

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231130004

极端降水事件下城市道路网络级联失效研究*

司志远, 陈章利, 贾玲, 王鹏

(江苏大学土木工程与力学学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 频发的极端降水事件给城市带来严重危害, 道路网络作为城市交通体系的基础, 是灾害疏散和灾后恢复的关键。道路网络中部分节点或路段受降水影响失效中断后会引发一系列连锁效应, 间接加剧城市居民生命财产损失。为了准确评估极端降水事件下城市道路网络级联失效及其影响, 研究在将道路网络交通态势和极端降水情景结合的基础上, 进一步考虑级联失效这一连锁效应。研究基于早晚高峰期、平峰期交通态势数据及交通、医疗和教育基础设施POI数据, 借助“负荷-容量”模型分析极端降水事件下城市道路网络级联失效演变过程及结果。结果表明, 早高峰期间100年重现期极端降水下南京市鼓楼区有292条道路失效中断, 在级联失效模拟下, 88条路段呈现严重拥堵状态, 相比交通与医疗基础设施, 教育基础设施服务范围受极端降水影响最大, 此外, 交通流对三种基础设施服务范围的影响均显著。本研究丰富并发展了极端灾害事件下城市道路网络研究体系, 可用以指导非常规暴雨时期城市防洪应急处置和规划工作。

关键词: 极端降水; 道路网络; 级联失效; 可达性

中图分类号: U491; P426.615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0792-08

Study on Cascading Failures of Urban Road Networks under Extreme Precipitation Events

SI Zhiyuan, CHEN Zhangli, JIA Ling, WANG Peng

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Frequent extreme precipitation events pose severe threats to cities. Road network, as the foundation of the urban transportation system, is crucial for disaster evacuation and post-disaster recovery. Failure and interruptions in certain nodes or sections in the road network due to precipitation can trigger a series of cascading effects, indirectly exacerbating the loss of life and property for urban residents. To accurately assess the cascading failures of urban road networks and their impacts under extreme precipitation events, the study integrated traffic status with extreme precipitation scenarios and further considered the chain reactions of cascading failures. Utilizing traffic status data from both morning and evening peak periods, as well as off-peak periods, along with Points of Interest (POI) data for transportation, medical, and educational infrastructure, the study employed a "load-capacity" model to analyze the evolution process and results of these failures in urban road networks under extreme precipitation events. The results indicated that during the morning peak hours, 292 roads in

* 收稿日期:2023-11-30;修回日期:2024-03-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51908249)、江苏省面上项目(BK20231327)、科技部创新方法专项(2020IM020300)资助

作者简介:司志远(1998—),男,硕士研究生。主要从事区域系统韧性与安全风险研究。E-mail:upesaszy@163.com

通信作者:王鹏(1986—),男,副教授,博士。主要从事区域系统韧性与安全方面的研究。E-mail:upeswp@ujs.edu.cn

Nanjing's Gulou District would fail and become interrupted under a 100-year return period extreme precipitation event. In the cascading failure simulation, 88 road segments exhibited severe congestion. Compared to transportation and medical infrastructure, educational infrastructure services were most affected by extreme precipitation. Additionally, traffic flow significantly impacted the service areas of all three types of infrastructure. The research enriches and advances the research framework for urban road networks under extreme disaster events and provides guidance for urban flood emergency response and planning during non-conventional rainstorms.

Keywords: extreme precipitation; road network; cascading failure; accessibility

0 引言

随着气候变化加剧,频发的极端降水事件给全球生命、基础设施和经济财产带来巨大影响^[1],2021年7·20郑州特大暴雨事件、2023年7·31北京特大暴雨事件均造成了严重的人员伤亡和财产损失^[2]。城市道路网络作为城市关键基础设施系统的重要组成部分,极易受降水影响导致城市基础设施服务中断,间接加剧极端降水事件影响。因此,分析极端降水事件下城市道路网络受损中断情况,探索道路网络的级联失效演变,评估道路网络受损后对城市基础设施服务影响具有重要的现实意义和理论价值。

