文章编号:1672-5328(2024)05-0057-09　中图分类号:U491　文献标识码:A　DOI:10.13813/j.cn11-5141/u.2024.0506

# 城市道路交通应对超标降雨的策略
## ——以郑州“7·20”特大暴雨为例

左利兴[1]，张豪[1]，张增棨[1]，李丹阳[1]，张铮[2]，刘乃钰[2]
(1.郑州市规划勘测设计研究院有限公司，河南 郑州 450052；2.中国城市规划设计研究院，北京 100037)

**摘要：**城市道路是应急救援的重要载体，有效降低超标降雨带来的风险对于韧性城市建设至关重要。综合考虑降雨量、道路积水深度、最大允许退水时间，确定超标降雨的交通风险边界条件。基于郑州“7•20”特大暴雨的道路受灾状况、交通运行情况，分析超标降雨情况下的道路风险区，指出传统平坦低洼叠加高路基区域，城市易涝区叠加交通拥堵、高架快速路匝道等区域的灾时风险性较高。然后，从构建特级应急通道网络、完善应急疏散方案、道路行泄通道精细化设计等方面提出超标降雨情况下城市道路交通应急响应策略。最后指出，面临超标降雨等极端天气时城市道路交通应从顶层规划、精细化设计、应急管理等多环节着手，提高城市应对超标降雨的综合防灾能力。

**关键词：**应急交通；超标降雨；道路风险区；应急通道网络；应急疏散；行泄通道；郑州市

Strategies for Urban Roadway Traffic in Response to Extreme Rainfall: A Case Study of the July 20, 2021 Torrential Rainstorm in Zhengzhou

ZUO Lixing[1], ZHANG Hao[1], ZHANG Zengqi[1], LI Danyang[1], ZHANG Zheng[2], LIU Naiyu[2]
(1. Zhengzhou Urban Planning Design & Survey Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450052, China; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China)

**Abstract**: Urban roads play a critical role in emergency rescue, and effectively reducing the risks posed by extreme rainfall is crucial to building resilient cities. By comprehensively considering factors such as rainfall volume, road waterlogging depth, and maximum permissible water drainage time, this paper presents the development of boundary conditions for extreme rainfall events. Based on the analysis of road damage and traffic operation during the July 20, 2021 torrential rainstorm in Zhengzhou, the paper identifies high-risk road zones under extreme rainfall conditions. It highlights that areas where traditional flat lowlands overlap with elevated roadbed, urban flood-prone zones coincide with traffic congestion, and ramp exits on elevated expressways are particularly vulnerable during extreme weather events. Moreover, emergency response strategies for urban roadway traffic during extreme rainfall are proposed, including constructing a major emergency channel network, improving emergency evacuation plans, and refining the design of road drainage channels. Finally, the paper emphasizes that, under extreme weather conditions such as excessive rainfall, cities need top-level planning, refined design, and emergency management of urban road to enhance the overall disaster response capacity.

**Keywords**: emergency traffic; extreme rainfall; high-risk road zones; emergency channel network; emergency evacuation; drainage channels; Zhengzhou

收稿日期：2024-04-03

作者简介：左利兴(1983— )，男，山东巨野人，硕士，高级工程师，研究方向为交通规划、交通工程，电子邮箱397673582@qq.com。

## 0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告(Sixth Assessment Report, AR6)显示，未来全球每增温1°C，极端日降雨事件的强度将增加7%[1]。作为典型极端降雨事件，郑州“7·20”特大暴雨导致严重的洪涝灾害，造成380人因灾死亡失踪、直接经济损失409亿元[2]。

作为城市生命线工程，城市道路交通在应急救援中发挥着关键作用，但也因其是直面灾害的开敞设施，更易受内涝影响，尤其是城市高架快速路匝道、隧道等特殊路段。

因此，开展城市道路交通应对超标降雨的策略研究对于保障城市生命安全极为重要。

中国既有关于内涝情景下的城市道路交通研究多聚焦于城市内涝设防标准内降雨对城市交通的影响，对超出标准降雨的道路交通应对策略研究考虑较少。陈芳 等[3]定量分析了不同降雨程度对城市交通系统的影响并提出具体的预警对策。范一丁[4]基于路网脆弱性理论建立了综合评价指标体系以及双层评估模型，对深圳市某区域内涝情况进行脆弱性评估和关键区域识别。方琦[5]从中国城市雨水排水设施现状、城市积水和内涝的风险标准、超标降雨的预防及应急措施等方面进行初步探讨，但研究较为宽泛，缺乏道路交通方面具体应对措施。

郑州“7·20”特大暴雨期间主城区内隧道、桥涵因灾基本中断，部分道路积水深度超过150 cm，城市交通一度陷入瘫痪，给灾时救援和灾后重建带来巨大困难。通过分析“7·20”特大暴雨期间道路设施受灾情况、交通运行状况，本文划分超标降雨下道路风险区类型，分析风险区情况并提出道路交通应对策略。

## 1 超标降雨交通风险边界条件

超标降雨指超出城市内涝设防标准的强降雨。《武汉市超标降雨灾害应急预案》[6]对超标降雨的界定标准为“1 h降雨超过100 mm或者24 h降雨超过300 mm，且降雨持续”。

由于城市类型不同，排水防涝设施建设条件、积水影响程度、内涝设防标准等也存在差异，单纯依靠降雨量判定超标降雨交通风险边界条件不符合实际情况。本文综合考虑降雨量、道路积水深度、最大允许退水时间等因素对超标降雨的交通风险边界条件进行研究。

