

# 四川省高速公路网韧性分析

兰瑞意, 刘 博\*, 陈 华

四川省交通运输发展战略和规划科学研究院, 四川 成都

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月22日; 发布日期: 2026年6月29日

## 摘 要

为进一步深入研究交通网络韧性的量化评估问题,本研究以四川省高速公路网为对象,采用基于L空间的网络构建方法建立拓扑模型,并引入高速公路实际O-D出行分布,从路径冗余性和路网鲁棒性两个维度开展韧性分析。研究结果表明:在路径冗余性方面,四川省高速公路的路径冗余性低于京津冀、长三角和粤港澳地区,并且21个市(州)之间存在较大差异,成都市高速公路网的平均冗余性处于中等水平。此外,当更多拓扑结构中的“圈”被有效路径使用时,路径冗余性会增加。在路网鲁棒性方面,四川省高速公路网在蓄意攻击策略下具备一定的鲁棒性,但在叠加交通流量后表现出对蓄意攻击的脆弱性。

## 关键词

韧性, 路径冗余性, 路网鲁棒性, 四川省高速公路网

# Analysis of the Resilience of Sichuan Expressway Network

Ruiyi Lan, Bo Liu\*, Hua Chen

Institute of Transportation Development Strategy & Planning of Sichuan Province, Chengdu Sichuan

Received: May 29, 2026; accepted: June 22, 2026; published: June 29, 2026

## Abstract

To further investigate the quantitative assessment of transportation network resilience, this study focuses on the Sichuan Province expressway network. A topology model is established using an L-space-based network construction method. On this basis, the actual O-D (origin-destination) travel distribution of the expressways is introduced to conduct resilience analysis from two dimensions: route redundancy and network robustness. The results indicate that, in terms of route redundancy, the Sichuan expressway network exhibits lower redundancy compared to the Beijing-Tianjin-Hebei,

\*通讯作者。

**Yangtze River Delta, and Guangdong-Hong Kong-Macao regions, with significant variations across the 21 cities, and the average redundancy of Chengdu's expressway network ranks at a moderate level. Additionally, route diversity increases when more topological cycles are traversed by numerous alternative routes. In terms of network robustness, the Sichuan expressway network demonstrates a certain degree of robustness under intentional attack strategies, but when traffic flow is considered, it exhibits vulnerability to such attacks.**

## Keywords

Resilience, Route Redundancy, Network Robustness, Sichuan Expressway Network

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

交通运输作为服务国民经济发展的基础性行业，是社会生产和生活组织体系中不可或缺的重要环节。然而，各类突发事件和自然灾害对交通运输系统的正常运行造成了严重干扰。近年来，“韧性”一词被越来越频繁地提及，《国家综合立体交通网规划纲要》<sup>1</sup>《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》<sup>2</sup>均提出了增强交通网络韧性、提高交通防灾抗灾能力的要求。韧性交通已成为行业研究的热点。

韧性最早起源于拉丁语“Resillo”，意味着恢复原本的状态(jump back) [1]。在学术研究中，Holling最先在生态系统中引入这一概念[2]，随后韧性被广泛应用于不同研究领域，如工业系统[3]、经济[4]等。在交通领域中，不同研究团队针对韧性的定义给出了不同理解。Murray-Tuite 将道路交通网络的韧性定义为在破坏性事件下网络功能保持效率、快速恢复(时间)以及在一定外部支持下维持其原始性能的属性[5]。Heaslip 等认为韧性是指系统在指定时间内保持其原有服务水平或恢复到该水平的能力[6]。Freckleton 等描述交通网络韧性为网络应对破坏性事件的能力，即事件发生后，网络能保持预定服务水平，或在合理时间内恢复并可能超过原有服务水平的能力[7]。美国将韧性定义为应对变化条件的储备和适应能力，并在破坏事件下具备抵抗和快速恢复的能力[8]。由于研究对象及关注角度的多样性，不同团队开展了许多相关研究。Xu 等人是国内团队中较早提出基于路径多样性和网络容量的冗余性量化方法，并系统性针对冗余性开展相关研究[9]-[12]。区俊峰[13]基于网络抗毁性研究，分别从单边失效与多边失效分析公路网抗毁性，并构建抗毁性优化模型求解公路新建方案。温振国[14]以陕西省高速公路网为研究对象，引入复杂网络理论进行建模并分析，并提出网络效率相对值和最大连通子图相对大小这两个适用于高速公路网络鲁棒性分析的指标。郑义彬等人[15]以湖北省高速公路网为研究对象，选取 Space-P 方法建立网络拓扑模型，在分析复杂网络的特性基础上，进一步分析其路网的节点和网络鲁棒性。以道路网络为对象的研究中，学者们多以韧性单一特征对路网韧性进行评估与分析。

