

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.09.019

大宗货物公路运输网络结构特征提取

左微^{1,2}, 戢晓峰^{1,2}, 李杰梅^{1,2}

(1. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650504; 2. 云南省现代物流工程研究中心, 云南 昆明 650500)

摘要: 为提取大宗货物公路运输网络结构特征, 选择网络总体特征、空间组织、运输联系以及货物种类生成等指标, 采用社会网络分析和空间分析方法, 构建了考虑实际运量的区域大宗货物公路运输网络结构特征提取方法; 基于云南物流大数据平台的实际运单提取7 291条大宗货物公路运输数据, 分析了云南省大宗货物公路运输网络的组织结构和货运节点运输联系的空间分异特征, 验证了特征提取方法的有效性。结果表明: 云南省大宗货物公路运输网络密度为0.023, 平均度1.759, 特征途径长度2.494, 平均聚类系数0.162, 为典型的小世界和无标度网络; 运输网络整体结构较为疏松, 但运行效率较高, 呈现“多中心”空间格局; 滇中城市经济圈存在小范围的联系强度集聚区, 而滇西边地区之间的点联系强度差异显著。同时, 运输网络空间组织呈“散点”布局, 受行政区划影响较小。整体上, 云南省大宗货物公路运输网络存在5条货运量较大的关键运输通道, 并呈现以腾冲、昆明市辖区为主的“双供给中心”发展格局, 供给节点货运量整体上处于较高水平, 但仍呈“供少需多”的特征; 从大宗货物种类的生成特征来看, 钢材货物运输的轴辐式指向显著, 金属矿石、能源类运输的向心性指向明显, 机械设备运输主要集中于滇东地区。

关键词: 运输经济; 网络结构特征; 空间分析; 大宗货物运输网络; 公路运输; 社会网络分析

中图分类号: F542

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2019)09-0140-10

Extraction of Bulk Cargo Highway Transport Network Structural Characteristics

ZUO Wei^{1,2}, JI Xiao-feng^{1,2}, LI Jie-mei^{1,2}

(1. School of Traffic Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650504, China;

2. Yunnan Modern Logistics Engineering Research Center, Kunming Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to extract the structural characteristics of highway transport network of bulk goods, selecting the indicators such as overall characteristics of network, spatial organization, transport links and the generation of cargo types, by using social network analysis and spatial analysis method, a method for extracting regional bulk cargo highway transport network structural characteristics considering the actual traffic volume is constructed. Based on the actual shipping orders of Yunnan logistics big data platform, 7 291 bulk cargo transport data are extracted, the organizational structure of the bulk cargo highway transport network and the spatial differentiation characteristics of freight nodes in Yunnan Province are analyzed, and the effectiveness of the characteristics extraction method is verified. The result shows that (1) The density of the highway transport network of bulk goods in Yunnan Province is 0.023, the average degree is 1.759, the characteristic route length is 2.494, and the average clustering coefficient is 0.162, which is a typical small-world and scale-free network. (2) The overall structure of the transport network is relatively loose, but its operation efficiency is high, showing a “multi-center” spatial pattern. (3) There are small range of

收稿日期: 2018-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(71764013); 云南省交通科技创新示范研究项目(2017A14); 云南省哲学社会科学规划智库项目(YNZK201832)

作者简介: 左微(1994-), 女, 广西贺州人, 硕士研究生。(1617521384@qq.com)

connection intensity agglomeration areas in the central Yunnan urban economic circle, while the connection intensity of freight flow points in the western Yunnan border area is significantly different. Meanwhile, the space organization of the transport network is scattered, which is less affected by administrative divisions. (4) There are 5 major key transport channels in Yunnan's bulk cargo highway transport network generally, and the development pattern of "double supply centers" based on Tengchong and Kunming municipal districts is presented. The freight volume of supply nodes is at a high level on the whole, but it still shows the characteristics of "less supply and more demand". (5) Judging from the generation characteristics of bulk cargo types, the hub-and-spoke direction of steel cargo transport is significant, the centripetal directions of metal ore and energy transport are obvious, and the mechanical equipment transport is mainly concentrated in eastern Yunnan.

Key words: transport economics; network structural characteristic; spatial analysis; bulk cargo transport network; highway transport; social network analysis

0 引言

大宗物流是指以能源产品、基础原材料和农副产品为流通对象,使用重载化载运工具,将生产、供应、销售、回收物流环节实施有机结合的大批量基础性资源的流动过程。其中,大宗货物运输是大宗物流过程的联结与实现形式^[1]。当前,我国物流业快速发展,而大宗货物已成为我国物流运送的主力。在我国物流分类中,大宗货物物流排名第一,约占全国物流市场的50%以上。同时,我国公路货运的分担比高达75.06%,在综合运输体系中占优势地位。为分析公路物流成本与网络组织模式,急需建立大宗货物公路运输网络的特征评价方法,获取其网络结构特征。

运输网络的结构特征作为研究区域运输空间组织特征和演化的关键,随着小世界网络^[2]和无标度网络^[3]的兴起,成为运输经济学与交通地理学的研究热点,引起了众多学者的广泛关注。现有运输网络结构研究主要集中于航空、铁路、道路和城市交通领域,但由于数据的可获取性,航空运输网络的研究成果较多,方法体系较为成熟,能够为大宗货物公路运输网络结构特征提取提供方法借鉴和理论依据。目前,航空网络特征提取大致分为两种:一种是采用复杂网络理论和方法,从静态的评价指标出发,对运输网络结构进行实例分析,如吴晋峰等^[4]运用社会网络分析法,构建了中国航空国际网络,获取其结构特征并分析其对入境旅游流的影响;党亚茹等^[5]运用复杂网络理论对航空客流数据进行实例分析,从整体上表征了航空客流网络的结构特征;党亚茹等^[6]采用社会网络评价指标和系统聚类方法,结合航空货物运输数据对我国航空货运网络