以郑州市为例，根据《郑州市排水(雨水)防涝综合规划(2021—2035年)》[7]，郑州市中心城区(含主城区、航空港区)城市内涝防治设计重现期标准为：城区应有效应对100年一遇24 h(253.5 mm)的暴雨，地面积水应满足居民住宅和工商业建筑物的底层不进水，道路中一条车道的积水深度不超过15 cm，中心城区最大允许退水时间不超过2 h等条件(见表1和表2)。

地面积水对城市道路交通影响较大。当积水深度超过道路路缘石高度时，行人和驾驶人较难分辨机非分隔设施，存在交通安全隐患；当积水深度超过机动车排气管高度时，排气管进水使发动机受损，车辆故障停驶，导致城市道路交通陷入瘫痪，需实施道路封闭管控。对于道路积水深度阈值，S. M. H. Shah 等[8]制定了积水道路上车辆行驶稳定性的安全指南，黄震 等[9]提出积水深度30 cm时达到小汽车排气口高度，可作为路段封闭标准。

综合以上因素，超标降雨的交通风险边界条件为：24 h降雨量超过该城市最大内涝设防标准量、道路积水深度超过30 cm且积水时间超过2 h。

表1 城市内涝防治设计重现期要求

Tab.1 Design recurrence period requirements for urban flood prevention

| 区域 | 内涝防治重现期/a | 地面积水设计标准 |
|---|---|---|
| 主城区、航空港区 | 100 | 居民住宅和工商业建筑物的底层不进水；道路中一条车道的积水深度不超过15 cm |
| 近郊组团中牟、荥阳-上街、南龙湖、新郑 | 50 | |
| 远郊组团巩义、登封、新密 | 30 | |

资料来源：文献[7]。

表2 内涝防治设计重现期下的最大允许退水时间

Tab.2 Maximum permissible water drainage time under flood prevention design recurrence period

h

| 项目 | 区域类型 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 中心城区 | 非中心城区 | 中心城区重要地区 | 交通枢纽地区 |
| 最大允许退水时间 | 2.0 | 3.0 | 1.0 | 0.5 |

注：中心城区为各功能组团中明确的城区范围；最大允许退水时间为雨停后地面积水的最大允许排干时间。

资料来源：文献[7]。

## 2 道路风险区分析

本文以郑州市“7·20”特大暴雨为例进行城市道路风险区分析。

### 2.1 超标降雨案例概况

2021年7月18日18:00至21日0:00，郑州市出现罕见持续强降雨，全市普降大暴雨、特大暴雨，累积平均降雨量449 mm，7月20日出现最大日降雨量624.1 mm，接近郑州平均年降雨量640.8 mm，达到1978年7月郑州国家基本气象站建站以来历史降雨最大值(189.4 mm)的3.4倍[2]。

受此次特大暴雨影响，郑州市累计降雨

400 mm 以上地区面积达 5 590 $km^2$，600 mm 以上地区面积达 2 068 $km^2$。其中，二七区、中原区、金水区累计降雨量接近 700 mm，巩义、荥阳、新密市超 600 mm，郑东新区、登封市接近 500 mm，主城区路面最大水深近 2.6 m[2](见图 1)。7 月 22 日，主城区积水逐渐消退。从 24 h 降雨量、道路积水深度、积水时间等指标看，本次降雨属于典型的超标降雨。

## 2.2 道路设施受灾状况

郑州市城区现状道路共 2 146 条，其中快速路、主干路 335 条，次干路 419 条，支路、街坊路 1 392 条。城区共有隧道 67 座，受此次强降雨影响，基本中断。

根据积水深度，将城市道路划分为 6 个等级(见图 2)。受郑州市整体西南高、东北低的地势影响，积水深度超过 100 cm 的区域多分布在西北、东南区域，东部局部区域道路积水深度超过 150 cm。主城区内隧道泵站等设施积水严重，主要受灾设施分布在穿越京广铁路、京广路、中州大道截面，部分设施积水深度超过 150 cm。

## 2.3 道路交通运行状况

根据高德地图 API 平台统计数据，对郑州市主城区灾后交通运行状况进行统计分析。

1）灾害初期。

2021 年 7 月 20 日，受特大暴雨影响，全市道路积水严重，车辆行驶速度大大降低。主城区道路平均运行速度不足 20 $km \cdot h^{-1}$，远低于灾前 34.4 $km \cdot h^{-1}$ 的道路运行水平(见图 3)。

2）灾害中期。

7 月 23 日，主城区道路交通除个别节点仍断行外，大部分恢复通行。但受灾害影响，全市仍以抗洪救灾为主，日常出行较少。曼哈顿、京广路等主要节点早高峰时段 30 min 出行范围可基本覆盖主城区(见图 4)，全市道路网络运行状况整体较好。主城区晚高峰时段道路平均运行速度约 31.3 $km \cdot h^{-1}$，逐渐恢复灾前运行水平。

3）灾害后期。

7 月 26 日，全市全面复工复产，但由于快速路上部分节点尚未通车、道路交通管制普遍存在、交通信号设施未完全恢复等，导致早高峰时段交通拥堵严重。道路平均运行速度 20.2 $km \cdot h^{-1}$，高峰时段拥堵指数 2.12(见图 5)。早高峰时段平均出行时间 50 min，约为平时(36 min)的 1.4 倍。

