

中文引用格式:周思聪. 基于复杂网络的长沙市内涝灾害链传播阻断机制[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12): 230–237.

英文引用格式:ZHOU Sicong. Propagation blocking mechanism of urban waterlogging disaster chain in Changsha based on complex network [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 230–237.

# 基于复杂网络的长沙市内涝灾害链 传播阻断机制\*

周思聪<sup>1,2</sup>高级政工师

(1 湖南安全技术职业学院 对外交流合作处, 湖南 长沙 410151;

2 国家矿山安全监察局湖南局安全培训中心, 湖南 长沙 410151)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.0210

**【摘要】** 为揭示城市内涝灾害链的跨系统级联传播机制并提升阻断效能, 首先, 基于复杂网络理论构建排水系统与交通系统的耦合网络模型, 整合高精度地形数据、实时交通流量及历史涝情数据; 然后, 采用动态级联失效算法, 量化节点中心度与连接边脆弱性, 解析“暴雨-径流-积水-交通瘫痪”的跨系统传播路径; 最后, 提出关键节点加固、冗余路网优化、智能响应协同的三级韧性阻断策略。结果表明: 泵站扩容与路网冗余设计可以有效减少渍水面积、缩短交通中断时长, 有助于提升城市关键基础设施的系统韧性与主动免疫能力, 推动城市防灾体系从被动应急转向主动免疫。

**【关键词】** 复杂网络; 城市内涝; 灾害链; 级联失效; 阻断

## Propagation blocking mechanism of urban waterlogging disaster chain in Changsha based on complex network

ZHOU Sicong<sup>1,2</sup>

(1 Office of International Exchange and Cooperation, Hunan Vocational Institute of Safety Technology, Changsha Hunan 410151, China; 2 Hunan Bureau of National Mine Safety Administration Safety Training Center, Changsha Hunan 410151, China)

**Abstract:** To uncover the cross-system cascading propagation mechanism of urban waterlogging disaster chains and enhance blocking effectiveness, a coupled drainage-traffic network model was first constructed based on complex network theory, integrating high-precision topographic data, real-time traffic flow, and historical flooding records. A dynamic cascading-failure algorithm was then employed to quantify node centrality and link vulnerability, thereby dissecting the cross-system propagation path from “rainstorm-runoff-ponding-traffic paralysis”. Finally, a three-level resilience blocking strategy—critical-node reinforcement, redundant-road-network optimization, and intelligent-response coordination—is proposed. The results show that pump-station expansion and redundant road design can effectively reduce waterlogged area and shorten traffic-interruption duration. And this enhances the system resilience and proactive immunity of critical urban infrastructures. It shifts the disaster-prevention paradigm from passive emergency

response to active immunity.

**Keywords:** complex networks; urban waterlogging; disaster cascade; cascading failure; blocking

0 引言

随着极端天气事件的频发和城市化进程加速,城市内涝灾害链式效应对城市安全构成严峻挑战,尤其是城市内涝与交通系统的耦合风险,对城市建设和经济社会可持续发展造成了严重影响<sup>[1]</sup>。近年来,城市内涝防治水平呈波动上升趋势,但基础设施与应急响应仍是关键瓶颈<sup>[2]</sup>;暴雨内涝可致道路交通系统机能骤降超 50%,亟需动态量化其安全韧性<sup>[3]</sup>。文献[4]显示,2020 年,长沙梅溪湖事件中,暴雨引发“管网溢流-交通中断-社区瘫痪”级联灾害,直接经济损失超亿元,暴露出现有研究的核心缺陷,即传统模型虽能模拟单一排水环节,却忽视交通瘫痪对应急资源阻滞效应,导致防控策略滞后实际灾情演化 3 h 以上;长沙主城区 60.4%的排水管网设计重现期低于 3 年,远低于当前城市开发强度所对应的暴雨强度,这意味着同等降雨条件下管网更易超载溢流。叠加城市化地表硬化导致的径流量激增,积水深度迅速抬升,道路通行能力随之骤降,最终放大“暴雨-径流-积水-交通瘫痪”的跨系统级联风险。因此,亟需突破单灾种静态分析局限,揭示上述跨系统动态耦合机制。