四川是天府之国，也是灾害频发之地。由于地跨青藏高原、横断山脉、云贵高原、秦巴山地、四川盆地等几大地貌，地形复杂，地质灾害频发，因此有必要对四川公路网进行韧性分析。而高速公路是综合交通的主动脉，以四川省为例，高速公路用全省综合交通 2% 的线网里程，承担了近 40% 的货运量和 34% 的客运量，其畅通运行对于全省经济社会至关重要，因此有必要对高速公路网开展韧性分析、为路网规

<sup>1</sup>[https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content\\_5588654.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm)

<sup>2</sup>[https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220119\\_3637245.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220119_3637245.html)

划调整提供参考。基于以上背景，尽管已有一些关于道路网络韧性的研究，针对四川省高速公路网韧性分析还需进一步深入研究，尤其是在多维度韧性分析方面还存在不足，且未充分考虑实际出行需求。因此本文以四川省高速公路网为研究对象，基于复杂网络理论构建拓扑模型，并引入高速公路网实际出行需求，从节点和路段两个层面，对高速公路网的路径冗余性和路网鲁棒性进行韧性分析，以期为行业管理部门开展交通规划提供科学决策支撑。

## 2. 研究设计

### 2.1. 研究理论

#### (1) 韧性分析框架

从目前学者对韧性的普遍定义来看，韧性高度依赖于系统原有的特性和事件的性质，而且是与时间密切相关的性能。因此，韧性的量化涉及事件发生前后的多阶段、多角度的复杂流程，且影响因素众多。就交通系统韧性的量化而言，学界普遍认可 Bruneau 等[16]提出的四个维度：冗余性、鲁棒性、资源丰富性、快速恢复性，具体含义如图 1 所示。

