

中文引用格式: 何雨琪, 魏婉莹, 蔡梦思, 等. 招标交易大数据下疫苗供应链知识图谱构建与网络分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 52-59.

英文引用格式: HE Yuqi, WEI Wanying, CAI Mengsi, et al. Construction and network analysis of knowledge graph of vaccine supply chain based on big data from tender transactions[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 52-59.

招标交易大数据下疫苗供应链知识图谱 构建与网络分析*

何雨琪, 魏婉莹, 蔡梦思, 谭索怡, 郑慧君, 吕欣**教授
(国防科技大学 系统工程学院 湖南长沙 410073)

中图分类号: X913; C931

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1067

基金项目: 国家自然科学基金资助(92467302, 72025405, 72301288, 72301285, 72421002); 中国工程院重大咨询项目(2022JB01); 湖南省自然科学基金资助(2023JJ40685)。

【摘要】 为解耦产业链供应链结构复杂性, 应对系统性风险和提升供应链韧性。依托招标交易大数据, 以疫苗领域为例, 设计供应链知识图谱构建思路, 系统构建供应链知识图谱。在此基础上, 运用复杂网络技术探究中国 2011—2023 年疫苗产业链供应链网络脆弱性和潜在安全风险。研究内容涵盖产业链复杂知识查询、城市度分布格局研究以及供应链风险模拟与分析。结果表明: 疫苗产业链在空间分布上存在不平衡现象, 具体体现在东部与西部地区之间的差异上; 疫苗生产结构呈现高度依赖性, 约 61.3% 的疫苗种类依赖单一生产商或境外代理商; 高中心性生产厂商为疫苗供应链网络的潜在风险点, 干扰约 33 家生产企业会严重阻碍疫苗的供给; 与核心城市相比, 网络中地位较低的城市如重庆、大连、深圳和沈阳的累计效应, 对疫苗流通效率的影响更为显著。

【关键词】 招标交易大数据; 疫苗供应链; 知识图谱; 复杂网络; 安全风险

Construction and network analysis of knowledge graph of vaccine supply chain
based on big data from tender transactions

HE Yuqi, WEI Wanying, CAI Mengsi, TAN Suoyi, ZHENG Huijun, LYU Xin

(School of Systems Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: To decouple the structural complexity of industrial and supply chains, address systemic risks, and enhance supply chain resilience, bidding transaction big data was employed. Taking the vaccine sector as an example, a framework for constructing a supply chain knowledge graph was designed, and a systematic supply chain knowledge graph was established. On this basis, complex network techniques were applied to examine the vulnerability and potential security risks of China's vaccine industry supply chain network from 2011 to 2023. The research encompassed complex knowledge queries of the industrial chain, an analysis of city degree distribution patterns, and simulations and analyses of supply chain risks. The

* 文章编号: 1003-3033(2025)10-0052-08; 收稿日期: 2025-06-14; 修稿日期: 2025-08-18

** 通信作者: 吕欣(1984—), 男, 湖南常德人, 博士, 教授, 主要从事应急管理、数据挖掘、移动计算等方面的研究。E-mail: xin.lu.lab@outlook.com。

study shows that the vaccine industry chain exhibits spatial imbalance, particularly between eastern and western regions. The production structure is highly dependent, with approximately 61.3% of vaccine varieties relying on a single manufacturer or overseas agent. Manufacturers with high centrality constitute potential risk points within the vaccine supply chain network, where disruptions to about 33 enterprises significantly hinder vaccine supply. Compared with core cities, the cumulative effects of cities with lower network status, such as Chongqing, Dalian, Shenzhen, and Shenyang, have a more pronounced impact on the efficiency of vaccine circulation.

Keywords: tender transaction big data; vaccine supply chain; knowledge graph; complex network; security risks

0 引言

随着分工合作的深化,产业链供应链日趋复杂,逐渐形成了主体分散、层级众多、链条长、耦合复杂的网络。这种复杂性,加之交易双方信息的不对称性以及外界环境的不确定性,导致供应链面临的风险急剧上升,并呈现出过程隐蔽化、中断突然化、破坏扩大化的趋势^[1]。疫苗是预防传染性疾病传播的关键防线,对保护国民生命健康和维护社会安全稳定具有重大意义。