诸多学者针对“物理-社会”协同刻画上的阶段性局限开展了研究,相关文献包括 2 条路径,①侧重物理过程的高精度模拟,如梁鑫等<sup>[5]</sup>以暴雨洪水管理模型耦合显卡加速的地表水及其伴随输移过程模型的地表水动力模块,显著提升了地形淹没预测精度。②尝试引入复杂网络或主体建模方法探讨社会系统响应,如王国成等<sup>[6]</sup>利用基于主体的建模方法揭示了主体异质性对应急行为的影响;姜波等<sup>[7]</sup>则利用贝叶斯网络构建暴雨应急决策框架。然而,上述 2 条路径仍存在共同缺陷,前者未能将交通-排水等关键基础设施的拓扑结构与级联失效机制量化,后者亦缺乏对高中心性节点“风险放大器”效应的定量刻画典型案例显示,一旦泵站等枢纽失效,下游社区在 2 h 内瘫痪的概率高达 82%<sup>[8]</sup>。

鉴于此,笔者拟构建排水-交通复杂耦合网络模型,通过拓扑中心性(度中心性/介数中心性)与边权脆弱性(排水负荷比、道路通行权重)双指标,量化关键基础设施拓扑结构及级联失效动态传播过程,并基于高中心性节点失效概率精准刻画“风险

放大器”效应;进而提出关键节点加固-冗余路网-智能响应三维防控策略,动态阻断灾害链跨系统扩散,推动治理从被动应对转向主动免疫,以期为长江中下游城市提供可复制的量化决策框架。

1 城市内涝灾害链传播机制模型构建

1.1 技术路线图

采用“数据驱动-模型耦合-策略验证”的技术框架,如图 1 所示。

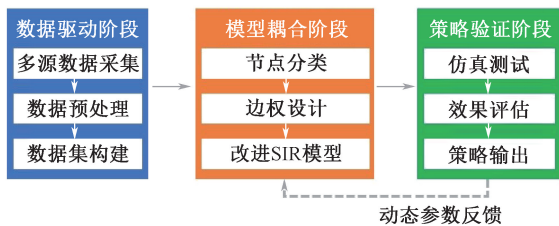


图 1 技术路线图  
Fig.1 Technical roadmap

图 1 中,在数据驱动阶段,通过整合长沙市高精度地形数据、实时交通流量及历史内涝案例,并经数据清洗、插补与标准化,构建多源融合数据集;在模型耦合阶段,基于复杂网络理论构建排水-交通耦合网络,建立边权动态计算模型量化灾害链传播机制;在策略验证阶段,采用改进“易感者-感染病者-康复者”模型(Susceptible-Infected-Removed, SIR)仿真暴雨-内涝-瘫痪的级联过程,评估“关键节点阻断-冗余路径优化-智能响应协同”三级策略的防控效果,并输出优化方案。虚线箭头表示动态参数的迭代机制,确保技术路线的可追溯性与方法论的严谨性。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 空间数据

1) 数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据。通过长沙市自然资源与规划局获取分辨率为 5 m 的 DEM 数据,用于提取地表坡度、汇水区边界及低洼区域分布。数据预处理包括坐标系统(WGS84 转 CGCS2000)、地形曲率计算及洼地填充。

2) 排水管网地理信息系统(Geographic Information System, GIS)图层。整合长沙市水务局提供的排水管网矢量数据(管径、流向和检查井位置)及市政部门雨水管网设计标准(重现期介于 1~50 年)。通过拓扑检查修正管线连接错误,并基于

GIS 生成管网拓扑网络。

3) 交通路网。采用 OpenStreetMap 软件提取长沙市主干道与次干道路网,结合高德地图实时交通流量数据(工作日/节假日模式),划分道路通行能力等级,如主干道通行能力为 1 200 辆/h,次干道为 800 辆/h。

1.2.2 属性数据

1) 泵站排水能力。基于长沙市水务局公开的泵站设计流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )与实际运行记录(如年久失修导致的效率衰减系数),结合气象局历史降雨数据(2020 年 7 月湘江流域暴雨事件),校准泵站负荷阈值。

2) 历史积水点记录。整合 2016—2023 年长沙市 12345 热线投诉数据与市政应急响应报告,提取

高频积水点(如开福区湘雅路、雨花区万家丽路段)的空间分布与积水深度( $0.3 \sim 1.2 \text{ m}$ )数据信息,通过核密度分析识别内涝风险热点区域。

3) 数据标准化。采用 Min-Max 归一化与 Z-score 标准化结合的方法标准化处理数据,消除量纲差异;并通过  $K$  最近邻算法( $K$ -Nearest Neighbors, KNN)插补( $k=5$ )与专家经验补充(如老旧管网参数)缺失值。