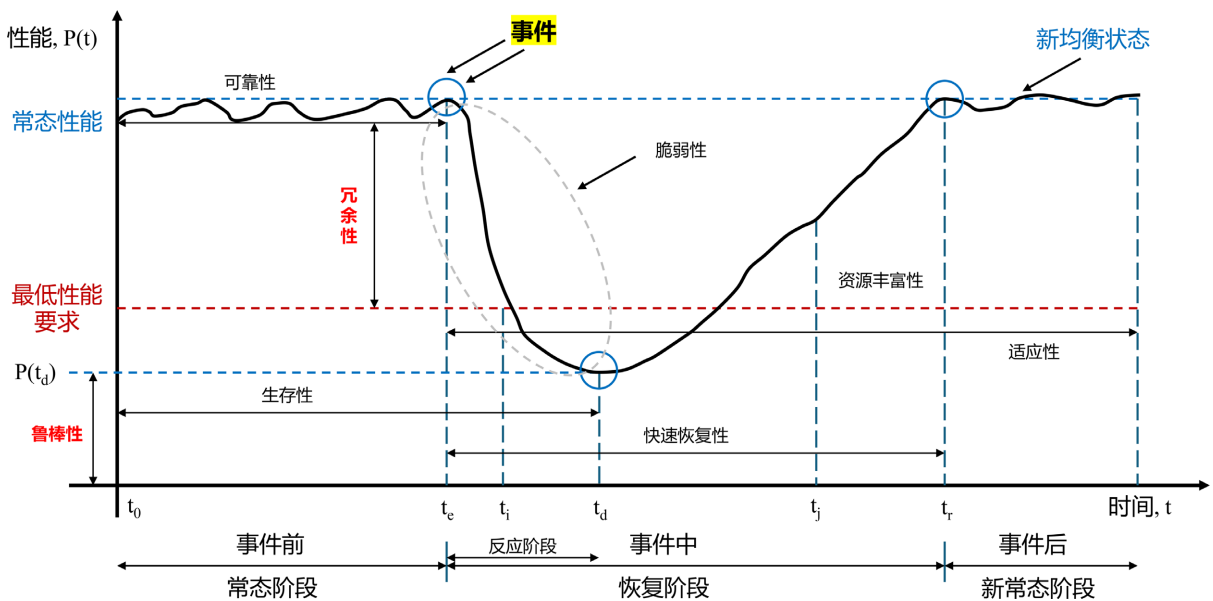


Figure 1. The four dimensions of quantitative resilience analysis

图 1. 韧性定量分析的四个维度

从度量韧性的四个维度来看，在事前规划阶段，增加网络冗余性和鲁棒性能够降低失效的概率和后果严重性。在事件发生和事后阶段，及时采取多种救援措施并增加相关资源的支持，能够提升救援效率和加快恢复速度。其中，资源丰富性和快速恢复性需要通过扰动事件发生前、中、后不同时期的微观数据进行量化研究，对数据的范围和质量要求十分高，因此相关研究较为困难。另外，在交通系统中意外事件造成损失是不可逆的，因此在事前规划阶段提供道路网络的储备能力显得尤为重要。为此，本文将从韧性的两个主要维度——冗余性和鲁棒性着手，规避没有事件数据失效场景下交通网络韧性评价的复杂性，关注对交通网络事前储备能力的系统评估，为四川省高速公路网韧性研究提供决策支撑。

#### (2) 路径冗余性分析

根据 Xu [9]，交通网络冗余性可从路径多样性和剩余容量两个维度进行评估，分别归纳为“路径冗

余性”和“容量冗余性”两个维度的评价指标。其中，路径冗余性主要关注出行者可选路径的数量，如果交通网络在常态下能为出行者提供更多的路径选择，则在不确定的失效场景时就更有可能为出行者提供替代路径，作为路网韧性的额外储备。而容量冗余性主要关注交通网络还能承载多少额外的交通需求，如果在常态下交通网络能够承载较多额外的交通需求，在事件发生交通网络供给能力下降时，就更有可能满足较多的交通需求，使得交通网络能够在扰动下能够保持稳定运行状态。由于容量冗余性需要路段级的设计通行能力及常态交通流量，受限于数据本文重点关注路径冗余性的评估。

路径冗余性被定义为交通网络中每个 O-D 对之间可选路径的数量。文献主要提到三种可选路径的定义：简单路径、有效路径、不重叠路径。其中，简单路径未考虑出行者行为选择可能导致对路径数量的高估，而不重叠路径要求任意两条路径不能使用相同路段，可能导致对路径冗余性的评估过于悲观。综合考虑本文选择有效路径作为可选路径的定义，并参考 Xu [9]和 Jing [17]将有效路径定义为：离起点越来越远且长度适中的路径。

有效路径要求路径上的所有路径使得出行者离起点越来越远，即：

$$c_{ri} \leq c_{rj}, \forall a_{ij} \in A \tag{1}$$

其中， $c_{ri}$ 和 $c_{rj}$ 分别是从小于起点  $r$  到路段  $a_{ij}$  的尾节点  $i$  和路段  $a_{ij}$  的头节点  $j$  的最短路径费用(出行距离或时间)， $A$  为交通网络中有向路段的集合。对于长度约束，路段  $a_{ij}$  的出行距离或时间  $t_{ij}$  需要满足：

$$t_{ij} \leq (1 + \tau_r^{a_{ij}})(c_{rj} - c_{ri}), \forall a_{ij} \in A \tag{2}$$

其中， $\tau_r^{a_{ij}}$  为路段  $a_{ij}$  对于起点  $r$  来说出行长度或时间可接受的延长比例。根据 Leurent，上式保证长度适中的路径的行程费用不超过最短路径的  $(1 + \tau_r^{a_{ij}})$  倍。将所有路段级的约束相加可证明以上关系：

$$c_k = \sum_{a_{ij} \in A_k} t_{ij} \leq \sum_{a_{ij} \in A_k} (1 + \tau_r^{a_{ij}})(c_{rj} - c_{ri}) \leq \sum_{a_{ij} \in A_k} (1 + \tau_r^{\max})(c_{rj} - c_{ri}) = (1 + \tau_r^{\max})c_{rs} \tag{3}$$

其中， $c_k$  是路径  $k$  的行程费用， $A_k$  是属于路径  $k$  的所有路段集合， $\tau_r^{\max}$  是起点  $r$  的可接受的最大延长比例。根据 Leurent 的研究[18]，城市交通网络的延伸率为 1.3~1.5，城际交通网络的延伸率为 1.6，结合本文研究对象为省域高速公路网络，将延伸率设置为 1.6。

另外，路径冗余性是针对 O-D 层面的指标，交通网络中包括大量的 O-D 对，难以仅根据 O-D 层面的冗余性指标对不同交通网络的路径冗余性大小进行比较，因此本文进一步使用节点路径冗余性的均值和均值 - 熵指标对 O-D 层面冗余性进行集计以表征不同交通网络的整体冗余性。均值 - 熵的计算公式如下：

$$RD = \frac{-\sum_{(r,s) \in RS} p_{rs} \log(p_{rs})}{\log(|RS|)} \times \overline{n^{rs}} \tag{4}$$

