

韧性城市理念下郑州市交通系统韧性评估与提升

逯靖远, 杜景州, 郭栋梁

(郑州市规划勘测设计研究院有限公司, 河南 郑州 450052)

摘要:在建设韧性城市的时代背景下,如何评估并发现城市交通系统的韧性问题,制定有针对性的安全提升对策是城市规划建设的重要任务。通过总结交通系统韧性理论的概念和特征属性,以郑州市交通系统为例,提出构建包含枢纽体系安全、对外疏散保障、应急通道支撑、道路网络韧性、公共交通支撑、交通运输安全、交通设施韧性和交通应急响应等8个一级指标、22个二级指标的郑州市交通系统韧性评估指标体系。分析郑州市交通系统的安全韧性现状,并从提升枢纽体系安全、构建对外立体救灾网络、增加关键通道多样性、提升道路网络稳健性和冗余性、增强公共交通服务安全性、增加交通设施功能多样性、提高交通系统智能化等7个方面制定郑州市交通系统韧性提升策略。研究结果对于全面提高郑州城市交通系统的防灾应急预防响应能力具有重要意义,也将促进城市交通系统韧性评估和韧性能力提升。

关键词:韧性城市;韧性交通;韧性评估;郑州市

Resilience Evaluation and Improvement of Zhengzhou Transportation System Under the Concept of Resilient City

LU Jingyuan, DU Jingzhou, GUO Dongliang

(Zhengzhou Urban Planning Design & Survey Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450052, China)

Abstract: In the context of building resilient cities, it is an important task for urban planning and construction to assess resilience issues in urban transportation systems, and formulate targeted safety improvement measures. By summarizing the concepts and characteristic attributes of transportation system resilience theory, taking Zhengzhou transportation system as an example, this paper proposes a resilience evaluation index system of Zhengzhou transportation system that includes 8 primary indicators and 22 secondary indicators, including hub system safety, external evacuation guarantee, emergency channel support, road network resilience, public transportation support, traffic safety, transportation facilities resilience, and traffic emergency response, then analyze the current status of the safety and resilience of Zhengzhou transportation system. The resilience improvement strategies of Zhengzhou transportation system are formulated from seven aspects, including improving the safety of the hub system, building an external three-dimensional disaster relief network, increasing the diversity of key channels, improving the robustness and redundancy of the road network, enhancing the safety of public transportation services, increasing the functional diversity of transportation facilities, and improving the intelligence of transportation emergency response. The research results are of great significance for comprehensively improving the disaster prevention and emergency response capability of Zhengzhou transportation system, and will also promote the resilience assessment and capacity enhancement of the urban transportation system.

Keywords: resilient city; resilient transportation; resilience evaluation; Zhengzhou

收稿日期: 2024-04-07

作者简介: 逯靖远(1981—),男,河南郑州人,学士,高级工程师,总经理,注册城乡规划师,研究方向为韧性城市、市政交通,电子邮箱49047901@qq.com。

作者简介: 杜景州(1989—),男,河南郑州人,硕士,高级工程师,注册城乡规划师,注册咨询工程师(投资),研究方向为城市交通规划与设计,电子邮箱576460692@qq.com。

0 引言

随着近年来极端气候灾害频发和城市进

入高质量发展阶段,城市交通系统的韧性评估和提升成为理论研究和城市规划与建设实践的热点。黄建中等^[1]将城市交通系统韧性

研究划分为3个阶段：2014年前，以交通网络的评价方法研究为主；2014—2017年，研究重点转向对于韧性特征的认知以及多种交通系统的韧性研究；2017年后，更加关注减灾、恢复、系统进化等方面的内容，对城市交通系统韧性提升的需求再次促进了韧性评估方法的研究。同时研究指出，当前韧性研究的重要议题包括韧性测度、韧性提升和多系统协同优化等方面。韧性测度研究主要是建立相应的指标体系对交通系统进行量化评估，但往往存在指标选取主观性强、计算方法缺少实例验证等问题，且评估对象多限于道路交通网络、公共交通、城市轨道交通等单一系统，对城市综合交通体系的韧性评估研究较少。韧性提升的研究对象包括道路网络、铁路、航空、交通设施等子系统和综合交通系统，但研究结论大多停留在普适性的策略层面，针对性不强。而多系统协同优化的研究慢慢受到关注，人们意识到城市交通韧性还应与社会、经济、组织等方面进行多维度协同，如此才能有效发挥应急保障作用^[1]。现状还缺少对于停车场、公共交通场站等交通设施平急两用的研究。因此，如何更加全面准确地评估城市交通系统存在的韧性问题、制定有针对性的提升策略，需要更加深入的研究。

本文通过梳理总结城市交通系统的韧性特征，以郑州市为例，构建交通系统韧性评估指标体系，评估郑州市交通系统现状存在的韧性问题，并针对性地制定韧性提升策略。

1 韧性城市与韧性交通

1.1 韧性城市

韧性指系统受到干扰后能恢复到最初状态。韧性城市也称弹性城市，国际韧性城市联盟将其定义为城市系统能够消化并吸收外界干扰的能力^[2]。外界干扰因素包括自然灾害、事故灾害、公共卫生事件、社会安全事件等。韧性城市就是城市系统在受到外界干扰后具备抵御灾害并从灾害中快速恢复的能力。

