

文章编号: 1005-0523(2020)03-0052-08

# 基于网络拓扑及交通特性的城市路网弹性评价

徐锦强<sup>1,2</sup>, 黄海南<sup>1</sup>, 李林<sup>1</sup>, 岳小泉<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学交通与土木工程学院, 福建 福州 350002; 2. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为了更好地应对城市道路的局部灾害,需对城市路网的抗灾能力进行评价。文章回顾了路网弹性的内涵,从路网拓扑结构和路网交通特征两个层面出发,提出路网弹性指数的概念并给出了量化方法:①基于复杂网络理论,分析了城市道路网络拓扑结构的特性,构建了基于节点度、中介中间度、接近中间度的节点拓扑指数;②基于交通量和冗余饱和度指标构建了节点交通指数,并提出计算模型。

**关键词:**交通工程;路网弹性;复杂网络理论;交通特性;冗余饱和度

**中图分类号:**U491.1

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.03.007

城市路网是城市交通的承载者,其应对局部灾害(内涝、地震等)的能力越发引起关注。许多国内外学者开展了大量研究,产生了道路网络弹性的概念,用于描述路网抵抗局部破坏的能力。生态系统弹性的概念,从早期一维的生态视角扩展到目前包括生态、技术、社会和经济四维视角<sup>[1]</sup>。对于城市来说,Lhomme S认为城市的弹性是城市吸收干扰和在扰动后恢复城市原有功能的能力<sup>[2]</sup>。Campanella T J则认为城市弹性是城市面对灾难性事件时将损失降到最低的能力<sup>[3]</sup>,强调了减小损失的特征。在城市弹性<sup>[4]</sup>研究基础上,路网弹性的概念被提出并细化<sup>[5]</sup>。路网弹性是指城市道路网络抵抗自然或人为灾害,吸收灾害影响,并快速恢复的能力,其能力具有三层含义。①路网抵抗力:在灾害发生时,路网对灾害的抵抗能力。②路网吸收力:路网局部受灾后,对交通产生不同程度的影响,周边路网承担了分流和疏散交通的功能,这就是路网的吸收能力。Lhomme S提出冗余指标来评价路网的吸收能力<sup>[6]</sup>。③路网恢复力:灾害后路网能迅速消除障碍重新恢复道路正常功能的能力。路网弹性的三层含义中,路网抵抗力和路网恢复力往往不能由路网自身结构决定,而路网吸收力是体现路网整体可靠性的关键能力。对路网弹性的研究有不同的侧重,包括道路网络的脆弱性<sup>[7-8]</sup>,道路网络可靠性<sup>[9-12]</sup>,这些研究往往只关注路网的拓扑结构,忽视了路网上的交通特征。

本文从路网拓扑结构和交通特性两个方面提出路网弹性指数的定义组成及计算方法:①利用复杂网络理论对路网拓扑结构进行分析,利用节点度、中介中间度、接近中间度指标构建了路网拓扑弹性指数;②利用交通量和相邻节点冗余饱和度指标构建了交通弹性系数。利用实例进行了方法的运用,可为路网规划改善、交通管理及防灾减灾提供参考。

## 1 路网弹性指数的定义及计算模型

为了定量分析路网对灾害的吸收力,提出“路网弹性指数”的概念,用来表征路网在局部受损时,路网自身进行消损的能力。当路网局部受灾后,造成的效率下降或局部失效,路网或节点的弹性指数高,则表明路网对这种后果能较好的吸收和消解,路网弹性好。从微观和宏观两个层面,分别定义节点的弹性指数和路网的弹性指数,每个节点的拓扑弹性构成了整个路网的拓扑弹性。

**收稿日期:**2019-09-04

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51608123);福建省自然科学基金项目(2017J01475);福建农林大学科技创新专项基金项目(KFA17035A,KFA17039A)

**作者简介:**徐锦强(1976—),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为地面交通管理与组织。

### 1.1 定义构成

当一个路网的节点因灾害而效率下降或完全失效后,其周边路网对它失效产生的影响进行吸收和消解的能力就是节点弹性指数。所有节点的吸收能力构成了整个路网的吸收能力。路网弹性指数从两个方面进行描述:① 道路作为复杂网络,其网络本身对弹性存在较大的影响,因此需要考虑路网拓扑结构特征;② 道路交通特性反映了道路上的交通的数量和时空分布,是路网弹性重要的制约因素。以往的路网弹性研究中往往忽略了道路上的交通特性。路网弹性指数的概念构成见图 1 所示。

