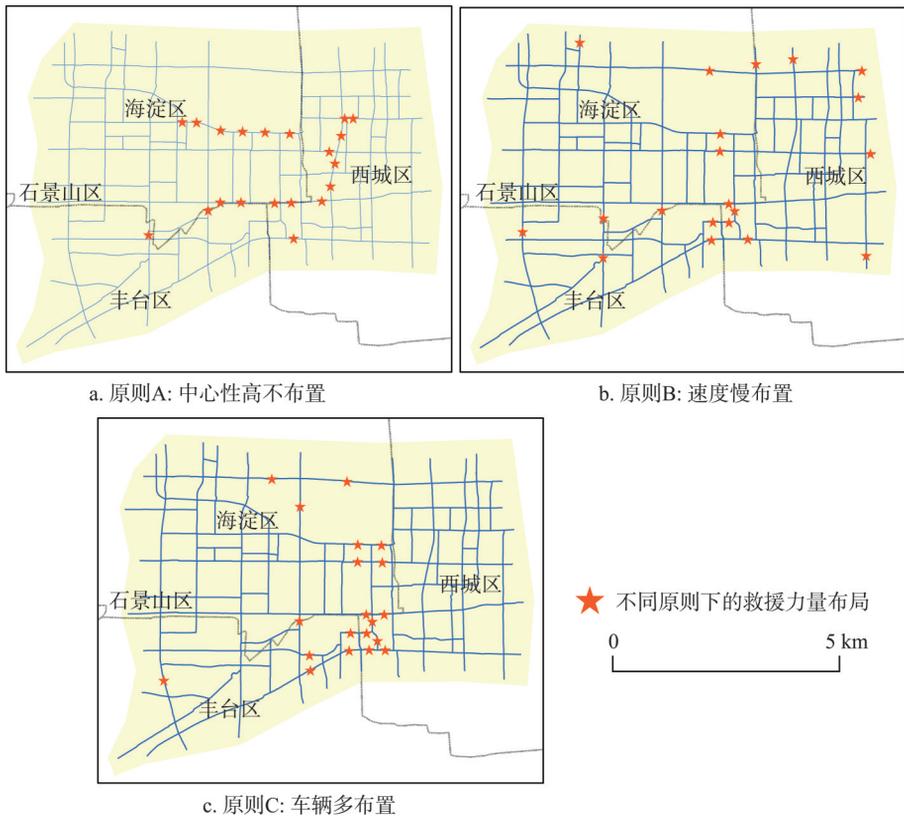


图9 研究区不同原则下的救援力量布局

Fig. 9 The rescue forces distribution under different principles of the research area

原则C与原则B在救援力量布置上较为相似, 均在北京西站、莲花桥等交通枢纽处布置了救援力量, 同时包括了北部的阜成路。该原则下, 救援力量主要布置在车辆较多的路段, 因此车辆总体的风险指数最低, 灾害损失最小。但基于该原则的救援布置容易造成救援力量浪费, 例如某些路段车辆虽多, 但由于道路较宽等因素, 其实质风险指数并不高; 再如车辆虽然拥堵, 由于路段并未积水, 其损坏风险也较小。因此, 该原则适合在救援力量充足的场景下运用。

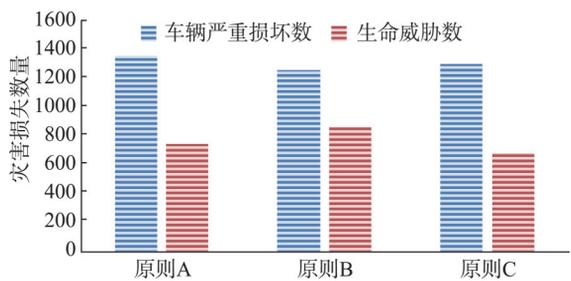


图10 研究区不同救援力量布局下的灾害损失  
 Fig. 10 The disaster loss under different rescue forces distribution of the research area