1.2 韧性交通

城市交通是包含交通枢纽、对外交通、道路交通、公共交通、步行及非机动车交通、交通设施等众多子项的综合系统。城市

交通系统是城市这个复杂系统的一个重要维度，是城市开展经济社会活动的空间载体，其安全、顺畅、通达是城市健康运行与发展的重要环节。从韧性城市的角度看，韧性交通指交通系统在干扰事件发生的前、中、后期能够有效应变、富有弹性和较强的抗冲击能力^[3]。

1.3 城市交通系统韧性特征

在发生干扰影响时，城市交通系统的最大特点是：自身既是灾害的直接受灾体，也是城市应急保障的生命线。其韧性特征在发生内部或外部的干扰下出现：一是有足够的适应能力和抗冲击能力，能保持或快速恢复可达性；二是有较强的学习能力和自我调整恢复能力，能够与干扰共生，从而减少本身的脆弱性，不断提高系统韧性。因此，城市交通系统韧性主要体现为贯穿灾前、灾中、灾后全过程的稳健性、适应性、冗余性、多样性、智慧性和恢复力等特征。

1) 稳健性：指在干扰发生时，能够有效抵御并减轻破坏影响的能力；

2) 适应性：指在发生干扰影响时，能够与灾害并存，维持自身结构和功能稳定的能力；

3) 冗余性：指关键的设施或路径有备份，当发生外界干扰影响时，备份系统能够迅速发挥作用，维持城市交通系统基本功能运转；通常情况下，交通网络性越好、设施服务能力越强，系统冗余性越高；

4) 多样性：指具有多种交通方式，保障在灾害发生时有不同的应对方法，当一种方式受阻时可以由另一种方式快速有效替代的能力；

5) 智慧性：指交通设施在应对干扰时有及时响应、自主应对、科学决策的能力；

6) 恢复力：指具备从灾害中吸取教训迅速恢复原有功能，甚至能通过学习转化和创新升级使功能得到强化提高的能力。

2 郑州市交通系统现状

2.1 综合交通系统现状及遭受“7·20”特大暴雨的影响

郑州市已经形成以郑州站、郑州东站、郑州航空港站为核心的铁路客运枢纽体系，在中国率先建成米字型高铁网络，形成“双

十字”铁路综合枢纽；郑州新郑国际机场(以下简称“新郑机场”)二期工程已建成，航空客、货运规模连续多年保持中部领先；形成了以京港澳高速公路和连霍高速公路为骨架的“十字+环放”高速公路网络格局；城市中心城区(包括主城区和航空港区)已建成“环+放射”快速路系统。郑州市建成区道路总长2 166 km，道路网密度 $6.6 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ ；至2023年底郑州地铁开通运营11条线路、总里程344.28 km，中心城区有公共汽车线路384条、线路总长度5 604.6 km、线网长度2 142.06 km，运营车辆约6 717辆，形成以快速公交和城市轨道交通为骨干、常规公共汽车为主体、特色公共汽车为补充的城市公共交通系统。

2.2 交通系统受灾情况

2021年7月17—23日，河南省遭遇历史罕见特大暴雨，发生严重洪涝灾害，特别是7月20日郑州市遭受重大人员伤亡和财产损失^[4]。灾害发生期间，城区出现大面积淹水，城市道路、铁路、公路、民航、公共交通等受到严重影响。其中，郑州东站、郑州站铁路客运枢纽内部出现集散大厅雨水倒灌、候车室进水、通信电力故障、站台股道严重积水等问题，造成列车停运、大量旅客滞留，并引发全国性的铁路运输系统大面积停运、晚点或改线。市域内国省干线公路受灾达50余处，受灾里程约142 km；主城区24个高速公路出入口中有积水点13处；因积水和交通管制所有高速公路出入口封闭，导致外地应急救援、医护等车辆进入受阻；城区67座隧道桥涵基本全部中断，部分道路积水深度超过150 cm；38座下穿铁路隧道中有36座全部断行，车辆、行人均无法通行，跨组团间交通联系基本中断^[5]；主城区494条道路中断，道路塌陷2 836处、空洞36处、脱空129处，西部山区多条道路受损、桥梁被冲毁。

2.3 交通系统灾后恢复措施

灾害发生后，为使城市交通系统尽快恢复到灾前或者更高水平、保障生产生活条件和经济社会发展，郑州市按照《河南郑州等地特大暴雨洪涝灾害灾后恢复重建总体规划》的要求采取了一系列重建措施。重点对铁路客站、地铁车站等重大交通枢纽进行排

水防涝能力提升改造；对城市轨道交通的段场出入线、车站出入口、风亭及与地下车站连通的下沉广场等地下空间的洞口增加防汛挡板、防水沙袋等设施；对重要交通干路和隧道出入口道路竖向进行优化改造，对长度大于500 m的隧道增设竖向逃生通道，在其出入口加装隧道液位监测和自动落杆系统，并联动摄像头、喇叭、信号灯等实现预警和提示；开展道路积水点和地铁施工区域范围内积水点专项整治，进一步校核地铁、隧道、立交桥的泵站排水能力，进行提标改造；对受损的公路、桥梁进行维修加固，完善支挡防护工程和交通安全设施等。同时开展了《郑州市应急防灾交通规划研究》，制定了《郑州市城市隧道桥涵汛期安全防范与排查应急专项》《郑州市汛期公共交通保障和人员疏散应急专项》《郑州市汛期地铁安全运行应急专项》《郑州市恶劣天气道路交通管理应急处置预案》等，以全面提高交通系统的防灾应急预防响应能力。