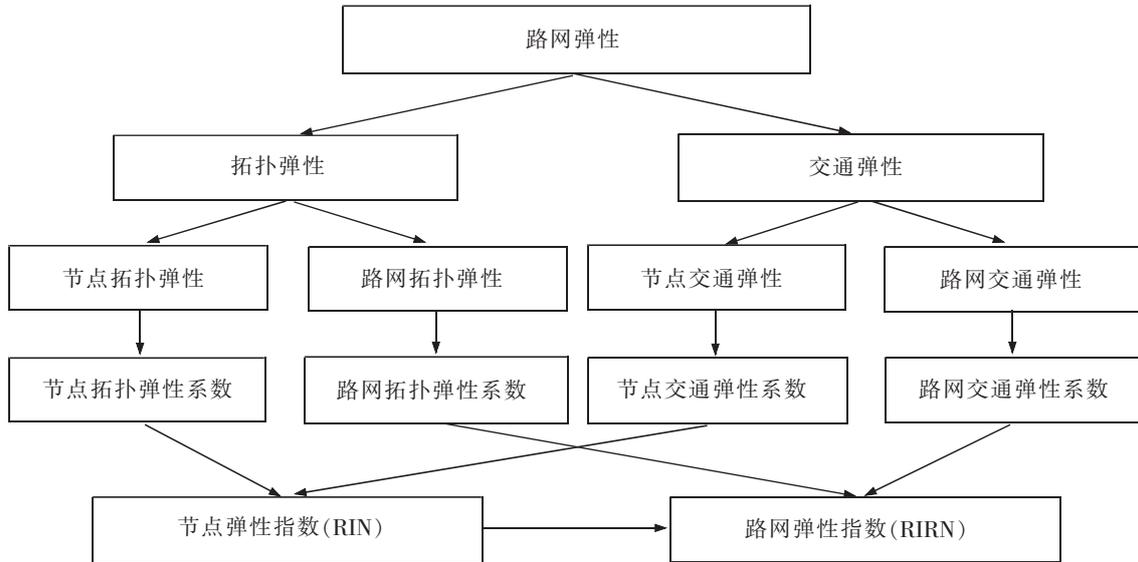


图 1 路网弹性指数的概念构成

Fig.1 Definition components of road network resilience

路网弹性指数的构成、评价指标及含义见表 1 所示。

表 1 路网弹性指数的评价指标

Tab.1 The definition components of road network resilience and their meaning

概念构成	评价指标	相关性	指标含义
拓扑弹性	节点度	正相关	路网中与该节点相连的连线数量。
	中介中间度	负相关	最短路径穿越次数。某节点中介中间度越高,穿越的最短路径越多,一旦该节点失效,受影响的最短路径越多。
	接近中间度	正相关	节点到网络中其它各节点的平均最短距离,表明路网的集中程度,路网越密集,路网弹性越好。
交通弹性	节点交通量	负相关	评价节点自身交通压力,当节点受损时,有多少交通量需要寻找替代线路绕行。
	相邻节点 冗余饱和度	正相关	与某节点相连的其它节点道路通行能力的冗余值,体现周边路网对节点交通流量的分流吸收能力。若无冗余,非但不会分流,还转移了拥堵。

### 1.2 计算模型

#### 1.2.1 拓扑弹性的计算

路网的拓扑结构是路网的“先天条件”,在一定程度上影响了路网节点的弹性。对实际路网进行拓扑结构转换,常用的拓扑方法有主方法<sup>[13]</sup>和对偶法<sup>[14]</sup>两种。利用复杂网络理论对路网的拓扑结构进行分析,利用节点度、中介中间度、接近中间度三项指标,评价节点的拓扑结构特征。节点度定义为与该节点相连的连线

数量,中介中间度反映的是节点在网络路径选择中的重要程度,中介中间度程度最高的节点是在网络中最短路径穿越次数最多的节点。接近中心性是指网络中任意一点到其它各节点之间的平均最短路径,反映的是某节点与整个网络上其它点的接近程度。各拓扑弹性评价指标见表2。

表2 拓扑弹性指数量化方法  
Tab.2 The traditional quantitative method of topological resilience indicators

