

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.06.020

# 考虑出行阻抗的城市群综合客运网络可达性

李成兵<sup>\*1</sup>, 吴鹏<sup>2</sup>, 李云飞<sup>2</sup>

(1. 内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

**摘要:** 为阐明城市群综合客运交通网络的多层空间结构并丰富网络的功能属性, 以耦合这一全新视角提出考虑城市交通换乘的城市群综合客运网络模型, 并从出行费用与出行时间出发分析节点与网络的可达性。首先, 基于复杂网络理论 Space-P 建模方法, 将城市群中的客运站点抽象为网络中的节点并进行编号, 以票价与出行时间标定边权, 分别构建公路客运子网、铁路客运子网。其次, 划设城市群中的各城市中心城区为独立的交通小区, 将有城市公共交通、步行等换乘方式连接的节点间添加耦合边, 构建耦合子网。再次, 将两类客运子网通过耦合子网组合叠加作为综合网络, 改进传统网络效率指标, 构建加权的阻抗效率指标评估节点与网络的阻抗可达性。最后, 以成渝城市群为实例研究, 构建成渝城市群综合客运网络并分析公路、铁路、综合网络的阻抗可达性。结果表明: 多个节点的耦合使得这些节点的阻抗可达性较好, 因此在研究城市群综合客运交通网络时, 城市交通换乘是不可忽略的因素; 综合网络的阻抗可达性相较于公路子网、铁路子网分别提升了 83.4%, 28.5%, 公路与铁路客运子网的耦合提高了城市群客运交通网络的阻抗可达性; 推进站点间、多种运输方式间的耦合协调, 继而构建更加便捷顺畅的城市群综合客运交通网络, 是降低旅客的出行成本的重要途径。

**关键词:** 智能交通; 交通可达性; 复杂网络; 城市群; 多模式交通网络; 出行阻抗

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 06-0182-08

## Accessibility of Integrated Passenger Transport Network for Urban Agglomeration Considering Travel Impedance

LI Cheng-bing<sup>\*1</sup>, WU Peng<sup>2</sup>, LI Yun-fei<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia 010070, China;

2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to clarify the multi-layer spatial structure of integrated passenger transport network for urban agglomeration and enrich its functional attributes, a new model of integrated passenger transport network for urban agglomeration considering urban transport transfer is proposed from a new perspective of coupling, and the accessibility of nodes and networks is analyzed from the perspective of travel cost and travel time. Firstly, the highway subnet and the railway subnet are constructed based on Space-P modeling method of complex network theory. The passenger stations in the urban agglomeration are abstracted as nodes in the network and numbered, and the edge weights are calibrated by travel fare and time. Secondly, the central urban area of each city in the urban agglomeration is designated as a traffic district, and coupling edges are added among nodes connected by urban public transport, walking or other transfer modes to build coupling subnets. Subsequently, the highway and railway subnets are combined into the integrated network by coupling subnets, and the traditional network efficiency indicator is improved to construct a weighted impedance efficiency indicator to evaluate the impedance accessibility of nodes and networks. Finally, taking Chengdu-

收稿日期: 2022-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62063023); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目 (NJYT22099)

作者简介 (\* 通讯作者): 李成兵 (1982-), 男, 安徽安庆人, 博士, 教授. (bingbingnihao2008@126.com)

Chongqing urban agglomeration as a case study, the result shows that (1) the coupling of multiple nodes makes the impedance accessibility of nodes better, therefore, urban transport transfer is an important factor in the study of integrated passenger transport network for urban agglomeration; (2) compared with the highway subnet and the railway subnet, the impedance accessibility of the integrated network is improved by 83.4% and 28.5% respectively, indicating that the coupling of highway and railway passenger subnets improves the impedance accessibility of urban agglomeration passenger transport network; (3) it is an important way to reduce the travel cost and time for passengers to promote the coupling and coordination among stations or among multiple transportation modes, and then build a more convenient integrated passenger transport network in urban agglomeration.