3 郑州市交通系统韧性评估

3.1 指标筛选

在郑州市综合交通体系特征和作用分析基础上，同时参考国家相关标准和部分城市经验选取交通系统韧性评估指标。

3.1.1 相关标准规范

《安全韧性城市评价指南》(GB/T 40947—2021)从建设安全韧性城市的角度指出交通设施安全是城市设施安全的重要方面，评价指标应包括人均道路面积、公路桥梁安全耐久水平、城际物资运送通道数量等3项指标。

住房和城乡建设部2022年发布的《城市体检评估技术指南(试行)》规定，在进行城区(城市)层面的城市体检时，城市交通系统的体检指标应包括城市道路网密度/ $(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$ 、高峰时段机动车平均速度/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 、城市轨道交通车站周边覆盖通勤比例/%、城市道路交通事故万车死亡率/人等。

交通运输部2022年印发的《交通强国建设评价指标体系》中涉及交通系统韧性的表征指标为：重点区域多路径、多方式连接比率；涉及交通运输安全性的表征指标为交通运输事故频率、死亡率、经济损失，交通运输安全从业人员职业技能素质，交通基础

设施抗灾抗损能力；涉及应急响应水平的表征指标包括突发事件(故)应急响应启动时间、交通运输应急恢复时间、应急救援力量响应及到达时间等^[6]。

3.1.2 部分城市规划研究

北京市是中国最早开展韧性城市建设研究的城市，率先编制和发布了《北京韧性城市规划纲要》，将交通韧性的评价指标细分为道路网密度、绿色出行比例、轨道交通里程及万车死亡率4个指标。其中道路网密度反映了城市的适应性和恢复力，绿色出行比例、轨道交通里程和万车死亡率均反映了城市的鲁棒性和恢复力等韧性特征^[7]。

《张家口韧性城市建设专题研究》提出了8项韧性城市评估的一级指标，交通韧性是其中的一项一级指标，其二级指标包括万车死亡率、每十万人可使用的疏散路线的数量、建成区高峰时段平均机动车速度、跨区域救援力量抵达时间等^[8]。

3.2 指标体系构建

结合城市交通系统的构成、郑州市交通系统的韧性特征和城市应急疏散救援需求，并参考相关标准规范和城市案例经验等，选取确定郑州市交通系统韧性评估指标，构建包含8个一级指标、22个二级指标的两级评估指标体系(见表1)。公共汽车线路网密度指在城市一定区域范围内，公共汽车线路经过的城市道路中心线总长度与适宜设置公共汽车线路的区域总面积的比值。

3.3 评估结果

1) 枢纽灾时疏散冗余性不够、应急连通替代能力不足。

郑州市承担了都市圈约60%的铁路客流量，过度集中的客流造成郑州站、郑州东站运能已经饱和，特别是在节假日和灾时应急疏散的特殊时期，两大铁路客运枢纽均处于过饱和运营状态，紧急疏散组织压力过大。以郑州东站为例，设计高峰小时旅客发送量为7400人次、最高聚集人数为5000人，而2016—2023年春节、“五一”和国庆等节假日期间客运量统计数据，高峰小时疏散需求达0.85万~2.63万人次·h⁻¹(见表2)，远超过设计发送能力，运输能力冗余性严重不足。

同时，现状郑州站、郑州东站、新郑机场、郑州航空港站等四大综合客运枢纽自身都配套有城市快速路集散系统、轨道交通、

公共汽车等3种或以上接驳方式，客运应急接驳集散能力较好；但各枢纽之间通过轨道交通连通的换乘次数均不小于2次、时间达78~106 min，通过机动车换乘的时间也需33~77 min(见表3)，特别是主城区的郑州站、郑州东站和航空港区的新郑机场、郑州航空港站之间换乘时间长、转换方式单一的问题较为突出。

2) 对外疏散通道整体较好，多样性和多路径不足。

对外疏散保障指标评估结果显示：郑州市对外通道分布满足疏散方向不小于2个、每个方向不少于2条的基本要求(见图1)，但缺少轨道交通等其他对外疏散方式；高速公路出入口覆盖率中心城区大于50%，覆盖率较高，但市域内白沙和中牟北部、航空港区北部和东部等区域覆盖率不足(见图2)；同时中心城区综合交通枢纽可达性普遍强于外围地区(见图3)。

3) 应急通道网络的冗余性和稳健性需提升。

根据批复的《郑州市应急防灾交通规划研究》，郑州市规划构建形成多层级、多方向、多路径的能有效适应洪涝、暴雪、地质及地震等多种灾害的应急通道网络，应急道路密度达0.5 km·km⁻²，密度较高。同时通过建立应急通道布局与人口分布和灾害空间的关系，对郑州市中心城区应急通道网络韧性进行评估分析，可知航空港、中牟县白沙、金水区龙湖北部等区域的应急通道密度较低(见图4)，且主城区内有较多的应急通道易受灾路段，航空港区南部和二七区西南部的应急通道与地质灾害空间分布重合较多(见图5)，中心城区易受灾应急道路比例约为45%，通道稳健性需提升。例如，郑州“7·20”特大暴雨灾害发生后3天仍有18处隧道桥涵、19处下穿陇海铁路或京广铁路通道、23条主干路断行。

4) 道路网络的冗余性和稳健性有待提升。

郑州市现状道路网密度为6.6 km·km⁻²，在全国36个主要城市中仅排第13位，与国家中心城市的定位不符，也未达到中心城区不小于8 km·km⁻²的标准要求。三环内外道路网密度差异较大，核心区普遍高于外围区域，二七区、金水区、郑东新区等道路网密度较高，中原区、高新区、经开区、惠济区的道路网密度相对较低(见图6)，其中二七区核心区道路网密度最高达到7.6 km·km⁻²，

