

从邻近驱动向能力驱动: 高端装备制造业创新网络的演化机理研究

谢洪涛¹, 孙紫旭¹, 刘兵兵¹, 郭文嘉^{1,2}

(1. 昆明理工大学管理与经济学院, 云南 昆明 650500;

2. 贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 高端装备制造业是培育新质生产力的核心阵地。针对关键技术空心化与地域锁死困境, 本文基于结构化理论构建“结构约束—能动选择”互嵌框架, 探讨创新网络跨区域演化的微观动力。研究利用 2013—2024 年中国高端装备制造产业专利合作数据, 采用指数随机图模型 (exponential random graph model, ERGM) 分析发现: 第一, 多维邻近构成的结构约束具有显著的内生依赖性, 但网络整体正经历从局部闭合同突破结构约束的范式转型, 实现了从路径依赖向路径创造的跨越; 第二, 基于能力补链、制度兼容与关系承诺 (3C 逻辑) 的能动选择是驱动跨区域结盟的核心动能, 可有效对冲远程合作的交易成本与风险不确定性; 第三, 技术能力对地理阻隔具有显著的能动消解效应, 其通过与地理距离的负向交互驱动网络从邻近驱动向能力驱动转型。研究揭示了创新主体突破结构约束的系统逻辑, 为完善跨区域协同创新系统治理体系、破解卡脖子难题提供了决策依据。

关键词: 创新网络; 跨区域演化; 结构约束; 能动选择; ERGM

中图分类号: C93; F426

文献标识码: A

文章编号: 1005-0566(2026)08-0045-12

Transitioning from proximity-driven to capability-driven: Evolutionary mechanisms of innovation networks in the advanced equipment industry

XIE Hongtao¹, SUN Zixu¹, LIU Bingbing¹, GUO Wenjia^{1,2}

(1. Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Faculty of Materials and Architectural Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Advanced equipment manufacturing (AEM) is the core battleground for cultivating new-quality productivity. Addressing technological hollowing out and geographical lock-in in key areas, this paper constructs an embedded framework of “structural constraints and proactive choices” grounded in structured theory to clarify the micro-dynamics of cross-regional innovation network evolution, focusing on how innovation entities break through geographical lock-in. Using patent cooperation data from China’s high-end equipment manufacturing industry from 2013 to 2024, the study employs an exponential random graph model (ERGM) to analyze the following findings: First, structural constraints formed by multidimensional proximity exhibit significant endogenous dependence, but the network as a whole is undergoing a paradigm shift from local closure to breaking through structural constraints, achieving a leap from path dependence to path creation. Second, proactive choices based on capability complementarity, institutional compatibility,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72464019; 72162026)。

作者简介: 谢洪涛 (1974—), 男, 湖南涟源人, 昆明理工大学管理与经济学院教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为创新管理、复杂系统管理。

and relationship commitment (3C logic) are the core driving force for cross-regional alliances, effectively offsetting the transaction costs and uncertainties of remote cooperation. Third, technological capabilities have a significant proactive dissipation effect on geographical barriers, driving the network's transformation from proximity-driven to capability-driven through a negative interaction with geographical distance. This research reveals the systemic logic of innovation entities breaking through geographical lock-in, providing a decision-making basis for improving the governance system of cross-regional collaborative innovation and solving bottleneck problems.

Key words: innovation networks; cross-regional evolution; structural constraints; proactive selection; ERGM

高端装备制造业是我国新质生产力培育的核心阵地,其创新资源的时空配置效率是影响产业转型升级的核心要素。然而,由于高端装备产品具有高度的技术复杂性与系统集成特征,我国在该领域长期存在核心技术空心化的风险,并面临显著的地理锁定困境。从系统科学视角来看,这种锁定主要源自于创新网络演化具有的内生拓扑惯性。根据结构化理论,个体的创新行动深刻嵌入在复杂的社会结构中,结构既是行动的产物,也是约束行动的规则与资源^[1]。传统的区域化集聚虽带来了初期的规模效应,但随着网络的演化与发展,维持既有关系的协调成本激增,网络易出现信息冗余与局部闭合,形成显著的结构性漏斗^[2]。这种漏斗效应抑制了异质性知识的远距离流动,使企业难以通过跨区域协同获取颠覆性创新所需的互补性资源^[3]。

尽管既有研究已对创新网络的演化机理进行了大量探讨^[4],但仍存在以下局限:一方面是过度强调邻近性决定论,忽视了企业在寻求实现技术突破时的能动选择;另一方面是缺乏对能力互补视角的微观解构,未能深刻揭示主体如何利用自身资源位势突破结构约束带来的空间阻隔。特别是对于高端装备制造业而言,其创新不仅依赖地理邻近带来的溢出,更依赖于跨地域获取异质性互补资源。面对关键核心技术攻关的战略需求,企业如何基于能力补链逻辑进行策略性组网?这种能动性是否足以消解由地理距离与结构惯性构成的系统屏障?

基于此,本文构建“结构约束—能动选择”互嵌的理论框架,以 2013—2024 年中国高端装备制造产业为研究对象,运用指数随机图模型(ERGM)

揭示其创新网络跨区域演化的系统动力。本文的边际贡献主要体现在以下三个方面。第一,揭示了创新网络从邻近驱动向能力驱动转型的演化路径。区别于以往侧重静态邻近性解释的视角,本文通过纵向窗口对比,识别出高端装备制造创新网络如何逐步打破内生结构的路径依赖,清晰刻画了网络从局部闭合向突破地理锁定、实现跨区域协同创新的动态轨迹。第二,构建了结构约束与能动选择互嵌的理论分析框架。针对现有研究对微观主体战略意图关注不足的问题,本文明确引入由能力补链、制度兼容与关系承诺构成的“3C 能动逻辑”,解构了技术能力对空间阻隔的负向调节(消解)效应,从而揭示了结构硬约束与主体能动选择在网络演变中的互嵌博弈机理。第三,提出了突破地理锁定与跨区域协同的创新系统治理体系。基于“结构—能动”互嵌的实证发现,本文从政府规制优化、链主企业协同以及数字赋能支撑等维度,为优化国家创新系统配置、破解核心环节技术空心化难题提供了具有针对性的决策参考。

