

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.02.001

基于知识图谱的城市洪涝灾害链推演及时空特性解析

王 浩^{1,2}, 杜 伟³, 刘家宏^{1,2}, 王 佳^{1,2}, 梅 超^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 水利部数字孪生流域重点实验室(筹), 北京 100038; 3. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要:城市洪涝灾害具有链式传播特性, 解析城市洪涝灾害链的传递规律和时空演变特征对于阻断灾害链具有重要意义。本研究以郑州“7·20”特大暴雨洪涝灾害中地铁5号线被淹和京广快速路隧道被淹2个事件为案例, 构建知识图谱揭示灾害链传递规律。通过复盘灾害链的演变过程, 从中识别灾害链中的诱发点、引爆点、扩散点以及放大点, 并着重分析致灾机理以及灾害链的时空特性, 以灾害曲线形式直观展示不同灾害链的影响程度。郑州“7·20”洪涝灾害典型案例解析表明, 两事件存在多个灾害链阻断时机, 在救灾过程中应综合考虑灾前、灾中因素的影响, 果断采取断链措施, 并且要充分发挥应急措施的时效性, 及时阻断引爆点和扩散点, 降低洪涝灾害损失。该方法能够应用于链式灾害的复盘, 指导分析具体事件的致灾机理和救灾切入点。

关键词:城市洪涝; 灾害链; 知识图谱; 灾害链传递; 灾害链推演; 时空特性

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)02-0185-12

城市洪涝灾害是当代全球广泛关注的重大挑战之一^[1]。城市化进程加快、气候变化以及基础设施老化等问题的逐渐加剧, 使得城市洪涝发生的频率和严重程度不断上升^[2-4]。城市洪涝灾害以及引起的一系列次生灾害构成城市洪涝灾害链, 其威胁程度远高于单一灾害^[5-7]。城市洪涝不仅对经济和社会造成巨大损失, 也严重威胁着人民的生命安全^[8-9]。例如, 2023年7月29日20时至8月2日7时, 北京市遭遇历史罕见特大暴雨, 近129万人受灾, 因灾死亡33人, 失踪18人^[10-11]; 2021年7月河南省洪灾造成省内1478.6万人受灾, 死亡、失踪398人, 直接经济损失高达1200.6亿元, 其中郑州市死亡、失踪380人, 占全省95.5%, 直接经济损失409亿元, 占全省34.1%^[12]。郑州市地铁5号线被淹事件和京广快速路隧道被淹事件受灾严重且具有典型的链式传播特性。郑州市地铁5号线全线被水淹没, 造成14人死亡, 5人受伤^[13]; 京广快速路隧道内及其附近被淹车辆共247辆, 6人遇难。城市洪涝频率与强度的不断增加, 导致城市洪涝链生灾害风险加剧^[14]。城市防汛部门需采取更有效的措施降低灾害链带来的损失^[15-16]。

明晰灾害链的时空特性能够有效提高洪涝预警和响应的有效性, 降低洪涝灾害发展过程的不确定性^[17], 为断链措施提供有效的切入点, 指导灾中应急措施。Chen等^[18]基于分层建模理论, 提出了一种自上向下的复杂灾害链演化过程建模方法, 实现了复杂灾害链的语义描述; Wang等^[19]将暴雨强度、环境因素和次生地质灾害形成过程作为输入变量, 逐步计算了次生地质灾害的危害值, 发现次生地质灾害的特征可以反映灾害链放大破坏的特点; 张社荣等^[20]提出基于统一场景的重力坝极端动力灾害链传递混合模拟方法, 根据包括洪水灾害在内的灾害链传递连续性模拟, 能够获取洪水流量、流速等灾害损失评估参数及洪灾仿真预演视景。总体来看, 目前针对灾害链的研究偏重于解析灾害链的因果关系和逻辑结构, 缺乏对整个灾害链时空特性的分析, 预警的时效性和精准性不足, 在指导公众有效避险时效率不高^[16-20]。城市洪涝灾害链推演涉及复杂的事件传递关系, 知识图谱是一种反应实体关系的语义网络, 因此, 可通过知识图谱以多个三元组的形式来描述灾害链各事件的属性关系^[21], 直观展示灾害链中各环节的致灾方式, 推演链式传递过程。

收稿日期: 2023-09-15; 网络出版日期: 2024-02-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240203.1910.002>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3090600); 国家自然科学基金资助项目(52192671)

作者简介: 王浩(1953—), 男, 北京人, 中国工程院院士, 从事水文水资源方面研究。E-mail: wanghao@iwhr.com

通信作者: 刘家宏, E-mail: liujh@iwhr.com

本文首先梳理典型城市洪涝链生灾害事件，分析城市洪涝灾害链传递规律。在此基础上，基于知识图谱分析郑州“7·20”特大暴雨洪涝灾害中地铁5号线被淹和京广快速路隧道被淹2个主要事件的因果关系以及时空特性，剖析灾害链阻断措施面临的主要瓶颈，提出灾害链断链总体思路，为提高城市洪涝预警及时性和响应有效性提供基础支撑。

1 典型城市洪涝事件灾害链特性分析

灾害链由致灾因子、孕灾环境和承灾体等构成^[22]。其中，承灾体的灾害损失具有多种表现形式，包括可预见、不可预见、有形、无形、经济损失、非经济损失等^[23-24]。分别从公众生命安全和经济财产安全2个角度来分析国内外典型洪涝事件的灾害链特性，如表1所示。

