

# 气候适应型交通韧性的评估框架及其规划协同与提升策略

赵娜, 翟国方, 鲁钰雯

**【摘要】**在对当前交通气候适应体系存在的评估维度割裂问题进行系统剖析的基础上, 依托需求和供给交互理念, 提出一种人工智能交通韧性评估框架。基于这一框架, 深入探索量化评估与韧性提升的技术方法, 突破了传统单一维度评估以及缺乏动态反馈与协同优化机制的局限。同时, 在该框架指导下, 提出气候适应型交通韧性规划协同与提升策略, 旨在提升城市交通系统的长期稳定性和综合应对能力, 为气候适应型城市建设提供理论支持, 并为交通基础设施可持续发展提供技术路径。

**【关键词】**气候适应型; 交通韧性评估; 交互评估模型; 规划协同

**【文章编号】**1006-0022(2025)07-0027-08 **【中图分类号】**TU981、TU984、U491、TP18 **【文献标志码】**A

**【引文格式】**赵娜, 翟国方, 鲁钰雯. 气候适应型交通韧性的评估框架及其规划协同与提升策略 [J]. 规划师, 2025(7): 27-34.

## Assessment Framework for Climate-adaptive Transportation Resilience and its Planning Coordination And Improvement Strategies/ZHAO Na, ZHAI Guofang, LU Yuwen

**【Abstract】** Based on a systematic analysis of current fragmented assessment dimensions in transportation climate adaptation systems, an AI-driven transportation resilience assessment framework is put forward grounded in demand-supply interaction principles. The framework thoroughly investigates quantitative assessment and resilience enhancement methodologies, overcoming the limitations of traditional single-dimensional evaluation approaches and the lack of dynamic feedback and collaborative optimization mechanisms. Under the guidance of the framework, the climate-adaptive transportation resilience planning coordination and improvement strategies are proposed, aiming to enhance long-term stability and comprehensive adaptive capacity of urban transportation systems, providing theoretical support for climate-resilient city development and technical pathways for sustainable transportation infrastructure.

**【Keywords】** climate-adaptive; transportation resilience assessment; interactive evaluation model; planning coordination

## 0 引言

在全球气候变化危机加剧的背景下, 城市面临的气候灾害风险持续攀升。IPCC 第六次评估报告指出, 近年来, 极端高温、暴雨洪涝、飓风等灾害频发, 严重威胁城市正常运转与居民生活。交通基础设施作为城

市的“生命线”, 其韧性直接关系到社会经济活动与民生保障。我国自 2022 年起密集出台 13 份交通领域的专项气候适应政策文件, 《国家适应气候变化战略 2035》更是将交通系统气候适应性建设列为重点。因此, 立足城市交通领域, 系统响应气候变化, 构建完善的韧性评估与规划实施机制, 成为建设气候适应型城市

**【基金项目】** 国家重点研发计划项目 (2023YFC3805204)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2025300463)、江苏省基础研究计划资助项目 (BK20220782)

**【作者简介】** 赵娜, 注册城乡规划师, 南京大学建筑与城市规划学院博士研究生。602023360021@smail.nju.edu.cn

翟国方, 南京大学建筑与城市规划学院教授、博士生导师, 城市安全发展研究中心主任。

鲁钰雯, 南京大学建筑与城市规划学院副研究员。

的关键所在。

当前，交通韧性研究逐步转向动态评估，主要从出行韧性（需求侧）与交通系统韧性（供给侧）两大维度展开。需求侧聚焦气候事件对出行行为的影响，通过分析极端天气下的出行方式、时间及路线调整概率，以及公共交通客流量变化，量化出行韧性<sup>[1]</sup>。供给侧则围绕基础设施结构稳定性与系统运营协同能力，如通过飓风后道路中断率、区域可达性变化或极端降雨时多模式交通压力转换效率，评估交通系统韧性<sup>[2]</sup>。在规划实践方面，既有研究多依赖气候灾害风险评估结果，针对高温热浪、暴雨洪涝等高暴露区域，主要通过基础设施加固<sup>[3]</sup>、网络布局优化与多模式交通协同<sup>[4]</sup>、应急管理机制完善<sup>[5]</sup>等路径提升交通气候适应性。

然而，既有研究与实践仍存在显著短板。在评估层面，需求侧与供给侧的研究相对割裂，缺乏对两者交互作用的深入探讨，导致无法精准匹配极端气候下动态变化的出行需求；在规划实践中，现有方法大多局限于基础设施加固或网络布局优化的单一维度，忽视了供需动态平衡机制，未能系统性关联韧性形成机制与规划要素，难以有效识别供需失衡的关键风险节点，进而制约了规划措施的落地实效<sup>[6]</sup>。

上述研究缺口表明，当前急需突破传统研究单一维度的静态分析模式，通过构建多维度动态评估、多要素耦合协同的系统化框架，应对气候变化对城市交通系统的严峻挑战。这不仅关乎交通系统自身的可持续发展，还是保障城市安全运行、提升社会韧性的重要基础。

