

中文引用格式:王宏威,阮晓波,李雨龙,等.基于日变交通流量降雨损伤 LSTM 模型的城市路网韧性分析[J].中国安全科学学报,2025,35(12):213-220.

英文引用格式:WANG Hongwei, RUAN Xiaobo, LI Yulong, et al. Resilience analysis of urban road networks based on LSTM model for rainfall-induced day-to-day traffic flow degradation[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 213-220.

基于日变交通流量降雨损伤 LSTM 模型的城市路网韧性分析^{*}

王宏威,阮晓波^{**} 讲师,李雨龙,汤玉涛,丁建勋 副教授
(合肥工业大学汽车与交通工程学院,安徽 合肥 230009)

中图分类号:X951 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.1472

基金项目:国家自然科学基金资助(52472312)。

【摘要】 为探究常规降雨作用下城市路网性能时变性,建立合理的路网韧性评价体系,首先,构建城市道路路段交通流量降雨损伤的长短期记忆网络(LSTM)模型;其次,定义具有时变特性的路网性能函数;然后,基于韧性理念推导出路网时变韧性计算模型;最后,基于某城市降雨信息与路网交通数据及 Sioux Falls 网络,分析降雨对路段与路网时变特性的作用效果。结果表明:当降雨持续时间或降雨量增加时,路段工作日交通流量损伤均有增加趋势;路网韧性是各相关路段协同作用的综合体现,因而其对降雨作用呈现出较交通流量损伤更为迟钝的响应,且其值在常规降雨条件下通常不小于0.9;少雨水季节明显强于多雨水季节的路网韧性,而路网年韧性在未受到降雨灾害影响时一般会维持在一个较高水平上,且其在相近年份之间的差异并不显然。

【关键词】 日变交通流量; 降雨损伤; 长短期记忆网络(LSTM); 城市路网; 路网韧性

Resilience analysis of urban road networks based on LSTM model for rainfall-induced day-to-day traffic flow degradation

WANG Hongwei, RUAN Xiaobo, LI Yulong, TANG Yutao, DING Jianxun

(School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: To explore the time-varying performance of urban road networks under regular rainfall and establish a reasonable evaluation system for road network resilience, an LSTM model for the rainfall-induced traffic flow degradation in urban road segments was first constructed, and a network performance function with time-varying characteristics was second defined. Then, based on the resilience concept, a time-varying resilience calculation model for road networks was derived. Finally, the effect of rainfall on the time-varying characteristics of road segments and networks was investigated based on rainfall information and traffic data of a certain city and the Sioux Falls network. The results show that when the duration or amount of rainfall increases, the traffic flow degradation of road segments increases on

* 文章编号:1003-3033(2025)12-0213-08; 收稿日期:2025-07-10; 修稿日期:2025-10-11

** 通信作者:阮晓波(1984—),男,安徽来安人,博士,讲师,主要从事道路基础设施与城市路网韧性方面的研究。E-mail: xiaoboruan@hfut.edu.cn。

weekdays. The road network resilience is a comprehensive reflection of the synergistic effect of various related road segments, and therefore its response to rainfall is slower than that of traffic flow degradation, and its value is generally not less than 0.9 under regular rainfall conditions. The road network resilience during low rainfall seasons is significantly stronger than that during high rainfall seasons, and the annual resilience of road networks is usually maintained at a higher level when not affected by rainfall disasters, and the difference between adjacent years is not significant.

Keywords: day-to-day traffic flow; rainfall-induced degradation; long short-term memory (LSTM); urban road networks; road network resilience

0 引言

在全球气候变迁与城市发展进程加速的双向驱动下,复杂不确定性风险已成为制约城市韧性体系构建与发展的核心要素^[1]。韧性城市建设涵盖经济、社会、制度、生态及基础设施等多个相互关联子系统。其中,城市基础设施系统作为与日常生活联系最为紧密的子系统,其运行效能直接影响民生福祉;而在基础设施网络内,交通系统因其空间连接性和功能基础性,呈现出复杂网络化特征,面临多重运行风险挑战。其不仅需应对设备故障、人为事故等突发扰动^[2-3],还易受地震、台风、洪水等自然灾害冲击^[4-5]。自然因素中,天气对交通系统运行效能的持续性影响尤为显著,降雪与降雨不仅降低了高速公路通行能力与行驶车速,还导致日交通流量缩减^[6];而高温环境可能产生逆向刺激效应,引发日交通流量增加^[7]。值得注意的是,能见度与降雨强度协同作用加剧了旅行时间可靠性(Travel Time Reliability, TTR)恶化,研究显示,低能见度结合强降雨对 TTR 将产生最大负面影响^[8]。全球观测数据表明:天气已成为道路网络周期性拥堵的关键诱因^[9]。因此,构建天气作用量化模型已成为提升城市路网性能的重要研究维度。