在一般供应链中,隐藏着诸多风险因素,包括供给风险、需求风险、政策风险、基础设施风险和自然灾害风险等^[2]。而疫苗作为高风险的生物制品,其质量安全和供应链的稳定性更容易受到环境波动的负面影响^[3]。在生产计划环节,由于供应链层级众多、信息不对称等原因,生产计划难以跟上需求端的波动,导致疫苗短缺现象。后续又因牛鞭效应,疫苗需求量沿供应链向上游走逐级放大,导致疫苗浪费事件的发生^[4]。在生产环节,部分厂商,如长春长生制药有限公司,因缺乏有效监管,被发现存在伪造生产记录、使用过期原液等违规行为^[5]。该监管疏漏导致数百万剂不合格疫苗流入市场,致使多人残疾、死亡。在运输环节,冷链仓储配送不当会阻碍产品的安全供给^[6]。山东公安曾查获数亿元因运输、仓储条件不符合国家规定而失效的疫苗^[7]。综上,疫苗计划、生产和流通中存在多个潜在风险,需要深入解构产业链结构以提前预警。当前实践通常通过传统技术,如构建关系数据库来管理供应链。然而这些技术通常依赖于有限的数据来源和较为基础的数据整合方式,可见视图有限。因此,需要引入新技术手段来改善疫苗供应链的可见性。

知识图谱是在语义网络的基础上发展起来的一种图形化的知识表示方法,它的出现为揭示产业链供应链结构、进行供应链知识管理提供了新的思路。

近年来,一些学者将知识图谱、大数据及人工智能技术应用于行业知识管理^[8]。如 KOSASIH 等^[9]以交通运输行业为例,采用图神经网络方法挖掘采购环节供应商之间的相互依赖关系信息。WICHMANN 等^[10]使用知识图谱技术研究了“供应商-生产厂家-销售方”网络结构。北京航天情报与信息研究所提出航天制造领域的供应链知识图谱框架设计,为建立航天装备知识图谱,实现航天制造供应链智能化管理提供帮助^[11]。由此可见:当前供应链知识图谱研究已取得初步进展。但这些研究多聚焦于供应链的局部或短链分析,而对整体或长链供应链的深入探索则相对欠缺。多数研究依赖于文献资料或单一企业的数据,导致研究成果的客观性与普适性受限。

鉴于此,笔者拟提出一个涵盖产业链供应链基本路径的图谱框架,利用企业招标交易大数据,结合其他知识库数据构建图谱;并在此基础上,利用复杂网络技术解耦疫苗产业链结构,识别关键企业与薄弱环节,进而揭示疫苗供应链存在的潜在安全风险,以为相关政策制定与监管决策提供科学依据和参考。

1 疫苗供应链数据采集与研究设计

1.1 疫苗供应链数据采集

考虑到供应链信息难获取、数据质量难保证等难点问题,笔者设计了供应链知识图谱的构建思路,从多个官方数据源获取疫苗招标交易大数据并结合其他知识库来构建知识图谱。

首先,从国家药品监督管理局获取截止 2023 年 12 月 31 日的 352 份备案疫苗数据,数据涉及 51 家国内生产企业和 5 家境外疫苗厂商代理机构的 106 种产品。随后,通过全国公共资源交易平台、30 个省级药品监督管理局(除香港、澳门、台湾、内蒙古)等官方数据公开平台,以及国内大型招标、工商信息网站,如标找找和企查查,得到国内 25 家生产企业

的部分采购数据、53 家生产企业的销售资料以及 52 家生产企业的冷链运输委托,时间跨度为 2011—2023 年。尽管因企业披露不足,导致上游采购信息存在一定程度的缺失(25/51),但在数据搜集方面仍取得了显著的进展。具体而言,采购数据涵盖国内全部上市、大型生产企业以及部分中型生产商。在划分企业规模时,参考中国国家统计局发布的企业规模划分标准。在已备案的 56 家国内生产和代理机构中,销售资料和冷链运输委托的收集率分别达到 94%和 92%。最终,从多个互联网数据库汇总了 16 320 条数据。

1.2 疫苗供应链网络分析指标体系

首先,采用自顶向下方法,依据疫苗供应链本体设计和招标交易大数据,系统构建供应链知识图谱。其次,鉴于复杂网络理论在解析高度互联复杂系统方面的有效性,在知识图谱构建的基础上采用复杂网络方法,剖析中国 2011—2023 年疫苗产业链供应链网络结构。研究内容涵盖产业链复杂知识查询、城市度分布格局研究以及供应链风险模拟与分析。在网络分析过程中,采用度中心性、中介中心性、邻域社区相异中心性、Domirank 等中心性指标以及连通片比例等结构性指标,探讨供应链的结构特征和行为模式。

