

文章编号:1671-6833(2023)02-0030-08

极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估

张金萍^{1,2}, 张朝阳¹, 左其亭^{1,2}

(1. 郑州大学 水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001)

摘要:为探究极端暴雨对城市内涝积水特征和应急响应能力的影响,基于 InfoWorks ICM 模型构建郑州市金水区的某片区内涝模型,分析极端暴雨情景下的城市管网排水能力和内涝积水特征,基于 ArcGIS 网络分析模块评估公安、医疗和消防 3 类应急服务部门在单一和组合情景下的可达范围和响应时间,以此确定城市应急响应能力。结果表明:研究区管网排水能力整体较低,排水能力<3 a 一遇的设计暴雨(3 a 一遇,下同)的管道占比为 50.15%,此类管道多分布于中部和南部,不能满足城市重要地区 3~5 a 的排水标准;淹没范围与管网排水能力和地表类型有着密切的联系,在较大除涝标准下,如 20 a 一遇和 100 a 一遇情景下积水呈现出南多北少的分布特征,而郑州 2021 年“7·20”特大暴雨情景下,北部和河流附近地区的积水面积较大;应急车辆涉水能力较高的服务部门在极端暴雨下的应急响应能力更高,100 a 一遇和“7·20”情景下消防部门的响应能力最高,10 min 内可达范围占比分别为 78% 和 36%;多部门联合调度可有效提升应急响应能力,如 100 a 一遇情景下,5、10、15 min 内联合调度的应急响应可达范围比最优部门(同一时间阈值下可达范围占比最大的部门)分别增加了 16%、7%、4%。

关键词:极端暴雨;城市内涝;管网排水能力;可达范围;应急响应时间**中图分类号:** O352; P426.616**文献标志码:** A**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.02.020

近年来,城市极端暴雨内涝灾害频发,已成为制约城市健康稳定发展的重要因素^[1-3]。极端暴雨内涝灾害不仅会造成严重的人员伤亡和直接经济损失,还可能导致城市交通及其他服务功能严重受损,进一步加剧暴雨内涝灾害^[4-5]。公安、医疗、消防部门作为城市公共服务的重要单元,其应急响应水平不仅体现了一个城市应对突发灾害事件的处理能力,更是城市防灾减灾的重要基础服务支撑。郑州“7·20”极端暴雨发生前后,无论是受灾极为严重的地铁 5 号线和京广快速路北隧道,还是其他受涝地区,在有效预警和救援时间内,城市应急公共服务部门响应迟缓,导致“应急不达”,这也是洪涝灾害加大的原因之一^[6]。因此城市暴雨内涝灾害管理更应对城市应急响应能力的研究予以高度关注。

当前,针对城市洪涝灾害的研究大多集中在风险评估和海绵城市等方面^[7-8],而暴雨洪涝灾害对

城市应急服务的影响研究相对较少,仅在近几年才引起相关学者的关注。2017 年,Coles 等^[9]研究了不同降雨情景下医疗和消防部门在响应时间 8 min 和 10 min 内的服务范围,分析了服务部门可达性降低所带来的危害;2019 年,Arrighi 等^[10]基于交通路网仿真系统,测算了正常天气和洪水情景下医疗和消防在响应时间 8 min 内的服务范围;2021 年,邵蕊等^[11]基于 TELEMAT-2D 模型分析了不同暴雨情景下医院、消防和公安部门的响应时间。

鉴于此,笔者以郑州市金水区的某片区为例,基于 InfoWorks ICM 软件构建城市内涝模型,分析极端暴雨情景下城市管网排水能力和内涝积水特征,评估公安、医疗和消防应急服务部门在单一和组合情景下的可达范围和响应时间,最终确定城市应急响应能力,以期在城市内涝应急管理和防灾减灾事件提供技术参考。

收稿日期: 2022-10-09; **修订日期:** 2022-11-06**基金项目:**国家重点研发计划项目(2021YFC3200205);河南省自然科学基金资助项目(212300410404)**作者简介:**张金萍(1979—),女,河南沁阳人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事城市雨洪和区域水资源开发。**通信作者:**左其亭(1967—),男,河南固始人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事水文水资源与水环境研究,

E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn。

引用本文:张金萍,张朝阳,左其亭.极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(2):30-37.(ZHANG J P, ZHANG Z Y, ZUO Q T. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation under extreme rainstorms[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2): 30-37.)

