

基于组合赋权-云模型的高速公路网交通韧性评价

李洁¹, 刘邱琪¹, 张欣宇¹, 韦媛媛², 张晶晶^{2†}

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 广西交通集团有限公司, 广西壮族自治区 南宁 530007)

摘要:为了制定提升高速公路网交通韧性的策略,提出一种基于组合赋权-云模型的路网韧性评价方法.首先,选取结构熵、边介数、聚类系数、路网密度4个路网拓扑结构指标和行程时间指数、路网流量非均匀指数2个交通运行状态指标,从路网拓扑结构与功能两方面对路网韧性进行综合评价.其次,对路网韧性等级进行划分,确定各评价指标在不同韧性等级的阈值,并基于逆向云发生器计算云参数特征值及确定度.随后,采用层次分析法和熵值法对指标进行组合赋权,通过加权平均得到不同韧性等级的隶属度,根据隶属度最大原则判定高速公路网韧性等级.最后,以某高速公路网为例进行实证研究,将所提出的组合赋权-云模型评价方法与综合模糊评价法进行对比.研究表明,二者的评价结果相近,但组合赋权-云模型评价方法克服了综合模糊评价法中随机性的缺陷,能更客观地反映路网的真实运行状态.

关键词:交通运输规划与管理;交通系统韧性;复杂网络;组合赋权;云模型;高速公路

中图分类号:U491

文献标志码:A

Evaluation of Traffic Resilience of Freeway Networks Based on Combined Weighting-Cloud Model

LI Jie¹, LIU Qiuqi¹, ZHANG Xinyu¹, WEI Yuanyuan², ZHANG Jingjing^{2†}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: In a pursuit to develop strategies to amplify the resilience of freeway networks, this paper introduces an evaluation method of road resilience based on the combined weighting-cloud model. First, four topological structure indicators were selected, namely structure entropy, edge betweenness, freeway network density, and clustering coefficient, as well as two traffic status indicators: the travel time index and the traffic heterogeneity index. The resilience of the freeway network was comprehensively evaluated based on the topological structure and traffic status indicators. Then, the resilience of the freeway network was graded, the boundary values of evaluation indicators at different resilience levels were determined, and the characteristic values and certainty of the cloud

* 收稿日期:2023-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878264), National Natural Science Foundation of China(51878264);湖南省科学技术厅重点研发项目(2022SK2096), Department of Science and Technology of Hunan Province(2022SK2096);河南省交通运输厅科技项目(2020G11), Department of Communications of Henan Province(2020G11)

作者简介:李洁(1972-),女,湖南株洲人,湖南大学副教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail: 214471852@qq.com

parameters were estimated based on the backward cloud generator. Afterward, the indicators were weighted by combining the analytic hierarchy process and the entropy method. The membership degrees of different resilience levels were determined by calculating the weighted average, and the resilience level of the freeway network was detected according to the maximum membership degree. Finally, a case study was made for a freeway network to compare the combined weighting-cloud model method proposed in this study with the comprehensive fuzzy method. It is indicated from the research that the evaluation results of the two methods are similar. In contrast, the combined weighting-cloud model method reflects the actual status of the freeway network more objectively because it is free from the defect of randomness, which is included in the latter method.

Key words: transportation planning and management; traffic resilience; complex networks; combined weighting; cloud model; freeway

韧性的概念最早由 Holling^[1]引入到生态系统的研究,随后在众多领域得到广泛关注和应用.2006年,Murray-Tuite^[2]首次将韧性概念引入交通运输系统中,基于交通特性提出韧性定义及其量化方法.此后,学者们从多方面研究与探讨交通系统的韧性特征与评价方法.

交通韧性是系统综合能力的表现,可通过拓扑指标、交通特性指标表征.Ip等^[3]基于复杂网络理论提出轨道系统可靠通道的韧性评价指标,根据该指标的加权平均值评估节点韧性,再以节点韧性加权总和量化路网韧性.Dunn等^[4]选择最大连通图、平均最短路径等拓扑指标评估航空网络的系统韧性.徐锦强等^[5]选择拓扑指标和交通指标对城市道路路网韧性进行综合评价,发现结合交通特性指标的路网韧性评价能更客观地反映路网实际性能.Bocchini等^[6]将总出行时间和出行距离作为系统性能指标,以实现道路网络韧性最大化为目标进行路网修复策略研究.Pratelli等^[7]以速度为道路交通性能指标,将韧性指数定义为随时间变化,实际速度面积和限速面积的比值.Omer等^[8]考虑出行时长、环境影响和出行成本3个因素对网络出行总时间的影响,以出行时间作为系统性能指标分析路网层面交通网络韧性.两类指标对交通韧性的表达各有侧重:拓扑指标是基于复杂网络理论,通过结构特性静态分析网络抵御、对抗冲击的能力;交通特性指标则表现了系统性能随时间的动态变化,可反映路网的韧性.

为提升和优化交通系统韧性,学者们针对不同交通扰动事件展开研究.Hsieh等^[9]对遭受自然灾害事件扰动的台湾高速公路网韧性进行评估.Begum

等^[10]从气候变化的视角提出区域公路网韧性提升的建议和评估标准.Xiao等^[11]探究地震灾害对交通基础设施破坏的程度.Chu等^[12]就如何提升易受地震影响的公路桥梁系统韧性进行了探讨.Zhu等^[13]针对飓风艾琳和桑迪的侵袭探讨纽约市交通基础设施系统的韧性.Kasmalkar等^[14]量化洪水对城市交通系统造成的破坏程度,以此提升城市交通系统的韧性.Bruyelle等^[15]在对城市轨道交通系统韧性的研究中考虑恐怖袭击事件的影响.Zhong等^[16]评估了遭受交通事故影响的广州机场高速公路的交通系统韧性.地震、飓风、恐怖袭击等是对交通系统造成巨大损失的极端事件,引起了较多学者的关注.