表1 郑州市交通系统韧性评估指标体系及评估结果

Tab.1 Resilience evaluation index system and evaluation results of Zhengzhou transportation system

序号	指标及含义		韧性含义	评估方式	评估标准	评估结果	主要结论及问题
	一级指标	二级指标					
1		枢纽高峰容量	稳健性、冗余性	定量	韧性好: 设计容量≥疏散需求 韧性一般: 设计容量≥0.8倍疏散需求 韧性不足: 设计容量<0.8倍疏散需求	<0.8倍疏散需求(郑州东站设计容量0.74万人次·h ⁻¹)	郑州站、郑州东站冗余性不足
2	枢纽体系安全	枢纽间连通性	稳健性、多样性	定量	韧性好: 连通方式≥3种, 时间≤30 min 韧性一般: 连通方式≥2种, 时间≤45 min 韧性不足: 连通方式<2种, 时间>45 min	公共交通换乘≥2次、出行总时间97~106 min, 小汽车出行总时间53~77 min	连通性较弱, 应急时相互替代能力差
3		多方式接驳集散能力	多样性	定量	韧性好: 接驳方式≥3种 韧性一般: 接驳方式≥2种 韧性不足: 接驳方式<2种	≥3种	灾时多方式接驳保障能力较强
4		对外通道规模及多方式	稳健性、多样性	定量	韧性好: 疏散方向≥3个, 疏散通道≥3条 韧性一般: 疏散方向≥2个, 疏散通道≥2条 韧性不足: 疏散方向<2个, 疏散通道<2条	疏散方向≥2个, 疏散通道≥2条	对外道路通道满足要求, 但缺少轨道交通等多方式保障, 多样性不足
5	对外疏散保障	高速公路出入口5 km覆盖率	稳健性、冗余性	定量	韧性好: 覆盖率≥50% 韧性一般: 覆盖率≥30% 韧性不足: 覆盖率<30%	中心城区>50%	中心城区覆盖率高, 但白沙、中牟、航空港部分区域覆盖率不足
6		综合交通枢纽可达性	冗余性	定性		中心城区明显大于外围, 主城区强于航空港区	枢纽对城市外围服务冗余性不足
7	应急通道支撑	应急道路密度	冗余性	定量	韧性好: 应急道路密度≥0.5 km·km ⁻² 韧性一般: 应急道路密度≥0.3 km·km ⁻² 韧性不足: 应急道路密度<0.3 km·km ⁻²	中心城区0.5 km·km ⁻²	建立了分层级的应急道路网络, 但航空港、白沙、龙湖北部等区域的密度较低
8		易受灾应急道路比例	稳健性	定量	韧性好: 比例≤20%; 韧性一般: 比例≤40%; 韧性不足: 比例≤50%	45%	主城区应急通道易受洪涝灾害影响, 且部分与地质灾害空间分布重合, 应急通道稳健性需提高
9	道路网络韧性	人均道路面积	冗余性	定量	韧性好: 人均面积≥13 m ² ·人 ⁻¹ 韧性一般: 人均面积≥8 m ² ·人 ⁻¹ 韧性不足: 人均面积<8 m ² ·人 ⁻¹	<8 m ² ·人 ⁻¹	人均道路面积低, 冗余性不足
10		道路网密度	稳健性、冗余性	定量	韧性好: 密度≥8 km·km ⁻² 韧性一般: 密度≥6 km·km ⁻² 韧性不足: 密度<6 km·km ⁻²	道路网密度为6.6 km·km ⁻² <8 km·km ⁻²	道路网密度冗余性一般
11		路网结构	稳健性、适应性	定量		快、主、次、支的道路级配为11:37:19:33	路网结构成“纺锤形”, 干线道路比例过高, 结构韧性较差
12	公共交通支撑	城市轨道交通车站800 m覆盖率	冗余性	定量	韧性好: 覆盖率≥50% 韧性一般: 覆盖率≥35% 韧性不足: 覆盖率<35%	中心区16.8%, 主城区18.2%	轨道交通覆盖率低, 服务冗余性需提高
13		公共汽车能源结构	多样性	定量	韧性好: 能源形式≥3种 韧性一般: 能源形式≥2种 韧性不足: 能源形式<2种	100%新能源	车辆能源结构单一, 多样性差
14		公共汽车线路网密度	稳健性、冗余性	定量	韧性好: 密度≥3.0 km·km ⁻² 韧性一般: 密度≥2.0 km·km ⁻² 韧性不足: 密度<2.0 km·km ⁻²	线路网密度3.4 km·km ⁻²	公共汽车服务冗余性较高
15		公共汽车站500 m覆盖率	冗余性	定量	韧性好: 覆盖率≥95% 韧性一般: 覆盖率≥90% 韧性不足: 覆盖率<90%	中心城区100%	公共汽车服务冗余性较高
16	交通运输安全	交通事故万车死亡率	稳健性	定量	韧性好: 死亡率≤1% 韧性一般: 死亡率≤3% 韧性不足: 死亡率>3%	死亡率<1%	交通运输安全系数较高
17		交通运输人员安全素养	适应性、恢复力	定性		有相应的培训制度	交通运输安全素养较高
18	交通设施韧性	公路桥梁安全耐久水平	稳健性、适应性	定量	韧性好: 一二类桥梁比例≥95% 韧性一般: 一二类桥梁比例≥90% 韧性不足: 一二类桥梁比例<90%	100%	公路桥梁安全韧性强
19		交通场站平灾结合能力	适应性、恢复力	定性		功能、形式单一	交通场站适应性、恢复力不足
20		地下交通防洪设施设置	稳健性、适应性	定性		部分安装智能防灾设施	地下交通设施灾害适应性有所提高, 但稳健性需进一步加强
21		交通应急预案制定	适应性、恢复力	定性		有详细完善的应急预案	交通系统响应恢复力较好
22	交通应急响应	交通应急智能化水平	智慧性、适应性、恢复力	定性		建立了统一指挥平台	交通应急智能化水平有所提高