## 1 气候适应型交通韧性评估框架

在气候变化背景下，极端天气事件

（如暴雨、高温、海平面上升等）愈发频繁，且强度不断加大，这使得传统交通系统的脆弱性被进一步放大。为突破现有研究在评估维度单一化、动态机制缺失化、要素关联碎片化的局限，本研究提出需求韧性与供给韧性动态交互机制技术。基于韧性理论，从需求侧与供给侧双重视角出发，聚焦于气候风险动态监测、AI驱动韧性分析与规划要素协同优化，系统评估城市交通系统在气候变化背景下的适应能力。见图1。

### 1.1 理论基础构建与韧性指标确定

在现代科学范畴内，“韧性”一词广泛渗透于生态学、社会学、工程学等众多学科，着重突出系统在遭受干扰时所具备的恢复与适应能力。在交通学领域，2006年Murray-Tuite<sup>[7]</sup>提出了“交

通韧性”概念。此后，相关研究大多聚焦于交通系统或网络在面对干扰时的恢复能力。气候适应型交通韧性不仅重视交通系统在极端气候事件冲击下的快速恢复能力，还强调其在长期气候变化大背景下的适应能力。以“韧性曲线”为理论基础<sup>[8]</sup>，具体体现在交通系统在抵抗、吸收、恢复和适应性方面的差异。在应对极端天气事件时，气候适应型交通韧性强调快速响应与精准预警，而在应对长期气候变化时，则侧重于规划适应性策略。

气候适应型交通韧性研究涉及物理韧性、需求韧性、供给韧性等多维度综合考量。基于动态数据的交通研究，分别从需求响应（关注出行者行为调整）、服务供给（聚焦交通系统功能维持）等角度，构建交通系统韧性理论框架，为后续的维度拆解与指标设计提供底层逻辑

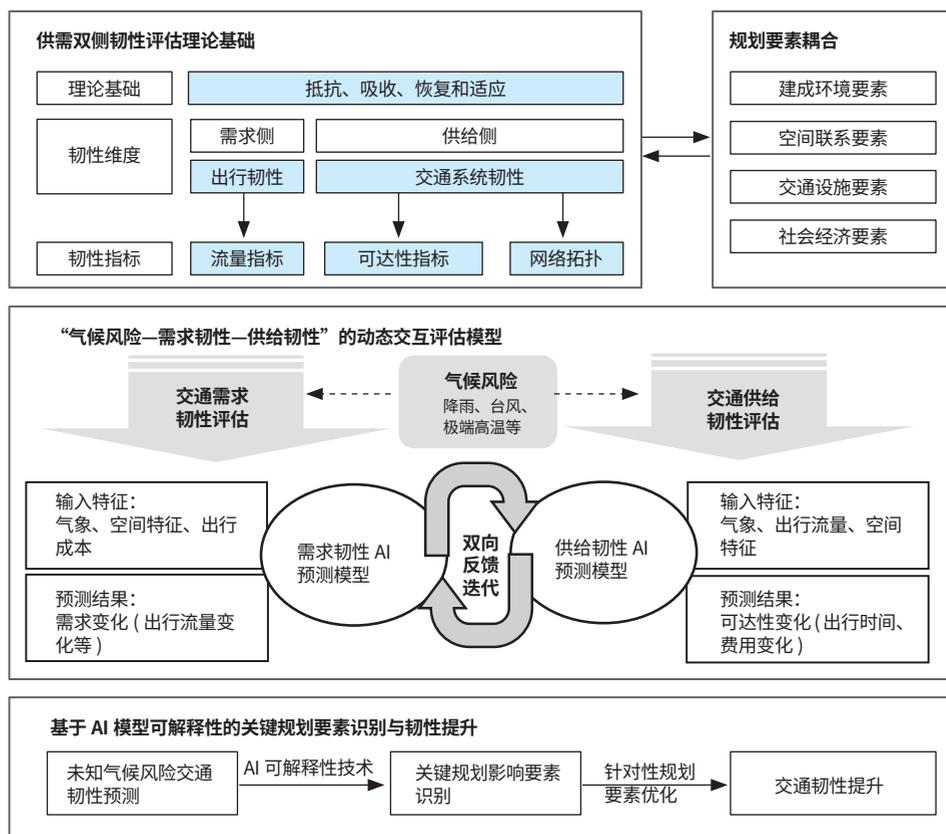


图1 气候适应型交通韧性评估框架

支撑。见图 2。

### 1.1.1 需求侧韧性与指标

气候适应型出行韧性是评估需求侧韧性的关键指标，用于衡量出行者在气候风险影响下，调整出行模式和需求的适应能力，以及在长期气候风险交互中形成新稳定状态的能力<sup>[9]</sup>。当气候风险改变出行的成本、安全性和便利性等要素时，出行者会重新评估出行方案。以暴雨天气为例，许多自驾出行者会因出行环境改变而选择地铁、公交等公共交通方式，也可能会推迟出行时间或减少不必要的出行，这表现出交通需求对外部环境变化的弹性响应。

从流量理论看，极端天气下的出行韧性可通过流量指标反映需求改变与适应。其中：实时交通流量能够直观呈现气候风险下出行需求总量的变化，反映出出行者主动调整出行计划的行为，是需求韧性最直接的量化体现；实时交通速度可反映交通速度下降的幅度与持续时长，从侧面印证了气候对出行效率的干扰；实时交通密度则能够反映需求在局部空间的集聚与滞留状况，体现出行者被动适应风险时，交通需求在空间分布