**Key words:** ITS; traffic accessibility; complex network; urban agglomeration; multimodal transport network; travel impedance

## 0 引言

《交通强国建设纲要》明确指出,要构建便捷顺畅的城市群一体化交通网,为交通强国建设奠定坚实基础。随着我国经济社会发展以及城市化水平的加快,城市群作为区域人口、经济、产业的主要聚集地,内部城市与城市之间的交往日趋频繁,人们迫切需要一个可达性较好、出行成本较低的城市群客运交通网络。为此,构建更加贴近实际的城市群综合客运网络模型并研究网络的阻抗可达性,提高城际出行的便捷性,助力区域经济社会发展。

目前,复杂网络理论在交通运输网络中的应用极为广泛。例如,Candelieri等<sup>[1]</sup>基于图论拓扑方法,对公共交通网络进行建模并分析其脆弱性;王国娟等<sup>[2]</sup>基于Space-L建模方法构建城市公交网络模型,研究站点失效后的绕行优化方案;路庆昌等<sup>[3]</sup>在轨道交通网络拓扑结构基础上,考虑实际客流、用户出行时间、公交接驳率,评估地铁网络脆弱性;冯霞等<sup>[4]</sup>构建无向加权航空网络模型,分析我国航空网络的拓扑结构以及节点与边失效情况下的鲁棒性;卫振林等<sup>[5]</sup>构建城市道路交通网络与城市轨道交通网络组合的城市复合交通网络模型,分析网络的可达特性。相关研究主要集中在城市公交、轨道交通、城市道路、航空网络等,研究较为丰富。

一些学者也将复杂网络理论运用到城市群客运交通网络。戴晓峰等<sup>[6]</sup>基于复杂网络理论建立城市群公路客运网络空间结构提取方法。李成兵等<sup>[7]</sup>以复合的视角将城市群公路交通网络与铁路交通网络叠加形成城市群复合交通网络并分析其拓扑结构。但该复合方法忽略了城市交通换乘耦合所带来的影响。不仅如此,一些学者在网络拓扑空间结构基础上不断深入,进而考虑网络的功能属性。例如,毛

剑楠等<sup>[8]</sup>提出了一种考虑基础经济属性、网络拓扑属性、城市联系强度属性3方面特性的城市群综合节点重要度计算方法;李成兵等<sup>[9]</sup>基于实际客流改进负载分配模型评估城市群复合交通网络抗毁性;Zhang等<sup>[10]</sup>从可持续角度出发评价京津冀城市群交通网络的经济、社会、生态影响;郭珂歆等<sup>[11]</sup>基于空间句法对北部湾城市群路网拓扑性和节点城市交通控制力强度进行多尺度形式一体化评价。对于网络结构属性与功能属性研究的不足,一些学者提出了一些展望。肖宏伟等<sup>[12]</sup>探讨了城际客运网络的属性影响要素,认为“属性指标”与“网络指标”有待进一步连接。关伟等<sup>[13]</sup>认为需要加强对综合交通运输网络系统工程的理论与方法论体系的研究,多层综合交通网络结构复杂特性是交通运输网络系统工程的重要研究领域之一。

在交通运输网络的可达性评估方面,Koenig<sup>[14]</sup>认为可达性是指在某一交通系统中,到达某地的难易程度;Aklilu等<sup>[15]</sup>采用空间数据对应的斯亚贝巴轻轨的可达性进行了分析;Wang等<sup>[16]</sup>采用成本加权距离法计算了中国各县(市、区)的空间可达性,并探讨了交通可达性与人口聚集的关系。在城市群客运交通网络可达性评估方面,宗会明等<sup>[17]</sup>采用加权平均出行时间、经济潜力指数等指标,分析高铁对成渝城市群县域可达性的影响;徐明非等<sup>[18]</sup>从出行时间角度出发给出公路交通以及公路衔接其他交通方式下的城市群可达性测算方法;洪东方等<sup>[19]</sup>利用加权平均旅行时间与可达性系数衡量区域交通网络的可达性。这些研究中,节点的可达性值表示该节点到其他所有节点的最短距离或最短时间的平均值,这与复杂网络理论中的网络效率指标相似并成反比关系。并且这些研究大多基于距离、时间、人口、经济等因素,极少考虑费用因素。部分研究是

对城市间的可达性进行分析,并未构建更加细致的客运交通网络。

综上所述,城市群综合客运交通网络的多层空间结构研究并不完善,城市群复合交通网络模型未考虑城市交通换乘耦合所带来的影响,对城市群综合客运网络的结构属性与可达性分析有待深入,考虑的功能属性有待进一步丰富。因此,以耦合的视角,建立客运子网与耦合子网多层组合的城市群综合客运网络模型,更加贴近实际情况;考虑城际出行时间与出行费用,从更加丰富的网络功能属性出发评估城市群综合客运网络的阻抗可达性。