表 1 典型洪涝事件灾害链特性
Table 1 Typical flood disaster chain characteristics

洪涝灾害事件 (日期)	洪涝灾害类型 (致灾因子)	承灾体	新闻报道实例(孕灾环境)	分类	死亡失踪人数 或经济损失
韩国首尔洪灾 (2022-08-07)	暴雨洪涝、山洪(日 降水量 380 mm)	设施中的人	地下室被淹、山体滑坡(居住环境、地形地貌)	人员	20 人
		交通系统、设施、经济	地铁被淹、文物损失、市场店铺受灾(交通环境、公共场所环境)	财产	约 28 ~ 56 亿元
美国肯塔基洪灾 (2022-07-28)	暴雨洪涝(日降水量 135 mm)	设施中的人	房屋被毁、山洪、泥石流	人员	37 人
		交通道路、设施、经济	部分社区淹水严重、桥梁被毁(交通环境、居住环境)	财产	3.3 万个家庭和企业断电
巴基斯坦洪灾 (2022-06-09)	暴雨洪涝 (多月暴雨)	交通道路及设施中的人	道路受困、房屋倒塌、山谷遇害(交通环境、居住环境、地形地貌)	人员	约 1 695 人
		交通道路、设施、经济	桥梁损毁、房屋损坏、电力切断、灾民经济援助(交通环境、居住环境)	财产	超 2 139 亿元
南非夸祖鲁-纳塔尔省洪灾(2022-04-08)	暴雨洪涝(日降水量 138.6 mm)	设施中的人	房屋倒塌、河流潮涨(居住环境、地形地貌)	人员	513 人
		交通道路、设施、经济	桥梁摧毁、基电设施受损、货运停止(交通环境、公共场所环境)	财产	约 21 亿元
澳大利亚昆士兰洪灾(2022-02-28)	暴雨洪涝 (多轮暴雨)	设施中的人	数千所房屋被毁(居住环境)	人员	23 人
		交通道路、设施、经济	道路淹没、房屋淹没、供应链危机(交通环境、居住环境)	财产	超 71 亿元
马来西亚洪灾 (2021-12-16)	暴雨洪涝(太平洋台风季)	交通道路及设施中的人	道路受困、房屋坍塌(交通环境、居住环境)	人员	59 人
		交通道路、设施、经济	道路损坏、房屋毁坏、灾民转移(交通环境、居住环境)	财产	约 81 ~ 100 亿元
飓风艾达引发美国洪灾(2021-09-01)	暴雨洪涝(日降水量 181.1 mm)	交通系统及设施中的人	车坠入深洞、设施通风不足中毒、洪水淹没(地形地貌、公共场所环境)	人员	95 人
		交通系统、设施、经济	地铁淹没、建筑物倒塌、断电一周(交通环境、公共场所环境)	财产	约 8 244 ~ 12 370 亿元

续表

洪涝灾害事件 (日期)	洪涝灾害类型 (致灾因子)	承灾体	新闻报道实例(孕灾环境)	分类	死亡失踪人数 或经济损失
郑州市洪灾 (2021-07-20)	暴雨洪涝、山洪、 溃坝洪水(日降水量 624.1 mm)	交通系统及设施中的人	地铁受困、车间爆炸、山洪(交通环境、公共场所环境、地形地貌)	人员	398 人
		交通系统、设施、经济	隧道车辆被淹、地下空间受淹、工厂停工(交通环境、公共场所环境)	财产	直接经济损失 1 200.6 亿元
欧洲洪灾 (2021-07-14)	暴雨洪涝(日降水量 150 mm)	设施中的人	建筑物坍塌(居住环境)	人员	395 人
		交通道路、设施、经济	垃圾和洪水填满隧道、建筑物坍塌、大面积停电(交通环境、公共场所环境)	财产	214 亿元
日本洪灾 (2020-07-03)	暴雨洪涝(几乎全月 降雨)	设施中的人	养老院被淹、洪水导致决堤(居住环境、地形地貌)	人员	82 人
		交通道路、设施、经济	桥梁损毁、房屋损毁、停电(交通环境、公共场所环境)	财产	无单独报道
伊朗洪灾 (2019-03-17)	暴雨洪涝、溃坝洪水(多轮暴雨)	交通道路及设施中的人	高速公路上的暴洪、房屋倒塌(交通环境、居住环境)	人员	超 70 人
		交通道路、设施	道路淹没、设施破坏(交通环境、公共场所环境)	财产	超 23 亿元
台湾省洪灾 (2018-08-23)	暴雨洪水、山洪(日 降水量 131 mm)	交通中的人	汽车对撞、自撞电线杆(交通环境)	人员	3 人
		交通道路、设施、经济	县道坍方、电线杆毁坏、停航(交通环境)	财产	无单独报道
日本西部洪灾 (2018-07-05)	暴雨洪涝、山洪(日 降水量 300 mm)	设施中的人	住宅损毁、泥石流、山体滑坡(居住环境、地形地貌)	人员	236 人
		交通系统、设施、经济	铁路停运、住宅损毁、工厂被破坏(交通环境、居住环境、公共场所环境)	财产	超 130 亿元
寿光洪灾 (2018-08-19)	暴雨洪涝、溃坝洪 涝(日降水量 222 mm)	交通道路及设施中的人	开车溺亡、多村庄被淹(交通环境、居住环境)	人员	16 人
		交通道路、设施、经济	房屋被淹、叶菜类农产品涨价(居住环境)	财产	92 亿元
甘肃省洪灾 (2018-07-09)	暴雨洪涝、山洪(累 积雨量 达 200 ~ 250 mm)	设施中的人	房屋被毁, 发生山洪人被冲入洪水(居住环境、地形地貌)	人员	20 人
		交通道路、设施、经济	公路塌方受损、房屋倒塌、电力中断(交通环境、居住环境、公共场所环境)	财产	81.8 亿元