上存在的韧性短板。这些流量指标从总量、效率、空间分布维度刻画了需求侧在气候风险下的韧性表现，为评估出行行为调整的有效性、识别需求韧性薄弱环节提供了数据支撑。

### 1.1.2 供给侧韧性与指标

供给侧韧性评估基于系统可靠性和工程抗灾理论，从服务运营和基础设施两个维度综合分析交通系统的气候适应能力。在评估过程中，重点关注极端气候下服务的持续性、中断后的恢复效率，以及关键设施的抵抗性能。通过分析网络稳定性、功能恢复能力和多模式协同效应，全面评估系统应对气候风险的整体韧性。

在气候风险情境下，交通系统韧性呈现出复杂特征：一方面，系统能够通过快速修复受损节点以及多模式协同来维持服务；另一方面，当极端气候与系统脆弱性叠加时，可能会出现多模式交通的级联失效现象。为量化这一复杂性，供给侧韧性研究选取可达性指标和网络拓扑指标来构建双维度评估体系。基于可达性理论，聚焦交通系统中“起点—终点”间的连通与便捷程度，衡量

气候风险下供给侧保障出行可达的能力。其中：OD 之间距离是基础，可直观反映可达性受气候干扰的表现；OD 之间各类交通时耗及其变化程度体现了气候对出行效率的冲击，以及供给侧（如道路除雪、公交调度）采取应对措施后，时耗恢复的韧性水平；OD 之间交通模式可选择性能能够衡量多模式交通的互补效应，体现系统维持服务连续性的能力；OD 之间路径可选择性则反映了供给侧网络的冗余度。复杂网络理论则用于刻画交通网络的结构特征，反映系统抗干扰与恢复的潜力。其中：接近中心性表征节点到网络其他节点的平均最短距离，反映关键节点在维持全网可达性中的枢纽作用；中心度通过介数中心性衡量节点在网络中的交通流承载重要性，换乘站等高中心度节点一旦受损（如暴雨致电梯故障），将引发显著的级联效应；聚类系数体现了节点周边网络的集聚程度。这些指标从可达性保障、网络结构特征维度，系统量化了供给侧在气候风险下的韧性表现。

## 1.2 规划要素与韧性指标耦合

气候适应型交通韧性的实现，依赖于交通韧性指标与土地利用、环境容量、交通设施等多要素之间的协同耦合<sup>[10]</sup>。各要素通过独特作用机制，融入交通系统应对气候风险的动态响应过程，在风险识别、冲击抵御和恢复重建等各个环节均发挥着关键作用。

土地利用要素决定了出行需求的时空分布特征。其中：各类用地面积框定了区域出行需求的总量；各类用地性质通过明确功能导向，塑造了出行需求结构；各类用地兼容性则通过缩短出行距离、丰富出行目的，有效降低了气候风险下的刚性出行需求。

环境容量要素从供需两侧调节交通韧性。其中：绿地率通过生态调蓄功能，

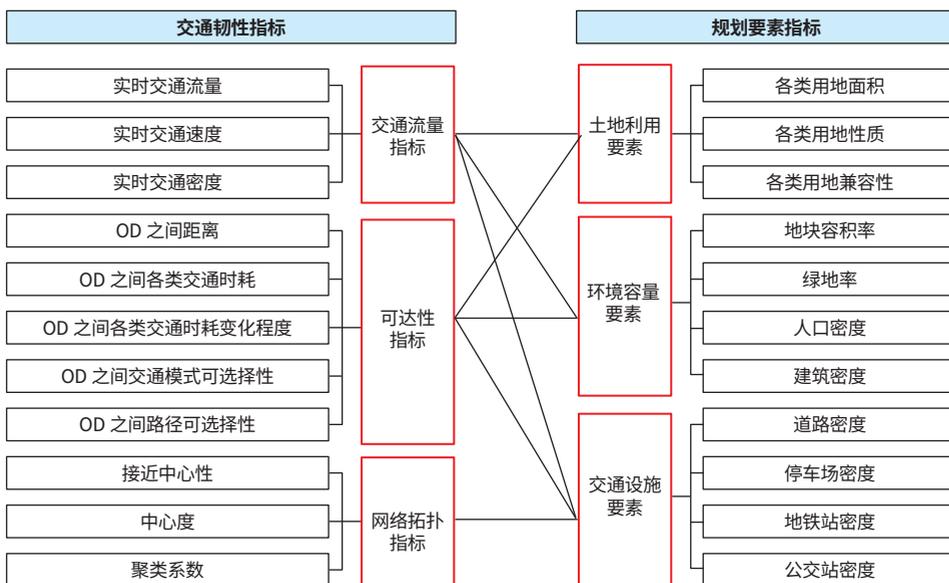


图 2 气候适应型交通韧性评估指标体系

能够缓解气候风险对交通设施的直接冲击,保障可达性的稳定;人口密度直接影响出行需求大小;地块容积率、建筑密度与交通设施的承载压力相关联。这些指标共同作用于交通供需平衡。

