

工业大宗物资的铁路物流网络空间结构特征研究

——以云南省为例

刘文龙^a 陈方^b 戢晓峰^a 刘小兰^{a1}

(昆明理工大学 a. 交通工程学院; b. 马克思主义学院, 云南 昆明 650504)

【摘要】: 为提取工业大宗物资铁路物流网络特征, 从物流网络流动格局、节点特征和运输轴线 3 个方面, 基于社会网络分析与空间分析方法构建了考虑流入—流出双向性的工业大宗物资铁路物流网络特征分析体系, 并以云南省为例, 利用云南省工业大宗物资的铁路货运全 OD 数据透视该省煤、金矿、钢铁、石油、化工等 5 类工业大宗物资铁路物流网络的组织结构、空间运输联系、网络节点和主要通道。结果表明: 云南省 5 类工业大宗物资物流网络组织均具有明显的小世界特性, 网络整体呈现放射状, 形成明显的集聚少核的空间分布格局, 运输走向“廊道效应”显著。

【关键词】: 铁路运输 工业大宗物资 网络结构 通道 社会网络分析

【中图分类号】: F532.8 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1005-8141(2022)02-0163-06

工业大宗物资运输直接关系到区域工业生产和经济发展, 构建高效的工业大宗物资物流网络对保障我国工业生产和经济稳定有着重要的现实意义。工业大宗物资物流是维持工业生产的低附加值原材料等物资按照市场需求进行大批量流动的过程。其中, 煤类、钢铁、石油、化工等工业大宗物资与社会生产息息相关, 更是一个地区经济持续发展的重要保障, 具有重要的战略意义^[1]。铁路运输承担了我国绝大部分工业大宗物资的运输任务, 在综合运输体系中的地位尤为重要。由于工业大宗物资存量和供销产业结构的不平衡性和铁路运输载运盛具的不通用性, 致使工业大宗物资铁路运输网络呈现典型性的单向流动特征, 运输成本居高不下。因此, 为分析工业大宗物资运输网络组织模式, 提高网络运行效率, 降低运输成本, 亟需透视各类工业大宗物资铁路运输网络, 剖析其网络空间结构特征。

近年来, 大宗物资物流在区域工业生产中的地位愈发重要。舒锦屏^[2]基于电子交易模式, 对大宗物资物流的节点、通道和流程进行了优化研究; 谷志刚^[3]为进一步优化大宗货物运输组织, 对大宗物资的需求特征进行了分析; 齐胜达、雷军、段祖亮等^[4]在区域物流空间现状的基础上, 通过测算区位商、引力强度等指标剖析了区域物流演化过程和空间网络结构。在区域货物运输组织特征相关研究中, 学者先后对货物运输网络结构特征进行了不同视角的探索。张玲、郝晶晶、戢晓峰^[5]在“流空间”的视角下, 从网络的层级结构特征和复杂性特征两方面构建了货物空间运输联系网络复杂结构特征提取方法; 左微、戢晓峰、李杰梅^[6]聚焦于大宗货物公路运输, 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; 张雪、戢晓峰、伍景琼^[7]构建了食用菌产业物流网络, 并从交通区位、经济情况、资源分布 3 方面建立了物流节点等级评价体系; 戢晓峰、普永明、郝京京等^[8,9]基于综合运输网络组织过程、网络层级结构、空间运输联系等多方面考虑, 以多个视角揭示了货物运输联系网络动态特征; 徐刚^[10]基于地区间 OD 联系对区域间铁路货物运输联系的区域性和层次性特征进行了分析; 任梦瑶、肖作鹏、王缉宪^[11]基于城际专线

作者简介: 刘文龙 (1996-), 男, 河南省周口人, 硕士研究生, 研究方向为交通运输地理与物流规划。陈方 (1980-), 女, 湖北省随州人, 博士, 副教授, 研究方向为社会地理。

基金项目: 中国工程院院地合作项目 (编号: 2019YNZD2); 国家自然科学基金项目 (编号: 71904068)