1 概况

1.1 研究区概况

郑州市金水区地处郑州市东北部,为郑州市中心城区,地势西南高、东北低,地面坡度在 1/200~1/9 000 之间。该区域属温带季风气候,四季分明,年均降雨量为 640.9 mm。本文研究区位于金水区内,人口、房屋和商业等密度较大,容易遭受暴雨内涝灾害。研究区总面积约为 74.44 km²,共有 20 家公安部门、17 家医疗部门和 8 家消防部门,其中医疗和消防部门主要分布在研究区中部和南部地区,公安部门分布则相对均匀,如图 1 所示。

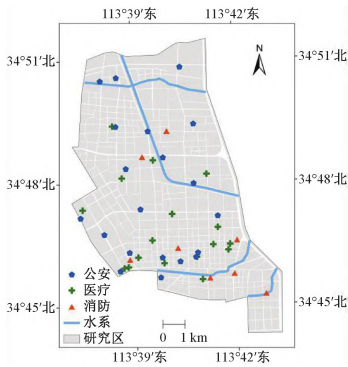


图 1 研究区概况图

Figure 1 Overview of the area in this study

1.2 数据来源

研究所需数据涉及排水管网、遥感影像、地形和降雨。排水管网数据(图 2(a))来源于《郑州市排水工程规划(2011—2020 年)》,管道断面多为圆形和矩形,研究区管道总长 116.8 km。遥感影像(2019 年)和 DEM 数据(2019 年)均来源于中科图新,遥感影像图(图 2(b))分辨率为 0.98 m,DEM 数据(图 2(c))精度为 12.5 m。建筑、道路、水系等下垫面资料(图 2(d))从遥感影像图中获得。降雨数据包括实测降雨数据和设计降雨数据,实测降雨

数据来自郑州市气象站 2011—2021 年实测暴雨资料,设计降雨根据郑州市暴雨强度公式^[12](式(1))计算获得。由郑州市实测降雨数据可知,雨峰系数在 0.3~0.5 的短历时降雨居多,因此设计降雨雨峰系数取 0.4,降雨历时取 120 min。

i = \frac{32.9(1 + 0.965lg P)}{(t + 24.8)^{0.929}}。 (1)

式中:*i* 为暴雨强度;*P* 为设计暴雨重现期,*a*; *t* 为设计暴雨总历时,min。

2 城市内涝模型构建

2.1 InfoWorks ICM 简介

InfoWorks ICM (简称 ICM) 提供了降雨径流模块、管网水流模块和二维地面洪水演进计算模块等^[13]。地表产汇流过程包括 Horton、SCS 等产流模型和 SWMM、SCS Unit 等汇流模型。在一维管网水动力模拟中,需要求解完全的圣维南方程组,包括质量守恒方程和动量守恒方程,表达式为

\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0; (2)

\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{Q |Q|}{K^2} \right) = 0。 (3)

式中:*A* 为断面面积,m²; *Q* 为流量,m³/s; *g* 为重力加速度,m²/s; *θ* 为管道中心线与水平线的夹角,(°); *K* 为输水率; *S*₀ 为渠底坡度。

在地表二维积水模拟中,采用浅水方程(即平均深度形式的 Navier-Stokes 方程)对二维流态进行数学描述,表达式为

\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} = q_{1D}; (4)

\frac{\partial (hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial (huv)}{\partial y} = S_{0,x} - S_{f,x} + q_{1D}u_{1D}; (5)

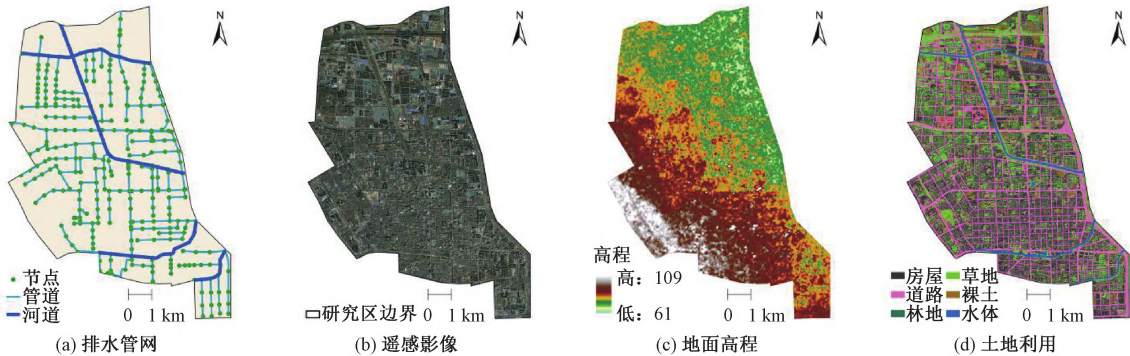


图 2 研究区基础数据

Figure 2 Basic data of the target area

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + \frac{gh^2}{2}\right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} =$$
$$S_{0,y} - S_{f,y} + q_{1D}v_{1D}$$

(6)

式中: h 为水深, m ; u 、 v 分别为 x 和 y 方向的速度, m/s ; $S_{0,x}$ 和 $S_{0,y}$ 分别为 x 和 y 方向的底坡; $S_{f,x}$ 和 $S_{f,y}$ 分别为 x 和 y 方向的摩擦力; q_{1D} 为单位面积上的出流量, m/s ; u_{1D} 和 v_{1D} 分别为 q_{1D} 在 x 和 y 方向的速度, m/s 。