一、理论分析与研究假设

技术创新网络的跨区域演化,本质上是微观主体的能动性突破与宏观结构的惯性约束深度博弈后的系统涌现。高端装备制造业作为典型的大科学、大工程领域,具有技术密集的系统集成特征,其核心零部件的研发高度依赖于全球范围内的异质性知识耦合。这种组网逻辑不仅受制于初始的空间嵌入,更依赖于主体在数字时代下的战略突围。本文构建“结构约束—能动选择”互嵌框架(见图 1),探究创新网络如何跨越路径依赖,实现向能力驱动的模式转型。

(一)理论演进:从结构规制到能动互嵌

现有的技术创新网络研究在解释跨区域演化时面临逻辑困境。一方面,是结构决定论的邻近性陷阱。该观点认为地理、认知等邻近性结构预设了关系的边界,但在数字时代,高端装备企业为获取异质性补链资源,常支付高昂成本进行远距离搜寻,这一跨区跳跃现象在结构决定论下难以自洽^[6]。但在数字时代与全球化背景下,高端装备企业为获取关键补链资源,常通过异地结盟实现跨区跳跃。另一方面,是能动论的去脉络化缺陷。资源基础观(RBV)强调主体基于能力互补的理性选择^[7],却忽视了创新行动深度嵌入在既有的拓扑位置与所有制关系中。

值得关注的理论前沿是,数字技术正引发地理消亡的深度变革。在高端装备研发中,数据复制成本与跨区域流动成本近乎为零,这一特征彻底扭转了传统合作中的信息不对称。数字技术不仅提供了搜寻杠杆,更重塑了主体的能动空间。因此,必须引入“结构—能动互嵌”视角:结构界定了初始的路径门槛,而以数据流动为支撑的能动选择,则是驱动结构演变、实现路径创造的核心力量。

(二)结构约束:内生拓扑惯性与多维邻近性的边界作用

结构约束是网络演化的重力场,通过路径依赖效应预设了关系的准入门槛^[1]。

(1)内生拓扑惯性的路径约束。高端装备制造业涉及精密传动、重型动力等高专用性资产,研发试错成本极高^[8]。这种特征诱导网络通过传递三方组实现声誉背书与风险共担^[9],进而形成显著的局部闭合与结构瓶颈,使得新晋主体面临严重的结构性歧视^[10]。

(2)多维邻近性的过滤效应。邻近属性通过降低沟通门槛与不确定性,将潜在对象过滤为现实伙伴。地理、技术等邻近性构成了网络演化的结构性漏斗,诱导主体在低成本区域进行路径依赖式创新。首先,地理邻近在促进复杂隐性知识

的面对面交互中具有不可替代性,这种空间成本优势使得主体产生强烈的本地依赖。其次,技术邻近能够降低知识吸收的认知摩擦,使主体倾向于在熟悉的领域内开展低风险合作。虽然这种邻近性驱动的演化路径能够带来短期的协作效率,但在高端装备制造业中,它也构成了隐形的认知红利陷阱^[11]。由于地理与技术的双重过滤,主体易被锁定在同质化的本地资源圈内,形成显著的进入壁垒。这种由邻近性构成的重力场,使得创新合作在初始阶段表现出强烈的内向型特征与空间粘性^[12]。据此提出假设:

H1:内生结构效应与多维邻近性构成了创新合作的路径门槛,导致合作倾向于在局部空间发生。

(三)能动选择:基于“能力—兼容—承诺”的补链逻辑

能动选择是主体基于战略意图的突围。在数字时代,数据流动成本的极小化与在线协同研发的普及,极大地扩张了高端装备企业的能动性维度。

(1)能力:基于资源基础观的补链搜寻。高端装备制造业创新本质上是高壁垒下的能力博弈^[13]。由于数据搜寻成本趋零,高能力主体可以即时识别全国乃至全球范围内的异质资源^[14]。这种能动性使其不再受困于本地资源枯竭,而是基于补链动机,跨越物理阻隔去寻找技术位势匹配的远端伙伴。据此提出假设:

H2a:合作伙伴的技术能力越强,其突破空间约束建立跨区域结盟的概率显著越高。

(2)兼容性:组织契合对治理成本的能动消解。识别互补能力后,协作效率取决于组织间的兼容性。高端装备制造业的研发往往涉及长周期、高投入的复杂系统集成,此时,组织兼容性(如所有制契合、规模对等)能够为主体双方构建共同的话语体系与逻辑契合基础^[15]。从交易成本理论看,跨区域合作显著放大了监控与协调成本,而所有制属性的契合(如国企对国企)能显著降低因体

制逻辑差异带来的制度性磨损;规模的对等则确保了双方在资源投入、风险承受力与战略优先级上的对称性,从而降低了合作过程中的话语权不匹配风险^[16]。在数字时代,在线协同平台并非自动消除组织差异,而是为主体提供了弥合鸿沟的能动杠杆。能动主体倾向于选择逻辑契合、规模匹配的伙伴,利用数字技术进一步放大话语体系一致的红利,以对冲空间距离带来的治理负担,实现协作效率的最优化。据此提出假设:

H2b:组织兼容性(所有制契合、规模对等)显著提升跨区域合作的可能性。

(3) 承诺:合作历史对跨区域违约的风险对冲。远距离协同因缺乏地理邻近下天然具有的非正式社会监督,面临极高的监控成本与机会主义风险。而基于历史合作经验形成的关系承诺能够为跨越空间阻隔的协作提供信用锚点^[17]。一方面,合作历史能够产生认知互信与行为惯性。这种非正式制度存量能有效抵消远程协作中的信息不对称。另一方面,关系承诺本质上是一种心理契约,它带来的违约成本远高于短期投机收益。在数字时代,在线交互平台通过数字化记录与高频沟通,能够动态地激活并维持这种基于历史经验的信任关系。能动主体倾向于通过重复结盟来锁定具有信用背书的成熟关系,以此作为突破本地化陷阱、保障长程合作安全性的核心策略。据此提出假设:

H2c:基于历史经验的关系承诺显著正向影响跨区域重复结盟。

综上,3C 匹配机制构成了企业跨区域合作的能动逻辑集成:能力维度驱动增益搜索,兼容性维度降低治理成本,承诺维度有效对冲风险,三者共同驱动了主体对空间约束的能动突破。

(四)互嵌逻辑:能力对距离的消解机制

结构与能动并非简单的加总关系,而是存在深层的动态调节机制。本研究认为,数据跨区域流动是消解地理约束、促成地理消亡的物质基础,而技术能力则是驱动这一流动的核心引擎。