当前城市路网性能量化常围绕可靠度、脆弱性和韧性等 3 维度展开。BHAVATHRATHAN 等^[10]在韧性维度上率先提出基于周期性容量中断的韧性指数构建方法,通过比较网络最佳性能与需求临界状态间的阈值空间,量化系统可承受的最大扰动强度。在此基础上,NOGAL 等^[11]提出了动态均衡限制分配模型以动态评估韧性指数。TANG Junqing 等^[12]进一步建立了分层贝叶斯网络模型,评估了北京等特大城市道路系统的长周期韧性,揭示出经济-韧性耦合作用的非线性特征。上述普遍缺乏量化具体扰动场景的韧性研究。金溪等^[13]构建了暴雨内涝情境下路网韧性评估框架,通过暴雨重现期与道路

速度衰减函数的耦合分析,提出了基于易涝节点改造的韧性提升策略。WANG Hongwei 等^[14]针对极端天气开发深度学习预测模型,利用扩散图卷积技术捕捉路网时空依赖特征,区分了常规降雨与极端天气对交通韧性的差异化影响模式。上述研究尚未展开探讨常规降雨天气与城市路网韧性的定量关系。

鉴于此,笔者拟以常规降雨天气为研究场景,首先建立路段日变交通流量降雨损伤的长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)模型;然后构建具有时变特性的城市路网性能函数与韧性计算模型;最后利用 Sioux Falls 网络开展应用研究,以期量化降雨强度与路段日变交通流量损伤及路网时变韧性的关联程度。

1 日变交通流量降雨损伤 LSTM 模型

1.1 交通流量降雨损伤分析

城市道路实际通行能力普遍低于设计理论值,这一现象源于服务水平约束与天气因素扰动的叠加效应。当道路系统无法维持理想服务水平时,路网冗余能力呈现动态特性^[15];叠加降雨等天气扰动后,容量损失进一步加剧。具体而言,降雨通过能见度下降与轮胎-路面摩擦因数衰减的双重作用机制,不仅引发车速减小与车头时距扩大,还提高了事故风险,表现为交通流量损失与通行能力降低。

1.2 降雨损伤 LSTM 模型构建

LSTM^[16]是循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)的一个分支,其在 RNN 上改进后,可保存长期记忆。LSTM 拥有传统神经网络所包含的 3 层结构,即输入层、中间层和输出层,中间层具备 4 层交互神经网络层的重复模块,如图 1 所示。该模块通过引入门机制使 LSTM 比 RNN 功能更强大,包含 4 部分,即遗忘门、输入门、记忆单元和输出门,其中, x_t 为输入, h_t 为输出, h_{t-1} 为前一次状态的

输出, C_t 为记忆单元存储的信息, C_{t-1} 为前一次状态的储存信息, t 为当前状态, σ 为激活函数, $\tanh$ 为双曲正切函数, “ $\times$ ” 为逐点乘法, “ $+$ ” 为点态加法。

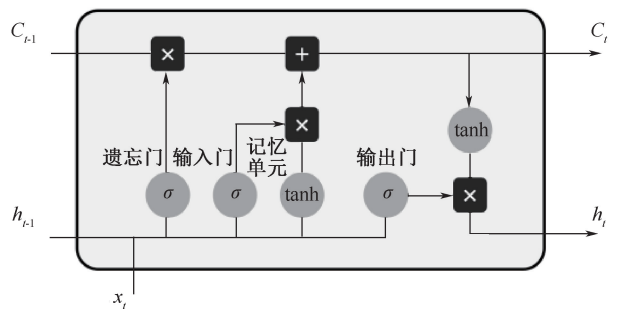


图 1 LSTM 重复模块
Fig. 1 LSTM repetitive module

以日降雨量 (y/mm) 及持续时间 (t/h) 作为输入参数、以路段日交通流量降雨损伤系数 ξ_d 作为输出参数, 构建降雨损伤 LSTM 模型。考虑到工作日与非工作日交通流量的波动特性, 定义 ξ_d 。将某路段无降雨日交通流量平均值作为该路段日交通流量基准值 Q_{0d} , 则 ξ_d 为:

$$\xi_d = \frac{Q_{\rho d}}{Q_{0d}} \quad (1)$$

式中: $Q_{\rho d}$ 为路段有降雨日交通流量, veh/d ; ρ 为降雨强度, 包含降雨量及持续时间; d 为工作日 ($d=1$) 或非工作日 ($d=2$)。