部分学者尝试从系统的角度对交通的日常扰动事件进行分析.Tang等^[17]从交通系统韧性的视角研究道路交通拥堵的治理策略.Almotahari等^[18]对构建的150个不同拓扑网络进行不同拥堵水平的测试,以筛选出最能表征网络韧性的指标,并在发生交通拥堵的城市路网进行实例验证.Khaghani等^[19]采用多维指标表征道路网络的韧性,利用加利福尼亚州洛杉矶主要高速公路数据分析路网在高峰时段对常发性交通拥堵的抵御能力.Testa等^[20]构建美国纽约高速公路网拓扑模型,选择平均节点度、聚类系数、中介中心性等拓扑指标为评价指标,分析随机移除节点或连线后路网的韧性.Zhang等^[21]利用北京和深圳GPS数据分析不同城市交通拥堵影响下道路网络韧性的特征和区别,为交通管理部门提供理论依据.Akbarzadeh等^[22]以伊朗伊斯法罕市的道路网为例,探讨交通流、节点中心性、节点重要度之间的关联性,为城市路网规划和交通管理提供重要依据.吕

彪等^[23]提出以日变交通配流为基础的城市路网韧性评估模型,使用路网效率和路网可达性等拓扑指标描述城市路网在扰动事件下的系统韧性.随着区域间出行需求不断增长,拥堵从城市道路逐渐蔓延到高速公路.尤其在节假日,局部交通流量短期内激增对高速公路造成进一步冲击^[24],进而影响交通系统韧性.由于高速公路具有一定的封闭性,交通流激增对路网造成的冲击在短时间内难以消散,如果高速公路网络系统韧性不足将导致系统性能迅速下降,影响社会经济的正常运转.对此,增强高速公路网的交通韧性,可以预防或减缓交通拥堵的发生,实现提升高速公路服务水平和降低出行成本的目的.

本文对节假日交通拥堵冲击下的高速公路网络交通韧性进行量化评估.首先,本文构建了高速公路网交通韧性评价指标体系,在选择指标时,考虑高速公路网结构特性的同时引入交通特性.其次,云模型广泛应用于各研究领域中的评价问题,可将不确定性问题进行定性和定量转换^[25-26].本文提出一种组合赋权-云模型的高速公路网韧性评价方法,以主观权值和客观权值对评价指标进行组合赋权,通过逆向云发生器得到各指标在不同等级区间内的确定度,根据综合确定度最大原则得到高速公路网韧性评价结果.最后,本文以某市高速公路网为例进行实证分析,通过交通调查数据、网络拓扑数据以及统计年鉴等数据对其路网韧性进行评价.本文通过将提出的评价方法与综合模糊评价法进行比较,验证了所提出的评价方法的合理性和有效性.

1 高速公路网韧性评价指标及分级

随着交通韧性研究的深入,韧性的具体定义在不同研究中存在一定差异,但韧性的内涵主要包含两方面:一是系统适应、吸收和抵抗冲击的能力,反映了交通的静态韧性;二是系统受到冲击后恢复到正常服务水平的能力,可反映交通的动态韧性.本文将高速公路网交通韧性定义为:高速公路网抵御交通流量的冲击,随着时间流逝能够恢复到正常运行水平的能力.

高速公路交通系统韧性评价指标的选取应当全面、客观,遵循独立性、不相关性以及可评价性等原则.当高速公路受到扰动时,韧性将受到两方面的影响:一方面,路网自身的结构特征能够适应并吸收部分交通流量,对系统韧性产生一定的影响;另一方面,交通特性反映了路网上的交通流数量和时空分

布,是短时间内路网韧性变化的重要因素.因此,高速公路网韧性的评价在采用路网拓扑结构相关指标的同时,还需考虑交通特性相关指标.

本文从路网结构韧性和功能韧性两方面出发,选取路网密度、行程时间指数等因素建立评价指标体系,并参考以往研究成果确定各指标的韧性等级.高速公路网韧性评价流程如图1所示.

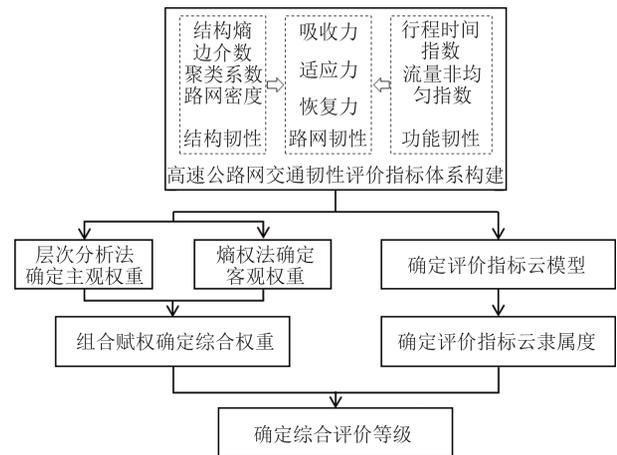


图1 高速公路网韧性评价流程

Fig.1 Freeway network resilience evaluation procedure

1.1 路网结构韧性指标

路网结构特性对交通韧性存在影响,且在短期内不随交通状态的改变发生变化.基于复杂网络理论,本文选取结构熵、边介数、聚类系数、路网密度4项指标,对路网的拓扑结构特征进行分析.

1.1.1 结构熵

熵的物理意义为体系混乱程度的度量,结构熵可量化网络结构的稳定程度从而反映体系所具备的抵抗能力.在交通系统中,路网结构熵越小,表明路网结构稳定性越差,所对应的结构韧性越差,表现为面临交通流量冲击时,路网难以抵抗和吸收,进而导致局部路段发生拥堵的概率增加.本文对高速公路交通系统节点分布特性进行研究,在节点拓扑指标的基础上计算路网的结构熵^[27],结构熵 E 的计算式如下:

$$E = - \sum_{i=1}^N I_i \ln I_i \quad (1)$$

式中: I_i 为第 i 个节点的重要度.

$$I_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^N k_i} \quad (2)$$

式中: k_i 为第 i 个节点的度值; N 为网络中节点的数量.

1.1.2 边介数

中介度反映了网络单元在网络中的枢纽性,分为节点介数和边介数^[28].边介数可反映单一路段在路网中的过渡性和衔接性,其值越大表示经过该路段的最短路径数越多.随着来自不同出行路径的流量不断增加,路段承受冲击的能力减弱,甚至发生局部交通拥堵,影响路网的综合运行效率,降低路网的韧性.边介数的计算公式表示为路网中所有节点对的最短路径中,经过该边路径的数目占最短路径总数的比例,具体如式(3)所示.

$$B_{cd} = \frac{2}{(N-1)(N-2)} \sum \frac{b_{icdj}}{b_{ij}} \quad (3)$$

式中: b_{ij} 表示节点 n_i 到节点 n_j 的所有最短路径数量; b_{icdj} 为节点 n_i 到节点 n_j 的所有最短路径中经过边 L_{cd} 的数量; $2/(N-1)(N-2)$ 为标准化公式.路网边介数即为路网中所有边介数的算数平均数.