1.3 网络拓扑结构定义

1.3.1 节点分类与功能

节点分类依据其在灾害链中的功能属性划分为源节点  $S$ 、传导节点  $C$ 、终端节点  $T$ ,具体定义与灾害传导逻辑见表 1。

表 1 灾害链节点分类与功能

Table 1 Classification and functions of nodes in disaster chain propagation

| 节点类别 |           | 属性                | 示例                                                                                     | 功能描述                                      |
|------|-----------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $S$  |           | 降雨强度、历时、空间分布模式    | 气象网格( $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ )输入芝加哥雨型数据                                    | 模拟极端降雨的时空异质性,为灾害链触发提供初始驱动条件               |
| $C$  | 排水井 $C_1$ | 最大排水能力、实时流量/设计负荷率 | 湘江新区望城坡泵站设计流量 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ ,实时流量 $18 \text{ m}^3/\text{s}$ (负荷率 120%)触发溢流 | 反映管网系统超载临界点,失效后导致上游积水无法排出,形成“暴雨-超载-溢流”灾害链 |
|      | 河道 $C_2$  | 水位阈值、堤防高程、漫溢风险等级  | 浏阳河某段堤防高程 $36.5 \text{ m}$ ,水位超 $36.2 \text{ m}$ 时倒灌风险激增                               | 河道排水能力饱和时成为跨区域灾害扩散枢纽,引发倒灌风险               |
| $T$  | 社区 $T_1$  | 人口密度、建筑抗涝等级       | 雨花区湘府路某社区地下室占比 30%,积水超 $0.5 \text{ m}$ 时渗水风险                                           | 积水引发基础设施损毁(如供电中断),形成“积水-社会瘫痪”终端灾害链        |
|      | 医院 $T_2$  | 救护车调度容量、备用电源覆盖率   | 三甲医院应急通道状态监测                                                                           | 节点失效直接削弱应急救援能力(如救护车无法调度),加剧灾害社会影响         |

表 1 中,从功能属性和灾害链传导路径 2 个维度定义节点分类, $S$  直接关联暴雨输入,是灾害链的触发起点; $C_1$ 、 $C_2$  通过排水超载或河道倒灌将风险逐级放大,如  $C_1$  或  $C_2$  等均会引发区域性灾害的扩散; $T_1$ 、 $T_2$  聚焦社会系统脆弱性, $T_1$  与  $T_2$  分别对应基础设施损毁和应急能力丧失,标志着灾害链的最终影响。示例为长沙市望城坡泵站、湘府路社区数据。

1.3.2 边权重设计

在复杂网络模型中,边的权重设计用于量化节点间的交互强度与风险传导能力,具体分为 2 类。

1) 排水管网边  $E_1$ 。将权重  $W_{E_1}$  定义为管道设计排水能力  $Q_D$  与当前实际排水流量  $Q_C$  的比值( $W_{E_1} = Q_D/Q_C$ )。 $W_{E_1}$  反映管道排水能力的负荷状态。 $Q_D$  为管网的理论最大流量, $Q_C$  为实时流量。当  $Q_C > Q_D$  时, $W_{E_1} < 1$ ,表明实际流量超出设计上限,管网超载,触发溢流事件。比值越小(如  $W_{E_1} =$

$0.5$ ),超载程度越高(实际流量为设计值的 2 倍),溢流风险急剧上升。该机制通过量化超载临界点,动态评估管网失效风险,并基于此设定灾害链阻断的阈值。

2) 道路通行边  $E_2$ 。采用分段函数形式,以积水深度  $d$  为自变量、道路通行能力为因变量,建立非线性映射关系:

$$W_{E_2} = \begin{cases} 1 & d \leq 0.3 \text{ m} \\ 0.5 \cdot \exp(-0.7 d/\text{m}) & 0.3 \text{ m} < d \leq 0.5 \text{ m} \\ 0 & d > 0.5 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $W_{E_2}$  为道路通行边权重,表征积水对通行能力的动态影响; $d$  为积水深度,  $\text{m}$ ,  $d/\text{m}$  为无量纲深度比值; $0.5$  为衰减系数,控制通行能力下降速率; $0.7$  为衰减指数系数,  $\text{m}^{-1}$ ,该值是决定衰减速度的敏感度参数。

该复杂网络模型通过指数衰减函数精准刻画

“小幅积水触发通行骤降”的临界突变现象,当  $d/m \leq 0.3$  时,道路通行无损失 ( $W_{E_2} = 1$ );当  $0.3 < d/m \leq 0.5$  时,通行能力呈指数衰减 ( $W_{E_2} = 0.5 \cdot \exp(-0.7d/m)$ ),表征积水超过阈值(0.3 m)后通行效率非线性下降特性;当  $d/m > 0.5$  时,道路完全中断( $W_{E_2} = 0$ )。