1.2.1 中心性指标

度中心性(Degree Centrality,DC)又称为度,它通过计算节点与其他节点的连接数量评估节点中心性,该指标反映企业合作的紧密程度,其表达式如下:

$$DC_u = \sum_v A_{uv} \tag{1}$$

式中: N 为网络节点个数; A 为邻接矩阵; A_{uv} 为节点 u 到节点 v 的连接情况。

介数中心性(Betweenness Centrality,BC)通过测度经过该节点的最短路径数量来衡量其在网络中的地位。尽管一个企业仅与少数节点直接相连,但它可能因为在不同企业之间充当“桥梁”作用,而具有较高的 BC。其表达式如下:

$$BC_h = \sum_{u \neq h \neq v} \frac{\sigma_{uv}(h)}{\sigma_{uv}} \tag{2}$$

式中: $\sigma_{uv}(h)$ 为节点 u 到节点 v 的最短路径中经过节点 h 的数量; σ_{uv} 为节点 u 到节点 v 的最短路数。

邻域社区相异中心性(Neighborhood Dissimilarity Centrality,NCDC)通过评估节点的邻域相异性和社团异质性衡量节点的重要性^[12]。高

NCDC 值的企业通常是连接不同社区的关键桥梁,对提高供应链在面对恶意攻击和中断时的稳健性起着决定性作用。其表达式如下:

$$NCDC_u = \frac{1}{k_u} \sum_{v \in \tau_u} (|\tau_u - \tau_v| \alpha) \begin{cases} \alpha = 1 \text{ if } c_u \neq c_v \\ \alpha = \beta \text{ if } c_u = c_v \end{cases} \tag{3}$$

式中: k_u 为节点 u 的度; τ_u 为节点 u 的邻居集合; $|\tau_u - \tau_v|$ 为 τ_u 中不属于 τ_v 的节点数量; c_u 为节点 u 所在的社区标签; α 为不同社区的链接影响; β 为惩罚系数。

DomiRank 是融合邻域竞争机制的中心性指标,通过综合局部与中尺度网络信息来评估节点重要性^[13]。高 DomiRank 得分的节点通常是那些被大量低度节点所包围的节点,它能通过与其他间接节点的协同作用,影响整个网络的稳定性和功能性。Domirank 被定义为 $\Gamma \in R_{N \times 1}$,下式是 $\Gamma \in R_{N \times 1}$ 的稳态解:

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d\Gamma(t)}{dt} = \varepsilon(A\theta I_{N \times 1} - A\Gamma(t)) - \Gamma(t), \tag{4}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\Gamma(t)}{dt} = 0$$

式中: $\varepsilon, \theta \in R^+$ 为给定参数; λ 为负特征值。

1.2.2 结构性指标

最大连通片比例通过计算最大连通子图节点数量与网络总节点数的比值来衡量网络的稳定性,该比例的下降幅度反映网络在受到攻击后连通性的变化程度。其表达式如下:

$$G = \frac{N'}{N} \tag{5}$$

式中 N' 为网络在遭受攻击后,最大连通子图中的节点数。

2 疫苗供应链知识图谱构建

2.1 知识图谱架构

疫苗产业链是指围绕产品生产、流通而形成的资源和活动网络,大体上可分为上游原材料供应、中游制造商生产以及下游运输和销售^[14]。根据产业链的特点,设计 9 种实体类型,如采购、生产、销售、委托配送等关系类型。上述实体分为 2 类定义:①企业类型实体,包括供应商、生产厂商、冷链物流和客户 4 种。②辅助知识查询和网络分析的非企业类型实体,包括产品、客户类型、原材料及设备、资质证书及地区等 5 类实体。图谱架构如图 1 所示,其中图中的节点代表产业链网络中的实体,节点之间