## 1 城市群综合客运网络模型

### 1.1 客运子网

将城市群中的长途汽车客运站抽象为网络中的节点并进行编号,构建公路客运子网的节点编号集合  $V_1 = \{1, 2, 3, \dots, n_1\}$ ,  $n_1$  为公路客运节点数。采用 Space-P 建模方法<sup>[20]</sup>,两站点间若能购买到直达车票,则存在一条连边。构建公路子网邻接矩阵  $B = (b_{ij})_{n_1 \times n_1}$ ,若节点  $i, j$  间有直达车票,则  $b_{ij} = 1$ ,若无,则  $b_{ij} = 0$ 。对邻接矩阵进行加权,记录两站点间的最低票价,构建公路子网票价矩阵  $B^{\text{fare}} = (b_{ij}^{\text{fare}})_{n_1 \times n_1}$ 。由于公路客运的具体行程时间难以查询,因此根据站间距离与车速测算站点间的出行时间,构建公路子网时间矩阵  $B^{\text{time}} = (b_{ij}^{\text{time}})_{n_1 \times n_1}$ 。将票价矩阵或时间矩阵作为边权矩阵即加权的邻接矩阵。

将城市群中办理客运业务的火车站抽象为网络中的节点并进行编号,构建铁路客运子网节点编号集合  $V_2 = \{n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n\}$ ,  $n$  为公路与铁路客运节点总数,铁路客运节点数  $n_2 = n - n_1$ 。采用 Space-P 建模方法,构建铁路子网邻接矩阵  $T = (t_{ij})_{n_2 \times n_2}$ ,若节点  $i, j$  间能购买到直达车票,则  $t_{ij} = 1$ ,若否,则  $t_{ij} = 0$ 。对邻接矩阵进行加权,记录两站点间的最低票价与最短出行时间,分别构建铁路子网票价矩阵  $T^{\text{fare}} = (t_{ij}^{\text{fare}})_{n_2 \times n_2}$  与铁路子网时间矩阵  $T^{\text{time}} = (t_{ij}^{\text{time}})_{n_2 \times n_2}$ ,将其分别作为边权矩阵即加权的邻接矩阵。

### 1.2 耦合子网

耦合边是指不同运输方式站点间进行客流传递的连边,为区分城际运输和城市运输,赋予耦合边新的定义:城际运输站点间通过城市交通进行客流传递的连边。城市群内部包含诸多城市,由于城市公共交通的存在,例如公交、地铁、出租车等,在城市中心城区中的各城际客运站具有明显的城市公

共交通换乘关系。考虑到城市公共交通、步行等换乘方式所带来的影响,将各城市中心城区划设为多个独立的交通小区。各交通小区中的节点两两间添加耦合边,互为耦合关联节点,构建多运输方式全耦合衔接客运子网,简称耦合子网。构建耦合子网邻接矩阵  $O = (o_{ij})_{n \times n}$ ,若节点  $i, j$  间可以通过城市交通、步行等方式换乘,则  $o_{ij} = 1$ ,若否,则  $o_{ij} = 0$ 。对邻接矩阵进行加权,记录站点间的最低换乘票价与最短换乘时间,分别构建耦合子网票价矩阵  $O^{\text{fare}} = (o_{ij}^{\text{fare}})_{n \times n}$  与耦合子网时间矩阵  $O^{\text{time}} = (o_{ij}^{\text{time}})_{n \times n}$ 。

### 1.3 综合网络

将公路子网、铁路子网、耦合子网组合叠加,构建综合网络节点编号集合  $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ ,其中  $n$  为公路与铁路客运节点总数即综合网络节点数。将公路子网邻接矩阵  $B$ 、铁路子网邻接矩阵  $T$ 、耦合子网邻接矩阵  $O$  组合叠加为综合网络邻接矩阵  $Z = (z_{ij})_{n \times n}$ ,用于表示综合网络的拓扑结构。对综合网络的邻接矩阵进行加权,将公路子网、铁路子网、耦合子网的票价矩阵或时间矩阵组合叠加,生成综合网络票价矩阵  $W^{\text{fare}} = (w_{ij}^{\text{fare}})_{n \times n}$  与时间矩阵  $W^{\text{time}} = (w_{ij}^{\text{time}})_{n \times n}$ 。将各节点的边权之和作为点权,构建综合网络点权集合  $H = \{h_1, h_2, h_3, \dots, h_n\}$ 。城市群综合客运网络示意图如图1所示。

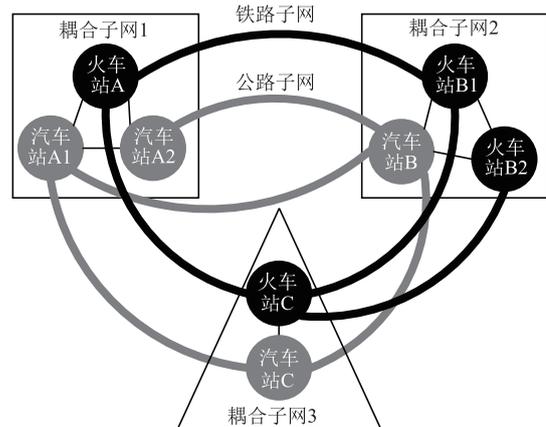


图1 城市群综合客运网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of integrated passenger transport network for urban agglomeration

