

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2025.03.012

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:谭婧,宗婉秋.新能源汽车产业协同创新网络演化与动力机制研究[J].西安理工大学学报,2025,41(3):418-431.

TAN Jing,ZONG Wanqiu. Research on the evolution and driving mechanisms for the collaborative innovation network in the new energy vehicle industry[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2025,41(3):418-431.

新能源汽车产业协同创新网络演化与动力机制研究

谭 婧,宗婉秋

(安徽大学 大数据与统计学院,安徽 合肥 230601)

摘要: 基于2006—2022年新能源汽车产业联合申请发明专利数据,将创新主体划分为企业、高校和科研机构三类,构建协同创新网络。采用社会网络分析法描述其演化特征,并运用指数随机图模型检验演化动力机制。结果显示,协同创新网络规模扩大、合作强度增强,整体紧密度下降但局部联系更密切,连通性较强并呈现“小世界特征”。内生机制方面,传递性与中介节点促进网络形成;外生机制方面,创新能力、年龄、地区市场竞争及产业政策均正向影响网络演化。高创新能力与中低年龄个体存在显著同配效应,低创新能力与高年龄个体则无。地理、制度和组织邻近性均促进网络演化,且两两之间存在协同作用,但组织邻近性的作用随经验积累而减弱。研究结论对优化产业布局与推动现代化产业体系建设具有重要意义。

关键词: 新能源汽车产业;协同创新;网络演化;动力机制;指数随机图模型

中图分类号: F426.471

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2025)03-0418-14

Research on the evolution and driving mechanisms for the collaborative innovation network in the new energy vehicle industry

TAN Jing, ZONG Wanqiu

(School of Big Data and Statistics, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Based on joint invention patent applications in the new energy vehicle (NEV) industry from 2006 to 2022, innovation actors are classified into three categories—enterprises, universities, and research institutions—to construct a collaborative innovation network. The social network analysis is employed to depict its evolutionary characteristics, with the exponential random graph model applied to examine the driving mechanisms of its evolution. The results indicate that the network has expanded in scale and strengthened in cooperation intensity; while overall cohesion has declined, local connections have become closer, network connectivity remains strong, and a “small-world” structure has emerged. Regarding endogenous mechanisms, transitivity and brokerage nodes promote network formation; regarding exogenous mechanisms, innovation capability, age, regional market competition, and industrial policy all exert positive effects on network evolution. Actors with high innovation capability and medium-to-low age exhibit significant assortative effects, whereas those with low innovation capability and high age do not. Geographic, institutional, and organizational proximity all facilitate network evolution and demonstrate synergistic interactions, though the effect of organizational proximity weakens as actors accumulate experience. These findings have important implications for optimizing industrial layout and

收稿日期: 2024-09-09; **网络首发日期:** 2025-04-15

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250415.1520.004>

基金项目: 安徽省哲学社会科学资助项目(AHSKY2022D047);安徽省社会科学创新发展研究课题资助项目(2021CX036)

第一作者: 谭婧,女,讲师,博士,研究方向为区域产业协同与绿色发展。E-mail:tanjinghit@126.com

通信作者: 宗婉秋,女,研究生,研究方向为复杂网络与产业协同发展。E-mail:844954329@qq.com

advancing the construction of a modern industrial system.

Key words: new energy vehicle industry; collaborative innovation; network evolution; driving mechanism; exponential random graph model

随着全球能源危机和环境污染加剧,新能源汽车产业已成为应对气候变化、推动能源转型的核心方向。中国作为全球最大的新能源汽车市场,高度重视其发展。但受技术复杂性和跨学科特征影响,单一组织难以独立应对研发与生产挑战,核心技术创新不足、质量体系不完善、协同效率低下等问题突出。创新是突破技术瓶颈、推动技术进步、提升效率和实现可持续发展的关键。构建跨组织的产学研协同创新网络,有助于打破行业壁垒、促进资源共享、推动技术突破与产业升级。在此背景下,研究新能源汽车产业产学研协同创新网络的演化特征与动力机制,对增强产业动能、优化布局和推动高质量发展具有重要意义。

现有协同创新网络研究主要聚焦于演化特征与动力机制两方面。演化特征方面,多利用社会网络分析法的联结次数、网络密度、网络中心性等指标刻画结构与演化。动力机制方面,多集中于内生或外生的单一视角,前者关注网络结构特征等微观因素,后者关注地理、组织、制度^[1]、等多维邻近性等宏观因素。方法上,传统回归模型忽视了网络关系的相互依赖性,QAP模型虽可避免该假设,但难以分析内生因素的作用,难以全面解释网络演化动力。总体而言,现有研究在多维视角整合与模型方法改进方面仍有深化空间。

关于中国新能源汽车产业协同创新网络的研究,现有文献主要集中于探讨网络结构与演化特征。对于演化动力机制的探讨,尽管已有研究采用相对合适的网络统计模型,综合考虑了内外生机制,但仍存在不足。例如,索琪等^[2]基于2009—2018年的专利数据,利用随机行动者导向模型分析多维邻近性与结构效应,但数据已较陈旧,难以反映最新状况。李文文等^[3]使用2017—2021年的数据,通过指数随机图模型分析创新个体属性与网络内生效应,但时间跨度有限,对外生机制的探讨也仅局限于个体属性。基于此,本研究选取最新数据、扩大时间跨度,采用社会网络分析法描述网络演化特征,并利用指数随机图模型对内外生机制进行更全面分析。

1 理论分析与假设提出

中国新能源汽车产业协同创新网络演化动力受内生机制和外生机制的共同驱动。随着新能源汽车产业的不断发展,创新合作模式逐步突破两两个体

间的单一关联,向集群化方向演进。具体表现为,具有共享合作伙伴的两个创新个体更易建立新的合作关系,从而形成稳定的三角结构。这一现象被称为“传递性趋势”,属于“网络内生结构效应”,是推动网络演化的重要内生机制。此外,新能源汽车产业中,创新个体更倾向于与经验丰富、创新能力强或与自身属性相近的伙伴建立合作关系,即个体的属性对其合作关系的建立具有重要影响。其中,个体也被称为行动者,故这种现象被定义为“行动者-关系效应”,并被视为影响网络演化的重要外生机制。与此同时,在新能源汽车产业协同创新网络中,个体间因地理区位、制度框架以及组织类型的差异,形成了多样化的外生关系。这些外生关系所构成的网络进一步影响个体间协同创新关系的形成,从而影响协同创新网络的演化,这一现象被称为“网络协变量效应”,同样是推动网络演化的重要外生机制。

1.1 产业协同创新网络演化的内生机制

内生结构效应指的是网络中某些创新个体间关系的建立能够推动其他创新个体间合作关系的形成,这种合作关系的相互作用进一步促进了整个网络的演化^[4]。传递性作为内生结构效应的一种表现,已被广泛应用,指的是当个体A和个体B虽无直接联系,但均与个体C建立了合作关系时,个体A和个体B也更可能形成合作关系,即“朋友的朋友更有可能成为朋友”^[5]。

在新能源汽车产业中,个体间协同创新过程面临诸多挑战,包括高昂的创新成本、漫长的投资回报周期以及较高的风险。在这种挑战下,合作关系中的信任能够有效降低新合作中的不确定性和风险,进而推动更多的协同创新活动。因此,创新个体会通过传递性形成的三角结构的稳定建立较强的信任关系并减少未知风险。例如,新能源汽车产业中的电池企业和充电设施企业均与同一整车企业合作时,该整车企业作为中介节点传递了信任与合作经验,从而使得这两家企业更容易建立直接的合作关系。随着产业的逐步发展,这种信任通过传递性形成的三角关系逐渐强化,促进了合作网络的稳定性和扩展,推动了新能源汽车产业协同创新网络的持续演化^[3]。基于此,提出假设:

H₁: 新能源汽车产业协同创新网络具有传递性特征,且传递性正向促进新能源汽车产业协同创新网络的演化。

1.2 产业协同创新网络演化的外生机制

1.2.1 行动者-关系效应

行动者-关系效应刻画的是创新个体的属性如何影响网络中个体间创新合作关系建立的过程。该效应主要包括主效应和交互项两类,主效应反映个体属性对网络中创新合作关系形成的影响,常用“马太效应”来解释,交互项则揭示了两个属性相近的创新个体更易形成合作关系的现象,这一现象常用“同配效应”来说明。

马太效应最初是由 Merton 提出^[6],指的是“强者越强,弱者越弱”的现象。在新能源汽车产业协同创新网络中,创新个体间存在显著的创新能力差异,通常创新能力较强的个体展现出更强的协同创新能力,这种优势使得它们更容易成为其他个体首选的合作对象。其次,由于新能源汽车产业的光明发展前景,一些曾经未涉及新能源汽车领域的个体开始纷纷加入,其在专业技术水平上与早已投入到新能源汽车产业的个体产生一定差距,且新能源汽车产业具有较高的技术壁垒,年龄较大的个体往往能掌握相关技术经验,形成大量专业知识和人脉积累,更容易吸引更多合作伙伴与其进行合作。再次,随着新能源汽车市场竞争的加剧,创新个体为了在市场中占据优势地位,更倾向于与其他企业、高校及科研机构合作,以整合资源,加速技术突破^[7],故个体所处的市场竞争程度越激烈越需要协同创新。最后,新能源汽车产业面临着高研发投入、技术不确定性、创新失败及知识外溢等风险,而产业政策通过提供研发补贴、税收优惠、技术标准制定等手段,有效降低企业的创新成本,减少创新失败的风险,从而激励个体积极参与协同创新^[8]。因此,个体所在地区的产业政策越多,支持越强,个体参与协同创新的积极性越高。综上,创新能力越强、年龄越大、个体所处地区的市场竞争程度越激烈与产业政策越多的个体越容易和其他伙伴建立合作关系,典型表现为马太效应。基于此,提出假设:

H_{2a}: 创新个体的创新能力、年龄大小、所处地区的市场竞争程度与产业政策属性具有马太效应,并且正向促进新能源汽车产业协同创新网络的演化。

同配效应是指两个具有相似属性的个体更倾向建立交往和合作^[9]。在新能源汽车产业中,创新能力等级相似的个体往往在技术认知、创新方法和解决问题的思维方式上较为契合,因此,具有相似创新能力等级的个体会倾向与彼此产生合作,从而减少沟通成本、加速知识共享和资源整合。例如,电池技术、智能驾驶、车联网等领域的技术研发和应用,技

术能力相似的企业或科研机构更容易开展深度合作,推动相关技术的突破。故新能源汽车产业中的个体在创新能力等级属性方面存在同配效应,且这种效应正向促进协同创新网络的演化。此外,年龄相似的个体由于在职业生涯阶段、工作经历和思维方式上具有一定的相似性,因此为了减少合作中的认知差异和沟通障碍,增强合作的默契与稳定性,他们更倾向于彼此产生创新合作关系,从而形成同配效应,共同推动技术进步,促进协同创新网络的演化。基于此,提出假设:

H_{2b}: 创新个体在创新能力等级和年龄等级属性方面存在同配效应,且这种效应正向促进新能源汽车产业协同创新网络的演化。

1.2.2 网络协变量效应

网络协变量效应是指外生关系网络对创新个体间合作关系形成的影响。邻近性因可以衡量个体间在不同外生关系上的接近程度,而作为研究协同创新网络关系形成的重要外生因素。①地理邻近性刻画的是各创新个体在地理距离上的接近程度^[10]。地理距离越近的个体相互信任度越高,交流共享知识和信息越有效,产生合作的概率就越大,反之建立合作的概率就越低。新能源汽车产业作为技术密集型产业,创新个体间的相互信任对分享关键技术与知识至关重要,地理上的邻近性可以通过面对面沟通、增强沟通效率来加强这种信任,从而为合作关系的形成奠定坚实的基础。②制度邻近性主要刻画各创新个体之间在制度安排、行动准则及实践模式等方面上的相似程度^[11]。制度越相似的个体之间合作壁垒就越少,产生合作的概率就越高。随着技术的发展,中国新能源汽车技术复杂程度日益复杂,为了避免因制度差异导致的合作壁垒与技术隔阂,产业中的创新个体倾向于与具有相同制度、法律约束的个体产生合作关系。③组织邻近性主要刻画两个创新个体在组织结构、文化和规章制度等方面的相似程度^[12]。组织类型相似的个体拥有较为相似的组织结构、文化和规章制度,进而降低合作的不稳定性和交易成本,增加合作概率。新能源汽车产业的创新个体主要分为产学研三种组织类型,组织类型相似的个体更容易加快知识转移和知识溢出,吸收互补资源形成合作关系。基于此,提出以下假设:

H_{3a}: 地理邻近性、制度邻近性和组织邻近性正向促进新能源汽车产业协同创新网络的演化。

此外,由于多维邻近的概念没有统一论,且存在交叉模糊地带,衡量的方法也没有形成统一范式,因此各维度邻近性在创新网络中并非独立,它们彼

此间可能存在协同、替代等交互效应并对创新网络产生影响,且其影响不同于单一邻近性^[13]。在新能源汽车产业创新合作中,地理邻近性通过促进个体互动和信息流通,降低沟通成本,从而增强个体组织兼容性,间接提升组织邻近性。同时,地理邻近性促进区域政策协同和制度环境标准化,使得企业能够在统一的制度框架下开展合作,进而提升制度邻近性。即地理邻近性并非创新合作的充要条件,但其可通过影响其他维度的邻近性间接推动创新合作的形成,表明地理邻近性与制度邻近性和组织邻近性相互作用促进协同创新网络的演化^[14]。此外,制度环境为创新个体提供了统一的政策和行业规则,促使个体在组织结构和合作模式上趋同,从而增强组织邻近性。同时,企业的组织结构和合作模式也推动了制度创新,影响政策和行业标准的制定。因此,制度邻近性和组织邻近性相互作用,共同促进创新合作关系的形成^[15]。基于此,提出假设:

H_{3b}:地理邻近性、制度邻近性、组织邻近性间以组合的形式存在交互作用并促进新能源汽车产业协同创新网络的演化。

2 研究设计

2.1 数据来源与处理

联合申请专利是协同创新的主要途径以及衡量

个体创新能力的关键指标^[16]。近年来,联合申请专利数据被学界广泛用来对协同创新网络进行研究和探讨。专利主要分为实用新型专利、外观设计专利和发明专利三种。其中,发明专利相对于另外两种专利技术含量较高,更适宜进行创新研究。在专利检索方法上,以往研究上大多使用IPC分类检索法和关键词检索法两种方法。IPC检索法虽然能够更清晰的反映专利技术,但新能源汽车的IPC分类号较为复杂,其分类号的确定存在争议,容易造成遗漏^[17]。因此本文基于关键词检索法,并借助国家知识产权局提供的专利检索平台对新能源汽车领域的联合申请专利展开了高级检索。参考已有的文献^[2],本文将检索关键词确定为“燃料电池汽车 or 插电式混合动力汽车 or 混合动力汽车 or 纯电动汽车 or 电动汽车”,申请人国家地区确定为“CN”,并考虑到专利从申请到授权需要经过18~36个月,2023—2025年申请的专利尚未完全授权,因此以公开日为“20060101:20221231”进行检索,检索时间为2025年1月,共检索到43 693条发明专利。再对数据进行筛选,剔除掉申请人为自然人或申请人数量为1的专利数据,申请人组织类型划分为产(企业)、学(高校)、研(研究机构)三种。经数据预处理后,共获得产学研联合发明专利7 204件。