## 2.4 道路风险区类型

结合郑州“7·20”特大暴雨期间交通设施受灾区域、道路交通运行状况，分析得到超标降雨情况下道路风险区类型。

1）叠加铁路、高速公路等高路基通道的传统平坦低洼区域。

京广铁路以东区域为传统平坦低洼区

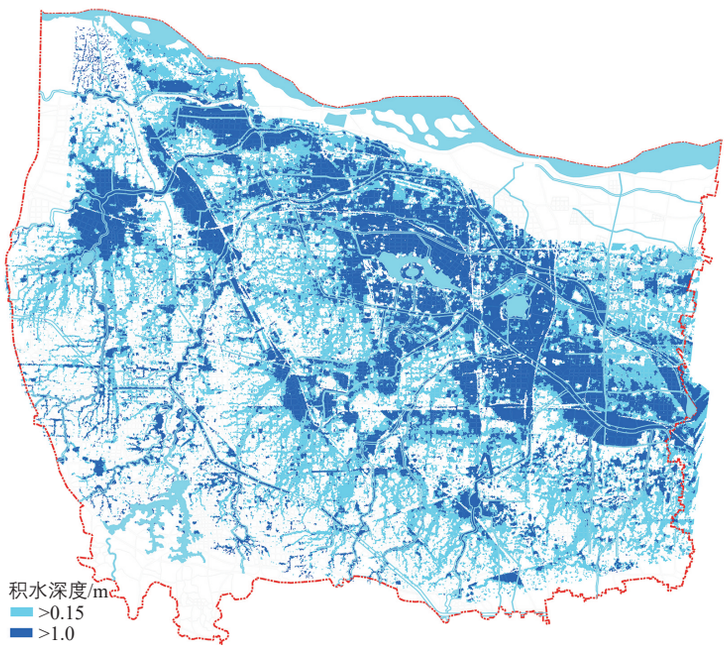



图 1 郑州“7·20”特大暴雨主城区积水分布

Fig.1 Water accumulation distribution in Zhengzhou's main urban area during the July 20, 2021 torrential rainstorm

资料来源：文献[7]。

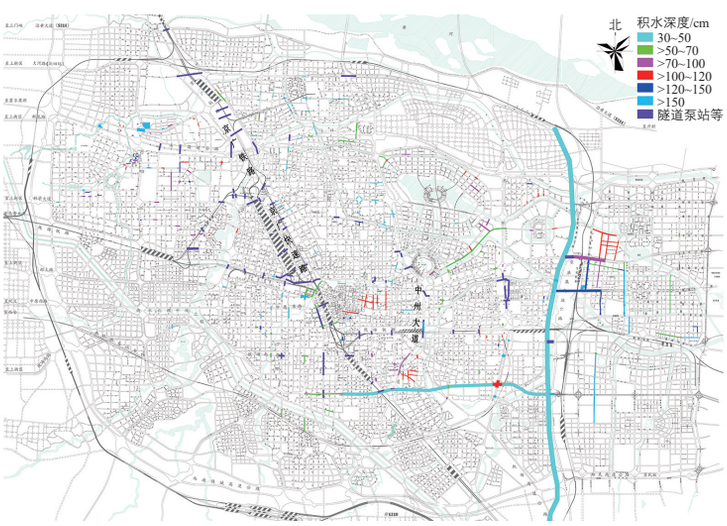



图 2 郑州“7·20”特大暴雨主城区道路积水分布

Fig.2 Road water accumulation distribution in Zhengzhou's main urban area during the July 20, 2021 torrential rainstorm

资料来源：文献[10]。

域，积水点数量较多；京广铁路、陇海铁路、连霍高速公路等高路基交通设施导致排水阻碍，超标降雨情况下大量地表涝水无法及时排出，道路受灾风险加剧(见图6)。

2）城市易涝与易拥堵叠加区域。

易涝风险区主要分布在京广路、北三环、中州大道、陇海路等路段，多为城市易拥堵路段、交通疏解困难，灾害期间更易发生人员受困现象(见图7)。例如，京广北路、京广南路均为内涝高风险等级路段，其中京广北路临近郑州火车站、周边用地开发成熟，路段交通量较大，交通拥堵程度较京广南路更高。因此“7·20”特大暴雨期间，京广北路受灾程度远远超过京广南路。

3）高架快速路匝道与易涝叠加区域。

高架快速路具有抵御洪涝灾害的先天优势，但高架快速路匝道是薄弱环节，受灾后易引起交通瘫痪。郑州“7·20”特大暴雨期间，高架快速路匝道严重积水16处，主要集中在中州大道。

基于郑州“7·20”特大暴雨24 h降雨数据，本文采用InforworksICM软件模拟评估郑州市主城区内涝风险[7]。由于道路积水深度超过30 cm时行驶车辆的安全性具有较大风险，本文将该类匝道认定为高风险集散点，积水深度达到15~30 cm为中风险集散点，其余为低风险集散点。模拟结果显示，京广路以东区域的高架快速路匝道风险较高，主要集中在东三环、北四环、中州大道、陇海路(老城段)、京广路(北段、老城段)[10](见图8)。

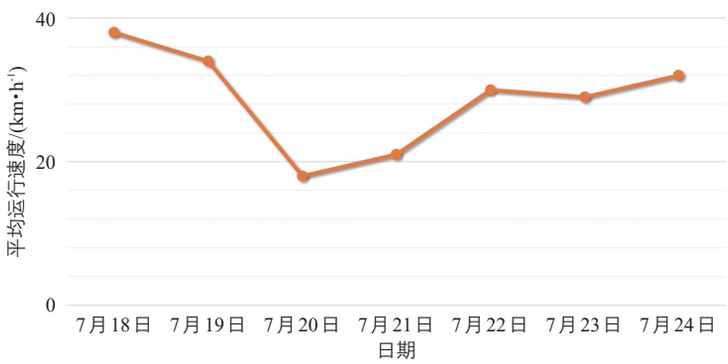



图3 郑州“7·20”特大暴雨前后主城区道路平均运行速度

Fig.3 Average roadway travel speed in Zhengzhou's main urban area before and after the July 20, 2021 torrential rainstorm