高端装备领域的高能力主体,远程协作产生的战略收益足以覆盖残余摩擦成本^[18]。特别是当虚拟设计平台等数字协作平台普及后,数据跨区域流动的成本趋近于零,使得技术能力强的主体可以实现云端组网^[19],邻近性对合作的结构性约束随主体能力的增强呈现显著的边际递减效应^[20]。这种能力消解距离的逻辑,是驱动创新网络由邻近驱动转向能力驱动的关键。据此提出假设:

H3:技术能力与地理邻近在驱动网络演化中存在替代效应(负向调节),即能动性的增强能够消解地理结构的约束。

如图 1 右下角所示,能动选择通过合作关系的构建转化为合作网络连边。这一过程依赖于 3C 逻辑的微观匹配机理:当能力、兼容与承诺达成一

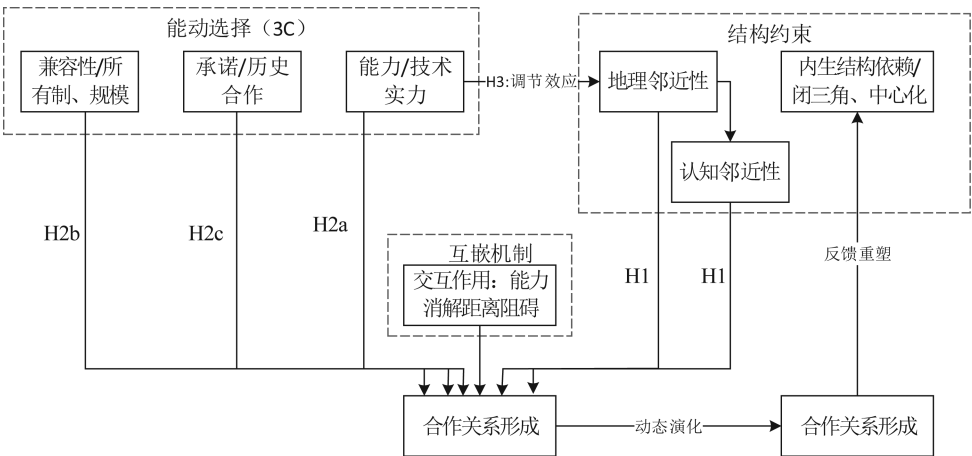


图 1 “结构—能动性互嵌”理论分析框架

致时,便促成了跨区域的长程连边。而这些长程网络连边又通过反馈重塑网络构建逻辑,不断对冲网络的结构内生惯性,驱动整个系统向更高维度的跨区域格局演化。

二、研究设计

本文旨在揭示技术创新网络跨区域演化的“结构—能动”互嵌机制。为解决网络数据中广泛存在的结构依赖性(如互惠性、传递性)导致的统计偏误,本研究采用指数随机图模型(ERGM)进行实证检验,并针对产业演化的阶段性特征进行分段对比。

(一)研究方法:指数随机图模型(ERGM)

技术创新网络属于典型的非线性复杂系统,其演化过程交织着内生自组织演化与外生环境驱动^[21]。传统的线性计量模型(如 Logistic 回归)基于观测值相互独立的假设,难以捕捉系统内部的反馈机制与结构依赖特征。

本文采用指数随机图模型(ERGM)进行实证研究,其学术意义在于:提供了一个整合性的建模框架,能够模拟“微观能动行为—网络反馈机制—宏观系统格局”的涌现过程。ERGM 的逻辑契合了结构化理论中结构与能动的辩证统一:首先,通过结构闭合性、偏好附着性等统计量捕捉网络的自组织特征,能有效揭示系统如何在既有连接基础上实现自演化。其次,通过引入 3C 逻辑及空间变量,刻画微观主体在面临外部环境约束时的能动选择。此外,ERGM 能揭示主体微观能动选择如何通过网络系统的自反馈机制,最终累积并涌现为宏观的跨区域协作格局,从而实现了复杂创新系统演化黑箱的深度解构。ERGM 模型的基本形式为:

$$P(Y=y|\theta) = \frac{\exp(\theta^T g(y, X))}{k(\theta, y)} \quad (1)$$

其中, Y 为随机网络, y 为观测到的实际网络; $g(y, X)$ 为包含内生结构统计量与外生属性统计量的向量; θ 为待估参数,代表各统计量对连边形成的贡献强度; $k(\theta, y)$ 是标准化常数,用于

确保概率和为 1。由于该常数计算极其复杂,本文采用马尔可夫链蒙特卡罗最大似然估计法(MCMCMLE)进行参数求解。

(二)样本选取与数据来源

本文选取中国高端装备制造产业作为实证对象。该产业具有高研发强度、长产业链条及显著的跨区域协作特征,是观察“结构—能动”博弈的理想研究对象。

(1) 合作网络构建:数据源自于中国国家知识产权局(CNIPA)专利数据库。本文检索并清洗了 2013—2024 年该产业的所有联合申请专利,在剔除个人及非营利机构后,以企业为节点,以合作申请行为作为连边权重。为避免单一年度数据随机性波动带来的误差,参考 Balland 等^[11]的研究,以 4 年为一个观测窗口。

(2) 数据匹配与清洗:通过企业名称匹配 CSMAR 及企查查数据,补充企业注册地、所有制及财务指标。

(三)变量定义与测度

基于“结构—能动性互嵌”框架,本文将 ERGM 统计量归纳为以下维度(见表 1)。

表 1 变量定义与测度方法说明表

变量类别	变量名称	ERGM 统计量/测度方法	理论含义
因变量	合作连边	Edges(存在合作=1, 否则 0)	网络密度与基准概率
内生结构	结构闭合性	GWESP(共享伙伴几何加权统计量, $\alpha = 0.25$)	局部传递性与社会嵌入
	偏好附着性	GWDEG(节点度几何加权统计量, $\alpha = 0.25$)	明星效应与马太效应
	地理距离	edgescov(经纬度球面距离的对数值)	H1:空间成本约束
结构约束	认知邻近	edgescov(基于 IPC 向量的余弦相似度)	H1:吸收能力基础
能动选择	技术能力	nodecov(企业累计专利授权量对数值)	H2a:能力吸引效应
	技术位势差	absdiff(两节点累计专利授权量差值绝对值)	H2a 补充:验证同质吸引还是能力互补
	所有制匹配	nodematch(相同所有制类别取 1)	H2b:组织兼容性
	规模相似性	absdiff(资产总额差值的绝对值)	H2b:规模对等效应
	关系承诺	edgescov(上一阶段网络邻接矩阵)	H2c:路径依赖与重复结盟
机制交互	能力 × 距离	nodecov × edgescov(能力与距离的交互项)	H3:能动性对空间的消解