进行层级分析。另一种是基于地理特征层面,采用空间分析方法,并借用 ArcGIS 等软件平台对评价指标数据或实际运输交流数据进行可视化处理,识别区域运输网络分布的结构特征,如王姣娥等^[7]将网络指标数据进行相关性及空间分析,得出航空空间组织结构演变日趋复杂化的结论;王海江等^[8]运用基于 O-D 联系网络的 GIS 空间分析方法,揭示了中国航空联系的网络结构及区域结构特征。目前,相关学者对公路运输的网络结构也做了一定研究,如戢晓峰等^[9]从网络整体性和权值性两个方面,建立了公路客运网络的空间提取方法;戢晓峰等^[10]基于空间分析方法构建了连片特困地区公路运输空间运行特征的提取流程;刘正兵等^[11]从地级市尺度,运用 GIS 可视化获取了城际货运联系网络的结构特征。综上所述,由于公路货运市场较分散及数据获取的困难,目前对公路货物运输网络结构的研究相对薄弱,并且相关研究未能考虑实际运量,从县域尺度的研究更为鲜见。同时,目前对大宗货物运输的研究主要集中于定价问题、运输模型、系统优化、运营模式和风险评估等方面,对大宗货物运输网络结构特征的研究尚未见报道。

基于此,本研究聚焦于大宗货物公路运输网络结构特征的提取问题,针对大宗货物公路运输网络,研究其组织结构和货运节点联系的空间分异特征;构建了考虑网络总体特征、空间组织、联系强度(基于实际运量)以及货物种类生成特征的大宗货物公路运输网络的结构特征评价方法;并基于云南物流大数据平台提供的海量大宗货物公路运输数据,采用社会网络分析和空间分析方法获取了县域尺度的云南省大宗货物公路运输网络的结构特征,以期为区域交通规划与物流规划提供理论依据。

1 大宗货物公路运输网络结构特征评价方法

为提取大宗货物公路运输网络结构特征,基于网络总体特征指标、网络空间组织特征指标、运输联系特征指标和货物种类生成特征4个方面构建了网络结构特征评价方法,如图1所示。首先,通过社会网络理论中的网络密度、平均度、特征途径长度、平均聚类系数指标得到网络的基本特征,系统

分析节点之间的紧密性、网络的通达性、运输效率和集聚性。同时,以节点的度数中心度与度分布为依据,提取网络的中心性与度分布特征,由此形成网络的总体特征。在此基础上,为进一步挖掘网络内部的组织连接情况,采用节点群结构来反映不同节点的聚类结果。然后,基于货流量分析O-D对和节点的运输联系强度特征。最后,通过流入、流出货物种类的空间分布提取不同货物种类的生成特征。

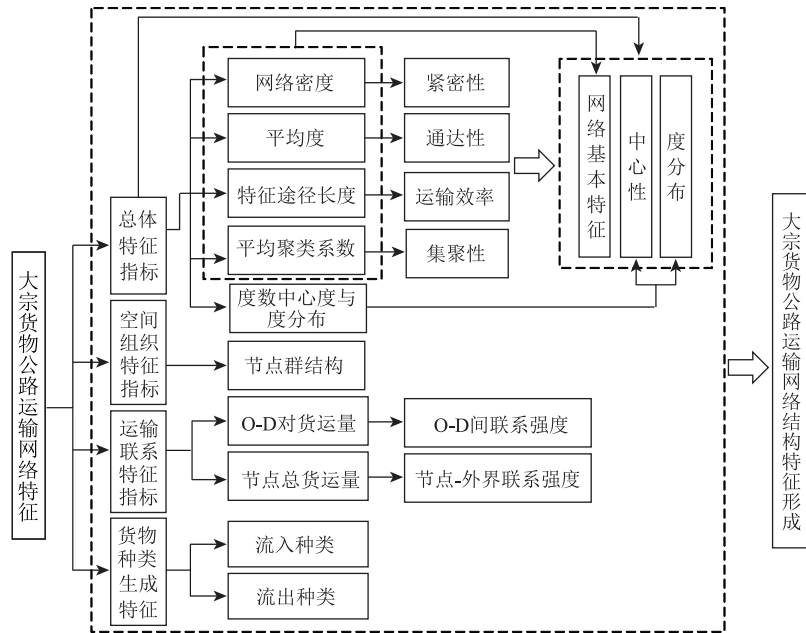


图1 大宗货物公路运输网络结构特征评价方法体系

Fig.1 Evaluation method system of structural characteristics of bulk cargo highway transport network

1.1 网络总体特征指标

(1) 网络密度

网络密度体现各个货运节点之间联络的紧密程度,一定规模的节点之间连线越多,该网络密度就越大。通过大宗货物网络节点的密度指标,可以定量的观测出整体网中货运节点的连接数量关系强度。在规模为 n 个货运节点的有向关系网络中,网络密度的表达式为:

$$D = m/n(n-1), \quad (1)$$

式中, D 表示网络密度; m 表示网络中包含的实际关系数目,即边数; n 表示网络节点总数^[12]。网络密度的取值范围是0~1,网络密度越大表明大宗货运城市节点之间的联系越紧密,所形成的空间网络结构功能越完善。