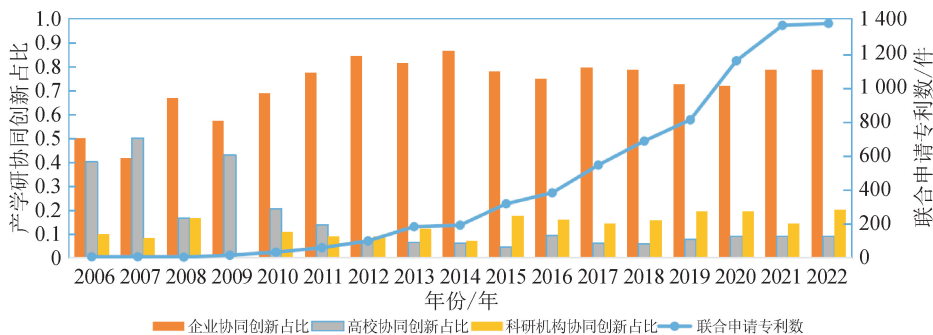


图1 2006—2022年中国新能源汽车产业协同创新变化趋势图

Fig.1 Trend of collaborative innovation in the new energy vehicle industry of China, 2006—2022

将申请人视为创新个体,联合申请专利视为协同创新活动,不同组织类型的创新个体在协同创新活动中发挥着不同的作用,计算出不同组织参与协同创新的占比。中国新能源汽车产业协同创新变化趋势及其产学研协同创新占比情况见图1。由新能源汽车产业联合申请专利数与实际产业的客观发展状况,可将产业发展划分为几个阶段。2006—2012年,新能源汽车产业联合申请专利数量相对较少,稳定在150条以下,产业市场需求尚未充分释放,产业基础设施建设和技术研发处于初步阶段,行业整体

规模较小,创新活动相对有限,产业发展处于起步探索阶段。2013—2017年,随着国家逐步出台支持政策,专利数量开始上升,行业技术水平有所提高,产业链开始逐步形成,市场需求逐渐增长,尤其是政府对新能源汽车的补贴政策逐渐到位,促使部分企业逐步加大研发投入,新能源汽车产业进入缓慢发展阶段。2018—2022年,国家政策进一步加强,尤其是财政补贴和购车优惠政策的出台,极大促进了新能源汽车产业的快速发展。专利申请数量迅速增长,技术创新加速,市场规模扩大,企业间的合作和

技术交流日益增多,产业链日渐完善,智能化、电动化等技术取得显著突破,新能源汽车的市场占有率逐渐提升,成为行业重要发展驱动力。此时,新能源汽车产业已经进入快速发展阶段,产业结构逐步优化,竞争力逐渐增强。

由产学研协同创新占比可知,企业始终是新能源汽车产业创新的核心力量,高校在协同创新中的占比逐渐降低,而科研机构协同创新占比始终不高。前期,由于高校和企业具有较强的知识资源整合能力,以及充足的人才和资金支持,协同创新活动更容易实现,这促使了一些高校和企业率先引领新能源汽车产业的创新发展。然而,随着产业进一步成熟,高校与企业之间开始出现知识差距和人才资金分配不均的问题,同时,参与协同创新的企业数量大幅增加,这使得企业在协同创新中的占比稳居首位,而高校在协同创新中的比例逐渐下降。科研机构由于在获取资助和资源方面可能面临来自高校和企业的竞争,导致其获得较少的支持,使其在协同创新中的占比始终不高。

2.2 研究方法

2.2.1 社会网络分析法

本文基于社会网络分析法,将专利申请创新个体作为节点,个体间合作关系为边,合作频数为边的权重,构建无向加权的中国新能源汽车产业产学研协同创新网络。分阶段绘制协同创新网络演化拓扑图,观察网络的演变趋势,并引入网络结构指标描述性分析协同创新网络的演化特征。

1) 节点数 N ,为网络中的节点总数,可用来衡量协同创新网络的网络规模,其值越大说明协同创新网络规模越大。

2) 平均度 K ,为网络中所有节点连接边的平均数,可用来衡量协同创新网络的合作强度,其值越大说明协同创新网络合作强度越高。

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

式中: N 表示节点的数量; k_i 是第 i 个节点的邻居节点的数量。

3) 网络密度 ρ ,为网络中实际连接数与可能连接数的比率,可用来衡量网络中节点间联系的紧密程度,其值越大说明协同创新网络中主体间联系越紧密。

$$\rho = \frac{M}{N(N-1)} \quad (2)$$

式中: N 表示节点的数量; M 代表边的数量。

4) 平均路径长度 L ,为所有节点间的平均最短

距离,可用来衡量协同创新网络的连通性,其值越小说明协同创新网络的连通性越好。

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

式中: N 表示节点的数量; d_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间最短路径的长度。

5) 聚类系数 C ,为网络中所有节点聚类系数的平均值,可用来衡量网络中两个邻居节点间存在边的概率,主要反映网络中节点的局部聚集性,即局部节点及其合作圈层的紧密程度。

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (4)$$

式中: N 表示节点的数量; k_i 是第 i 个节点的邻居节点的数量; E_i 是第 i 个节点的邻居节点间实际存在的边的数量。

2.2.2 指数随机图模型

Frank 和 Strauss^[18]提出的马尔科夫随机图模型是最早的指数随机图模型(exponential random graph model, ERGM),随后 Wasserman 和 Pattison^[19]在 p_1 模型^[20]和马尔科夫随机图的基础上提出了 p^* 模型, p^* 模型假设网络中的边之间普遍存在条件依赖关系,这一假设使得大部分基于依赖性假设的指数随机图模型都可以被视为 p^* 模型,该模型的公式为:

$$\Pr(X = x) = \frac{1}{k} \exp\left\{\sum \theta_m Z_m(x)\right\} \quad (5)$$

式中: X 是随机网络集合;用随机变量 X_{ij} 表示个体 i 和 j 是否存在关联,如果 i 和 j 之间存在边,那么 $X_{ij}=1$,否则为 0; x 表示网络中真实关系构成的矩阵; $1/k$ 是使得概率处于 0~1 之间的常量; $Z_m(x)$ 是网络统计量,包括内生结构变量、个体属性和网络关系变量; θ_m 是网络统计量的系数。

2.3 变量说明与模型构建

2.3.1 变量说明

本文被解释变量为中国新能源汽车产业协同创新网络中创新个体间产生合作关系的概率。解释变量主要包括影响中国新能源汽车产业协同创新网络演化的内生机制变量和外生机制变量。其中内生机制变量包括网络内生结构变量,外生机制变量包括个体属性变量和网络协变量。

1) 内生结构变量

几何加权二元共享伙伴(Gwdsp)描述的结构为没有直接联系的两创新个体可通过很多共享伙伴或中介点发生联系,从而形成开放三角结构,其值是统计节点同时作为另外两个节点“中介”的个数,反应

网络的中介性,可以很好地测量网络的传递性。本文选取 Gwdsp 内生结构变量表示传递性,衡量其对中国新能源汽车产业协同创新网络演化的驱动作用。

2) 个体属性变量

马太效应。基于以上假设,将创新能力(PA)、年龄(AG)、地区市场竞争程度(CM)、地区产业政策(SP)四个个体属性变量纳入 ERGM,探讨其马太效应是否会对中国新能源汽车产业协同创新网络的演化产生影响。创新能力越强的个体越容易吸引更多伙伴与其合作产生大量的联合申请专利,故选取创新个体的专利申请次数来测量各个体的创新能力^[21];个体年龄的大小用个体成立年限来衡量^[22];创新个体所处的地区市场竞争程度通常用 Herfindahl-Hirschman 指数衡量^[7],其计算公式为:

$$H_i = \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (6)$$

式中: H 为 Herfindahl-Hirschman 指数; n 为个体所处地区市场中新能源汽车企业的数量; S_i 为地区市场中第 i 个企业的市场份额(百分比)。Herfindahl 指数越低,地区市场竞争力越强,反之越弱。个体所处地区的产业政策通过各年地方性法规文件、地方政府规章及相关文件的累计数量来衡量^[23]。

