# 绿色技术协同创新网络形成机理研究

# ——基于黑龙江绿色联合专利视角

刘微微\*，曹湘杰

(哈尔滨工程大学经济管理学院，黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要：**明晰协同创新网络形成机理能进一步激发协同创新网络的创新势能。本文以1990-2020年黑龙江省公司、高校和研发机构间的绿色联合申请专利数据搭建黑龙江省绿色技术协同创新网络，并使用指数随机图模型(ERGM)对该网络形成机理进行分析。研究结果表明该协同创新网络是小世界网络。网络内生结构边、几何边共享伙伴和几何加权度分布对网络的形成有显著影响。节点的地理同配性能显著影响网络的形成。网络中节点间的连接与节点研发能力和机构类型无关。

**关键词：**绿色技术；协同创新；网络形成机理；指数随机图模型

# 0 引言

“高增长、高能耗、高碳排”的发展引致的气候变化成为当今人类面临的重大全球性挑战[1]。我国自2009年开始便成为世界第一大能源消费国，为进一步提高国家自主贡献力度，习近平主席提出于2030年前实现“碳达峰”、于2060年前实现“碳中和”的发展目标。而绿色技术创新是实现中国双碳目标的关键。通过绿色技术创新，能够淘汰落后产能，优化产业结构，从而大幅度减少碳排放，进而推动绿色经济效率的稳步提升。黑龙江省是我国典型的资源消耗型省份，以“高投入、高消耗、高污染、低质量、低效益、低产出”为特征的发展方式仍占据主导地位[2]，因此，提升黑龙江省绿色技术创新水平具有重要的现实意义。

在知识经济时代的背景下，新知识因能够产生递增回报而对经济增长至关重要[3]。随着学科内容的不断丰富，技术变得更为复杂，科技创新主体囿于资源和技术要素的有限性，仅依靠自身无法适应技术更迭的节奏，并且需要付出较大的成本应对研发过程中的不确定性。协同创新网络作为一种能够联结学术界与产业界的创新发展模式，能够有效组织公司、高校及科研院所的资源与技术要素，促

基金项目：黑龙江省哲学社会科学研究规划项目（21GLB062）

作者简介：刘微微（1982-），女，黑龙江齐齐哈尔人，哈尔滨工程大学教授，博士生导师，研究方向：创新管理；曹湘杰（2001-），男，广东东莞人，哈尔滨工程大学，本科生，研究方向：创新管理。

通讯作者：刘微微，heulww@163.com

进学术融合，提升科技创新效率，进而缩短科研产出周期。这意味着协同创新网

络的组织机构之间具有的技术知识的依存关系，能有效配置资源并形成较为全面的优势互补，降低机构个体的科技创新风险，进而实现技术创新。

明晰网络形成机理是发挥协同创新网络效能的前提。对协同创新网络形成机理进行研究，能打开技术领域合作社会化过程的“黑箱”，进一步激发协同创新网络的创新势能，增加科技创新产出。协同创新网络是社会网络的一种，利用社会网络分析方法对合作关系进行分析成为科研合作现象研究的有利工具[4]。指数随机图模型(ERGM)是社会网络分析中一类重要的模型，同时是一种专门针对关系数据的统计方法。基于该模型的网络分析不只停留在节点层次和二元层次，更是能延展到网络结构层次，能够全面揭示网络社会化过程及网络形成机理。本文以黑龙江绿色技术产学研协同创新机构为研究对象，关注协同创新网络的社会化形成机理，采用指数随机图模型，同时考虑网络内生结构及外生变量对网络形成的影响，揭示网络形成的内在机理。

# 1 文献综述

## 1.1绿色技术创新

随着碳排放引致的气候变化成为全球性挑战，绿色技术创新因能显著降低碳排放，有效减少环境污染，成为了备受关注的热点。绿色技术创新的概念最早由Braun＆Wield提出，指通过技术创新达到节约资源、降低原料损耗的目的，进而保护生态环境[5]。区别于一般技术创新，绿色技术创新具有双重外部性与多元主体共同作用的两个显著特征[6]。双重外部性一方面指知识溢出效应能使其他研发单位受益，另一方面指环境改善获得的收益更多属于公共收益只有极少部分属于私人收益，因此研发单位个体往往缺乏推动绿色技术创新的激励。而对于多元主体共同作用这一特征的分析，张江雪指出污染治理与工艺改进等绿色技术的突破作为共性问题，仍依赖其他产业伙伴与知识伙伴尤其是政府的推动与协同[7]。

学界对绿色技术创新的影响因素进行了分析，研究主要集中在环境规制、研发投入与创新环境三个方面。环境规制方面，学者们存在三种观点：第一种观点是环境规制促进绿色技术创新，部分学者认为环境规制为绿色技术创新提供了有效激励进而显著提升创新效率[8、9]；第二种观点是环境规制抑制绿色技术创新，Barbera等认为环境规制会使环境外部成本内部化，致使企业成本上升，不利于技术创新[10]；第三种观点是环境规制与绿色技术创新之间并不是简单的线性关系，而是呈现“U”型关系[11]。研发投入方面，学者们普遍认为研发投入与绿色技术创新呈现正相关关系，即研发投入越多，研发单位对于绿色技术创新水平影响越大。创新环境方面，学者们从市场规制、政府创新补贴、媒体舆论等多种引致创新环境变化的因素的角度进行了具体的研究。