### 5 结语

(1) 本文在构建内涝水淹模型和多智能体城市路况模型的全链条、多维度的灾害情景推演方案的基础上, 实施应急救援目标导向下多时间刻度的应急救援方案定量预评估, 有效顾及了灾害事件发生后生命周期过程中各类信息传递的不完整性、欠准确性和

动态演化性等特点,通过应急救援方案的动态预评估支撑决策者的应急方案优化设计。

(2) 应急救援配置可采用基于救援人数的应急方案、基于救援启动时间的应急方案和基于救援空间布局原则的应急方案。本文针对100年重现期降雨场景,采用蒙特卡洛模拟方法,分别对以上3类不同的应急方案进行动态模拟,并从车辆损失和生命安全角度定量评估应急方案的优劣。基于救援人数的应急方案中给出了不同救援人数下灾害损失变化情况,印证了救援力量在应急事件处置中的基础性地位。随着救援力量的增多,将显著减少承灾载体的高风险区域,进而提升应急处置成效;基于救援启动时间的应急方案中得出,最优的救援启动时间在45 min到75 min之间,适时的救援启动可以有效规避过早启动导致的救援空间配置不当和过晚启动导致的救援失效两类问题;基于救援空间布局的应急方案实证了不同原则下救援力量的空间配置特点,并诠释其最优运用条件。

(3) 城市气象灾害应急系统是个复杂而庞大的体系,受到多因素的制约,从而导致应急方案预评估与决策优化的复杂性和艰巨性。本文提出的灾害情景推演方案和应急决策范式可以为解决上述问题提供一种新的思路。但是,本文采用的模拟过程可能存在以下3类误差:降水模型的径流量预测误差一般在 $\pm 6\% \sim \pm 25\%$ 之间;城市路况推演模型中平均车速误差不大于3%;城市积水仅模拟了高风险情景。因此,需继续完善对灾害情景推演方案的校验研究,将增强成果的现实价值;而且,文中仅对不同应急救援目标导向下的应急方案进行了预评估和比对研究,基于多目标耦合的应急方案构建及其评估也将是未来的研究重点。

### 参考文献(References)

- [1] IPCC. Summary for policymakers//Stocker T F, Qin D, Plattner G-K et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Shi Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(4): 6-14. [史培军. 再论灾害研究的理论与实践. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-14.]
- [3] Shi Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(3): 1-9. [史培军. 三论灾害研究的理论与实践. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.]
- [4] Wang Jing'ai, Shi Peijun, Wang Ping, et al. Spatial-temporal Pattern of Natural Disasters in China. Beijing: Science Press, 2006. [王静爱, 史培军, 王平, 等. 中国自然灾害的时空格局. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [5] Ma Zongjin. The Momentous Natural Disasters and Reduction Action: General Remarks. Beijing: Science Press, 1994. [马宗晋. 中国重大自然灾害及减灾对策: 总论. 北京: 科学出版社, 1994.]
- [6] Hu Aijun, Li Ning, Zhu Yande, Wu Jidong, et al. Integrated risk governance paradigm for meteorological disasters: Thoughts on the low-temperature freezing rain and snow disaster in southern China of 2008. Progress in Geography, 2010, 29(2): 159-165. [胡爱军, 李宁, 祝燕得, 等. 论气象灾害综合风险防范模式: 2008年中国南方低温雨雪冰冻灾害的反思. 地理科学进展, 2010, 29(2): 159-165.]
- [7] Zhao Sijian, Huang Chongfu, Guo Shujun. Scenario-driven risk analysis of regional natural disasters. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 9-17. [赵思健, 黄崇福, 郭树军. 情景驱动的区域自然灾害风险分析. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 9-17.]
- [8] Yin Zhan'e, Xu Shiyuan, Yin Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 553-562. [尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562.]
- [9] Leveson N. A new accident model for engineering safer systems. Safety Science, 2004, 42(4): 237-270.
- [10] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, et al. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2001, 295(3): 507-525.
- [11] Song Chengcheng, Li Mengya, Wang Jun et al. Simulation of typhoon storm surge impacts in Shanghai based on storm surgescenarios and disaster prevention measures. Progress in Geography, 2014, 33(12): 1692-1703. [宋城城, 李梦雅, 王军, 等. 基于复合情景的上海台风风暴潮灾害危险性模拟及其空间应对. 地理科学进展, 2014, 33(12): 1692-1703.]