物流联系格局的研究，透视了各城市在网络中的职能差异；杨文龙、杜德斌、马亚华等^[12]立足于“一带一路”贸易网络，研究其拓扑性质、空间结构、节点邻近性等网络特征。在社会网络分析^[13]和空间分析^[14,15]领域，学者们在不同视角下做了多样探索。运输通道作为识别物流网络主要流向的网络轴线，也是探究其网络特征的重要视角之一，而目前运输通道识别的相关研究较为鲜见。Arseneva、徐朝丽、蔡文学^[16]采用皮尔森相关系数对吞吐量和进出口额的两变量相关性进行了解析，识别出粤俄海洋运输的主通道；孙正安、陈大伟、李旭宏^[17]借鉴图论方法，通过筛选 OD 矩阵运量大的一条或多条路径，与区域城镇、产业、交通轴线相匹配，识别出运输主通道。综上，工业大宗物资的现有研究鲜有关其区域物流网络及优化问题，而工业大宗物资物流网络已是制约区域工业发展的重要因素。因此，对工业大宗物资铁路物流网络进行理论研究具有重要的现实意义。

基于此，本文聚焦于工业大宗物资铁路物流网络特征分析，综合考虑网络结构、空间组织、联系强度和运输类型等，构建了工业大宗物资铁路物流网络空间结构特征分析体系，并基于云南省铁路货运全 OD 数据，对该省石油、钢铁、化工、煤、金矿 5 类工业大宗物资铁路物流网络特征进行了剖析，以期对物流基础设施规划和工业大宗物资运输规划提供理论基础。

1 研究方法、研究区域及数据来源

1.1 研究方法

为了提取工业大宗物资铁路物流网络空间结构特征，本文基于物流网络流动格局、节点特征和运输轴线 3 个方面构建了工业大宗物资铁路物流网络空间结构特征分析体系（图 1）。从图 1 可见：首先，借鉴社会网络分析方法提取物流网络的网络密度、平均度、平均路径长度、平均聚类系数等网络整体连通性指标和中心度、点入度、点出度等节点中心性指标，利用 GIS 空间分析和 Gephi 统计分析等技术提取物流网络结构特征，并识别出物流网络的主要通道。其次，结合物流网络联系特征的动态数据和整体连通性的静态指标，挖掘出物流网络的流动格局。同时，基于物流网络的节点中心性指标，采用自然断点法揭示各城市节点的中心性和运输类型，并将代表物流网络轴线的主要通道进行了可视化处理。最后，通过物流网络流动格局、节点特征、运输轴线 3 个方面对工业大宗物资铁路物流网络的组织结构、运输联系、网络节点及主要通道等空间结构特征进行了剖析。

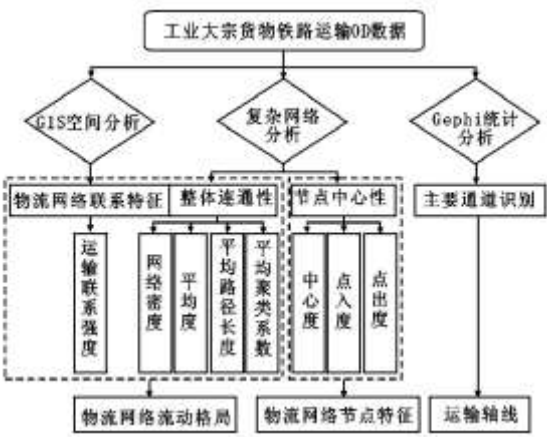


图 1 工业大宗物资铁路物流网络特征分析体系

物流网络静态特征指标：本文借鉴社会网络分析方法在小世界特性网络^[18]、无标度特性网络^[19]和网络节点^[20,21,22]等方面的研究，选取网络密度、平均度、平均路径长度、平均聚类系数共 4 项指标以科学评估物流网络的整体连通性，并提取网络节点中心度指标以衡量网络中各节点的中心性和支配权。

