

极端天气条件下交通基础设施韧性评估与提升方法

郭登堂

德州市公路事业发展中心, 山东 德州 253011

DOI:10.61369/UAID.2025010035

摘要：随着极端天气事件日益频繁，交通基础设施面临严峻挑战。针对此，构建交通基础设施韧性评估与提升体系。研究先明确研究背景与目标，构建包含指标选取原则、关键指标及权重分配的评估指标体系；分析不同极端天气作用机制、识别薄弱环节并制定影响分级标准；提出规划设计、建设施工、运营维护阶段的韧性提升策略；设计实施流程，建立资源整合与监督反馈机制。该研究成果为提升交通基础设施应对极端天气能力提供系统方案，助力保障交通系统稳定运行。

关键词：极端天气；交通基础设施；韧性评估；提升策略；实施路径

Methods for Assessing and Improving the Resilience of Transportation Infrastructure under Extreme Weather Conditions

Guo Dengtang

Dezhou Highway Development Center, Dezhou, Shandong 253011

Abstract : As extreme weather events become more frequent, transportation infrastructure faces significant challenges. To address this, a resilience assessment and enhancement system for transportation infrastructure has been developed. The study begins by clarifying the research background and objectives, constructing an evaluation index system that includes principles for selecting indicators, key indicators, and their weight distribution. It then analyzes the mechanisms of different extreme weather events, identifies weak points, and establishes impact grading standards. The study proposes resilience enhancement strategies for the planning and design, construction, and operation and maintenance phases. Additionally, it outlines implementation procedures and establishes a resource integration and supervision feedback mechanism. This research provides a systematic solution to enhance the ability of transportation infrastructure to cope with extreme weather, thereby ensuring the stable operation of the transportation system.

Keywords : **extreme weather; transportation infrastructure; resilience assessment; enhancement strategies; implementation path**

引言

近年来，全球气候变化导致暴雨、暴雪、高温、强风等极端天气事件频发，对交通基础设施造成严重冲击，引发道路损毁、桥梁垮塌、运输中断等问题，威胁公众出行安全与社会经济稳定运行。在此背景下，提升交通基础设施在极端天气下的韧性迫在眉睫。开展交通基础设施韧性评估与提升研究，能够科学识别设施薄弱环节，针对性制定应对策略，有效降低极端天气造成的损失。本文围绕交通基础设施韧性评估指标构建、影响分析、提升策略及实施路径展开研究，旨在为增强交通系统抗灾能力提供实践指导与技术支撑。

一、交通基础设施韧性评估指标体系构建

（一）评估指标选取原则

交通基础设施韧性评估指标的选取需遵循系统性、科学性与实用性原则。系统性要求指标覆盖交通基础设施全生命周期及极端天气作用的各个环节，全面反映设施在灾前预防、灾中抵御和灾后恢复阶段的表现。科学性强调指标需基于客观事实和专业理

论，确保数据可量化、可验证，避免主观随意性。实用性则要求指标选取紧密结合工程实际，便于在规划设计、建设施工和运营维护等阶段应用，能够有效指导交通基础设施韧性提升工作。同时，指标选取还应兼顾动态性，考虑不同地区气候差异、设施类型特点及技术发展水平，确保评估体系具有广泛适用性和持续有效性^[1]。

（二）关键评估指标确定

极端天气下交通基础设施韧性评估需聚焦核心指标。设施抗

灾能力指标反映基础设施在极端天气冲击下保持结构完整与功能正常的的能力，包括路基稳定性、桥梁抗震强度、路面抗滑性能等参数。恢复能力指标衡量设施受损后恢复至正常运行状态的速度与效率，涵盖修复时间、资源投入、临时通行能力恢复程度等要素。连通性保持指标关注极端天气期间交通网络的畅通程度，以路网中断节点数量、绕行距离增加比例、关键通道通行能力下降幅度等为量化依据。此外，社会经济影响指标评估极端天气对交通系统服务功能的破坏程度，涉及运输延误成本、经济损失规模、公众出行满意度等维度，从多视角综合评估交通基础设施的韧性水平。

（三）指标权重分配方法

指标权重分配采用经验判断与数据验证相结合的方式。首先，组织交通工程、防灾减灾等领域专家，基于专业知识和工程实践经验，对各评估指标的重要程度进行主观赋权，形成初步权重分配方案。其次，收集不同地区、不同类型交通基础设施在极端天气下的运行数据，运用层次分析法、熵值法等客观分析手段，对专家赋权结果进行修正与验证，平衡主观判断与客观数据的权重占比。针对权重争议较大的指标，通过多轮专家研讨与案例数据对比分析，确定最终权重值。此外，建立权重动态调整机制，根据极端天气变化趋势、技术革新及设施功能需求转变，定期优化指标权重，确保评估体系能够准确反映交通基础设施在极端天气下的实际韧性状况。