1.1.3 聚类系数

聚类系数主要反映的是网络内部相邻节点之间联系程度的高低.所有节点的聚类系数平均值即为网络聚类系数 C ,可描述路网的聚集程度^[29]. C 越趋近1,意味着路网中节点聚集性越好,节点之间通达性越强,路网的韧性越强.当局部路段的交通流量过多时,聚集性较好的路网能够利用邻近节点的替代性资源分散交通流,避免发生拥堵或拥堵能够在短时间内疏散,路段恢复到正常的服务水平.节点和网络的聚类系数为:

$$C_i = \frac{M_i}{k_i(k_i-1)} \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (5)$$

式中: k_i 为第 i 个节点的度值,这些节点间存在的最大连线数为 $k_i(k_i-1)$; M_i 为实际存在的连线数.

1.1.4 路网密度

路网要求具有合适的规模,能够承受交通流的冲击,为出行者提供一定的出行服务水平.路网密度是进行交通评价常用的指标,密度越高的路网在面对流量冲击时可用于交通分流的路段越多,表现出更强的抵抗力和吸收力,路网具有较强的韧性.考虑到计算的简便性,高速公路路网密度可以用区域内高速公路里程数与区域面积的比值来表示,其计算式为:

$$v = \frac{d}{S} \quad (6)$$

式中: d 为研究区域高速公路网总里程; S 为行政区

划总面积.

1.2 路网功能韧性指标

高速公路交通流具有一定时空演变规律,交通状态的不同变化模式对路网韧性造成的冲击程度不同.在畅通状态下,交通流的缓慢增长对路网冲击较小,且在韧性可承受的范围内;随着交通流增加,流量的时空不均匀分布对路网的冲击进一步加剧,局部路段的拥堵会严重影响整个路网的韧性.考虑交通特性对路网功能韧性的影响,本文选择行程时间指数和路网流量非均匀指数作为路网功能韧性指标.

1.2.1 行程时间指数

行程时间指数(Travel Time Index, TTI)为得克萨斯州交通研究所使用的路网运行状态评价指标^[30-31],定义为出行实际行驶时间与自由流状态下行驶时间的比值,计算式如下:

$$TTI_{ij} = \frac{t_{ij}}{t_{ij}^{free}} \quad (7)$$

式中: t_{ij} 为出行实际行驶时间; t_{ij}^{free} 为自由流状态下行驶时间.

TTI是一个被广泛采用的交通运行状态评价指标,如高德地图^[32]和百度地图中所使用的拥堵延时指数即为行程时间指数.由式(7)可知,TTI值越大表示出行时间越长,路段越拥堵.当交通流持续进入路网时,路网的吸收力逐渐减小,抵抗力降低,交通系统韧性变弱.

1.2.2 路网流量非均匀指数

路网流量非均匀指数 F_{NE} 表示路网所有节点流量的非均衡度,而节点 i 在 t 时刻的流量均衡度 $F_i(t)$ 可通过与节点 i 相连接所有路段流量和路网中节点标准流量 $F_i^N(t)$ 的方差表征^[33]. F_{NE} 体现了路网中流量的分布情况.当交通流量过度集中于局部路段时,即使某些路段仍然畅通,但路网的整体韧性较差.

$F_{NE}(t)$ 计算流程为:

$$F_i^N(t) = \frac{Q_i(t)}{k_i} \quad (8)$$

式中: $Q_i(t)$ 为 t 时刻流入与流出节点 i 的交通流量总和; k_i 为节点 i 的度值,节点标准流量 $F_i^N(t)$ 为节点 i 的度平均交通量.

$$F_i(t) = \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} [Q_i^j(t) - F_i^N(t)]^2 \quad (9)$$

式中: $Q_i^j(t)$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 相连路段上下行的交通总量,而节点 i 在 t 时刻的流量均衡度 $F_i(t)$ 为各路段流量 $Q_i^j(t)$ 与标准流量 $F_i^N(t)$ 离差平方和的平

均值.

$$F_{NE}(t) = \frac{1}{N} \sum \left[F_i(t) - \frac{1}{N} F_i(t) \right]^2 \quad (10)$$

式中: $F_{NE}(t)$ 为 t 时刻的路网流量非均匀指数.

1.3 路网韧性等级划分

为更加科学地评价路网韧性, 本文参考相关研究成果并结合专家意见, 将路网韧性划分为 4 个等级, 即 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{强韧性, 较强韧性, 中韧性, 弱韧性}\}$. 各指标不同等级范围根据以往研究成果以及统计年鉴确定, 具体数值如表 1 所示.

表 1 韧性评价指标分级标准

Tab.1 Grading standard of resilience evaluation indicators

一级指标	二级指标	强韧性	较强韧性	中韧性	弱韧性
结构韧性	结构熵	[0.9, 1)	[0.4, 0.9)	[0.2, 0.4)	[0, 0.2)
	边介数	(0, 0.1]	(0.1, 0.4]	(0.4, 0.8]	(0.8, 1]
	聚类系数	[0.8, 1)	[0.4, 0.8)	[0.1, 0.4)	[0, 0.1)
	路网密度	[900, 1 800)	[500, 900)	[200, 500)	[0, 200)
功能韧性	TTI	[1, 1.5)	[1.5, 2)	[2, 4)	≥ 4
	F_{NE}	[0, 2)	[2, 4)	[4, 8)	[8, ∞)

由于各指标没有统一的纲量, 本文采用相对分析法确定指标范围. 针对路网密度这一指标, 本文利用我国各主要城市的《统计年鉴》中高速公路总里程和行政区域面积 2 个数据指标, 计算高速公路路网密度, 并以此为参考确定路网密度指标等级的边界值. 结构熵、边介数、聚类系数、路网流量非均匀指数 4 个指标可参考现有研究成果设定等级边界值^[27, 33-35]. 行程时间指数指标的等级边界值则参考高德地图拥堵延时指数范围确定^[32].

2 组合赋权-云模型评价模型

2.1 云模型理论

云模型由李德毅等^[36]提出, 适用于处理定性概念与定量数量之间不确定性转换. 在本研究中, 高速公路网交通韧性的分级为定性概念, 评价指标的取值为定量数据.

2.1.1 云模型的概念

设 U 为一个用精确数值表示的定量论域, D 为位于 U 上的定性概念, 若存在 $x \in U$ 且 x 为定性概念 D 的

一次随机实现, x 对 D 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 为具有稳定倾向的随机数^[35]: $\mu(x): U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$ 则 x 在论域 U 上的分布为隶属云, 即云模型, x 为一个云滴.