运输联系强度动态特征：为科学度量物流网络中各节点货物运输联系强度，参考相关研究成果，本文提取物流网络中两运输

节点间的双向实际货运量来衡量，表达式为：

$$S_{ij} = E_{ij}W_{ij} + E_{ji}W_{ji} \dots\dots\dots (1)$$

式中， S_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的货物运输联系强度； W_{ij} 和 W_{ji} 分别表示 i 节点至节点 j 、节点 j 至节点 i 的货运量 (t)； E_{ij} 和 E_{ji} 表示节点 i 和 j 节点之间的运输联系。若节点 i 和节点 j 之间的存在运输联系，则 $E_{ij}=1$ ；若节点 i 和节点 j 之间不存在运输联系，则 $E_{ij}=0$ 。 E_{ji} 同理。

主要运输通道识别：为了分析铁路物流网络的主要走向及轴线特征，本文基于物流网络中各节点间货物运输联系强度，采用序列分析法识别出运输联系强度高、联系紧密的前 5%运输通道作为该运输联系网络中的主要通道。

1.2 研究区域

本文以云南省为案例，选取 OD 点位于云南省的铁路物流网络作为研究对象。云南省位于我国西南边境地区，由于我国资源分布的区域地理性，工业大宗货物多为长距离运输，铁路运输是主要的运输方式。在云南省提取运量排名前 5 位的工业大宗物资分别为煤、金矿、钢铁、石油、化工，共占铁路运输总量的 61.03%。煤、金矿、钢铁、石油、化工等 5 类工业大宗物资均服务于云南省重点发展产业，也是保障云南省经济发展与社会稳定的重要战略物资。因此，本文选取云南省煤、金矿、钢铁、石油、化工等 5 类工业大宗物资物流网络为研究实例，具有较强的代表性。

1.3 数据来源及预处理

本文数据来源于 2018 年云南省铁路货运全 OD 数据，通过字段筛选，从 26 类运输货物中整理出 2018 年全年煤、金矿、钢铁、石油、化工等 5 类工业大宗物资的运输数据，共 23088 条。数据涵盖 OD 点位于云南省的全国工业大宗物资铁路运输联系，数据内容含有运输的货物类种类、起讫站点、货物重量等，是基于该区域范围内的货运站点形成的运输海量数据，能够在一定程度上表征云南省阶段性的工业大宗物资铁路物流网络。本文在数据处理的过程中，以地级市作为研究单元，并将地级市行政管辖范围内合并为 1 个节点，如将昆明市主城五区、安宁市、禄劝县等合并为昆明市辖区（以下简称为“昆明节点”）。

2 实证结果及分析

2.1 网络流动格局

物流网络静态特征指标分析：根据上述社会网络分析方法，测算煤、金矿、石油、钢铁、化工等 5 类工业大宗物资铁路物流网络的网络密度、平均度、平均度、平均路径长度、平均聚类系数，以分析各类工业大宗物资铁路物流网络的紧密性、通达性、运输效率、集聚性等指标。(1)5 类工业大宗物资铁路物流网络密度均较低，各个城市节点间的运输联系紧密性较差；区域的整体物流网络较为疏散，物流网络整体功能有待提高。5 类工业大宗物资铁路物流网络的平均度为 2.14，表示平均 1 个节点与 2.14 个其他节点取得运输联系，物流网络中货物之间交流不明显。其中，煤类物流网络平均度最高，物流网络密度最大，城市节点间运输联系最密切。(2)5 类工业大宗物资铁路物流网络平均路径长度均远小于同规模随机网络路径长度的理论值，网络的运行效率较高，各个网络的运输效率由高到低依次为石油、钢铁、化工、煤、金矿。5 类工业大宗物资铁路物流网络平均聚类系数均高于同规模随机网络聚类系数的理论值，表现出较强的运输集聚性，各个网络的运输集聚强度由高到低依次为煤、钢铁、化工、石油、金矿。通过对比分析得出：5 类工业大宗物资铁路物流网络均表现出明显的小世界网络特性，网络整体通达性和运输效率较高，且具有较强的集聚性。