为保障应用场景真实性, 选取江淮流域某城市为研究对象。收集该城市 2020 年 5 月 1 日—2023 年 4 月 30 日的降雨强度和交通流量数据, 其中, 降雨数据为日降雨量及持续时间^[17], 而交通数据为多条主次干道的日交通流量。整理收集的数据, 有降雨共 278 天, 其中, 工作日 192 天、非工作日 86 天。以 70% 数据作为训练集, 30% 数据作为测试集。开展模型训练, 确定模型参数, 分别建立工作日与非工作日路段日变交通流量降雨损伤 LSTM 模型。考虑到收集到的有降雨非工作日样本量较少, 非工作日降雨损伤 LSTM 模型的泛化能力可能难以保障。因此, 降雨强度与路段日交通流量损伤的关系程度及路网韧性分析重点关注工作日场景。

1.3 拟合结果分析

利用降雨损伤 LSTM 模型, 开展降雨强度与路段工作日交通流量损伤的关系程度分析。将任意日降雨量 y 及持续时间 t 作为输入参数, 计算相应的工作日降雨损伤系数 ξ_1 , 绘制 ξ_1 与降雨强度的关系程度三维图, 如图 2 所示。

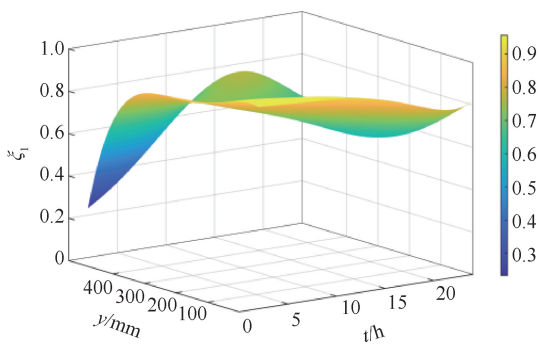


图 2 降雨强度与路段日变交通流量损伤关系
Fig. 2 Relationship between rainfall intensity and day-to-day traffic flow degradation of road segments

t 为 2、5、15 和 24 h, 包含短时与长时降雨情形, 可从图 2 中 4 次截取 y 与 ξ_1 的关系, 如图 3 所示。当 t 较短时, ξ_1 随着 y 增加先缓慢下降, 当 y 达到一定数值时, ξ_1 转为快速下降; 当 t 较长时, ξ_1 保持相对较为缓慢的变化趋势。

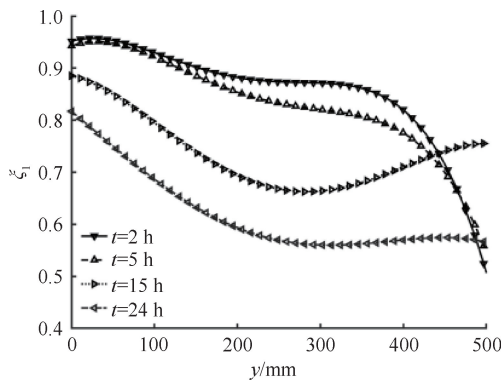


图 3 降雨量与路段日变交通流量损伤关系
Fig. 3 Relationship between rainfall volume and day-to-day traffic flow degradation of road segments

y 选取 21、54、151 和 302 mm, 包含中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨情景, 可从图 2 中 4 次截取 t 与 ξ_1 的关系, 如图 4 所示。随着 t 增加, ξ_1 以下降趋势为主; 随着 y 增大, ξ_1 减小速度加快。

2 城市路网韧性计算模型

鉴于城市路网运营环境的多变性及其运行性能的时变性, 为更好地定量研究常规降雨对路网性能维持水平的作用程度, 借助韧性理念定义具有韧性内涵的路网性能指标, 刻画路网性能时变性。