1.4 动态传播规则

1.4.1 失效触发条件

1) 节点级失效。当传导节点(如排水泵站)的实时负荷持续超过设计阈值时,系统判定其进入失效状态。例如:泵站  $Q_C$  超过  $Q_D$  的 1.2 倍,并持续 30 min,表明设施长期超负荷运行,结构稳定性与排水效率显著下降。此时,节点状态由“正常”转为“失效”,触发下游节点连锁超载。这种阈值设计兼顾瞬时冲击与持续压力的双重影响,既可避免短时波动导致的误判,又能够确保对系统性风险的敏感响应。失效节点通过中断服务或反向压力传导,加剧邻近区域排水能力的衰减,形成“多米诺骨牌”式灾害扩散。

2) 边中断。边的失效由物理环境恶化直接驱动,表现为道路积水深度超限( $d > 0.5$  m)或管网溢流事件。当积水深度超过 0.5 m 时,车辆通行完全受阻,道路通行边权重降至 0,物质与信息传递中断;管网溢流则因排水能力崩溃导致边功能丧失。此类中断通过动态调整网络拓扑结构(如移除失效边或重置权重),重构灾害传播路径。例如:道路中断迫使交通流绕行低洼区域,将加剧局部积水风险。该机制将物理灾害现象转化为网络动态响应规则,为级联效应模拟提供量化依据。

1.4.2 级联传播算法

改进的 SIR 模型模拟灾害链时空演化如图 2 所示。

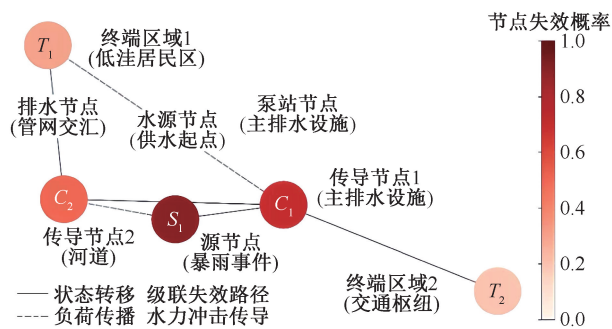


图 2 改进 SIR 模型下的城市内涝灾害链传播过程  
Fig. 2 Schematic diagram of inundation disaster chain propagation under improved SIR model

图 2 中,水源节点(暴雨  $S_1$ )首先通过实线箭头指向泵站节点  $C_1$ ,继而引向管网节点  $C_2$ ,最终连接至终端节点  $T_1$  与  $T_2$ ,从而构成 1 条完整的级联失效路径。实线箭头表示级联失效路径(如  $S_1 \rightarrow C_1 \rightarrow T_1$ ),虚线箭头表示直接水力冲击(如  $S_1 \rightarrow C_2$ )。节点由  $S_1$  向  $T_2$  渐变,映射 0~1 风险值,揭示“暴雨超载→泵站失效→区域瘫痪”非线性级联机制。

采用改进的 SIR 模型,动态模拟灾害链传播过程中各节点的状态演化,并记录易感状态-失效状态-恢复状态的时序变化。

易感状态,节点初始状态受上游失效节点影响的概率  $P_i$  如下:

$$P_i = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \alpha \cdot W_{Ei}) \tag{2}$$

式中: $\alpha$  为环境敏感系数,用于表征降雨强度、管网老化等外部环境对节点脆弱性的放大效应,取值为 0.8;  $W_{Ei}$  为上游第  $i$  条边的权重;  $k$  为上游失效节点数。根据式(2),可通过乘积形式( $\prod$ )量化多路径失效的累积冲击,即上游失效边越多( $k$  增大)或边权重越高( $W_{Ei}$  增大),当前节点失效概率越高。

节点进入失效状态(I)后,按指数分布( $\lambda = 0.1 \text{ min}^{-1}$ )向邻接节点传递负荷冲击,参数  $\lambda$  控制冲击传播速率,其值越小表明失效持续时间越长,灾害扩散范围越广。

恢复状态的触发依赖应急措施,恢复时间  $T_R$  服从韦布尔分布(形状参数 2.5,尺度参数 120 min),形状参数大于 1 表明恢复效率随时间递增,尺度参数代表基准恢复时长。该模型通过概率累加、指数衰减与韦布尔恢复 3 阶段耦合,完整刻画“节点失效-冲击传播-应急修复”灾害链动态过程。