资料来源：根据高德地图API平台统计数据绘制。

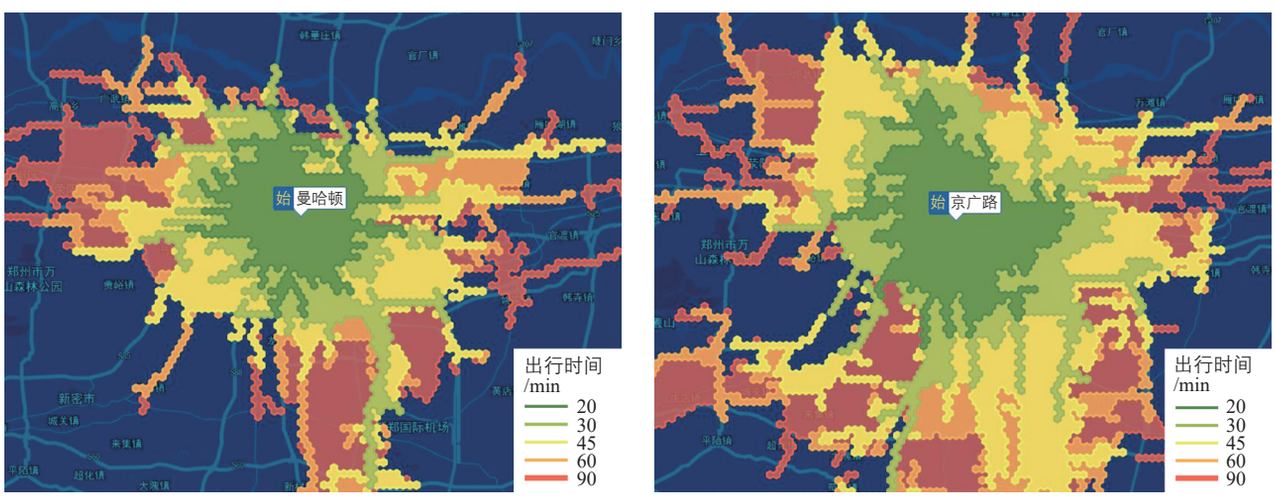
## 3 城市道路交通应急响应策略

### 3.1 完善应急通道网络，注重顶层设计

应急通道网络是灾害应急救援、抢险避难、灾后应急保障的交通通道网络；应有效串联交通枢纽、指挥中心、医疗救援中心等重要应急保障设施，满足城市抗灾救援需求；并以防灾分区为单元进行有效校核，保证每个防灾分区单元至少有1条应急通道。

1）构建特级应急通道网络。

《城市综合防灾规划标准》(GB/T 51327—2018)将应急保障设施级别划分为I级、II级、III级。结合防灾需求，城市着重规划两级应急通道网络以满足I级、II级应急保障设施联系需求。然而，超标降雨的强破坏




a 曼哈顿　　b 京广路

图4 7月23日郑州市主城区主要节点早高峰时段出行等时圈

Fig.4 Morning peak travel isochrones for key nodes in Zhengzhou's main urban area on July 23, 2021

资料来源：根据高德地图API平台统计数据绘制。

性使郑州市部分I级应急保障设施遭到功能性破坏。由于城市应急指挥系统、生命线系统、紧急物资运输系统等仍然依赖应急通道网络提供城市范围内大尺度空间移动。因此，需在I级应急通道网络基础上构建特级应急通道网络，以满足极端天气城市应急防灾要求。

特级应急通道应以保障超标降雨情况下城市生命线工程基本运转为总目标。以郑州市为例，特级应急通道防灾能力应达到应对“7·20”同等级超强降雨标准，其中关键节点(如出入口、匝道等)设施排水能力远期实现对标200年一遇降雨(主城区防洪标准)，同时辅助临时防水淹设备、应急管制手段等应对超标降雨。

2）特级应急通道应急保障基础设施类别。

如图9所示，郑州市域各级应急保障设施点共计363个，其中，I级应急保障设施95个，约占26%；II级应急保障设施268个，约占74%。

特级应急通道应有效串联I级应急保障设施。I级应急保障基础设施为区域和城市应急指挥、医疗卫生、供水、物资储备、消防等特别重大应急救援活动所必需的设施以及涉及国家、区域公共安全的设施提供应急保障，受灾时设施功能不能中断或灾后需立即启用。结合郑州市规划应急保障基础设施具体情况，可将特级应急通道应急保障基础设施划分为5个类别(见表3)。

3）防灾分区单元划分。

作为配置防灾资源、构建有效救灾疏散体系的城市单元，防灾分区单元应满足防止灾害蔓延、及时组织救援疏散的要求，应与城市功能布局相协调，根据城市规模、空间格局、灾害影响、风险特征等因素进行合理分级与划定。本文主要考虑灾害影响、组织管理、救援疏散3个因素进行防灾分区单元的划分。