2.1 性能函数

路网性能函数可大致反映出一个城市路网的实际交通状况。关于性能函数定义大多基于道路交通基本属性, 如速度或流量。然而, 这些特性不能实时

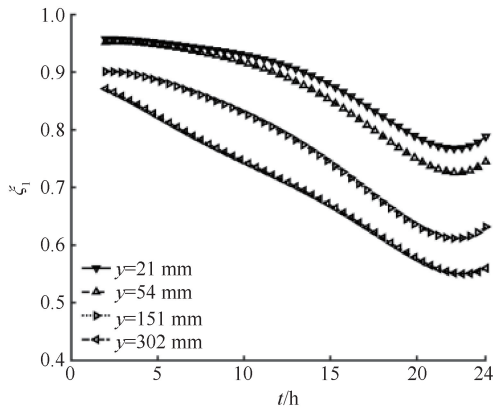


图4 降雨持续时间与路段日变交通流量损伤关系

Fig. 4 Relationship between rainfall duration and day-to-day traffic flow degradation of road segments

准确反映整个路网状态,因此引入网络效率来描述整个路网性能。

城市路网拓扑结构为 $G=(N, A)$, 其中 N 为网络节点集合, A 为路段集合。根据 NAGURNEY 等^[18]提出的方法, G 的网络效率 $E(G)$ 定义为:

$$E(G) = \frac{1}{|W|} \sum_{i \neq j \in N} \frac{q_w}{\lambda_w} \quad (2)$$

式中: W 为路网的出行起止点 (Origin-Destination, OD) 对集合; $|W|$ 为 OD 对数量; λ_w 为 OD 对 w 的权重; q_w 为 OD 对 w 间的出行需求量, 人次。

式(2)虽考虑了路网交通需求和用户出行, 但该效率指标是静态的, 无法描述网络动态变化。因此, 在此基础上, 张玺等^[19]根据 Wardrop 均衡原理, 提出具有一般性的动态网络效率指标 $E_G(t)$:

$$E_G(t) = \frac{1}{|W|} \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_w} \frac{f_k(t)}{c_k(t)} \quad (3)$$

式中: $f_k(t)$ 为 t 时刻路径 k 上流量, veh/h; $c_k(t)$ 为 t 时刻路径 k 阻抗, 即出行时间, min; R_w 为 OD 对 w 间的路径集合。

路径 k 阻抗由其路段阻抗相加得到, 而路段阻抗 c_a 一般采用美国联邦公路局开发的模型^[20]计算:

$$c_a = c_a^0 \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{X_a} \right)^\beta \right\}, \quad a \in A \quad (4)$$

式中: c_a^0 为路段 a 上自由流阻抗, min; x_a 为路段 a 上交通流量, veh/h; X_a 为路段 a 的通行能力, veh/h; α 和 β 为模型参数。

根据路段路径的关联关系, 计算路径 k 阻抗 c_k :

$$c_k = \sum_{a \in A} c_a \delta_{ak}, \quad k \in R_w \quad (5)$$

式中 δ_{ak} 为 0~1 变量, 即路段 a 在路径 k 上为 1, 否则为 0。

降雨直接导致路段日交通流量损伤, 间接致使路段通行能力下降。综合来说, 降雨诱发了城市路网中的流量波动, 因而使用日变交通配流模型才能描述流量的动态变化。由于每天道路状况不同, 出行用户难以获取完整路况信息, 只能通过估计大致出行时间来选择出行路径。为更好地描述用户在路网中的出行选择, 采用随机用户均衡 (Stochastic User Equilibrium, SUE) 模型^[20]进行交通配流。

在 SUE 模型中, 用户通过估计路径阻抗来选择出行路径, 其中用户估计的路径阻抗 $\hat{c}_k$ 通常包含 c_k 及其估计的误差 ε_k , 即:

$$\hat{c}_k = c_k + \varepsilon_k \quad (6)$$

一般情况下, 假设 ε_k 服从 Gumbel 分布。根据离散选择理论, 可计算得到基于 Logit 的 SUE 问题路径选择概率 p_k :

$$p_k = \frac{\exp(-\theta c_k)}{\sum_{k \in R_w} \exp(-\theta c_k)} \quad (7)$$

式中 θ 为离散参数, 反映出行用户所理解的路径阻抗的聚合度量, 其值越大, ε_k 越小。

将 p_k 与 q_w 相乘, 可得到路径 k 上流量 f_k :

$$f_k = q_w p_k \quad (8)$$

在得到 f_k 后, 可计算所有 OD 出行经过每条路段的交通流量 x_a :

$$x_a = \sum_{k \in R_w} f_k \delta_{ak}, \quad a \in A \quad (9)$$

为区别路段在路网中的重要程度, 增加一个路段权重参数:

$$\omega_a = \frac{x_a}{\sum_{w \in W} q_w} \quad (10)$$

结合式(3)的定义内涵, t 时刻路段效率 $E_a(t)$ 为:

$$E_a(t) = \frac{x_a(t)}{c_a(t)} \omega_a \quad (11)$$

因此, t 时刻路网性能函数 $F(t)$ 为:

$$F(t) = \frac{1}{|A|} \sum_{a \in A} E_a(t) \quad (12)$$

式中 $|A|$ 为路网中的路段数量。

2.2 时变韧性计算模型

根据 BRUNEAU 等^[21]的韧性理论, 单一扰动下系统性能变化如图 5 所示, 其一个周期 T 分为 3 个阶段, 即扰动前 ($t_0 \sim t_e$)、扰动影响阶段 ($t_e \sim t_r$) 和扰动后