1.5 城市内涝模型验证

1.5.1 2020 年长沙“7·12”内涝事件

输入实时降雨(62.3 mm/h)、管网负荷及交通中断数据,模拟结果显示,关键节点(如芙蓉区泵站)失效导致下游 10 个社区瘫痪,与实际 12 个受灾社区吻合度 82%(表 2)。误差主要是由于老旧管网淤积数据缺失(如望城坡误差率 33.3%)和地形建模偏差。交通中断滞后降雨峰值 1.5 h( $R^2 = 0.89$ ),验证了“管网超载→积水滞留→交通瘫痪”的时空传递机制。蒙特卡罗仿真结果表明:社区失效数量 95%置信区间覆盖实测值(8~12 个),模型稳定性良好。关键传导节点的模拟失效数量与实际受灾社区对比显示(表 2),模型误差主要源于数据缺

失与地形建模偏差,验证了灾害链传导机制的复杂性。

表 2 关键传导节点失效对比

| 社区/易涝点名称     | 模拟失效数量 | 实际失效数量 | 误差率/% | 主要原因     |
|--------------|--------|--------|-------|----------|
| 湘江新区望城坡早谷塘口  | 2      | 3      | 33.3  | 管网淤积数据缺失 |
| 芙蓉区东岸建材公交车站前 | 3      | 3      | 0     | 模型精准匹配   |
| 雨花区湘府路半岛蓝湾   | 5      | 6      | 16.7  | 地形建模局部偏差 |
| 总计           | 10     | 12     | 16.7  | —        |

1.5.2 2021 年长沙“5·22”暴雨内涝事件

为进一步验证模型的适用性,选取 2021 年长沙“5·22”暴雨内涝事件作为补充验证场景。2021 年暴雨事件仿真与实测数据对比见表 3。从表 3 可以看出,内涝点数量误差率为 10.5%,应急响应时间误差为 9.3%。Morris 敏感性分析结果显示,在所有待估参数中,应急调度延迟与风险感知衰减率的 Morris 筛选因子  $\mu$  值最高,分别达到 0.82 与 0.76,表明二者对模拟结果的非线性影响最为显著,被识别为高风险参数。Sobol 指数显示,数据质量贡献模型误差为 38.7%。

表 3 2021 年暴雨事件仿真与实测数据对比  
Table 3 Simulation vs. actual data comparison  
for 2021 rainstorm event

| 指标           | 实际值 | 模拟值 | 误差率/% |
|--------------|-----|-----|-------|
| 内涝点数量        | 19  | 17  | 10.5  |
| 平均应急响应时间/min | 43  | 47  | 9.3   |
| 经济损失/亿元      | 2.7 | 2.4 | 11.1  |

综上,文中所建模型的误差源于 3 个方面:①数据采集。老旧管网淤积数据缺失,需依赖  $K$  最近邻算法插补暴雨流量,插补过程因缺乏同工况历史样

本而引入偏差,导致流量输入失真。②模型结构。当前 SIR 模型将环境敏感系数  $\alpha$  设为固定常数,未能反映降雨强度时空变化对节点脆弱性的动态影响。③参数设置。泵站效率衰减系数基于经验值一次性给定,未随运行年限实时更新,造成阈值偏离实际。为提升模型的适用性与可靠性,提出改进路径,即在数据层面,部署物联网监测并人工核验;在模型层面,在动态贝叶斯网络嵌入“积水-绕行”反馈模块;在优化参数时,采用长短期记忆网络动态校准衰减系数。从而形成“数据-模型-参数”协同优化机制,提升模型可靠性。

2 灾害链传播仿真与阻断节点识别

2.1 静态拓扑特征分析

城市内涝灾害链的复杂网络拓扑特征主导风险传播路径。复杂网络拓扑分析表明:度中心性指标可用于识别高度连接枢纽节点,如湘江新区望城坡节点(度值 0.87)失效将直接影响 5 个社区,触发区域“孤岛效应”;而介数中心性指标则定位跨系统传导枢纽,以开福区小王家巷泵站为例(介数值 0.68),其失效将导致下游排水效率下降超 40%。需注意的是,模型识别存在 16.7%的误差率,主要源于管网淤积数据缺失(如望城坡误差率达 33.3%)和地形建模偏差(湘府路误差 16.7%),这些因素可能导致高脆弱节点的漏判风险。

2.2 动态级联失效模拟

静态结构分析需结合动态情景模拟,以量化节点失效的连锁效应。单点攻击试验显示,移除芙蓉区东岸建材公交站泵站后,网络连通性损失率达 42%,并引发湘江新区西二环路段等次生积水点,验证了“一点溃、全局瘫”的风险特征。单点攻击与风险传导效应如图 3 所示。