城市道路网络作为支撑整个道路交通体系的基础,是多种交通方式正常运行的重要保障,更是灾害疏散、灾后恢复工作的关键^[3-6],对城市系统正常运转具有重要作用。在极端降水事件或其他突发性事件影响下,道路网络中部分交叉口和路段发生故障,交通流重新分配后导致其他交叉口、路段发生拥堵或瘫痪,由此引发一系列连锁效应,这一现象被称作级联失效^[7-8]。

当前研究大多借助“负荷-容量”模型,侧重于从网络效率或拥堵程度分析节点受到随机攻击或蓄意攻击后道路网络的级联失效演变^[9-10],有学者从网络的整体效率、连通程度和路段的拥堵程度等多角度探究了城市交通网络在遭受地震破坏后的级联失效后果^[11],但极端降水影响下城市道路网络的级联失效及其影响尚不清晰。有研究通过提出一种基于排序质心(ROC)的CIA-ISM(交叉影响分析和解释结构建模)方法,评估了极端降水条件下地铁系统应急管理的可靠性^[12]。有学者将洪涝情景模拟和城市交通网络分析相结合,评估当前以及未来正常条件和不同重现期洪涝情景下城市关键公共服务部门应急响应的空间可达性,但是并未考虑城市道路网络在遭受极端降水事件影响后的级联失

效演变所带来的进一步影响^[13]。

因此,研究以南京市鼓楼区道路网络为研究区域,进行100年重现期极端降水模拟,基于交通态势数据及交通、医疗和教育基础设施点位数据,借助“负荷-容量”模型,探究极端降水事件下城市道路网络受损中断情况、道路网络级联失效演变,并从道路中断情况、道路拥堵程度及城市基础设施服务可达性三个角度分析极端降水下城市道路网络级联失效后果及影响,研究成果可为中国城市防洪减灾和可持续发展提供决策依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

选取南京市鼓楼区作为研究区域,研究范围西起淮滨路和扬子江大道,东至中央路,北起宝塔桥西街,南至集庆门大街,如图1所示。

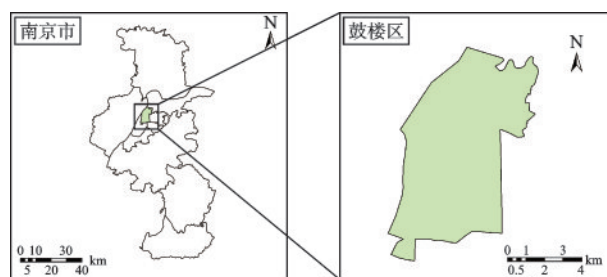


图1 研究区域示意

Fig.1 Study Area

1.2 极端降水模拟

本研究采用100年一遇的极端降水形成的洪水淹没数据。基于《室外排水设计标准》(GB50014—2021)和南京市暴雨强度公式(修订)查算表得出总径流控制率对应的设计降雨量计算方法^[14-15],按下式计算重现期为100年的总降水量,然后使用芝加哥雨型生成器创建两小时的降雨量分布图,如图2

所示。

$$i = \frac{64.300 + 53.800 \lg P}{(t + 32.900)^{1.011}} \quad (1)$$

式中, i 为降雨强度(mm/min); t 为降雨历时(min); P 为重现期(a)。

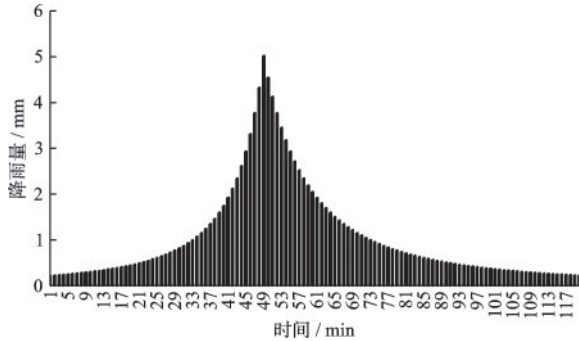


图2 120 min降雨量分布图

Fig.2 120 min rainfall distribution

研究使用二维浅水模型进行洪水水动力模拟。托马斯等提出并建立了SW2D-GPU:由通用图形处理单元加速的二维浅水模型,不仅能完成城市地区洪水模拟,同时能加快降水下的城市洪水模拟速度。因此研究基于路网、DEM、建筑物等高线、行政边界等基础数据构建基础淹没环境,进而利用SW2D-GPU模型模拟重现期100年的南京市鼓楼区降水淹没情况^[16],如图3所示。

