

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2024.10.003

社交网络下电力绿色创新与绩效协同演化机制^①

方德斌^{1,2}, 王鹏宇², 曹罡斌²

(1. 中南民族大学铸牢中华民族共同体意识研究基地, 武汉 430074;

2. 武汉大学复杂科学与管理研究中心, 武汉 430072)

摘要: 本研究从社交网络的视角研究电力市场绿色科技创新与企业绩效如何协同演化。基于2009年—2019年电力上市公司绿色专利与基本运营数据, 构造包含决策层与影响层的两层网络, 运用深度学习拟合两层网络间映射关系, 建立企业绿色科技创新与绩效的协同演化机理模型, 其中, 企业作为每层网络中的节点, 并具有社交网络属性, 在网络中交换信息; 同时, 借助观点动力学仿真企业间交流解释演化过程, 通过比较企业间不同的绿色创新博弈关系, 分析企业绿色科技创新决策的影响因素与影响机制。研究发现: 首先, 当绿色科技创新边际效应高时, 企业间交流对企业决策影响较弱, 企业创新决策主要由绩效驱动, 此时企业应注重自身经营状况, 提高财务绩效, 为绿色科技创新提供坚实的基础; 其次, 当企业间绿色科技创新关系为公共物品博弈时, 创新决策与企业绩效呈正向相互影响, 邻域内企业决策影响作用增强, 且企业间交流越频繁, 企业中选择积极创新的比例越高, 同时企业经营能力对积极创新的影响更显著。本研究为电力企业科技创新决策提供理论支撑, 丰富了绿色创新与企业协同发展理论。

关键词: 电力上市公司; 绿色科技创新; 企业绩效; 协同演化; 社交网络

中图分类号: F426.61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2024)10-0035-18

0 引言

自1990年代以来, 我国经济体制在鼓励企业采取以产业规模扩张为主的外延式发展模式后得到了迅速发展, 但随之衍生的资源高速消耗, 温室气体大量排放等环境问题日益制约着其进一步的提高。面对严重的环境问题, 作为社会经济财富的核心载体, 企业在利用自然资源同时, 也需承担生态环境保护的责任^[1]。2020年9月, 习近平总书记提出双碳的经济转型目标, 旨在倡导企业与环境协同发展, 积极开展绿色科技创新, 努力创造“环境-经济”双赢的局面^[2, 3]。国务院为鼓励绿色科技创新, 也在《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》中提出: “鼓励绿

色低碳技术研发, 实施绿色技术创新攻关行动, 支持企业建立市场化运行的绿色技术创新联合体”^[4]。绿色科技创新是经济增长的根本驱动力^[5], 已被广泛认为是企业发展的重要战略^[6]。

在此趋势下, 近年来企业界关于绿色科技创新的交流日渐增多, 媒体关于绿色创新的报道也屡见不鲜, 企业间以此为主题的交流会议以为常态, 公司间的交流对企业自身绿色科技创新决策与经营状况产生影响是非常值得关注的议题。大量社会心理学的文献^[7, 8]也为群体中的个体间交流对其决策产生影响提供了充分的证据。Lindström等^[9]和Gavrilets等^[10]指出个体的内生因素(如观点)与个体决策是相互耦合的过程, 及个体观点在其决策过程中扮演关键角色, 但个体

① 收稿日期: 2022-02-19; 修订日期: 2024-03-17。

基金项目: 国家社会科学基金资助重大项目(19ZDA083); 国家自然科学基金资助专项项目(72243010)。

作者简介: 方德斌(1976—), 男, 安徽舒城人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: dbfang@whu.edu.cn