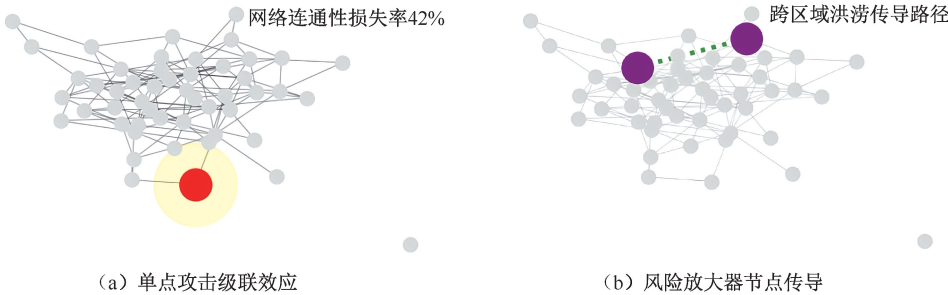


图 3 单点攻击与风险传导效应

Fig. 3 Schematic diagram of single-point attack and risk propagation effects

图 3 中,蓄意攻击高中心性节点(如芙蓉区泵站)会导致网络连通性骤降 42%,引发 42%的区域发生次生积水,而随机攻击 10%节点仅损失 15%的连通性。湘江关键设施通过虚线路径将局部积水扩散为跨区内涝(如岳麓区瘫痪)。贝叶斯网络模拟结果显示,当优先保护中心性最高的前 10% 节点时,蓄意攻击造成的网络连通性损失率由 65% 降至 22%。

2.3 关键脆弱节点清单与空间优化

基于拓扑分析与动态模拟,筛选出长沙市前 10%的高脆弱节点,见表 4。利用 GIS 技术实现空间可视化,结果如图 4 所示。

表 4 关键脆弱节点示例(前 5 位)

| Table 4 Examples of critical vulnerable nodes (Top 5) |      |        |       |        |
|-------------------------------------------------------|------|--------|-------|--------|
| 节点名称                                                  | 所属区域 | 中心性类型  | 脆弱性指数 | 主要风险类型 |
| 望城坡早谷塘口                                               | 湘江新区 | 度中心性   | 0.92  | 内涝连锁   |
| 小王家巷泵站                                                | 开福区  | 介数中心性  | 0.85  | 跨流域传导  |
| 湘府路半岛蓝湾                                               | 雨花区  | 度/介数复合 | 0.78  | 交通中断   |
| 东岸建材公交站                                               | 芙蓉区  | 介数中心性  | 0.76  | 社区瘫痪   |
| 西二环罗家嘴                                                | 湘江新区 | 介数中心性  | 0.72  | 次生积水   |

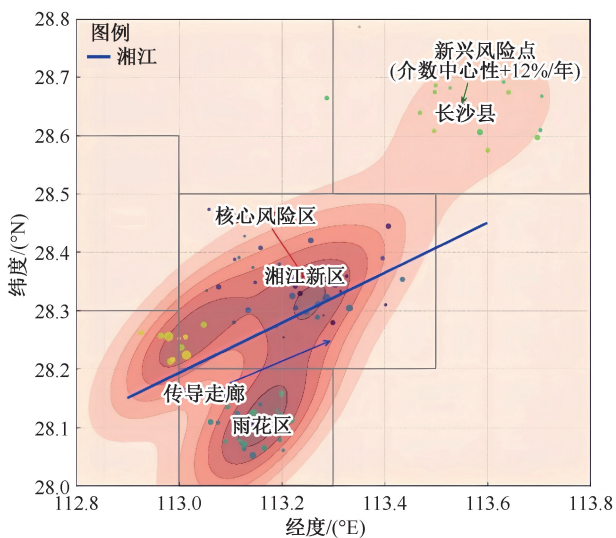


图 4 关键节点 GIS 空间分布与风险热力图  
Fig. 4 GIS spatial distribution of key nodes and risk heatmap

图 4 中,湘江新区与雨花区为核心风险区(热力密度超警戒值 120%),需优先加固排水设施,其高强度开发导致地表硬化率>75%,排水能力(3 年一遇标准)与城市扩张失衡;湘江河道形成泵站“传导走

廊”,应增设冗余管线切断级联路径<sup>[9]</sup>;长沙县新兴开发区介数中心性年增 12%,需控制开发密度。

基于“枢纽依赖+跨区耦合”风险特征,提出三级策略:首先,进行节点加固,筛选前 10%高脆弱节点(如雨花区枢纽)建立实时监测;其次,要网络优化,在跨流域桥梁嵌入冗余管线,改造多路径弹性网络<sup>[10]</sup>;最后,要智能协同,集成贝叶斯模型联动气象-管网-交通模块,形成“识别-推演-调控”闭环。