二、极端天气对交通基础设施的影响分析

（一）不同极端天气的作用机制

极端天气对交通基础设施的破坏存在差异化作用机制。暴雨天气通过持续强降水引发路面积水、路基浸泡与边坡失稳，导致路面结构承载能力下降，桥梁墩台基础受冲刷掏空；洪水还可能引发泥石流、塌方等次生灾害，直接冲毁道路与桥梁。暴雪天气下，积雪结冰致使路面摩擦系数降低，增加交通事故风险，同时积雪荷载可能超过桥梁、高架结构设计承载能力，造成结构变形甚至坍塌。大风天气通过强风吸力与冲击力，对交通标识、隔音屏障等附属设施产生破坏，强风还可能导致树木倒伏阻断道路，影响交通通行。高温天气则加速沥青路面软化变形、材料老化，降低路面使用寿命，同时引发桥梁伸缩缝失效、轨道热胀变形等问题，威胁交通运行安全。不同极端天气的叠加效应，更会加剧对交通基础设施的综合破坏程度^[2]。

（二）交通基础设施薄弱环节识别

交通基础设施在极端天气下存在多处薄弱环节。道路工程中，填挖交界处、高填方路段、沿河傍山路段易受雨水冲刷发生路基塌陷；沥青路面在高温下易出现车辙、拥包，低温冻融期则易产生裂缝。桥梁工程方面，下部结构的桥墩基础在洪水冲刷下易发生沉降、倾斜；上部结构的伸缩缝、支座等连接部位在温度骤变与强风冲击下易出现松动、损坏。隧道工程中，洞口段易受暴雨引发的滑坡、泥石流掩埋，洞内排水系统若堵塞，易造成积水漫流影响通行。交通附属设施如边坡防护工程、排水系统、照

明与监控设备等，在极端天气下也常因防护能力不足或供电中断而失效，进而削弱交通基础设施整体韧性。

（三）影响程度分级标准

极端天气对交通基础设施的影响程度依据设施功能受损状态与交通中断情况进行分级。轻度影响表现为局部设施出现轻微损坏，如少量路面裂缝、部分排水口堵塞，交通运行基本正常，通过简单维护即可恢复。中度影响指设施损坏导致局部路段通行效率显著下降，如桥梁伸缩缝损坏、部分路段积水严重，需采取临时交通管制或应急修复措施维持通行。重度影响表现为关键设施严重损坏，如桥梁坍塌、道路大面积塌陷，导致交通完全中断，需投入大量人力物力进行抢修重建。灾难性影响则涉及区域交通网络瘫痪，引发重大经济损失与社会安全问题，需启动跨区域应急救援与灾后重建工作。通过明确分级标准，为应急响应与资源调配提供科学依据^[3]。

三、交通基础设施韧性提升策略

（一）规划设计阶段的韧性增强措施

在交通基础设施规划设计阶段，需从源头增强其应对极端天气的韧性。首先，选址环节应充分考量气象条件与地质风险，避开洪水淹没区、滑坡高发带等高风险区域，优先选择地形稳定、排水顺畅的地段。其次，设计标准需突破常规荷载要求，针对暴雨、暴雪、强风等极端天气设定更高的抗灾参数，如提高路基防洪标高、增强桥梁抗风等级、优化路面结构的耐温性能。同时，引入冗余设计理念，预留备用通道、应急出入口等设施，确保主线路受损时交通网络仍能维持基本通行能力。此外，运用BIM技术进行全生命周期模拟分析，结合历史极端天气数据，对设施在灾害场景下的性能表现进行预演，提前优化设计方案，减少潜在风险。通过整合多学科知识，统筹考虑交通需求与防灾需求，为交通基础设施构建第一道韧性防线^[4]。

（二）建设施工阶段的质量保障手段

建设施工阶段的质量管控是实现交通基础设施韧性设计目标的关键环节。严格控制材料质量，对钢筋、混凝土、沥青等主材进行多批次抽检，确保其物理力学性能满足抗灾设计标准；规范施工工艺，强化路基压实度控制、桥梁桩基浇筑质量监管及防水层施工流程管理，杜绝因施工缺陷降低设施抗灾能力。建立全过程质量追溯体系，通过施工日志、影像记录、检测报告等资料，实现对隐蔽工程、关键工序的动态监管。针对极端天气易发地区，推行专项施工技术，如在冻融区域采用保温路基技术，在强降雨区域优化排水系统施工工艺。引入第三方质量检测机构，对工程实体进行独立评估，及时发现并整改质量隐患。通过系统化的质量保障措施，确保交通基础设施在建成初期即具备良好的抗灾性能。

（三）运营维护阶段的动态管理方案

运营维护阶段需建立动态化管理机制，持续提升交通基础设施韧性。构建智能监测网络，通过传感器、无人机巡检、卫星遥感等技术，实时采集路面状况、桥梁结构应力、边坡位移等数

据,结合气象预警信息,提前预判极端天气对设施的潜在威胁。制定分级响应预案,针对不同类型极端天气和影响程度,明确应急抢修队伍、物资调配、交通管制等处置流程,确保灾害发生时能够快速响应。推行预防性维护策略,定期对设施进行健康检测与性能评估,对存在安全隐患的部位及时加固维修,如对老化桥梁支座进行更换、对破损排水系统进行疏通改造。同时,建立公众反馈渠道,整合社交媒体、热线电话等信息来源,快速定位设施受损点,形成“监测-预警-处置-反馈”的闭环管理体系,持续提升交通基础设施在极端天气下的运行韧性^[5]。