图1中,在同一交通小区中的城际客运站点通过耦合边进行两两连接,构成3张耦合子网。公路子网与铁路子网通过耦合子网产生联系,共同构成城市群综合客运网络。

## 2 可达性评估

节点的可达性值表示该节点到其他所有节点的

最短距离或最短时间的平均值,节点的阻抗效率则是指该节点到其他所有节点的最小阻抗(最短时间或最低票价)的倒数平均值,两指标较为相似并且成反比关系。可达性值越低,说明可达性越好;阻抗效率越高,同样说明可达性越好。阻抗效率与可达性成正比关系,因此采用阻抗效率来评估城市群客运交通网络的可达性。以下是阻抗效率的具体公式与说明。

### 2.1 网络效率

网络效率是复杂网络理论中衡量网络性能的常用指标,表示全网所有节点间最短路径上的连边数量的倒数平均值,如式(1)所示:

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}, \quad (1)$$

式中, $E$ 为网络效率; $n$ 为节点总数; $d_{ij}$ 为节点 $i, j$ 间最短路径上的连边数量。

可以看出,网络效率只能衡量网络的拓扑结构与连通性。为衡量网络的功能连通性即可达性,在网络效率基础上构建加权的网络阻抗效率作为可达性评估指标,其中包括节点阻抗效率与网络阻抗效率。

### 2.2 节点阻抗效率

节点间的阻抗效率是两节点间最小阻抗(最短时间或最低票价)的倒数,如式(2)所示:

$$I_{ij} = 1 / \sum_{(i,j) \in L_{ij}} w_{ij}, \quad (2)$$

式中, $I_{ij}$ 为节点 $i, j$ 间的阻抗效率; $w_{ij}$ 为节点 $i, j$ 间的边权,以阻抗标定边权; $L_{ij}$ 为节点 $i, j$ 间最短路径的节点对集合,例如节点 $v_1, v_6$ 间的最短路为 $v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_6$ ,那么 $L_{1,6} = \{(1, 3), (3, 6)\}$ ,若无最短路则 $I_{ij} = 0$ 。

节点的阻抗效率是该节点到其他所有节点的阻抗效率的平均值,即该节点到其他所有节点的最小阻抗(最短时间或最低票价)的倒数平均值,用于衡量节点在网络中的可达性,如式(3)所示:

$$I_i = \frac{1}{n-1} \sum_j I_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_j (1 / \sum_{(i,j) \in L_{ij}} w_{ij}), \quad (3)$$

式中 $I_i$ 为节点 $i$ 的阻抗效率。

### 2.3 网络阻抗效率

网络阻抗效率是节点阻抗效率的平均值,即全网所有节点间最小阻抗(最短时间或最低票价)的倒数平均值,用于衡量整个网络的可达性,可以对不同网络的可达性,如式(4)所示:

$$I = \frac{1}{n} \sum_i I_i = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} (1 / \sum_{(i,j) \in L_{ij}} w_{ij}), \quad (4)$$

式中, $I$ 为网络阻抗效率; $n$ 为节点总数; $I_i$ 为节点 $i$ 的阻抗效率; $w_{ij}$ 为节点 $i, j$ 间的边权。

## 3 实例研究

### 3.1 成渝城市群综合客运网络

根据《成渝城市群发展规划》《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》,确定了成渝城市群的范围。由于同一中心城区内的多个长途汽车站在城际运输中往往存在分工,且多条班线的出发与到达城市相同,因此将各地市级及以上城市的多个长途汽车站抽象为一个汽车站并进行编号,共计36个。选取各县级及以上城市中办理客运业务的火车站并继续编号,共计72个。因此,实例共有108个节点,节点编号集合 $V = \{1, 2, 3, \dots, 108\}$ 。在重庆市公路客运售票网(愉客行)以及四川汽车客运票务网对点查询汽车站点间的车票,记录最低票价,构建公路子网邻接矩阵 $B$ 与票价矩阵 $B^{\text{fare}}$ 。由于公路客运的具体行程时间难以查询,故暂不考虑公路客运的出行时间。在中国铁路12306网站点间查询火车站点间的车票,记录最低票价与最短出行时间,构建铁路子网邻接矩阵 $T$ 、票价矩阵 $T^{\text{fare}}$ 、时间矩阵 $T^{\text{time}}$ 。在市域范围内将通过城市公共交通、步行等方式换乘衔接的站点间添加耦合边,构建耦合子网邻接矩阵 $O$ 。公路子网、铁路子网、耦合子网的邻接矩阵合并为成渝城市群综合客运网络邻接矩阵 $Z = (z_{ij})_{108 \times 108}$ 。根据综合网络邻接矩阵,利用MATLAB绘制了基于Space-P的成渝城市群综合客运网络,如图2所示。