3 灾害链传播阻断机制仿真与优化

3.1 灾害链传播阻断策略设计

针对长沙市城市洪涝灾害特征,实施“硬性工程+软性协同”综合阻断策略。①硬性层面,基于高精度地形数据对河东红旗渠、河西龙王港等城市内涝高发区泵站进行扩容(更换大功率泵机,使排水能力提升 20%),采用建筑信息模型建模适配管网接口,并在关键节点增设缓冲井避免超压渗漏;同时,重构汇水分区,如红旗渠水系增设 3 条 DN1200 支管直排浏阳河,促使主泵负荷降低 30%。依据颜峻等<sup>[11]</sup>韧性评价指标,对五一商圈等 19 个易涝点实施路面抬升,确保满足 10 年一遇防洪标准。②软性层面,构建“预警-响应-调控”系统,结合周利敏等<sup>[12]</sup>动态模拟技术,整合气象数据与群神经网络模型将暴雨的准确预警提前 2 h,通过物联网动态调控泵站、信号灯及车库封闭措施,延长节点失效时间 30%以上,可有效阻断灾害的连锁反应。

3.2 灾害链传播阻断策略效果评估

分析动态贝叶斯网络模拟泵站扩容效果,发现湘江新区渍水面积减少 18%,交通中断时长从 6 h 缩减至 4.2 h,级联失效规模降低 25%。参照文献[13]中的时序分段拟合方法,优化路网冗余,在长沙市中心增设 12 条替代干道(如黄兴北路延伸段)。依据复杂网络拓扑与 GIS 分析替代路径选址,覆盖高脆弱节点(如湘府路半岛蓝湾)≤500 m;通过 DEM 筛选坡度≤1%且高程≥35 m 的路线;结合实时流量在拥堵路段(如五一广场)布设通行能力 120%的分流干道。优化后路网连通度从 0.68 提升至 0.82,20%的节点失效下交通恢复效率提高 40%。

3.3 成本-效益分析

基于文献[14]中动态可计算的一般均衡模型,量化效益。泵站扩容与路段抬升总投资为 28.5 亿元,年均减少损失 9.3 亿元,投资回收周期为 3.1 年(匹配政府 5 年财政周期)。边际分析结果表明:每

追加 1 亿元投入,未来 5 年城市内涝风险降低 12%,每亿元投入可保护 15 万人及 200 亿元国内生产总值。结合范维澄<sup>[15]</sup>提出的安全韧性框架可知:硬性措施通过物理改造快速降低灾害暴露度,而软性措施通过智能预警延缓和分散风险,二者协同可将城市防洪效率提升 35% 以上。因此,优先实施泵站扩容与预警系统升级,并同步推进路网冗余优化,有助于形成“短期止损-长期抗灾”的可持续治理模式。

4 结 论

1) 关键节点主导风险扩散过程为:20%的高脆

弱节点引发 80%的级联失效事件,导致下游社区瘫痪概率达 82%;节点中心度与连接边脆弱性共同调控跨系统灾害链的传播路径。

2) 三级阻断策略能够降低灾害影响,泵站扩容使渍水面积减少 18%,冗余路网优化提升路网连通度至 0.82;智能响应协同缩短交通中断时长至 4.2 h,级联失效规模降低 25%。

3) 所构建的“排水-交通”耦合复杂网络模型在郑州暴雨与深圳台风案例中验证有效,可量化拓扑中心性对级联风险动态传递的支配效应。

参 考 文 献

[1] 张乐,张海龙,李锋,等. 融合 BERT-BiLSTM-CRF 的城市内涝灾害风险要素识别方法研究[J]. 安全与环境学报, 2025,25(8):3 176-3 188.  
ZHANG Le, ZHANG Haillong, LI Feng, et al. Integration of BERT-BiLSTM-CRF for identifying urban waterlogging disaster risk factors [J]. Journal of Safety and Environment,2025,25(8):3 176-3 188.

[2] 尹萌萌,刘梦婷,朱伟,等. 城市内涝灾害韧性评估及影响因子分析:以福州市为例[J]. 中国安全生产科学技术, 2024,20(10):61-66.  
YIN Mengmeng, LIU Mengting, ZHU Wei, et al. Resilience assessment and influencing factors analysis of urban waterlogging disaster:a case study of Fuzhou city [J]. Journal of Safety Science and Technology,2024,20(10):61-66.