评价指标	绝对值量化	相对值量化	变量含义
节点度	$k_i = \sum_{j=1}^N \delta_{ij}$	$k_i^* = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \delta_{ij}$	$N$ 为节点总数; $\delta_{ij}$ 表示节点 <i>i</i> 是否与节点 <i>j</i> 相连,相连为1,反之则为0。
中介中间度	$C_{Bk} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{j-1} \frac{P_{jkk}}{P_{jk}}$	$C_{Bk}^* = \frac{2}{N^2-3N+2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{j-1} \frac{P_{jkk}}{P_{jk}}$	$P_{jk}$ 为 <i>j</i> 到 <i>k</i> 之间的最短路径数量; $P_{jkk}$ 为 <i>j</i> 到 <i>k</i> 之间经过节点 <i>i</i> 的最短路径数量。
接近中间度	$C_{Gk} = 1 / \sum_{k=1}^N d_{ik}$	$C_{Gk}^* = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N d_{ik}$	$d_{ik}$ 为节点 <i>i</i> 到节点 <i>k</i> 的最短路径

当需要对不同路网之间的拓扑指标进行对比时,应采用相对指标进行评价。

由于3个拓扑弹性指标的正负相关性不同,评价前需要先将指标同趋势化,即将逆向指标转化为正向指标。常用的正向化方法是取倒数,但易改变原指标的分布规律,因此采用倒扣逆变换法<sup>[15]</sup>进行正向化。指标正向化后,依据变异系数法<sup>[16]</sup>确定各指标所占权重,得到节点拓扑弹性系数,公式如下

$$E_{Ti} = \omega_1 \times k_i^* + \omega_2 \times C_{Bk}^* + \omega_3 \times C_{Gk}^* \tag{1}$$

式中: $E_{Ti}$ 为节点*i*的拓扑弹性指数; $k_i^*$ , $C_{Bk}^*$ 和 $C_{Gk}^*$ 分别是相对节点度,相对中介中间度和相对接近中间度; $\omega_1, \omega_2$ 和 $\omega_3$ 为权重。拓扑弹性指数越大,表明该节点弹性越好,受损后对路网影响越小。

### 1.2.2 交通弹性的计算

1) 节点交通量。节点*i*的交通量 $Q_i$ 是节点*i*原本需要承担的交通, $C_i$ 是节点*i*的通行能力, $x_i$ 是节点*i*的饱和度。当节点*i*中断时, $Q_i$ 需要分流到周边路网中。当 $Q_i$ 越大,表明周边路网需要疏解的交通压力越大,该节点*i*的交通弹性越差。为了消除指标间量纲的差异,采用改进的min-max标准化法<sup>[17]</sup>进行标准化处理

$$Q_i^* = \frac{Q_i - \min Q + 1}{\max Q - \min Q + 1} \tag{2}$$

式中: $\max Q$ 和 $\min Q$ 分别是所有节点交通量的最大值和最小值。

2) 相邻节点富余饱和度。提出相邻节点富余饱和度 $x_{Ri}$ ,用于表征受损节点*i*周边的其它节点吸收受损节点交通量的能力。考虑周边路网交通流的稳定,周边路网吸收分流交通量后的饱和度不宜超过0.9。若相邻节点自身饱和度已经超过0.9,则表明该节点无法吸收分流交通量。计算公式如下

$$x_{Ri} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (0.9 - x_j) \quad \text{其中, } x_j = \begin{cases} x_j, & x_j < 0.9 \\ 0.9, & x_j \geq 0.9 \end{cases} \tag{3}$$

式中: $x_{Ri}$ 为节点*i*的相邻节点富余饱和度;节点*j*与节点*i*相邻; $m$ 为节点*j*的数量; $x_j$ 为节点*j*的饱和度。采用改进的min-max标准化法对 $x_{Ri}$ 进行标准化,得到 $x_{Ri}^*$ 。

3) 交通弹性的计算。利用倒扣逆变换法和变异系数法,得到节点交通弹性系数 $E_{Qi}$ ,公式如下

$$E_{Qi} = \omega_1 \times [\max(Q_i^*) - Q_i^*] + \omega_2 \times x_{Ri}^* \tag{4}$$

式中: $\omega_1, \omega_2$ 为变异系数法确定的权重

### 1.2.3 节点弹性及路网弹性计算

综合上述 2 个方面共 5 个指标,加权平均得到节点弹性指数,公式如下

$$E_i = \frac{\omega_1 E_{Ti} + \omega_2 E_{Qi}}{\omega_1 + \omega_2} \quad (5)$$