同配效应。基于以上假设,本文将创新能力等级和个体年龄等级纳入 ERGM,首先将各创新个体的创新能力与个体年龄进行排名并划分高、中、低三个等级水平,排名在 $[0, 25\%]$ 内分别记为 PAH 和 AGH,排名在 $(25\%, 75\%]$ 内分别记为 PAM 和 AGM,排名在 $(75\%, 100\%]$ 内分别记为 PAL 和 AGL^[9],然后选取创新能力等级与个体年龄等级作为个体同配变量,考察其同配性对新能源汽车产业协同创新网络演化的驱动作用。

3) 网络关系变量

地理邻近性(GP)。利用各创新个体所属城市的经纬度计算其之间的球面距离 D 则创新个体 i 与创新个体 j 之间的球面距离计算公式为:

$$d_{ij} = C \{ \arccos[\sin(a_i) \sin(a_j) + \cos(a_i) \cos(a_j) \cos(|l_i - l_j|)] \} \quad (7)$$

式中: a_i, a_j 分别为创新个体 i 与创新个体 j 的纬度; l_i, l_j 分别为创新个体 i 与创新个体 j 的经度; $C = 6\,371\text{ km}$,为地球的平均半径。在百度地图 API 批量获取创新个体的经纬度信息,并对球面地理距离做归一化处理,得到创新个体 i 与创新个体 j

之间的地理邻近性为:

$$G_{ij} = \frac{D_{ij} - \min(D_{ij})}{\max(D_{ij}) - \min(D_{ij})} \quad (8)$$

式中: G_{ij} 为地理邻近性。

制度邻近性(IP)。参考陈钰芬等^[24]的研究,利用创新个体是否属于同一省份计算创新个体之间的制度邻近性。当两个创新个体属于同一个省份时,记二者的制度邻近性为 1,反之为 0。如重庆大学和重庆长安汽车股份有限公司属于同一个省,故二者之间的制度邻近性为 1,重庆大学和安徽大学不属于同一个省,故二者之间的制度邻近性为 0。

$$I_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{创新主体 } i \text{ 与 } j \text{ 同属一个省份} \\ 0, & \text{创新主体 } i \text{ 与 } j \text{ 不同属一个省份} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I 为制度邻近性。

组织邻近性(OP)。专利申请创新个体划分为企业、高校、科研机构 3 个组织类别,通过参与合作的专利申请人是否为相同的组织类型来测量创新个体间的组织邻近性。如参与合作的个体为相同的组织类型,则组织邻近性 O 赋值为 1,否则赋值为 0。

邻近性的交互项。为探讨邻近性间的交互作用,需构建邻近性变量的交互项。为避免多重共线性,首先对邻近性变量进行中心化处理,再通过两两相乘构建交互项,生成的地理邻近性与制度邻近性的交互项 I_{GI} 为 $(G - \bar{G})(I - \bar{I})$ 、地理邻近性与组织邻近性的交互项 I_{GO} 为 $(G - \bar{G})(O - \bar{O})$ 、制度邻近性与组织邻近性的交互项 I_{IO} 为 $(I - \bar{I})(O - \bar{O})$,其中, $\bar{G}, \bar{I}, \bar{O}$ 分别表示 G, I, O 的均值。以上三个交互项反映邻近性之间的相互影响。若交互项系数为正,表明二者间存在互补效应;若为负,则表示二者间存在替代效应。

2.3.2 模型构建

将网络内生结构变量、个体属性变量和网络关系变量分别纳入 ERGM,并对上文的理论假设进行实证检验。如下,模型 1 为仅包含个体属性变量的基准模型;模型 2 在模型 1 的基础上添加了网络关系变量,为外生机制检验模型;模型 3 在模型 2 的基础上添加了网络内生结构变量,为外生机制和内生机制的综合检验模型。

模型 1:

$$P(Y = y) = \exp(\theta_1 E_d + \theta_2 P_A + \theta_3 A_G + \theta_4 C_M + \theta_5 S_P + \theta_6 P_{AH} + \theta_7 P_{AM} + \theta_8 P_{AL} + \theta_9 A_{GH} + \theta_{10} A_{GM} + \theta_{11} A_{GL}) / k \quad (10)$$

模型 2:

$$P(Y=y) = \exp(\theta_1 E_d + \theta_2 P_A + \theta_3 A_G + \theta_4 C_M + \theta_5 S_P + \theta_6 P_{AH} + \theta_7 P_{AM} + \theta_8 P_{AL} + \theta_9 A_{GH} + \theta_{10} A_{GM} + \theta_{11} A_{GL} + \theta_{12} G + \theta_{13} I + \theta_{14} O + \theta_{15} I_{GI} + \theta_{16} I_{GO} + \theta_{17} I_{IO}) / k \quad (11)$$

模型 3:

$$P(Y=y) = \exp(\theta_1 E_d + \theta_2 P_A + \theta_3 A_G + \theta_4 C_M + \theta_5 S_P + \theta_6 P_{AH} + \theta_7 P_{AM} + \theta_8 P_{AL} + \theta_9 A_{GH} + \theta_{10} A_{GM} + \theta_{11} A_{GL} + \theta_{12} G + \theta_{13} I + \theta_{14} O + \theta_{15} I_{GI} + \theta_{16} I_{GO} + \theta_{17} I_{IO} + \theta_{18} G_w) / k \quad (12)$$

式中: E_d 为网络中的边数; G_w 为几何加权二元共享伙伴, 是网络内生结构变量; P_A 、 A_G 、 C_M 、 S_P 分别为创新个体的创新能力、年龄以及所处地区的市场竞争程度和地区产业政策; P_{AH} 、 P_{AM} 、 P_{AL} 分别为高、

中、低三个创新能力等级水平; A_{GH} 、 A_{GM} 、 A_{GL} 分别为高、中、低三个年龄等级水平, 均为个体属性变量; G 、 I 、 O 分别为地理、制度和组织邻近性; I_{GI} 、 I_{GO} 、 I_{IO} 为邻近性的交互项, 均为网络关系变量; $\theta_1 \sim \theta_{18}$ 是模型中的待估系数。

3 实证结果分析

3.1 协同创新网络演化特征分析

3.1.1 协同创新网络演化

本文使用 Gephi 软件分阶段绘制出中国新能源汽车产业协同创新网络的拓扑图。

考虑到创新个体数量过多影响网络特征的观察, 及网络演化趋势对网络中关键核心创新个体的依赖, 提取网络中度数大于 3 的节点, 对原始网络进行简化形成新网络, 具体可视化见图 2, 其中, 圆点代表节点, 节点的大小以连接次数来量化, 连接次数越多的节点圆点越大。

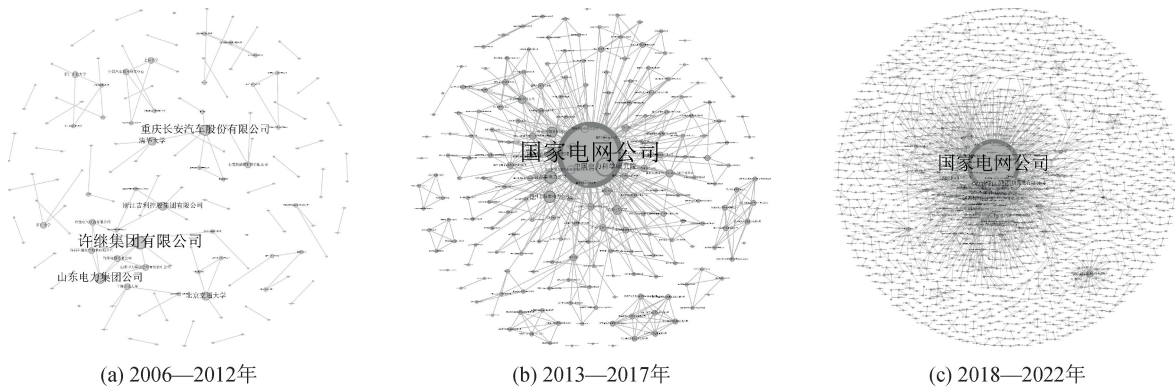


图 2 2006—2022 年各阶段中国新能源汽车产业协同创新网络拓扑图

Fig. 2 Collaborative innovation network topology of new energy vehicle industry of China in various stages from 2006—2022