①灾害影响方面，主要考虑排水分区划分，保证同一防灾分区单元内水流排泄方向一致。②组织管理方面，按照行政区划(街道级、社区级)进行分区，便于应急防灾工作统一指挥和协调，也有利于应急救援物资的统筹配置。根据文献[10]，适宜的防灾分区单元人口规模为城区20~50万人、外围区域3~10万人。③救援疏散方面，避免跨区域疏散，以分区内应急救援力量配置为主。主要按照铁路、高速公路、高架城市道路、河流等划分的交通中区进行防灾分区单元设置。根据上述原则，郑州市共划设71个防灾分区单元，其中主城区20个(见图10)。

4）应急通道网络构建。

综合郑州“7·20”特大暴雨期间道路受灾情况、应急保障设施功能需求、防灾分区单元划分等因素，提出超标降雨情况下应急通道网络构建的基本要求：各城区对外交通具备2条以上应急通道；串联重大应急保障

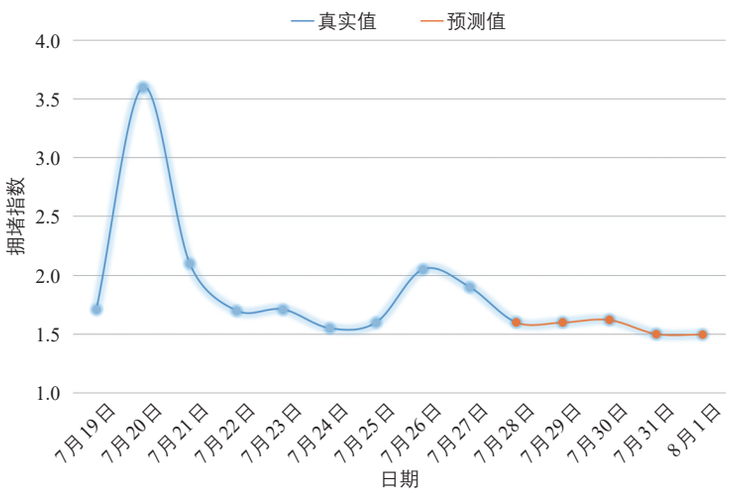



图5 郑州“7·20”特大暴雨前后主城区早高峰时段拥堵指数变化趋势

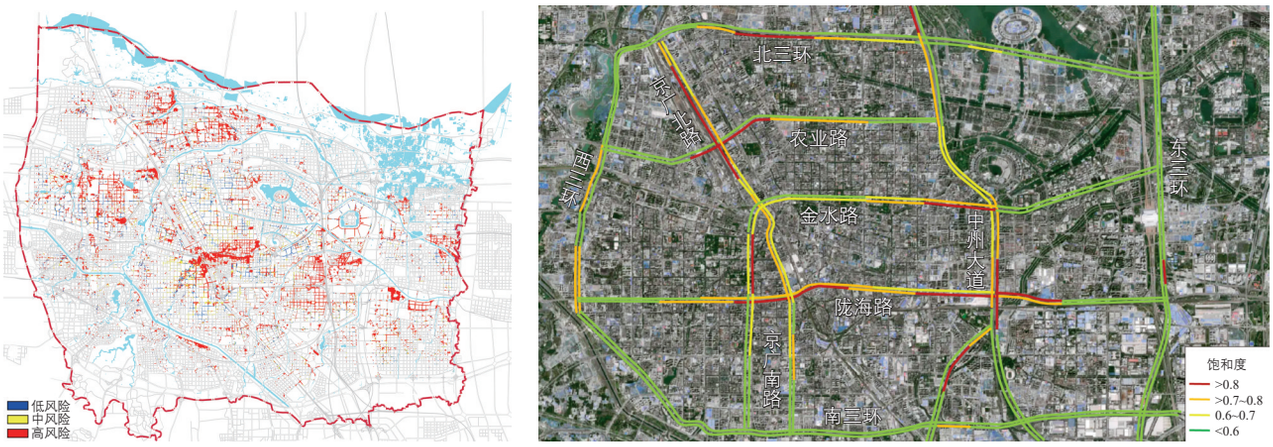
Fig.5 Congestion index trends of morning peak traffic in Zhengzhou's main urban area before and after the July 20, 2021 torrential rainstorm

资料来源：根据高德地图API平台统计数据绘制。

图6 郑州市积水隐患区域分布

Fig.6 Distribution of areas with water accumulation hazards in Zhengzhou

资料来源：文献[7]。




a 内涝等级分布　　b 交通拥堵分布

图7 城市内涝等级与交通拥堵区域分布

Fig.7 Distribution of urban waterlogging levels and areas with traffic congestion

资料来源：文献[7]、高德地图API平台统计数据。

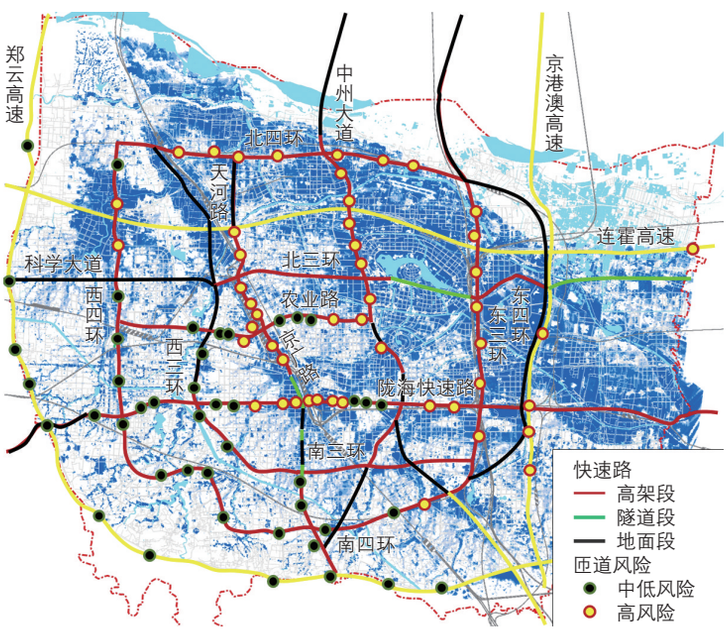



图8 郑州“7•20”特大暴雨高架快速路匝道风险评估

Fig.8 Risk evaluation of elevated expressway ramps during the July 20, 2021 torrential rainstorm in Zhengzhou