期望值 E_x 、熵值 E_n 、超熵值 H_e 是云模型的 3 个主要指标: 期望值 E_x 是云滴 4 个韧性评价等级对应的云分布中心值, 反映韧性评价指标的划分等级; 熵值 E_n 表示各评价等级的值域范围, 可反映评价过程中数据采集的随机性; 超熵值 H_e 是熵的不确定性度量, 表示某一评价等级的隶属度随机性大小, 揭示韧性评价过程中指标取值随机性与等级模糊性之间的关联程度. $Z = r_{ij}(E_{xij}, E_{nij}, H_{ej})$ 可整体表征云模型的定性概念 D , 即本研究中 6 项指标的韧性等级.

2.1.2 云发生器

云发生器是云模型中定性概念与定量数据之间相互转换的特定算法, 主要分为正向云发生器和逆向云发生器^[37]. 正向云发生器表示由定性概念到定量数据的转换过程, 逆向云发生器表示由定量数据到定性概念的转换过程. 本文主要通过逆向云发生器, 基于样本云滴数据计算云模型的 3 个数字特征, 实现韧性评价指标取值到韧性分级的转换^[38], 如图 2 所示.



图 2 逆向云发生器示意图

Fig.2 The schematic diagram of backward cloud generator

2.1.3 云模型特征值计算

通过逆向云发生器获取云模型特征值的算法有多种^[39], 本文参考以往应用在交通研究中的方法^[35]计算云模型的 3 个特征值. 当云滴所在的论域空间存在一个评价范围 $[C_{min}, C_{max}]$ 时, 云模型的期望值 E_x 计算式如下:

$$E_x = \frac{C_{max} + C_{min}}{2} \quad (11)$$

式中: C_{max} 、 C_{min} 分别对应等级区间的上限、下限边界值, 即阈值. 对于单边界的情况, 如 $[-\infty, C_{max}]$ 或 $[C_{min}, +\infty]$, 则依据评价指标具体实测值的上限或下限确定缺省边界.

熵值 E_n 的计算式为:

$$E_n = \frac{C_{max} - C_{min}}{2.355} \quad (12)$$

超熵值 H_e 将指标值 x 的随机性约束弱化为某种“泛正态分布”,是熵值 E_n 的不确定性度量,所以可根据 E_n 的大小为 H_e 取一个合适的常数,一般 $0.01 \leq H_e \leq 0.1$ [35].

2.2 组合赋权

高速公路网韧性评价指标体系包含了结构和功能两个方面的多项指标,各指标对韧性的影响不尽相同,需要进行合理赋权.权重的计算方法主要分为两大类:主观赋权法和客观赋权法.主观赋权法包括层次分析法、模糊综合评价法、专家意见法等.层次分析法是常用的主观赋权方法,通过业内专家将定性问题进行量化分析,使各指标权重结果更符合实际情况.由于业内专家的经验和个人偏好等主观因素影响,赋值过程中可能存在一定偏差,影响计算结果的客观性.熵值法是客观赋权法之一,根据数据的差异性确定各指标的重要程度,权重的确定比较客观,不受主观因素的影响.熵值法确定权重是基于各指标数据的差异,而忽略了不同指标之间的影响,导致最终结果可能与实际情况相违背.

为弥补单一赋权方法的不足,本文将层次分析法和熵值法相结合,利用式(13)计算韧性指标的综合权值.组合赋权将高速公路网韧性评价指标主客观权重的差异程度和重要程度相匹配,计算组合权重值,确保权重值贴合实际情况的同时减少人为因素的影响,提高评价结果的合理性和客观性.

$$\omega_i = \frac{\delta_i \times \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^6 (\delta_i \times \varepsilon_i)} \quad (13)$$

式中: ω_i 为韧性指标 i 的组合权重值, $i=1, 2, \dots, 6$; δ_i 为指标 i 主观权重值; ε_i 为指标 i 客观权重值.

2.3 评价模型

本文首先采用组合赋权法确定高速公路网 6 个韧性评价指标的权重,然后根据云模型理论建立高速公路网交通韧性的综合评价模型.具体步骤如下:

1) 根据上文选定的指标,建立交通系统韧性评价对象的指标集 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_6\}$,评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 及评价指标的组合权重集 $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_6\}$.

2) 运用逆向云发生器,基于评价集 V 生成相应的云参数矩阵: $Z = r_{ij}(E_{xij}, E_{nij}, H_{eij})$.

3) 利用云参数计算云模型的确定度 μ_{ij} :

$$\mu_{ij} = \exp \left[-\frac{(x_i - E_{xij})^2}{2E_{nij}^2} \right] \quad (14)$$

4) 将 w_i 和 μ_{ij} 加权平均计算高速公路网隶属各等级的综合确定度,根据综合确定度最大原则判定该路网的韧性等级:

$$\mu_j = \sum_i \omega_i \mu_{ij} \quad (15)$$

3 实例分析

3.1 高速公路基础数据

本文选取某市高速公路网作为评价对象进行实例研究,根据交通调查数据、路网拓扑数据、统计年鉴数据等,对高速公路网交通韧性指标进行计算.首先,本文选取 2020 年 5 月 1 日至 2020 年 5 月 4 日共 4 d 交通调查数据,在对数据进行校核和清洗后,计算进出各收费站的交通量.其次,基于复杂网络理论,路网拓扑模型的构建方法可分为 Space L、Space P、Space R [40-41].为更好地反映路网真实情况,最大限度地保留路网结构完整性,本文采用 Space L 方法构建某市高速公路拓扑路网模型:以收费站为节点 $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$,以收费站点之间连接的路段为连线 $E = \{e_{12}, e_{13}, e_{14}, \dots, e_{ij}\}$,以各收费站点之间的交通量作为拓扑模型的权重 $W = \{w_{12}, w_{13}, w_{14}, \dots, w_{ij}\}$.实际路网中,同一高速路段的同一收费站可能存在多个出入口,为简化模型,本文将同一收费站多个出入口视为同一节点.基于 OpenStreetMap 提供的某市高速公路网络矢量数据及 2020 年该市公路交通示意图,利用 ArcGIS、UCINET 等软件建立高速公路网络拓扑模型,经过处理获得 59 个收费站点和 368 条路段,如图 3 所示.

基于上述交通调查数据和路网拓扑数据,计算该市高速公路网从 5 月 1 日至 5 月 4 日每天的韧性评价指标和 4 d 的平均值,结果如表 2 所示.