决策反过来也会影响其观点形成。遗憾的是,现有绿色科技创新驱动因素的研究往往忽略了这一过程,而研究企业绩效与绿色科技创新相互影响的文献也主要围绕政策规制与企业内生等层面出发,通过实证的方式分析其作用机理。目前尚未有文献从企业间交流入手,基于企业经营的基础数据,建立数学模型来探讨企业绿色科技创新决策与企业绩效的协同演化机制。十八大提出的绿色发展理念能否转换为社会红利,取决于环保责任主体应对的策略^[11, 12],因此,发掘企业间交流对绿色科技创新决策影响机理,厘清绿色科技创新决策与企业绩效的演化机制,对于探究如何有效驱动中国企业进行绿色科技创新,以及完备绿色创新与企业协同发展理论有着重要意义。

绿色科技是指降低环境污染,生产能耗或提高原材料使用率的技术、工艺,而企业获取绿色专利数则是反映绿色科技创新的重要指标^[13-15]。基于企业自身角度,绿色科技创新需要长期的积累,依赖于企业的规模与经营能力,其中企业的规模很大程度上决定了在创新过程中可以调配的资源^[16],企业的经营能力则决定了创新的持续性^[17]。而从外部视角出发,企业间的交流是群体活动,个体绿色科技创新的观点与决策在群体社交网络中相互作用,对后期决策产生影响^[18]。因此建立一个反映上述两点的数学模型是揭示影响机制的关键。考虑到数据量限制,因电力企业拥有全中国最大占比的温室气体的排放,其理应承担对应的环保责任,研究电力企业的绿色科技创新决策是反映整体的合适样本。

为揭示企业经营状态对绿色科技创新决策的作用,本研究构建一个包含决策层与因素层的二层网络,将企业作为每层网络中的节点,在每层中形成各自的社交网络,并在网络中交换信息,进而借助观点动力学将公司决策的演化过程表示为企业间交流的作用;考虑到决策的影响的滞后性,本研究假定当期企业间影响因素与决策的相互影响将形成下一期企业的影响因素。值得注意的是,绿色科技创新对企业绩效的影响尚未有定论^[19],因此本研究构建了两个具有递进关系的模型:当绿色科技创新对环境边际贡献较高时,各企业间竞争并不激烈,其各自的绿色科技创新决策是互相影响,这可以用传播模型模拟;但随着其创新科技

数目的增多,其对环境的边际贡献会有所减弱,各企业间竞争逐渐激烈,考虑到生态环境具有公共物品的属性^[20, 12],企业的绿色科技创新决策不仅是互相影响,还会存在搭便车的现象,这可模拟为公共物品博弈。

本研究以电力上市公司的数据为例,研究其绿色科技创新决策与企业绩效协同演化的过程。选取电力行业作为案例进行研究,是因为该行业在绿色科技创新方面具有代表性和先行性。电力行业作为能源消耗和碳排放的主要来源之一,其绿色科技创新对环境保护和可持续发展具有重要意义^[21]。本研究通过深度学习技术模拟出两层网络间的映射关系,深入探讨和分析。第一层,即因素层,基于电力上市公司 2009 年—2019 年间的基础数据建立,这些数据细致反映了各企业的实际运营状态和业绩表现。第二层,决策层,则是通过企业绿色专利数量的数据构建,直观地映射出各公司在绿色科技创新方面的决策力度。这种双层网络的深度分析,不仅揭示了企业在绿色科技创新决策上的动向如何影响其绩效,也深入探讨了这种影响随着时间的演进过程。通过分析电力上市公司的数据,本研究不仅揭示了企业绿色科技创新决策如何影响其绩效,还考察了这种影响随时间的演变过程。本研究针对此两种情况进行仿真,由此产生的主要贡献主要为以下几点。

第一,将实际企业经营数据与创新决策运用深度学习拟合动态映射,将模型现实化,更切实的反映了现实情况。第二,模拟企业在不同博弈关系时,交流对企业绿色科技创新决策的影响,诠释了交流对企业绿色创新决策的影响机理。第三,完备了现有的绿色创新驱动理论,揭示了企业绩效与企业绿色科技创新协同演化的机理。