资料来源：文献[10]。

表3 特级应急通道应急保障基础设施类别

Tab.3 Categories of emergency infrastructure facilities for major emergency channels

| 类别 | 应急保障设施 |
|---|---|
| 应急指挥中心 | 市级应急指挥中心 |
| 交通枢纽(设施) | 城市疏散救援出入口 |
| | 承担重大抗灾救援任务的机场、港口、铁路车站等重要交通枢纽 |
| 消防设施 | 消防指挥中心、特勤消防站 |
| 避难设施 | 中心城区避难场所 |
| 医疗卫生设施 | 设置市、区级应急医疗卫生设施的避难场所 |

资料来源：文献[10]。

设施，特大灾害期间发挥基本功能；各防灾分区单元有1条以上应急通道；市域应急通道尽可能选择高等级公路；应急通道道路形式以高架道路为主，并辅以交通管制措施，保障超标降雨情况下城市生命线通道基本畅通。

郑州市主城区构建“三横三纵两环”应急通道网络(见图11)，其中“三横”为北四环(绕城高速至东三环)、农业路、陇海路；“三纵”为西四环(农业路至绕城高速)、京广路(北四环至陇海路)—紫辰路、中州大道；“两环”为绕城高速—连霍高速—京港澳高速、北四环—西四环—南四环—东三环。

### 3.2 完善应急疏散方案，强化灾时交通管理

应急疏散是超标降雨情况下减少伤亡的重要措施。郑州“7•20”特大暴雨期间，由于前期缺乏有效交通疏导措施，大量车辆滞留，造成严重交通拥堵，不仅给救援带来很大困难，受灾人员也无法明确逃生路线，错失最佳逃生时间。应针对隧道、下沉式立交桥等天然防汛薄弱点完善应急疏散方案。

以京广隧道为例，隧道全长4.3 km，由京广北路、京广中路、京广南路3段隧道组成。其中，京广北路隧道受灾尤为严重，该段隧道北端为京广路高架，南接陇海路高架，设置有4组匝道。综合考虑京广北路隧道匝道设置、相邻道路等情况，研究制定其应急疏散方案，当相关部门发布预警时，启动隧道出口下游交叉口交通管制，确保隧道内车辆快速疏散。具体方案为：1)隧道入口

封闭，车流疏散至京广路地面层；2)陇海路高架匝道禁止进入隧道，车流引导至地面层；3)中原路出口连续放行，中原路西向东禁行，仅右转；4)陇海路出口疏导交通，右转快速驶出，进入陇海路西段(见图12)。

同时，应强化灾时交通管控以保障应急疏散方案的实施。灾时交通管控的目的是使道路系统资源在时空上合理分配，以保证救援和恢复重建工作顺利进行并维持市民的基本生活要求[11]。借鉴日本相关经验，灾时交通管控分为初期管控和二期管控两阶段。灾害前期阶段，启动初期管控，引导车辆尽快驶离、禁止外来车辆驶入应急通道，保证应急救援车辆尽快进入灾区。随着灾情扩大，启动二期管控方案，仅允许救援车辆通行，禁止一切其他交通。后期视灾情发展情况逐