(四)模型构建逻辑:从自组织到系统综合

为验证“结构—能动”在创新网络演化中的交互作用,本文构建了四组嵌套模型,反映复杂系统从基础到高级的演进逻辑。

模型 1(系统基准效应):仅包含内生结构项,旨在剥离出创新网络系统的自组织逻辑,识别系统内部的路径依赖特征。

模型 2 与模型 3(外部环境与能动扰动):分别引入结构约束与 3C 能动选择变量,考察系统在面临外生驱动时的状态响应,验证微观战略选择对系统形态的边际贡献(验证 H1、H2a、H2b、H2c)。

模型 4(全变量系统机制):引入交互项,这是本文的核心建模目标。旨在探讨结构与能动的辩证统一,即微观能动性如何作为一种系统扰动力量,通过调节机制打破既有空间结构约束,驱动系统实现质变(验证 H3)。在模型 4 中,引入了技术位势差作为核心控制变量。通过观察该项系数,识别高端装备创新网络在跨区域演化中,主体是倾向于寻找门当户对的同质化伙伴(系数显著为负),还是倾向于寻找具备跨阶梯互补特性的异质化伙伴(系数显著为正)。这一设置将有效回应能力互补如何驱动系统演化这一核心科学问题,从而实现实证结果与理论框架中补链强链逻辑的深度耦合。

三、实证分析

(一)描述性统计与网络结构特征

1. 样本企业特征

表 2 展示了研究样本中企业的主要统计特征,包括企业规模、专利能力、所有制结构以及地域分布情况。整体而言,样本企业具有以下特点:创新网络节点以企业为主,为了便于分析网络演化规律,

表 2 研究样本的基本特征分布			
特征维度	指标/类别	样本数(n)	百分比/%
节点类型	企业	1 857	84.3
	高校	163	7.4
	科研机构	184	8.3
节点规模	大型	872	39.6
	中型	544	24.7
	小型	583	26.4
	微型	205	9.3
所有制结构	公有制	1 302	59
	非公有制	902	41
地域分布	东部地区	1 404	63.7
	中部地区	408	18.5
	西部地区	295	13.4
	东北地区	97	4.4

具有中介作用的高校与科研院所也纳入了分析;样本包含不同规模、不同所有制特征的企业,满足企业兼容性分析的要求;产业链分布跨越多个省份,区域跨度较大,满足地理邻近性分析的要求。

各企业的专利能力分布数据(见表 3)表明,发明专利数量的标准差(4 251.12)远大于均值(945.40),且最大值(82 926)与最小值(0)差距极大。说明企业间创新能力差异显著,便于识别能力异质性,且多数企业具有一定专利基础,合作潜力较大。

表 3 研究样本的专利能力分布				
指标	均值(Mean)	标准差(S. D.)	最小值(Min)	最大值(Max)
发明专利数量	945.40	4 251.12	0	82 926
专利被引频次	2 045.62	12 205.91	0	389 059

2. 技术创新网络的动态演化态势

在进行指数随机图模型(ERGM)估计前,本文首先通过拓扑指标考察高端装备制造业创新网络的动态演变。从表 4 可见,网络规模呈现爆发式增长,节点数从第一阶段(2013—2016 年)的 498 个增至第三阶段(2021—2024 年)的 1 594 个。平均度由 1.87 升至 2.08,反映出产业协同深度的稳步提升。然而,网络密度持续处于低位(0.001 3 ~ 0.003 8),验证了高端装备领域创新网络“局部集聚、整体稀疏”的典型特征。

结合图 2 可见,网络在 10 年间发生了显著的空间与拓扑形态重构。第一阶段(图 2a):网络呈现明显的孤岛化特征。此时节点间合作高度依赖地理邻近,子网络内部虽有闭合,但跨区域的桥接连边极少。这反映了早期高端装备制造主体受限于信息搜寻成本,陷入了严重的局部锁死困境。第二至三阶段(图 2b、图 2c):网络从簇群集聚向基于技术位势的轴辐式分布转型。特别是图 2c 中,出现了大量长程连边,标志着具备核心集成能力的主体正利用在线协作平台打破地理边界。这种形态演变直观地证实了系统正从邻近驱动转向能力驱动,实现了从路径依赖向路径创造的飞跃。

表 4 描述性统计结果

时期	节点数	边数	网络密度	平均度	聚类系数	模块化程度	社区数量	最高节点度	核心节点数
2013—2016	498	466	0.003 8	1.87	0.018 8	0.878 8	59	69	29
2017—2020	997	1 001	0.002	2.01	0.048 6	0.885	91	114	49
2021—2024	1 594	1 661	0.001 3	2.08	0.047 6	0.881 7	108	140	93