(2) 平均度

网络中节点 i 的度是指节点 i 的连接边数目,记为 k_i ($i=1, 2, \dots, n$)^[13],所有节点度数的平均值则为网络的平均度,记为 $\langle k \rangle$,其表达式为^[14]:

$$\langle k \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i, \quad (2)$$

式中, i 表示第 i 个节点; k_i 为节点 i 的度, $\langle k \rangle$ 值越小,则网络通达性越好^[15]。

(3) 特征途径长度

在网络中,连接任意两个点之间最短路径的平均长度称为特征途径长度^[16]。其表达式为:

$$L = \frac{n(n-1)}{2} \sum_{i>j} d_{ij}, \quad (3)$$

式中, d_{ij} 表示连接节点 i 和 j 之间最短路径上的边数, L 值越小,表示网络中任意两点之间的距离越短,货运网络的运输效率就越高。

(4) 平均聚类系数

聚类系数是描述网络节点聚集程度的参数,节点 i 的聚类系数定义为:节点 i 的相邻节点之间所实际具有的边数与可能有的边数的比值。其表达式为:

$$C_i = 2E_i/k_i(k_i-1), \quad (4)$$

式中, E_i 为这些相邻节点之间实际具有的边数。由

于单个节点的聚类系数受到该节点的移动路径的影响很大, 所以通常计算全部节点聚类系数的平均值来观测整个网络的节点聚集情况^[17]。网络的平均聚类系数定义为:

$$C = \frac{1}{n} \sum_i^n C_i. \quad (5)$$

(5) 度数中心度与度分布

点的度数中心度就是与点直接相连的其他点的个数。度数中心度体现了节点在货运联系网络的“中心性”与“支配权力”。其值越大, 货运活跃度越高, 表明节点具有物流枢纽中心性, 是一个货运节点连接其他节点的总和。在有向图中, 度数中心度分为点入度和点出度两种类型, 前者反映其他节点输入到某节点的货运连接总数, 具有需求属性; 后者反映一个节点输出到其他节点的货运连接总数, 具有供给属性。

度分布是对节点度数的总体描述, 表示为网络中节点的度的概率分布。节点的度分布情况可用分布函数 $P_{(k)}$ 来描述, $P_{(k)}$ 表示网络中度为 k 的节点在整个网络中所占的比例。但一般情况下通常采用累积度的分布函数描述度的分布情况, 它表示度不小于 k 的节点的概率分布, 其表达为:

$$P_{(k)} = \frac{n_{(k)}}{n}, \quad (6)$$

$$P_{(k)} = \sum_{i=k}^{\infty} P_{(i)}, \quad (7)$$

式中, $n_{(k)}$ 表示网络中度为 k 的节点个数。

1.2 网络空间组织特征指标

网络社团结构是社会网络最普遍和最重要的拓扑属性之一^[18], 由不同的节点群构成; 具有同一货运节点群相互连接紧密, 不同货运节点群相互连接稀疏的特点。不同节点群的分布情况能够反映货运网络内部不同节点的聚类结果或不同凝聚子群内的归属。对其结构进行研究, 对于挖掘网络的隐含模式、内部组织、预测其行为等具有重要意义^[19]。

1.3 运输联系特征指标

为精确的度量节点的货运联系强度, 采用各节点对之间的货运量来表示 O-D 点之间的货运联系强度; 用各节点总货运量来描述一个节点与外界的货运联系强度, 其表达式为:

$$S_{(i)} = \sum_{j=1}^n a_{ij}w_{ij} + \sum_{j=1}^n a_{ji}w_{ji}, \quad (8)$$

式中, S_i 为节点 i 的总货运量; w_{ij} 为节点 i 至节点 j 的货运量; w_{ji} 为节点 j 到节点 i 的货运量; a_{ij} , a_{ji} 的

取值为 0 或 1 (若 a_{ij} 取值为 1, 表示节点 i 至节点 j 的货运量不为 0, 即存在货运联系; 若取值为 0, 表示节点 i 至节点 j 的货运量等于 0, 即不存在货运联系。 a_{ji} 的取值亦如此)。

1.4 货物种类生成特征

为更好地挖掘运输网络的资源差异特征, 对各节点流入、流出货物类型进行归纳, 并通过 ArcGIS 可视化, 能够直观地反映基于地域特征所形成的大宗货物公路运输网络。

2 云南省大宗货物公路运输网络特征

2.1 数据来源及处理

本研究以云南省为例提取大宗货物公路运输网络的结构特征, 利用云南省物流大数据平台的海量订单数据, 经过字段筛选, 采集 2018 年 4 月至 6 月份的大宗货物公路运输数据, 共计 7 975 条。数据涵盖了云南省 129 个县级行政区与周边 13 个县级行政区及市辖区, 具体内容包括运输的起讫点、货物名称及货物重量等, 是基于该地域范围内的无车承运人所形成的海量运输信息, 在一定程度上足以表征现阶段云南省的大宗货运网络。

数据处理过程中, 将地市级行政中心 (市辖区) 合并为一个节点, 如将五华区、呈贡区、晋宁区合并为昆明市辖区, 南明区、云岩区、花溪区合并为贵阳市辖区, 成华区、双流区合并为成都市辖区, 东区、仁和区合并为攀枝花市辖区, 并提取存在货运联系的城市, 共得到 79 个货运节点。同时, 为避免边的长度为 0, 去掉起讫点位于同一市辖区及同一县级行政区内的物流信息, 最终得到 7 291 条有效数据。

2.2 运输网络的构建方法

运输网络是由不同的货运节点和运输线路构成。为构建与之对应的网络模型, 将各节点间的公路货运运输关系抽象为网络的边, 运用 UCINET 软件构造 O-D 货运联系矩阵表: 当起讫节点间的数值为 1 时, 定义为两节点在此方向上存在货运联系, 即货运量不为 0; 当起讫节点间的数值为 0 时, 定义为两节点在此方向上不存在任何货运联系, 即货运量为 0。最后, 以有向图的邻接矩阵形式来表征大宗货物公路运输网络, 并通过 UCINET 软件得到该网络拓扑结构。