式中: $E_i$  为节点  $i$  的弹性指数; $E_{Ti}$  是节点  $i$  的拓扑弹性指数; $E_{Qi}$  是节点  $i$  的交通弹性指数; $\omega_1$  和  $\omega_2$  为加权重,由专家法确定,且  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

路网由节点构成,节点的弹性指数构成了整个网络的弹性指数。对路网中所有节点的弹性指数取平均值作为整个路网的弹性指数  $E$ ,计算公式如下

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (6)$$

式中: $E$  为路网弹性指数; $N$  为路网节点总数。

通过各节点弹性指数  $E_i$  的对比分析,可以评价各节点在遭受灾害时对整个路网的影响。由于指标均作了归一化处理,可将路网的弹性指数进行横向对比,用于评价不同路网间的弹性差异。

## 2 实例分析

### 2.1 路网拓扑图的建立

以福州仓山区金山片区路网为例。采用对偶法构建路网的拓扑图,对道路编号遵循原则有:① 相同路名的道路用同一个节点表示;② 同一条道路若道路断面有较大差异,应按两条道路来编号;③ 排除路网中的孤立路段。按此规则,金山片区内的 31 条主干道对应拓扑图中的 31 个节点,共有 163 条连线。对照道路连接关系,构建网络邻接矩阵,导入网络分析软件 UCINET 和 NETDRAW<sup>[18]</sup>进行分析。金山片区路网编号见图 2(a),转换后的路网拓扑结构见图 2(b)。

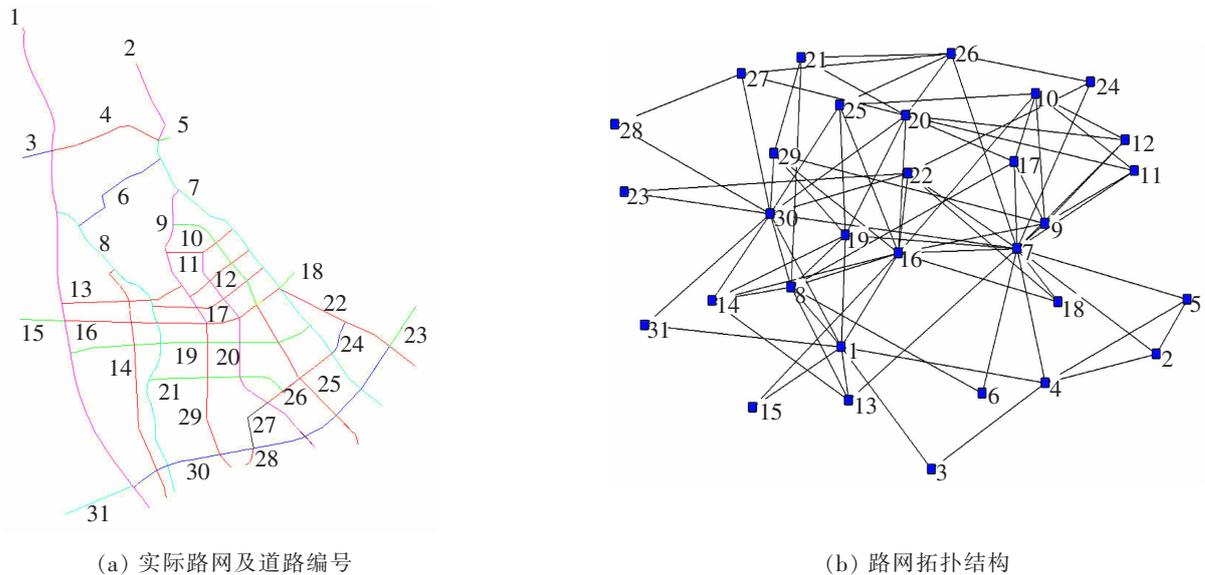


图 2 金山片区路网编号及对应的网络拓扑图

Fig.2 The number list of Jinshan area road network and the topological representation