3.2 路网韧性评价

组合赋权方法可弥补单一赋权方法的不足,使赋值结果更合理、准确.本文基于 3.1 节处理后的数据,分别采用层次分析法和熵值法计算各评价指标的主观和客观权重值,并按式(13)确定相应的组合权重值,如表 3 所示.

表 3 显示,聚类系数的组合权重值最大,为 0.268 5,说明该指标对路网韧性具有重要影响,路网

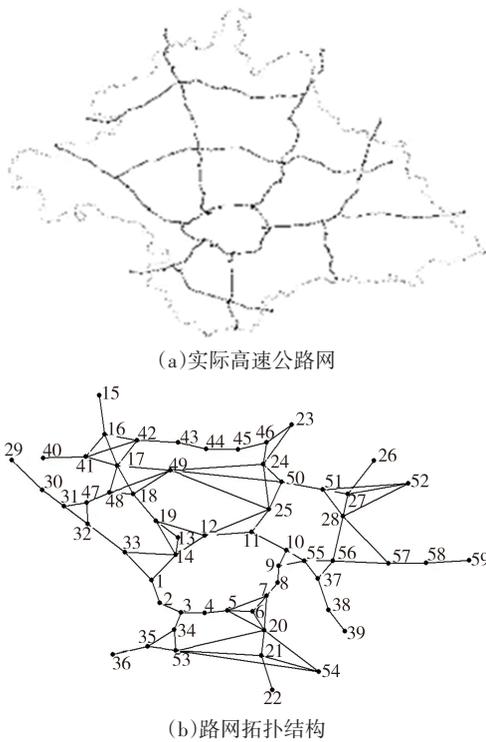


图3 某市高速公路网及其对应拓扑结构
Fig.3 The freeway network and its corresponding topological structure

内部相邻节点之间连接程度的提升是增强路网韧性的关键.在功能韧性指标中,路网流量非均匀指数的组合权重值较大,为0.204 5,表明交通流量在路网中是否均匀分布对路网韧性有重要影响.这一结果证

表2 某市高速公路网韧性评价指标

Tab.2 Resilience evaluation indicators of the freeway network

指标	5月1日	5月2日	5月3日	5月4日	4日平均
结构熵			0.929 1		
边介数			0.206 3		
聚类系数			0.378 0		
路网密度			485.520 0		
TTI	1.422 4	1.574 2	1.443 7	1.524 0	1.462 1
F_{NE}	6.148 1	6.737 6	7.969 0	5.906 1	6.690 2

表3 评价指标组合权重值

Tab.3 Combination weight values of evaluation indicators

评价指标	主观权重值	客观权重值	组合权重值
结构熵	0.109 1	0.108 5	0.068 3
边介数	0.165 1	0.165 2	0.157 8
聚类系数	0.202 2	0.229 5	0.268 5
路网密度	0.166 6	0.181 5	0.175 0
TTI	0.155 6	0.139 8	0.125 9
F_{NE}	0.201 4	0.175 5	0.204 5

明管理者可通过一定的管控措施(如限行、引流等)来缓解扰动对交通系统韧性的冲击.

基于表2路网韧性评价指标的实际值及式(11)、式(12),利用逆向云发生器算法计算6项评价指标隶属各韧性等级云模型的特征值,计算结果如表4所示.

表4 韧性评价指标云模型特征值

Tab.4 Cloud model characteristics values of resilience evaluation indicators

评价指标	强韧性	较强韧性	中韧性	弱韧性
结构熵	(0.95,0.04,0.01)	(0.65,0.21,0.03)	(0.30,0.08,0.02)	(0.10,0.08,0.02)
边介数	(0.05,0.04,0.01)	(0.25,0.13,0.02)	(0.60,0.17,0.02)	(0.90,0.08,0.01)
聚类系数	(0.90,0.08,0.01)	(0.60,0.17,0.03)	(0.25,0.13,0.02)	(0.05,0.04,0.01)
路网密度	(1450,467.09,0.1)	(700,169.85,0.08)	(350,127.39,0.06)	(100,84.93,0.05)
TTI	(1.25,0.21,0.02)	(1.75,0.21,0.02)	(3.00,0.85,0.04)	(4.27,0.23,0.02)
F_{NE}	(1.00,0.85,0.01)	(3.00,0.85,0.02)	(6.00,1.70,0.02)	(11.87,3.29,0.02)

本文根据表4云模型的特征值,通过MATLAB软件运用云正向发生器算法绘制各韧性评价指标的标准云图,如图4所示.

由图4(c)可知,当确定度为0.6时,强韧性等级集中分布在[0.82,0.99],较强韧性等级集中分布在[0.37,0.75],中韧性等级集中分布在[0.10,0.38],弱韧性等级集中分布在[0.02,0.09].

基于表2的韧性评价指标实际值和表4的指标云模型特征值,利用式(14)计算不同评价指标隶属各级别的确定度,结果见表5.

基于表3和表5的结果,利用式(15)计算5月1日至5月4日每天及这4d平均的高速公路网韧性隶属各韧性等级的综合确定度,最终评价结果见表6.

由表6可知,高速公路网在5月1日至5月4日这4d平均的韧性等级为中韧性,说明假期出行需求大,交通流冲击对路网韧性产生较大影响.单日路网韧性评价结果表明,假期大部分时间路网韧性都处于中韧性状态.由于假期免收高速公路费的影响,所以交通系统受到冲击较大,路网交通分布最不均匀,路网韧性评价结果均为中韧性;而在处于假期中段