灾害链特性主要表现为交通环境脆弱性、居住环境易涝性以及经济活动受阻等方面，在城市区域主要的损失类型包括经济损失和人员损失。经济财产安全方面，极端降雨导致交通设施破坏、交通中断、生命线设施中断等，产生直接经济损失，而交通的中断不可避免地会影响当地经济活动，产生间接经济损失^[25]。交通环境、居住环境、公共场所环境等都构成经济财产安全的孕灾环境。人员损失方面，交通系统中的道路、桥涵、隧道以及生命线设施被淹可能威胁公众生命安全，例如，郑州“7·20”期间京广快速路隧道受淹曾导致 6 人溺亡的不幸事件；生命线设施方面的供水、供电中断等也会对居民的生命健康造成影响。此外，房屋

坍塌/被淹、地下室/地铁等易涝设施被淹，也是造成人员损失的重要原因^[26-27]。基于以上分析，城市洪涝威胁公众生命安全的主要孕灾环境是交通环境和居住环境。在交通系统中，人群作为承灾体通过地铁、驾车等方式出行，与致灾因子相遇引发洪涝灾害损失；在居住场所中，致灾因子将受灾人群居住的各种场所转变为孕灾环境，威胁公众生命安全。

2 城市洪涝灾害链知识图谱构建

Neo4j 作为一种知识图谱的图数据库，提供优化的关系遍历执行算法，具有多种驱动语言支持，并且用户界面友好、数据语义描述丰富，已被使用在构建灾害链网络、分析致灾机理等相关研究中^[28-30]。通过 Neo4j 的 Match 语句可实现灾害链知识图谱的绘制。知识图谱所需数据来自国务院灾害调查组的《河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告》^[12]。

2.1 郑州地铁 5 号线被淹灾害链

将灾害链中模式层构建分为灾害属性、灾害链中事件、灾害链外事件、断链措施以及事件属性 5 类，构建了灾害链知识图谱。灾害的属性主要考虑灾害构成属性，即致灾因子、承灾体、孕灾环境等；灾害链中事件是灾害链的传播节点，比如配电设施被淹、列车迫停等经济损失以及由此链式引发的人员伤亡；灾害链外事件是加剧灾害损失的关键因素，例如违规设计或停运指令延迟发布，这些链外事件影响着灾害链能否传递以及灾害损失的大小；断链措施是阻断灾害链传播的方式，例如采取应急方案、及时救援；事件属性描述事件的属性值，主要涉及灾害链中事件、灾害链外事件以及断链措施的发生时间。其中灾害链外事件与断链措施都可分为灾前、灾中两部分分析。由图 1 可知，洪灾发生后，灾前因素会影响灾前、灾中断链措施的有效性，导致应急响应迟缓，难以发挥原有的减灾效果；而灾中因素会降低防汛部门救援效率而加剧灾情。此事件灾害链链式影响复杂，涉及因素多，断链难度大，而灾前的预防措施覆盖面广，能够有效降低潜在风险，是限制灾损的有效防汛方式。

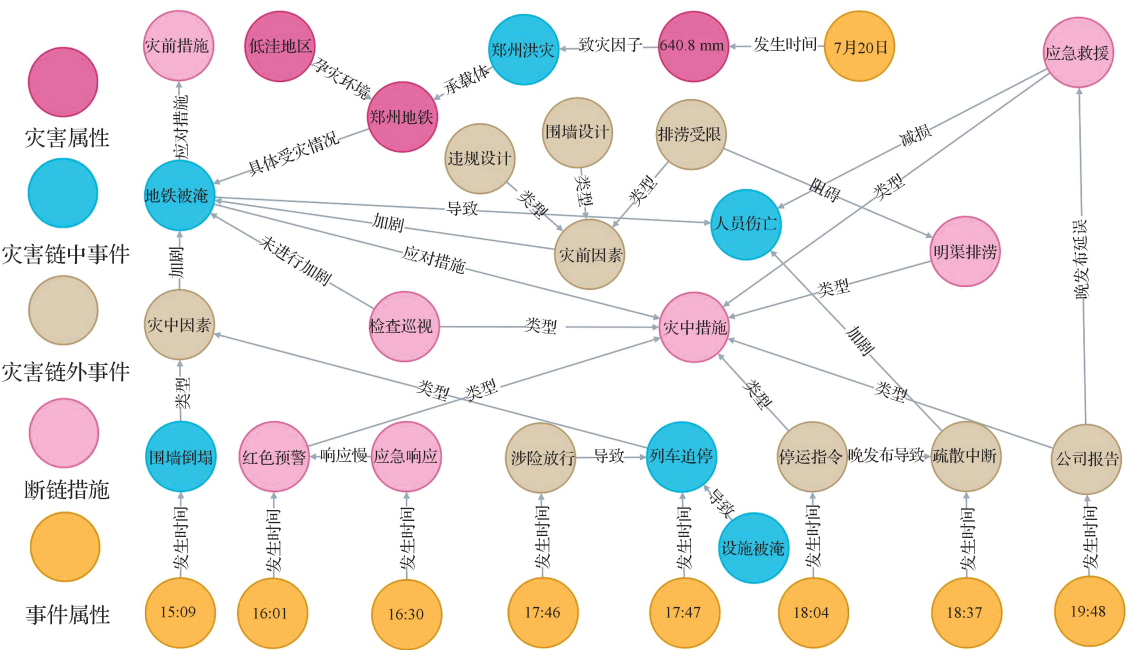


图 1 郑州地铁 5 号线灾害链知识图谱

Fig. 1 Knowledge graph of the disaster chain of Zhengzhou metro line 5

2.2 京广快速路隧道被淹灾害链

由图 2 可知, 郑州京广快速路隧道淹没事件中, 极端降雨作为致灾因子使隧道淹没而产生孕灾环境, 人和车辆作为主要承灾体由于车辆拥堵难以转移, 最终产生灾害损失。因此, 灾害损失加剧的原因是灾中断链措施未采取或采取不及时, 具体表现为车辆拥堵在隧道中难以疏导。京广快速路隧道区域附近被淹车辆共 247 辆, 其中隧道周边道路 142 辆, 这表明隧道内外都存在拥堵情况且拥堵时间长, 在灾害链传播过程中交通疏导难度愈发增加。