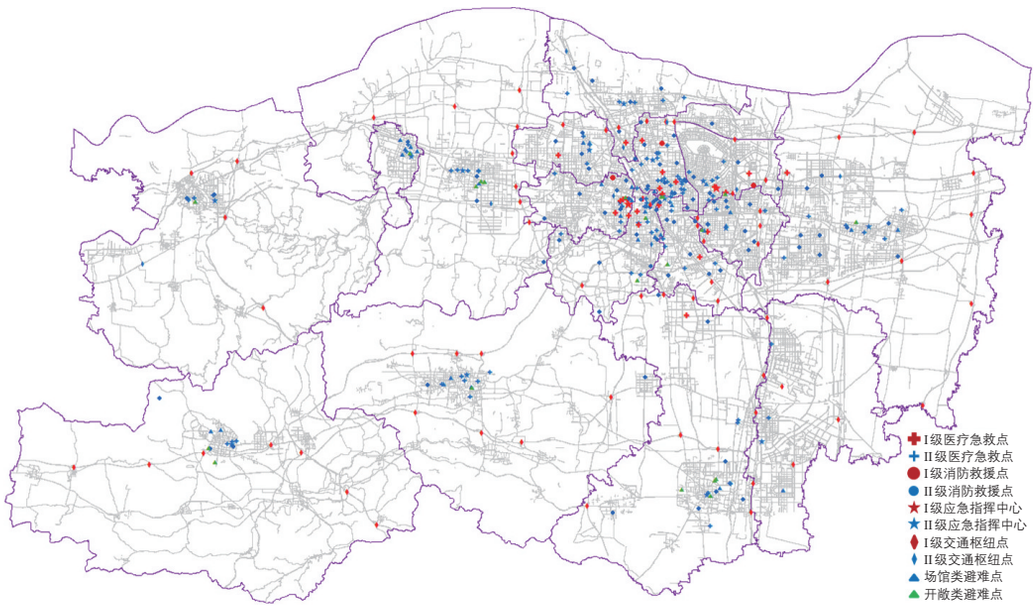



图9 郑州市域应急保障设施点分布

Fig.9 Distribution of emergency support facilities in Zhengzhou

资料来源：文献[10]。

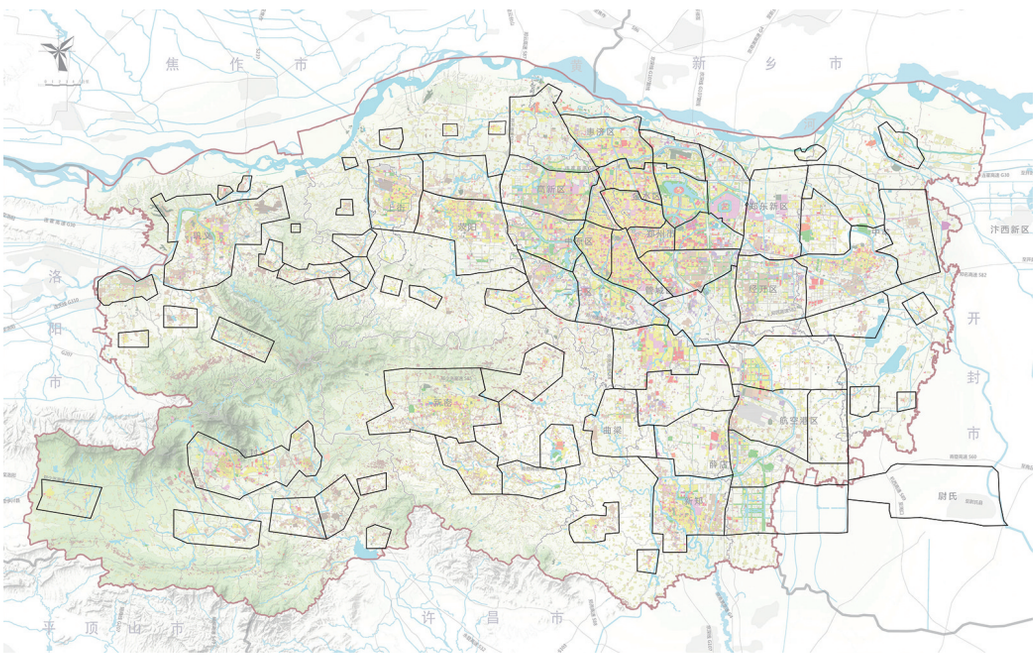



图10 郑州市防灾分区单元划分

Fig.10 Division of disaster prevention zones in Zhengzhou

资料来源：文献[10]。

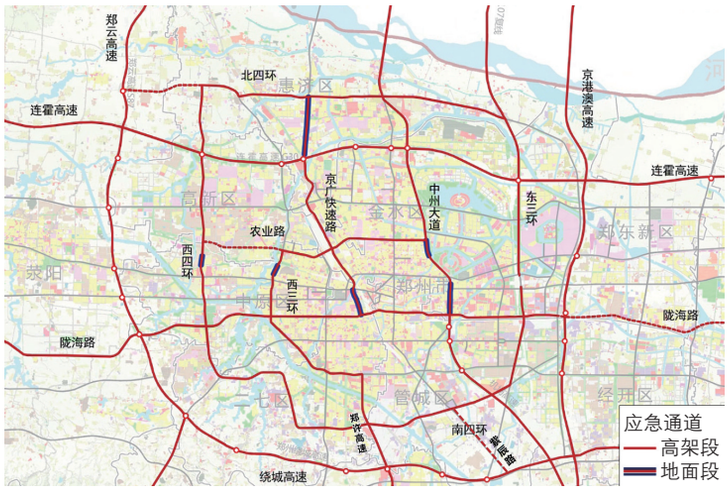



图11 郑州市主城区应急通道网络

Fig.11 Emergency channel network in Zhengzhou's main urban area

资料来源：文献[10]。

图12 郑州市京广北路隧道应急疏散示意

Fig.12 Schematic diagram of emergency evacuation for the Jingguang North Road Tunnel in Zhengzhou

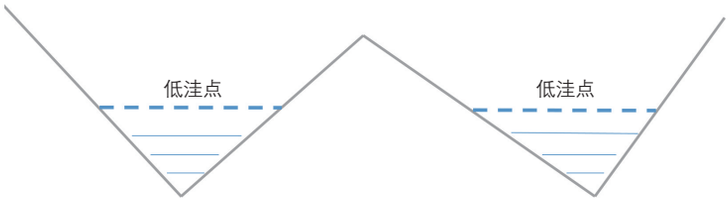



图13 锯齿形道路纵坡面示意

Fig.13 Illustration of longitudinal slope of serrated roads

资料来源：文献[14]。

步解除交通管控，恢复城市正常秩序。

### 3.3 重视道路行泄通道规划，开展精细化设计

“7·20”特大暴雨期间，短时急剧降雨量超过管网搜集能力，发生溢流，地势较低的道路自然形成天然行泄通道。面对极端天气频发、城镇化进程加速，道路路面作为行泄通道排放超出管网承载能力的雨水，在排涝除险中起到关键的作用[12]。因此，超标降雨情况下道路行泄通道设计尤为重要。

道路行泄通道的选取一般在竖向规划时确定，但传统的竖向规划通常没有考虑道路排水需求。因此，在进行城市竖向规划修编时，应重点加强与排水防涝规划的结合，强化规划协同，全面统筹城市道路行泄通道规划布局。