四、韧性评估与提升的实施路径

(一) 实施流程规划

交通基础设施韧性评估与提升实施流程遵循“规划-执行-反馈”闭环逻辑。首先,开展前期调研,收集区域气象灾害历史数据、交通设施设计图纸及运行监测资料,明确评估范围与重点对象。其次,基于既定评估指标体系,运用现场勘查、无损检测、大数据分析等手段,对设施抗灾能力、恢复效率等指标进行量化评估,形成风险清单与薄弱环节诊断报告。随后,依据评估结果,结合规划设计、建设施工、运营维护阶段特性,制定差异化提升方案,细化技术措施、责任分工与时间节点。在实施过程中,建立动态跟踪机制,通过进度周报、专项检查等方式确保措施落地。项目完成后,开展效果验收,对比提升前后指标变化,结合模拟灾害测试或实际灾损数据,验证方案有效性,形成经验总结与改进建议,为后续工作提供参考^[6]。

(二) 资源整合与协同机制

构建“政产学研用”协同资源体系,保障韧性提升工作高效推进。政府部门统筹政策制定、资金划拨与监管考核,通过设立专项基金、出台补贴政策,为项目提供资金支持与制度保障;高校及科研机构负责技术研发与标准制定,将先进的监测技术、修复工艺转化为实践应用;企业作为实施主体,承担工程建设、设备安装及运维服务;行业协会发挥协调作用,搭建信息共享平

台,促进技术交流与经验推广。建立跨部门联席会议制度,定期组织交通、气象、应急管理等部门沟通会商,打破信息壁垒,实现灾害预警、设施状态数据实时共享。引入社会资本参与,通过PPP模式整合企业资金、技术优势,形成多元化投入机制,确保人力、物力、财力资源的优化配置与协同联动^[7]。

(三) 监督与反馈机制

建立多层次监督体系,保障韧性评估与提升工作质量。在内部监督层面,实施单位设置质量管控小组,对施工工艺、材料验收、进度执行等环节进行全过程监督,留存影像、检测报告等过程资料。外部监督方面,引入第三方监理机构,依据国家标准与合同要求开展独立评估,定期提交监理报告;同时,政府部门通过随机抽查、专项审计等方式,核查资金使用合规性与工程质量达标情况^[8]。搭建数字化反馈平台,整合智能监测设备、公众反馈渠道数据,实现设施状态异常信息、提升措施实施效果的实时反馈。针对监督检查中发现的问题,建立“问题清单-整改台账-验收销号”闭环管理机制,明确责任主体与整改期限,并将整改情况纳入绩效考核,定期开展监督结果分析,建立奖惩分明的激励机制,强化监督成果应用,推动交通基础设施韧性提升工作持续优化。

五、结语

本研究围绕极端天气下交通基础设施韧性问题,构建了涵盖评估指标体系、影响分析、提升策略及实施路径的系统性方案。通过明确关键评估指标与权重分配,剖析极端天气作用机制及设施薄弱环节,提出分阶段韧性提升策略,并规划可落地的实施流程与协同监督机制,为交通基础设施应对极端天气威胁提供了具体指导。然而,研究受数据样本与极端天气复杂场景限制,在动态适应性评估等方面仍有完善空间。未来,随着智能监测技术与大数据分析的发展,可进一步深化多源数据融合下的韧性动态评估,探索极端天气预测与设施韧性提升的协同优化路径,持续推动交通基础设施韧性研究向更高效、精准的方向发展。

参考文献

- [1] 贾瑞彪. 韧性城市建设中的风险分析与问题解决构思 [J]. 未来城市设计与运营, 2023(1): 13-18.
- [2] 徐潇源, 李佳琪, 王晗, 严正, 谢邦鹏, 罗潇. 城市电力-交通系统韧性研究综述及展望 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(23): 1-15.
- [3] 张翕然, 李正中, 张馨, 陈绍宽. 城市轨道交通系统韧性研究现状及展望 [J]. 交通信息与安全, 2024, 42(4): 1-11.
- [4] 嵇涛, 姚炎宏, 黄鲜, 诸云强, 邓社军, 于世军, 廖华军. 城市交通韧性研究进展及未来发展趋势 [J]. 地理科学进展, 2023, 42(5): 1012-1024.
- [5] 杨秀平, 王里克, 李亚兵, 等. 韧性城市研究综述与展望 [J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(6): 78-84.
- [6] 黄晓明, 赵润民. 道路交通基础设施韧性研究现状及展望 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2023(6): 1529-1549.
- [7] 许寅, 吴翔宇, 王颖. 极端条件下基于城市分区电网孤岛运行的韧性提升技术研究及展望 [J]. 供用电, 2024, 41(8): 45-53.
- [8] 魏威. 韧性交通视角下城市轨道交通规划提升若干思考 [J]. 交通与港航, 2023, 10(2): 25-30.