## 1.2协同创新网络

自“协同”一词被Haken系统性阐述为各子系统相互协调合作以产生“1+1>2”的协同效应以来[12]，学者们将“协同”广泛应用于技术创新领域的研究，协同创新的概念由此产生。又由于协同创新基于组织机构间具有知识交互性的合作，故而天生具有网络的属性，因此学者们在协同创新的基础上提出了协同创新网络的概念。学者们就协同创新网络的主体关系展开了研究，Liefner等根据协同创新主体性质的不同，将创新主体关系划分为两类：一是基于客户、供应商、分销商和同行等产业链上下游垂直合作；二是企业与大学、科研院所等知识生产机构的水平合作[13]。后者的三种机构类型之间建立协同创新关系更倾向于科学技术知识上的交互，高校和科研院所充当知识的生产者与传播者，为企业输送前沿的科技知识，通过产学研协同推动要素流通与资源共享，助力技术创新。学界还从网络空间尺度的角度展开了广泛的研究，Sonderegger等认为地理同配性对合作伙伴选择始终存在影响，本地协同创新网络在创新发展后期发挥着更大作用[14];以Lucas等为代表的跨区域协同创新网络支持者强调跨区域协同创新网络的重要性，认为区域外部协同创新更为重要[15]。在绿色创新领域，林诗琦从全国的视角对绿色协同创新网络地理临近性进行了深入的研究，指出地理临近性对绿色协同创新有显著的促进作用[16]；熊瑶从不同发展阶段的角度切入，指出我国绿色技术协同创新网络中地理邻近作用趋于减弱，寻找优质外部创新资源而建立远距离链接，成为绿色技术协同创新的趋势[17]。总体而言，绿色技术创新领域内对于协同创新网络的研究较少，并且大都从全国宏观视角进行分析，较为缺乏对于省际面板数据的分析。

## 1.3网络形成机理

学者们通过对网络形成机理的研究，能够揭示学科领域协同创新的社会化过程，进而有针对性地提出管理对策，扩大网络的正向效应。目前，学界主要从网络内生结构和外生变量对网络形成机理进行了阐释。在内生结构的影响性研究中，学者们常利用网络基本测度指标对网络结构进行描述，而后结合网络的时空演化揭示网络形成机理[18];除此之外，学者们还常运用指数随机图模型对网络进行模拟，以此揭示机理。在外生变量的影响性研究中，学者们根据学科领域选择恰当的节点属性作为外生变量，并有针对性地选取模型展开进一步的研究。李柏洲等基于刺激-反应模型，采用回归分析方法，探究知识流动视角下战略性新兴产业创新网络的形成机理[19]；刘璇等运用指数随机图模型从网络结构洞效应与同质性效应的角度对网络形成进行了较为全面的研究[20]；仵凤清等建立了驱动企业技术创新网络发展的系统动力学模型，对核心外生变量影响作用进行了检验[21]。从上述内容可知，指数随机图模型能同时实现对内生结构和外生变量的作用进行检验，因此成为了学者在网络形成机理研究中的热门工具。基于指数随机图模型的研究大多聚焦于具体学科领域，如生物科技[22]、传媒[23]等，但较为缺乏绿色技术领域的应用。还有学者限定区域范围，进一步结合空间尺度开展研究，钮亮聚焦浙江省的产学研合作网络，深入分析产学研合作成因[24]；王海花等建立ERGM模型预测长三角城市群协同创新网络演化动力[25]。总体而言，学界选取的地区大多是发达地区，较为缺乏对相对不发达地区的刻画。

## 1.4研究评述

前人有关绿色技术创新的研究更多集中在影响因素等方面，较少从协同创新网络这一角度进行深入分析。在协同创新网络研究方面，学者更多采用全国性的数据进行宏观描述或聚焦于发达地区，对于具有资源相对匮乏的地区关注较少。其次，学者对绿色技术协同创新网络的研究以网络拓扑结构发现为主，较为缺少对网络内在形成机理的揭示。本文基于指数随机图模型，同时考虑网络内生结构和外生变量的交互作用，揭示黑龙江省绿色技术协同创新网络的内在形成机理，以期为相对不发达地区的绿色技术创新提供理论支撑与实践建议。

# 2 理论框架

## 2.1网络类型及结构

大量的理论与实证研究表明，社会网络中节点之间边的连接不是完全规则更不是完全随机的，而是介于二者之间。因此社会网络是同时拥有较大的簇系数(聚类系数)和较小的平均路径长度的小世界网络或具有度分布为幂律分布特征的无标度网络。小世界网络由于传递路径短，能够较快实现信息传递，并能迅速根据网络中边的增减情况调整网络性能，因此社会网络的“小世界”性能有效提高机构间的合作效率。由于绿色技术创新对资源配置效率有着较高要求，而机构间的合作效率的实现是高效资源配置的重要保障，因此提出如下假设：