其中， $RD$  是交通网络冗余性的均值 - 熵指标， $RS$  是交通网络中所有 O-D 的集合， $\overline{n^{rs}}$  是交通网络中所有 O-D 对路径冗余性的均值， $p_{rs}$  为描述 O-D 对  $(r, s)$  的属性，公式如下：

$$p_{rs} = \frac{n^{rs}}{\sum_{(r,s)} n^{rs}} \tag{5}$$

### (3) 路网鲁棒性分析

鲁棒性作为交通网络韧性的另一个重要维度，其分析主要涉及对交通网络动态特性的研究，即在交通网络在遭受不同程度的破坏时，依然能够保持一定运输能力的性能。参考已有研究[19]，本文涉及的鲁棒性可分为两个方面进行定义：狭义的鲁棒性基于网络的几何结构，指遭受攻击后网络维持连通的能力，

称为结构鲁棒性；而广义的鲁棒性基于网络的功能，指遭受攻击后网络维持正常运行的能力，称为功能鲁棒性。

节点对之间的效率  $e_{ij}$  定义为两点之间最短距离的倒数，当节点  $i$  和节点  $j$  之间无法联通时效率为 0，当两节点间最短距离为 1 时效率为 1。交通网络的全局效率测度可表示为

$$E(G) = \frac{1}{K(K-1)} \sum e_{ij} \quad (6)$$

式中， $K$  表示网络  $G$  中 O-D 节点个数，对于具有  $N$  个节点的网络  $G$ ， $K \leq N$ ， $e_{ij}$  表示从 O-D 节点  $i$  到 O-D 节点  $j$  最短距离的倒数。

本文研究对象为四川省高速公路网，对于以服务跨区域交通出行为主要功能的高速公路网，在传统网络全局效率的基础上加以改进，在全局效率测度中引入 O-D 对之间的真实交通量进行效率加权，作为功能鲁棒性测度，定义如下：

$$E(G) = \frac{1}{K(K-1)} \sum v_{ij} e_{ij} \quad (7)$$

式中， $v_{ij}$  表示从 O-D 节点  $i$  到 O-D 节点  $j$  的换算车流量，其余符号同式(6)。

## 2.2. 路网拓扑模型构建

交通网络构建的关键在于对节点和边的拓扑关系的抽象化表达，常见的网络构建方法有 3 种：L 空间、P 空间和 R 空间。其中，L 空间网络构建方法以交通站点为节点、交通站点之间的交通路段为边，该方法能直观反映交通地理实体的相对位置和拓扑连接关系；P 空间网络构建方法同样以交通站点为节点，若交通站点之间有交通路段直接相连，则生成连边，该方法能直观反映交通节点之间的衔接转换关系；R 空间网络构建方法以交通站点之间的交通路段为点，若两条交通路段有共有交通节点，则生成连边，该方法能直观反映各交通路段的特征和衔接转换关系。针对高速公路网韧性分析需求，P 空间和 R 空间网络构建方法难以表征高速公路路段和互通的位置关系，因此本文选择基于 L 空间的网络构建方法。

本文将四川省高速公路拓扑网络构建为有向加权图  $G = \langle V, E \rangle$ ，其中点集  $V$  包括 834 个表示收费站的 O-D 节点和 174 个表示枢纽互通的其他节点；边集  $E$  包括 2210 条表示节点间实体高速公路路段、权重为路段里程的有向边。所构建的四川省高速公路拓扑结构如图 2 所示。

## 3. 路网鲁棒性分析

### 3.1. 单边失效下路段重要度评价

本文将单边断连后网络全局效率下降幅度定义为路段重要度，表示如下：

$$\varepsilon_k = \frac{E(G_k)}{E(G)} \quad (8)$$

式中， $\varepsilon_k$  表示第  $k$  条边断连后的路段重要度， $E(G)$  表示初始网络全局效率， $E(G_k)$  表示第  $k$  条边断连后的网络全局效率。

以路段重要度作为评价指标，依次对所有路段单独攻击，模拟单边失去功能后对整体路网的影响程度。随后，通过运用 K-Means 聚类方法对各路段的指标数值进行分级，得出各路段在公路网中的重要度等级，具体结果如图 3 所示。