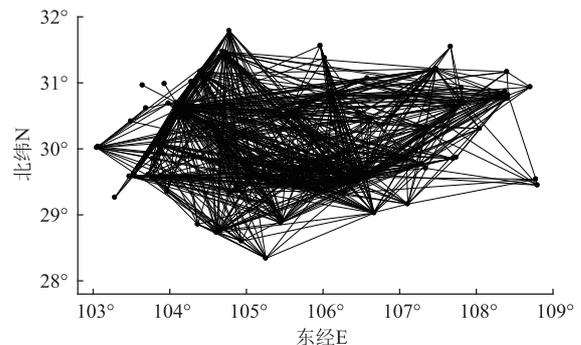


图2 基于Space-P的成渝城市群综合客运网络

Fig. 2 Integrated passenger transport network of Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on Space-P

图2中,Space-P建模方法原理为:两站点间若可以购买到直达车票,则存在连边。相关的还有

Space-L 建模方法,其原理为:一条线路上相邻的两站点间才存在连边。两者存在差别,Space-P 建模方法用于分析网络换乘,即研究网络的可达性。而Space-L 建模方法用于分析网络的实际路网,可以进行抗毁性、脆弱性等攻击性仿真。

### 3.2 公路子网阻抗可达性

在公路客运子网中,基于公路子网票价矩阵以及节点阻抗效率指标,计算得到了每个节点的阻抗效率,如图3所示。

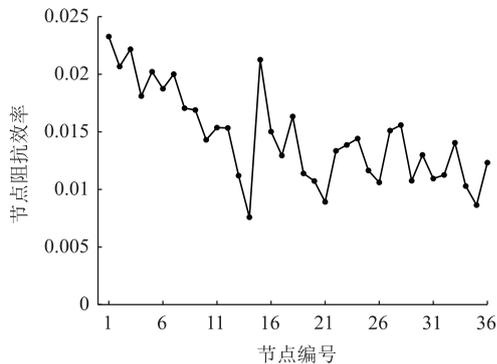


图3 公路客运节点的阻抗效率

Fig. 3 Impedance efficiency of nodes in highway subnet

图3中,阻抗效率较高即可达性较好的6个公路客运节点如表1所示。

表1 阻抗效率较高的公路客运节点

Tab. 1 Nodes in highway subnet with high impedance efficiency

排序(编号)	站名	阻抗效率
1(1)	重庆	0.023 3
2(3)	铜梁	0.022 2
3(15)	璧山	0.021 3
4(2)	合川	0.020 7
5(5)	大足	0.020 2
6(7)	永川	0.020 0

表1中,阻抗效率较高即可达性较好的节点为重庆中心城区以及下辖的区县,这5个区县均处于重庆1 h 经济圈内,是重庆的卫星城市。这些可达性较好的节点彼此间距离较近、连通性好,并且与四川其他城市的公路客运较为通畅,说明较为密集的网络其可达性可能会更好。

图3中,阻抗效率较低即可达性较差的6个公路客运节点如表2所示。

表2中的6个节点均处于成渝城市群的边缘位置并且较为孤立,在整个网络中的阻抗可达性相对较弱符合常理。

### 3.3 铁路子网阻抗可达性

在铁路客运子网中,基于铁路子网票价矩阵以

表2 阻抗效率较低的公路客运节点

Tab. 2 Nodes in highway subnet with low impedance efficiency

排序(编号)	站名	阻抗效率
36(14)	黔江	0.007 6
35(35)	雅安	0.008 6
34(21)	云阳	0.008 9
33(34)	达州	0.010 3
32(26)	绵阳	0.010 6
31(20)	开州	0.010 7