交通设施要素作为供给韧性的物质载体,发挥着不可或缺的作用。其中:道路密度提供了路径冗余,增强了交通网络的抗风险能力;地铁站、公交站密度决定了公共交通的覆盖范围,提升了多模式交通的可达性;停车场密度则匹配了出行末端需求,保障了交通系统的运行效率。

规划要素与交通韧性指标通过多层次交互融合,形成双向迭代机制:土地利用、交通设施要素能够调节出行需求结构,作用于流量指标,对需求韧性产生影响;交通设施、环境容量要素支撑可达性效能,影响供给韧性;各要素协同优化网络拓扑,保障系统韧性。同时,交通韧性指标评估结果会反向驱动规划要素优化,为气候适应型交通韧性的评估与提升构建系统性的耦合框架。

### 1.3 “气候风险—需求韧性—供给韧性”的动态交互评估模型

气候风险、需求韧性与供给韧性在交通系统中相互作用。气候风险作为外部扰动源,驱动需求侧与供给侧的动态响应;需求侧出行者调整出行方案,其变化传递至供给侧;供给侧受资源、容量限制调整服务,又反作用于需求侧,形成双向迭代反馈。为量化这种交互扰动引发的交通系统综合韧性变化,本研究构建了“气候风险—需求韧性—供给韧性”的动态交互评估模型。

在需求韧性评估方面,定义出行韧性指数(如出行流量下降率),筛选气象、空间、成本等影响要素,利用机器学习算法训练 AI 模型,通过调整气候参数预

测未知风险下的需求韧性。在供给韧性评估方面,则定义供给韧性指数(如出行成本增长率),识别拓扑结构、地理环境等关键要素,训练 AI 模型并验证其泛化能力,进而预测供给韧性。动态交互模型基于需求侧和供给侧评估框架,建立双向数据交互机制:将需求侧 AI 模型预测得到的需求变化结果作为关键参数,输入供给侧 AI 模型,驱动供给系统对服务压力与资源调配进行模拟;将供给侧输出的可达性变化反向输入需求侧 AI 模型,影响出行者的二次决策。通过迭代计算,直至系统达到动态平衡,从而实现交通韧性的精准量化评估。

### 1.4 基于 AI 模型可解释性的关键规划要素识别与韧性提升

动态交互 AI 模型既可用于未知气候条件下需求韧性和供给韧性的评估,也可借助 AI 可解释性方法,分析输入特征对预测结果的影响。具体而言,如果模型预测一个交通系统在某种气象条件下的某种韧性指数较低,就能利用模型解释性技术,识别导致这种预测结果的关键规划影响因素,以及这些因素数值对预测结果的定量影响关系。基于此,针对关键要素设计优化方案,通过调整输入特征(如优化设施布局、调控用地性质等),改变韧性指标,进而实现交通韧性的提升。

## 2 气候适应型交通韧性评估技术

在气候适应型交通韧性评估框架下,以智能评估技术为核心,提出“数据感知—模型计算—决策输出”三层架构实现路径。数据感知层采集气候灾害全周期交通与出行数据,模型计算层通过深度学习算法量化分析系统动态变化,决策输出层整合结果辅助决策。三层架构协

同运作,保障深度学习评估模型精准捕捉气候灾害影响,支撑交通韧性管理。见图 3。

### 2.1 交通气候风险数据获取与预处理技术

数据感知层是交通韧性评估的基础,主要用于数据获取和预处理,所涉及的数据类型多元,包括交通运行数据、空间数据及气象水文数据等。其中:交通运行数据(如 GPS 轨迹、地铁闸机记录、手机信令数据等)可精准呈现交通运行状态和人群出行轨迹;空间数据(包含路网拓扑、地形高程、POI 分布等)为研究提供地理空间维度的信息支撑;气候风险作为关键扰动因素,主要通过气象水文数据(如降水强度、风速、内涝点分布等)体现,这些数据可用于明确气候风险的类型与等级。通过对多元数据进行耦合分析,能够构建起气候适应型交通韧性评估的基底。

### 2.2 基于 AI 预测的交通韧性评估技术

#### 2.2.1 需求侧出行行为韧性 AI 评估技术

本研究采用流量变化率与出行模式转换率来表征出行韧性。前者反映极端天气下 OD 流量的增减幅度,后者则用于量化不同交通方式之间的转移比例。以流量指数为例,通过计算特定气候风险等级下的流量与基线流量的变化率来衡量韧性指数,具体定义如下:当相对流量保持稳定或上升趋势时,表明韧性较好;当相对流量下降时,则表明韧性较差。同时,将建成环境要素与流量变化率进行时空匹配。基于轨道交通、道路交通等出行模式在气候风险下的客流重分配,对韧性变化进行组合分类,并将需求侧出行韧性 AI 评估设定为分类任