的连线表示实体之间的关系。

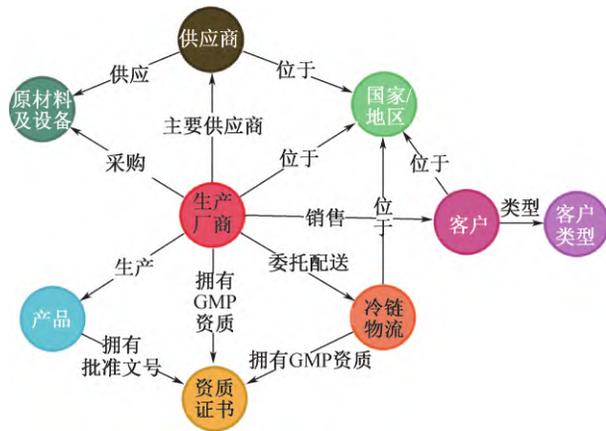


图 1 疫苗供应链知识图谱架构
Fig.1 Vaccine supply chain knowledge graph architecture

2.2 知识图谱构建

在本体框架设计的基础上,进一步采用知识抽取技术识别实体及实体间关系,从招标交易大数据中获取有价值的知识。

在自然语言处理中,实体和关系的抽取模型主要依靠基于规则(词典和正则匹配)、长短期记忆网络、双向长短期记忆网络、条件随机场、生成式预训练模型(Generative Pre-trained Transformer, GPT)等技术,通过人工标注招标数据生成标注数据集,并在上述算法上进行测试,发现上述模型效果均不如基于规则的方法,因此在处理招标、交易数据时,使用基于词典和正则匹配的方法进行知识抽取,并将最终结果与 ChatGPT 4.0 进行校验,其匹配度高达 98%,说明抽取结果的准确性。剔除无关、重复数据后,将其导入 Neo4j、Gephi 图数据库,得到 2 750 个实体节点和 7 282 关系,如图 2 所示。



图 2 疫苗供应链知识图谱
Fig.2 Vaccine supply chain knowledge graph

3 供应链知识图谱网络分析及应用

利用图数据库和复杂网络方法从供应链知识查询、产业链城市分布格局研究、供应链风险模拟等角度,评估产业链供应链脆弱性,探讨潜在的安全风险。

3.1 供应链知识查询与分析

以疫苗接种知识查询为例,展示供应链复杂知识查询,从而辅助相关人员进行疫苗安全性的判断。

疫苗从生产到接种人群经历了一系列的环节和步骤,其中,存在诸多导致疫苗失效的因素。接种人群可通过图谱查询疫苗产品和运输企业资质,判断自己接种疫苗的安全和有效性。如疫苗接种人员可通过生产、拥有药品经营质量管理规范(Good Supply Practice, GSP)资质关系查询,了解疫苗的产品信息,初步判断其产品质量,如图 3 所示。此外,运输企业也是影响疫苗安全的重要一环,接种人群可通过委托运输、拥有药品生产质量管理规范(Good Manufacturing Practice of Medical Products, GMP)资质关系检索运输企业的资质和企业信息,判断此企业是否可靠。GSP 和 GMP 分别评估疫苗生产和运输的合规情况,若资质过期则说明存在安全风险。

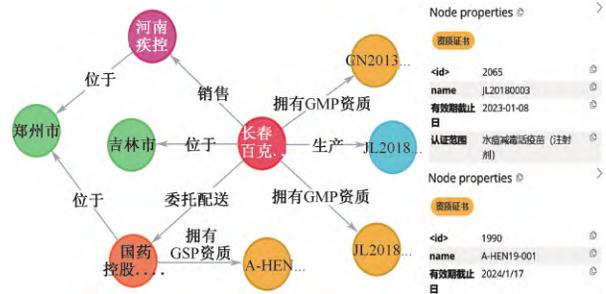


图 3 疫苗生产-流通过程知识查询
Fig.3 Vaccine production and distribution knowledge search

3.2 产业链城市分布格局研究

以供应商、生产厂商、冷链物流和客户企业注册地所在的地级市为节点,构建城市分布网络进行产业链城市分布格局研究。网络中包含 149 个城市节点,3 912 条贸易关系,节点的大小取决于节点的度,度数越高节点越大,如图 4 所示。由图 4 可知:疫苗产业链网络由几大主要城市群形成,包括京津冀地区、珠江三角洲以及长江中下游城市群等。网络中的核心城市(高度节点),即北京、上海、长春、沈阳、武汉、深圳、成都、重庆、昆明和兰州等,呈现中东部