及节点阻抗效率指标,计算得到了每个节点的费用阻抗效率,如图4所示。

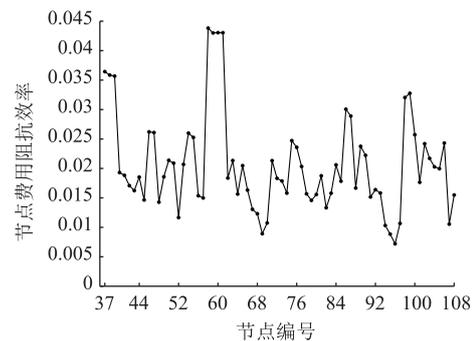


图4 铁路客运节点的费用阻抗效率

Fig. 4 Cost impedance efficiency of nodes in railway subnet

图4中,有7个费用阻抗效率较高即可达性较好的铁路客运节点,如表3所示。

表3 费用阻抗效率较高的公路客运节点

Tab. 3 Nodes in railway subnet with high cost impedance efficiency

排序(编号)	站名	阻抗效率
1(58)	成都站	0.043 82
2(60)	成都南站	0.043 05
3(61)	成都西站	0.043 04
4(59)	成都东站	0.043 00
5(37)	重庆北站	0.036 44
6(38)	重庆西站	0.035 85
7(39)	沙坪坝站	0.035 68

由图4与表3可知,成都与重庆中心城区的高铁站在出行费用方面的节点阻抗效率较高,可达性较好。由于市内换乘的便捷性,同一城市内的多个站点联系紧密,会使得这几个站点的阻抗效率较高。例如成都与重庆的这些站点,还有诸如涪陵站与涪陵北站(编号46,47)、南充站与南充北站(编号86,87)等例子,同样也是因为换乘便捷、联系紧密的缘故使得节点阻抗效率较高,可达性较好。

基于铁路子网时间矩阵以及节点阻抗效率指标, 计算得到了每个节点的时间阻抗效率, 如图 5 所示。

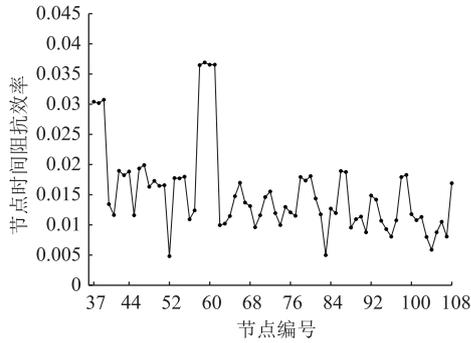


图 5 铁路客运节点的时间阻抗效率

Fig. 5 Time impedance efficiency of nodes in railway subnet

图 5 和图 4 的趋势类似, 重庆与成都中心城区的高铁站在出行时间方面的阻抗效率较高, 可达性较好。图 5 中, 一些无市内换乘的单一节点在时间阻抗效率方面表现良好, 例如大足南站 (编号 42)、荣昌北站 (编号 43)、永川东站 (编号 44)、内江北站 (编号 78) 等, 因为这些站点是成渝高铁的中间站, 成渝高铁运营时速 300 km/h (部分复兴号列车 350 km/h), 运输速度更快, 时间耗费更少, 所以节点的时间阻抗效率较高。这些节点的费用阻抗效率不高的缘故, 是因为高速动车组费用略高于普通动车组、城际动车组、快速旅客列车等。

### 3.4 综合网络阻抗可达性

将公路子网、铁路子网、耦合子网的票价矩阵合并为综合网络的边权矩阵, 计算得到了综合网络各节点的阻抗效率, 如图 6 所示。

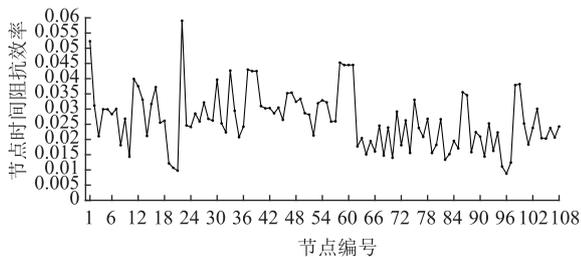


图 6 综合网络节点的阻抗效率

Fig. 6 Impedance efficiency of nodes in integrated network

由图 6 可知, 重庆中心城区的站点 (编号 1, 37, 38, 39) 与成都中心城区的站点 (编号 22, 58, 59, 60, 61) 在城市群综合客运网络中仍然表现出了很强的可达性。还有例如涪陵汽车站、涪陵站、涪陵北站 (编号 11, 46, 47), 南充汽车站、南充站、南充北站 (编号 30, 86, 87), 广安汽车站、广安站、广安南站 (编号 33, 98, 99) 等站点可达