中原区核心区道路网密度则仅为 $5.5 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$, 道路网冗余性不足。三环以内的人均道路面积普遍不足(见图7), 中原区、金水区、二七区等高密度人口聚集区的路网冗余度需进一步加强。整体路网结构中快、主、次、支的道路级配呈现11:37:19:33的“纺锤形”结构, 干线道路比例过高, 长度比例达到48%, 远超国家标准15%~20%的规定范围, 路网结构稳健性较差。

5) 公共汽车交通冗余性较高, 但城市轨道交通冗余性不足, 两网可替代性有待加强。

郑州市中心城区公共汽车线路网密度为 $3.4 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$, 车站500 m覆盖率100%, 空调车、新能源车比例均达到100%, 服务冗余

性较高。相比之下, 中心城区城市轨道交通车站800 m覆盖率仅为16.8%, 主城区覆盖率约为18.2%(见图8), 车站覆盖率低; 且日均客运强度仅为 $0.66 \text{ 万人次} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 未达到国家标准最低要求(0.7), 在全国主要城市中仅排名17位, 与城市人口规模和在全国的功能定位严重不符, 特别是高新区、经开区、惠济区等城市轨道交通服务支撑明显较弱。同时公共汽车交通与城市轨道交通之间的接驳换乘能力较弱, 存在两网融合不足、灾时应急疏散服务范围不够、互相替代协调能力不强等韧性问题。

6) 交通设施适应性和恢复力较好, 多样性有待提高。

郑州市运营或在建的独立占地公共停车场117处, 用地面积约 81.5 hm^2 ; 公共交通场站64处, 用地面积约 68 hm^2 , 但其开发建设模式均为平面、单一功能, 较少考虑平灾结合、平急两用的应急功能需求。市域内高速公路及普通国省干线公路一、二类桥梁比例为100%, 桥梁设施安全韧性较高; 中心城区内已经对部分主要下穿隧道进行了防洪防涝智能化提升改造, 完善了隧道内应急监测和出入口自动升降杆设备等, 城市道路隧道已具备一定的智慧化防灾与应急响应能力。

7) 交通运输安全及交通应急响应较好。

郑州市交通事故万车死亡率整体上小于1%, 交通事故死亡率压力呈现市区高、外围县区低的态势, 中原区的交通事故死亡率压力最高(见图9)。郑州市“城市大脑”一期工程已经建成, 建立了统一的城市灾害监测和应急指挥调度平台, 制定了防范低温雨雪冰冻灾害应急预案、防汛应急预案、地震应急预案、地质灾害应急预案等, 构建了恶劣天气道路交通管理应急处置预案体系“1+8+N”模式和交通枢纽应急疏散保障预案, 明确了郑州市应急防灾交通网络, 并成立了专业化、多层级的应急抢险救援队伍。整体上, 交通系统应急响应和灾后恢复能力较好。

4 郑州市交通系统韧性提升策略

1) 全面提升枢纽体系应急冗余性和安全替代能力。

应加快主城区郑州南站的建设, 形成“四主多辅”铁路客运枢纽韧性格局; 建设铁路客运枢纽间、铁路与机场枢纽之间轨道交通直连线路, 布局形成枢纽环线、铁路联

表2 2016—2023年节假日期间郑州东站客流量

Tab.2 Passenger volume of Zhengzhou East Railway Station during holidays from 2016 to 2023 万人次

年份	春节	五一	国庆	国庆日均 客运量	国庆高峰小 时客运量
2016	109.4	17.8(3天)	71(7天)	10.1	0.85~1.01
2017	217.0	32.6(3天)	78(7天)	11.1	0.95~1.13
2018	269.0	39.0(3天)	90(7天)	12.9	1.09~1.29
2019	295.0	50.0(4天)	98(7天)	14.0	1.19~1.41
2020	203.0	138.0(5天)	132(8天)	16.5	1.40~1.67
2021	273.0	123.0(5天)	124(7天)	17.7	1.50~1.79
2023	337.0	131.9(5天)	208(8天)	26.0	2.21~2.63

注: 节假日客流量数据来源于郑州市委宣传部官方微博“郑州发布”; 高峰小时数据按照《郑州市第五次城市综合交通调查》到达高峰小时系数为8.5%、离开高峰小时系数为10.1%计算获得; 2022年客流数据受郑州市疫情影响较大, 不在本次分析范围内。