2.2 城市内涝模型构建

研究区透水表面包括林地、草地和裸土, 选用 Horton 公式作为入渗模型; 不透水表面包括房屋、道路和水体, 采用固定径流系数法计算径流量。区内 4 条河流被概化为方形管道, 排水系统共有排水管道 331 根、雨水井 335 个、出水口 6 个。首先利用泰森多边形法划分子汇水区, 再根据小区、街道的分布情况进一步调整, 共得到 240 个子汇水区。利用高程数据创建地面模型, 对研究区 2D 计算区间进行网格划分, 同时把建筑和道路网格高程分别提高 5 m 和降低 0.15 m, 以展现其对洪水的阻挡和引导作用。最后将节点类型改为“2D”, 即可实现一维管网汇流和二维地表漫流的耦合计算。

选用 3 场实测降雨数据(表 1)进行参数率定和验证, 这 3 场实测降雨近似等于重现期分别为 1 a、5 a、10 a 一遇的设计降雨。采用传统的人工试错法和综合径流系数法^[14]对模型参数进行率定, 率定完成后 2015 年 7 月 22 日和 2016 年 8 月 5 日场次暴雨下的综合径流系数分别为 0.638 和 0.656, 与《郑州市排水工程规划(2011—2020 年)》中规定的综合径流系数 0.65 较为接近。选用 2016 年 8 月 1 日场次暴雨进行验证, 计算得到综合径流系数为 0.679, 实测积水点与模拟积水点位置基本吻合(图 3), 故认为模型具有一定的可靠性。

表 1 郑州市金水区 3 场实测暴雨数据

Table 1 Measured rainstorm data in Jinshui District, Zhengzhou City

暴雨场次	降雨	降雨	平均雨	雨峰
	历时/min	量/mm	强/(mm·h ⁻¹)	系数
20150722	90	35.0	23.33	0.10
20160805	70	53.5	45.86	0.43
20160801	80	68.5	51.38	0.56

3 内涝模拟结果分析

3.1 管网排水能力评估

在城市排水管网中, 管道超负荷状态 S 为管道内水深占管道高度的比例, 可用来评估管道排水能



图 3 模拟与实测积水点对比

Figure 3 Comparison between simulated and measured ponding points

力。 $0 \leq S < 1$ 代表管道未充满; $S = 1$ 代表管道充满且当前时刻的水力坡度小于等于管道坡度; $S = 2$ 代表管道充满且当前时刻的水力坡度大于管道坡度。可见, 当 $S = 1$ 或 2 时, 管道排水能力不足。

根据 GB 50015—2019《建筑给水排水设计标准》中雨水管道设计标准, 分别模拟重现期为 1 a、2 a、3 a、5 a、10 a、30 a、50 a 一遇的设计暴雨, 并统计不同排水能力的管道长度和占比, 如表 2 和图 4 所示。

表 2 不同排水能力的管道长度占比统计表

Table 2 Statistics of different type pipeline length proportion

管道排水能力	管道长度/m	管道长度占比/%
<1 a 一遇	30 146.6	25.80
1~2 a 一遇	17 566.0	15.03
2~3 a 一遇	10 893.0	9.32
3~5 a 一遇	10 516.5	9.00
5~10 a 一遇	11 730.3	10.04
10~30 a 一遇	13 141.0	11.25
30~50 a 一遇	71 37.2	6.11
>50 a 一遇	15 715.8	13.45

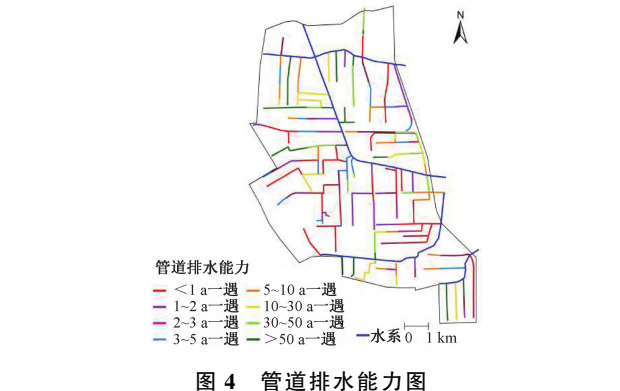


图 4 管道排水能力图

Figure 4 Drainage capacity of pipeline

由图 4 可知, 研究区中南部管道的排水能力较低, 管道排水能力普遍低于 5 a 一遇, 而研究区北部

管道的排水能力良好,排水能力多为 10 a 一遇以上。个别入河管道的排水能力不能抵御 5 a 一遇的降雨,致使其上游管道内雨水不能及时向河流排泄,降低整体管网行洪能力,引发或加重城市内涝。

由表 2 可知,排水能力小于 1 a 一遇的管道占比最大,为 25.80%,其次为 1~2 a 一遇的管道,占比为 15.03%,小于 3 a 一遇的管道占比为 50.15%,所以研究区排水管道主要能够抵御 2 a 一遇的降雨。根据《郑州市排水工程规划(2011—2020 年)》,重要地区的雨水管道设计标准为 3~5 a 一遇,可见研