2.3 网络总体特征

2.3.1 网络基本特征

云南省大宗货物公路运输网络所呈现的拓扑结构如图 2 所示, 以密度、平均度、特征途径长度、

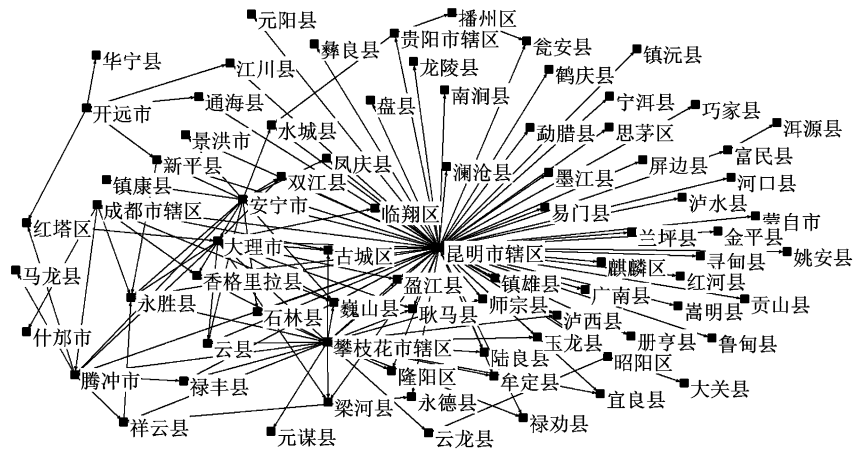


图2 云南省大宗货物公路运输网络拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of Yunnan bulk cargo highway transport network

平均聚类系数作为网络基本特征指标分别进行计算分析,结果如表1所示。

表1 云南省大宗货物公路运输网络的特征指标

Tab. 1 Characteristic indicators of Yunnan bulk cargo highway transport network

统计指标	网络密度		特征途径		平均聚类系数	
	节点数	边数	平均度	长度		
数值	0.023	79	139	1.759	2.494	0.162

(1) 云南省大宗货物运输网络节点之间的运输联系较为疏松。网络共有79个节点,139条边,平均每个运输节点至少与其他1.759个运输节点产生货运联系。该网络密度较小,表明运输空间的货物流联系不明显,各城市节点的运输联系不紧密,网络的整体功能有待进一步地完善。

(2) 网络的通达性和运行效率较高,集聚性较强,表现出明显的小世界特征。该网络的特征途径长度为2.494,远远小于同等规模随机网络的途径长度理论值 $L_R(L_R \propto \ln n / \ln \langle k \rangle \approx 7.737)$,即任意两节点间的最短连接需要2.494个个体长度,说明网络整体的运行效率较高。同时,网络的平均聚类系数为0.162,高于同等规模随机网络的聚类系数理论值 $C^*(C^* \propto \langle k \rangle / n \approx 0.022)$,表现出较强的集聚性。根据社会网络分析中小世界的测量指标可知,该网络拥有相对较小的 L 和相对较大的 C ,且平均度 k 大于1远远小于 $n(n=79)$,因此该运输网络具有明显的小世界特征。

2.3.2 中心性分析

计算各节点的点出度、点入度和整体中心度,得到排名前十位节点的度数中心度情况,如图3~图5所示。

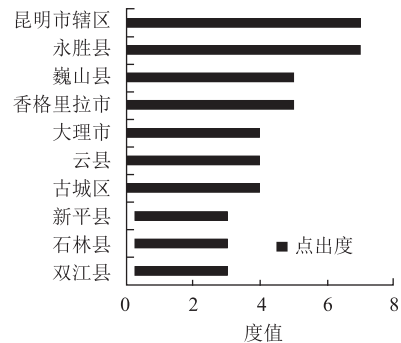


图3 点出度统计结果

Fig. 3 Statistical result of point-out degree

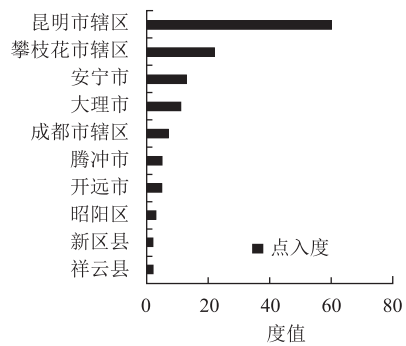


图4 点入度统计结果

Fig. 4 Statistical result of point-in degree

(1) 云南省大宗货物公路运输网络整体空间上呈现以昆明市辖区、攀枝花市辖区、安宁市、大理市为主的“多中心”空间格局。整体上看,网络节点的点出度与点入度的整体水平相差较大。其中昆明市辖区的点出度最高,以昆明市辖区为起点到其他城市节点的货运联系最多,其对外部输出的特征明显。昆明市辖区、永胜县的点入度相对较高,以昆明市辖区、永胜县为目的地的货运联系相对较多。

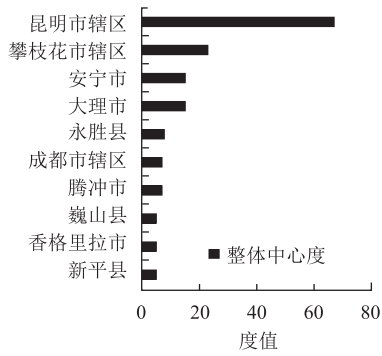


图 5 整体中心度统计结果

Fig. 5 Statistical result of global centrality degree

从中也可以发现, 昆明市辖区的点出度和点入度、整体中心度均最高, 表明昆明市辖区在整个大宗货运网络中处于绝对的控制中心地位。其次, 攀枝花市辖区、安宁市和大理市分别作为外部节点和非行政中心节点, 其点出度较高、整体中心度靠前, 说明攀枝花市辖区、安宁市和大理市为运输网络的副控制中心节点, 同时云南省境内的大宗货物运输也在一定程度上依赖外部供给输入。