表3 郑州主要客运枢纽间连通性分析

Tab.3 Connectivity between major passenger transportation hubs in Zhengzhou

起点	终点	交通方式	换乘次数/ 次	单程时间/ min	备注
郑州站	郑州航空港站	轨道交通	2	97	1号线、2号线、城郊线
		机动车		65~77	快速路—主干路—国道, 快速路—高速公路—国道
	新郑机场	轨道交通	2	78	1号线、2号线、城郊线
		机动车		42~69	快速路—高速公路, 快速路—主干路
郑州东站	郑州航空港站	轨道交通	2	106	5号线、2号线、城郊线
		机动车		53~65	快速路—高速公路—主干路, 快速路—国道
	新郑机场	轨道交通	2	90	5号线、2号线、城郊线
		机动车		33~55	快速路—高速公路, 快速路—主干路

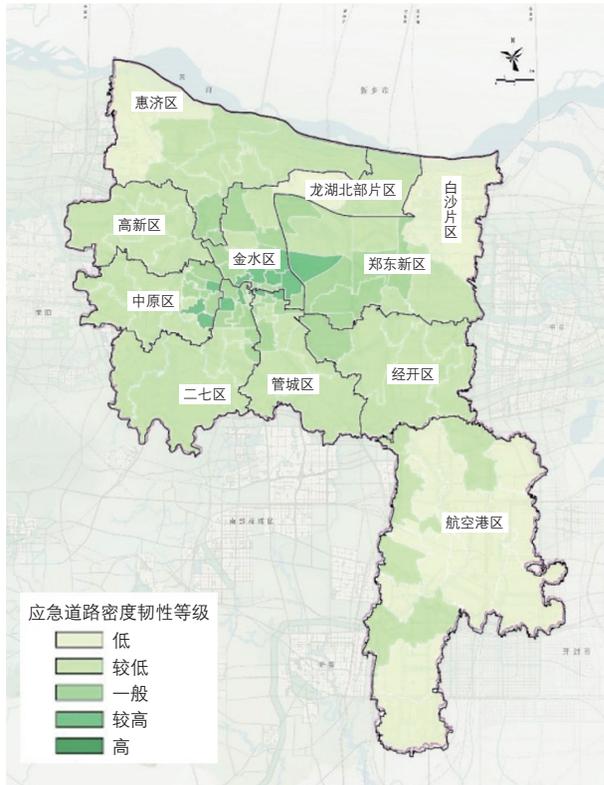


图4 郑州市应急道路密度韧性评估结果
Fig.4 Resilience assessment results of emergency roads density in Zhengzhou

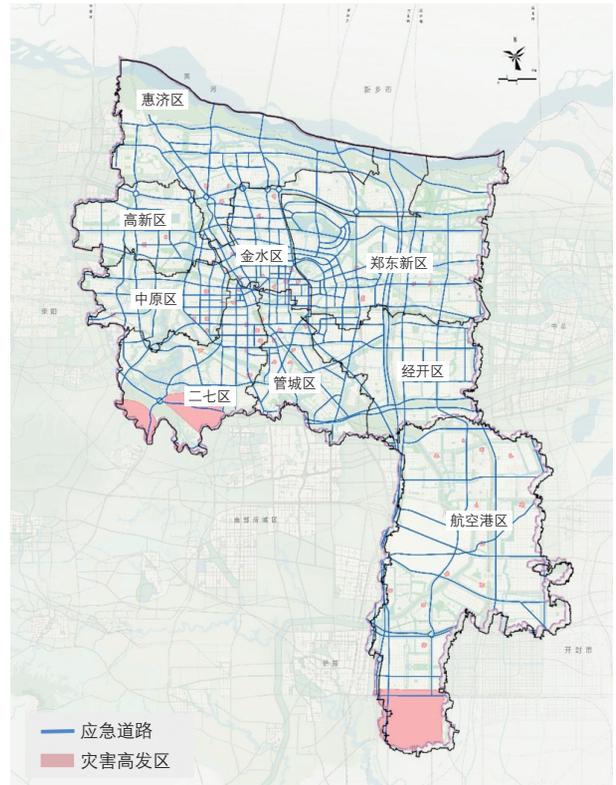


图5 郑州市易受灾应急道路分布
Fig.5 Distribution of disaster-prone emergency roads in Zhengzhou

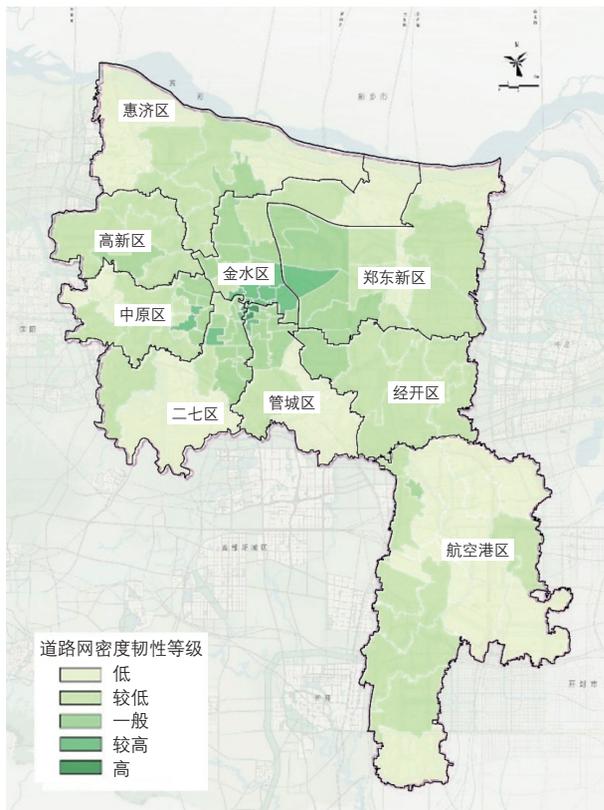


图6 郑州市道路网密度韧性评估结果
Fig.6 Assessment results of density resilience of Zhengzhou road network