物流网络运输联系特征：通过对石油、钢铁、化工、煤、金矿 5 类工业大宗物资铁路物流网络中各节点间的运输联系强度进行计算，利用 ArcGIS 空间分析技术和弦图对各类工业大宗物资的地理网络和拓扑网络进行可视化处理，透视 5 类工业大宗物资铁路物流网络（图 2—6）。通过对 5 类工业大宗物资铁路物流网络对比分析，发现其运输联系具有很多异同特征。

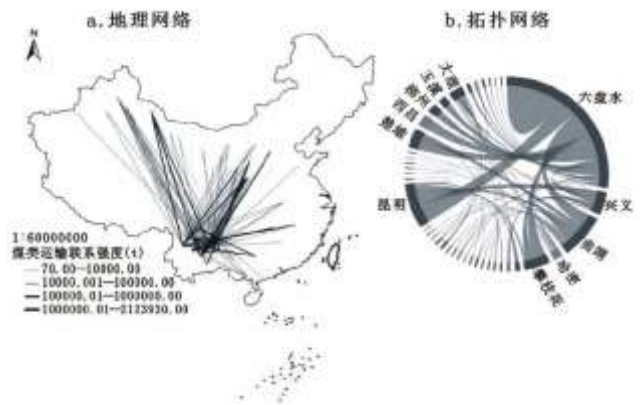


图 2 云南省煤类物资铁路物流网络

注：底图来自国家测绘地理信息局标准地图服务网站，审图号为 GS(2016)1584 号，图 3—6 同。

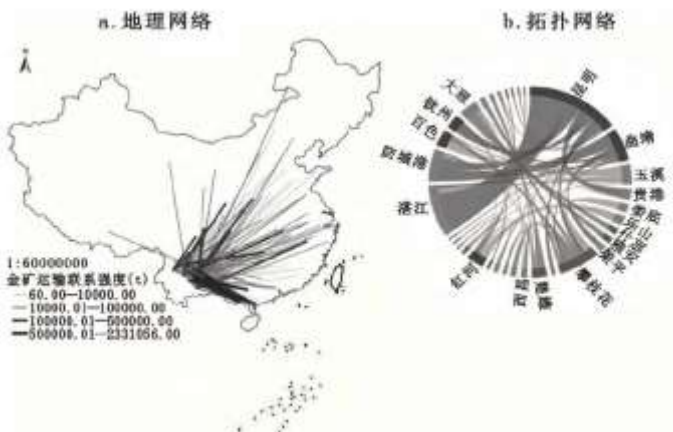


图 3 云南省金矿物资铁路物流网络

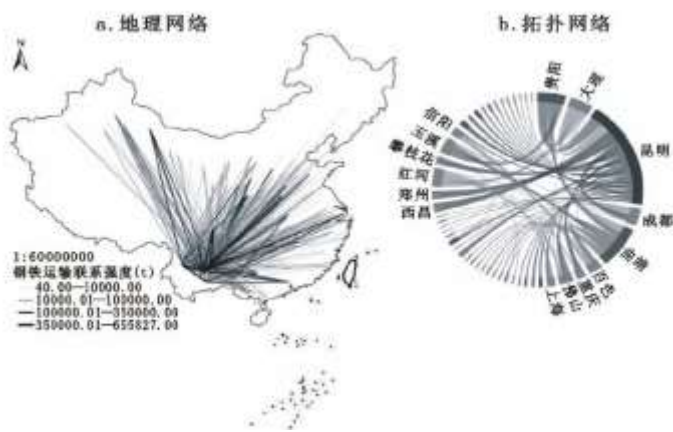


图 4 云南省钢铁物资铁路物流网络

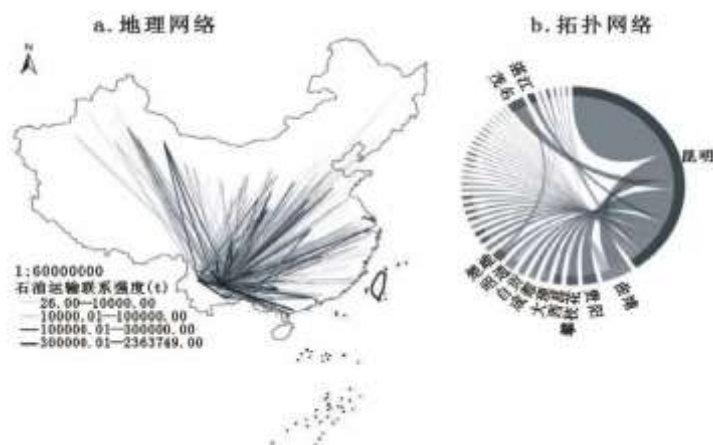


图 5 云南省石油物资铁路物流网络

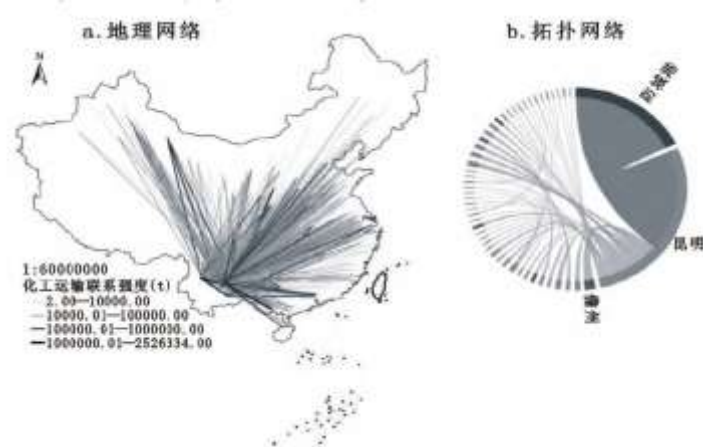


图 6 云南省化工物资铁路物流网络

具体表现为：(1) 云南省煤类物资铁路物流网络如图 2 所示。煤类物流网络形成了以六盘水、曲靖、大理三核心向全国辐射的运输格局，具有运量大、平均运距远、辐射范围广等特征。