(t_r 以后)。扰动前后系统保持在正常状态,而扰动影响阶段有 2 种状态,即退化(t_e-t_d)与恢复状态(t_d-t_r)。

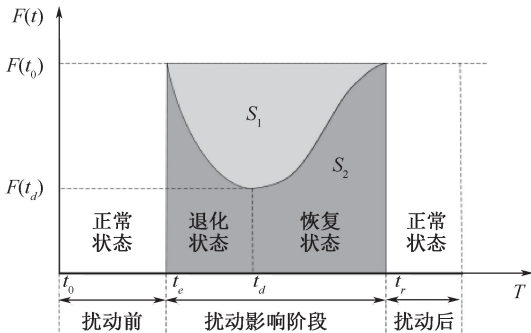


图 5 单一扰动下系统性能变化
Fig. 5 System performance changes under a single disturbance

基于上述分析,得到单一扰动下系统韧性值 R 的计算模型:

$$R = \frac{\int_{t_e}^{t_r} F(t)}{F(t_0)(t_r - t_e)} \quad (13)$$

式中 $F(t_0)$ 为正常状态下系统性能值。式(13)中分子为图 5 中的 S_2 ,为扰动影响阶段系统性能剩余量;分母为(S_1+S_2),其中 S_1 为系统性能损失量。

上述计算模型虽能较全面地反映路网受到冲击时的 3 个阶段,但仅适用于单一灾害周期。为分析降雨作用下路网性能日变特性,同时考虑到路网应对降雨扰动恢复的复杂性,在韧性计算模型中,将每日路网重置,重新计算路网性能。

降雨扰动下路网日变性能如图 6 所示,描述了 9 天的路网性能变动,其中, $F(t_0)$ 为正常或无降雨状态时的路网性能。 t_1 天降雨强度为 ρ_1 ,当日无降雨,路网性能 $F(t_1)=F(t_0)$,同理, $F(t_4)=F(t_5)=F(t_9)=F(t_0)$; t_2, t_3, t_6, t_7 和 t_8 天有降雨,其降雨强度分别为 $\rho_2, \rho_3, \rho_6, \rho_7$ 和 ρ_8 ,相应的路网性能为 $F(t_2), F(t_3), F(t_6), F(t_7)$ 和 $F(t_8)$ 。因此,由 $F(t_1)-F(t_9)$ 组成的 9 天路网性能曲线展现了路网性能日变特性。

基于式(13)韧性计算模型与图 6 内涵,定义截止第 t_n 天且时间跨度为 μ 的 R_μ 计算模型:

$$R_\mu = \frac{\int_{t_n-\mu}^{t_n} F(t)}{\mu F(t_0)}, \quad t_n-\mu, t_n \in T \quad (14)$$

式(14)可计算单日路网韧性,即 $\mu=1$;可测度不同 μ 下路网韧性,分析不同阶段路网韧性差异,制定路网性能提升策略。

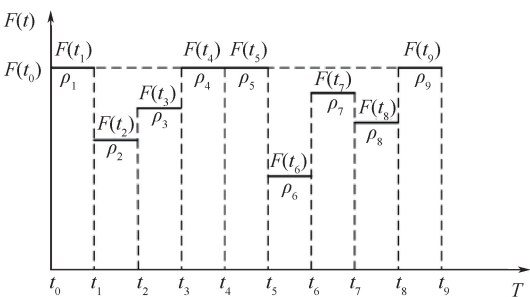


图 6 降雨扰动下路网日变性能
Fig. 6 Day-to-day performance of road network under rainfall disturbance

3 城市路网韧性分析

3.1 Sioux falls 网络与仿真步骤

采用 Sioux Falls 网络作为测试网络,该网络结构如图 7 所示。Sioux Falls 网络包含 24 个节点和 76 条路段。具体仿真步骤如下:

1) 初始设定。Sioux Falls 网络的 OD 需求量 q_w 、路段 a 上的自由流阻抗 c_a^0 、0-1 指示变量 δ_{ak} 、离散参数 θ 及 c_a 模型参数 α 和 β 已知且保持不变;路段 a 的通行能力 X_a 已知。

2) 路段交通流量分配。有降雨时,基于降雨损伤 LSTM 模型计算 ξ_d ,更新路段通行能力为 $\xi_d X_a$;无降雨时,路段通行能力仍为 X_a ;利用 SUE 模型进行

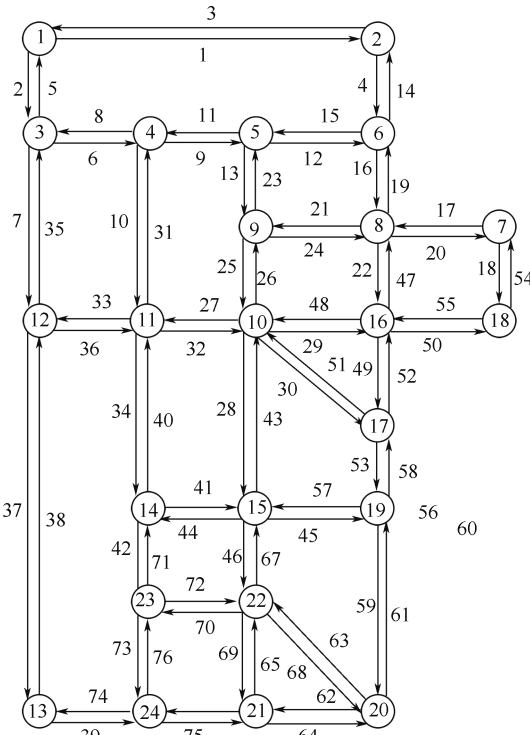


图 7 Sioux Falls 网络
Fig. 7 Sioux Falls network

交通配流,获得路段 a 的交通流量 x_a 。

3) 路网性能函数推求。依据步骤 1) 和步骤 2) 计算时间跨度 μ 内路段日交通流量;将此交通流量代入式(4)、式(10)一式(12),得到路网性能函数 $F(t)$ 。

4) 路网韧性值计算。将步骤 3) 中的 $F(t)$ 代入式(14),根据需求计算特定时间跨度下路网韧性值。

3.2 降雨作用下路网日变韧性

参照文献[22],将降雨持续时间设为 1、3、6、12 和 24 h,随机生成降雨场景,划分降雨等级。开展工

作日 Sioux Falls 网络仿真试验,得到不同降雨等级下路网日变韧性值范围,其结果见表 1。降雨等级为小雨时,路网韧性几乎无损失;中雨时,损失为 1%~3%;大雨时,损失为 2%~4%;暴雨时,损失为 3%~6%;大暴雨时,损失为 4%~10%,特大暴雨时,韧性值小于 90%。由此可见:降雨对路网韧性相较于对路段日交通流量的影响更低,这是因为大流量路段可通过车辆路径选择将流量分散到低流量路段,降低了整个路网性能损失,提高了路网韧性。

表 1 工作日路网日变韧性值范围

Table 1 Range of day-to-day resilience values for road networks on weekdays

降雨持续时间/h	降雨量/mm					
1	[0.1 1.5]	[1.6 6.9]	[7.0 14.9]	[15.0 39.9]	[40.0 49.9]	[50.0 +∞)
3	[0.1 2.9]	[3.0 9.9]	[10.0 19.9]	[20.0 49.9]	[50.0 69.9]	[70.0 +∞)
6	[0.1 3.9]	[4.0 12.9]	[13.0 24.9]	[25.0 59.9]	[60.0 119.9]	[120.0 +∞)
12	[0.1 4.9]	[5.0 14.9]	[15.0 29.9]	[30.0 69.9]	[70.0 139.9]	[140.0 +∞)
24	[0.1 9.9]	[10.0 24.9]	[25.0 49.9]	[50.0 99.9]	[100.0 249.9]	[250.0 +∞)
降雨等级	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
路网韧性/%	[99 100]	[97 99]	[96 98]	[94 97]	[90 96]	[0 90]

3.3 过去 3 年的韧性分析

为分析目标城市过去 3 年(2020 年 5 月 1 日—2023 年 4 月 30 日)的韧性表现,依据收集的降雨信息首先确定交通流量损伤系数,然后在 Sioux falls 网络上开展仿真试验,计算路网日变性能值,如图 8 所示。路网性能无降雨时接近 20,有降雨时可降至 13.68,其损伤后基本维持在 17~20 之间。在真实场景中,降雨强度达到一定水平将不利于车辆通行。因此,后续可根据目标城市实际情况开展更完备的研究,确定合理的车辆通行路网性能最低值。