性也较好, 其主要原因在于多个站点的耦合关联。

计算了公路子网、铁路子网、综合网络的网络阻抗效率, 如图 7 所示。

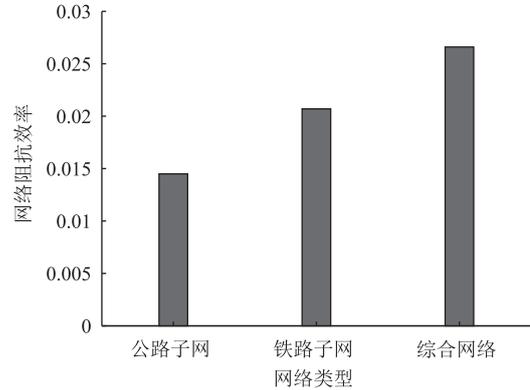


图 7 网络阻抗效率对比

Fig. 7 Comparison of impedance efficiency of networks

图 7 中, 公路子网的阻抗效率为 0.014 5, 铁路子网的阻抗效率为 0.020 7。公路子网与铁路子网通过耦合子网组合叠加后的综合网络的阻抗效率为 0.026 6, 相较于公路子网提升了 83.4%, 相较于铁路子网提升了 28.5%。由此可见, 公路子网与铁路子网的耦合提高了城市群客运交通网络的阻抗可达性, 旅客的出行阻抗进一步降低。

## 4 结论

提出考虑城市内部换乘的城市群综合客运网络建模方法, 在研究城际运输时考虑城市交通换乘进而更加贴近实际情况。从出行费用与时间的角度出发研究城市群客运交通网络的阻抗可达性, 以成渝城市群综合客运网络为例, 识别出行成本较低即节点阻抗效率较高、阻抗可达性较好的站点, 评估并对比网络的阻抗可达性, 得出如下结论与展望:

(1) 实例表明成都、重庆、南充等城市的多个耦合站点的阻抗效率较高, 主要由于市内换乘的便捷性使得相互耦合的节点均表现出较好的阻抗可达性, 因此在深入研究城市群综合客运交通网络时, 城市交通换乘是不可忽略的环节。

(2) 综合网络的阻抗效率高于公路子网、铁路子网, 这说明多种运输方式的耦合衔接能够提高城市群客运交通网络的阻抗可达性, 旅客的出行成本进一步降低, 因此要大力推动不同运输方式间的耦合衔接, 构建更加协调的综合客运网络, 进一步降低出行阻抗。