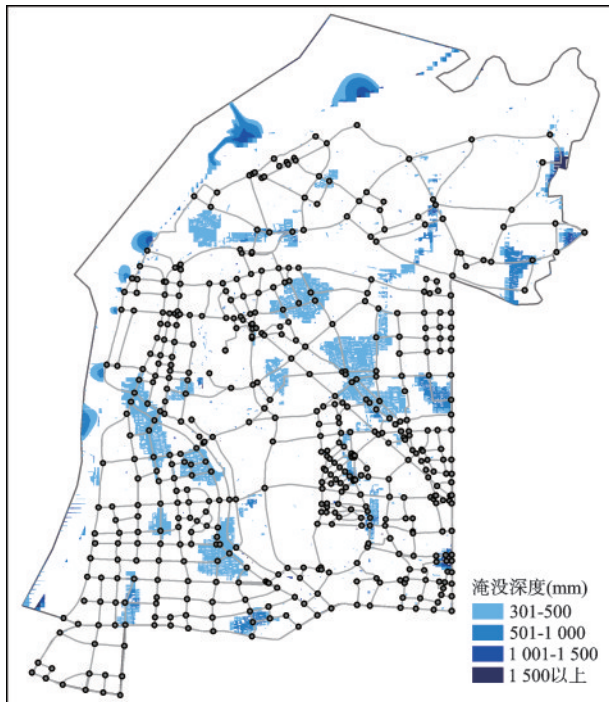


图3 南京市鼓楼区100年重现期下降水淹没模拟结果

Fig.3 Simulation results of flood inundation in Gulou District, Nanjing during 100-year return period

1.3 城市道路网络级联失效过程

当道路有拥堵、施工、事故或恶意攻击等情况发生时,为保证道路网络系统的正常运行,该失效路段的负荷会转移到相邻的路段上。但相邻路段容量受到物理空间以及原有负荷的限制,负荷的转移可能导致相邻路段的负荷超过其承载能力而发生失效,引起新一轮的失效和负荷重分配。往复进行,最终导致道路网络大规模瘫痪。

1.3.1 道路网络建模

以南京市鼓楼区道路网络为对象,对道路网络进行处理后,利用能够体现道路网络实际布局特征的原始法构造网络,以道路交叉口为节点,路段为边,构建无向网络,所构建的道路网络共含有505个节点及806条边,如图4所示。

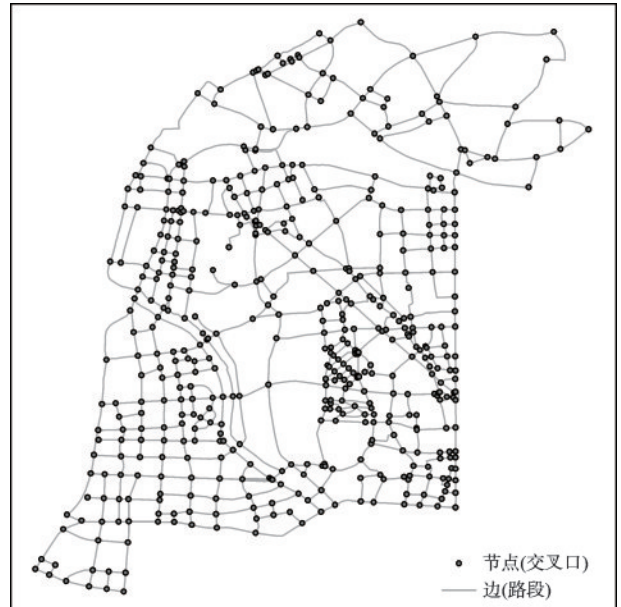


图4 南京市鼓楼区道路网络拓扑图

Fig.4 Road network topology of Gulou District, Nanjing

1.3.2 道路网络交通态势数据及POI数据获取

利用百度地图开放平台实时路况查询接口获取2023年09月26日早高峰08:00时刻、晚高峰18:00时刻、平峰15:00时刻的鼓楼区道路网络交通参数及交通态势情况,如图5所示。