(2) 大宗货运节点的输出能力远大于输入能力。排名靠前的货运节点出度平均值为 13, 点入度平均值为 4.5。在节点的连接关系中, 输出连接关系大约是输入连接系数的 3 倍, 表明节点的输出能力强于输入能力。

2.3.3 度分布统计特征

对云南省大宗货物公路运输网络的点出度、点入度和整体中心度的累积概率分布关系分别进行拟合, 得到如图 6 所示结果。

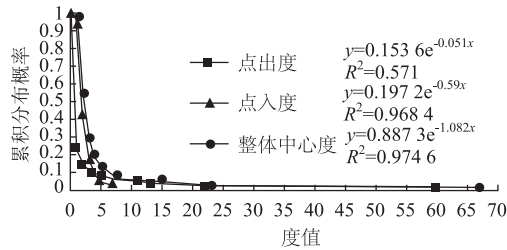


图 6 点出度、点入度及整体中心度累积概率分布

Fig. 6 Cumulative probability distribution of point-out degrees, point-in degrees and global centrality degrees

云南省大宗运输网络存在少数拥有大量连接关系的集散节点, 度分布遵循较强的幂次定律, 该网络为典型的无标度网络。从输出能力 (点出度) 来看, 度的递减速率快, 超过一半以上的节点低于平均水平, 少数节点具有一定的优势, 但网络的覆盖比例较低, 优势不明显; 从输入能力 (点入度) 来

看, 度的跨度范围小, 递减速率较为均匀, 一半的城市节点入度在 0~2 之间, 一半的城市节点位于 2~7 之间, 表明网络节点整体的货运输入能力差别不大, 各节点对大宗货物需求的分布在一定程度上较为均衡; 从整体中心度来看, 各节点之间的连接状况具有严重的不均匀分布性, 存在少数高连通的集散节点, 对网络的连接具有主导性。

2.4 网络空间组织特征

大宗货物运输网络的货运节点群结构能够清晰地表征内部的组织连接关系, 因此对节点进行合理的划分, 不仅能够了解与分析运输网络的组织结构特征, 还能挖掘出数据所隐藏的信息。利用 Gephi 软件基于模块度的社区探测算法对大宗货物公路运输的网络拓扑结构进行节点群划分, 并使模块度最优化。最终将 79 个节点划分为 7 个货运节点群 (如图 7 所示), 不同的颜色或形状表示不同的节点群, 节点直径的大小表示接近中心度的程度。具体结果如表 2 所示。

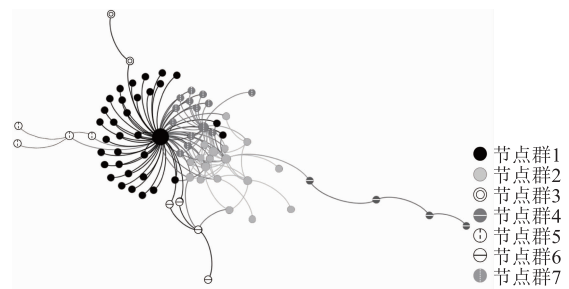


图 7 云南省大宗货物公路运输网络节点群划分结构图

Fig. 7 Node group division structure diagram of Yunnan bulk cargo highway transport network

表 2 云南省大宗货物公路运输网络节点群划分结果

Tab. 2 Result of dividing node groups of Yunnan bulk cargo highway transport network

节点群名称	节点
节点群 1	凤庆、景洪、昆明市辖区、临翔区、河口、册亨、广南、红河、金平、兰坪、蒙自、盘县、屏边、思茅区、巧家、麒麟区、元阳、贡山、鹤庆、澜沧、龙陵、泸水、鲁甸、勐腊、墨江、姚安、彝良、易门、镇沅、南涧、宁洱、嵩明、寻甸
节点群 2	安宁、大理、双江、巍山、香格里拉、新平、永胜、云县、镇康、成都市辖区、古城区、什邡、腾冲、永德、红塔、禄丰、祥云、马龙
节点群 3	富民、洱源、
节点群 4	水城、贵阳市辖区、播州区、瓮安
节点群 5	昭阳区、镇雄、大关、云龙
节点群 6	通海、开远、华宁、江川
节点群 7	石林、耿马、梁河、盈江、玉龙、隆阳、泸西、陆良、禄劝、牟定、师宗、宜良、攀枝花市辖区、元谋

为进一步研究节点群的空间组织特征,以揭示大宗货运网络组织的空间分布特点,根据节点群划分的结果,利用 ArcGIS 对各货运节点群的分布情况进行可视化处理。

(1)“轴辐式”是货运节点群内部的主要连接方式,同时节点群之间的点-点型组织结构提高了网络的运输效率。

①各节点群在整体上呈现“轴辐式”和“直线型”两种连接状态,但以“轴辐式”为主要形式。其中,节点群1、节点群5、节点群6和节点群7分别以昆明市辖区、昭阳区、开远市、攀枝花市辖区为中心呈轴辐式连接;节点群2主要通过3个轴辐式结构(分别以大理市、安宁市、成都市辖区为中心)进行连接,并且各中心节点之间均以点-点型结构相互连结;节点群3和节点群4均呈现直线型结构。

②每一个货运节点群的中心节点都是接近中心度较高的节点,以此为核心辐射周围其他各点。

③各节点群之间的连接都普遍采用了点-点型模式。例如,节点群1和节点群7以昆明-攀枝花作为节点群间的主要连接;而节点群7和节点群2则以攀枝花-成都、攀枝花-大理作为节点群间重要的连接线路。该模式通过核心节点之间的连接,保持节点群间的高效运输。同时在一定程度上简化了网络的结构,提高了整体网络的运输效率,进一步验证了该网络的运行效率较高。