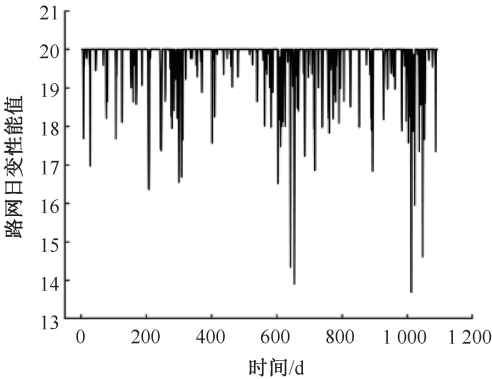


图 8 城市路网日变性能值

Fig. 8 Day-to-day performance values of urban road networks

基于路网日变性能值,利用式(14)计算路网月韧性值,如图 9 所示。从图中看出,夏秋 2 季的路网月韧性较低,而春冬 2 季的月韧性较高。

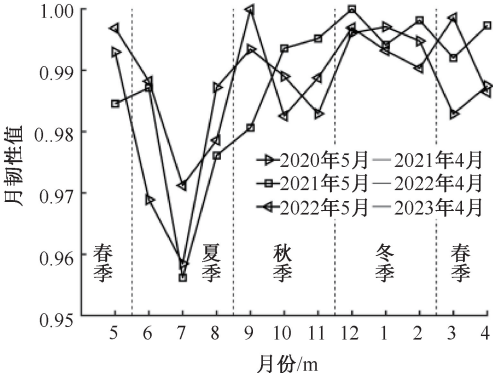


图 9 2020 年 5 月—2023 年 4 月路网月韧性值

Fig. 9 Monthly resilience values of road networks from May 2020 to April 2023

路网的季节月均韧性值与其月韧性值展现出类似变化特征,具体见表 2。此外,由于仅讨论降雨对路网影响,降雪作用并未体现在冬季路网韧性中,这可能是冬季路网韧性较高的重要原因之一。

过去 3 年的路网年韧性值,见表 3。从表中看出,第 3 年份路网韧性总体情况略好于前 2 年份,但三者之间差异并不大。此外,目标城市路网年韧性均保持在一个较高水平,这是因为该城市过去 3 年

表 2 路网季节月均韧性值

Table 2 Monthly average resilience values of road networks during seasons

季节	春	夏	秋	冬
月平均韧性	0.991 0	0.974 7	0.989 6	0.995 6

并未发生十分严重的降雨灾害,致使路网韧性变动基本同于季节性降雨的变化趋势。

表 3 路网年韧性值

Table 3 Annual resilience values of road networks

年份	年韧性
2020 年 5 月—2021 年 4 月	0.985 9
2021 年 5 月—2022 年 4 月	0.987 9
2022 年 5 月—2023 年 4 月	0.989 3

4 结 论

1) 当降雨持续时间较短,随降雨量增加的工作日路段交通流量损伤,前期发展缓慢,但降雨量达到某一数值时,损伤发展明显加速;而当降雨持续时间较长,随降雨量增大的损伤发展呈现相对缓慢的变

动趋势。当降雨量不变,随降雨持续时间增长的损伤明显加大,这可能是由于持续降雨改变了人们的出行意愿。

2) 路段交通流量比路网韧性对降雨作用反应更为敏感,这是因为路网韧性是各相关路段协同作用的综合结果,说明路网性能不能通过路段性能的简单相加得到。

3) 多雨水季节明显弱于少雨水季节的路网韧性,然而,目标城市近 3 年的路网年韧性差异性并不明显,这是因为该城市并未受到降雨灾害影响。

4) 进一步研究,一是宏观政策层面,基于日变交通流量降雨损伤模型的路网韧性对比研究,能够解析不同气候城市的路网韧性差异,为国家基础设施投资优先级划定提供量化依据;二是实时管控层面,融合短时损伤模型的路网状态监测系统,可实现降雨事件下交通流异常波动预警,结合动态信号配时优化与路径诱导,将显著增强城市交通系统的在线韧性调控能力。

参 考 文 献

[1] KONG Jingjing, ZHANG Chao, SIMONOVIC S P. Resilience and risk-based restoration strategies for critical infrastructure under uncertain disaster scenarios[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 92: DOI: 10.1016/j.scs.2023.104510.