道路横坡坡度设计方面，根据《城市道路工程设计规范(2016版)》(CJJ 37—2012)，道路横坡宜采用1.0%~2.0%坡度标准，快速路及降雨量大的地区宜采用1.5%~2.0%坡度标准。阮红权[13]提出，坡度为2%的横坡路面的最大过水断面更大，更有利于提高路面行泄能力。因此，考虑非交通性主干路行泄通道功能时，有条件情况下横坡坡度应取值2%。

道路纵坡坡度设计方面，《城市道路工程设计规范(2016版)》(CJJ 37—2012)要求，城镇道路机动车车行道纵坡坡度应大于0.3%，当遇到特殊困难时，可设置锯齿形边沟或采取其他排水设施。但由于设置锯齿形边沟或变坡点容易造成人为低洼点，一旦发生超过雨水管渠排水能力的降雨，低洼点蓄积的雨水无法及时排泄，极易引发积水内涝[14]。因此，道路行泄通道的最小纵坡应大于0.3%，并结合防洪分区合理规划行泄路径。

## 4 结束语

超标降雨情况下城市道路交通应急防灾能力提升是一项系统性工程，可靠、高效、灵活的交通系统对于确保城市在极端天气或其他突发事件中的正常运行至关重要，道路交通是关键。本文以郑州“7·20”特大暴雨为例，通过分析评估道路设施受灾情况及内涝风险，发现传统平坦低洼叠加高路基区域，城市易涝区叠加交通拥堵、高架快速路匝道等区域的灾时风险性较高，下一步应优

先进行重点治理与管控。超标降雨情况下城市道路交通应以保障城市生命线工程正常运转为首要目标，注重顶层规划设计、强化灾时交通管理，结合城市特点制定有针对性的应急疏散方案，并在传统雨水管网排涝的基础上，注重道路行泄通道的规划与设计，提高城市交通面对极端天气的韧性。

参考文献：

References:


[1] 周波涛，钱进. IPCC AR6报告解读：极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展，2021，17(6)：713-718.
ZHOU B T, QIAN J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate change research, 2021, 17(6)：713-718.

[2] 中华人民共和国应急管理部国务院灾害调查组. 河南郑州“7•20”特大暴雨灾害调查报告[R]. 北京：中华人民共和国应急管理部，2021.

[3] 陈方，戢晓峰，吉选，等. 降雨对城市交通系统的影响与预警对策[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版)，2013，26(4)：506-509.
CHEN F, JI X F, JI X, et al. The impact of rainfall on urban transportation system and early warning countermeasure[J]. Journal of Wuhan University of Technology (social science edition), 2013, 26(4): 506-509.

[4] 范一丁. 降雨内涝情景下城市路网脆弱性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.
FAN Y D. Research on vulnerability of road network under urban waterlogging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[5] 方琦. 浅议超标降雨的预防及应急措施[J]. 城市道桥与防洪，2011，5(5)：109-111.
FANG Q. Elementary discussion on prevention and emergency measures of over-standard rainfall[J]. Urban roads bridges & flood control, 2011, 5(5): 109-111.

[6] 武汉市人民政府. 市人民政府办公厅关于印发武汉市超标降雨灾害应急预案的通知[EB/OL]. (2022- 07- 06) [2024- 03- 01]. https://www.wuhan.gov.cn/zwgk/xxgk/zfwj/bgtwj/202207/t20220706_2000735.shtml.

[7] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司，郑州市规划勘测设计研究院有限公司. 郑州市排水(雨水)防涝综合规划(2021—2035年)[R]. 郑州：上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司，2023.

[8] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, MARTINEZ-GOMARIZ E, et al. Criterion of vehicle instability in floodwaters: past, present and future [J]. International journal of river basin management, 2021, 19(2): 1-23.

[9] 黄震，张学全，张庭瑞，等. 暴雨内涝环境下城市交通脆弱路段预测方法[J/OL]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2024：1- 9[2024- 03- 01]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20240102.1045.002.html.
HUANG Z, ZHANG X Q, ZHANG T R, et al. Prediction method of urban traffic vulnerable road under rainstorm and waterlogging environment[J/OL]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2024: 1-9[2024-03-01]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20240102.1045.002.html.

[10] 中国城市规划设计研究院，郑州市规划勘测设计研究院有限公司. 郑州市应急防灾交通规划研究[R]. 北京：中国城市规划设计研究院，2022.

[11] 曾松，杨晓光. 日本的灾时交通管理系统[J]. 国外公路，1999，19(5)：5-10.

[12] 蔡辉艺. 路面行泄通道在发达国家的实践及对我国的启示[J]. 给水排水，2021，9(47)：53-57.
CAI H Y. The practice and enlightenment of excess stormwater pathway in developed countries[J]. Water & wastewater engineering, 2021, 9(47): 53-57.

[13] 阮红权. 路面行泄在城市内涝防治中的作用探讨[J]. 净水技术，2023，42(8)：150-156.
RUAN H Q. Discussion on the function of pavement drainage in urban flooding prevention and control[J]. Water purification technology, 2023, 42(8): 150-156.

[14] 高学珑，陈奕，蔡辉艺，等. 城市道路雨水排放系统构建及要点研究[J]. 给水排水，2021，47(6)：36-42.
GAO X L, CHEN Y, CAI H Y, et al. Research on construction and key points of urban road rainwater drainage system[J]. Water & wastewater engineering, 2021, 47(6): 36-42.