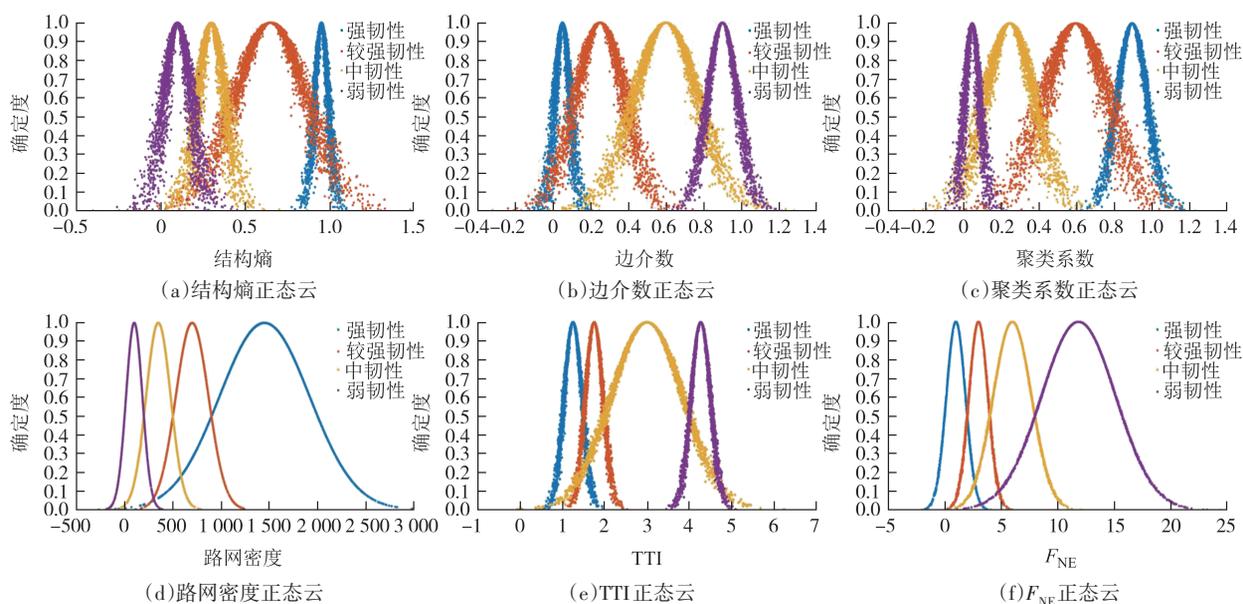


图 4 韧性评价指标云图

Fig.4 Cloud images of resilience evaluation indicators

表 5 评价指标级别确定度

Tab.5 The certainty of the evaluation indicators at each level

评价指标	时间	强韧性	较强韧性	中韧性	弱韧性
结构熵		0.872 6	0.413 4	0.000 0	0.000 0
边介数		0.000 5	0.945 0	0.068 4	0.000 0
聚类系数		0.000 0	0.426 3	0.615 9	0.000 0
路网密度		0.077 4	0.450 6	0.567 9	0.000 0
TTI	5月1日	0.713 8	0.296 2	0.178 7	0.000 0
	5月2日	0.303 7	0.704 5	0.244 9	0.000 0
	5月3日	0.653 6	0.345 1	0.187 1	0.000 0
	4日平均	0.427 0	0.560 3	0.221 4	0.000 0
F _{NE}	5月1日	0.000 0	0.001 1	0.996 2	0.220 0
	5月2日	0.000 0	0.000 1	0.910 2	0.295 7
	5月3日	0.000 0	0.000 0	0.511 3	0.494 6
	5月4日	0.000 0	0.002 9	0.998 5	0.193 1
	4日平均	0.000 0	0.000 1	0.920 9	0.289 1

表 6 高速公路网韧性评价结果

Tab.6 Freeway network resilience evaluation results

时间	综合确定度				评价结果
	强韧性	较强韧性	中韧性	弱韧性	
5月1日	0.163 1	0.408 2	0.501 7	0.045 0	中韧性
5月2日	0.111 5	0.459 4	0.492 5	0.060 5	中韧性
5月3日	0.155 5	0.414 1	0.403 6	0.101 1	较强韧性
5月4日	0.127 0	0.441 8	0.507 6	0.039 5	中韧性
4日平均	0.148 8	0.419 9	0.488 3	0.059 1	中韧性

的5月3日,出行者出行需求相对降低,故而呈现较强韧性.

本文为进一步探究路网韧性的变化,对5月1日和5月3日的小时交通流数据进行分析,利用上述研究方法分别对单日每小时的路网交通韧性进行评价,最终评价结果如图5所示.

图5中,横轴表示时间,以小时为单位将一天的交通流进行划分,纵轴表示韧性评价结果,值越大则表示路网交通韧性越强.由图5可知,5月1日该市高速公路网长时间处于中韧性的状态.假期开始的第1d,大多数出行者都在前往目的地路途中,路网

中交通流量大且短时间内难以消散,这一冲击对路网韧性造成持续性的影响.5月3日出行需求减少,这一天的高速公路网在短时间内进行调节后,路网可恢复到较强韧性的状态,甚至在凌晨时分路网处于强韧性状态.

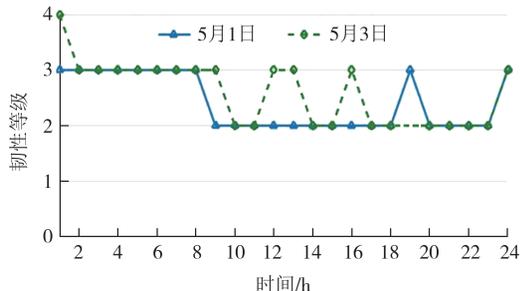


图 5 以小时划分的高速公路网韧性评价结果

Fig.5 Hourly resilience evaluation results of the freeway network

3.3 评价方法对比

为验证本文高速公路网韧性评价模型的合理性和有效性,研究选用综合模糊评价法^[42]与所提出的

组合赋权评价法进行对比. 综合模糊评价方法采用梯形函数构建高速公路网韧性评价指标的隶属度函数, 通过绘制归一化指标“累计频率曲线”, 将 20%、40%、70% 和 90% 的曲线值作为划分韧性 4 个等级的阈值. 各指标隶属度矩阵与前文熵值法的客观权重相乘, 得到综合评价矩阵 P , 对各指标进行赋值计算综合韧性得分 r . 最终评价结果如表 7 所示.

$$P = (0.108\ 4, 0.165\ 2, 0.229\ 5, 0.181\ 5, 0.139\ 8, 0.175\ 5) \cdot \begin{pmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{i1} & \cdots & u_{ij} \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$r = P \cdot [15, 50, 70, 90]^T \quad (17)$$

由表 7 可知, 2 种方法的评价结果大部分都相同, 综合模糊评价法将 5 月 3 日单日的路网韧性判定为中韧性, 这是由于综合模糊评价的结果会随着隶属度函数的变化而改变, 最终评价结果也不同. 本文考虑到交通流量和出行时间的随机性和模糊性, 采用云模型方法评价高速公路网的交通韧性. 云模型方法将韧性等级定性概念转化为云特征参数, 并利用云模型算法原理计算隶属度函数, 弥补了隶属度函数不一致的缺陷, 进一步增加了韧性评价结果的可靠性, 使得结果更加客观地反映高速公路网的整体运行状态.