利用百度地图开放平台下载获取鼓楼区交通、教育和医疗基础设施POI数据。其中,交通基础设施主要为公交站及地铁站,教育基础设施主要为学校及科研单位,医疗基础设施主要为医院、急救中心和诊所等,获取的交通基础设施点有312个,教



图5 2023年09月26日鼓楼区交通态势

Fig.5 Traffic status in Gulou District on September 26, 2023

育基础设施点有664个,医疗基础设施点有407个,点位信息如图6所示。

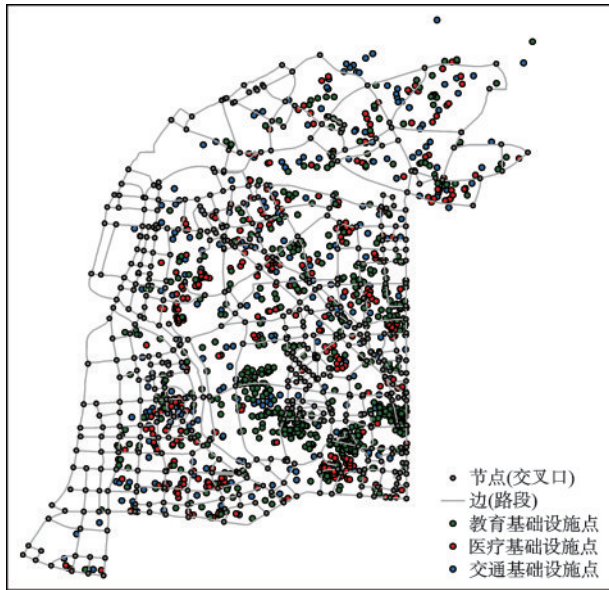


图6 鼓楼区教育、医疗和交通基础设施点分布

Fig.6 Distribution of educational, medical and transportation infrastructure in Gulou District

1.3.3 交通态势数据处理

研究基于百度开放平台获取的交通态势路况评价对各道路进行赋值,作为各路段当前负荷状态。百度开放平台交通态势路况主要分为畅通、缓行、拥堵及严重拥堵4个等级。为了避免对路段负荷的过大估计,对畅通路段进行分情况赋值,具体见表1。

由于鼓楼区属于南京市老城区之一,因此根据国家公路工程技术标准(JTGB01—2003)确定各道路限速,主干道(60 km/h)、二级干线(50 km/h)、三

表1 基于不同交通态势等级赋值表

Table 1 Assignment table based on different traffic status levels

| 交通态势等级 | 简介 | 赋值 |
|--------|----------------|----|
| 无车流 | 道路畅通且相连路段畅通 | 0 |
| 畅通 | 道路畅通但相连路段缓行或拥堵 | 1 |
| 缓行 | — | 2 |
| 拥堵 | — | 3 |
| 严重拥堵 | — | 4 |

级干线的限速每个路段均分配有支线道路(30 km/h)^[17]。考虑到极端降水情况下,驾驶员会根据道路情况降低车速,因此研究将降水下车速上限设定为50%^[18]。基于不同的交通态势等级及路段类型确定的路段速度见表2。

表2 不同道路等级路段数量、车道数及速度

Table 2 Number of road sections, lanes, and speed for different road levels

| 道路等级 | 主要道路 | 次要道路 | 其他道路 |
|------------------------------|------|-------|-------|
| 车道数 | 6 | 4 | 2 |
| 数量/个 | 192 | 108 | 506 |
| 限速/(km·h ⁻¹) | 60 | 50 | 30 |
| 暴雨下速度/(km·h ⁻¹) | 30 | 25 | 15 |
| 无车流或畅通/(km·h ⁻¹) | 30 | 25 | 15 |
| 缓行/(km·h ⁻¹) | 22.5 | 18.75 | 11.25 |
| 拥堵/(km·h ⁻¹) | 15 | 12.5 | 7.5 |
| 严重拥堵/(km·h ⁻¹) | 7.5 | 6.25 | 3.75 |