省内外间的煤类运输联系密切，对于省外运输联系，主要辐射我国西北、中部和南部地区；对于省内运输联系，核心节点城市占据主导地位，省内运输网络区域化态势显著，呈现出较强的集聚性。(2) 云南省金矿物资铁路物流网络如图 3 所示。金矿是指具有足够含量黄金并可工业利用的含金矿物体，金矿物流网络形成以昆明、曲靖、红河等节点为多核心向云南省内外辐射的运输格局，具有平均运距较远、单次运输量大、辐射范围集中等特征。对于省外运输联系，主要辐射我国南部、中部地区，防城港、湛江等城市为重要节点；省内的运输联系较少且有较强的集聚性，集中在东部地区，昆明、大理、红河等地之间的运输联系密切。(3) 云南省钢铁物资铁路物流网络如图 4 所示。云南省钢铁物流网络形成昆明市、曲靖、红河等多核心向全国辐射的运输格局，具有辐射范围广、平均运距较长等特征。对于省外运输联系，钢铁运输形成明显的圈层结构，与邻近地区的运输量大，与较远地区的运量相对较小。对于省内运输联系，昆明、曲靖地区的核心控制力较强，且较多与大理、红河等地区之间进行运输往来，有较强的集聚性。(4) 云南省石油物资铁路物流网络如图 5 所示。云南省石油运输形成以昆明市为唯一核心的点—辐式网络，具有平均运量较小、集聚性强等特征。云南省石油加工产业集中，石油运输呈现出显著的集聚特征。昆明为石油运输网络的唯一核心，具有明显的圈层结构特征。(5) 云南省化工物流网络如图 6 所示。云南省化工物流网络呈现出以昆明为核心向全国辐射的核心主导型运输格局，辐射范围广，平均运距 1183.15km。化工运输网络