- [12] Waugh W L, Sylves R T. Organizing the war on terrorism. *Public Administration Review*, 2002, 62(Suppl.): 145-153.
- [13] Hu Beibei, Zhou Jun, Wang Jun, et al. Risk assessment on rainstormwaterlogging of Tianjin Binhai New Area based on scenario simulation. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(7): 846-852. [胡蓓蓓, 周俊, 王军, 等. 基于情景模拟的天津市滨海新区2020年暴雨内涝风险评估. *地理科学*, 2012, 32(7): 846-852.]
- [14] Wang Huimin, Liu Gaofeng, Tong Jinping, et al. Study on dynamic emergency decision-making model of unconventional water disaster. *Soft Science*, 2012(1): 20-24. [王慧敏, 刘高峰, 佟金萍, 等. 非常规突发水灾害事件动态应急决策模式探讨. *软科学*, 2012(1): 20-24.]
- [15] Dai Juan, Pan Yinong, Liu Qing, et al. Application of improved AHP in county-scale rainstorm and flood risk assessment. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, 34(4): 428-434. [戴娟, 潘益农, 刘青, 等. 改进的AHP在县域尺度暴雨洪涝风险评价的应用. *气象科学*, 2014, 34(4): 428-434.]
- [16] Chen Mingxian, Shen Feimin. Emergency resource evaluation of subsea tunnel fire based on scenario evolution and catastrophe progression. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(6): 869-874. [陈明仙, 沈斐敏. 基于情景演变和突变级数的海底隧道火灾应急资源评价. *福州大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(6): 869-874.]
- [17] Cheng Conghui, Guo Junhua. Process and "Human-machine" interaction path of the case-based reasoning for decision-making of sudden incidents. *Forum on Science and Technology in China*, 2015, 12: 51-56. [程聪慧, 郭俊华. 基于案例推理的应急决策过程及其“人一机”交互机理. *中国科技论坛*, 2015, 12: 51-56.]
- [18] Ge Honglei, Liu Nan. A stochastic programming model for relief resources allocation problem based on complex disaster scenarios. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2014, 34(12): 3034-3042. [葛洪磊, 刘南. 复杂灾害情景下应急资源配置的随机规划模型. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(12): 3034-3042.]
- [19] Du Hongbin, Li Hui, Yuan Leping, et al. Risk assessment model for air traffic control based on Fuzzy-ANP method. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(12): 79-85. [杜红兵, 李晖, 袁乐平, 等. 基于Fuzzy-ANP的空管安全风险评估研究. *中国安全科学学报*, 2010, 20(12): 79-85.]
- [20] Zhao Shuping, Liang Changyong, Qi Xiaowen, et al. A group decision making method for emergency facility location for disruptions in urban areas. *Journey of Systems & Management*. 2014, 23(6): 810-818. [赵树平, 梁昌勇, 戚筱雯, 等. 城市突发事件的应急设施选址群决策方法. *系统管理学报*, 2014, 23(6): 810-818.]
- [21] Schmid V, Doerner K F. Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(3): 1293-1303.
- [22] Shariff S S, Moin N H, Omar M. Location allocation modeling for healthcare facility planning in Malaysia. *Computer & Industrial Engineering*, 2012, 62(4): 1000-1100.
- [23] Xu Zhixin, Xi Shuren, Qu Jingyuan. Multi-attribute analysis of nuclearreactor accident emergency decision making. *Tsinghua University (Science & Technology)*, 2008(3): 445-448. [徐志新, 奚树人, 曲静原. 核事故应急决策的多属性效用分析方法. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008(3): 445-448.]
- [24] Ren Xuehui, Wang Yue. Designing in the system of precaution and emergency rescue decision for touring safety accidents of coastal city. *Progress in Geography*, 2005, 24(4): 123-128. [任学慧, 王月. 滨海城市旅游安全预警与事故应急救援系统设计. *地理科学进展*, 2005, 24(4): 123-128.]
- [25] Huang Chao, Huang Quanyi, Shen Shifei, et al. Representation of emergency case information. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2014, 54: 149-152, 158. [黄超, 黄全义, 申世飞, 等. 突发事件案例表示方法. *清华大学学报(自然科学版)*, 2014, 54: 149-152, 158.]
- [26] Plate E J. Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(s1/2): 2-11.
- [27] Liu Jun, Guo Liang-hui, Zhang Jiantao, et al. Study on simulation of drainage and flooding in urban areas of Shanghai based on improved SWMM. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(21): 64-70. [刘俊, 郭亮辉, 张建涛, 等. 基于SWMM模拟上海市区排水及地面淹水过程. *中国给水排水*, 2006, 22(21): 64-70.]
- [28] J Gironás, LA Roesner, LA Rossman, et al. A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM). *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(6): 813-814.
- [29] Zhang Zhiyong. Car-following theory in urban expressway [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002. [张智勇. 城市快速道路车辆跟驰模型研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2002.]
- [30] Wang Yongsheng. Claim Survey and Damage Assessment of Vehicles. Beijing: China Machine Press, 2007. [王永盛. 车险理赔查勘与定损. 北京: 机械工业出版社, 2007.]
- [31] Wang Wenjun, Zhu Hua. Rescue and driving of the wading car. *Science & Technology Information*, 2012(8): 426-427. [王文军, 朱华. 汽车涉水行驶及其施救方法. *科技信息*, 2012(8): 426-427.]
- [32] Zografos K G, Androutopoulos K N, Vasilakis G M. A real-time decision support system for roadway network incident