**H1** 黑龙江省绿色技术协同创新网络是小世界网络

传递性是大多数社交网络的基本特征，表现为节点i与节点j连接形成了边的同时，节点i与节点k也形成了边，则节点j与节点k之间很有可能建立联系，进而形成了闭合三角形(三元组)。因此三元组是无向网络中一种重要的网络结构，该结构可表示网络中三元节点间协同关系的传递性[26]。由于绿色技术创新是多元主体共同参与的活动，机构仍依赖其他产业伙伴或知识伙伴[7]。并且各机构对于绿色技术创新都能做出具有自身独特性的边际贡献，为了实现创新效益、资源节约最大化，机构间趋向于形成三元组以维持“均衡”状态。

k-星是网络结构中另一个重要结构，其中k表示节点的度(Degree)，即单个节点与其他节点连接构成边的数量。节点k值高说明节点处于核心地位，资源整合能力强，信息传递、知识交互效率高，因此该结构能够反映网络扩张性趋势及知识溢出效应。研究发现，社会网络中往往存在核心机构，能够有效吸引其他机构进行合作[27]。

基于上述两个典型网络结构，本文提出如下假设：

**H2** 黑龙江省绿色技术协同创新网络存在传递性特征

**H3** 黑龙江省绿色技术协同创新网络存在核心机构

## 2.2节点属性

在协同创新网络的研究中，机构研发能力常作为重要的节点属性。由于研究产量常被用作衡量组织创新能力的重要依据，高研发效率让研究单位有机会更高程度地曝光自己的成果以提升自己的认知度，继而引发强强联手[28]。因此，本文提出假设：

**H4** 高研发力的机构之间更倾向于建立协同创新关系

具有相似特征的行动者之间建立联系的概率往往要高于基于随机联系产生的概率,即同质性节点间更倾向于建立联系[29]。学者们就协同关系的同质性进行了广泛的研究，基于前人文献，结合黑龙江省绿色技术创新实际情况，研究主要关注地理同配性和组织同配性两个方面的影响：

(1)地理临近有利于学者们的交流，进而促进知识的传播，同时还有利于学者们建立良好的人际关系，提升研究效率；

(2)由于相同类型的组织具有相近的规制与研究范式，故而更有利于沟通与协调，促进要素流动，提升资源利用效率，推动创新发展；

根据上述对同质性理论的阐释，提出假设：

**H5** 同一地区的机构之间更倾向于建立协同创新关系

**H6** 同一类型的机构之间更倾向于建立协同创新关系

# 3 研究设计

## 3.1数据来源与变量定义

目前学者们对于协同创新网络的研究，多数基于问卷调查获取的关系数据等小规模数据，缺少基于大规模关系数据更具全面意义的刻画。专利的申请与公布是技术创新成功的标志之一，常被作为研究技术创新的代理指标[30]。除此之外，专利数据包含创新活动参与主体详细信息，对于网络形成机理的研究而言，联合专利申请人信息可反映主体机构协同关系及主体机构类型，申请人地址可反映协同创新空间尺度等。因此，本研究采用绿色发明专利联合申请数据对黑龙江省绿色技术协同创新网络进行刻画。本研究从Incopat数据库获取1990-2020年全国绿色联合专利数据，然后通过企查查获取参与主体的地址信息，筛选专利申报省份为黑龙江，获取黑龙江省机构参与申请的绿色联合专利数据共662条并建立协同创新网络，最终形成一个包括320家研发机构的网络。将研发机构划分为公司、高校和研究院三类，其中公司196家，高校47家，研究院所77家。登录国家知识产权局，根据国际绿色专利IPC分类号对参与机构进行专利数搜索，获得对应绿色专利数量。由于存在技术溢出效应，机构拥有研发能力越强越能吸引其他机构与它合作申请联合专利，因此选取机构绿色技术专利数量指标来衡量机构研发能力。

## 3.2指数随机图模型

指数随机图模型(ERGM)是一种专门针对关系数据的统计方法，该模型根据输入的观察网络参数，生成随机网络对观察网络进行拟合，并将拟合得到的网络与观察网络进行比较，二者越相似，则说明拟合效果越好。相较于传统回归模型的分析范围局限于节点对(Dyad)关系，指数随机图模型不仅能对节点对进行分析，而且能从更复杂的网络结构层面分析网络形成机理[31]，即能够通过类似Logistic回归的统计形式解释观察网络的结构特征。除此之外，指数随机图模型能够整合网络的内生结构和外生变量来分析网络的形成[32]，即判断网络的形成是源于形成过程中的关系还是源于节点属性特征。指数随机图模型的一般形式表示为

(1)