1.4 道路网络级联失效分析

开展极端降水下道路网络级联失效仿真模拟分析,流程如图7所示。

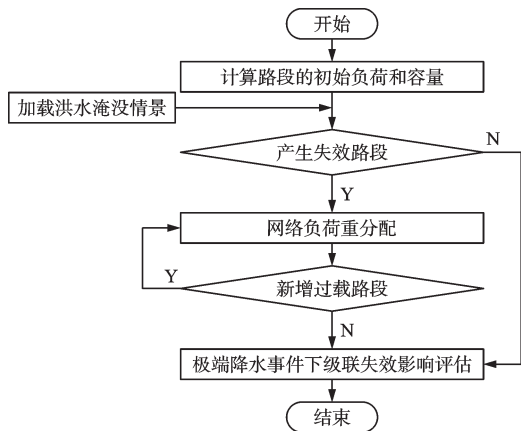


图7 级联失效仿真模拟步骤

Fig.7 Process flowchart of cascading failure simulation

基于道路等级确定路段车道数量,通过下式计算各个路段的负荷及容量。

$$P_j = n_j \times \alpha_j \quad (2)$$

其中, P_j 为路段 j 的初始负荷; n_j 为路段 j 对应的车道数; α_j 为路段 j 对应的交通态势赋值, 当 $\alpha_j=4$ 时, 认为路段负荷达到了上限。

当洪水淹没结果作为攻击加载到道路网络中后, 将淹没深度超过 30 cm 的道路认定为路段失效^[19]。对失效路段进行删除, 并对失效路段的负荷进行重分配。重分配方法为: 首先计算失效路段的交通负荷, 基于道路网络拓扑图、及路况状态和道路网络淹没模拟结果确定所有负荷可移动方向(与该失效路段通过节点相连的未失效路段), 将失效道路负荷基于所有可移动路段的道路长度权重分别加载至对应可移动路段。

对失效路段负荷进行重分配后, 将重分配后路况等级大于 4 的路段认定为过载。对过载道路进行保留, 将超过路段容量的负荷进行重分配。

2 结果与讨论

从道路整体拥堵程度变化、完好设施点数量变化及交通、教育和医疗设施点位可达性变化来反映级联失效前后极端降水对城市道路网络及基础服务范围影响情况。

2.1 极端降水下城市道路网络级联失效结果

将 120 min 积水淹没情景加载到城市道路网络中后, 鼓楼区道路网络有 292 条道路由于积水淹没深度超过 30 cm 而失效。

在此基础上进行早晚高峰以及平峰期道路网络级联失效仿真模拟, 模拟结果见表 3, 模拟分析后道路网络状态如图 8 所示。对比早晚高峰期及平峰期道路网络级联失效仿真模拟结果可发现, 极端降水事件严重影响了道路网络的通行能力。同时极端降水对早高峰期间道路网络影响最大, 对比早晚高峰期以及平峰期发现主要原因是在早高峰期间道路网络中路段总体负载远大于晚高峰以及平峰期间的道路网络路段负载, 因此早高峰期间道路网

表3 级联失效模拟后交通态势等级取值及其数量表

Table 3 Values for traffic status levels and their quantities after cascading failure simulation

| 交通态势等级 | 取值范围 | 早高峰 | 平峰 | 晚高峰 |
|--------|-------|-----|-----|-----|
| 淹没路段 | — | 292 | 292 | 292 |
| 无车流 | 0 | 242 | 144 | 167 |
| 畅通 | (0,1] | 116 | 209 | 161 |
| 缓行 | (1,2] | 94 | 45 | 105 |
| 拥堵 | (2,3] | 72 | 11 | 48 |
| 严重拥堵 | (3,4] | 88 | 7 | 33 |



图8 级联失效后道路网络状态

Fig.8 Road network status after cascading failure

络受到攻击后产生的级联失效影响相对更大。

2.2 极端降水对城市基础设施服务影响分析

将靠近淹没路段的基础设施点设定为失效状态,将靠近正常路段的基础设施点设定为正常状态。在发生极端降水后,鼓楼区内有132个交通基础设施点、276个教育基础设施点和169个医疗基础设施点由于靠近淹没路段而失效。

进一步分析基础设施的可达性,选用1、3、5 min作为节点分析交通、教育和医疗基础设施服务范围变化,研究结果见表4。在正常情况下,交通基础设施1 min内的服务覆盖范围为30.842 km²,1~3 min内为16.26 km²,3~5 min内为5.358 km²,总计52.46 km²。考虑极端降水导致道路网络级联失效后,早高峰期间,1 min内服务范围减少13.711 km²,1~3 min内增加3.333 km²,3~5 min内增加3.876 km²,总计减少6.502 km²;平峰期间分别减少10.953、2.368、1.81 km²,总计减少6.775 km²;晚高峰期间分别减少14.817、2.004、4.051 km²,总计减少7.762 km²。