第一阶段, 萌芽期(2006—2012 年)。由图 2(a) 可知, 2006 至 2012 年间, 中国新能源汽车产业协同创新网络结构尚不成熟, 整体较为稀疏, 处于网络萌芽期。这一时期, 中国新能源汽车产业发展刚刚起步, 2009 年工业和信息化部发布《汽车产业调整和振兴规划》, 首次提出新能源汽车发展目标。网络初步形成了以许继集团有限公司、重庆长安汽车股份有限公司等为核心的“龙头企业引领、高校与科研机构支撑”的协作格局, 在整车制造、电池技术和驱动系统等关键领域展开技术攻关, 推动了新能源汽车初步技术体系的建立。同时, 长三角在浙江吉利控股集团和浙江大学的带动下, 聚焦电池和驱动技术; 珠三角则以惠州亿能电子有限公司、东莞新能源科技有限公司等为代表, 主要在动力电池及关键零部件方面进行技术攻关。这一时期的产业协同萌芽为中

国新能源汽车产业的起步奠定了基础, 并为后续快速发展积累了经验与技术储备。

第二阶段, 形成期(2013—2017 年)。由图 2(b) 图可知, 2013 至 2017 年间, 随着新能源汽车产业的发展, 创新个体数量增加, 合作关系日益紧密, 以国家电网有限公司为代表的大量核心节点逐步形成, 并与其他节点建立紧密联系, 构成多个凝聚子群。同时, 外围节点逐步向核心节点聚集并合作, 推动了产业协同创新网络的初步形成。这一时期, 国家电网公司作为网络中的最大核心节点, 以广泛的合作关系展现其在能源供应保障和技术创新支持中的关键作用, 是推动新能源汽车普及和技术进步的重要催化剂。与此同时, 网络中的其他核心节点—重庆长安汽车股份有限公司和浙江吉利控股集团有限公司等, 依托其在传统汽车制造领域的深厚积累, 成功实现

向新能源汽车的战略转型,在电池技术、电动驱动系统和智能驾驶等关键领域取得重大技术突破,不仅巩固了其行业领先地位,也在推动新能源汽车市场化应用方面发挥了重要引领作用。此外,清华大学等高等院校在理论研究方面发挥了重要作用,但整体的技术成果转化进展较慢,更多依赖于跨界合作的企业。

第三阶段,发展期(2018—2022 年)。由图 2(c)可知,2018 至 2022 年间,协同创新网络中的核心节点数量显著增加,围绕核心节点的子群规模扩大,节点间的联系愈加紧密。同时,边缘节点和小型凝聚子群数量也呈增长趋势,形成了一个明显的“核心-边缘”结构。这表明,随着新能源汽车产业的进一步发展,核心区域的影响力加强,边缘区域的创新活动也开始逐步增加和完善,新能源汽车产业协同创新网络进入发展期。这一时期,国家电网公司依然保持最大核心节点的地位,并与其他电力企业通过建设充电桩和智能电网共同发挥了基础设施的建设和技术支持作用,为新能源汽车普及提供了重要保障。新能源汽车制造商如浙江吉利控股集团有限公司、重庆长安汽车股份有限公司作为核心创新个体,在电池技术、电动驱动系统、智能化驾驶等关键领域实现了持续的技术突破,推动了技术的产业化应用。科研机构如中国电力科学研究院,发挥了更大的作用,提供了标准化研究和技术支持。高等院校如清华大学、东南大学等则开始在智能电池、电力电子技术等领域取得突破,并加快了技术与产业的结合,推动了新能源汽车技术的商业化应用。这一时期,三类主体的合作深化,不仅推动了技术创新的不断突破,也促进了整个产业的快速发展,形成了一个多层次、协同发展的创新生态系统,推动了中国新能源汽车产业的技术进步与市场拓展。

3.1.2 协同创新网络特征

为了更详细地描述中国新能源汽车产业协同创新网络的演化特征,本文还基于社会网络分析法测量出网络的五个结构指标并对其进行描述性分析。计算结果见表 1。

协同创新网络规模不断扩大。十五年间,协同创新网络节点数由从萌芽期的 152 个快速增长至发展期的 1 503 个,整体扩大了约 10 倍,这表明参与到新能源汽车产业协同创新网络中的个体数量显著增加,协同创新网络规模显著扩大。

协同创新网络合作强度不断提升。从网络平均度来看,整体上呈现上升趋势,由萌芽期的 1.447 增

加到发展期的 3.188,网络中每个创新个体与其它创新个体之间平均合作的次数不断增强,表明中国新能源汽车产业协同创新网络合作强度越来越大。

表 1 各阶段中国新能源汽车产业协同创新网络统计特征

Tab.1 Statistical characteristics of collaborative innovation networks in new energy automobile industry in China at various stages

指标	萌芽期 (2006—2012)	形成期 (2013—2017)	发展期 (2018—2022)
节点数	152	738	1 503
平均度	1.447	2.783	3.188
网络密度	0.015	0.011	0.005
平均路径长度	1.611	2.661	3.769
平均聚类系数	0.510	0.759	0.684

协同创新网络的紧密程度逐渐降低。网络密度整体偏低,且呈现出逐渐下降的趋势,从萌芽期的 0.015 下降至发展期的 0.005。较低的网络密度值表明创新网络成员联络稀疏,呈弱连接状态。密度的持续下降表明,随着新能源汽车产业的快速发展,创新个体数量快速增长,而网络中的合作关系增速相对滞后,导致网络密度被稀释,产学研合作未得到有效深化与充分利用。

协同创新网络的连通性较强,局部合作关系日益紧密,“小世界特征”逐渐显著。从平均路径长度和平均聚类系数来看,Strogatz^[25]指出较大的聚类系数和较小的平均路径体现了网络具有“小世界”特性。由结果知各阶段网络的平均路径长度介于 1~4 之间,意味着网络中任意两个节点之间仅需 1~4 个中间节点即可建立连接,表明协同创新网络具有较强的连通性。同时,聚类系数从萌芽期的 0.510 上升至发展期的 0.684,表明创新主体之间的局部合作关系日益紧密。且较小的平均路径长度与逐渐增大的聚类系数表明中国新能源汽车产业协同创新网络的“小世界特征”逐渐凸显。

3.2 协同创新网络演化动力机制分析

3.2.1 ERGM 结果分析

本文采用马尔科夫链蒙特卡罗估计法(MC-MC)对所建立的 3 个模型进行参数估计(见表 2)。由结果可知,模型 3 的 AIC 与 BIC 值最小,说明模型 3 的拟合效果更贴近实际,表明内生和外生机制同时促进了中国新能源汽车产业协同创新网络的演化,以下分析主要依据模型 3 的结论。

表 2(续)

变量 类型	变量名	萌芽期 (2006—2012 年)			形成期 (2013—2017 年)			发展期 (2018—2022 年)		
		模型 1	模型 2	模型 3	模型 1	模型 2	模型 3	模型 1	模型 2	模型 3
拟合	AIC	900.6	756.2	590.2	998.2	675.4	532.7	1 289.3	989.3	708.2
	BIC	938.5	875.4	623.1	1 093.4	894.2	784.4	1 249.5	956.2	894.1