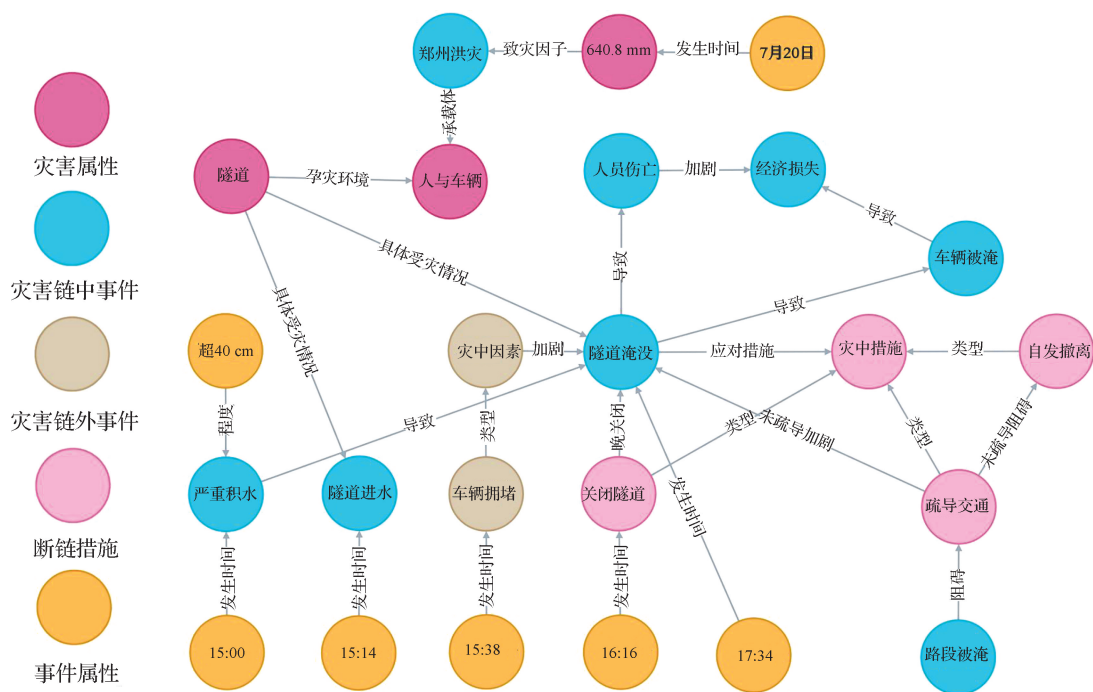


图2 郑州京广快速路隧道灾害链知识图谱

Fig. 2 Knowledge graph of disaster chain of the Beijing-Guangzhou expressway tunnel in Zhengzhou

3 城市洪涝灾害链推演及时空特性解析

时空特性分析能够还原灾害链中各事件的“时间先后顺序”和“相对位置关系”，实现灾害演变过程复盘，从而提供采取有效断链措施的时间区间和空间位置，指导应急响应措施。

3.1 城市洪涝灾害链推演

从知识图谱中抽离出与灾害链链式传递相关的核心节点开展灾害链推演。根据各事件对后续的具体影响,可分为诱发点、引爆点、扩散点以及放大点。诱发点为诱发一系列洪涝灾害的根本原因,多为城市洪涝原生灾害的起始端;引爆点为引发城市洪涝风险并极大增加灾害损失的单元,即将原本有风险但无灾损的承灾体转化为有灾损的承灾体,引爆潜在风险的单元;扩散点为引发已形成洪涝灾害一系列次生灾害的单元;放大点为扩大城市洪涝灾害链已有损失的单元。

郑州地铁 5 号线被淹事件灾害链推演如图 3 所示。暴雨产生的洪水是灾害链的诱发点。随着诱发点产生的洪涝灾害风险的不断提高,郑州市气象局截至 16:01 已发布了 5 次预警信息,此时若能采取相应措施,可避免引爆点的产生,但因未按照预案及时响应错过了预警时效性最有效的阶段。灾害链被引爆后,产生“多米诺效应”,灾害损失爆发式增长,出现扩散点和放大点,在事件中表现为“应急方案未启动”以及“停运指

令发布不及时”导致地铁放行，从而加剧灾害损失。在灾害演变的 13 个事件节点中，灾害链中扩散点和放大点数量都为 6 个，占比最高。其中，扩散点多向传播，引发次生灾害，增加承灾体种类与数量；而放大点进一步加剧灾害损失。并且扩散点和放大点表现出“叠加”的特性。比如道路被淹、地铁被淹事件，既是扩散点，又是放大点，既增加灾害链的复杂性，又加剧灾害损失程度。