表4 不同类型设施点降水前后状态及服务范围

Table 4 Status and service areas of different types of facilities before and after precipitation

| 状态 | 类型 | 设施点数量/个 | | 0~1 | 1~3 | 3~5 |
|----------|----|---------|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 正常 | 失效 | min/ km ² | min/ km ² | min/ km ² |
| 初始 | 交通 | 312 | 0 | 30.842 | 16.26 | 5.358 |
| | 教育 | 664 | 0 | 29.758 | 17.409 | 5.411 |
| | 医疗 | 407 | 0 | 25.325 | 20.414 | 6.587 |
| 早高 峰期 | 交通 | 180 | 132 | 17.131 | 19.593 | 9.234 |
| | 教育 | 388 | 276 | 16.057 | 16.036 | 6.259 |
| | 医疗 | 238 | 169 | 13.426 | 19.289 | 12.633 |
| 平峰 期 | 交通 | 180 | 132 | 19.889 | 18.628 | 7.168 |
| | 教育 | 388 | 276 | 18.243 | 14.854 | 6.229 |
| | 医疗 | 238 | 169 | 16.477 | 19.07 | 7.843 |
| 晚高 峰期 | 交通 | 180 | 132 | 16.025 | 19.264 | 9.409 |
| | 教育 | 388 | 276 | 14.781 | 17.375 | 7.021 |
| | 医疗 | 238 | 169 | 13.223 | 20.015 | 11.363 |

正常情况下,教育基础设施1 min内的服务覆盖范围为29.758 km²,1~3 min内为17.409 km²,3~5 min内为5.411 km²,总计52.579 km²。考虑极端降水导致道路网络级联失效后,早高峰期间,1 min内服务范围减少13.701 km²,1~3 min内减少1.373 km²,3~5 min内增加0.848 km²,总计减少14.227 km²;平峰期间分别减少11.515、2.555、

0.818 km²,总计减少13.253 km²;晚高峰期间分别减少14.977、0.034、1.61 km²,总计减少13.402 km²。

正常情况下,医疗基础设施1 min内的服务覆盖范围为25.325 km²,1~3 min内为20.414 km²,3~5 min内为6.587 km²,总计52.326 km²。考虑极端降水导致道路网络级联失效后,早高峰期间,1 min内服务范围减少11.899 km²,1~3 min内减少1.125 km²,3~5 min内增加6.046 km²,总计减少6.978 km²;平峰期间分别减少8.848、1.344、2.256 km²,总计减少7.936 km²;晚高峰期间分别减少12.102、0.399、4.776 km²,总计减少7.725 km²。

将研究结果进行可视化后如图9所示。对比早晚高峰及平峰期的交通、医疗和教育基础设施1 min内服务范围变化,发现三种基础设施服务均明显受交通流影响。其中平峰期所受影响最小,而早晚高峰受影响较大。

进一步对比早晚高峰时段的交通、医疗和教育基础设施服务范围,发现晚高峰时期三种基础设施受影响最大。然而,分析表明,尽管早高峰时期极端降水后严重拥堵和拥堵路段明显多于晚高峰,但由于早高峰的拥堵路段整体较短,对基础设施服务范围影响较小;而晚高峰时期严重拥堵和拥堵路段整体较长,对基础设施服务范围影响较大。

3 结论

(1)极端降水及车流量对鼓楼区道路网络影响较大,在发生100年重现期极端降水时,鼓楼区早高峰期806条道路中有292道路因积水淹没失效,在进行级联失效模拟后,88条路段变成严重拥堵状态。

(2)相比交通与医疗基础设施,教育基础设施服务范围受极端降水带来的影响最大,同时三种基础设施服务范围均受交通流影响较大。

(3)对比研究早晚高峰期极端降水后交通态势及基础设施服务范围后发现,整体拥堵路段的长度对基础设施服务范围影响更大。

(4)文中仅将100年重现期下降水120 min后的淹没情景直接加载到城市道路网络中进行道路网络级联失效模拟,在未来的研究中将考虑加载随时间变化下的淹没深度情景分析,探究更加真实的极端降水下城市道路网络级联失效变化及其影响。