从路网结构来看，雅西、攀西、汶马、九绵高速等连接三州地区的高速公路，以及遂内、遂广高速等



该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 2. Topological structure of Sichuan expressway network

图 2. 四川省高速公路拓扑结构图





该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作，底图无修改。

**Figure 3.** Distribution of road segment importance levels. (a) Road network structure; (b) Road network function  
**图 3.** 路段重要度等级分布。(a) 路网结构；(b) 路网功能

路网稀疏地区的高速公路，由于缺乏有效的替代路线，其在路网中的重要度相对较高。从路网功能来看，四川省高速公路的出行以市域内短途出行为主，例如成都、乐山绕城及周边放射线高速公路车流量大，因此其在整体路网中的重要度相对于其他市(州)和非城区段的高速公路更为突出。

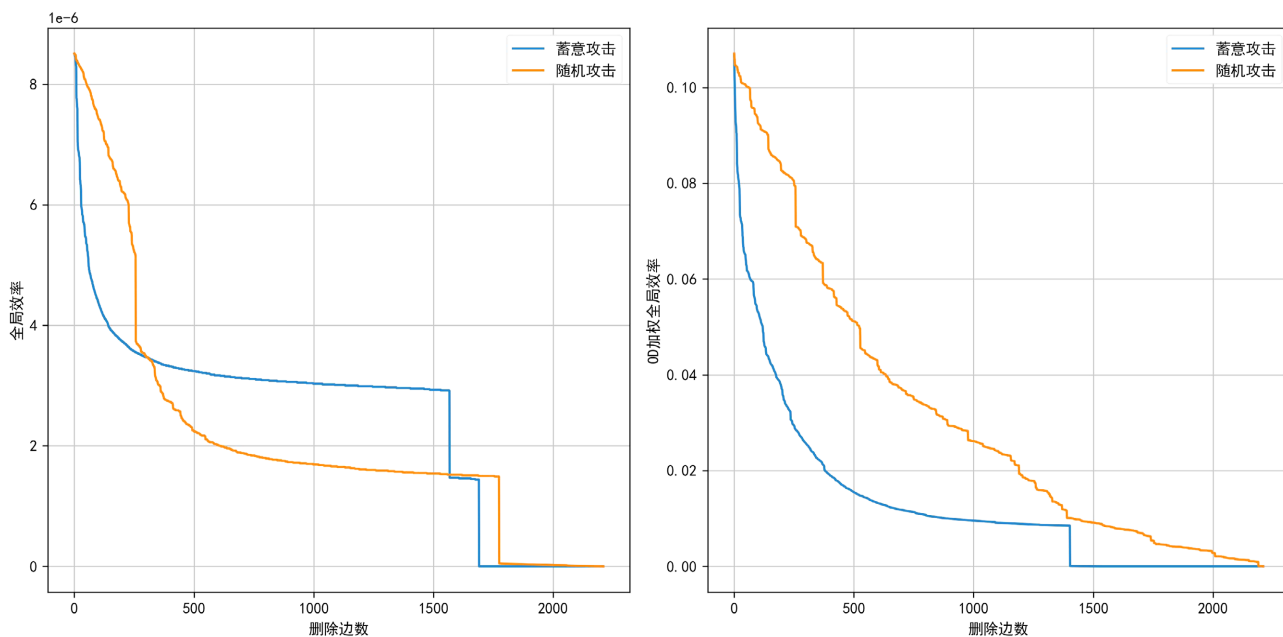
### 3.2. 多边失效下路网鲁棒性分析

#### (1) 整体路网

在多边失效模式下，通过分析随机攻击和蓄意攻击两种策略对网络全局效率的影响，对路网鲁棒性进行评估分析。随机攻击策略假设每一条边受到攻击的概率相等，随机选择边进行删除；而蓄意攻击策略则采用基于边介数的方式，依次删除当前边介数最大的边。不同攻击策略的结果如图 4 所示。

从路网结构来看，在攻击初始阶段，连接三州地区的高速公路由于单一性和边介数较大，在蓄意攻击策略下往往首先受到攻击，导致全局效率值迅速下降。在网络边失效率从 14%到 71%的阶段，蓄意攻击策略下连接三州地区的高速公路全部失效，但非三州地区路网连通性较好，O-D 对节点间有多条可选路径，使得四川省高速公路网能够保持结构的整体稳定，全局效率值下降相对较慢。直至网络边失效率达到 77%时，蓄意攻击策略下的全局效率值骤降为 0，导致网络完全瘫痪。相比之下，随机攻击策略下情况稍好，但在网络边失效率达到 80%后，同样会导致网络的完全瘫痪。