注:PA 为创新能力;AG 为年龄;CM 为地区市场竞争程度;SP 为地区产业政策;PAH、PAM、PAL 分别为创新能力高、中、低三个等级水平;AGH、AGM、AGL 分别为年龄高、中、低三个等级水平;GP、IS、OP 分别为地理邻近性、制度邻近性和组织邻近性;GP×IS、GP×OP、IS×OP 分别为地理邻近性与制度邻近性、地理邻近性与组织邻近性、制度邻近性与组织邻近性的交互项;*、**、*** 分别表示 $p<0.05$ 、 $p<0.01$ 、 $p<0.001$;括号中为标准误差。

1) 网络演化的内生机制检验

中国新能源汽车产业协同创新网络存在传递性特征,且传递性对新能源汽车产业协同创新网络的演化具有正向影响,假设 H₁ 得到验证。Gwdsp 的估计系数在创新网络演化过程中始终显著为正,表明没有直接联系的两个体可通过中介点发生联系从而形成开放三角结构,即具有共享伙伴的创新个体更倾向于建立创新合作关系,促进网络的形成,验证了产业创新个体良好传递性有益于协同创新网络的演化。另一方面,Gwdsp 的系数随时间的变化产生了较大幅度的上升,表明考察期内,传递性效应对中国新能源汽车产业协同创新网络演化的促进作用逐渐加强。

2) 网络演化的外生机制检验

创新能力、个体年龄、个体所处的市场竞争程度与产业政策的马太效应对新能源汽车产业协同创新网络的演化均具有正向影响,假设 H_{2a} 得到验证。

创新能力与个体年龄的估计系数在演化过程中始终显著为正,且在发展期,创新能力和个体年龄的系数分别为 1.322 和 0.098,表明中国新能源汽车产业协同创新网络中存在着马太效应,即创新能力越强、年龄越大的个体获得新的创新合作的关系的概率就越大,反之,创新能力越弱、年龄越小的个体获得创新合作主导机会的概率则越低。原因可能在于:①新能源汽车产业是一个高度技术密集型的行业,涉及到电池、电机、电控等多个核心技术领域,且技术不断发展和更新,创新能力越强、越成熟的个体往往拥有较长时间的研发、技术积累和市场经验,更易取得先发竞争优势,也更容易找到合作伙伴,其他创新个体建立合作关系;②政府在推动新能源汽车产业发展的过程中,出于风险和不对称等因素的考虑,可能会倾向于支持有稳定发展历史和较强综合实力的企业,以保障行业的健康发展;③创新能力强和市场存在时间较长的企业,往往同时具有更

好的品牌口碑和市场认可度,在新型能源汽车保有量的存量和增量上均有较高的竞争优势等。这些因素都会进一步促进协同网络的演化。

市场竞争程度的估计系数显著为正,表明市场竞争程度的马太效应正向促进新能源汽车产业协同创新网络的演化。这是因为产业市场竞争程度越激烈,企业面临的压力和挑战就越大,迫使它们寻求通过合作来增强自身的创新能力和市场竞争力。同时,产业政策的估计系数始终显著为正,表明了产业政策的马太效应正向促进新能源汽车产业协同创新网络的演化,主要原因在于随着政府对新能源汽车产业的政策支持力度加大,创新个体获得了更明确的发展方向。这些政策通过设定技术标准、提供研发资金支持和补贴等措施,推动了创新个体之间的协作与资源整合,形成了强有力的创新合作网络。

在同配效应方面,高创新能力与中、低年龄个体具有同配效应,且其同配效应显著促进产业协同创新网络的演化,而中、低创新能力与高年龄个体未显现出同配效应,假设 H_{2b} 得到部分验证。PAH 的估计系数在网络演化过程中始终显著为正,表明高创新能力个体具备更强的创新资源、技术积累和产业洞察能力,更倾向于选择同样具备高创新能力的个体进行“强强联合”,共同推进关键技术突破,促进协同创新网络的演化;而 PAM 与 PAL 的系数却始终显著为负,表明中、低创新能力个体更倾向于跨创新能力层级进行合作,即中、低创新能力个体在新能源汽车产业的协同创新网络中未显现出同配效应。这意味着低创新能力个体间的合作通常难以产生重大突破,它们更多扮演资源整合者或追随者角色。然而,通过与高创新能力个体的跨层次合作,低创新能力企业能借助先进技术和资源实现技术升级,进而推动整个网络的创新突破。AGH 的估计系数显著为负,而 AGM 与 AGL 的估计系数显著为正,表明高年龄个体更容易被边缘化,传统汽车行业的老牌

专家和管理者难以形成创新合力,从而高年龄个体间未显现出同配效应。相反地,中、低年龄个体作为新能源汽车产业的核心创新力量,更倾向与同龄段个体建立创新合作关系,加速了新能源汽车技术的突破和市场化。此外,政府补贴、科研资金、风投资本往往倾向于支持年轻的科技创业者和创新团队(如蔚来、小鹏、理想等公司),促使年轻个体间的同配增强,从而形成了紧密的创新网络,促进新能源汽车产业协同创新网络的演化。

地理邻近性、制度邻近性和组织邻近性均对中国新能源汽车产业协同创新网络的演化有显著影响。假设 H_{3a} 得到验证。

首先,地理邻近性的估计系数始终显著为负,且系数绝对值随着时间推移而变的越来越大。这说明创新个体间的地理距离越大,越不利于创新合作关系的建立,反之,越有利于创新合作关系的建立,从而促进协同创新网络的演化。且在产业协同创新网络演化进程中,其对协同创新网络演化的作用强度在逐渐增强。其原因可能在于地理邻近性可以促进新能源汽车行业间的信息交流、降低合作成本、增强信任与合作、共享资源等,进而对其产业的协同创新网络产生积极地推动作用。

其次,制度邻近性的估计系数在网络形成期与发展期显著为正。处于同一个省域行政区的个体间具有相似的制度特征,交流隔阂越少,越易建立创新合作关系,从而促进协同创新网络的演化;反之,不同省域的制度环境差异会给阻碍创新合作,抑制协同创新网络的演化。

最后,组织邻近性的估计系数显著为正,但随着时间的推移,系数值不断变小。在新能源汽车产业协同创新网络形成期,组织邻近性扮演着关键角色,创新个体倾向与组织结构相似的伙伴进行合作,这种倾向有助于在合作关系中减少由于组织结构、文化等方面差异所产生的合作障碍,易于技术交流和信息反馈的顺畅进行。然而,随着时间的推移,当协同创新网络规模扩大,网络中的创新个体逐渐发展出多样化的合作模式,并积累了丰富的创新合作经验,它们开始寻求与其他类型组织的合作机会,在产学研用相结合的新诉求下,组织邻近性作用于中国新能源汽车产业协同创新网络演化的效果逐渐降低。

地理邻近性、制度邻近性和组织邻近性间以组合的形式存在交互作用,且均促进网络的形成,假设 H_{3b} 得到验证。地理邻近性、制度邻近性与组织邻近性两两之间的交互项估计系数均显著为正,表明三者间存在协同的交互作用,且正向促进了新能源

汽车协同创新网络的形成和演化。相邻地区往往共享相似的产业政策,如长三角和京津冀区域的统一补贴、税收优惠和基础设施支持,这不仅降低了政策执行的差异性,还减少了企业在跨区域合作时的制度摩擦(制度邻近性)。同时,政府倾向于在地理相近的区域设立新能源汽车产业园区和协同创新平台,促进企业、高校和科研机构的紧密合作,推动资源共享和人才流动(组织邻近性)。因此,地理邻近性不仅直接促进了企业间的合作,还通过提升制度邻近性和组织邻近性,间接增强了创新网络的稳定性和扩展性,促进新能源汽车产业协同创新网络的演化。此外,制度邻近性和组织邻近性的相互作用共同推动了新能源汽车产业协同创新网络的演化。统一的政策环境和行业标准(制度邻近性)为企业、高校和科研机构提供了明确的合作规则,降低了制度壁垒,使具备相似组织结构和运营模式的创新个体(组织邻近性)更容易建立稳定的合作关系。同时,组织邻近性加快了知识转移和知识溢出,使合作个体能够更高效地吸收互补资源,进一步推动产业创新。当组织类型相似的个体的合作加深时,它们会促使政府优化政策,完善行业标准,进一步提升制度邻近性。这种双向促进的作用促进了新能源汽车产业协同创新网络演化,推动技术进步和市场竞争力的提升。