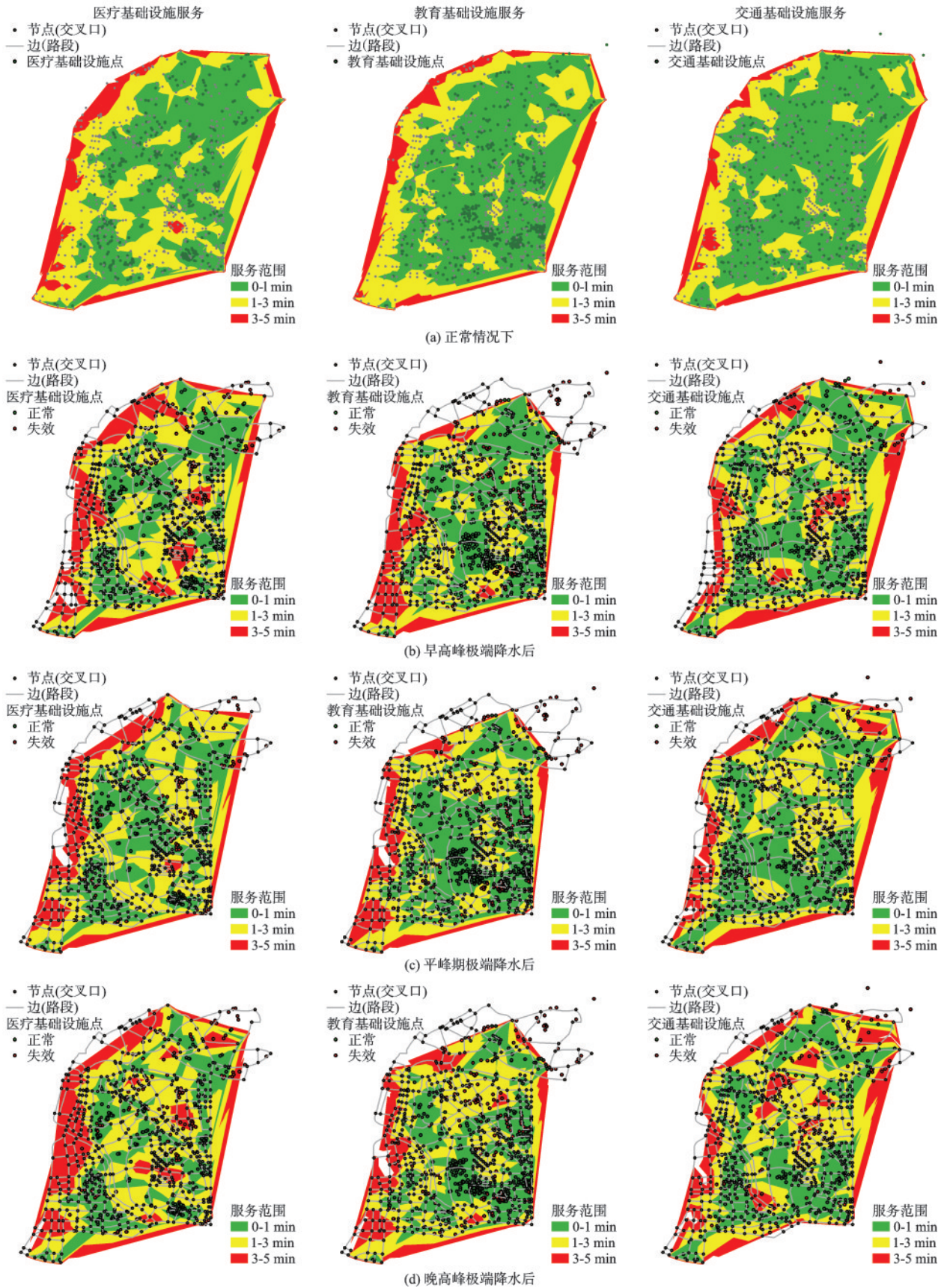


图9 不同类型设施点降水前后状态及服务范围

Fig.9 Status and service areas of different types of facilities before and after precipitation