从路网功能来看，将交通流量叠加于四川省高速公路网后，无论是随机攻击还是蓄意攻击策略，网络全局效率均呈下降趋势，且下降速度呈现先快后慢的特点。整体而言，蓄意攻击策略的效果更为显著。例如，在网络边失效率达到 1%时，蓄意攻击策略下全局效率值下降 26%，而随机攻击策略下全局效率值



**Figure 4.** Changes in global network efficiency under different attack strategies. (a) Road network structure; (b) Road network function  
**图 4.** 不同攻击策略下的网络全局效率变化。(a) 路网结构；(b) 路网功能

仅下降 4%；直至网络边失效率达到 64%时，蓄意攻击策略下网络完全瘫痪，而随机攻击策略下全局效率值仍保持初始值的 10%。这表明，在了解四川省高速公路网的出行信息的基础上，进行蓄意攻击更容易影响交通 O-D 节点之间的出行，可能导致较为严重的阻断事件发生。

(2) 分市(州)路网

采用随机攻击和蓄意攻击两种策略对边数不小于 100 的各市(州)路网鲁棒性进行单独分析，结果如表 1 和表 2 所示。

由表可知，除乐山市以外的各市(州)，蓄意攻击下的 O-D 加权网络全局效率下降速度最快，蓄意攻击下的网络全局效率下降速度、随机攻击下的网络全局效率下降速度次之，随机攻击下的 O-D 加权网络全局效率下降速度最慢。这表明，在蓄意攻击下，各市(州)的路网普遍比随机攻击更缺乏鲁棒性。并且在

**Table 1.** Proportion of attacked edges when global network efficiency decreases in each city  
**表 1.** 各市(州)网络全局效率指标下降时被攻击边数比例

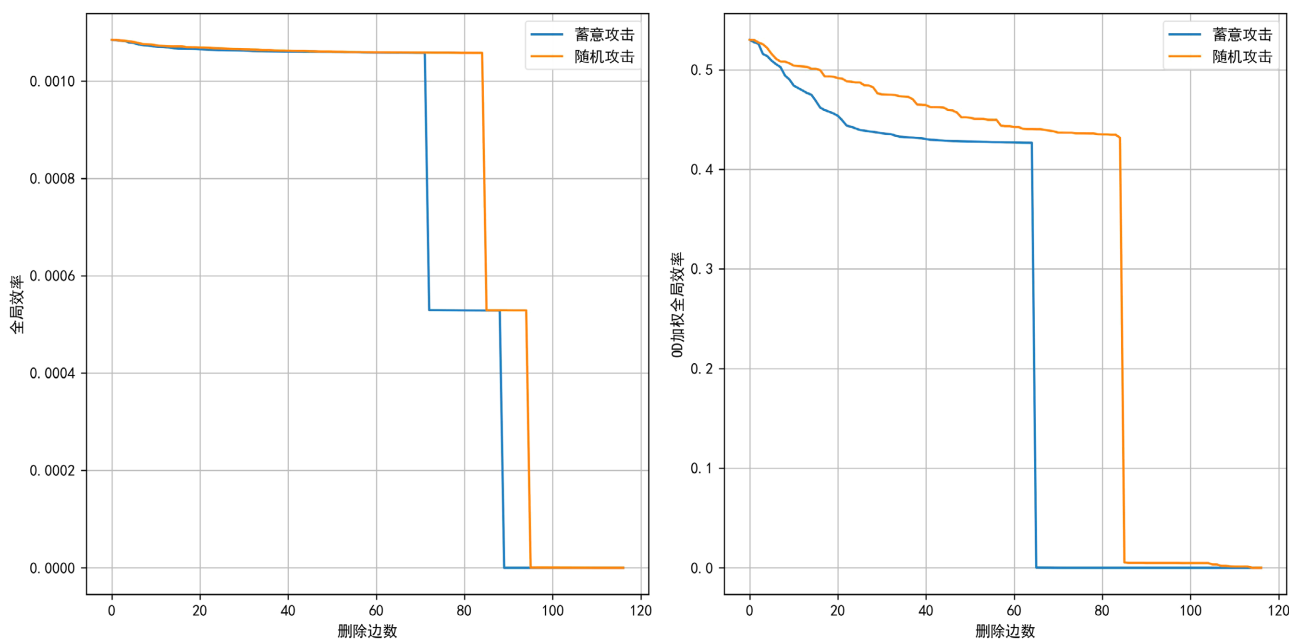
市(州)	随机攻击			蓄意攻击		
	指标下降 10%	指标下降 50%	指标下降 99%	指标下降 10%	指标下降 50%	指标下降 99%
全省	3.7%	11.6%	80.3%	0.5%	5.1%	76.5%
成都市	2.8%	10.6%	84.7%	0.8%	3.9%	70.7%
绵阳市	3.0%	16.7%	92.4%	1.5%	7.6%	76.5%
泸州市	4.0%	15.1%	94.4%	0.8%	7.1%	75.4%
宜宾市	4.1%	17.2%	95.9%	1.6%	9.0%	73.8%
乐山市	73.3%	73.3%	81.9%	62.1%	62.1%	76.7%
南充市	1.9%	12.0%	94.4%	0.9%	6.5%	72.2%
眉山市	3.0%	18.0%	95.0%	2.0%	8.0%	74.0%