究区管网排水能力整体较低,应及时对排水能力较低的管道进行养护与修缮,以免极端降雨时造成严重的内涝问题。另外,排水能力大于 30 a 一遇的排水管道占比为 19.56%,主要为入河排水管道,这些管道是城市向外泄洪的主要出口,口径较大,因此排水能力也较强,利于雨洪及时排泄。

3.2 内涝积水特性分析

选取 20 a、100 a 一遇设计暴雨和郑州 2021 年“7·20”为极端暴雨情景。模拟得到城市内涝淹没结果如图 5 所示。

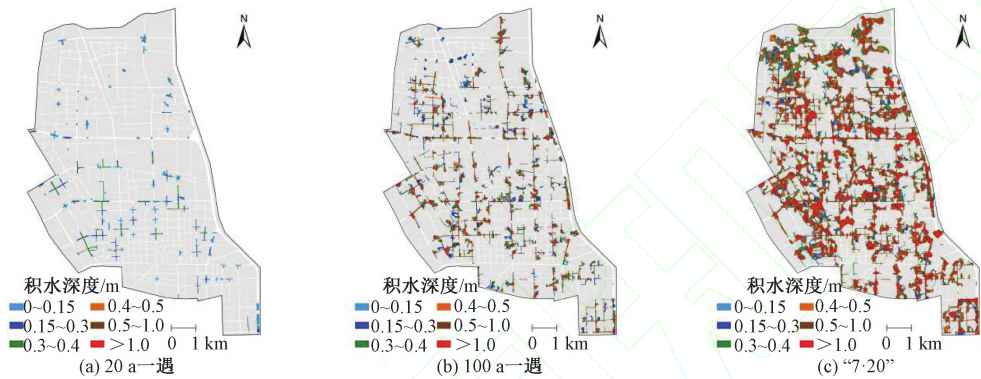


图 5 不同极端暴雨情境下的内涝淹没

Figure 5 Waterlogging area of different extreme rainstorm events

由图 5(a)和图 5(b)可知,在 20 a 一遇情景下,部分区域出现了不同程度的积水,主要集中在研究区南部,个别路段积水深超过 0.3 m。100 a 一遇情景下,积水范围明显比 20 a 一遇情景范围广,南部积水较多,约 68%的路段积水深超过了 0.3 m。结合管网排水能力及下垫面特征可知,北部多为透水率高的裸土和绿地,且雨水可在短时间内就近排入河流,因此北部积水较少;而南部多为不透水的城市路面和建筑,产流速度快且汇流时间短,增加了排水管道内部的水压力,中南部管道排水能力较北部低,因此研究区积水整体呈现出南多北少的分布特征。

由图 5(c)可知,郑州“7·20”情景下,研究区约 86%的路段积水深超过了 0.3 m,致使大面积路网瘫痪,与 20 a 一遇和 100 a 一遇不同的是,北部和河流附近地区的积水较严重。这是由于“7·20”雨量和雨强均较大,使得区内河流水位过高甚至超出地面向附近地区漫溢,北部裸土和绿地蓄滞能力达到极限,再加上房屋布局稀疏,无法阻挡洪流向四周漫流,因而北部积水面积较广。

4 应急响应能力评估

4.1 评估方法

根据不同应急车辆的排气孔高度,将公安(小

型车辆)、医疗(中型车辆)、消防(大型车辆)车辆临界停滞水深(超过该水深,车辆就会熄火)分别设置为 0.3、0.4、0.5 m。研究表明,城市应急最佳救援时间应不超过 10 min^[9],但为了凸显可达范围在不同时段内的变化情况,选取 5、10 和 15 min 作为响应时间范围阈值。采用最快路径法^[15],基于 ArcGIS 网络分析得到城市服务部门在各响应时间阈值下的可达范围,以此评估城市应急响应能力。

根据《郑州市交通工程规划管理技术规定》得到主干路、次干路和支路的最大限速分别为 60、40 和 30 km/h,由行车速度与地面最大积水深度的关系式(7)^[16]设置雨天自由流行车速度。忽略应急车辆受红绿灯等交通规则约束,并假设应急车辆在晴天自由流情景下能达到最大限速。

$$v = \frac{v_{\max}}{2} \tanh\left(\frac{-x + a}{b}\right) + \frac{v_{\max}}{2}。$$

(7)

式中: v 为降雨自由流行车速度,km/h; v_{\max} 为最大限速,km/h; x 为地面最大积水深度,cm; a 为车辆临界停滞水深的中值,cm; b 为降雨衰减系数,一般取 3~5,其值越小速度衰减越快。