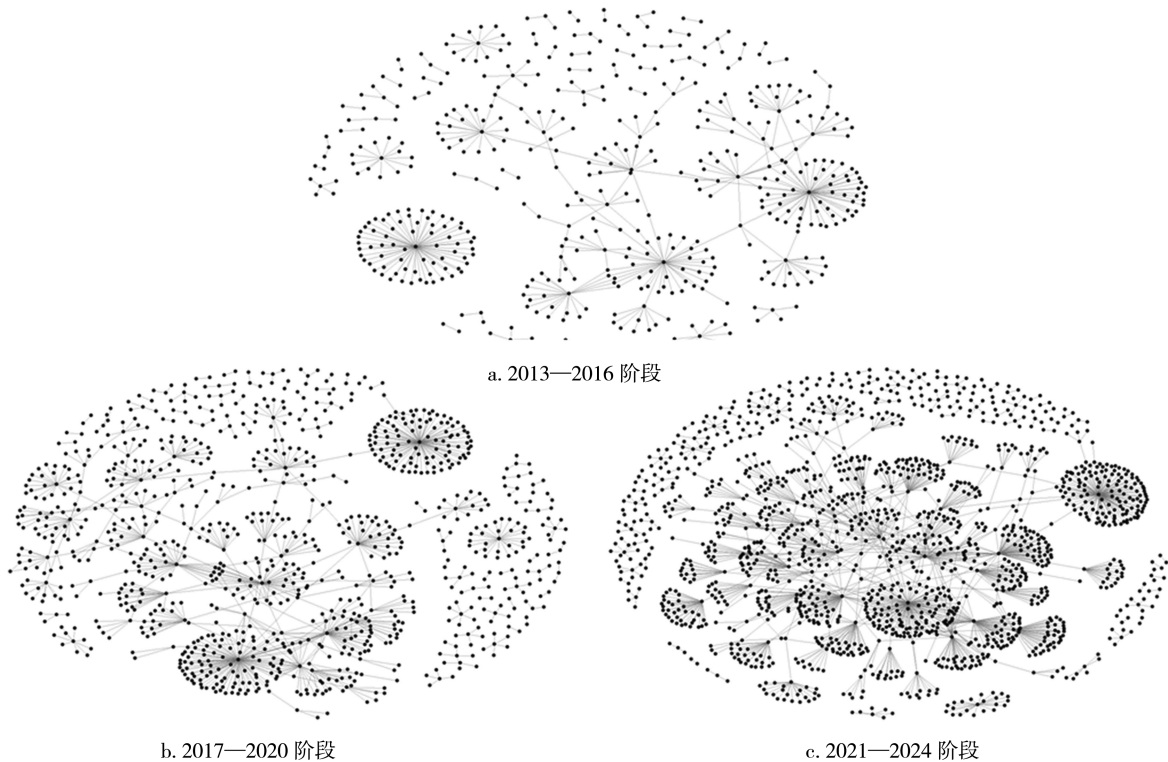


图 2 分阶段的创新网络结构

(二)ERGM 估计结果分析

本文采用 MCMC-MLE 算法,依次构建了从基准结构到交互机制的四个嵌套模型。其结果见表 5。

表 5 技术创新网络演化机制的 ERGM 估计结果

变量名称	模型项(ERGM)	2013—2016	2017—2020	2021—2024
结构项	闭三角 GWESP	0.27 ***	-0.85 ***	-0.83 **
	中心化程度 GWDEG	0.69 ***	0.74 ***	0.42 ***
结构约束项	地理距离 edgecov(lnDist)	5.57 ***	5.53 ***	6.26 ***
	认知邻近 edgecov(TechSim)	5.97 ***	5.61 ***	5.58 ***
能动选择项	技术能力 nodecov(Cap)	1.04 ***	0.60 ***	0.49 ***
	技术位势差 absdiff(Cap)	-0.25	0.17	0.31 *
	组织兼容性 nodematch(Owner)	0.98 ***	0.69 ***	0.65 ***
	规模差异 absdiff(Size)	-0.42 *	-0.15	-0.26 **
	历史合作 edgecov(Prior)	-	0.05 ***	0.07 ***
核心机制项	能力×距离 Interaction	-1.54 *	-1.32 *	-0.99 *
	控制变量	已控制	已控制	已控制
AIC/BIC		3 899/4 006	10 250/10 384	18 723/18 844

1. 内生结构效应:自反馈机制的符号反转与逻辑重构

估计结果显示,高端装备制造创新网络的内生演化展现出显著的阶段性差异,其中闭三角效应(GWESP)的符号反转构成了系统范式转型的实

证证据:

(1)演化初期的信任闭合逻辑(2013—2016): GWESP 系数显著为正($\beta = 0.27^{***}$),表明初期创新网络高度依赖“朋友的朋友”这种闭合三元组来对冲合作风险,内生拓扑惯性极强,但也导致了严重的路径依赖。

(2)演化后期的能动选择逻辑(2017—2024): 进入第二、三阶段,GWESP 系数发生根本性反转且显著为负(-0.85^{***} ; -0.83^{**})。这揭示了网络逻辑的质变:随着产业成熟,创新主体开始排斥冗余的局部闭合,转而鼓励跨越社群边界的能动选择行为,实现了从路径依赖向路径创造的跨越。

2. 结构约束效应:多维邻近性的持续强化与路径锁定风险

模型 2 估计结果显示,地理邻近和认知邻近在三个阶段均显著为正($p < 0.001$),这一稳健表现

确凿支撑了假设 H1。模型 2 显示,地理邻近与认知邻近在三个阶段均显著为正,揭示了网络演化中深层结构累积特征:

(1)地理邻近的成本边界。系数值随时间呈上升趋势,说明在合作创新网络构建构成中,面对面的非正式交流仍是降低协作摩擦的关键,但这也构成了阻碍远程合作的隐形墙。这种空间约束本质上是一种成本过滤机制:它诱导主体在局部空间内形成高频、低成本的协作回路,但也极易导致网络中的合作关系产生地理性锁死,使合作创新行为被限定在特定的区域边界内。

(2)认知邻近的知识垫片。系数值持续保持高位,反映出主体倾向于在技术领域相似的伙伴中搜寻以降低吸收成本。然而,从系统演化视角看,这种对认知一致性的长期依赖可能导致网络内部知识的高度同质化,进而削弱系统产生颠覆性创新的能力。

综上,结构约束不仅为创新主体提供了风险对冲的安全垫,同时也构成了一道隐形的结构性漏斗。这使得创新合作展现出强烈的内生性特征,为后续论证能动性如何突破此种约束提供了逻辑起点。

3. 能动选择项:3C 逻辑的微观证据

为了深度揭示主体如何穿越由多维邻近构成的结构性漏斗,本文将微观主体的战略能动性操作化为由“能力、兼容性与承诺”构成的集成包。模型估计证实,3C 逻辑各维度指标均表现出稳健的显著性。

(1)能力维度:技术位势差在演化后期呈现出显著的正向效应(0.31^*),有力地验证了非对称补链逻辑的存在。高位势主体倾向于与具备技术落差的节点建立连接,通过跨阶梯协作实现能力互补。值得注意的是,其系数值随时间推移有所下降,这暗示随着产业成熟,技术门槛已从稀缺资源转化为行业准入标准。进一步观察技术位势差的估计结果可以发现,该变量在演化后期(2021—2024)呈现显著的正向效应。这一发现具有深远的政策内涵:一方面,技术位势差显著为正,意味

着系统演化正摆脱早期的同质聚类惯性,高位势主体倾向于与具备技术落差的节点建立连接。这从侧面证实了,面对卡脖子环节的补链需求,企业正能动地通过技术跨阶梯协作实现能力互补。另一方面,高能力主体不仅自身具备强大的搜寻引力,更通过与异质性能力节点的非对称匹配,实现了创新要素在全国尺度内的优化配置。这种强者牵引、位势互补的格局,正是网络从路径依赖向路径创造转化的微观基础。

(2)兼容性与承诺维度:所有制匹配系数显著为正,规模差异系数显著为负,说明主体通过寻找门当户对的伙伴来降低组织摩擦。同时,历史合作(关系承诺)在后两阶段显著增强,成为抵消跨区域不确定性的核心非正式制度安排。