**Table 2.** Proportion of attacked edges when global network efficiency of the O-D decreases in each city  
**表 2.** 各市(州)O-D 加权网络全局效率指标下降时被攻击边数比例

市(州)	随机攻击			蓄意攻击		
	指标下降 10%	指标下降 50%	指标下降 99%	指标下降 10%	指标下降 50%	指标下降 99%
全省	3.3%	20.8%	98.3%	0.2%	4.4%	63.5%
成都市	2.8%	22.5%	92.7%	0.5%	4.7%	33.7%
绵阳市	7.6%	32.6%	98.5%	1.5%	7.6%	58.3%
泸州市	9.5%	52.4%	97.6%	0.8%	2.4%	52.4%
宜宾市	4.1%	50.8%	96.7%	0.8%	4.1%	69.7%
乐山市	25.0%	73.3%	74.1%	11.2%	56.0%	56.0%
南充市	7.4%	39.8%	94.4%	1.9%	8.3%	53.7%
眉山市	7.0%	41.0%	99.0%	3.0%	8.0%	52.0%

叠加交通流量后, 这种差异更加明显。例如, 成都市交通流量集中的重要路段在受到蓄意攻击时, 其路网功能鲁棒性极差, 仅有 34%的边受攻击后就会导致网络的完全瘫痪。

另外, 还发现一个比较有意思的点, 乐山市路网在不同攻击策略下的全局效率变化如图 5 所示。与其他市(州)不同, 乐山市路网在边失效率达到 60%之前, 全局效率始终维持在较高水平。这主要得益于乐山市的路网联通性较好, 市域核心区域的高速公路网存在较多的“圈”, 且实际出行需求分布相对均匀。从路网结构和路网功能来看, 与其他市(州)相比, 乐山市都展现出较好的鲁棒性。



**Figure 5.** Changes in global network efficiency of Leshan under different attack strategies. (a) Road network structure; (b) Road network function

**图 5.** 不同攻击策略下的乐山市高速公路网络全局效率变化。(a) 路网结构; (b) 路网功能

#### 4. 结束语

在韧性被纳入交通强国建设评价指标体系的背景下, 交通网络韧性已经成为国内外学者广泛关注的

研究热点。本文以四川省高速公路网为研究对象，基于 L 空间的网络构建方法建立拓扑模型。在系统梳理交通网络韧性研究脉络后，结合四川省高速公路网的实际情况和掌握的数据，重点关注韧性中的路径冗余性和路网鲁棒性两个维度。同时，基于高速公路联网收费系统数据，挖掘并提取高速公路网真实 O-D 对，作为路径冗余性和路网鲁棒性分析的核心输入。

针对路径冗余性分析，本文基于深度搜索算法，计算 O-D 对之间的有效路径数量作为路径冗余性的定量评价指标，并对其统计分布、空间分布和有效路径的空间集聚特征进行了深入分析。结果表明，四川省高速公路网路径冗余性较其他三个交通极较低，且不同市(州)之间以及同一市(州)内部均存在显著差异。其中，成都市平均路径冗余性处于中等水平，这表明城市等级高其路径冗余性并不一定高。本文通过分析拓扑结构中“圈”的数量和空间分布，对此现象进行了详细讨论和原因分析。结果显示，在交通网络中大量有效路径经过的区域形成更多的“环路”，可能是增强网络路径冗余性的一种经济有效的方案。