(2)关键节点作用突出,但网络层级结构不完善。从整体的角度看,网络存在一个十分突出的核心节点位置,并以此为分界线,左右两端的节点群结构复杂性差异十分明显。表明大宗货物运输网络节点的货运发展水平不均衡,层级结构不完善,只存在若干个节点在网络中发挥关键性作用。这在很大程度上加剧中心节点的运输压力。其次,在运输网的中心,所组成的节点群节点个数最多,对网络的支配作用最强。随着运输的传递,以次级节点为中心的节点群在数量上有所递减,到达运输网的末端,由于运输联系强度降低,节点群的节点密度也随之降低,最终呈现长条式的发展格局。

(3)大宗货运网络节点群的空间分布呈现“散布”的形态,各节点群没有局限在市域范围或相邻地区间抱团发展,受行政区划的影响极小。整体上以昆明市辖区为中心的节点群1在空间上散布的范围最广,遍布云南省11个州市,延伸至滇西边境、滇西南密集城镇群、滇西北、滇东北、红河州一带以及滇中的寻甸、嵩明。节点群2在空间上整体呈

长带状及散点状的发展格局。其中,长带状以香格里拉-镇康(途径永胜、大理)的西北至西南走向的城镇群为主;散点状包括滇中的禄丰、安宁等5个城市以及四川省的什邡、成都市辖区。节点群3包括洱源、富民,形成点-点的空间联系。贵州省的遵义市、瓮安县、播州区和水城县组成的节点群4构成空间上沿直线传递的节点联系。滇东北地区的大关、昭阳区、镇雄与大理州的云龙构成的节点群5,形成东北与西部的联系。节点群6在空间上呈小团状的发展形式。节点群7主要分布于滇中及滇东地区,整体上形成弧形状的散点布局。

2.5 货运节点联系特征

2.5.1 节点间联系强度特征

对存在货运联系的O-D点货运量分别进行累加,得到各节点间的总货运量,通过弦图使其可视化,最终表现为两节点之间的运输联系强度,如图8所示。

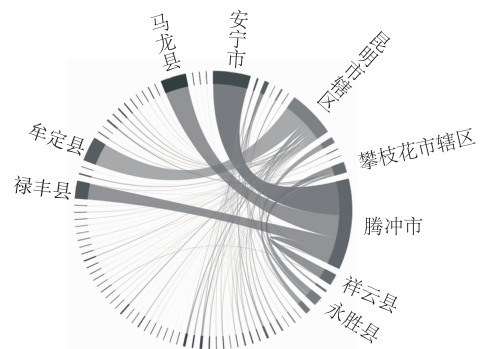


图8 货运节点联系图

Fig. 8 Connection diagram of freight nodes

(1)云南省大宗货物公路运输网络节点间的货运联系强度差异较大,具有明显的分层现象。

从总体的角度看,腾冲市与外部节点的货运联系强度最强,占比28.38%,昆明市辖区的货运联系强度排名第二,占比14.77%,安宁市、马龙县、牟定县、禄丰县、祥云县、攀枝花市辖区、永胜县为货运联系较强的城市节点。

(2)在众多节点弱联系的状态之下,云南省大宗货物公路运输网络形成了5条货运量较大的运输通道,并呈现以腾冲市、昆明市辖区为主的“双供给中心”发展格局,其中腾冲市为最大的供给型节点,昆明市辖区为运输功能最完善的供给型节点。

从输入的角度看,网络存在众多联系“内向型”特征明显的运输节点(62个),且运输联系强度大多表现为弱联系。这在一定程度上反映了云南省大宗货物公路运输网络整体的联系强度不高,进一步

验证了运输网的功能有待进一步提升。

从输出的角度看, 腾冲市是输出货运联系强度最大的节点城市, 输出货物运量占其总货运量的 99.2%, 是云南省大宗货物最大的供给型节点。腾冲市矿产资源丰富, 境内的铁矿资源为众多的工业节点城市提供原材料上的支持, 由此形成了 4 条货运量较大的运输通道: 腾冲—安宁、腾冲—马龙、腾冲—禄丰、腾冲—祥云。昆明市辖区是输出货运联系强度仅次于腾冲市的节点城市, 与云南省接近一半的县级行政区保持着输出联系, 输出货运量约占其总货运量的 97.0%。可以看出, 昆明市辖区是云南省大宗货物运输功能最完善的供给型节点, 处于联系的中心地位, 同时承担着整个大宗货物运输网络大部分城市节点的输入供给与运输联系; 在众多的输出联系中有一条对外输出货运量较大的运输通道(昆明市辖区—牟定), 其输出的货运量约占昆明市辖区输出总货运量的 52.8%。昆明市辖区是西部公路运输重要的交通枢纽, 境内路网密度高, 公路交通基础设施完善, 使其具备辐射周围各地区的中心条件, 是至关重要的大宗货物公路运输节点城市。

(3) 云南省大宗货物公路运输以较少量的城市节点与周边的省市(四川省、贵州省)存在相对较弱的货运联系特征。

从外部节点的运输来看, 内部节点与外部节点整体表现为弱联系, 且输入联系远大于输出。云南省境内与邻近省市(四川省、贵州省)共存在 32 个方向的运输联系, 其中, 对外运输方向有 4 个, 分别是安宁—水城、昆明市辖区—册亨、昆明市辖区—盘县、永胜—攀枝花市辖区, 联系强度为 0.000 8; 对内运输方向共有 28 个, 为成都市辖区、攀枝花市辖区对境内 23 个货运节点的输入, 联系强度为 0.07。

2.5.2 点联系强度空间分析

基于公式(8)计算各节点的总货运量, 并得到相应的百分比, 利用 ArcGIS 将其可视化。

结果发现, 腾冲市的点联系强度最大, 昆明市辖区、安宁市的点联系强度次之。滇中地区存在小范围的强度集聚区, 而滇西边境差异特征鲜明。

从节点强度的集聚性角度上讲, 滇中地区大宗货物运输密度整体较大, 以此为中心, 随着运输距离的增加其流量强度沿着运输线向四周逐渐降低。在路网密度大、运输发展较为均衡的滇中地区, 昆明市辖区发挥着不可替代的中枢节点作用。位于呈贡区内的王家营公铁联运物流集聚区吸引了大量的大宗货物和公路物流企业的聚集, 使处于运输末梢