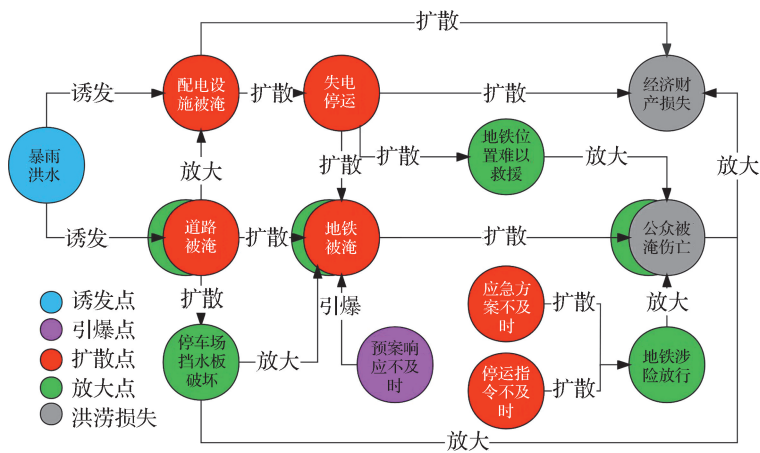


图 3 郑州地铁 5 号线灾害链推演

Fig. 3 Derivation of the disaster chain in Zhengzhou metro line 5

郑州京广快速路隧道被淹事件灾害链推演如图 4 所示。暴雨产生的洪水是灾害链的诱发点，随着致灾因子强度提高，道路与隧道形成积水，车辆难以通行。因此，疏导交通不及时是此次事件的引爆点。车辆拥堵无法快速缓解，隧道内车辆无法驶出，隧道被淹时受灾车辆难以及时驶离。“车辆拥堵、交警无法到达、交通疏导不及时”3 部分之间存在“循环放大效应”，在采取措施阻断灾害链前，随着隧道内淹没水深的不断上升，交通疏导的有效性愈发降低，车辆拥堵情况将更加严重，交警也难以到达现场疏导交通。在“循环放大效应”中放大点不断加剧引爆点严重程度，使得救灾工作难以开展，救灾难度显著提高。

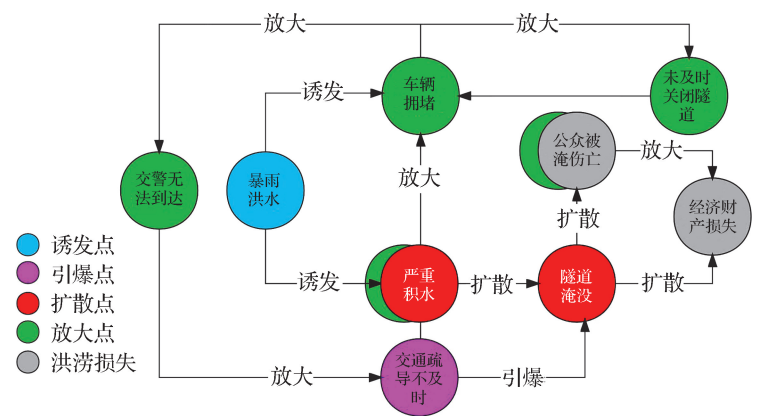


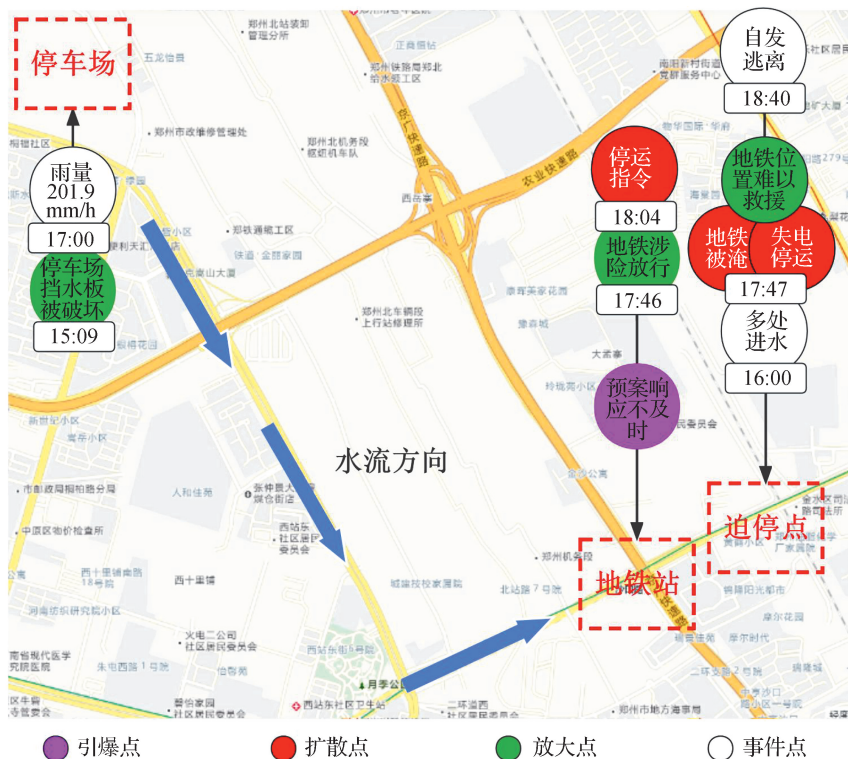
图 4 郑州京广快速路隧道灾害链推演

Fig. 4 Derivation of the disaster chain of the Beijing-Guangzhou expressway tunnel in Zhengzhou

综合分析，两事件诱发点都是暴雨引发的洪水，导致道路和隧道积水、交通受阻，成为潜在的灾害源，并且未及时采取相应的措施成为引爆点。两事件的扩散点和放大点存在表现差异：地铁事件中，承灾体种类更多，灾害链主要通过传播扩散增加灾害损失；而在隧道被淹事件中，车辆拥堵、交警无法到达、交通疏导不及时形成“循环放大效应”，灾害链主要通过放大灾害链某一节点增加损失。