参考文献:

- [1] Dave R, Subramanian S S, Bhatia U. Extreme precipitation induced concurrent events trigger prolonged disruptions in regional road networks [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(10): 104050.
- [2] Wang Z, Jiang B, Wang X, et al. Psychological challenges and related factors of ordinary residents after “7.20” heavy rainstorm disaster in Zhengzhou: a cross-sectional survey and study [J]. *BMC psychology*, 2023, 11(1): 1-13.
- [3] Dong S, Yu T, Farahmand H, et al. Probabilistic modeling of cascading failure risk in interdependent channel and road networks in urban flooding [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102398.
- [4] 陈孟飞, 林兆丰. 城市复杂道路网络及抗毁性研究 [J]. *黑龙江交通科技*, 2023, 46(4): 51-54.
Chen M F, Lin Z F. Study on urban complex road network and its invulnerability [J]. *Communications Science and Technology Heilongjiang*, 2023, 46(4): 51-54. (in Chinese)
- [5] Ardekani S A. Management of urban road networks following man-made or natural disasters [J]. *WIT Transactions on The Built Environment*, 2005, 82: 6.
- [6] Ma F, Liu F, Kum F Y, et al. Cascading failures and vulnerability evolution in bus-metro complex bilayer networks under rainstorm weather conditions [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(3): 329.
- [7] 郑长江, 陶童统, 陈志超. 基于流量可调重分配的级联失效模型 [J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*: 1-9 [2023-10-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230306.1124.001.html>.
Zheng C J, Tao T T, Chen Z C. Cascading failure model based on adjustable redistribution of traffic flow [J/OL]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*: 1-9 [2023-10-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230306.1124.001.html>. (in Chinese)
- [8] Dong S, Gao X, Mostafavi A, et al. Modest flooding can trigger catastrophic road network collapse due to compound failure [J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 38.
- [9] 万蔚, 黄雨晨, 王振华, 等. 突发状况下的道路网络故障演化分析——以通州区道路网络为例 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(11): 14-20, 40.
Wan W, Huang Y C, Wang Z H, et al. Evolution analysis of road network faults under emergency conditions: taking Tongzhou urban road network as an example [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2019, 38(11): 14-20, 40. (in Chinese)
- [10] 李树彬, 林兆丰, 孔祥科, 等. 城市公交网络级联失效分析 [J]. *山东建筑大学学报*, 2023, 38(5): 105-113.
Li S B, Lin Z F, Kong X K, et al. Cascading failure analysis of urban public transit network [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2023, 38(5): 105-113. (in Chinese)
- [11] 何祥, 袁永博, 张明媛. 城市交通系统地震级联失效研究 [J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(6): 79-86.
He X, Yuan Y B, Zhang M Y, et al. Cascading failure of urban traffic system under earthquake [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(6): 79-86. (in Chinese)
- [12] Yang Z, Dong X, Guo L. Scenario inference model of urban metro system cascading failure under extreme rainfall conditions [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 229: 108888.
- [13] 殷杰, 许世远, 经雅梦, 等. 基于洪涝情景模拟的城市公共服务灾害应急响应空间可达性评价——以医疗急救为例 [J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 1737-1747.
Yin J, Xu S Y, Jing Y M, et al. Evaluating the impact of fluvial flooding on emergency responses accessibility for a mega-city's public services: A case study of emergency medical service [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1737-1747. (in Chinese)
- [14] 室外排水设计标准: GB 50014—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [15] 暴雨强度公式(修订) [S]. 南京: 北京世纪千府国际工程设计有限公司江苏分公司, 2014.
- [16] Carlotto T, Chaffe P L B, dos Santos C I, et al. SW2D-GPU: A two-dimensional shallow water model accelerated by GPGPU [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 145: 105205.
- [17] 公路工程技术标准: JTGB01—2003 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [18] Wu Q, Han Z, Cui C, et al. Vulnerability identification and cascading failure spatiotemporal patterns on road network under the rainstorm disaster [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11: 564.
- [19] Yin J, Yu D P, Yin Z N, et al. Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intraurban road network: a case study in the city center of Shanghai, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 138-145.
(本文编辑: 赵霞)