4.2 可达范围评估

以服务部门的位置为起点,研究区内随机点为终点,基于 ArcGIS 网络分析功能得到公安、医疗和

消防部门的可达范围如图 6~8 所示。由图 6~8 可知,在晴天和 20 a 一遇情景下,各服务部门响应能力良好,90%以上的区域响应时间小于 15 min。在 100 a 一遇和“7·20”情景下,高强度、大量级的极端降雨不仅大大削弱了车辆的正常行驶速度,更重要的是由极端暴雨积水引发了城市道路交通中断,多数应急响应部门服务能力失效,如,“7·20”情景下,失去响应服务能力的公安、医疗、消防部门个数分别为 13、12、2,对应的占比分别为 65%、71%、25%。

4.3 响应时间评估

分别统计响应时间在 5、10 和 15 min 内的可达范围占比如图 9 所示。由图 9 可知,在晴天和 20 a 一遇情景下,90%以上的区域响应时间小于 15 min,表现出良好的响应能力,但在 100 a 一遇和“7·20”情景下,响应能力普遍较差,个别地区响应时间超过 10 min。在晴天和 20 a 一遇情景下公安部门的响应能力最高,而在 100 a 一遇和“7·20”情景下消防部门的响应能力最高。公安部门的数量最多且分布较均匀但车辆涉水能力低,消防部门的数量最少但车辆涉水能力高,在晴天和 20 a 一遇情景下,淹没面积少,大部分路网可供公安车辆通行,所以公安部门

的响应能力高,而在 100 a 一遇和“7·20”情景下,淹没面积广,消防车辆具有较强的涉水能力,故消防部门应急响应能力较强。由此可见,提高应急车辆涉水能力可有效提升应急响应能力。

4.4 多部门组合下的响应能力评估

不同车辆的涉水能力有所差别,涉水能力较低的车辆在内涝影响下应急响应能力将急剧衰减。当遭遇极端降雨时,城市路网瘫痪严重,采取不同服务部门间联合调度的方式有利于提升城市应急响应能力和减少内涝灾害损失,为此,组合公安、医疗和消防部门并评估其响应能力。

4.4.1 可达范围评估

基于 ArcGIS 网络分析得到公安、医疗和消防组合部门在不同天气状况下的可达范围分布如图 10 所示。由图 10 可知,应急服务部门组合后,晴天和 20 a 一遇情景下的响应时间均在 10 min 以内,具有较好的响应能力,考虑到多部门间联合调度的困难性,以及城市服务资源的过度冗余,在服务部门分布较密集的南部地区,可采取抽调方式,增加部门间协同性。在 100 a 一遇情景下,92%的区域可在 15 min 内得到相应服务,整体响应能力较好,个别地区由于

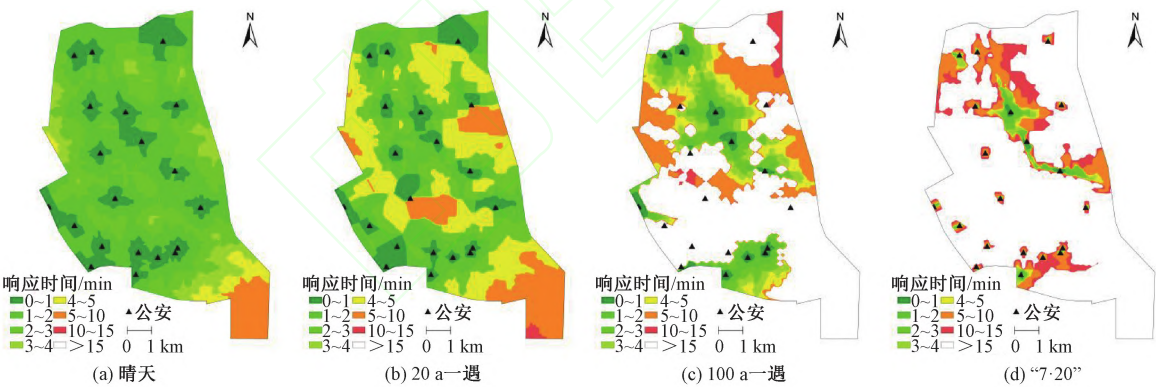


图 6 不同天气状况下公安部门的可达范围

Figure 6 Reachable range of public security department with different extreme rainstorms