的大宗物资在铁路运输这一干线运输后, 通过公路运输高效、灵活地完成短途“站到点”的运输服务。由此不断发展, 强化了王家营片区的物流集聚效应。昆明市辖区也因此成为大宗货物运输的物流中枢, 加速滇中地区大宗货运的集聚性。相比之下, 位于运输网末梢的边境地区, 随着运输网络层级的不断降低, 运输的控制能力和密度逐渐降低, 最终表现为大宗货物低需求的强度特征。

从节点强度的差异性角度上讲, 腾冲市矿产资源丰富点强度最大, 是“双供给中心”之一, 但由于位于交通基础设施发展较为落后的滇西边境, 导致其对周边节点的影响力弱, 货运点强度相比周围地区差异性较大。

2.5.3 货物种类生成特征分析

由于各地区资源分布的差异、经济发展状况以及交通基础设施建设的情况不同, 由此引起不同种类的大宗货物联系在不同地区之间形成网络进行运输, 对其进行地理特征的分析与形成机理的研究能更好地挖掘基于地域特征所形成的物流体系。通过对比分析云南省流入、流出货物种类的空间分布情况, 可以发现:

(1) 云南省大宗货物公路运输的货运节点呈“供少需多”的发展格局, 作为具有流出属性的节点城市其货运量整体上处于较高水平。流出货物的地理位置零散地分布于滇中、滇西、滇东南、滇西南、滇东北、滇西北 6 大区域, 以滇中城市的集聚效应较为明显, 整体上呈现“散点”布局。而输入货物的地理分布范围广泛, 整体上呈片式分布。

(2) 钢材货物的运输轴辐式指向显著。货运网络中钢材的进出交流密度极大, 表现出高需求特征, 这与云南省节点工业的发展特征相适应。云南省的铁矿主要分布在滇中境内的工业区附近, 由此形成的钢铁运输从滇中地区的中心城镇圈指向云南省的外围圈。

(3) 金属矿石、能源(煤、炭)的运输向心性指向明显。金属矿石、能源的供应点分散的位于云南省的若干外围地区, 而需求点则以滇中地区的中心城镇区为主。

(4) 机械设备的运输主要集中在东部地区。以河口为出发点, 指向东部边界和省外交界地区。

(5) 不同种类的大宗货物运输方向之间的差异, 体现了区域产业结构、资源分布的差异。钢材货物的运输和金属矿石、能源的运输指向相反。可见, 不同地区之间的资源互补是大宗货物运输的一个重要特征。

3 结论

本研究将静态指标和实际运输量相结合,构建大宗货物公路运输网络结构特征评价方法,能够有效完善现有公路运输网络的研究体系。以云南省大宗货物运输为案例,利用复杂网络理论和GIS空间分析技术,提取云南省大宗货物公路运输网络结构特征,具体结论包括:

(1) 云南省大宗货物公路运输网络具有明显的小世界和无标度网络特征,货运节点的空间发展规模差异性较大,呈现“多中心”的空间格局。组织结构的空间“散布”特性,决定了其远距离运输的货运形式。

(2) 货运联系强度的层级结构是区域资源与地理区位的择优选择,由此形成5条货运量较大的运输通道是云南省大宗货物运输的关键。货运资源与交通基础设施之间的矛盾,导致滇西边地区货运联系强度差异性显著。

(3) 节点城市的发展类型与经济、地理区位决定了大宗货物的公路运输格局。工业基础材料主要以滇中经济圈为中心向各地运输;金属、能源产品则由云南省的周边城市向滇中城市聚集。

(4) 通过云南省大宗货运网络组织及货运联系的空间特性分析,验证了复杂网络理论和空间分析方法是大宗货物公路运输网络特征提取的有效研究工具,所建立的大宗货物网络结构特征评价方法在区域公路运输领域具有较好的适用性。

参考文献:

References:

- [1] 严青. 基于联合运输的大宗货物货物流化发展探讨 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
YAN Qing. Discussion on Development of Freight Logistics of Bulk Cargo Based on Combined Transport [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [2] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective Dynamics of 'Small-world' Networks [J]. Nature, 1988, 393 (4): 440 - 442.
- [3] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science, 1999, 286 (15): 509 - 512.
- [4] 吴晋峰, 任瑞萍, 韩立宁, 等. 中国航空国际网络结构特征及其对入境旅游的影响 [J]. 经济地理, 2012, 32 (5): 147 - 152.
WU Jin-feng, REN Rui-ping, HAN Li-ning, et al. Chinese Aviation International Network and Its Impact on Inbound Tourism [J]. Economic Geography, 2012, 32 (5): 147 - 152.
- [5] 党亚茹, 李雯静. 基于网络视角的航空客流结构分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10 (5): 167 - 174.
DANG Ya-ru, LI Wen-jing. Air Passenger Flow Structure Analysis with Network View [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10 (5): 167 - 174.
- [6] 党亚茹, 彭丽娜. 基于复杂网络中心度的航空货运网络层级结构 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12 (3): 109 - 114.
DANG Ya-ru, PENG Li-na. Hierarchy of Air Freight Transportation Network Based on Centrality Measure of Complex Networks [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12 (3): 109 - 114.
- [7] 王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性 [J]. 地理学报, 2009, 64 (8): 899 - 910.
WANG Jiao-e, MO Hui-hui, JIN Feng-jun. Spatial Structural Characteristics of Chinese Aviation Network Based on Complex Network Theory [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64 (8): 899 - 910.
- [8] 王海江, 苗长虹. 中国航空联系的网络结构与区域差异 [J]. 地理科学, 2015, 35 (10): 1220 - 1229.
WANG Hai-jiang, MIAO Chang-hong. Network Structure and Regional Difference of Aviation Links in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35 (10): 1220 - 1229.
- [9] 戢晓峰, 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.
JI 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.
- [10] 戢晓峰, 普永明. 连片特困地区公路运输空间运行特征 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (7): 142 - 150.
JI Xiao-feng, PU Yong-ming. Spatial Operation Characteristics of Highway Transport in Concentrated Destitute Areas [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (7): 142 - 150.
- [11] 刘正兵, 戴特奇, 廖聪, 等. 中国城际公路货运空间网络特征: 基于“第一物流”网站数据 [J]. 经济地理, 2017, 37 (6): 28 - 35.
LIU Zheng-bing, DAI Te-qi, LIAO Cong, et al. The Characters of Intercity Freight Transport Networks in China: A Case Study on "FIRST CARGO" Platform [J]. Economic Geography, 2017, 37 (6): 28 - 35.
- [12] 戢晓峰, 李俊芳, 陈方. 基于社会网络分析的云南省自助游空间结构研究 [J]. 干旱区资源与环境,