群集分布,西部分散分布的空间特点。

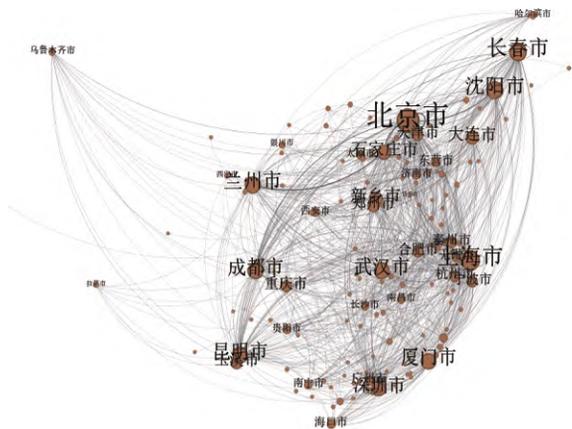


图4 疫苗产业链城市分布网络

Fig.4 City distribution network of the vaccine industry chain

表1 从生产、供应、物流和产业链城市群4个维

表1 城市度中心性 TOP10

Table 1 TOP 10 of city degree centrality

排名	生产所在地	度中心性	供应商所在地	度中心性	物流所在地	度中心性	产业链城市群	度中心性
1	北京市	8.0	北京市	107	北京市	24	北京市	144
2	泰州市	4.0	上海市	85	长春市	13	上海市	100
3	长春市	4.0	石家庄	32	重庆市	13	成都市	44
4	杭州市	3.0	昆明市	29	武汉市	13	石家庄	43
5	成都市	3.0	成都市	23	广州市	12	昆明市	39
6	大连市	3.0	武汉市	17	上海市	10	武汉市	36
7	吉林市	3.0	天津市	15	西安市	10	广州市	29
8	上海市	3.0	广州市	13	济南市	10	天津市	27
9	玉溪市	2.0	苏州市	12	郑州市	9	长春市	26
10	深圳市	2.0	杭州市	11	合肥市	9	重庆市	25

3.3 供应链风险模拟与分析

统计分析疫苗产品的生产与供应情况发现,在已备案的106种产品中(根据产品名称区分),大约61.3%种疫苗(65/106)由单一疫苗生产商或境外代理商提供,平均每种疫苗由2.25家企业生产。为进一步探究这些疫苗产品的应用范围及其所针对的疾病类型,借助ChatGPT获取每种疫苗对应的疾病信息。统计结果显示,目前仅有40余种疾病可通过疫苗接种进行预防,其中,12种疾病对应的疫苗仅由单一企业生产(如布氏菌活疫苗、森林脑炎灭活疫苗等),涉及7家企业,分别为兰州生物、上海赛尔生物、武汉生物、北京生物、长春生物、康希诺、厦门万泰。这种高依赖性的生产结构将导致系统性风险的积聚。

鉴于上述发现,采用网络扰动方法进一步探究疫苗供应链中所隐含的潜在安全风险。网络扰动是

度,列出度中心性排名前十的核心城市。由表1和图4可知:疫苗产业链在空间分布上存在不均衡问题。具体而言,在疫苗供给方面,生产厂商的地域分布呈现出东西部差异显著,而南北向相对均衡的特点。约78%的生产厂商集中分布在东部及东北地区,数量自东向西逐渐递减。而南北方向上,两地生产厂商的数量大致相等。在原材料及设备采购方面,华北和华东地区为供应商的主要聚集区,同时,也汇聚了大量的生产企业,形成资源供应和产品生产的协同集聚优势。与疫苗生产领域的状况相似,西部偏远地带在供应商数量上显著不足。在疫苗运输方面,北方地区注册的物流企业占较大比例(约65%)。在宁夏回族自治区和青海省等西部区域,本土物流企业相对匮乏,导致这些地区的冷链运输高度依赖邻近省份或全国性的大型物流企业,暴露出运力不足、过度依赖外部支持的困境。

指通过移除网络中的节点和其相关连边破坏网络拓扑结构及其功能的行为。根据扰动策略的不同,可分为随机扰动和目标扰动2类。在疫苗供应链中,不可预测事件,如频繁的极端自然灾害、动荡不安的国际局势以及突如其来的公共卫生事件,都可能导致疫苗供应遭受随机扰动。另一方面,网络扰动的效果取决于被干扰节点的重要性,有针对性地干扰网络中的关键节点,能够对网络造成最大的损害。在疫苗供应链中,目标扰动可通过扰乱特定生产厂家的生产流程和冷链运输,如私自降低生产标准、封锁某地的交通、限制关键原材料的供应以及疫苗的进出口活动来体现^[15]。

为探究特定生产商生产中断对全国疫苗供应的影响,构建包含53家生产厂商与488家客户的生产销售网络,并运用多种扰动策略实施风险模拟分析。目标扰动策略依据中心性算法的排名结果确定,节

点的排名越靠前,表明其在网络中占据的地位越高,因此被攻击的优先级越高。图 5a 展示了 4 种中心性算法(1.2.1 节)所识别的 TOP10 关键节点,每种中心性算法对应 1 种扰动策略。从图 5a 中可以看出,目标干扰策略主要针对的是关键生产厂商,其中,兰州生物和河北制药是网络中的支配节点,它们在所有中心性排名中位居前列。尤其是河北制药,作为“重组乙型肝炎疫苗(CHO 细胞)”的主要生产者,其扰动将严重影响全国乙肝疫苗的接种计划。次要关键的厂商是成都生物和长春生物,其中,成都生物在 Domirank 和 DC 上得分较高,表明其市场占有率高且在局部供应网络中占据主导地位,长春生物在 BC 和 NCDC 上表现突出,显示其在生产销售网络中扮演着桥梁角色,能有效连接不同客户社群。