- response logistics. *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*. 2002, 10(1): 1-18.
- [33] Ana Paula Iannoni, Reinaldo Morabito, Cem Saydam. An optimization approach for ambulance location and the districting of the response segments on highways. *European Journal of Operational Research*. 2009, 104(2): 528-542.
- [34] Liu Zhong-tie, Xie Yi, Gao Yan, et al. Research on the efficiency of police power resource disposition based on the DEA model. *Journal of People's Public Security University of China (Social Sciences Edition)*, 2015, 6: 58-64. [刘忠铁, 解易, 高岩, 等. 基于DEA模型的警力资源配置效率研究. *中国人民公安大学学报(社会科学版)*, 2015, 6: 58-64.]

## Scenario deduction based emergency rescue plan assessment and decision optimization of urban rainstorm water-logging: A case study of Beijing

SUN Chao<sup>1</sup>, ZHONG Shaobo<sup>1</sup>, DENG Yu<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Physics / Institute of Public Safety Research, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The scenario deduction and dynamic pre-assessment of urban natural disasters emergency plan play vital roles in emergency decision optimization. However, traditional plan assessments usually consist of scenario deduction of time slices and post-disaster assessment based on limited information. Based on the full-chained multi-dimensional scenario deduction plan coupled with water-logging model and multi-agent urban road condition model, this article conducts pre-assessment of emergency plan with multi time scales and rescuing targets. By examining the scale of damaged cars and the number of people threatened by the disaster, the assessment is performed regarding the quantity of people, time, and spatial arrangement of the plan. Based on this, the article provides a new solution in conducting disaster scenario deduction plan and optimizing emergency decisions. The emergency plan based on the number of people indicates that the rescuing force is firstly arranged at areas with higher risk, including North Fengwo Road, South Fengwo Road, Guanglian Road and Lianhua Bridge. In reality, only limited force participates in rescuing in time, and the spatial direction based on the number of force plays a vital role in optimizing rescue decision. Meanwhile, we also prove that the amount of rescue force stands for the fundamental position in emergency dispose. From the emergency plan based on the initiating time of rescue, it can be seen that the best initiating time is between 45 and 75 minutes, and the appropriate time of initiating can efficiently avoid the improper configuration of rescue space due to the premature rescue and the loss of efficacy when it starts too late. Different spatial arrangements of rescue could lead to different rescue force arrangement features and optimized conditions.

**Keywords:** city; rainstorm water-logging; scenario deduction; assessment of emergency plan; decision optimization