3) 网络演化的内外生机制相互作用分析

在新能源汽车产业协同创新网络的演化过程中,内外生机制的相互作用关系呈现出明显的互动性。初期阶段,外部因素如创新能力、个体年龄、市场竞争程度和产业政策等对网络演化的影响较为显著,形成了强烈的马太效应主导了网络的初步发展。在这一阶段,内生因素(如传递性)对网络演化的影响较为微弱,表明外部因素在推动网络发展的初期阶段占据主导地位。然而,随着网络演化的深入,内生机制与外生机制的相互作用关系逐步加强。外生机制在推动创新网络形成的同时,为内生机制的作用提供了基础。例如,地理邻近性对网络演化起到显著促进作用,且随着网络规模的扩大,其影响逐渐增强,说明物理空间的接近性不断强化合作关系。而制度邻近性和组织邻近性则通过减少制度壁垒和促进资源共享,增加了创新个体间的互动和信任积累。这些空间邻近和信任积累的作用降低了合作的不确定性,使更多的创新个体愿意通过已有的合作关系拓展新的合作,继而增强内生机制的传递性效应,推动网络演化。换言之,外部机制通过降低创新合作的门槛和提升合作动机,间接强化了内生机制

的作用,而内生机制的深化则进一步巩固了外部机制对网络稳定性的贡献。最终,内外生机制的相互促进作用推动了新能源汽车产业协同创新网络向更加稳定、高效的方向演化,形成了一个动态演进的创新生态。

3.2.2 拟合优度检验与模型诊断

与传统的线性模型根据 R^2 来检验回归估计的拟合情况不同,在 ERGM 中,拟合优度检验的基本思想是,在模型收敛的前提下,通过比较实际观测网络与仿真网络的特征差异来评估 ERGM 的拟合情况。若观测网络的关键结构特征位于仿真网络的置信区间,则认为仿真网络较好地解释了原始网络。由于篇幅原因,本文仅展示发展期模型 3 的拟合优

度检验结果(见图 3)。图中主要包括节点度(degree)、二元共享伙伴(dyad-wise shared partners)、边共享伙伴(edges-wise shared partners)和测地距离(geodesic distances)。在拟合图中,粗黑色线代表中国新能源汽车产业协同创新观测网络的测量结果,灰色线则代表了仿真网络在 95% 置信区间时的测量结果。当粗黑色线落在灰色线条之间时,表明仿真网络能够较好的代表观测网络的结构特征,仿真网络能够较好地解释节点度、二元共享伙伴、边共享伙伴与测地距离,说明该模型能够准确把握中国新能源汽车产业协同创新网络的动态演化机制,模型具有良好的拟合效果,证实了本文构建的网络模型的科学与合理性。

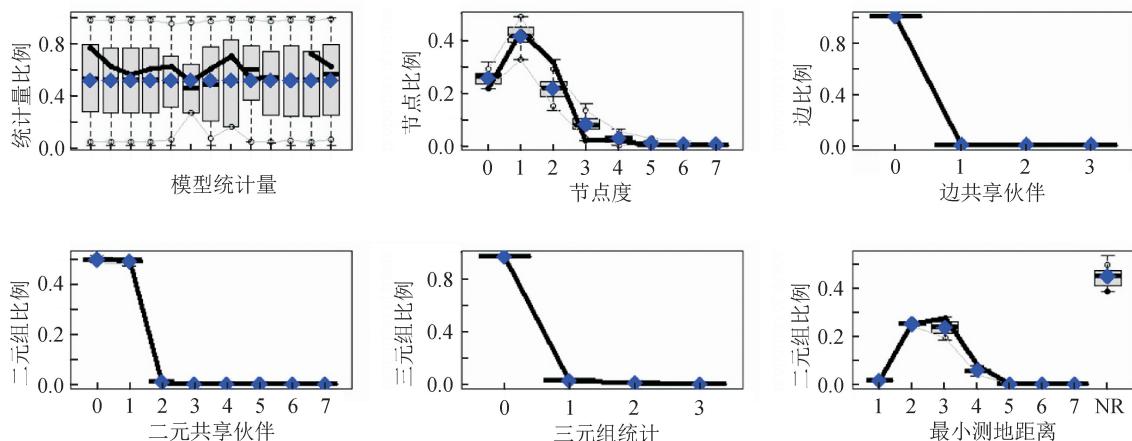


图3 ERGM 拟合优度检验图
Fig. 3 ERGM goodness-of-fit test chart

4 结论

本文将中国新能源汽车产业创新个体分为产、学、研等三类组织类型,基于 2006—2022 年产业联合申请发明专利数据,构建了中国新能源汽车产业协同创新网络,应用社会网络分析法描述分析协同创新网络演化特征,运用随机指数图模型(ERGM)实证检验了协同创新网络的演化动力机制,得到一些研究结论与实践启示。

1) 考察期内,中国新能源汽车产业协同创新网络发展优势明显。参与协同创新的主体规模不断扩大,个体间合作强度不断提升;尽管整体网络紧密程度有所下降,但局部合作关系日益紧密,网络连通性较强,并逐步呈现出显著的“小世界特征”。这些网络演化特征表明了政府对产业创新发展政策支持效果显著,企业自身成长亦有不俗的表现。同时,也应注意到,进一步政策支持不仅应关注到如“国家电网有限公司”等对于协同创新网络处于重要位置的创

新个体,也应鼓励和吸引处于相对弱势创新合作地位的组织个体参与创新合作,从而促进新能源汽车产业协同创新更深、更广发展。

2) 中国新能源汽车产业协同创新网络演化受内生和外生机制的共同影响,各种机制作用却有不同。表示内生结构效应的传递性具有正向促进作用,应充分关注协同创新网络中具有“桥梁”角色的中介创新个体,他们在创新个体之间创新资源的流动、和创新合作信任关系与合作联盟的建立过程中,起着重要的作用。同时,核心中介创新个体在网络中其辐射作用的发挥,进一步带动关联组织的创新能力提升,展现出影响创新网络布局的重要作用,该类型创新主体的成长和发展,有益于整个产业的技术升级转型和协同创新生态优化。

外生机制方面的影响较为多样化。在行动者-关系的马太效应方面,个体创新能力、年龄属性以及个体所处地区的市场竞争程度和产业政策军队新能源汽车产业协同创新网络的演化产生正向促进作

用,但在同配效应方面,高创新能力和中、低年龄的个体具有同配效应,且同配效应起正向促进作用,而中、低创新能力高年龄的个体未显现同配效应。这表明,各类个体参与创新的主动性和积极性方面具有较大的异质性,在相关政策的制定方面应有的放矢、差别对待。在通过支持和激励政策促进中、低创新能力和高年龄创新主体参与创新的积极性和主动性的同时,也应继续发展高创新能力和中、低年龄创新个体的协作创新积极性,打破高-高、低-低合作的同配局面。此外,政策制定应充分考虑市场竞争程度和产业政策的作用,既要促进高竞争性市场环境下的创新主体的积极性,又要通过产业政策引导不同创新主体之间的合作与协同创新。在网络协变量效应方面,地理距离和行政区划越接近越有益于协同创新网络的演化,创新个体的组织邻近性在萌芽期有促进作用,但考察期后期的影响逐渐降低。这一结论表明,中国新能源汽车产业协同创新网络演化仍面临行政壁垒和地理距离约束,但跨产、学、研组织的创新合作有不断增强的趋势。在创新资源要素全国统一市场建设进程中,应关注行政区壁垒和区域空间障碍,并进一步促进多主体合作,持续发挥产学研协同创新优势。在多维邻近性的交互作用方面,地理邻近性、制度邻近性和组织邻近性两两之间存在协同的交互作用,并促进了新能源汽车产业协同创新网络的演化。这表明地理邻近性、制度邻近性和组织邻近性这三个维度在新能源汽车产业的协同创新网络中并非独立存在,技术创新的推进不仅仅依赖于单一因素,而是需要这些因素共同作用,以促进信息交流、技术合作和资源整合。