3C 因素的系统性显著支撑了假设 H2 成立,3C 变量的系统显著性并非孤立的统计结果,而是共同作用形成推动主体突破结构约束的合力。能力决定了为何跨区,兼容性解决了如何适配,承诺则降低了跨越风险,三者协同驱动创新网络向更大范围跨区域协作格局的跃迁。

4. 交互效应:结构与能动的辩证统一

图 3 展示了核心交互项(技术能力 $\times$ 地理距离)在三个阶段的边际效应对比,回答了微观主体如何通过能动性选择重塑宏观格局。

(1)消解效应的演进:对比图 3a 与图 3c,高技术能力主体的预测合作概率曲线随地理距离增加而下降的趋势明显更为平缓,说明技术能力不仅仅是一种个体资源,更是一种系统转换动能。这验证了在高端装备研发领域,由于数字化建模与虚拟仿真技术的普及,数据跨区域流动的边际成本快速降低,使得高能力主体能够跨越地理藩篱实施远程牵手,进而诱发了实质性的地理消亡。

(2)临界阈值突破:实证结果显示,当主体的技术能力达到临界阈值时,其产生的战略收益足以对冲高昂的空间摩擦成本。这种能力驱动对地理邻近的替代效应,是推动网络从局部闭塞走向全国尺度优化配置的核心机制。

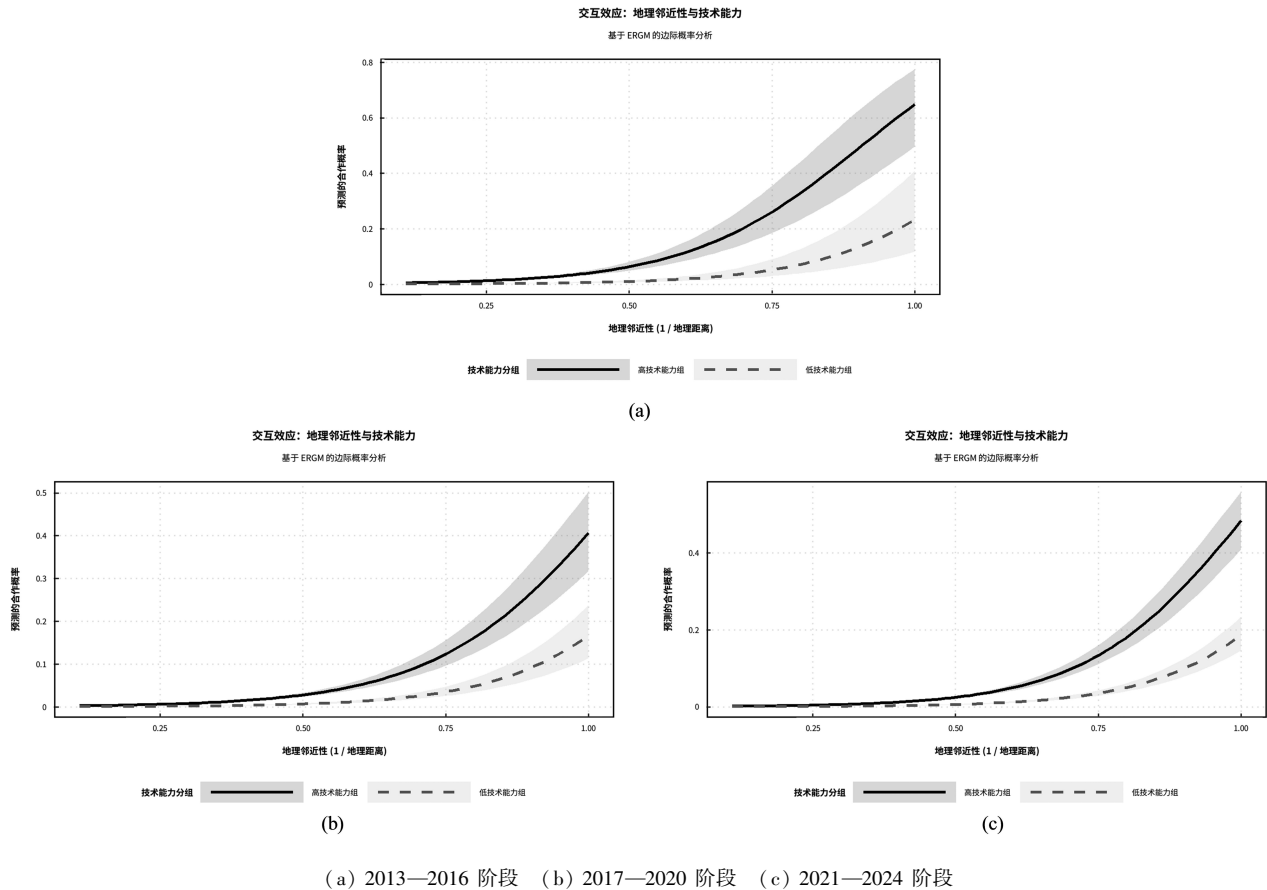


图3 三个演化阶段下技术能力对地理距离阻碍的边际消解效应对比

这一发现深刻体现了结构与能动的辩证统一。一方面,地理边界(结构)在整体上限制了大多数节点的连接概率,显示出典型的结构约束效应。另一方面,具备高技术能力的主体(能动者)通过跨区域的空间消解行为,不断产生新的长程连边;这种微观层面的突破行为经过网络反馈的不断累积,最终打破了原有的邻近协同格局,驱动整个创新网络系统向更大范围的跨区域协同格局跃迁,显示出显著的能动重塑结构特征。结合技术位势差的正向发现,可以进一步推论:高端装备制造领域的跨区域演化,并非无序的地理扩散,而是一种战略性寻优。高能力主体之所以能够穿越空间屏障,其根本动能在于追逐跨区域的能力互补租金。由于关键核心技术的互补资源在地理分布上具有稀缺性与散点化特征,迫使具备高位势的能动者必须支付跨区协作成本去匹配那些具备能力梯度差的伙伴。这种为了互补而跨区的逻辑,