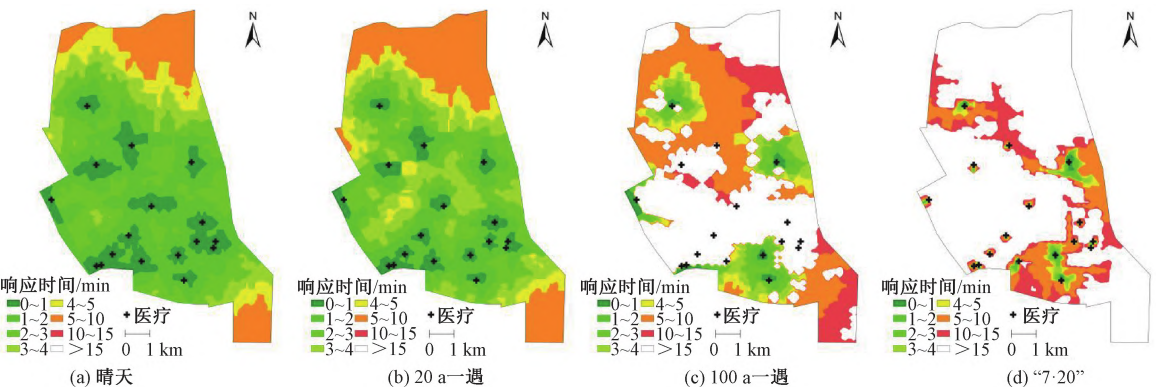


图 7 不同天气状况下医疗部门的可达范围

Figure 7 Reachable range of medical department with different extreme rainstorms

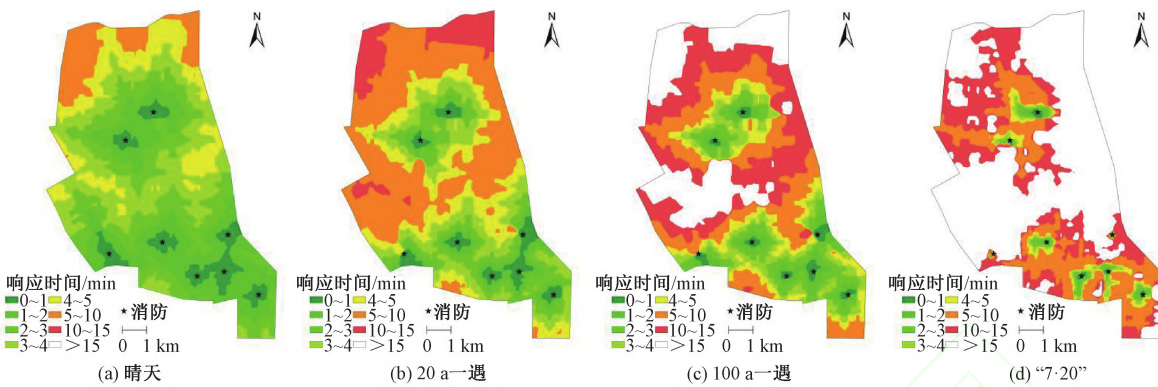


图 8 不同天气状况下消防部门的可达范围图

Figure 8 Reachable range map of fire department with different extreme rainstorms

服务部门分布稀疏而响应时间较长,如研究区北部和中部。“7·20”情景下城市应急响应能力最差,即使在多部门组合下,仍有高达 46% 的区域不能在 15 min 内得到相应服务,这主要是由于“7·20”使得大面积城市路网瘫痪,特别是在中部地区,约 7 家公安部门、7 家医疗部门和 1 家消防部门失去服务能力。因此,在特大暴雨情景下,即使 3 类服务部门联合调度,也不能发挥出较好的应急响应能力。

4.4.2 响应时间评估

定义同一时间阈值下可达范围占比最大的部门为最优部门,分别统计最优部门和公安医疗消防组合部门在不同时间阈值下的可达范围占比,如图 11

所示。由图 11 可知,在各响应时间阈值下,组合部门可达范围占比普遍增加,响应能力显著好转。其中,100 a 一遇的变化最大,5 min、10 min、15 min 内可达区域占比分别增加了 16%、7%、4%;“7·20”分别增加了 9%、6%、4%,20 a 一遇分别增加了 13%、5%、0%。由此可见,无论是何种极端降雨情景,应急响应时间在 5 min 内的可达区域占比增加较快,10 min 内可达区域占比次之,15 min 内可达区域占比增加较缓,可见应急响应能力以服务部门为中心,向四周呈现出由快到慢的衰减规律。总之,多部门联合调度可以缩短响应时间、增大可达范围,是减少内涝灾害的有效措施。

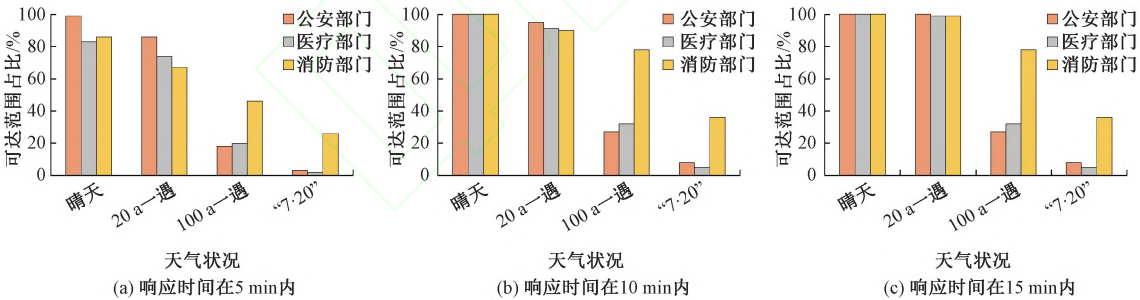


图 9 不同响应时间阈值下可达范围占比统计

Figure 9 Statistics of reachable range proportion with different response time thresholds