[3] 唐少虎,朱伟,程光,等. 暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报,2022,32(7): 143-150.  
TANG Shaohu, ZHU Wei, CHENG Guang,et al. Safety resilience assessment of urban rad traffic system under rainstorm waterlogging[J]. China Safety Science Journal,2022,32(7):143-150.

[4] 长沙市第一次全国自然灾害综合风险普查公报汇编[Z/OL]. (2024-11-13). [http://cssafe.changsha.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/lzyj/cssaj\\_wjtz/csaj\\_sajj/202411/t20241113\\_11653470.html](http://cssafe.changsha.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/lzyj/cssaj_wjtz/csaj_sajj/202411/t20241113_11653470.html).

[5] 梁鑫,侯精明,王添,等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法[J]. 水利水电科技进展,2024, 44(6):56-63.  
LIANG Xin, HOU Jingming, WANG Tian, et al. A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6):56-63.

[6] 王国成,高德华. 基于 ABM 的公共政策仿真研究进展与方法论启示[J]. 公共管理学报,2023,20(2):116-127, 173.  
WANG Guocheng, GAO Dehua. The status quo and methodological enlightenment of simulation research on public policies using agent-based modeling[J]. Journal of Public Management,2023,20(2):116-127,173.

[7] 姜波,张超,陈涛,等. 基于 Bayes 网络的暴雨情景构建和演化方法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2021,61(6): 509-517.  
JIANG Bo,ZHANG Chao,CHEN Tao,et al. Construction and deduction of rainstorm disaster scenarios based on Bayesian networks[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2021,61(6):509-517.

[8] 黄晶,余靖雯,袁晓梅,等. 基于系统动力学的城市洪涝韧性仿真研究:以南京市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2020,29(11):2 519-2 529.  
HUANG Jin, SHE Jingwen, YUAN Xiaomei, et al. Simulation of urban flood resilience based on a system dynamic model: a case study in Nanjing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(11):2 519-2 529.

[9] 黄梅,刘晨曦,俞晓莹,等. 城市水生态网络韧性评价与优化策略:以长沙市为例[J]. 经济地理,2022,42(10):

52-60.

HUANG Mei, LIU Chenxi, YU Xiaoying, et al. Resilience evaluation and optimization of urban water ecological network: take Changsha as an example [J]. Economic Geography, 2022, 42(10): 52-60.

[10] 罗健, 柴凝. 长株潭城市群“绿心工程”区域抗洪韧性效能提升策略[J]. 城市建筑, 2024, 21(16): 39-42.  
LUO Jian, CHAI Ning. Analysis on the strategies for improving the regional flood resilience performance of "green heart project" in changsha-zhuzhou-xiangtan urban agglomeration[J]. Urbanism and Architecture, 2024, 21(16): 39-42.

[11] 颜峻, 左哲, 王永柱, 等. 城市安全发展评估指标体系与指数构建[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 118-125.  
YAN Jun, ZUO Zhe, WANG Yongzhu, et al. Evaluation index system and index construction for urban safe development[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 118-125.

[12] 周利敏, 童星. 数字韧性视角下应急管理新模式: 特征、内涵与实践探索[J]. 中国行政管理, 2024, 40(12): 129-140.  
ZHOU Limin, TONG Xing. Disaster governance innovation from the perspective of digital inclusion: technological empowerment, fair participation, and indicator construction[J]. Chinese Public Administration, 2024, 40(12): 129-140.

[13] 熊智, 钟少波, 宋敦江, 等. 城市轨道交通客流量时间序列分段拟合方法[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 35-41.  
XIONG Zhi, ZHONG Shaobo, SONG Dunjiang, et al. A method of fitting urban rail transit passenger flow time series[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 35-41.

[14] 王艺. 动态 CGE 模型下特大城市外洪内涝灾害经济损失评估[J]. 系统科学学报, 2025, 33(2): 163-168.  
WANG Yi. Economic loss assessment of external floods and internal waterlogging disasters in mega cities under dynamic CGE model[J]. Chinese Journal of Systems Science, 2025, 33(2): 163-168.

[15] 范维澄. 以安全韧性城市建设推进公共安全治理现代化[J]. 人民论坛·学术前沿, 2022(增 1): 14-24.  
FAN Weicheng. Modernizing public safety governance with the construction of a safe and resilient city[J]. Frontiers, 2022(S1): 14-24.



**作者简介:** 周思聪 (1984—), 男, 湖南岳阳人, 硕士, 高级政工师, 湖南师范大学公共管理硕士研究生导师, 主要从事应急管理、综合救援等方面的研究。E-mail: zhousicong@hunnu.edu.cn。