中，昆明是云南省内外物流往来的主要核心节点。(6)通过对 5 类工业大宗物资铁路物流网络对比分析，发现其具有相同特征：一是 5 类物流网络整体均呈现放射状，形成明显的集聚少核的空间分布格局，区域化态势显著；二是从省内运输空间结构来看，工业大宗物资运输联系整体形成了“东低、中高、西部塌陷”的空间分布格局，运输走向呈现出显著的“廊道效应”；三是从省内运输联系来看，各类工业大宗物资运输联系呈现出核心不同的圈层结构，具有较强的集聚性，且核心城市多集中在城镇化发展水平高、区位优势度强、相关产业发展势头旺的昆明、曲靖、大理等滇中地区；四是从与省外运输空间结构来看，运输格局整体呈现“西南、西北、华东较高，华北地区较低”的分布态势，运输辐射范围较广；五是从与省外运输联系来看，形成以滇中、滇东北区域为核心向全国呈放射状的对外运输格局，且运输联系表现出“近密远疏”特征。

2.2 网络节点特征

本文利用社会网络分析方法计算出云南省各个城市节点在 5 类工业大宗物资铁路物流网络中的加权度、加权出度、加权入度 3 项指标，揭示了云南省各城市节点特征。对物流网络中节点加权度采用自然断点法，利用节点加权度，将各类网络节点划分为 I 型、II 型中心城市；对各节点的加权出度和加权入度对比分析，加权出度大于加权入度的节点为输出型城市，反之为输入型城市，得出各城市节点的运输类型（图 7）。

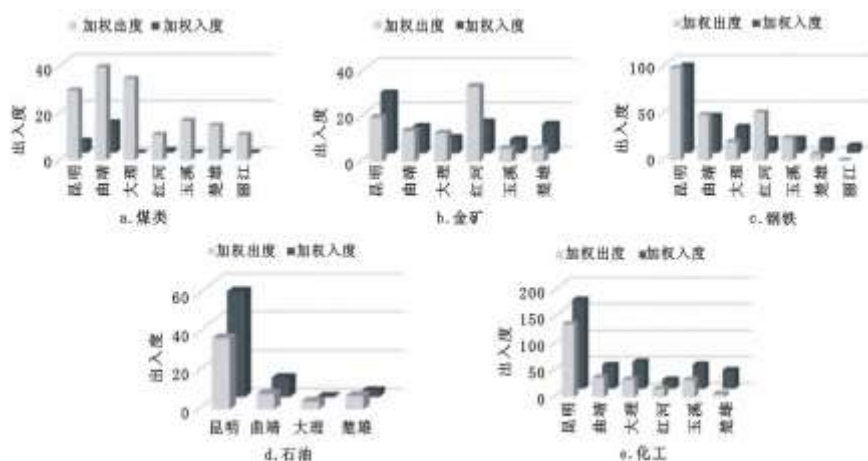


图 7 城市节点加权出入度对比

图 7 可见：(1)通过综合分析各城市节点在 5 类工业大宗物资运输网络中的中心程度，可以发现昆明节点是云南省工业大宗物资铁路物流的主要城市，曲靖节点是除昆明节点外的工业大宗物资铁路物流的次主要城市。(2)5 类工业大宗物资中，煤、金矿、钢铁、化工 4 类物资在云南省的主要市州内运输联系密切，运输分布具有较广的分布性；而石油运输主要分布在昆明和曲靖两个地区，集聚性较强。(3)5 类工业大宗物资运输类型各异，煤炭运输以输出型为主，金矿、钢铁、化工运输类型为输入兼输出型，石油运输以输入型为主。

2.3 网络主要通道识别

5 类工业大宗物资运输联系符合“二八定律”，即在物流网络中，极少数的运输通道承担着大多数的运输量。5 类工业大宗物资铁路物流网络中，均以不到 5%的实际运输通道担负着物流网络中超过 50%的运输量。选取以 OD 点位于云南省的铁路物流网络为研究对象，提取各工业大宗物资铁路物流网络中运量前 5%的运输通道作为主要通道，利用 Gephi 软件对 5 类工业大宗货物铁路运输的主要通道运量归一化处理，以不同连线的粗细代表运量的大小，进行可视化处理，结果如图 8 所示。