表 7 评价方法结果对比

Tab.7 Comparison of the evaluation results of different methods

时间	综合模糊评价		本文评价结果
	总得分	评价结果	
5月1日	49.177 0	中韧性	中韧性
5月2日	47.756 2	中韧性	中韧性
5月3日	49.201 7	中韧性	较强韧性
5月4日	48.667 5	中韧性	中韧性
4日平均	48.847 6	中韧性	中韧性

4 总结

针对高速公路节假日的拥堵问题, 本文从系统韧性的角度进行探讨, 在提升交通韧性的同时能够实现交通拥堵的有效治理. 本研究提出通过组合赋权-云模型的方法对高速公路网韧性进行评价, 并以某市 2020 年 5 月 1 日至 5 月 4 日的高速公路数据进行实证研究, 得到以下主要研究结论:

1) 本文关注高速公路网结构对交通韧性的静态影响, 同时考虑不同交通状态造成的冲击对路网韧

性的动态影响, 选取结构熵、边介数、聚类系数、路网密度 4 个结构韧性指标和行程时间指数、路网流量非均匀指数 2 个功能韧性指标, 构建高速公路网韧性评价指标体系; 综合采用层次分析法和熵值法对各指标进行组合赋权, 发现 6 个评价指标中的聚类系数对韧性的影响最大; 在路网功能韧性中, 路网流量非均匀指数对路网韧性的权重较大, 说明路网流量分布均匀性是路网韧性短期变化的重要影响因素.

2) 本文采用组合赋权-云模型对高速公路网韧性进行评价. 通过主客观结合赋权的方法计算各评价指标的组合权值, 避免了以往研究中单一赋权方法的不足, 确保指标权重的合理和有效性. 采用云模型对路网韧性进行评价, 实现定量数值与定性概念之间相互转换, 在一定程度上克服了路网韧性评价过程中的不确定性和模糊性.

3) 本文基于某市 2020 年 5 月 1 日至 5 月 4 日交通调查数据和路网拓扑数据对高速公路网韧性进行评价. 4 d 平均及每日的评价结果显示, 除 5 月 3 日的路网韧性被判定为较强韧性外, 其他评价结果均为中韧性; 从 5 月 1 日和 5 月 3 日每小时的路网韧性评价结果来看, 5 月 1 日的高速公路受到交通流冲击大, 路网韧性评价结果大部分都为中韧性, 5 月 3 日路网则在不同时间分别表现出强韧性、较强韧性、中韧性 3 种结果. 此外, 为验证本评价模型的合理性和有效性, 将其与经典综合模糊评价方法进行对比, 发现评价结果基本一致, 且进一步验证了所提方法更贴近实际情况.

随着区域出行需求的增加, 高速公路拥堵问题愈发严重. 本文从交通韧性的新角度展开研究, 考虑交通流量对高速公路路网整体的影响, 对遭受交通拥堵事件扰动的高速公路网韧性进行评价. 本文的研究为解决高速公路拥堵问题提供了新的研究方向, 具有理论意义和实际意义. 未来还可从几个方面完善高速公路网韧性的研究: 对于评价指标体系, 可构建多维韧性评价指标, 结合天气、道路条件等多个影响因素, 分析交通拥堵事件下的高速公路韧性; 对于云模型韧性等级的划分标准, 可通过交通实际大数据计算分析各等级的边界值, 提高路网韧性评价结果的精确性和客观性; 对于节假日路网韧性的评价, 本文仅以 5 月 1 日至 5 月 4 日假期整体的交通状况对路网韧性进行评价, 可对不同假期不同时间路网韧性的特性进行分析和比较, 以此提出更具体的改善措施或管理策略.

参考文献

- [1] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [2] 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*. Monterey:IEEE, 2006: 1398-1405.
- [3] IP W H, WANG D W. Resilience and friability of transportation networks: evaluation, analysis and optimization [J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5(2): 189-198.
- [4] DUNN S, WILKINSON S M. Increasing the resilience of air traffic networks using a network graph theory approach [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 90: 39-50.
- [5] 徐锦强, 李林, 岳小泉. 基于网络拓扑及交通特性的城市路网弹性评价[J]. *华东交通大学学报*, 2020, 37(3): 52-59.
- XU J Q, LI L, YUE X Q. Evaluation of road network resilience based on network topology and traffic characteristics [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2020, 37(3): 52-59. (in Chinese)
- [6] BOCCHINI P, FRANGOPOL D M. Restoration of bridge networks after an earthquake: multicriteria intervention optimization [J]. *Earthquake Spectra*, 2012, 28(2): 427-455.
- [7] PRATELLI A, LEANDRI P, AIELLO R, et al. Intersection redesign for network resilience and safety [J]. *Promet-Traffic & Transportation*, 2021, 33(2): 297-308.
- [8] OMER M, MOSTASHARI A, NILCHIANI R. Measuring the resiliency of the Manhattan points of entry in the face of severe disruption [J]. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2011, 4(1): 153-161.
- [9] HSIEH C H, FENG C M. The highway resilience and vulnerability in Taiwan [J]. *Transport Policy*, 2020, 87: 1-9.
- [10] BEGUM S, FISHER R S, FERRANTI E J S, et al. Evaluation of climate change resilience of urban road network strategies [J]. *Infrastructures*, 2022, 7(11): 146.
- [11] XIAO Y H, ZHAO X D, WU Y P, et al. Seismic resilience assessment of urban interdependent lifeline networks [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 218: 108164.
- [12] CHU J C, CHEN S C. Optimization of transportation-infrastructure-system protection considering weighted connectivity reliability [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2016, 22(1): 04015008.
- [13] ZHU Y, XIE K, OZBAY K, et al. Data-driven spatial modeling for quantifying networkwide resilience in the aftermath of hurricanes irene and sandy [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 2604(1): 9-18.
- [14] KASMALKAR I G, SERAFIN K A, SUCKALE J. Integrating urban traffic models with coastal flood maps to quantify the resilience of traffic systems to episodic coastal flooding [J]. *MethodsX*, 2021, 8: 101483.
- [15] BRUYELLE J L, O' NEILL C, EL-KOURSI E M, et al. Improving the resilience of metro vehicle and passengers for an effective emergency response to terrorist attacks [J]. *Safety Science*, 2014, 62: 37-45.
- [16] ZHONG R X, XIE X X, LUO J C, et al. Modeling double time-scale travel time processes with application to assessing the resilience of transportation systems [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 132: 228-248.
- [17] TANG J Q, HEINIMANN H R. A resilience-oriented approach for quantitatively assessing recurrent spatial-temporal congestion on urban roads [J]. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0190616.
- [18] ALMOTAHARI A, YAZICI A. Practice friendly metric for identification of critical links in road networks [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2020, 2674(8): 219-229.
- [19] KHAGHANI F, JAZIZADEH F. mD-resilience: a multi-dimensional approach for resilience-based performance assessment in urban transportation [J]. *Sustainability*, 2020, 12(12): 4879.
- [20] TESTA A C, FURTADO M N, ALIPOUR A. Resilience of coastal transportation networks faced with extreme climatic events [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2015, 2532(1): 29-36.
- [21] ZHANG L M, ZENG G W, LI D Q, et al. Scale-free resilience of real traffic jams [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(18): 8673-8678.
- [22] AKBARZADEH M, MEMARMONTAZERIN S, DERRIBLE S, et al. The role of travel demand and network centrality on the connectivity and resilience of an urban street system [J]. *Transportation*, 2019, 46(4): 1127-1141.
- [23] 吕彪, 高自强, 管心怡, 等. 基于日变交通配流的城市道路网络韧性评估 [J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(6): 1181-1190.
- LÜ B, GAO Z Q, GUAN X Y, et al. Resilience assessment of urban road network based on day-to-day traffic assignment [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(6): 1181-1190. (in Chinese)
- [24] 郭瑞军, 于景, 孙晓亮, 等. 基于电子收费数据的高速公路交通流特性分析 [J]. *大连交通大学学报*, 2018, 39(1): 17-22.
- GUO R J, YU J, SUN X L, et al. Analysis on traffic flow character of expressway based on electric charge data [J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2018, 39(1): 17-22. (in Chinese)
- [25] 王瑛, 蒋晓东, 张璐. 基于改进的 CRITIC 法和云模型的科技奖励评价研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(4): 118-124.
- WANG Y, JIANG X D, ZHANG L. Research on the evaluation of science and technological awards based on improved CRITIC method and cloud model [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2014, 41(4): 118-124. (in Chinese)
- [26] 叶琼, 李绍稳, 张友华, 等. 云模型及应用综述 [J]. *计算机工程与设计*, 2011, 32(12): 4198-4201.