式中：c为常量，以确保得到的概率在0到1之间；表示对应网络结构k的集合的网络统计量，当网络结构k出现在网络中，则，反之；是对应网络统计量的系数。指数随机图模型的发展经历了简单随机图模型、二元独立性模型、二元依赖性模型、高序依赖性模型四个阶段。简单随机图模型又称Bernoulli模型，由于该模型假设网络节点间建立联系是随机的，并且研究视野仅局限于边这一种结构，忽视了其他结构特征对网络形成的作用，故无法较好地把握网络的结构特征。二元独立性模型在简单随机图模型的基础上，将独立性假设聚焦于二元组，即假定二元组间是独立的。基于该假设，该模型无法解释传递性、派系以及除互惠性和差异化吸收性以外的一些网络结构问题[33]。Frank & Strauss将Markov依赖性假设引入到模型中来，确立了二元依赖性模型，其中典型代表有Markov随机图模型[34]，以及Wasserman & Pattision对Markov随机图模型进行拓展而来的模型。二元依赖性模型打破了前两个模型中的独立性假设，创造性地引入k-星、三角形等结构[35]，使模型的灵活性得到大幅度提升，然而Robins等发现二元依赖性模型存在模型退化的问题而无法充分获取网络结构特征[36]。为进一步优化模型，Snijders等引入了几何加权度(交替k-星)、交替k-三角、交替k-2路径三个非线性的统计项[37]，使模型能够有效收敛。因该模型对高阶参数子集进行了更为深入的研究，故而被称为高序依赖性模型。本文结合实际情况，选择高序依赖性模型研究协同网络形成机理，并选取边(edges)以及Hunter & Handcock提出的几何加权度(gwdegree)、几何加权边共享伙伴(gwesp)作为网络内生结构变量[38]，选取机构专利数量、机构所属地区和机构类型作为外生变量研究节点属性对协同创新网络形成的影响,如表1所示。

**表1 指数随机图模型统计量及意义**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 统计量 | 名称 | 函数 | 图例 | 描述 |
| 内生变量 | 边数 | edges |  | 基本协同创新关系 |
| 几何加权度分布 | gwdegree |  | 一个节点连接多个节点，具有核心地位 |
| 几何加权边共享伙伴 | gwesp |  | 传递性趋势 |
| 外生协变量 | 节点二元属性 | nodecov | 二元层级1 | 高研发能力机构更趋向于建立协同创新关系 |
| 节点二元属性 | nodematch |  | 具有同质性机构间更趋向于建立协同创新关系 |

根据表1的描述，建立模型1验证协同创新网络的传递性与扩张性。

(2)

除了对内生结构变量进行检验，指数随机图模型还能对节点属性的影响作用进行分析。因此提出模型2：

(3)

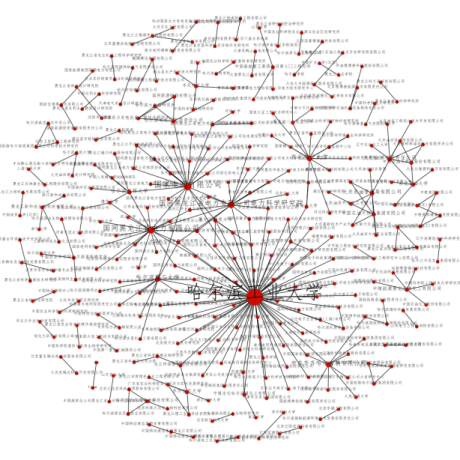
公式(3)中的用于检验各机构研发能力对黑龙江省绿色技术协同创新网络形成的影响。公式(4)中用于检验机构类型的同质性对网络形成的影响，变量Type表示机构的类型，公司取1，大学取2，研究所(院)取3。

(4)

# 4 实证检验

## 4.1描述性分析

使用Gephi软件对黑龙江省绿色技术协同创新网络进行可视化操作，得到该网络的拓扑结构如图1所示：



**图1 黑龙江省绿色技术协同创新网络拓扑图**

从图1看出黑龙江省绿色技术协同创新网络具有较为明显的聚集效应，运用Gephi软件计算网络密度，得出黑龙江省绿色技术协同创新网络的密度为0.006，网络密度较低，属于低密度网络。本文借鉴文献[22]的做法，使用小世界系数转换不等式［39］判断观察网络是否为小世界网络，即如果随机网络与观察网络的聚类系数比值大于它们平均路径长度比值，则说明观察网络为小世界网络。在小世界网络中，聚类系数是反映网络节点间的连接集聚程度的局部性变量，平均路径长度是反映全部网络节点对的最短路径距离的全局性变量。基于上述分析，使用Gephi软件生成一个具有与该网络相同节点数量和网络密度的随机网络，如表2所示。从比较结果来看，聚类系数比值为131，远大于平均路径长度比值0.473，因此黑龙江省绿色技术协同创新网络是小世界网络，假设1成立。同时，该网络的小世界性提升了网络的创新能力。一方面，该网络具有大的聚类系数，表明局部网络内节点建立了高度密切的信息传递关系和协同创新关系[40]，能有效提升网络的协同创新能力；另一方面，该网络具有小的平均路径长度，表明网络具有较高的信息传递效率，能使信息与资源得到进一步利用，进而提升协同创新效率。

|  |
| --- |
|  |

**表2 协同创新网络类型检验**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 网络类型 | 点 | 密度 | 聚类系数 | 平均路径长度 |
| 随机网络 | 321 | 0.006 | 0.004 | 7.062 |
| 观察网络 | 321 | 0.006 | 0.524 | 3.347 |
| 比值 |  |  | 131 | 0.474 |