正是破解结构约束的深层演化动力。

(三) 稳健性检验与异质性分析

为了确保上述“结构约束—能动选择”互嵌机制及其演化规律的科学性,本文从系统建模的稳健性与不同情境下的异质性两个维度进行深度检验。

1. 模型稳健性与可靠性检验

作为一种针对非线性复杂系统的建模方法,ERGM 估计结果的可靠性取决于模型的收敛程度与拟合优度。

(1) MCMC 收敛性诊断:本文对各阶段全模型进行了马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)诊断。结果显示,各变量统计量的采样迹图均在均值附近波动,未出现趋势性漂移或显著的退化现象。所有参数估计的 t-ratio 绝对值均远小于 0.1,证明 MCMC 算法已实现高精度收敛,参数估计值具有稳健性。

(2) 拟合优度检验(GOF):为验证 ERGM 模型

对真实网络特征的捕捉能力,本文进行了拟合优度检验。图 4 显示:其一,度分布 (degree) 的高度吻合证明模型准确捕捉了高端装备创新网络中由少数领军企业构成的明星效应;其二,边共享伙伴分布 (ESP) 的匹配说明模型有效控制了网络内部

的内生传递性与闭三角倾向;其三,测地线距离的完美包络则证实模型能真实反映网络在突破空间限制后的资源配置效率。这种多维统计指标的拟合,证实了所构建的“结构—能动”互嵌模型具有极强的还原力。

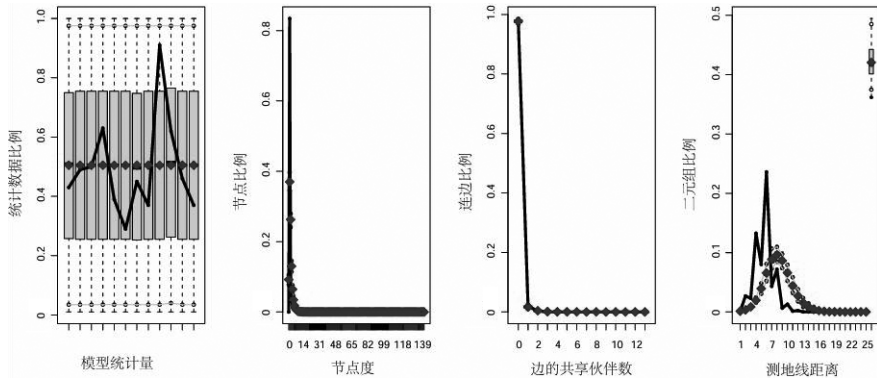


图 4 第三阶段全模型的拟合优度检验(GOF)

2. 异质性分析:情境差异下的能动响应

本文进一步通过子样本回归,探讨不同所有制主体及不同技术领域在突破结构约束时的行为差异,以验证机制的普适性与情境敏感性。

(1) 所有制异质性:行政赋能与市场搜寻的逻辑分野

对比发现,非公有制企业($\beta = -3.49^{***}$)在第三阶段的“能力 $\times$ 距离”交互项系数绝对值显著高于公有制企业($\beta = -0.82^{***}$),公有制企业与非公有制企业在突破空间约束的机制上呈现显著分野:①行政驱动型锚点,公有制企业(央企/国企)的“能力 $\times$ 距离”交互效应斜率较缓,其跨区域组网更多嵌套在国家战略布局与行政分工下,行政合法性部分替代了技术能力的消解作用;②市场驱动型飞地,非公有制企业展现出更剧烈的能力消解效应(交互项系数绝对值更大)。由于缺乏行政资源屏障,高能力民营主体必须凭借极高的技术溢价来覆盖昂贵的跨区搜寻成本。这深刻反映了我国高端装备创新系统内行政锚点与市场飞地共生的演化格局。

(2) 技术领域异质性:核心技术的结构嵌入与非核心领域的空间补偿

异质性分析进一步揭示了技术体制对网络演

化逻辑的深层调节作用,展现出显著的非对称特征。

第一,核心技术领域的高结构嵌入性。在涉及高端装备核心环节(如精密传动、重型动力)的技术网络中,地理邻近仍占据主导地位,且 GWESP 项呈现显著的准分离现象。这说明,在核心攻关领域,由于技术复杂度极高且试错成本巨大,主体往往陷入深度嵌入的信任闭环中,表现出较强的结构约束特征。此时,能动选择的重点在于维持既有结构的稳定性,而非跨空间扩张。

第二,非核心领域的空间补偿效应。在非核心技术领域,技术能力展现出剧烈的空间补偿效应(交互项系数高达 -5.71^{***})。这证实了在技术边界尚不清晰、资源高度分散的边缘创新领域,主体的战略能动性得到了最大限度的释放。技术能力成为打破地域锁定、实现跨区域资源寻优的关键杠杆。这种空间补偿逻辑揭示了:主体的能动突破往往率先发生在外围领域,通过非核心环节的跨区渗透,逐步驱动整个系统向跨区域协同格局跃迁。

这一发现深度呼应了高端装备产业核心求稳、外围求变的演化特征,揭示了新质生产力在不同技术层级的差异化渗透逻辑。

四、结论与启示

(一) 研究结论

本文基于结构化理论构建“结构约束—能动选择”互嵌框架,运用指数随机图模型(ERGM)对2013—2024年中国高端装备制造产业创新网络的跨区域演化进行了系统考察。

第一,高端装备制造创新网络经历了从局部信任闭合向跨域能力互补的范式转型。研究捕捉到了系统跨越10年的非线性演化轨迹:演化初期,网络表现出显著的内生拓扑惯性,GWESP统计量显著为正,说明系统依赖由地理邻近与“朋友的朋友”构成的安全垫对冲合作风险;随着产业成熟,GWESP系数在后两阶段发生显著反转(转负),确凿证实了网络正排斥冗余的局部闭合,转而通过长程合作关系的建立获取跨区域的异质性资源。这一范式转型标志着系统已实现从路径依赖向路径创造的实质性跨越。

第二,基于“3C逻辑”的能动选择是驱动网络突破结构约束的核心动力。创新主体并非被动嵌入结构,而是通过能力(capability)补链、制度兼容(compatibility)与关系承诺(commitment)的系统化能动选择,有效对冲了地理距离带来的结构重力。其中,技术能力决定了跨区动机(补链增益),组织兼容性优化了协作效率(消减摩擦),而基于历史经验的关系承诺则保障了远距离组网的安全跨越。

第三,技术能力对结构约束的能动消解效应是驱动网络跨区域重组的关键机制。交互效应分析证实,技术能力能显著软化地理距离的约束力。高能力主体凭借其资源位势产生的战略优势,足以覆盖跨区域搜寻与远程监控带来的摩擦成本,驱动网络从初始的邻近驱动向更高阶的能力驱动范式转换,为破解核心环节技术空心化困境提供了微观证据。