5 类工业大宗物资主要通道联系网络均表现出显著的圈层结构和“中心—腹地”特征，各工业大宗物资以中心城市为主导与腹地城市之间进行运输联系，形成主要运输联系圈。具体表现为：(1) 由于我国资源与产业布局的区域地理性，煤运输总体呈现“西煤东运、北煤南运”趋势。(2) 金矿、钢铁、石油、化工物流网络均以昆明节点为中心城市。(3) 石油运输主要通道联系网络的结构特征最为显著，以昆明节点为唯一中心对云南省内的运输腹地进行物流往来。(4) 钢铁运输主要通道的联系网络中形成以昆明节点为主中心，曲靖节点为次中心的双中心运输格局，联系节点城市较多，运输网络格局较为分散。

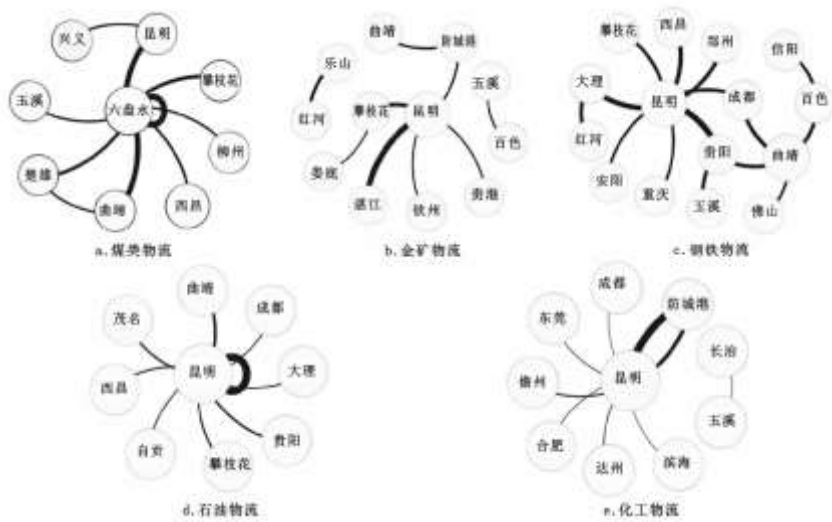


图 8 5 类工业大宗物资铁路物流网络主要通道

3 结论与对策建议

3.1 结论

本文从物流网络流动格局、节点特征、运输轴线 3 个角度“动静结合”构建了工业大宗物资铁路物流网络空间结构特征分析体系，并以云南省煤、金矿、钢铁、石油、化工等 5 类工业大宗物资铁路物流网络为例，利用社会网络分析理论、ArcGIS 空间分析、Giphi 统计分析技术透视出工业大宗物资铁路物流网络空间结构特征，主要结论如下：(1) 5 类工业大宗物资铁路物流网络流动格局同中有异。相同之处在于：网络整体连通性网络密度较低、联系紧密性较差、整体通达性和运输效率较高，表现出显著的小世界网络特性。物流网络整体呈现放射状，形成明显的集聚少核的分布格局，“廊道效应”显著；云南省内物流网络整体形成了“东低、中高、西部塌陷”的空间分布格局，省外运输格局整体呈现“西南、西北、华东较高，华北地区较低”的分布态势。不同之处在于：相关产业的空间分布格局造成不同工业大宗物资铁路物流网络的核心不同；物流网络空间组织的集散程度不同，致使各物流网络的平均运距有差异。(2) 昆明市作为云南省的政治、经济和交通中心，对工业大宗物资物流具有较强主导性，是控制 5 类工业大宗物资的 I 型中心城市。云南省各类工业大宗物资铁路物流类型各异，煤类物流以输出型为主，金矿、钢铁、化工物流为输入兼输出型，石油运输以输入型为主。(3) 5 类工业大宗物资铁路物流符合“二八定律”，且表现出显著的圈层结构和“中心—腹地”特征，各类工业大宗物资铁路物流网络的主要运输轴线和方向较为明显。