本文在区分产学研各创新主体的基础上,对新能源汽车产业协同创新网络的演化特征和演化动力机制进行了分析,未来,可针对不同产业链环节创新主体的异质性表现开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 戴靓,纪宇凡,王嵩,等. 中国城市知识创新网络的演化特征及其邻近性机制[J]. 资源科学,2022,44(7): 1494-1505.
DAI Liang, JI Yufan, WANG Song, et al. Evolutionary characteristics and proximity mechanism of inter-city knowledge innovation networks in China[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1494-1505.
- [2] 索琪,李长升. 技术-合作网络视角下中国新能源汽车产业演化动力机制研究[J]. 管理学报,2023,20(3): 329-338.
SUO Qi, LI Changsheng. The dynamic evolution mechanism of China's new energy vehicle industry from the perspective of technology-cooperation network[J]. Chinese Journal of Management, 2023, 20(3): 329-338.
- [3] 李文文,李垚. 新能源汽车产业协同创新演化研究——基于动态网络视角[J]. 科技进步与对策,2025,42(2):63-72.
LI Wenwen, LI Yao. Collaborative innovation in new energy vehicle industry from the dynamic network perspective[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2025, 42(2): 63-72.
- [4] 王艳梅,孙恩慧,陈雨生,等. 中国海洋战略性新兴产业技术创新协同网络结构与驱动机制[J/OL]. 科研管理,1-13[2025-01-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1567.G3.20241202.0901.004.html>.
WANG Yanmei, SUN Enhui, CHEN Yusheng, et al. The collaborative network structure and driving mechanism of technological innovation for marine strategic emerging industries in China[J/OL]. Science Research Management, 1-13 [2025-01-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1567.G3.20241202.0901.004.html>.
- [5] 王叶,曲如晓. 全球创新网络的演化特征和动力机制研究[J]. 科研管理,2024,45(9):1-10.
WANG Ye, QU Ruxiao. Research on the evolutionary characteristics and dynamic mechanism of global innovation network[J]. Science Research Management, 2024, 45(9): 1-10.
- [6] MERTON R K. The Matthew effect in science[J]. Journal of Advanced Nursing, 1968, 159: 56-63.
- [7] 刘斐然. 市场竞争、政府支持与产学研合作创新[J]. 现代经济探讨,2022(5):88-98.
LIU Feiran. Market competition, government support and industry-university-research cooperation innovation[J]. Modern Economic Research, 2022(5): 88-98.
- [8] 张杨勋,周浩. 战略性新兴产业政策对企业合作创新影响的实证检验[J]. 统计与决策,2023,39(24): 58-63.
- [9] 王海花,孙芹,郭建杰,等. 长三角城市群协同创新网络演化动力研究:基于指数随机图模型[J]. 科技进步与对策,2021,38(14):45-53.
WANG Haihua, SUN Qin, GUO Jianjie, et al. Research on evolution dynamic of collaborative innovation network in the Urban Agglomeration of Yangtze River Delta based on ERGM[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2021, 38(14): 45-53.
- [10] 赵东,张晓青,黄彩虹,等. 黄河下游城市协同创新网络演化特征及影响因素分析[J]. 西安理工大学学报,

- 2025,41(1):12-22.
- ZHAO Dong, ZHANG Xiaoqing, HUANG Caihong, et al. Evolution characteristics of collaborative innovation network in cities in the lower reaches of the Yellow River and its analysis of influencing factors[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2025, 41(1): 12-22.
- [11] BOSCHMA R. Proximity and innovation: a critical assessment[J]. *Regional Studies*, 2005, 39(1): 61-74.
- [12] 刘晓燕,李金鹏,单晓红,等. 多维邻近性视角下集成电路产业技术交易网络演化机制研究[J]. 中国科技论坛:2022(5):49-57,70.
- LIU Xiaoyan, LI Jinpeng, SHAN Xiaohong, et al. Research on the evolution mechanism of IC industry technology trading network from the perspective of multi-dimensional proximity [J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2022(5): 49-57, 70.
- [13] 周青,陈佩夫,毛崇峰,等. 多维邻近性对国际技术标准生存时间的影响研究——基于 ITU 国际技术标准生存分析[J]. 研究与发展管理,2024,36(3):149-162.
- ZHOU Qing, CHEN Peifu, MAO Chongfeng, et al. Influence of multidimensional proximity on the survival time of international technical standards—Survival analysis based on ITU international technical standards [J]. *R&D Management*, 2024, 36(3): 149-162.
- [14] HANSEN T. Substitution or overlap? The relations between geographical and non-spatial proximity dimensions in collaborative innovation projects[J]. *Regional Studies*, 2015, 49(10): 1672-1684.
- [15] BROEKEL T, BOSCHMA R. Knowledge networks in the Dutch aviation industry: the proximity paradox [J]. *Journal of Economic Geography*, 2012, 12(2): 409-433.
- [16] 吕爽,孙铁山,张洪鸣. 高铁网络如何促进城市间合作创新——基于高铁网络通达性与合作专利的实证分析[J]. 经济评论,2024(3):92-108.
- LÜ Shuang, SUN Tieshan, ZHANG Hongming. How high-speed rail network promotes inter-city collaborative innovation? Empirical analysis based on high-speed rail network accessibility and co-patents [J]. *Economic Review*, 2024(3): 92-108.
- [17] LIN Z J, KITTS J A, YANG Haibin, et al. Elucidating strategic network dynamics through computational modeling[J]. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 2008, 14(3): 175-208.
- [18] FRANK O, STRAUSS F D. Markov Graphs [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1986, 81(395): 832-842.
- [19] WASSERMA S, PATTISON P. Logit models and logistic regressions for social networks: I. An introduction to Markov graphs and p [J]. *Psychometrika*, 1996, 61(3): 401-425.
- [20] HOLLAND P W, LEINHARDT S. An exponential family of probability distributions for directed graphs: rejoinder[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1981, 76(373): 62-65.
- [21] 杨振森,周颖. 数字化转型如何促进企业高质量发展——基于自然资源基础观的视角[J]. 企业经济, 2024,43(2):43-53.
- YANG Zhensen, ZHOU Ying. How does digital transformation promote high-quality development of enterprises[J]. *Enterprise Economy*, 2024, 43(2): 43-53.
- [22] 成泷,蔡俊亚,杨毅,等. 依赖性与嵌入性:产学研合作创新持续性研究[J]. 科技进步与对策,2020,37(10): 29-36.
- CHENG Long, CAI Junya, YANG Yi, et al. Interdependence and embeddedness: research on the persistence of industry-university-research collaborative innovation[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2020, 37(10): 29-36.
- [23] 韩永辉,黄亮雄,王贤彬. 产业政策推动地方产业结构升级了吗? ——基于发展型地方政府的理论解释与实证检验[J]. 经济研究,2017,52(8):33-48.
- HAN Yonghui, HUANG Liangxiong, WANG Xianbin. Do industrial policies promote industrial structure upgrading? Theory and evidence from China's development-oriented local government[J]. *Economic Research Journal*, 2017, 52(8): 33-48.
- [24] 陈钰芬,王科平. 多维邻近性视角下人工智能合作创新网络演化研究 [J]. 管理学报,2023, 20(7): 1045-1055.
- CHEN Yufen, WANG Keping. Research on the evolution of ai cooperative innovation network from the perspective of multi-dimensional proximities[J]. *Chinese Journal of Management*, 2023, 20(7): 1045-1055.
- [25] STROGATZ S. Exploring complex networks[J]. *Nature*, 2001, 410(6825): 268-276.

(责任编辑 王绪迪)