(3) 费用阻抗与时间阻抗是分析网络可达性的

两种不同属性,个别节点时间可达性较好但费用可达性并不好,个别节点费用可达性较好但时间可达性并不好,进一步的研究中可以尝试构建阻抗函数使其有机结合,同时兼顾两种属性评估网络阻抗可达性。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] CANDELIERI A, GALUZZI B G, GIORDANI I, et al. Vulnerability of Public Transportation Networks Against Directed Attacks and Cascading Failures [J]. *Public Transport*, 2019, 11 (1): 27-49.
- [2] 王国娟,吕文红,高歌,等.基于复杂网络的失效公交站点绕行方案研究[J].*公路交通科技*, 2020, 37 (11): 107-117.  
WANG Guo-juan, LÜ Wen-hong, GAO Ge, et al. Study on Detour Scheme for Failure of Transit Station Based on Complex Network [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37 (11): 107-117.
- [3] 路庆昌,崔欣,徐标,等.公交接驳场景下轨道交通网络脆弱性研究[J].*中国安全科学学报*, 2021, 31 (8): 141-146.  
LU Qing-chang, CUI Xin, XU Biao, et al. Vulnerability Research of Rail Transit Network under Bus Connection Scenarios [J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31 (8): 141-146.
- [4] 冯霞,贾宏臻.考虑节点失效和边失效的航空网络鲁棒性[J].*北京交通大学学报*, 2021, 45 (5): 84-92.  
FENG Xia, JIA Hong-zhen. Aviation Network Robustness Considering Node Failure and Edge Failure [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2021, 45 (5): 84-92.
- [5] 卫振林,甘杨杰,赵鹏.城市复合交通网络的若干特性研究[J].*交通运输系统工程与信息*, 2015, 14 (1): 106-111.  
WEI Zhen-lin, GAN Yang-jie, ZHAO Peng. Characteristic Research of Urban Complex Traffic Network [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 14 (1): 106-111.
- [6] 戴晓峰,吴寄石.城市群公路客运网络空间结构特征提取方法[J].*公路交通科技*, 2017, 34 (10): 128-134.  
DI Xiao-feng, WU Ji-shi. A Method for Extracting Characteristics of Highway Passenger Transport Network Spatial Structure in Urban Agglomeration [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34 (10): 128-134.
- [7] 李成兵,魏磊,郝羽成.城市群复合交通网络特性研究[J].*系统仿真学报*, 2016, 28 (12): 2958-2965.  
LI Cheng-bing, WEI Lei, HAO Yu-cheng. Research on Characteristics of City Agglomeration Compound Traffic Network [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28 (12): 2958-2965.
- [8] 毛剑楠,刘澜.城市群客运网络节点重要度识别方法[J].*公路交通科技*, 2019, 36 (5): 130-137.  
MAO Jian-nan, LIU Lan. A Method for Identifying Node Importance of Passenger Transport Network in Urban Agglomeration [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 36 (5): 130-137.
- [9] 李成兵,张帅,杨志成,等.蓄意攻击下城市群客运网络级联抗毁性仿真[J].*交通运输系统工程与信息*, 2019, 19 (2): 14-21.  
LI Cheng-bing, ZHANG Shuai, YANG Zhi-cheng, et al. Invulnerability Simulation in Urban Agglomeration Passenger Traffic Network under Targeted Attacks [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19 (2): 14-21.
- [10] ZHANG L, ZHANG X, YUAN S, et al. Economic, Social, and Ecological Impact Evaluation of Traffic Network in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on the Entropy Weight TOPSIS Method [J]. *Sustainability*, 2021, 13 (4): 1862.
- [11] 郭珂歆,彭国庆,郑新奇,等.北部湾城市群综合交通网络一体化分析与评价[J].*地理与地理信息科学*, 2021, 37 (4): 57-63.  
GUO Ke-xin, PENG Guo-qing, ZHENG Xin-qi, et al. Analysis and Evaluation of Integrated Transportation Network of Beibu Gulf Urban Agglomeration [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2021, 37 (4): 57-63.
- [12] 肖宏伟,王启轩,张捷.成渝城市群关联网络特征及影响因素解析—基于公路客运视角的研究[J].*上海城市规划*, 2021, 30 (2): 128-135.  
XIAO Hong-wei, WANG Qi-xuan, ZHANG Jie. Analysis of the Characteristics and Influencing Factors of the Interlocked Network of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration: A Perspective of Highway Passenger Transport [J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2021, 30 (2): 128-135.
- [13] 关伟,吴建军,高自友.交通运输网络系统工程[J].*交通运输系统工程与信息*, 2020, 20 (6): 9-21.  
GUAN Wei, WU Jian-jun, GAO Zi-you. Transportation

- Network Systems Engineering [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20 (6): 9-21.
- [14] KOENIG J G. Indicators of Urban Accessibility: Theory and Application [J]. Transportation, 1980, 9 (2): 145-172.
- [15] AKLILU A, NECHA T. Analysis of the Spatial Accessibility of Addis Ababa's Light Rail Transit: The Case of East-West Corridor [J]. Urban Rail Transit, 2018, 4 (1): 35-48.
- [16] WANG Z, XU J, FANG C, et al. The Study on County Accessibility in China: Characteristics and Effects on Population Agglomeration [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21 (1), 18-34.
- [17] 宗会明, 黄言. 高速铁路对成渝城市群区域可达性和城市相互作用格局的影响 [J]. 人文地理, 2019, 34 (3): 99-107, 127.  
ZONG Hui-ming, HUANG Yan. The Impact of High-speed Rail on Regional Accessibility and Regional Spatial Interactions: A Case Study of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration [J]. Human Geography, 2019, 34 (3): 99-107, 127.
- [18] 徐明非, 欧晓培, 王元庆. 城市群公路可达性与衔接提升研究 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (11): 245-254.  
XU Ming-fei, OU Xiao-pei, WANG Yuan-qing. Study on Highway Accessibility of Urban Agglomerations and Its Connection Improvement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (11): 245-254.
- [19] 洪东方, 骆华松, 覃洁. 云南省沿边地区交通网络可达性与城镇化耦合发展研究 [J]. 湖北农业科学, 2021, 60 (7): 191-196.  
HONG Dong-fang, LUO Hua-song, QIN Jie. Research on the Coupling Development of Transportation Network Accessibility and Urbanization in Border Areas of Yunnan Province [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60 (7): 191-196.
- [20] 孔繁钰, 周愉峰, 李献忠. 基于 Space-P 复杂网络模型的城市公交网络特性分析 [J]. 计算机科学, 2018, 45 (8): 125-130.  
KONG Fan-yu, ZHOU Yu-feng, LI Xian-zhong. Characteristic Analysis of Urban Public Transport Networks Based on Space-P Complex Network Model [J]. Computer Science, 2018, 45 (8): 125-130.