1 文献评述

回顾之前文献,关于绿色科技创新驱动机理的研究集中在企业内部因素驱动与外部压力驱动两个大类:第一是基于资源基础观,分析企业内部因素对绿色科技创新的影响。资源基础理论认为,企业内部的异质性资源和组织能力是提升企业绩效的根本,因此企业背景特征、资源、能力、管理者

关注等是主要的内部驱动力^[22]。Du 等^[23]指出环境规制对绿色技术创新和产业结构升级的影响与经济发展水平有显著的相关性,低发展水平时抑制绿色创新,高发展水平时促进绿色技术创新和产业升级;Buysse 和 Verbeke^[24]验证了企业的环境策略(绿色创新等)需有相匹配的资源,有限的资源将限制企业采取最低层次的环境战略。研究表明,由于绿色科技创新的外部溢出性决定其不会具有资源优先分配权,企业进行绿色创新等长期收益项目需有丰富的创新资源保障^[25]。

外部压力对绿色创新驱动因素也可分两类,一是基于利益相关者理论探究创新战略的影响因素,Delgado-Ceballos 等^[26]研究指出拥有更好利益相关者整合能力的企业将对其绿色创新政策起到积极影响。一些研究认为企业高管对待环境问题的态度将极大的影响企业绿色科技创新的决策^[27,28]。另一种是基于波特假说,讨论环境政策对绿色创新的驱动效果:李青元和肖泽华^[12]认为排污收费的方式能通过外部压力的方式倒逼出企业绿色创新,但环保补助的政策助长了企业的机会主义,反而不利于绿色创新。齐绍洲等^[13]和 Liu 等^[29]都通过专利数据证明了采用排污权交易的政策能够诱发了地区污染行业内企业的绿色创新活动。Anouliès^[30]则认为碳排放权市场能提高环境质量却对企业决策与利益作用甚微。

绿色科技创新对企业绩效的影响决定了企业间绿色创新决策。有大量文献对此方向展开研究,但结论还存在争论,一般可以分为两种:第一,企业绿色科技创新对企业绩效产生正向影响,Xie 等^[31]和 Dixon-Fowler 等^[32]都指出绿色科技创新有助于提高企业财务绩效,Fernando 等^[33]则认为绿色科技创新提高了企业可持续发展的综合能力。第二,绿色科技创新对企业绩效影响非正向,Climent 等^[34]通过比较常规基金与环境类基金的收益,认为绿色科技创新并不能提高企业绩效,反而因为创新成本过高而影响企业利润与竞争力。Soltmann^[35]则认为绿色创新投资与其绩效成 U 型关系,而非单向的联系。基于此,本研究依据两种不同的影响关系,分别构建模型,建立符合正向影响的企业间传播模型与符合非正向影响的企业间公共物品博弈模型。

社交对个体的决策的影响,自上世纪 50 年代

起就已经有了基于建立经典的数学模型来分析群体中的动态观点交互与共享相关研究。近年,复杂网络^[8]与时变^[36]等参量的加入,也丰富了相关研究的适应性。随着研究由个体决策延伸到群体中决策,演化博弈与传播模型也因其能反映群体中协同进化的特点而被广泛使用^[37,38]。考虑到观点在群体中传播所呈现的网络结构,Ehrhardt 等^[39,40]认为节点状态的动力学演化速度远快于网络拓扑结构的演化速度。Hassani 等^[41]提出在社交网络环境下达成共识的重要性和方法是一个迭代和动态的过程。Zheng 等^[42]通过考虑社交圈对谣言传播的影响,利用用户社交圈中的高同质性特征与社交互动结合,提出了能有效提高早期谣言的检测准确率的检测算法。除此之外,Zino 等^[36]采用双层复杂网络的方式将离散变量与连续变量相结合来模拟群体中决策与观点的相互耦合。但是本研究认为在实际的应用过程中,除了要同时考虑离散与连续之外,不应简单的采用线性映射的方式来决定观点的变化过程,应该利用深度学习,将大数据与决策映射起来,更准确的反映联系^[43]。因为深度学习是通过组合低层特征形成更加抽象的高层表示属性类别或特征的机制,以发现数据的分布式特征表示^[44]。