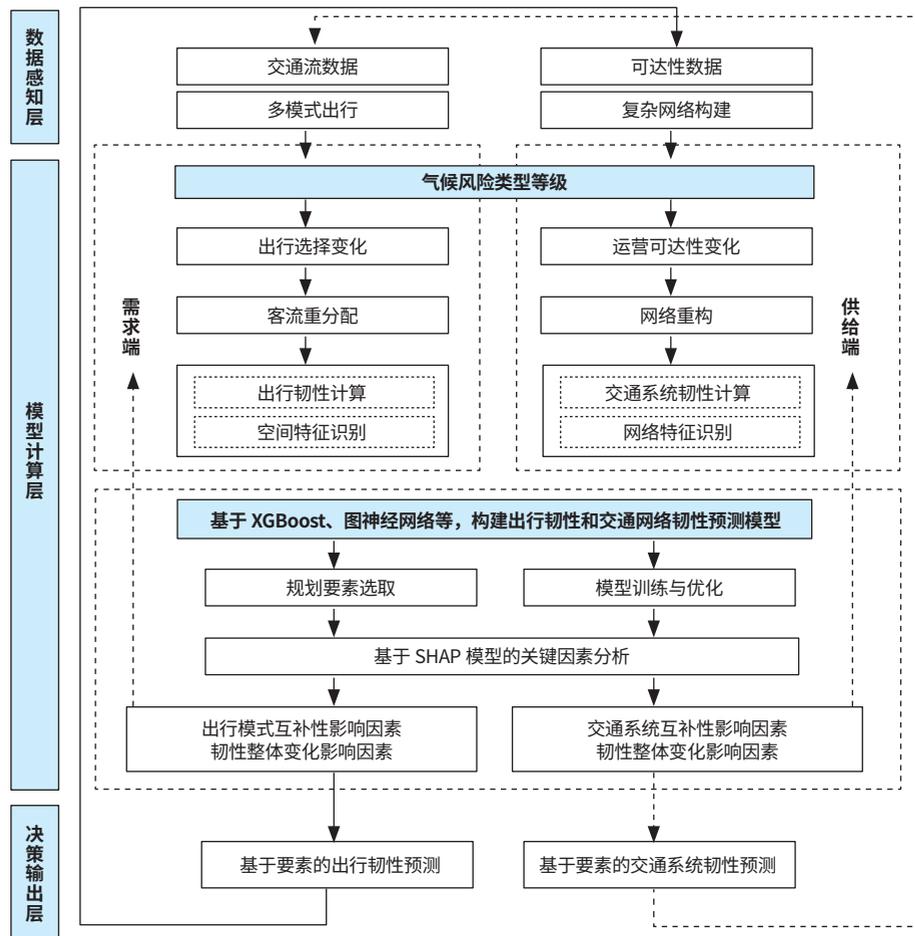


图3 气候适应型交通韧性评估技术

务，以提取的建成环境等潜在影响因素为特征数据，借助 XGBoost、图神经网络等 AI 模型，挖掘这些特征与韧性分类之间的关联。在训练出精准的分类模型后，针对目标区域的不同出行起终点对，固定建成环境与关联特征数据，仅变更天气数据输入，以此预测未来不同气候风险等级下的出行韧性类别，从而实现精准评估。

### 2.2.2 供给侧交通系统韧性 AI 评估技术

供给侧交通系统韧性的智能评估与需求侧有相似之处，但在评估指标和影响因素方面存在差异。交通系统韧性通常选取运营可达性变化和网络结构效率作为核心评估指标。前者基于可达性理论，通过计算极端天气下综合出行成本

(包括时间、费用等)的变化，衡量交通系统运行效率的变化；后者则关注交通系统因部分设施失效而引发的结构性调整，反映系统的冗余性和重构能力。考虑到网络结构效率发生结构性调整，最终影响的也是出行者的可达性变化，即运营可达性变化实际上已经隐含了网络结构效率的变化情况，因此本研究直接使用可达性变化作为供给侧交通韧性的评估指标。

对于可达性变化(即出行时间和费用的变化)的预测，可以采用回归和分类两种方式。其中：回归方式是利用 AI 模型直接预测可达性的变化率；分类方式则是将变化率划分为几个级别，将每个级别视为一类，进而将问题转化为分类问题。此外，针对出行时间和费用的变

化，既可以采用综合指标来展开分析，也可以分别训练两个模型进行独立分析。

在模型训练与预测阶段，将已提取的影响因素作为输入数据，运用适合的 AI 模型进行训练。通过调整模型参数和输入条件，完成对未来不同等级气候风险下交通系统韧性的预测。

### 2.2.3 需求韧性与供给韧性动态交互机制技术

在交通韧性评估中，基于深度学习方法，融合需求侧与供给侧的评估技术，构建需求韧性与供给韧性 AI 交互评估模型。在该模型中，需求侧与供给侧的预测模型输出紧密相连、互为输入，以更全面且精准地反映交通系统在气候风险下的韧性特征。

以地铁在暴雪天气下的运营为例，暴雪天气可能导致道路网络出行困难，使得很多原本选择道路出行的人流转向地铁网络，从而导致地铁客流量的增长。这种客流量的变化反过来会造成地铁系统的拥挤。此外，暴雪天气下列车行驶速度变慢，地铁出行的时间成本也会相应增加，这又会导致一部分乘客放弃出行，进而使地铁客流量再次发生变化。可见，在暴雪天，交通系统供给能力的变化会引发出行时间的变化，并导致客流的变化，而客流的变化又会反过来影响系统的供给能力，从而再次影响出行时间。这凸显出需求侧与供给侧是紧密交互的，而不是相互独立的。