针对路网鲁棒性分析，本文分别对单边失效和多边失效状态下的鲁棒性进行详尽分析。结果表明，从路网结构来看，四川省高速公路网在蓄意攻击策略下鲁棒性较好，对三州地区路网进行针对性补强后，可进一步提升路网结构鲁棒性。而从路网功能来看，在叠加交通流量后，受市域内短途出行为主特征的影响，四川省高速公路网在蓄意攻击策略下鲁棒性较差。分市(州)来看，蓄意攻击下路网鲁棒性普遍弱于随机攻击，且叠加交通流量后差异更加明显。

本文在路网构建和数据使用上存在一定的不足和局限。四川省高等级公路网不仅包括高速公路，还有高技术等级的国道和省道，有相当一部分车辆出行时选择高速公路和普通公路交替行驶。因此，为更加真实反映路网韧性，需要在拓扑模型中进一步考虑普通国道省道。此外，在计算路径冗余性时，未将 O-D 对的流量作为权重，对 O-D 对之间的有效路径数量进行权重设置，与实际出行需求存在一定差异。

## 基金项目

四川省交通运输发展战略和规划科学研究院基本科研业务费项目(2025JBKY01)。

## 参考文献

- [1] Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M. and Bruneau, M. (2010) Framework for Analytical Quantification of Disaster Resilience. *Engineering Structures*, **32**, 3639-3649. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008>
- [2] Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- [3] Wears, R.L. (2006) Resilience Engineering: Concepts and Precepts. *Quality and Safety in Health Care*, **15**, 447-448. <https://doi.org/10.1136/qshc.2006.018390>
- [4] Rose, A. (2004) Defining and Measuring Economic Resilience to Disasters. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, **13**, 307-314. <https://doi.org/10.1108/09653560410556528>
- [5] Murray-Tuite, P.M. (2006) A Comparison of Transportation Network Resilience under Simulated System Optimum and User Equilibrium Conditions. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, Monterey, 3-6 December 2006, 1398-1405. <https://doi.org/10.1109/wsc.2006.323240>
- [6] Heaslip, K., Louisell, W., Collura, J., et al. (2010) A Sketch Level Method for Assessing Transportation Network Resilience to Natural Disasters and Man-Made Events. *Proceedings of the 89th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC, 10-14 January 2010, 15 p. <https://trid.trb.org/View/910940>
- [7] Freckleton, D., Heaslip, K., Louisell, W., et al. (2012) Evaluation of Transportation Network Resiliency with Consideration for Disaster Magnitude.
- [8] House, T.W. (2013) Presidential Policy Directive—Critical Infrastructure Security and Resilience. White House Press Releases Fact Sheets and Briefings/FIND.
- [9] Xu, X., Chen, A., Jansuwan, S., Yang, C. and Ryu, S. (2018) Transportation Network Redundancy: Complementary Measures and Computational Methods. *Transportation Research Part B: Methodological*, **114**, 68-85. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.05.014>

- 
- [10] Zang, Z., Xu, X., Chen, A. and Yang, C. (2021) Modeling the  $\alpha$ -Max Capacity of Transportation Networks: A Single-Level Mathematical Programming Formulation. *Transportation*, **49**, 1211-1243. <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10208-1>
- [11] Xu, X., Chen, A. and Yang, C. (2018) An Optimization Approach for Deriving Upper and Lower Bounds of Transportation Network Vulnerability under Simultaneous Disruptions of Multiple Links. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **94**, 338-353. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.08.015>
- [12] Zhao, R., Xu, X. and Chen, A. (2022) Alternative Method of Counting the Number of Efficient Paths in a Transportation Network. *Transportmetrica A: Transport Science*, **18**, 1207-1233. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1933255>
- [13] 区俊锋. 公路网网络抗毁性分析及优化研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [14] 温振国. 基于复杂网络理论的陕西省高速公路网结构特性及鲁棒性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [15] 郑义彬, 蔡航鹏, 赖伟伟, 等. 基于复杂网络的湖北省高速公路网特性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 31-37.
- [16] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., *et al.* (2003) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, **19**, 733-752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- [17] Jing, W., Xu, X. and Pu, Y. (2019) Route Redundancy-Based Network Topology Measure of Metro Networks. *Journal of Advanced Transportation*, **2019**, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2019/4576961>
- [18] Leurent, F.M. (1997) Curbing the Computational Difficulty of the Logit Equilibrium Assignment Model. *Transportation Research Part B: Methodological*, **31**, 315-326. [https://doi.org/10.1016/s0191-2615\(96\)00035-5](https://doi.org/10.1016/s0191-2615(96)00035-5)
- [19] 史春辉. 复杂网络拓扑结构抗毁性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2012.