- YE Q, LI S W, ZHANG Y H, et al. Cloud model and application overview [J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, 32(12): 4198-4201. (in Chinese)
- [27] 谭跃进, 吴俊. 网络结构熵及其在非标度网络中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(6): 1-3.
- TAN Y J, WU J. Network structure entropy and its application to scale-free networks [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2004, 24(6): 1-3. (in Chinese)
- [28] FREEMAN L C. Centrality in social networks conceptual clarification [J]. *Social Networks*, 1978, 1(3): 215-239.
- [29] 李聪颖, 马荣国, 王玉萍, 等. 城市慢行交通网络特性与结构分析[J]. *交通运输工程学报*, 2011, 11(2): 72-78.
- LI C Y, MA R G, WANG Y P, et al. Characteristics and structure analysis of urban slow mode traffic network [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(2): 72-78. (in Chinese)
- [30] 张溪, 刘建军, 周天, 等. 基于行程时间比指数的街道级交通运行特征研究[J]. *交通工程*, 2018, 18(6): 8-15.
- ZHANG X, LIU J J, ZHOU T, et al. Study on community-level traffic operation characteristics based on travel time ratio index [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2018, 18(6): 8-15. (in Chinese)
- [31] PÉREZ-GONZÁLEZ C M, MORENO-QUINTERO E, PIÑA-BARCENA J, et al. Measurement of travel time reliability of road transportation using GPS data: a freight fluidity approach [J]. *Transportation Research Part A*, 2019, 130: 240-288.
- [32] 张建旭, 郭力玮. 基于在线地图交通态势分析的路网拥堵状态识别[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(5): 75-81.
- ZHANG J X, GUO L W. Congestion status recognition of road network based on traffic situation analysis of online map [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(5): 75-81. (in Chinese)
- [33] 张庆. 高速公路网结构动态评价及系统实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- ZHANG Q. Dynamic evaluation of highway network structure and system implementation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [34] 赵月, 杜文, 陈爽. 复杂网络理论在城市交通网络分析中的应用[J]. *城市交通*, 2009, 7(1): 57-65.
- ZHAO Y, DU W, CHEN S. Application of complex network theory to urban transportation network analysis [J]. *Urban Transport of China*, 2009, 7(1): 57-65. (in Chinese)
- [35] 纪柯柯, 陈坚, 吴改选, 等. 基于组合赋权:云模型的高速公路路网交通适应性评价[J]. *公路*, 2021, 66(3): 193-200.
- JI K K, CHEN J, WU G X, et al. Traffic adaptability evaluation of expressway network based on combined weighting-cloud model [J]. *Highway*, 2021, 66(3): 193-200. (in Chinese)
- [36] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. *计算机研究与发展*, 1995, 32(6): 15-20.
- LI D Y, MENG H J, SHI X M. Membership clouds and membership cloud generators [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 1995, 32(6): 15-20. (in Chinese)
- [37] 贺德强, 柳国强, 陈彦君, 等. 基于正态云模型和模糊层次分析法的列车通信网络性能评估方法[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(2): 310-320.
- HE D Q, LIU G Q, CHEN Y J, et al. Evaluation method of train communication network performance based on normal cloud model and fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(2): 310-320. (in Chinese)
- [38] 吕辉军, 王晔, 李德毅, 等. 逆向云在定性评价中的应用[J]. *计算机学报*, 2003, 26(8): 1009-1014.
- LÜ H J, WANG Y, LI D Y, et al. The application of backward cloud in qualitative evaluation [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(8): 1009-1014. (in Chinese)
- [39] 曾凯. 基于云模型的市域铁路公交化运营评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- ZENG K. Research on evaluation of regional railway public transit operation based on cloud model [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [40] SIENKIEWICZ J, HOŁYST J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland [J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 72(4): 046127.
- [41] HOŁYST J A, SIENKIEWICZ J, FRONCZAK A, et al. Universal scaling of distances in complex networks [J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 72(2): 026108.
- [42] 陈思妤, 李洁, 胡演诚, 等. 面向常发性拥堵的城市局部路网韧性评价与分析[J]. *交通信息与安全*, 2022, 40(4): 138-147.
- CHEN S Y, LI J, HU Y C, et al. An evaluation and analysis on the resilience of the urban local road network for recurrent congestions [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2022, 40(4): 138-147. (in Chinese)