邻接矩阵能对节点属性的连接倾向进行描述性分析，本文以协同创新网络中各机构所属地区作为混合矩阵的识别标志，选取协同次数最高的前4个地区绘制协同创新网络地区邻接矩阵，如表3所示。可以看出黑龙江和黑龙江建立协同关系次数为143，黑龙江和北京协同次数为104，黑龙江和江苏协同次数为20，黑龙江和广东协同次数为16。从数据可知黑龙江绿色技术协同创新中心在黑龙江，说明地理同配性可能会影响网络的形成，具体影响程度如何需要通过指数随机图模型测度。

**表3 地区邻接矩阵**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 黑龙江 | 北京 | 江苏 | 广东 |
| 黑龙江 | 143 | 104 | 20 | 16 |
| 北京 | 104 | - | - | - |
| 江苏 | 20 | - | - | - |
| 广东 | 16 | - | - | - |

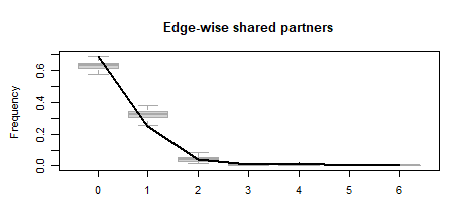
## 4.2参数估计

本文借助R语言中的statnet程序包编写实现ERGM模型，采用马尔科夫链蒙特卡罗极大似然估计法(MCMCMLE)对所建立的4个模型进行参数估计[41]，结果如表 4 所示。

**表4 参数估计结果**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 变量 | 模型1 | 模型 2 | 模型 3 |
| 结构效应 | edges | -6.0073\*\*\* | -5.9640\*\*\* | -5.5850\*\*\* |
| gwesp | 1.5279\*\*\* | 1.4950\*\*\* | 1.5230\*\*\* |
| gwdegree | 0.7177\*\*\* | 0.7388\*\*\* | 1.0140\*\*\* |
| 属性效应 | nodecov.PatentNum |  | -0.00007  (p=0.135) | -0.0002\*\*\* |
| 同质性效应 | nodematch.Area |  |  | 0.3277\*\* |
| nodematch.Type1 |  |  | -0.1565  (p=0.26) |
| nodematch.Type2 |  |  | -0.9693\*\*\* |
| nodematch.Type3 |  |  | 0.0981  (p=0.44) |
| AIC |  | 3577 | 3605 | 3504 |
| BIC |  | 3604 | 3641 | 3575 |

AIC(Akaike Information Criterion**)和**BIC(Bayesian Information Criterion)是衡量模型拟合优度的指标，数值越小说明模型拟合效果越好。由表4可以看出，模型3拟合效果最好。模型1是只包含内生结构的模型，用于检验内生结构对于网络形成的影响，模型通过引入几何加权度与加权边共享伙伴防止退化。模型2在模型1的基础上引入了机构绿色技术专利数这一属性变量，反映机构的研发能力，从节点属性影响方面对网络进行分析。模型3是包含研究所涉全部内生结构与外生变量的综合模型，拟合效果最好，AIC值为3504，BIC值为3575。因此，对模型3进行拟合优度检验，选取典型指标边共享伙伴绘制拟合优度图，如图2所示。



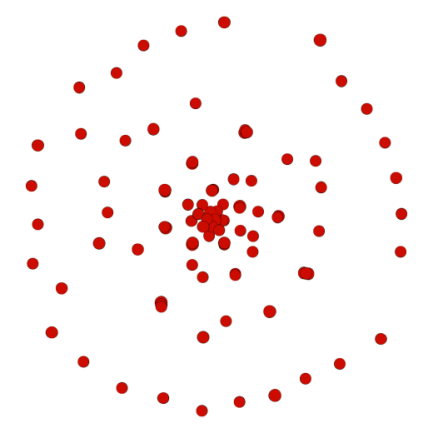
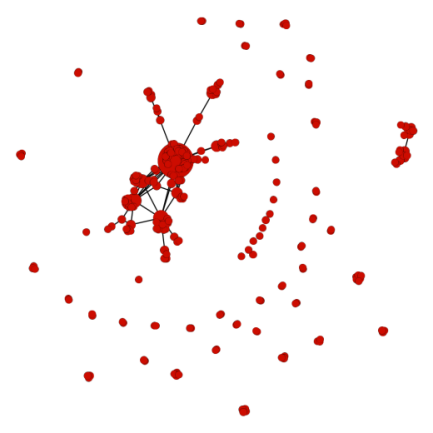
**图2 模型3边共享伙伴拟合优度图**