[2] 张雯婕, 胡军红, 闻成维, 等. 考虑网络韧性的城市轨道交通故障恢复研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 179-186.

ZHANG Wenjie, HU Junhong, WEN Chengwei, et al. Research on urban rail failure recovery considering network resilience[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 179-186.

[3] 刘星良, 谢厅, 刘唐志, 等. 基于 HNAC-FD 的高速公路网应急疏导措施效用评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 222-229.

LIU Xingliang, XIE Ting, LIU Tangzhi, et al. Evaluate effectiveness of emergency evacuation measures in expressway network based on HNAC-FD mode[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 222-229.

[4] FANG Chao, CHU Yanze, FU Haoran, et al. On the resilience assessment of complementary transportation networks under natural hazards[J]. Transportation Research Part D, 2022, 109: DOI: 10.1016/j.trd.2022.103331.

[5] YIN Kai, WU Jianjun, WANG Weiping, et al. An integrated resilience assessment model of urban transportation network: a case study of 40 cities in China[J]. Transportation Research Part A, 2023, 173: DOI: 10.1016/j.tra.2023.103687.

[6] AGARWAL M, MAZE T H, SOULEYRETTE R. Impacts of weather on urban freeway traffic flow characteristics and facility capacity[C]. Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, 2005: 1 121-1 134.

[7] COOLS M, MOONS E, WETS G. Assessing the impact of weather on traffic intensity[J]. Weather Climate and Society, 2010, 2(1): 60-68.

[8] MATHEW S, PULUGURTHA S S. Quantifying the effect of rainfall and visibility conditions on road traffic travel time reliability[J]. Weather Climate and Society, 2022, 14(2): 507-519.

[9] SNELDER M, CALVERT S. Quantifying the impact of adverse weather conditions on road network performance[J].

- European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2016, 16(1): 128–149.
- [10] BHAVATHRATHAN B K, PATIL G R. Quantifying resilience using a unique critical cost on road networks subject to recurring capacity disruptions[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2015, 11(9): 836–855.
- [11] NOGAL M, O'CONNOR A, CAULFIELD B, et al. Resilience of traffic networks: from perturbation to recovery via a dynamic restricted equilibrium model[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, 156: 84–96.
- [12] TANG Junqing, HEINIMANN H, HAN Ke, et al. Evaluating resilience in urban transportation systems for sustainability: a systems-based Bayesian network model[J]. *Transportation Research Part C*, 2020, 121: DOI: 10.1016/j.trc.2020.102840.
- [13] 金溪, 穆延. 暴雨内涝下城市路网抗涝韧性评估[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(5): 226–236.
JIN Xi, MU Yan. Resilience assessment of urban road networks to flooding under heavy rainfall and flooding[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(5): 226–236.
- [14] WANG Hongwei, PENG Zhongren, WANG Dongsheng, et al. Evaluation and prediction of transportation resilience under extreme weather events: a diffusion graph convolutional approach[J]. *Transportation Research Part C*, 2020, 115: DOI: 10.1016/j.trc.2020.102619.
- [15] 路庆昌, 李建宇, 崔欣, 等. 考虑路径特性的道路交通网络冗余性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(8): 195–203.
LU Qingchang, LI Jianyu, CUI Xin, et al. Redundancy analysis of road traffic network considering path characteristics[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(8): 195–203.
- [16] GREFF K, SRIVASTAVA R K, KOUTNIK J, et al. LSTM: a search space odyssey[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017, 28(10): 2 222–2 232.
- [17] 世界 241 个国家的天气[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://rp5.ru>.
- [18] NAGURNEY A, QIANG Qiang. A network efficiency measure with application to critical infrastructure networks[J]. *Journal of Global Optimization*, 2008, 40(1/2/3): 261–275.
- [19] 张玺. 基于网络效率的日变路网脆弱性识别方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(2): 176–182.
ZHANG Xi. Day-to-day road network vulnerability identification based on network efficiency[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(2): 176–182.
- [20] 吕彪, 高自强, 刘一骝. 道路交通系统韧性及路段重要度评估[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(2): 114–121.
LYU Biao, GAO Ziqiang, LIU Yiliu. Evaluation of road transportation system resilience and link importance[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(2): 114–121.
- [21] 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, 19(4): 733–752.
- [22] GB/T 28592—2012, 降水量等级[S].
GB/T 28592—2012, Grade of precipitation[S].

作者简介: 王宏威 (1998—), 男, 浙江临海人, 硕士, 主要从事道路交通基础设施与城市路网韧性方面的工作。E-mail: whw1998@126.com。