### 2.2 节点拓扑弹性计算

路网中各节点的节点度、中介中间度和接近中间度计算结果如图 3 所示

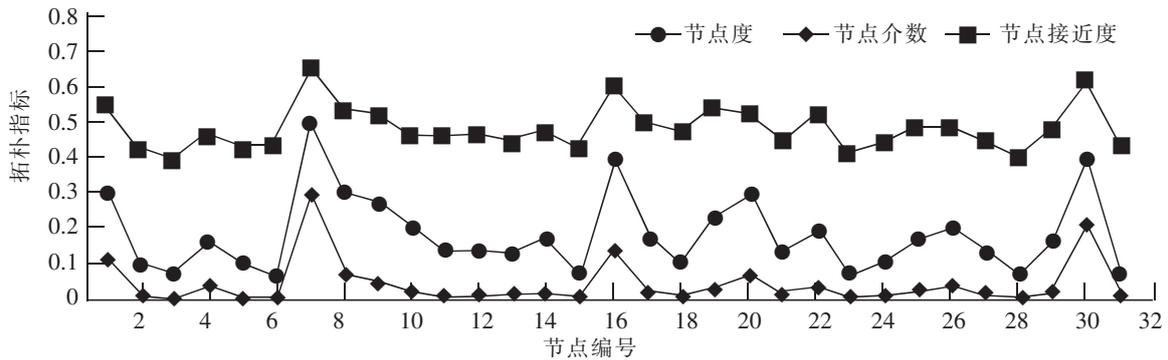
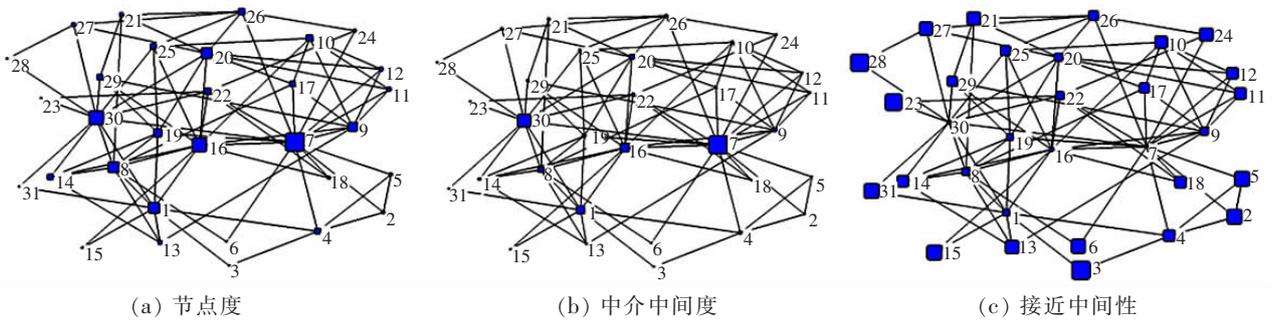


图3 路网拓朴指标曲线图

Fig.3 Topological indexes of each node in Jinshan area

利用 NETDRAW 软件将路网拓朴指标可视化,如图 4 所示,可直观看出每个指标的显著节点。



(a) 节点度

(b) 中介中间度

(c) 接近中间性

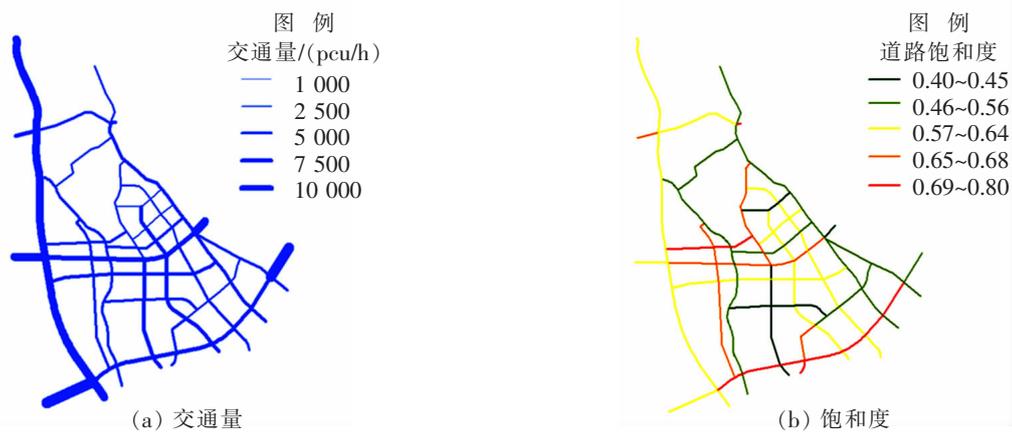
图4 路网拓朴指标可视化图

Fig.4 Visualization of topological indexes of Jinshan area

### 2.3 节点交通弹性计算

#### 2.3.1 节点交通量和饱和度

金山片区道路高峰小时交通量以及饱和度数据从交管部门获取,见图 5 所示。在一些长路段上,不同区段交通量和饱和度存在一定差异,采用平均值作为该节点的交通量和饱和度值。