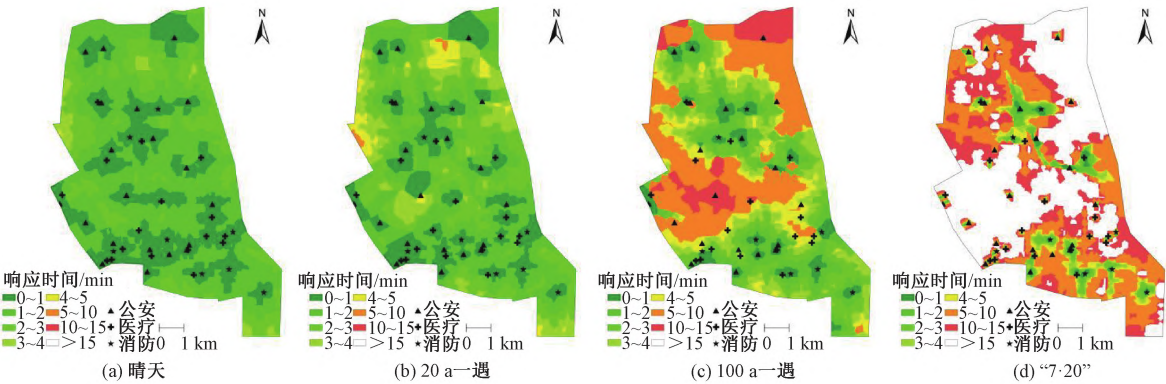


图 10 不同天气状况下应急服务组合部门的可达范围

Figure 10 Reachable range of combined emergency departments with different extreme rainstorms

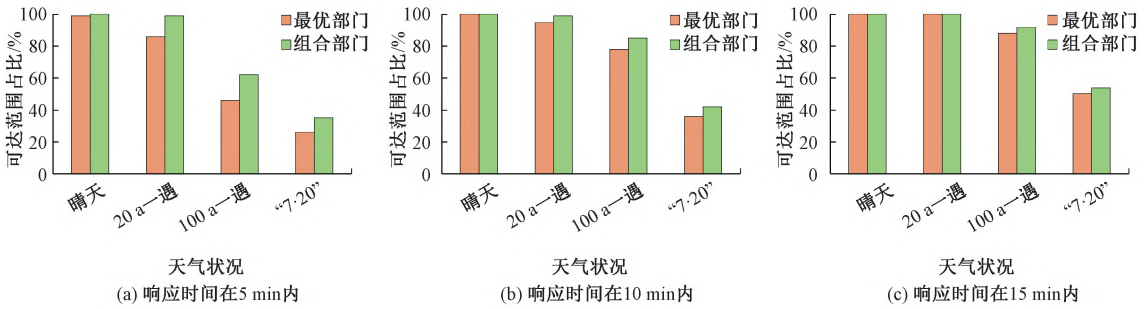


图 11 不同响应时间阈值下可达范围占比统计
Figure 11 Statistics of reachable range proportion with different response time thresholds

5 结论

本文分析了极端暴雨下城市管网排水能力和内涝积水特征,评估了城市应急响应能力,得到如下结论:①管网排水能力整体较低。排水能力<3 a一遇的管道占比为 50.15%,多集中于中南部;②淹没范围与管网排水能力和地表类型有着密切的联系。20 a一遇和 100 a一遇下的积水特征为南多北少,“7·20”下的北部和河流附近地区积水较严重;③车辆涉水能力较高的应急部门在极端暴雨下的响应能力更高。在晴天和 20 a一遇下,90%以上的区域响应时间小于 15 min,100 a一遇和“7·20”下的应急响应能力则较差;④应急部门联合调度可有效提升响应能力。10 a一遇下,组合部门在 5、10、15 min 内可达区域占比较最优部门分别增加了 16%、7%、4%。

参考文献:

[1] 刘家宏,裴羽佳,梅超,等. 郑州“7·20”特大暴雨内涝成因及灾害防控[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 38-45.
LIU J H, PEI Y J, MEI C, et al. Waterlogging cause and disaster prevention and control of "7·20" torrential rain in Zhengzhou[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2): 38-45.
[2] JIANG R G, WANG Y P, XIE J C, et al. Assessment of extreme precipitation events and their teleconnections to El Niño Southern Oscillation, a case study in the Wei River Basin of China[J]. Atmospheric Research, 2019, 218: 372-384.
[3] PRATHIPATI V K, NAIDU C V, KONATHAM P. Inconsistency in the frequency of rainfall events in the Indian summer monsoon season[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(13): 4907-4923.
[4] WU X H, CAO Y R, XIAO Y, et al. Finding of urban rainstorm and waterlogging disasters based on microblogging data and the location-routing problem model of urban