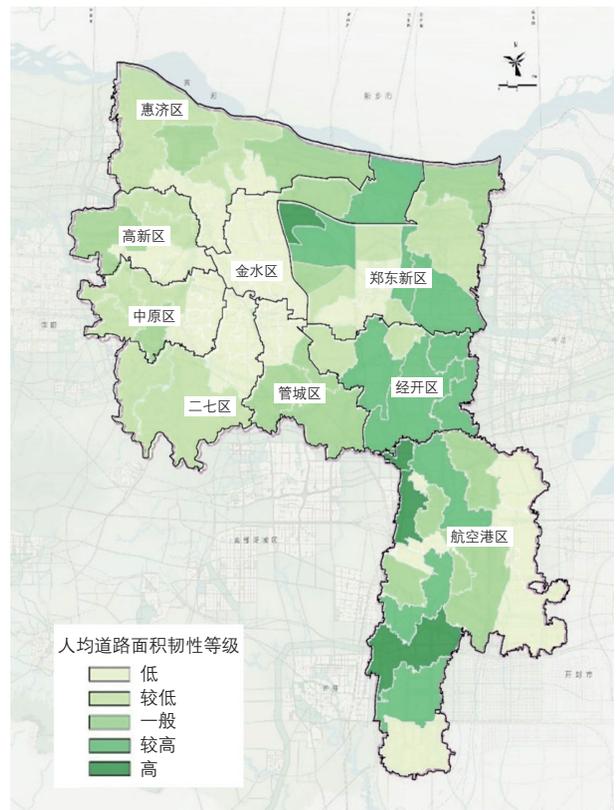


图7 郑州市人均道路面积韧性评估结果
Fig.7 Resilience assessment results of per capita road area in Zhengzhou

运输瘫痪。“7·20”特大暴雨灾害期间，郑州市主城区由于下穿铁路隧道全部断行，造成疏散和救援车辆均无法通行，跨组团间交通联系中断。因此从建设韧性城市的角度，为提高郑州市道路网络结构稳健性，对于新建经过铁路、高速铁路截面的通道应考虑采用上跨、下穿(隧道)和道路平穿等多形式的组合，增加经过关键截面通道的多样性，提升多灾种应对能力；对于现状下穿隧道，应通过增强阻水、排水能力，强化防冻、防火、抗震等标准，提升应对多灾害的抵御和适应能力。

4) 提升城市道路网络的稳健性和冗余性。

郑州市正处于由特大城市向超大城市发展过渡的特殊时期，发展方式由规模扩张转向更新提质，提升道路网密度和人均道路面积是增强城市安全韧性的关键任务。应借助城市更新的发展契机，充分落实窄马路、密路网的理念，通过适度补充加密支路及街巷道路，改善城市交通微循环系统，提高道路网密度和可达性，解决灾时应急避难疏散的最后100 m问题；应优化路网结构，特别是完善三环以外的快速路及主、次干路网络，增强道路网络结构的稳健性和连通性，增加灾时疏散与救援的对内、对外交通可达性；应提高直接连接应急避难场所(设施)的人行通道安全设计标准，优化相对高程，建立完善的步行空间安全保障机制，提高应急疏散中步行空间的安全韧性，畅通疏散救援通道，避免二次灾害的发生。

5) 增强公共交通系统安全服务的稳健性和冗余性。

公共交通在应对洪涝、冰雪等自然灾害时相对于小汽车有更强的车辆通过性和驾驶稳健性，因此灾害适应性较强，特别是城市轨道交通系统，在城市应急疏散救灾中往往承担着重要的角色。同时，公共交通又是特殊情况下城市交通枢纽最重要的客运疏散方式，是枢纽安全韧性的重要一环。因此，首先应加快完成郑州市地铁3期工程和启动4期工程建设，提高中心城区的地铁覆盖率，并对现状处于易淹、易涝区域的车站出入口优化竖向高程、增设挡水板等安全设施；应提高新建线路及设施的防灾减灾技术标准，完善极端天气、突发事件情况下的停运机制等，从而提高灾时城市轨道交通应急运输安全服务能力。其次，对于公共汽车交通应重点强化驾驶人安全驾驶意识，严禁冒险作

业、涉险运营；应明确途经中高风险区线路的绕行线路及应急预案，实现多路径保障；应优化公共汽车能源供应体系，在发展新能源车辆的同时，适当保留一些燃油车辆，多样化保证能源供应。

6) 增加交通设施功能的多样性。

公共停车场、公共汽车场站等交通设施分布在城市的各个位置，与居住区、商业中心、办公区、公共场馆等人流密集场所结合紧密，在遭遇重特大灾害时，是人员最容易到达的避难空间，也是最容易作为临时紧急物资堆放与处理的场所。因此，应推动交通设施用地功能的多样化，增加应急物资储备和应急避难的功能，强调平灾结合能力。