(二) 理论讨论:演化阶段评价与对空心化的回应

研究进一步深化了对高端装备制造创新系统演化的规律性认识。

(1)演化动能的切换:从行政/地理诱导向战略性市场驱动。网络早期对局部闭合的依赖验证了三元闭包提供结构约束的观点,但随主体资源与能力的提升,网络演化正摆脱邻近性锁定,转向基于能力互补的战略性能力驱动模式。

(2)治理实效的对冲:跨区域重组对技术空心化的响应。区别于过度追求技术相似性引发的知识锁定,本文研究发现企业通过长程合作关系建立获取的互补性知识,本质上是基于补链动机的能动搜寻。这种跨区域资源的非线性重组,通过产业链与创新链的深度融合,夯实了自主可控的技术底座,体现了创新系统治理的微观实效。

(三) 政策启示:构建适应新质生产力发展的创新系统治理方案

针对高端装备制造业存在的局部锁死与空心化挑战,本文基于“结构—能动”互嵌视角提出如下方案:

(1)创新系统规制维度:从空间补贴转向网络补差,破除行政边界隔阂。中央政府应统筹构建跨区域利益调节机制,针对跨省市的补链合作,推行财税分成、产值跨区核算、人才绿卡互认政策。通过政府信用的润滑作用,人为冲抵行政边界形成的结构性损耗,实施网络相容导向的制度供给,放宽跨所有制协作限制,提升创新系统的兼容性。

(2)企业协同治理维度:激活链主溢价,实现以能动性突破带动系统重塑。鼓励领军企业发挥路由器功能,政府应支持其牵头组建跨区域协同创新联合体。通过定向下放科研经费配给权,支持链主企业开展基于“3C逻辑”的远距离补链组网,利用其资源吸纳力吸引远端异质资源,破解关键环节空心化困境。

(3)数字平台支撑维度:构建数字孪生底座,降低跨区域协作摩擦。利用大数据技术对全国技术节点进行精确数字化画像,降低主体的认知距离,变盲目偶遇为精准联姻。建立基于区块链的关系承诺保障体系,利用数字化契约强化主体间的底层信任,利用数据要素的流动性对冲物理距

离的阻隔,保障产业链供应链系统韧性。

(四)局限与展望

本文的研究仍存在以下几方面的局限:首先,受限于截面数据,本文对数据跨区域流动对“结构—能动”互嵌关系的实时调节效应研究尚显不足,未来可引入数据要素流转强度等指标进行深化。其次,未来可尝试运用时间指数随机图模型(TERGM)或 SAOM 模型,研究创新网络全生命周期的“生成—维持—断裂”动态演化机制,为创新系统的动态治理提供更精细的证据支持。

参考文献:

- [1] GIDDENS A. The constitution of society: outline of the theory of structuration[M]. Berkeley: University of California Press, 1984: 281-302.
- [2] 吕建林, 胡斌, 杨博旭. 人工智能科研与技术合作网络演化机制研究: 基于“三维驱动—双网异质”框架的实证分析[J]. 中国软科学, 2026(1): 171-181.
- [3] 吕承超, 姜延杰, 何加豪, 等. 创新驱动下的数据要素流动网络演化机制研究[J]. 科研管理, 2025, 46(6): 10-20.
- [4] 胡梦雅, 衣春波, 吴爱华, 等. 基于 SAOM 模型的集成电路企业创新合作网络动态演化研究: 多维相似性与网络结构的影响[J]. 科学学与科学技术管理, 2025, 46(12): 152-165.
- [5] BALLAND P A, BOSCHMA R, FRENKEN K. Proximity and innovation: from statics to dynamics[J]. Regional studies, 2015, 49(6): 907-920.
- [6] REUER J J, LAHIRI N. Searching for alliance partners: Effects of geographic distance on the formation of R&D collaborations[J]. Organization science, 2014, 25(1): 283-298.
- [7] BARNEY J. Firm resources and sustained competitive advantage[J]. Journal of management, 1991, 17(1): 99-120.
- [8] 吕国庆, 曾刚, 顾娜娜. 基于地理邻近与社会邻近的创新网络动态演化分析: 以我国装备制造业为例[J]. 中国软科学, 2014(5): 97-106.
- [9] BOSCHMA R. Proximity and innovation: a critical assessment[J]. Regional studies, 2005, 39(1): 61-74.
- [10] GARCIA MM, ZOUAGHI F, SANCHEZ GM. Geographical and cognitive proximity effects on innovation performance: which types of proximity for which types of innovation? [J]. European management review, 2025, 22(2): 291-317.
- [11] BALLAND P A, BOSCHMA R. Complementary interregional linkages and smart specialisation: an empirical study on European regions [J]. Regional studies, 2021, 55(6): 1059-1070.
- [12] 许培源, 吴贵华. 粤港澳大湾区知识创新网络的空间演化: 兼论深圳科技创新中心地位[J]. 中国软科学, 2019(5): 68-79.
- [13] JACKSON I, IVANOV D, DOLGUI A, et al. Generative artificial intelligence in supply chain and operations management: a capability-based framework for analysis and implementation[J]. International journal of production research, 2024, 62(17): 6120-6145.
- [14] 张玉臣, 王芳杰. 研发联合体: 基于交易成本和资源基础理论视角[J]. 科研管理, 2019, 40(8): 1-11.
- [15] 吕冲冲, 杨建君, 张峰. 不同理论视角下组织间合作创新的对比分析[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2019, 39(2): 51-58.
- [16] 王进富, 魏珍, 刘江南, 等. 以企业为主体的产学研战略联盟研发伙伴选择影响因素研究: 基于 3C 理论视角[J]. 预测, 2013, 32(4): 70-74, 80.
- [17] BALLAND P A, TOM B, DARIO D, et al. The new paradigm of economic complexity[J]. Research policy, 2022, 51(3): 104450.
- [18] CHEN H, MEHRA A, TASSELLI S, et al. Network dynamics and organizations: a review and research agenda[J]. Journal of management, 2022, 48(6): 1602-1660.
- [19] BROEKEL T. Using structural diversity to measure the complexity of technologies[J]. PLoS one, 2019, 14(5): e0216856.
- [20] LU C, LI B. The influence factors of innovation networking formation based on ERGM: evidence from the smart medical industry[J]. Journal of digital economy, 2023, 2: 64-80.
- [21] SHIPILOV A, GAWER A. Integrating research on interorganizational networks and ecosystems [J]. Academy of management annals, 2020, 14(1): 92-121.