基于此，需求侧与供给侧模型能够实现持续的相互迭代优化。具体而言，在极端天气场景下，需求侧模型可以预测客流量的变化，但其需要以可达性变化作为输入(这里的可达性指出行时间成本和经济成本的变化)；供给侧模型可以预测可达性变化，但又需要实时的出行需求变化(即客流量变化)作为输入。也就是说，两个模型的输出互为对方的输

入。因此,这两个模型可以不断交互迭代,直至两个模型的输出在互为输入的情况下达到收敛状态,此时便可以得到最终的预测结果。通过这种持续的双向迭代,输出结果会更加精准,从而为交通韧性评估提供了更为全面且可靠的技术支撑。

### 2.3 基于需求韧性与供给韧性 AI 交互评估模型可解释性的规划提升技术

依托需求韧性与供给韧性 AI 交互评估模型,结合 AI 模型可解释性方法,可以精准识别规划要素对交通模式和网络韧性的影响,预测基础设施易受损区域、可达性下降区域及交通韧性高需求区域。具体而言,可以采用 shap.TreeExplainer 对模型进行 SHAP 分析,量化各特征的影响力,精准揭示天气严重程度、出行距离、周边设施完备度等驱动因子与预测指标之间复杂的非线性作用关系。对于神经网络模型,同样可以通过热力图分析来识别关键影响因素。基于 SHAP 等分析结果,可以从多个维度开展针对性的规划优化工作。例如,若发现出行距离与交通系统韧性呈显著负相关关系,则可以优化多模式交通互补体系,为关键长距离出行线路增设冗余线路与交通方式,进而提升网络的连通性与系统的韧性。

将调整后的道路通行能力参数、公交线路设置方案和应急资源调配计划等数据重新输入到需求韧性与供给韧性 AI 交互评估模型中进行预测。通过对比优化前后平均出行时间、交通韧性指数等指标,验证规划优化措施与应急响应机制的有效性。若优化后平均出行时间显著缩短,且韧性指标提升,则表明规划策略与应急机制能够有效增强交通系统的韧性,为应对未来气候风险与交通挑战提供有力支撑。

## 3 气候适应型交通韧性规划协同与提升策略

在“气候风险—需求韧性—供给韧性”的动态交互评估框架下,结合国内外实践案例,提出气候适应型交通韧性规划协同<sup>[11]</sup>与提升策略,并建立动态评估与反馈优化机制,以实现闭环管理。见图 4。

### 3.1 基于规划协同的韧性提升策略

#### 3.1.1 交通与空间格局协同

交通与空间格局的协同,核心在于构建一套空间结构优化与交通风险防控的互动反馈机制。依托 AI 模型,能够精确识别气候风险下交通系统的长距离出行韧性薄弱区域,进而优化城市空间组织形态,从根本上减少长距离、高风险的出行需求。同时,要加强交通廊道在极端气候条件下的承载能力和应急响应能力,形成从风险识别到格局重构再到交通韧性提升的协同闭环。多中心网络的韧性重构有助于实现职住平衡。通过模型锁定韧性薄弱区域后,可在高风险廊道周边布局次级就业中心。例如,上海全面推进“15 分钟就业服务圈”建设<sup>[12]</sup>,

使职住分布更加均衡,减轻了长距离通勤对交通系统的压力,从而从空间规划层面降低了极端天气下交通韧性受冲击的可能性。重点廊道韧性规划能够进一步强化应急保障。结合可达性变化热力图,针对预测可达性下降程度较高的交通走廊,需预先增设应急通道,在极端气候下保障交通联通,增强系统的应急能力,从而提升整体韧性。

#### 3.1.2 交通与功能要素协同

韧性交通是城市各功能要素发展的基础。通过 AI 模型量化识别气候风险下的脆弱节点,并借助 SHAP 分析揭示影响交通韧性的关键因素(如极端天气下的路网中断概率、关键交通设施覆盖盲区等),进而有针对性地优化高频功能用地与关键设施之间的可达性配置,实现功能需求与交通韧性的深度耦合。具体而言,针对气候风险下韧性较差但功能联系紧密的用地(如居住区—就业中心、商业区—物流枢纽),可通过增设冗余路径、优化公共交通接驳等方式,保障极端天气下的通勤与物流效率。例如,新加坡政府在居住区与商业中心之间增设了高架连廊,在地铁环线增设了地下通道,使极端天气下的通勤效率得到极大提升,