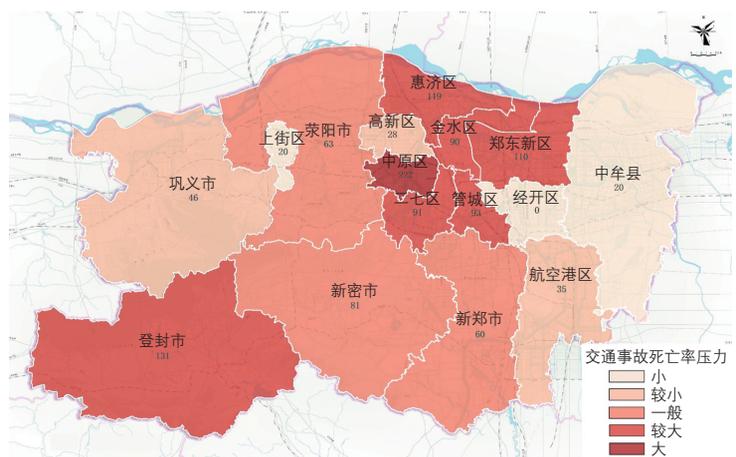
7) 提高交通系统智慧化防灾减灾能力。

智慧化是交通系统应急防灾的适应性和



图8 郑州市中心城区城市轨道交通车站800 m覆盖范围

Fig.8 Coverage area within 800 m radius of rail transit stations in Zhengzhou central district



注：各区县数值为2019—2023年交通事故发生平均数/起。

图9 郑州市交通事故死亡率压力分布

Fig.9 Pressure distribution of traffic accident mortality rate in Zhengzhou

恢复力的重要支撑。郑州市应进一步强化对交通系统的科技赋能，通过完善和提升轨道交通设施、长大桥梁、隧道、高风险路段等关键设施和节点的数字化、网联化、智能化水平，全面增强交通系统在灾前预防、灾中应对、灾后恢复的全过程中智慧化监测、预警、响应和恢复能力。

5 结束语

本文从建设韧性城市的角度阐述了韧性交通的概念，并分析总结了城市交通系统的韧性特征。以郑州市交通系统为例，分析城市交通安全韧性指标要求。参考北京、张家口等城市的韧性城市规划指标，提出构建包含枢纽体系安全、对外疏散保障、应急通道

支撑、道路网络韧性、公共交通支撑、交通运输安全、交通设施韧性和交通应急响应等8个一级指标、22个二级指标的郑州市交通系统韧性评估指标体系。进而分析评估郑州市交通系统韧性能力，最终从枢纽体系安全、对外立体救灾网络、关键通道多样性、道路网络稳健性和冗余性、公共交通安全性、交通设施功能多样性、交通系统智能化等7个方面提出郑州市交通系统韧性提升策略的建议。

参考文献：

References:

[1] 黄建中, 胡刚钰, 石佳宁, 等. 城市交通系统的韧性研究: 概念、特征与议题[J/OL]. 城市规划, 2024[2024-04-01]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2378.TU.20240108.2135.006>.

[2] 仇保兴. 构建韧性城市交通五准则[J]. 城市发展研究, 2017, 24(11): 1-8.

QIU B X. Five guidelines to build transport of tough urban[J]. Urban development studies, 2017, 24(11): 1-8.

[3] 沈清基. 基础设施韧性与交通韧性[EB/OL]. (2020-06-09)[2024-04-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/qSEUwgmrg9-3t3k3-lrZPA>.

[4] 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[EB/OL]. (2022-01-21)[2024-04-01]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/202201/P020220121639049697767.pdf>.

[5] 郭栋梁, 杜景州. 7·20背景下郑州市交通系统韧性提升策略研究[C]//中国城市规划学会城市交通规划专业委员会. 韧性交通: 品质与服务: 2023年中国城市交通规划年会论文摘要. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 223.

[6] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部关于印发《交通强国建设评价指标体系》的通知(交规划发〔2022〕7号)[A/OL]. (2022-01-16)[2024-04-01]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202203/t20220317_3646455.html.

[7] 赵丹, 何永, 杨兵. 北京韧性城市规划纲要研究[R/OL]. 北京: 中国城市规划网, 2018[2024-04-01]. https://www.sohu.com/a/242382447_656518.

[8] 清华同衡规划设计研究院有限公司. 张家口韧性城市建设专题研究[R]. 北京: 清华同衡规划设计研究院有限公司, 2020.



图10 郑州“四主多辅”铁路客运枢纽韧性格局
Fig.10 Resilience pattern of Zhengzhou's "four main and multiple auxiliary" railway passenger transportation hub

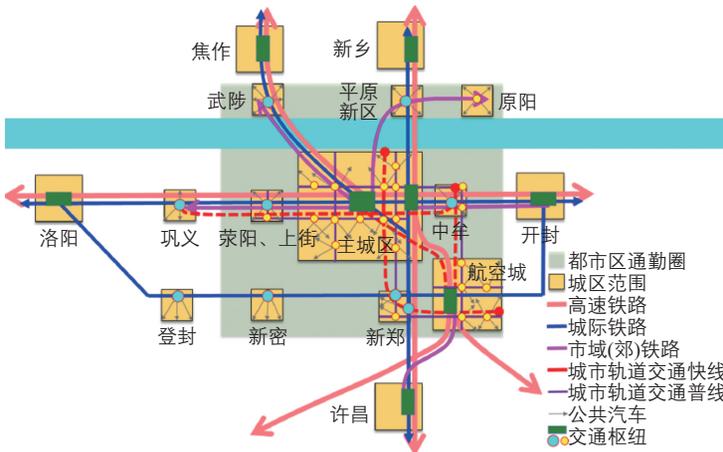


图11 郑州都市圈轨道交通多网融合
Fig.11 Multi-network integration of rail transit in the Zhengzhou Metropolitan area