(a) 交通量

(b) 饱和度

图5 金山片区路网交通量及饱和度空间分布图

Fig.5 Traffic volume and saturation degree of nodes in Jinshan area

由图可知,片区内交通量较大的是节点 1,15,18,23,31,饱和度较大的节点是 5,13,30。

#### 2.3.2 节点交通弹性

根据式(2)、式(4)计算相邻节点富余饱和度及交通弹性,鉴于篇幅仅列出部分节点,见表 3。

表 3 主要节点交通参数及交通弹性分析结果(部分)  
Tab.3 The traffic characteristics and traffic resilience of the nodes (partly)

参数	节点编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
相邻节点数量	9	3	2	5	3	2	15	9	8	6
饱和度	0.588	0.567	0.650	0.633	0.750	0.550	0.533	0.550	0.683	0.633
相邻节点饱和度平均值	0.645	0.639	0.610	0.618	0.578	0.542	0.585	0.608	0.576	0.596
相邻节点富余饱和度	0.255	0.261	0.290	0.283	0.322	0.358	0.315	0.292	0.324	0.304
节点交通弹性	0.278	0.744	0.602	0.688	0.639	0.781	0.642	0.669	0.754	0.761

2.4 节点弹性分析

综上所述,得到节点拓扑弹性、交通弹性及节点弹性,如表 4 和图 6 所示。

表 4 金山路网各节点的节点弹性  
Tab.4 The resilience of each node in Jinshan area

节点编号	拓扑弹性	交通弹性	节点弹性	节点编号	拓扑弹性	交通弹性	节点弹性
1	0.302	0.278	0.284	17	0.240	0.697	0.581
2	0.193	0.744	0.604	18	0.200	0.270	0.252
3	0.168	0.602	0.492	19	0.282	0.627	0.540
4	0.230	0.688	0.572	20	0.311	0.622	0.543
5	0.193	0.639	0.526	21	0.214	0.698	0.576
6	0.174	0.781	0.627	22	0.259	0.722	0.605
7	0.393	0.642	0.579	23	0.171	0.071	0.096
8	0.312	0.669	0.578	24	0.195	0.771	0.625
9	0.297	0.754	0.638	25	0.237	0.697	0.580
10	0.255	0.761	0.633	26	0.253	0.741	0.618
11	0.217	0.772	0.631	27	0.215	0.663	0.549
12	0.217	0.806	0.657	28	0.169	0.670	0.543
13	0.214	0.710	0.585	29	0.238	0.603	0.511
14	0.238	0.695	0.579	30	0.349	0.582	0.523
15	0.173	0.279	0.252	31	0.173	0.089	0.110
16	0.366	0.560	0.511				