图2中黑色实线代表观察网络特征，灰色箱体代表模拟网络特征，黑色实线始终落在灰色箱体附近，仿真边共享伙伴分布基本与实际观测值拟合，说明模型3拟合效果良好。

## 4.3数据分析与讨论

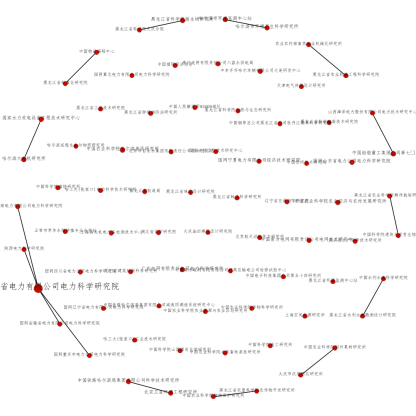
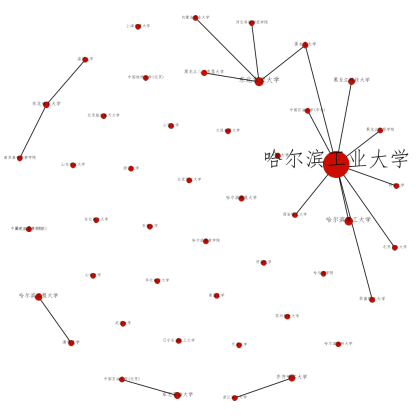
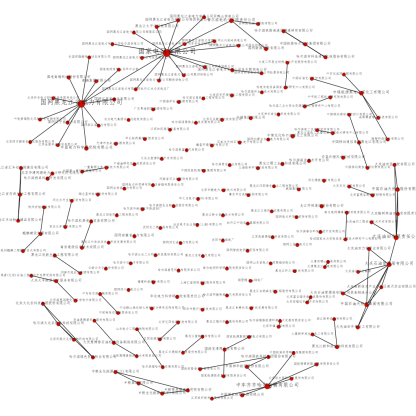
模型1用于检验边、几何加权边共享伙伴和几何加权度分布三个内生结构对绿色技术协同创新网络形成的影响。由表4可知，三个内生结构变量均对整个网络的形成具有显著影响。边结构的系数为负，说明网络密度较低，这与前述网络密度特征结果描述一致，同时该结果符合大部分真实观察网络的典型特征。边结构的系数为-6.0073，表明每当网络增加一条新的边时，网络中另外一个节点对连接的概率为exp(-6.0073)/(1+exp(-6.0073))=0.002。即两个研发机构间协同创新关系的建立，将影响另外两个研发机构间协同创新关系的建立，建立的概率为0.2%。加权边共享伙伴能够反映网络的传递性，估计参数为exp(1.5279)=4.61，即当两个研发机构拥有一个共同的协同创新伙伴，它们之间建立协同创新关系的概率比两个随机节点高361%。加权边共享伙伴的贡献为exp(1.5279/(1+ exp(1.5279))=0.82，说明加权边共享伙伴对于网络中协同创新关系的影响较大，即协同创新网络具有传递性，假设2成立。几何加权度分布的系数为0.7177且统计值显著，对网络中边的形成的贡献是exp(0.7177)/(1+exp(0.7177))=0.67，即对新边连接上的贡献达到了67%，说明了协同创新网络中存在核心机构，假设3成立。从节点的网络中心度的角度出发，网络中心度大于10的节点只有7个，总节点数为320，仅占总结点数的2%。这些机构分别是哈尔滨工业大学(74),国家电网有限公司(22)，国网黑龙江省电力有限公司(20)，国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院(17)，东北农业大学(12)，中车齐齐哈尔车辆有限公司(11)、哈尔滨理工大学(11)。它们作为核心机构通过广泛开展协同创新活动，以起到辐射效应，带动黑龙江省绿色技术协同创新发展。

为探究机构研发能力对于网络形成的影响，模型2引入了机构绿色专利数量这一节点属性，验证网络属性效应。表4结果说明机构绿色专利数量对机构间建立协同创新关系的概率的影响不显著，即机构间是否建立协同创新关系与机构研发能力无关。为更直观地反映绿这一结果，对协同创新网络进行节点控制可视化操作，不同专利数的网络连接如图3和图4所示。从图3和图4可以看出，删除绿色专利数大于10的节点后，网络的密度为0.004，存在大量的孤立节点，节点连接非常稀疏; 删除专利数小于2的节点后，网络的密度为0.007，也存在较多的孤立节点网络同样较为稀疏，网络密度为0.004。两个子网络的密度差异较小，说明网络的形成不受机构绿色专利数量。可视化结果与指数随机图模型计算结果一致，假设4不成立。这有利于绿色技术创新方面知识的溢出，进而促进黑龙江省绿色技术整体研发水平的提升。

** **

****图3 删除专利数大于10的节点的网络** **图4 删除专利数小于2的节点的网络****

为探究同质性效应对协同创新网络形成的影响，提出了模型3。该模型基于模型2增加了机构所属地区和机构类型两个属性，从地理同配性与组织同配性两个方面对网络同质性效应进行检验。由表4可见，在地理同配性上，地区变量统计显著，同在一个地区的贡献率提升了exp(0.3277)=0.39。说明同一地区之间更倾向于建立协同创新关系，假设5成立。在组织同配性上，公司和研究院所的统计检验不显著，说明公司之间和研究院所之间并没有更倾向于建立协同关系的趋势；高校虽然通过了统计检验，但高校之间建立协同关系的概率为exp (-0.9693)/(1+exp(-0.9693))=0.28，说明高校间自主进行绿色技术协同创新可能性不大。这表明，同类型机构间并没有更倾向于建立协同创新关系的趋势，假设6不成立。进一步将整个协同创新网络分为公司间的协同创新网络、高校间的协同创新网络和研究院所间的协同创新网络三个子网络，如图5所示。网络密度分别为0.005、0.017和0.006。三个子网络密度差异较小，均存在较多的独立节点，网络比较稀疏，连通性较差。可视化结果与指数随机图模型结果一致。模型3中，绿色专利数量的贡献率降低了0.2%，同样说明了假设4不成立。