3.2 灾害链时空特性解析

图5展示了郑州地铁5号线事件灾害链的时空特性。从时间特性分析,15:09 五龙口停车场大门挡水板被冲毁,雨洪水灌入停车场;16:00—17:00 郑州市中心城区1 h降水量达到201.9 mm^[31],雨洪水冲毁停车场围墙,灌入地铁隧道,使得17:47 地铁失电停运、列车被淹且位置难以救援;18:04 地铁公司发布停运指令,避免灾害损失加剧;18:40 乘客打开车门自发逃离,因水流太大太急一度退回车内。当地消防部门和医务人员接到救援消息后,立即展开救援行动。直至21:00 左右,成功救出500 多人,尽管救援及时,但仍有14 人死亡,5 人受伤^[32]。从空间特性分析,中心城区洪涝灾害易损性较强^[33],洪水灌入地铁隧道后,沙口站和海滩寺之间开始积水;当列车离开站台,进入两站台间积水地段后,退行约30 m 时列车失电迫停,但位置标高相较于原位置却低了75 cm,进一步提高灾害风险。结合2 个特性分析,17:00 前地铁事件存在潜在风险,17:00 后的极端降雨作为致灾因子极大提高了灾害扩大化的概率。地铁被淹后,人作为主要承灾体,被迫置于难以救援的孕灾环境,使得潜在风险转化为实际损失。断链措施最有效的切入点位于15:09 停车场大门挡水板被冲毁前后。停车场挡水板冲毁前,可根据预警信息实施预案,开展检查巡视;停车场挡水板冲毁后,立刻开展有效的应急处置,包括排查风险、列车停运、乘客疏散等措施。



注：迫停点为地铁被迫停止的位置点

图5 郑州地铁5号线灾害链时空特性

Fig. 5 Spatial-temporal characteristics of the disaster chain in Zhengzhou metro line 5

图6展示了郑州京广快速路隧道事件灾害链的时空特性。从时间特性分析,3条隧道进水时间并不集中,北隧道15:14首先进水,16:00左右中隧道、南隧道进水;16:20中隧道匝道大面积进水,并向南北两侧漫延;这导致3条隧道被淹的时间点集中在17:30左右;而车辆拥堵于15:38左右开始,此时车辆已经受到隧道内积水影响,到中隧道匝道大面积进水期间42 min,理论上存在阻断灾害链的可能性。但此次洪灾涉及区域广,多个区域均需要交警疏导受淹路段交通,防汛部门或交通部门难以及时响应。从空间特性分析,整个隧道北低南高,积水首先在北隧道开始,且北隧道的淹没水深大于其他2条隧道;此后的大面积积水发

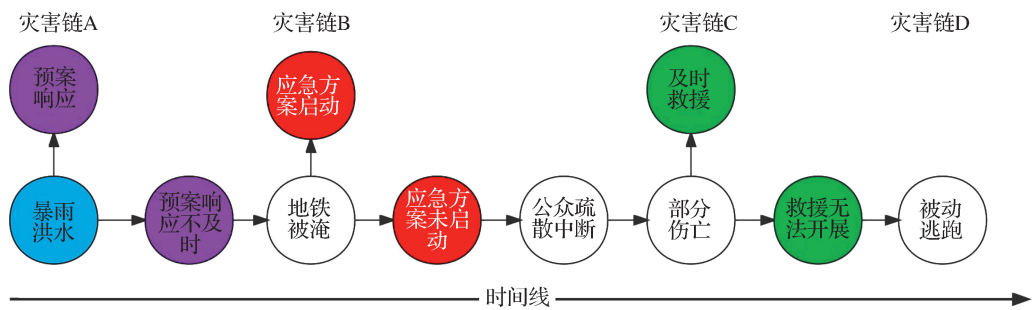


图 7 多情景灾害链模拟推演假设

Fig. 7 Simulation assumption of multi-scenario disaster chain

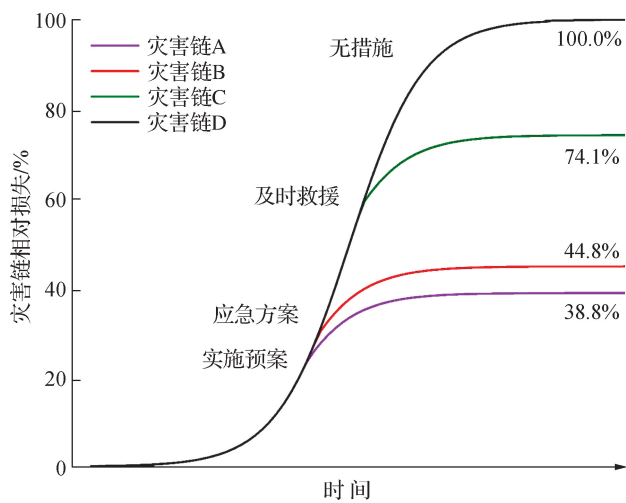


图 8 多情景灾害链模拟综合损失曲线

Fig. 8 Comprehensive loss curve simulated in multi-scenario disaster chain

图 8 中, 当控制引爆点后, 根据《国家城市轨道交通运营突发事件应急预案》, 将采取现场疏散、乘客转运等多种应急响应措施, 之后扩散点和放大点无法损害已经脱离孕灾环境的承灾体, 可有效控制灾害损失发展。随着断链措施不断滞后, 洪涝灾害在链式传播中不断叠加放大, 扩散点会产生新的扩散点或放大点, 灾害损失持续加剧。