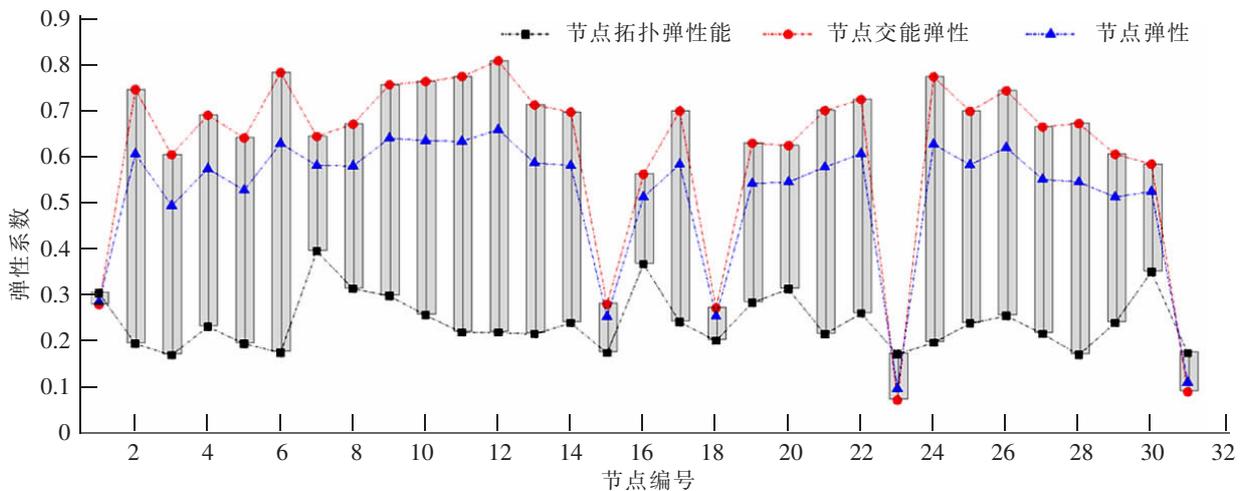


图 6 节点拓扑弹性、交通弹性、节点弹性及路网弹性指数曲线图

Fig.6 Topological resilience, traffic resilience and RIRN of nodes in Jinshan area

利用式(6),可以求得整个路网的弹性系数为 0.516,可与其它路网进行横向比较。

从图6可以看出,路网中拓扑弹性相对均衡,较好的是节点7,16和30。交通弹性中,较差的节点是15,1,18,31和23。节点1承担路网中最大的交通量,另外四个节点是桥梁,沟通不同片区的重要通道,弹性极差。以节点1为例,处于网络的边缘,与它相连的道路也不少,有较好的拓扑弹性,但因其承担的交通量巨大,交通弹性很差,整体降低了该节点的弹性。以节点12为例,它拓扑弹性一般,但由于它承担的交通压力小,受损后对周边路网的交通影响小,因此它的交通弹性强,整体提高了该节点的弹性。

金山片区经过路网弹性分析,实际路网的弹性分析结果见图7所示。拓扑弹性好的节点相交道路多,与路网连接紧密;拓扑弹性差的节点主要集中在路网边缘。交通弹性好的节点主要是交通流量小而且分布在路网密集区域,交通弹性差的节点主要是交通量巨大或者桥梁等。从图7还可以看出,节点交通弹性对节点弹性起关键作用。

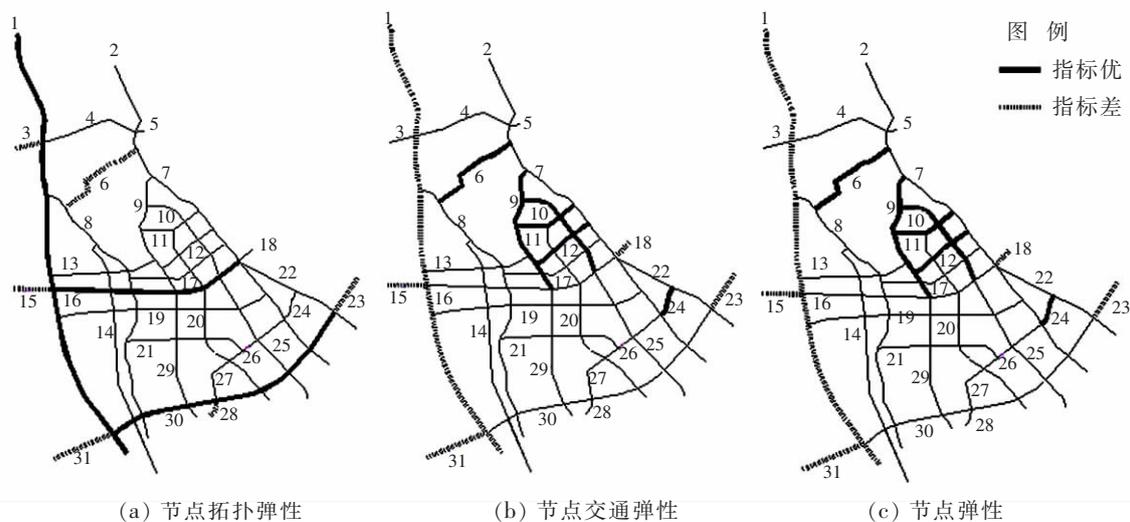


图7 金山片区实际路网弹性分析结果

Fig.7 The resilience result in real road network of Jinshan area

拓扑弹性和交通弹性共同决定了该节点的弹性,考虑交通特性后,对网络弹性的分析更加真实。路网弹性的评价能对各道路的重要程度及可能存在的瓶颈进行评判,评价的结果对改善道路网规划、交通管控及灾害响应等工作有一定指导作用。