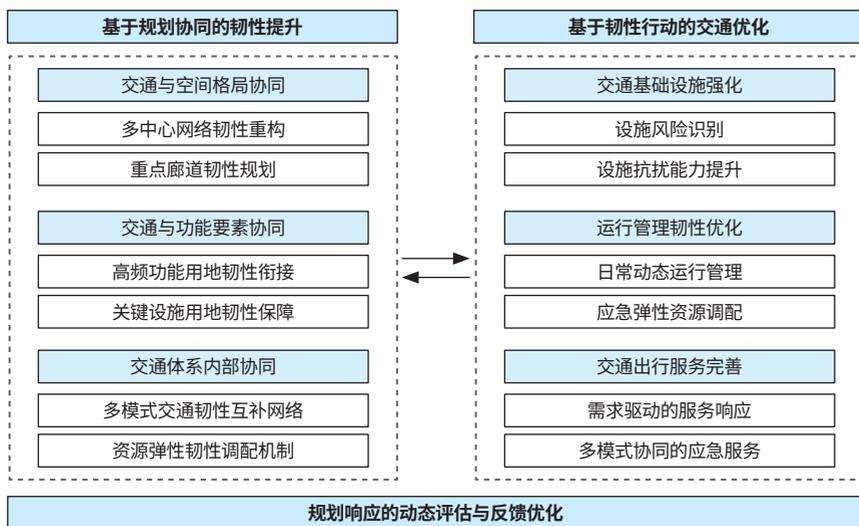


图 4 气候适应型交通韧性规划协同与提升策略

有效实现了功能需求与交通韧性的深度耦合<sup>[13]</sup>。针对关键基础设施用地的可达性保障,如针对模型识别的医疗设施可达性脆弱区域,规划专用应急通道网络(包括高架救援车道、防洪强化道路等),并确保与消防、避难场所等关键节点的无缝衔接,从而在极端事件中维持救援效率,同步提升交通系统的服务韧性<sup>[14]</sup>。

### 3.1.3 交通体系内部协同

交通体系内部协同的重点在于构建供需动态匹配和模式弹性互补的自适应机制。依托供需交互预测模型,精准识别极端天气下客流时空分布异常区、多模式衔接瓶颈点等系统脆弱区(点),通过优化多模式交通韧性互补网络与建立资源弹性韧性调配机制<sup>[15]</sup>,推动城市整体交通体系韧性的提升。

在多模式互补方面,根据模型输出的多类韧性状态组合,对不同交通方式间的衔接转换设施进行优化。例如,合理布局公交站点与地铁站的换乘区域,完善步行和自行车道与其他交通方式的衔接,以促进多种交通方式的无缝对接。此类措施可以提高交通系统的整体运行效率和应对复杂情况的能力<sup>[16]</sup>。在资源弹性配置方面,依据实时预测的需求变化,建立动态运力调配机制。在交通需求出现波动时,能够及时调整公交、地铁等交通工具的运力,实现资源的合理分配,保障交通系统的稳定运行,并提升其在不同需求情况下的韧性。通过这些措施,能够确保交通系统在面对极端气候和客流波动时,依然保持高效和稳定的服务。

## 3.2 基于韧性行动的交通优化策略

### 3.2.1 交通基础设施强化

交通基础设施的韧性优化是提升交通系统应对极端天气气候能力的基础。在气候变化加剧的背景下,设施的抗灾

能力和环境适应性直接决定了其在极端条件下的运行稳定性。为此,提升韧性的首要任务是基于气候风险评估模型和GIS技术,对城市交通网络进行全面扫描,精准识别极端天气下易受损的关键设施,如道路、桥梁等。在本研究所构建的框架下,通过气候风险评估模型实时分析交通设施的脆弱性,当识别出关键设施存在高风险时,便针对性地采取加固措施。例如:提升道路的排水能力,以减少暴雨期间的积水风险;提高桥梁的抗洪标准,以抵御洪水侵袭。这些措施能够有效降低极端条件下的交通中断风险,确保交通系统的连续性。以荷兰鹿特丹“韧性三角洲”计划为例,针对易受海平面上升威胁的道路,采用了可升降防洪堤与透水路面相结合的设计<sup>[17]</sup>,既有效抵御了洪水侵袭,又减少了雨水径流,从而极大地增强了城市交通系统的防洪韧性。

### 3.2.2 运行管理韧性优化

运行管理韧性优化是气候适应型交通体系构建中实现日常管理与应急响应协同的关键环节。在极端天气气候风险加剧的背景下,交通系统运行的动态调控能力直接决定了其韧性水平。为此,构建基于多源数据融合与智能算法驱动的运行管理机制,成为提升交通系统气候适应性的核心策略。在本研究所构建的框架下,通过机器学习算法对数据展开实时分析,当预测到交通流量达到一定阈值时,启动相应级别的应急措施,如临时交通管制、开辟应急车道等,以保障交通系统的有序运行。同时,利用实时交互预测结果,动态调整信号控制策略,根据路口实际车流情况灵活调节信号灯时长,能提升道路通行效率,有效缓解交通拥堵。例如,荷兰鹿特丹结合智能交通管理系统,通过实时监测和动态调整交通信号,优化交通流量<sup>[17]</sup>,

进一步提升了交通系统的韧性。

### 3.2.3 交通出行服务完善

交通出行服务完善是提升交通系统韧性与适应性的重要环节,其核心在于建立需求导向的动态响应机制。在气候变化背景下,交通出行需求的动态变化对交通出行服务的灵活性和精准性提出了更高要求。为此,构建基于数据融合与技术创新的服务体系,成为提升交通出行服务韧性的关键策略。通过出行需求预测模型,对多源数据进行实时分析,动态调整公交服务。同时,利用智能评估技术整合公共交通、共享出行等多源数据,通过手机应用程序等平台为居民提供个性化出行引导服务。结合实时交通信息,系统可动态推荐最优出行路线和方式,帮助居民避开拥堵路段,提升出行效率与服务体验。例如,杭州在G20峰会期间,依托“城市大脑”交通系统,整合地铁、公交、出租车等多源数据,向市民实时推送包含道路拥堵、停车位信息的智能出行方案,使得峰会期间核心区域的出行效率得到极大提升<sup>[18]</sup>。