在灾害链演变过程中, 要发挥应急管理制度在洪涝灾害中的指导作用, 在有效的预警和响应范围内采取断链措施, 优先按照预案响应等措施避免灾害链引爆点的产生。随着采取断链措施时间的滞后, 扩散点和放大点涉及的承灾体数量和种类增多, 开展全面救灾工作的难度愈发增加, 此时应以生命安全为优先项, 阻断相关的扩散点, 采取应急措施避免人员伤亡。

5 结 语

本文首先通过梳理典型城市洪涝灾害链事件, 识别了交通道路、交通系统、生命线设施等主要承灾体及其灾害链传递和损失特性。其次, 以郑州“7·20”特大暴雨洪涝灾害中地铁 5 号线被淹事件、京广快速路隧道被淹事件为案例, 提出了诱发点、引爆点、扩散点以及放大点等灾害链关键节点, 基于知识图谱分析了灾害链的因果关系和逻辑结构, 结果表明在救灾过程中应综合考虑灾前、灾中因素的影响, 避免应急响应措施

迟缓,防控引爆点和扩散点,从而降低洪涝灾害损失;在此基础上,解析了 2 个案例的灾害链时空演变特性,识别了阻断灾害链的有效切入点。最后,以郑州地铁 5 号线被淹事件为例,推演了 4 种可能的灾害链发展场景,提出了不同应急响应时间和灾害链阻断措施影响下的综合损失参考曲线,为城市洪涝灾害链阻断提供科技支撑。下一步,在本研究基础上加强灾害链损失的量化分析,为城市洪涝灾害链的动态评估和阻断提供更多的数据基础。

参考文献:

- [1] 张红萍,李敏,贺瑞敏,等. 城市洪涝模拟应用场景及相应技术策略[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 452-461. (ZHANG H P, LI M, HE R M, et al. Application scenarios and corresponding technical strategies of urban flood modeling[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 452-461. (in Chinese))
- [2] O'DONNELL E C, THORNE C R. Drivers of future urban flood risk[J]. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2020, 378(2168): 20190216.
- [3] MA Y, CUI Y T, TAN H G, et al. Case study: diagnosing China's prevailing urban flooding: causes, challenges, and solutions [J]. Journal of Flood Risk Management, 2022, 15(3): e12822.
- [4] PARK K, LEE M H. The development and application of the urban flood risk assessment model for reflecting upon urban planning elements[J]. Water, 2019, 11(5): 920.
- [5] 刘永志,唐雯雯,张文婷,等. 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 20-27. (LIU Y Z, TANG W W, ZHANG W T, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 20-27. (in Chinese))
- [6] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. 水科学进展, 2023, 34(2): 172-181. (LIU J H, MEI C, LIU H W, et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 172-181. (in Chinese))
- [7] LIU W, HE S M. Dynamic simulation of a mountain disaster chain: landslides, barrier lakes, and outburst floods[J]. Natural Hazards, 2018, 90(2): 757-775.
- [8] LI Y, ZHOU W H, SHEN P. Flood risk assessment of loss of life for a coastal city under the compound effect of storm surge and rainfall[J]. Urban Climate, 2023, 47: 101396.
- [9] WANG H L, HU Y X, GUO Y, et al. Urban flood forecasting based on the coupling of numerical weather model and stormwater model: a case study of Zhengzhou City[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 39: 100985.
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 王小杰,夏军强,董柏良,等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 196-207. (WANG X J, XIA J Q, DONG B L, et al. Simulation of urban flood using the SWMM with the hierarchical catchment partition method[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 196-207. (in Chinese))
- [12] 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[R/OL]. (2022-01-21)[2023-05-10]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/202201/P020220121639049697767.pdf>. (Ministry of emergency management of the People's Republic of China. Investigation report on “7·20” rainstorm disaster in Zhengzhou City, Henan Province[R/OL]. (2022-1-21)[2023-5-10]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/202201/P020220121639049697767.pdf>. (in Chinese))
- [13] ZHENG Q, SHEN S L, ZHOU A N, et al. Inundation risk assessment based on G-DEMATEL-AHP and its application to Zhengzhou flooding disaster[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 86: 104138.
- [14] TOM R O, GEORGE K O, JOANES A O, et al. Review of flood modelling and models in developing cities and informal settlements: a case of Nairobi City[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 43: 101188.
- [15] QI W C, MA C, XU H S, et al. A comprehensive analysis method of spatial prioritization for urban flood management based on source tracking[J]. Ecological Indicators, 2022, 135: 108565.
- [16] ZANG Y W, MENG Y, GUAN X J, et al. Study on urban flood early warning system considering flood loss[J]. International

- Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 77: 103042.
- [17] GU Y, CHEN Y B, SUN H Z, et al. Remote sensing-supported flood forecasting of urbanized watersheds: a case study in Southern China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(23): 6129.
- [18] CHEN Y J, ZHANG J, ZHOU A C, et al. A modeling method for a disaster chain: taking the coal mining subsidence chain as an example[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2018, 24(5): 1388-1408.
- [19] WANG Q Y, HOU J D. Hazard assessment of rainstorm-geohazard disaster chain based on multiple scenarios[J]. Natural Hazards, 2023, 118(1): 589-610.
- [20] 张社荣, 张耀飞, 王超, 等. 基于统一场景的重力坝极端动力灾害链传递混合模拟方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 1-9. (ZHANG S R, ZHANG Y F, WANG C, et al. Hybrid simulation method of extreme dynamic disaster chain transfer for gravity dams based on unified scene[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 1-9. (in Chinese))
- [21] 杜志强, 李钰, 张叶廷, 等. 自然灾害应急知识图谱构建方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1344-1355. (DU Z Q, LI Y, ZHANG Y T, et al. Knowledge graph construction method on natural disaster emergency[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1344-1355. (in Chinese))
- [22] LI C L, SUN N, LU Y H, et al. Review on urban flood risk assessment[J]. Sustainability, 2022, 15(1): 765.
- [23] 高凯, 杨志勇, 高希超, 等. 城市洪涝损失评估方法综述[J]. 水利水电技术, 2021, 52(4): 57-68. (GAO K, YANG Z Y, GAO X C, et al. A review of the evaluation methods of urban flood loss[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(4): 57-68. (in Chinese))
- [24] 王宝华, 付强, 谢永刚, 等. 国内外洪水灾害经济损失评估方法综述[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 95-99. (WANG B H, FU Q, XIE Y G, et al. A review on evaluation method of economic loss of flood in the world[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(3): 95-99. (in Chinese))
- [25] DING W, WU J D. Interregional economic impacts of an extreme storm flood scenario considering transportation interruption: a case study of Shanghai, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 88: 104296.
- [26] WAN MOHTAR W H M, ABDULLAH J, ABDUL MAULUD K N, et al. Urban flash flood index based on historical rainfall events[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 56: 102088.
- [27] 郭元, 王路瑶, 陈能志, 等. 极端降水下的城市地表-地下空间洪涝过程模拟[J]. 水科学进展, 2023, 34(2): 209-217. (GUO Y, WANG L Y, CHEN N Z, et al. Simulation of the flood process in urban surface-underground space under extreme rainfall[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 209-217. (in Chinese))
- [28] 王浩学, 王兴隆. 基于 Neo4j 的语言学术语知识图谱构建研究[J]. 中国科技术语, 2023, 25(3): 18-26. (WANG H X, WANG X L. Graph construction of linguistic term knowledge based on Neo4j[J]. China Terminology, 2023, 25(3): 18-26. (in Chinese))
- [29] 朱海铭, 林广发, 张明锋, 等. 基于灾害风险普查知识库的台风灾害链知识图谱构建[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 1-12. (ZHU H M, LIN G F, ZHANG M F, et al. Construction of typhoon disaster chain knowledge graph based on disaster risk survey knowledge base[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 1-12. (in Chinese))
- [30] 许强, 崔圣华, 黄维, 等. 面向工程地质领域的滑坡知识图谱构建方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1601-1615. (XU Q, CUI S H, HUANG W, et al. Construction of a landslide knowledge graph in the field of engineering geology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(10): 1601-1615. (in Chinese))
- [31] LI Y, YE S S, WU Q Z, et al. Analysis and countermeasures of the "7·20" flood in Zhengzhou[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2023, 22(6): 3782-3798.
- [32] YANG H, ZHAO L S, CHEN J. Metro system inundation in Zhengzhou, Henan Province, China[J]. Sustainability, 2022, 14(15): 9292.
- [33] WU Z N, SHEN Y X, WANG H L. Assessing urban areas' vulnerability to flood disaster based on text data: a case study in Zhengzhou City[J]. Sustainability, 2019, 11(17): 4548.
- [34] 阎沁琳, 杜二虎, 郑春苗. 城市洪涝灾害应急疏散模拟及其效率-公平权衡分析[J]. 水科学进展, 2023, 34(3): 409-417. (YAN Q L, DU E H, ZHENG C M. Urban flood emergency evacuation simulation and its efficiency-fairness tradeoff analysis[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(3): 409-417. (in Chinese))

- [35] DONG B L, XIA J Q, LI Q J, et al. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: case study of the “7 · 20” flood event in Zhengzhou, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 80: 103205.
- [36] 陈敏建, 周飞, 马静, 等. 水害损失函数与洪涝损失评估[J]. *水利学报*, 2015, 46(8): 883-891. (CHEN M J, ZHOU F, MA J, et al. Water-induced disaster damage function and flood and water-logging damage assessment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(8): 883-891. (in Chinese))

Derivation and transmission analysis of urban flood disaster chain based on knowledge graph*

WANG Hao^{1,2}, DU Wei³, LIU Jiahong^{1,2}, WANG Jia^{1,2}, MEI Chao^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources(Preparation), Beijing 100038, China*; 3. *Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

Abstract: Urban flood disasters exhibit chain-like propagation characteristics, and analyzing the transmission laws and spatiotemporal evolution features of urban flood disaster chains is of significant importance for disrupting the disaster chain. This study aims to use two events from the “7 · 20” unprecedented heavy rain and flood disaster in Zhengzhou—the flooding of metro line 5 and the flooding of the Beijing- Guangzhou expressway tunnel—as case studies. A knowledge graph was constructed to reveal the transmission laws of the disaster chain. By reviewing the evolution process of the disaster chain, triggering points, detonation points, diffusion points, and amplification points within the disaster chain were identified. The study focused on analyzing the disaster-causing mechanisms and spatiotemporal characteristics of the disaster chain, presenting the impact levels of different disaster chains in the form of disaster curves. Analysis of typical cases of the “7 · 20” flood disaster in Zhengzhou indicates that there were several chances to break the disaster chains in both events. In the disaster relief process, the influence of pre-disaster and in-disaster factors should be comprehensively considered, and decisive measures should be taken to break the chain. It is crucial to fully leverage the timeliness of emergency measures, promptly block detonation and diffusion points, and reduce losses from flood disasters. This method can be applied to the retrospective analysis of chain-like disasters, guiding the analysis of the disaster-causing mechanisms and entry points for disaster relief in specific events.

Key words: urban flooding; disaster chain; knowledge graph; disaster chain propagation; disaster chain deduction; spatiotemporal characteristics

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3090600) and the National Natural Science Foundation of China (No. 52192671).