图 5b 显示 随机扰动和 4 种目标扰动对生产销

售网络的影响。随着节点的逐渐剔除,网络的连通性逐渐降低,直到达到完全断开的崩溃状态。由图 5b 可知:随机扰动下的网络瓦解速率显著低于目标扰动。当网络连通性降低到 0.1 或以下水平时,目标扰动移除的企业仅占随机扰动的 10%。在早期的目标干扰中,疫苗供应受到 BC 策略的影响最大,网络连通性下降最快。当 1%(6/514) 的网络节点受到 BC 干扰时,关键供给中断导致多个孤立子网络形成,网络连通性降至 0.5。在中后期的目标干扰中,疫苗供应受 DomiRank 策略的影响最大,当 6%(33/514) 的企业受到干扰时,网络最大连通片比例下降到 0.1 或更低。当被干扰企业数增加到占总数的 8%(45/514) 时,最大连通片比例急剧下降至 0.01 及以下,网络连通性被严重破坏。总体来看,疫苗供应在干扰初期表现出较高的脆弱性,但随

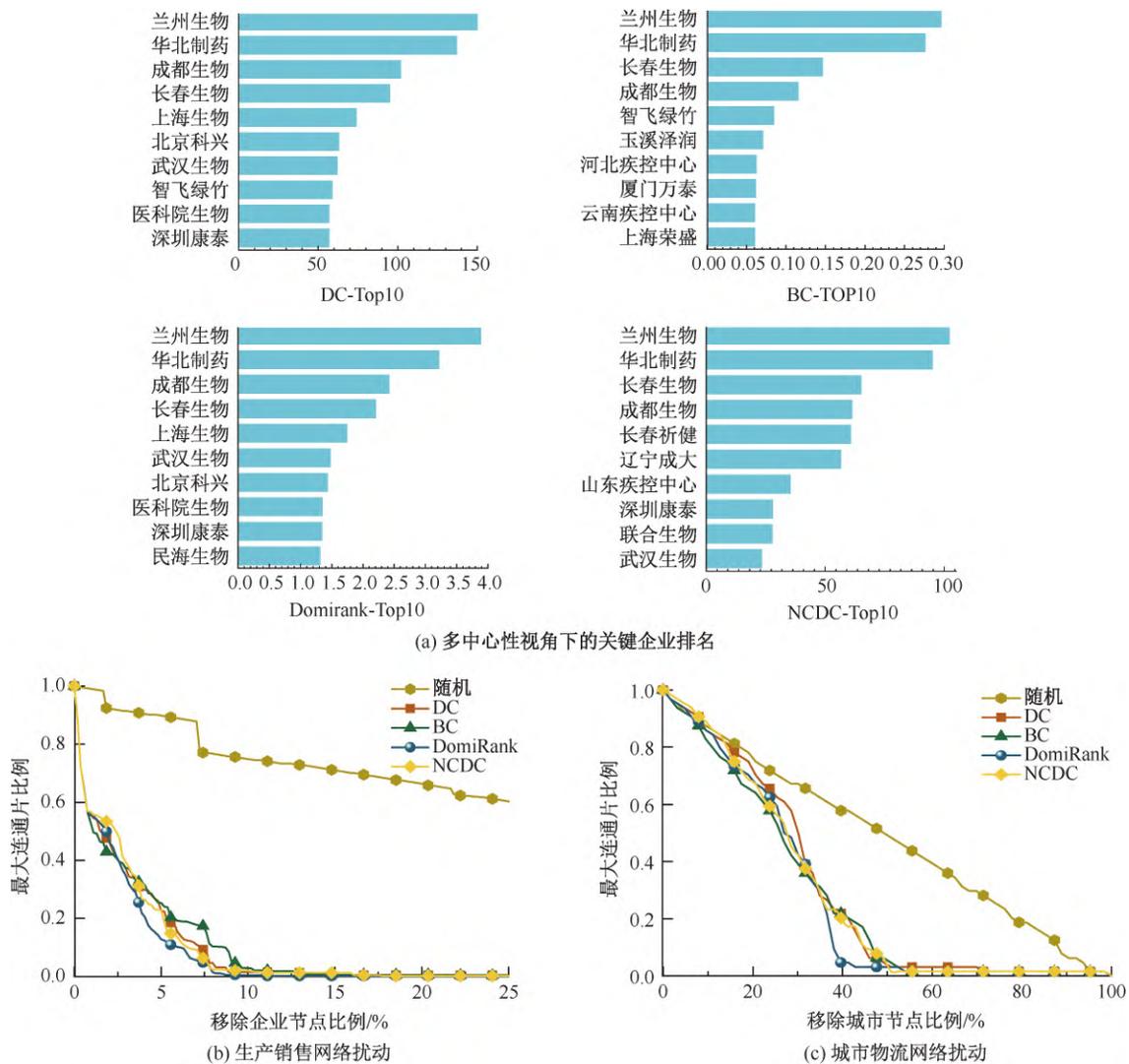


图 5 网络扰动分析

Fig.5 Analysis of network perturbations

着干扰企业的增加,网络连通性的下降速度逐渐减缓,抗干扰能力逐渐增强。这一现象表明:中心性较高的生产厂商是疫苗供应链网络中的潜在风险点。

通过针对性地封锁 52 家生产厂商和 268 家冷链物流所在的 63 个城市,探讨地区性突发事件对全国疫苗供应链的影响。图 5c 显示 5 种扰动策略对城市物流网络的影响。由图 5c 可知:城市封锁情景下的连通性曲线呈现出与生产企业受干扰时截然不同的模式。当城市封锁比例处于较低水平时,网络连通性的下降幅度相对较小,显示出较高的网络鲁棒性。