****

**(a)公司 (b)高校 (c)研究院所**

**图5 不同组织类型的网络**

# 5 结语

本研究以黑龙江省1990-2017年绿色专利合作数据为基础，运用社会网络分析法和ERGM模型，分析了绿色技术协同创新网络的形成机理，研究结论如下：

（1）本文搭建的黑龙江省绿色技术协同创新网络密度较低，网络整体连通性性不高，说明黑龙江省绿色技术领域仍有较大的发展空间。相关部门应加快出台推进绿色技术产学研融合发展的政策，促进组织机构间协同创新，发挥“1+1>2”的协同创新效能，助力绿色技术发展。

（2）黑龙江省绿色技术协同创新网络是小世界网络。网络小世界性的存在能够推动创新要素的流通，提升网络的信息传递效率，使信息与资源得到进一步利用，同时产生了知识溢出效应，有效促进黑龙江省绿色技术创新整体性发展。相关部门在提升协同创新组织数量的同时，也应积极搭建组织间交流渠道，提高组织间的连通效率，进而实现信息与资源的有效流通。

（3）本文通过指数随机图模型分析了黑龙江省绿色技术协同创新网络的形成机理，发现网络内生结构中的几何加权边共享伙伴和几何加权度分布均对网络的形成有正向影响。边共享伙伴提升了网络中的节点连接的概率，表明网络具有传递性。加权度分布提升了网络中的节点连接的概率，表明网络中存在核心节点，即存在核心机构，但核心机构数量较少，扩张性还有待提升。

(4)通过对节点属性的研究，发现研发能力并不是机构间选取协同对象的重要因素，这有利于知识溢出，进一步推动黑龙江省绿色技术领域的发展。在同质性研究方面，发现具有地理同配性的机构之间更倾向于建立协同创新关系，从地区邻接矩阵可以看出协同创新网络中心在黑龙江，黑龙江省也积极寻求与其他较为发达地区的协同；研究还发现，同一类型的组织机构间并没有更趋向于建立协同关系，说明产学研协同创新壁垒在一定程度上被打破，有利于不同类型机构间的资源交互，提升协同创新效率。相关部门应积极拓宽组织机构间建立协同创新关系的渠道，发挥核心机构的创新引领作用，进一步增强网络的传递性，促进知识和技术的扩散，使黑龙江省绿色技术网络产生良性的协同创新效应。

参考文献：

[1]林伯强,谭睿鹏.中国经济集聚与绿色经济效率[J].经济研究,2019,54(02):119-132.

[2]赫海灵,李婉红.环境管制对黑龙江省制造企业绿色技术创新影响分析[J].对外经贸,2017(02):57-59.

[3] Romer PM (1990) Endogenous technological change. J Polit Econ 98:71–102

[4] Newman M E.Scientific col laboration networks.I.Network construction and fundamental results[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Mater Physics，2001，64(2):016131.

[5]Braun, Ernest, and David Wield. "Regulation as a means for the social control of technology." Technology Analysis & Strategic Management 6.3 (1994): 259-272.

[6]Manuel Frondel,Jens Horbach,Klaus Rennings. What triggers environmental management and innovation? Empirical evidence for Germany[J]. Ecological Economics,2007,66(1).

[7]张江雪. 技术创新与绿色经济的理论基础[M]. 北京: 经济日报出版社,2015:51-64.

[8]王娟茹,张渝.环境规制、绿色技术创新意愿与绿色技术创新行为[J].科学学研究,2018,36(02):352-360.

[9]Michael E. Porter,Claas van der Linde. Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship[J]. The Journal of Economic Perspectives,1995,9(4).

[10]Barbera Anthony J,McConnell Virginia D. The impact of environmental regulations on industry productivity: Direct and indirect effects[J]. Journal of Environmental Economics and Management,1990,18(1).

[11]蒋伏心,王竹君,白俊红.环境规制对技术创新影响的双重效应——基于江苏制造业动态面板数据的实证研究[J].中国工业经济,2013(07):44-55.

[12]HAKEN H. Synergetics: An introduction[J]. Springer-Verlag, Berlin-New York, 1983:112-114.

[13]Liefner I, Brömer C, Zeng G. Knowledge absorption of optical technology companies in Shanghai, Pudong: Successes, barriers and structural impediments[J]. Applied Geography, 2012, 32(1): 171-184.

[14]Sonderegger P, Täube F. Cluster life cycle and diaspora effects: Evidence from the Indian IT cluster in Bangalore[J]. Journal of International Management, 2010, 16(4): 383-397.

[15]Lucas M, Sands A, Wolfe D A. Regional clusters in a global industry: ICT clusters in Canada[J]. European Planning Studies, 2009, 17(2): 189-209.