因此本研究以企业规模与经营为基础数据,考虑企业间交流传播的影响,建立两层网络的演化模型来反映企业决策进化过程,并采用深度学习的方式拟合两个网络之间的映射关系。而之前文献中,研究企业间交流对绿色科技创新的驱动机理的文献较少,理论建模仍然空白,本研究对这个方向进行了补充。

2 基础模型

绿色科技创新对企业绩效的影响是基于在“绿色创新-环境效应-公司绩效”的逻辑,企业决策层的关系是变化的,据此,本章构建两种演化模型:一是,当在提倡绿色科技创新初期,此时企业之间博弈关系不明显,新决策的传播可以用传播模型模拟;二是,随着市场上绿色科技的增多,其带来的边际效应逐渐减弱,考虑到研发投入是一个非常巨大的成本与环境的公共物品属性,此

时公司与公司之间并不仅仅是上一节中定义的合作传播关系,更多的是公共物品博弈关系。

2.1 传播模型描述

传播模型就是研究群体中个体间的相互作用对观点演化过程影响的模型. 在群体中,个体不会完全地接受或完全忽略其他个体的观点,而是会在更新观点的过程中考虑这些观点. 通过群体的交互过程,个体不断更新和融合他们对同一问题的意见,并最终形成不同稳定状态.

本研究定义一个包含所电力上市公司的集合 $V = \{1, 2, \dots, m\}$, 其中每一家电力公司的决策都包含两个策略, 表示为二元变量 $x_i \in \{0, 1\}$, $i \in V$, 其中 $x_i = 0$ 表示企业采取消极绿色创新策略 (NP), $x_i = 1$ 表示企业采取积极绿色创新策略 (PP). 企业当期的策略选择直接由公司规模与财务绩效等因素的影响, 将公司 i 的影响因素用向量 $y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ 表示, 其中 $y_{ik} \in [0, 1]$, 表示企业经营在该指标上的强弱. 现实中, 电力公司的影响因素 y_i 往往决定了其策略选择 x_i , 同时其后续的策略选择 x_i 也反过来影响 y_i , 例如公司选择积极的创新策略进而促进其研发的投入, 产出的绿色科技也正向的提高了公司的财务绩效, 提高的绩效进一步使得公司选择积极创新策略, 因此这是一个动态的相互影响的过程.

同时, 电力企业 i 的绿色科技创新策略 x_i 与影响因素 y_i 不仅自身相互作用, 且会与其他上市企业的策略选择 x_l 、影响因素 y_l 因相互之间交流而产生相互影响, 例如企业之间对于创新的投入程度会相互参考, 而企业的创新决策也会对周边企业的经营产生影响. 因此, 为了反映企业其科技创新决策以及经营情况因相互影响而变化的动态过程, 本研究构建了由决策层与影响层组成的一个二层网络: 第一层为决策层, 体现企业决策之间的相互影响, 第二层为影响层, 反映影响因素的相互作用, 其中企业以节点的方式存在于每一层网络; 交流与观察是企业间相互作用的基础, 本研究假定在两层网络中, 企业拥有各自的社交网络, 在网络中的企业可以交换信息, 以此反映交流与观察的过程. 并且, 本研究考虑到在全球范围内, 许多企业在提交专利申请之前, 已经积极采纳了绿色创新策略, 通过实践探索和技术发展, 逐步将这些绿色创新转化为可申请专利的技术成果. 这

一过程不仅体现了企业对环境保护和可持续发展的承诺, 也为他们在未来获取专利保护和市场竞争优势奠定了基础. 针对这样的创新, 多个国家已经启动了加速审查制度, 例如英国、澳大利亚、韩国、日本、美国、以色列、加拿大等, 以促进这些环保技术的快速审查和授权. 中国在这方面也不例外, 实行《发明专利申请优先审查管理办法》, 优先审查那些涉及关键技术领域如节能环保、新一代信息技术、生物科技、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等的发明专利申请, 以及与低碳技术和资源节约相关的重要专利申请. 这样的措施不仅加速了绿色技术的审查过程, 还鼓励了更多企业投身于绿色创新之中, 对环境保护和生态平衡的维护做出了积极贡献. 所以, 本研究假设决策层和因素层之间不存在时间上的差异性(在文章的最后针对时间上的差异性做了补充性说明), 具体情况如图 1 所示.