然而,当封锁城市的比例超过 6.3%(4/63) 时,网络的瓦解速率迅速上升,并在 4 种不同的目标干扰策略下表现出明显的分化。当封锁城市的比例增至 39.7%(25/63) 时,4 种干扰策略的差异达到最大。此时,DomRank 策略的干扰效果最为显著,网络的连通性骤降至 0.05,导致网络全面崩溃。相比之下,其他干扰策略的影响相对较小,网络的连通性仍能维持在大约 0.21 的水平,保持一定的功能性。此现象揭示了疫苗供应链在面对不同规模和类型的城市封锁措施时存在的脆弱性。

在 4 种不同的目标干扰策略作用下,实施城市

封锁对网络连通性变化速率(即一阶导数)的影响如图 6 所示。一阶导数出现较大波动,表明在该阶段被移除的城市对保持网络连通性起着重要作用。由图 6 可知:当封锁城市比例在 0~55%(35/63),网络连通性的波动明显,而当封锁比例达到 55%~100% 时,连通性波动趋近于 0。值得注意的是,在封锁城市比例为 0~6.3% 时,即封锁北京、上海、新乡、长春等 Top4 关键城市的情况下,连通性曲线的下降速率较低,且此时网络仍保持 92% 以上的连通性。而在封锁比例为 23%~39.7% 期间,即封锁重庆、大连、深圳、沈阳、厦门、杭州、广州、无锡、宁波、廊坊等重要性相对较小的城市时,连通性波动幅度达到最大,网络连通性以最大速率下降。此种现象表明:疫苗供应链交通网络具有较高的韧性和弹性。由于关键城市之间存在替代路径,使得即便部分关键城市受阻,其他城市或路径也能承担其部分或全部功能,从而保持网络的整体连通性。当封锁较多重要性相对较小的城市时,由于非关键节点的累积效应以及此时网络结构的敏感性,尽管单个城市对网络影响有限,但它们的累积效应可超过少数几个关键节点的影响。