### 3 结语

对道路网络弹性的研究对改善可持续道路网络和灾害响应的建设计划起到积极作用。本文结合了路网拓扑特性和交通特性两个方面的影响,提出了评价路网弹性的指标和计算模型,并将模型运用于福州金山片区路网。从案例研究中获得的结论是:

- 1) 同时考虑拓扑结构和交通特性的影响,对路网弹性的评价结论更为合理。
- 2) 节点的交通量和相邻节点冗余饱和度是交通弹性的关键因素。
- 3) 对于某个节点,流量弹性和拓扑弹性之间可能存在很大差异。

### 参考文献:

- [1] 蔡建明,郭华,汪德根. 国外弹性城市研究述评[J]. 地理科学进展,2012,31(10):1245-1255.
- [2] LHOMME S,SERRE D,DIAB Y,et al. A Methodology to Produce Interdependent Networks Disturbance Scenarios[C]//Ish International Symposium on Uncertain Modeling and Analysis and Management,2011:724-731.
- [3] CAMPANELLA T J. Urban resilience and the recovery of New Orleans[J]. Journal of the American Planning Association,2006,(2):141-147.

- [4] 李彤玥,牛品一,顾朝林. 弹性城市研究框架综述[J]. 城市规划学刊,2014,21(5):23-31.
- [5] KIM S, YEO H. A flow-based vulnerability measure for the resilience of urban road network[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2016,218:13-23.
- [6] LHOMME S, SERRE D, DIAB Y, et al. Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step towards more flood resilient cities[J]. Natural Hazards and Earth System Science,2013,13(2):221-230.
- [7] BERDICA K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done[J]. Transport Policy,2002,9:117-127.
- [8] CHEN A, YANG H, LO H K, et al. Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results[J]. Transportation Research Part B,2002,36:225-252.
- [9] 郭继孚,高永,温慧敏. 基于替代路径的路网连通可靠性评价方法研究[J]. 公路交通科技,2007,24(7):91-94.
- [10] CAO H, LIU H, ZHAO F, et al. The Evaluation of Node Importance in Urban Road Network Based on Complex Network Theory [J]. MATEC Web of Conferences,2016,61:04026.
- [11] WANG S, ZHENG L, YU D. The improved degree of urban road traffic network: A case study of Xiamen, China[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2017(469):256-264.
- [12] 吴中,吕文轩,叶奕辰. 二流理论的解析与城市路网动态评价方法[J]. 华东交通大学学报,2019,36(4):81-87.
- [13] PORTA S, CRUCITTI P, LATORA V. The network analysis of urban streets: a primal approach[J]. Environment & Planning B: Planning & Design,2006,33(5):705-725.
- [14] PORTA S, CRUCITTI P, LATORA V. The network analysis of urban streets: A dual approach[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2006,36(9):853-866.
- [15] 叶宗裕. 关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择[J]. 浙江统计,2003(4):24-25.
- [16] 杨宇. 多指标综合评价中赋权方法评析[J]. 统计与决策,2006(13):17-19.
- [17] 王晖,陈丽,陈昱,等. 多指标综合评价方法及权重系数的选择[J]. 广东药学院学报,2007,23(5):583-589.
- [18] 王陆. 典型的社会网络分析软件工具及分析方法[J]. 中国电化教育,2009(4):95-100.

## Evaluation of Road Network Resilience Based on Network Topology and Traffic Characteristics

Xu Jinqiang<sup>1,2</sup>, Huang Hainan<sup>1</sup>, Li Lin<sup>1</sup>, Yue Xiaoquan<sup>1</sup>

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;  
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to better deal with the local disasters of urban road network, it is necessary to evaluate the resilience of urban road network. The concept of the resilience of road network was summarized based on the literature reviews of relevant published papers. According to topological structure and traffic characteristics of the road network, the concept "resilience indicator of road network" (RIRN) was proposed, and two quantitative methods were given: (1) Based on the complex network theory, the characteristics of the topological structure of urban road network was analyzed and a topological index was structured associated with node degree, intermediate centrality and closeness centrality; (2) Meanwhile, a traffic index was structured associated with traffic volume and surplus saturation degree. A calculating method of RIRN was proposed and applied to the network in Jinshan Area of Fuzhou, China, for purpose of illustration. This paper highlights the effects of traffic characteristics on the resilience of road network and extends the research method in planning urban road networks, traffic management and disaster prevention.

**Key words:** traffic engineering; resilience of road network; complex network theory; traffic characteristics; surplus saturation degree