3.2 建议

基于上述研究结论，本文对提升工业大宗物资铁路物流网络运行效率提出建议：一是要加快铁路基础设施建设，加密铁路运输网络；二是要制定运输载运盛具标准，减少返程空载率；三是要增强各个节点城市之间运输联系，增设主要节点城市，形成多核心运输网络。

参考文献:

- [1]于梦曦. 国家战略物资储备体系研究[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2015.
- [2]舒锦屏. 电子交易平台下的大宗物资物流解决方案优化研究[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2013.
- [3]谷志刚. 铁路大宗货物运输需求特征探析[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(S1): 78-83.
- [4]齐胜达, 雷军, 段祖亮, 等. 中国丝绸之路经济带区域物流空间差异及其演化研究[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 207-215.
- [5]张玲, 郝京京, 戢晓峰. 城际货物运输联系的网络特性及空间组织优化研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(1): 150-158.
- [6]左微, 戢晓峰, 李杰梅. 大宗货物公路运输网络结构特征提取[J]. 公路交通科技, 2019, 36(9): 140-149.
- [7]张雪, 戢晓峰, 伍景琼. 云南省食用菌产业物流网络研究[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(3): 36-40.
- [8]戢晓峰, 普永明, 伍景琼, 等. 云南省国际道路货物运输空间联系特征[J]. 地域研究与开发, 2016, 35(4): 36-40.
- [9]戢晓峰, 郝京京. 基于多源数据的货物空间运输联系特征及形成机制[J]. 公路交通科技, 2016, 33(7): 153-158.
- [10]徐刚. 地区间铁路货物运输 OD 分布特征分析[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(2): 118-121.
- [11]任梦瑶, 肖作鹏, 王缉宪. 中国城际专线物流网络空间格局[J]. 地理学报, 2020, 75(4): 820-832.
- [12]杨文龙, 杜德斌, 马亚华, 等. “一带一路”沿线国家贸易网络空间结构与邻近性[J]. 地理研究, 2018, 37(11): 2218-2235.
- [13]刘婵娟, 胡志华, 杨正璇. 基于社会网络的全球集装箱海运网络层次体系与派系划分[J]. 世界地理研究, 2019, 28(6): 68-76.
- [14]Zeraatpisheh M, Ayoubi S, Sulieman M, et al. Determining the Spatial Distribution of Soil Properties Using the Environmental Covariates and Multivariate Statistical Analysis: A Case Study in Semi-arid Regions of Iran[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(4): 551-566.
- [15]涂建军, 毛凯, 况人瑞, 等. 长江经济带三大城市群城际客运联系网络结构对比分析[J]. 世界地理研究, 2021, 30(1): 69-79.
- [16]Arsenva A, 余朝丽, 蔡文学. 粤俄贸易海洋运输主通道识别与未来影响分析[J]. 物流科技, 2015, 38(5): 146-150.
- [17]孙正安, 陈大伟, 李旭宏. 基于 OD 分布的运输通道识别方法[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(3): 116-123.
- [18]Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of ‘Small-world’ Networks[J]. Nature, 1998, 393(4): 440-442.

[19]Barabasi A L,Albert R.Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science,1999,286(15) : 509–512.

[20]Kraetke S.How Manufacturing Industries Connect Cities Across the World:Extending Research on Multiple Globalizations' [J].Global Networks-A Journal of Transnational Affairs,2014,14(2) : 121-147.

[21]Alderson A S,Beckfield J.Power and Position in the World City System[J]. American Journal of Sociology,2004,109(4) : 811-851.

[22]Rozenblat C,Zaidi F,Bellwaid A.The Multipolar Regionalization of Cities in Multinational Firms' Networks[J].Global Networks-A Journal of Transnational Affairs,2017,17(2) : 171-194.