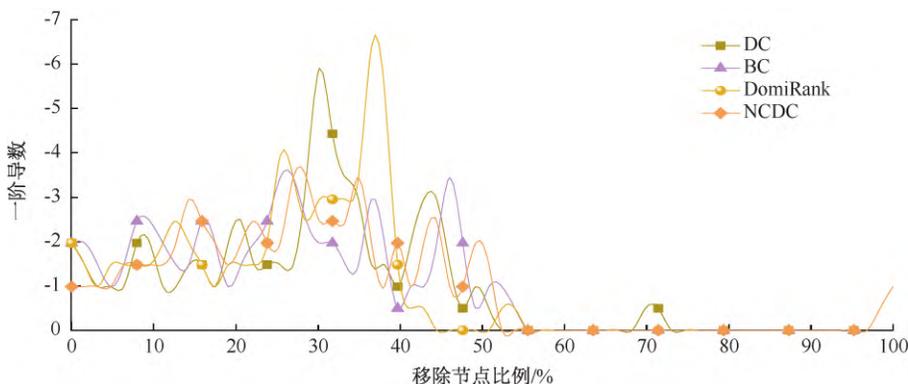


图 6 城市封锁下网络连通性变化速率

Fig.6 Rate of change in network connectivity under city blockade

4 结 论

1) 基于招标交易大数据提出的知识图谱方法能够有效整合多源数据,通过融合分析解决数据获取的难题,为疫苗供应链的监测与决策提供数据支持。

2) 统计分析和复杂网络分析表明:疫苗产业链供应链企业分布存在结构性风险,具体表现为疫苗原材料供应、生产及资源在城市空间上的不均衡分

布,以及疫苗生产结构存在的高依赖性问题。

3) 城市封锁的网络扰动分析表明:中心性较高的生产厂商是疫苗供应链网络中的潜在风险点,重要生产厂商受干扰将严重破坏全国疫苗供应。当封锁城市比例达到 23%~39.7% 时,即封锁重庆、大连、深圳、沈阳、厦门、杭州、广州、无锡、宁波、廊坊等重要性相对较小的城市时,城市物流网络展现出高度敏感性,此时非关键城市的累计封锁效应将超越关键城市,对疫苗流通造成更为显著的影响。

参 考 文 献

- [1] NIKOOKAR E, STEVENSON M, VARSEI M. Building an antifragile supply chain: a capability blueprint for resilience and post-disruption growth [J]. *Journal of Supply Chain Management*, 2024, 60(1): 13–31.
- [2] BARYANNIS G, VALIDI S, DANI S, et al. Supply chain risk management and artificial intelligence: state of the art and future research directions [J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(7): 2 179–2 202.
- [3] 牛莉霞, 杨满意. 疫苗供应链风险评价指标体系构建 [J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(7): 32–38.
NIU Lixia, YANG Manyi. Construction of a risk evaluation index system for vaccine supply chain [J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(7): 32–38.
- [4] 斯樊锋, 姜志勇. 中国疫苗冷藏链中的牛鞭效应 [J]. *物流技术*, 2004(11): 53–55.
SI Fanfeng, JIANG Zhiyong. Bullwhip effect in China vaccine cold chain [J]. *Logistics Technology*, 2004, (11): 53–55.
- [5] 违法违规生产狂犬病疫苗长春长生公司被处罚没款 91 亿元 [N]. *生活报*, 2018. 10. 17(009).
- [6] 国家卫生计生委, 食品药品监管总局. 关于印发疫苗储存和运输管理规范(2017 年版) 的通知 [EB/OL]. (2017-12-28). <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/fgwj/gzwj/gzwjyp/20171228165101753.html>.
- [7] 邹霞. 风险信号视野下媒体的放大效应及其规避: 对“澎湃新闻”山东非法疫苗报道的信号分析 [J]. *情报杂志*, 2020, 39(7): 108–113.
ZOU Xia. The risk amplification effect and its avoidance of media from risk signal perspective: a signal analysis on Shandong illegal vaccine reports of the paper [J]. *Journal of Intelligence*, 2020, 39(7): 108–113.
- [8] 许娜, 梁燕翔, 王亮, 等. 基于知识图谱的煤矿建设安全领域知识管理研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(5): 28–35.
XU Na, LIANG Yanxiang, WANG Liang, et al. Research on knowledge management in coal mine construction safety field based on knowledge graph [J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(5): 28–35.
- [9] KOSASIH E E, BRINTRUP A. A machine learning approach for predicting hidden links in supply chain with graph neural networks [J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(17): 5 380–5 393.
- [10] WICHMANN P, BRINTRUP A, BAKER S, et al. Extracting supply chain maps from news articles using deep neural networks [J]. *International Journal of Production Research* 2020, 58(17): 5 320–5 336.
- [11] 武群惠, 田广. 面向航天制造企业的供应链知识图谱研究与智能辅助分析示范建设 [J]. *军民两用技术与产品*, 2021(9): 50–55.
- [12] DAI Bitao, MOU Jianhong, TAN Suoyi, et al. The role of link redundancy and structural heterogeneity in network disintegration [J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 255: DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124590.
- [13] MARCUS E, ALEJANDRO T, YAMIR M, et al. DomiRank centrality reveals structural fragility of complex networks via node dominance [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): DOI: 10.1038/s41467-023-44257-0.
- [14] DUIJZER L E, VAN JAARSVELD W, DEKKER R. Literature review: the vaccine supply chain [J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 268(1): 174–192.
- [15] SERDAR M Z, KOC M, AL-GHAMDI S G. Urban transportation networks resilience: indicators, disturbances, and assessment methods [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 76: DOI: 10.1016/j.scs.2021.103452.



作者简介: 何雨琪 (2001—) 女, 湖南长沙人, 博士研究生, 主要研究方向为数据挖掘、应急管理、自然语言处理。E-mail: gfkdeyuqi@163.com。