## 3.3 规划响应的动态评估与反馈优化

规划实施的动态评估以数据驱动为核心,建立规划响应的动态评估与反馈优化机制。通过将交通流量、拥堵时长等实际运行数据与模型预测结果进行对比,量化评估规划措施对关键脆弱区域的改善效果,如监测高风险路段通行效率的提升情况。同时,定期将最新交通数据输入模型,重新评估交通系统的脆弱性,及时捕捉新出现的脆弱点或未有效改善的区域。基于模型重新预测结果,动态调整基础设施改造、运行管理策略以及出行服务方案,确保交通韧性规划能够持续适应系统变化,实现交通系统韧性的动态提升与长效优化。

## 4 结束语

在气候适应型城市建设的大背景下,交通韧性对于城市的稳定运行、资源有效调配及居民生活保障起着关键作用。强调交通与规划要素的高效协同,更是实现城市可持续发展的关键保障。本研究在深入剖析当前交通气候适应体系建设面临的评估维度割裂问题的基础上,聚焦交通韧性评估与规划协同展开探索。在理论框架方面,融合多元数据以及需求端、供给端要素,耦合建成环境、空间联系等规划要素,明确韧性评估的理论基础与维度指标,构建起交通韧性评估及规划协同的理论框架。在技术方面,充分运用人工智能与大数据技术,从数据感知、模型训练着手,分析气候风险下出行与交通系统的韧性变化,建立“气候风险—需求韧性—供给韧性”的动态交互评估模型,并剖析关键影响因素,实现对交通韧性的系统性量化评估。在策略方面,提出数据驱动的规划协同与交通优化路径,涵盖交通与空间格局协同、交通与功能要素协同、交通体系内部协同等规划协同策略,以及交通基础设施强化、运行管理韧性优化、出行服务完善等交通优化策略内容。

伴随气候变化影响的不断加剧,气候适应型交通韧性研究具有广阔的探索空间。未来,需加强气象学、地理学、社会学等跨学科合作,深化气候变化与交通系统相互作用机制研究,并引入物联网、数字孪生等技术,提升实时监测与智能决策能力。随着理论与技术的持续发展,智能驱动的交通韧性评估与规划将为全球气候适应型城市建设提供重要支撑。■

### [参考文献]

[1]ZHANG F, LI Z, LI N, et al. Assessment of

- urban human mobility perturbation under extreme weather events: a case study in Nanjing, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101671.
- [2]GU Y, FU X, LIU Z, et al. Performance of transportation network under perturbations: reliability, vulnerability, and resilience[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 133: 101809.
- [3]ANSARI A, EL-HUSSAIN I, AL SHIJI Y, et al. Robustness assessment of muscat coastal highway network (CHN) under multi-hazard scenarios focusing on traffic stability and adaptation measures[J]. *Scientific Reports*, 2024(1): 30632.
- [4]马飞等. 极端天气下城市公共交通多层复杂网络脆弱性研究: 第1版[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [5]XI H, NELSON J D, HENSHER D A, et al. Evaluating travel behavior resilience across urban and rural areas during the COVID-19 pandemic: contributions of vaccination and epidemiological indicators[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2024, 180: 103980.
- [6]黄伟, 李光红, 孙娜. 国土空间规划背景下交通规划体系建构研究[J]. *规划师*, 2023(10): 1-7.
- [7]MURRAY-TUITE P M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]//*Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, 2006.
- [8]BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003(4): 733-752.
- [9]黄洁, 王姣娥. 出行韧性的理论与方法及实证[J]. *地理学报*, 2023(10): 2507-2519.
- [10]王健宇, 程家乐, 陈献天, 等. 建成环境对交通安全的影响及优化策略[J]. *规划师*, 2023(9): 47-55.
- [11]胡刚钰, 何杨, 黄建中, 等. 都市圈国土空间与综合交通协同规划框架和策略[J]. *规划师*, 2023(11): 27-33.
- [12]周程祎. 上海全面推进“15分钟就业服务圈”[N]. *解放日报*, 2023-08-27(001).
- [13]商谦. 四个东亚发达城市高密度地区地下空间形态研究[J]. *时代建筑*, 2019(5): 24-28.
- [14]江锦成. 面向重大突发灾害事故的应急疏散研究综述[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021(10): 1498-1518.
- [15]FERRANTI E J S, OBERLING D F, QUINN A D. Transport resilience to weather and climate: an interdisciplinary view from Rio de Janeiro[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning*, 2022(3): 103-121.
- [16]马书红, 杨磊, 陈西芳. 风险扩散下城市群多模式交通网络的韧性演化[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2023(6): 42-51.
- [17]李磊, 陈天. 滨海低地城市鹿特丹应对气候变化灾害的策略及路径[J]. *国际城市规划*, 2022(1): 153-159.
- [18]G20峰会智能公交系统实施 智能交通或迎新奇点[EB/OL]. (2016-09-06)[2025-05-06]. <https://www.chuandong.com/news/news186302.html>.

[收稿日期]2025-05-11;

[修回日期]2025-06-10