emergency logistics[J]. Annals of Operations Research, 2020, 290(1): 865-896.
[5] DING J Y, CAI J F, GUO G X, et al. An emergency decision-making method for urban rainstorm water-logging: a China study[J]. Sustainability, 2018, 10(10): 3453.
[6] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R/OL]. (2021-01-21) [2022-08-13]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/>.
The State Council of The People's Republic of China. Investigation report of "7·20" catastrophic rainstorm disaster in Zhengzhou, Henan Province[R/OL]. (2021-01-21) [2022-08-13]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/>.
[7] 刘曙光,郑伟强,周正正,等. 极端暴雨下城市地下空间洪涝风险及灾害防控[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, (44)2: 22-29.
LIU S G, ZHENG W Q, ZHOU Z Z, et al. Flood risk and control in urban underground spaces under extreme rainfall[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, (44)2: 22-29.
[8] 俞茜,李娜. 不同降雨特征下低影响开发的降雨径流控制效果研究进展[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 18-21, 9.
YU Q, LI N. Research progress of effects of low impact development on rainfall runoff reduction under different rainfall characteristics[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(8): 18-21, 9.
[9] COLES D, YU D P, WILBY R L, et al. Beyond 'flood hotspots': modelling emergency service accessibility during flooding in York, UK[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 419-436.
[10] ARRIGHI C, PREGNOLATO M, DAWSON R J, et al. Preparedness against mobility disruption by floods[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 1010-1022.
[11] 邵蕊,邵薇薇,苏鑫,等. 基于 TELEMAT-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 60-69.
SHAO R, SHAO W W, SU X, et al. Impact of various

flood scenarios on urban emergency responses times based on the TELEMAC-2D model[J]. Journal of Tsinghua University (Science And Technology), 2022, 62(1): 60-69.

[12] 许拯民, 荆燕燕. 关于城市暴雨强度公式推求的研究[J]. 水文, 2014, 34(3): 53-56.

XU Z M, JING Y Y. Derivation of urban storm intensity formula[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(3): 53-56.

[13] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市洪涝模拟及其风险分析: 以福州市白马河片区为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 784-793.

YE C L, XU Z X, LEI X H, et al. InfoWorks ICM flood simulation and risk analysis: case of Baima River District, Fuzhou [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(6): 784-793.

[14] ZHANG J P, ZHANG H R, FANG H Y. Urban waterlogging simulation and rainwater pipe network system evaluation based on SWMM and SCS method [J]. South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 110-121.

[15] 钟少颖, 杨鑫, 陈锐. 层级性公共服务设施空间可达性研究: 以北京市综合性医疗设施为例[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 731-744.

ZHONG S Y, YANG X, CHEN R. The accessibility measurement of hierarchy public service facilities based on multi-mode network dataset and the two-step 2SFCA: a case study of Beijing's medical facilities[J]. Geographical Research, 2016, 35(4): 731-744.

[16] 杜磊, 杨晓宽. 不同道路积水情况对交通影响及造成损失的研究[C]//第十一次全国城市道路交通学术会议论文集. 大连: 中国土木工程学会, 2011: 389-393.

DU L, YANG X K. Study on traffic impact and loss caused by different road ponding[C]//Proceedings of the 11th National Urban Road Traffic Academic Conference, Dalian: China Civil Engineering Society, 2011: 389-393.

Urban Waterlogging Simulation and Emergency Response Capacity Evaluation with Extreme Rainstorms

ZHANG Jinping^{1,2}, ZHANG Zhaoyang¹, ZUO Qiting^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to explore the impact of extreme rainstorms on urban waterlogging characteristics and emergency response capacity, a urban waterlogging model for a certain area in Jinshui District of Zhengzhou city, was developed based on InfoWorks ICM model, and the drainage capacity and waterlogging characteristics of urban pipe network with extreme rainstorm were analyzed. Application with ArcGIS network analysis module, the emergency reachable range and response time of public security, medical treatment and fire protection departments were evaluated to determine the whole city's emergency response capacity. The results showed that the drainage capacity in the study area was lower wholly, and the proportion of pipes with drainage capacity less than 3 a was 50.15%, which were mostly distributed in the middle and south and could not meet the drainage standard of 3~5 years in important areas. Meanwhile, the inundation area was closely related to the drainage capacity and the underlying characteristics. The accumulated water showed the distribution characteristics of more in the south and less in the north under the larger standard of waterlogging control such as 20 a and 100 a, while more water area appeared in the north and near the river with “7·20” rainstorm. The emergency service department with higher emergency vehicle wading ability owned higher emergency response ability in extreme rainstorm, the fire department had the highest response ability in 100 a and “7·20” rainstorm scenarios, and the reachable area in 10 min accounted for 78% and 36%, respectively. Moreover, the joint multi-department regulation could effectively improve the emergency response capability. For example, compared with the best department(he department with the largest proportion of reachable range with the same time threshold), the emergency reachable area of joint multi-department regulation increased by 16%, 7%, and 4%, respectively in 5, 10, and 15 min with the 100 year rainstorm.

Keywords: extreme rainstorm; urban waterlogging; drainage capacity; reachable area; emergency response time