[16]林诗琦. 中国绿色协同创新网络时空格局及影响因素分析[D]. 华东师范大学, 2020.

[17]熊瑶. 中国绿色技术协同创新网络特征及影响因素研究[D]. 华东师范大学, 2019.

[18]周佳. 长三角城市群绿色技术创新及其合作网络的时空演化研究[D].华东师范大学,2019.

[19]李柏洲, 王雪, 薛璐绮, 等. 战略性新兴产业创新网络形成机理研究[J]. 科研管理, 2022, 43(3): 173.

[20]刘璇,汪林威,李嘉,张朋柱.科研合作网络形成机理——基于随机指数图模型的分析[J].系统管理学报,2019,28(03):520-527.

[21]仵凤清,郝涛,高林.基于系统动力学的企业技术创新网络形成机理研究[J].技术与创新管理,2016,37(04):350-356.DOI:10.14090/j.cnki.jscx.2016.0402.

[22]罗泰晔,马翠嫦.基于指数随机图模型的协同创新网络形成机理研究[J].情报理论与实践,2018,41(10):143-146+72.DOI:10.16353/j.cnki.1000-7490.2018.10.023.

[23]陈爱萍,俞琰.基于指数随机图模型的网络新闻媒体分析[J].金陵科技学院学报,2012,28(02):30-36.DOI:10.16515/j.cnki.32-1722/n.2012.02.008.

[24]钮亮.浙江省产学研合作网络形成机理——基于指数随机图模型的分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(04):74-82.DOI:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.011.

[25]王海花,孙芹,郭建杰,杜梅.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.

[26]Faust K. A puzzle concerning triads in social networks: Graph constraints and the triad census[J].Social Networks，2010，32(3):221-233.

[27]张利华,闫明.基于SNA的中国管理科学科研合作网络分析——以《管理评论》(2004-2008)为样本[J门.管理评论，2010，22(4):39-46.

[28]Ding Ying. Scientific collaboration and endorsement: Network analysis of coauthorship and citation networks.[J]. Journal of informetrics,2011,5(1).

[29]Harris J K．指数随机图模型导论［M］杨冠灿，译．上海: 格致出版社，2016．

[30]段德忠, 杜德斌, 谌颖, 等. 中国城市创新网络的时空复杂性及生长机制研究[J]. 地理科学, 2018, 38(11):1759-1768.

[31]Van Der Pol J. Introduction to network modeling using Exponential Random Graph models (ERGM)[J]. 2017.

[32]Kim J Y, Howard M, Cox Pahnke E, et al. Understanding network formation in strategy research: Exponential random graph models[J]. Strategic management journal, 2016, 37(1): 22-44.

[33]Holland P W, Leinhardt S. An exponential family of probability distributions for directed graphs[J]. Journal of the american Statistical association, 1981, 76(373): 33-50.

[34]Robins G, Snijders T, Wang P, et al. Recent developments in exponential random graph (p\*) models for social networks[J]. Social networks, 2007, 29(2): 192-215.

[35]Frank O, Strauss D. Markov graphs[J]. Journal of the American Statistical association, 1986, 81(395): 832-842.

[36]王越乙, 徐枞巍. 指数随机图 (p\*) 模型不同描述的对比研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2015 (4): 422-427.

[37]Snijders T A B, Pattison P E, Robins G L, et al. New specifications for exponential random graph models[J]. Sociological methodology, 2006, 36(1): 99-153.

[38]Hunter D R, Handcock M S. Inference in curved exponential family models for networks[J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 2006, 15(3): 565-583.

[39]Davis G F, Yoo M, Baker W E. The small world of the American corporate elite, 1982-2001[J]. Strategic organization, 2003, 1(3): 301-326.

[40]韩雪. 基于小世界网络理论的产学研合作现状及其优化研究[D]. 浙江师范大学, 2019.

[41]Van Der Pol J. Introduction to network modeling using exponential random graph models (ergm): theory and an application using R-project[J]. Computational Economics, 2019, 54(3): 845-875.

**Research on the Formation Mechanism of Green Technology Collaborative Innovation Network**

——Based on the Perspective of Green Cooperative Patent Data in Heilongjiang Province

Liu Weiwei\*,Cao Xiangjie

(*School of Economics and Management,Harbin Engineering University, Harbin 150001,China*)

**Abstract：**Clarifying the formation mechanism of collaborative innovation network can further stimulate the innovation potential energy of collaborative innovation network. Based on the green joint patent application data among companies, universities and R&D institutions in Heilongjiang Province from 1990 to 2020, this paper constructs the Green Technology Collaborative Innovation Network in Heilongjiang Province, and uses the exponential random graph model (ERGM) to analyze the formation mechanism of the network. The results show that the collaborative innovation network is a small world network. The endogenous structural edge, geometric edge sharing partner and geometric weighting distribution of the network have a significant impact on the formation of the network. The geographical matching performance of nodes significantly affects the formation of the network. The connection between nodes in the network has nothing to do with node R & D capability and organization type.

**Keywords：**green technology; collaborative innovation; network formation mechanism; exponential random graph model