- 2016, 30 (6): 204–208.
- Ji Xiao-feng, LI Jun-fang, CHEN Fang. Spatial Structure of Self-help Tourism in Yunnan Province Based on Social Network Analysis [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30 (6): 204–208.
- [13] 冷炳荣, 杨永春, 李英杰, 等. 中国城市经济网络结构空间特征及其复杂性分析 [J]. *地理学报*, 2011, 66 (2): 199–211.
- LENG Bing-rong, YANG Yong-chun, LI Ying-jie, et al. Spatial Characteristics and Complex Analysis: A Perspective from Basic Activities of Urban Networks in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66 (2): 199–211.
- [14] 孙玺菁, 司守奎. 复杂网络算法与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- SUN Xi-jing, SI Shou-kui. *Complex Network Algorithms and Applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [15] 戢晓峰, 刘传颖, 李杰梅. 旅游业驱动的区域航空网络时空演化特征 [J]. *经济地理*, 2017, 37 (11): 205–212.
- Ji Xiao-feng, LIU Chuan-ying, LI Jie-mei. Temporal-spatial Evolution Characteristics of Regional Aviation Network Driven by Tourism [J]. *Economic Geography*, 2017, 37 (11): 205–212.
- [16] 刘军. 整体网分析: UCINET 软件实用指南 [M]. 上海: 上海人民出版社, 2014.
- LIU Jun. *Lectures on Whole Network Approach: A Practical Guide to UCINET* [M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2014.
- [17] 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 Cong-ying, MA Rong-guo, WANG Yu-ping, et al. Characteristics and Structure Analysis of Urban Slow Mode Traffic Network [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11 (2): 72–78.
- [18] 苏宇. 社会网络中社区发现算法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- SU Yu. *Research on Community Discovery Algorithm in Social Networks* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [19] 王伟. 基于聚类分析的社会网络社团划分方法研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- WANG Wei, *Research on Social Network Community Division Method Based on Clustering Analysis* [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.
-
- (上接第 128 页)
- [7] 周炜, 张天侠, 崔海涛, 等. 轿车与公路护栏碰撞的有限元仿真 [J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34 (3): 298–309.
- ZHOU Wei, ZHANG Tian-xia, Cui Hai-tao, et al. Finite Element Simulation Study on Car Hitting Guardrails of Highways [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34 (3): 298–309.
- [8] 舒翔, 张晓晴, 黄小清, 等. 高速公路护栏系统的有限元优化分析 [J]. *公路交通科技*, 2006, 23 (5): 121–125.
- SHU Xiang, ZHANG Xiao-qing, HUANG Xiao-qing, et al. Finite Element Analysis on Optimum Design of Expressway Guardrail System [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23 (5): 121–125.
- [9] JTG F80/1—2004, 公路工程质量检验评定标准 [S]. JTG F80/1—2004, Standard for Quality Inspection and Assessment of Highway Engineering [S].
- [10] JTG F80/1—2017, 公路工程质量检验评定标准 [S]. JTG F80/1—2017. Standard for Quality Inspection and Assessment of Highway Engineering [S].
- [11] JTT 281—1995, 高速公路波形梁钢护栏 [S]. JTT 281—1995, Corrugated Sheet Steel Beams for Expressway Guardrail [S].
- [12] GBT 31439.1—2015, 波形梁钢护栏 第 1 部分: 两波形梁钢护栏 [S]. GBT 31439.1—2015, Corrugated Sheet Steel Beams for Road Guardrail—Part 1: W-beam Guardrail [S].
- [13] JTG D81—2017, 公路交通安全设施设计规范 [S]. JTG D81—2017, Design Specifications for Highway Safety Facilities [S].
- [14] BS-EN 1317-2: 2010, Road Restraint Systems - Part 2: Performance Classes, Impact Test Acceptance Criteria and Test Methods for Safety Barriers Including Vehicle Parapets [S].
- [15] 日本道路协会. 护栏的设置标准及说明 [S]. 东京: 日本道路协会, 2004. Road Association of Japan. Standards and Commentaries of Barriers Installation [S]. Tokyo: Road Association of Japan, 2004.
- [16] JTG B05—2013, 公路护栏安全性能评价标准 [S]. JTG B05—2013, Standard for Safety Performance Evaluation of Highway Barriers [S].
- [17] JTG B05—2015, 公路项目安全性评价规范 [S]. JTG B05—2015, Specification for Highway Safety Audit [S].
- [18] JTG H10—2009, 公路养护技术规范 [S]. JTG H10—2009, Technical Specifications of Maintenance for Highway [S].