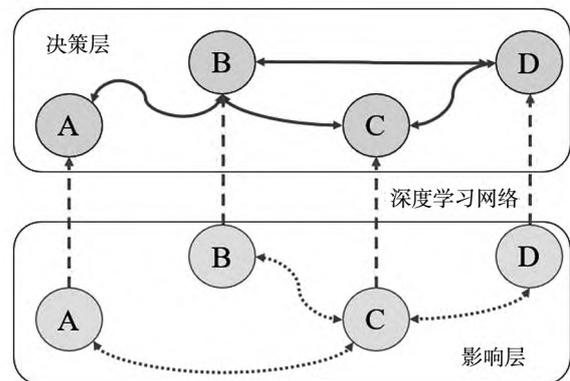


图 1 连接示意图

Fig. 1 Connection diagram

两层网络的拓扑结构类似: 以影响层为例, 企业间于影响层中形成一个无向的连通图, 节点之间的连边表示两企业之间相互影响的程度系数 $a_{il}, a_{il} \in [0, 1]$, 其中 a_{il} 越大则表示公司 i 对公司 l 的影响越大. 在现实中, 公司之间的影响通常是不对称的, 例如: 大规模企业不易被小规模企业影响, 而小规模企业极易被大企业影响, 进而假定 a_{il} 不一定等于 a_{li} , 且连边不存在自循环(即不存在 a_{ii}). 同理, 本研究用变量 $b_{ik} \in [0, 1]$ 来表示电力公司 i, k 之间在决策层的相互影响程度(仍为非对称, 不存在 b_{ii}).

当企业进入到下一期绿色科技创新决策时, 其前期阶段的决策和影响因素是形成下期影响因

素的依据,进而本研究假设公司在 $t + 1$ 时期的影响因素和决策的变化是受到 t 时期两种情况不同程度的共同影响. 据此,可以将企业的影响因素变化建模为动力学模型,具体如下所示

$$y_i(t+1) = (1 - u_i) \sum_{l=1}^m a_{il} y_l(t) + u_i \frac{1}{w_i} \sum_{k=1}^m b_{ik} x_k(t) \quad (1)$$

$$x_k(t+1) = f(y_i(t+1) | \theta) \quad (2)$$

其中 u_i 沟通层比重; a_{il} 为 i 和 l 之间的影响权重; b_{ik} 为 i 和 k 之间的沟通权重; w_i 为节点 i 的度; $f(\cdot | \theta)$ 表示以参数 θ 构建的深度学习模型, θ 表示需被训练的网络参数.

虽然在现实情况中从影响因素层到决策层之间存在的映射关系无法直接采用直观模型给出,但是可以用深度学习模型拟合其对应关系. 深度学习模型相比于其他的分类模型具有准确度高,鲁棒性和容错能力强,能充分逼近复杂的非线性关系等优势.

2.2 基于公共物品博弈的传播模型描述

在公共物品博弈中,传统经济学认为无论其他参与者选择什么策略,搭便车都会使得个人收益最大,最终导致集体收益为零^[45];然而,经济学实验表明,现实中自利的个体也会表现出一定程度的合作^[46]. 基于此理论,假定电力上市企业每一轮在决策层与其社交网络中相连的企业都进行绿色科技创新的公共物品博弈,并且如果企业采取积极的绿色创新策略,则要花费一个固定的成本 c ,而决策的投资回报系数为 r ,反之,如企业采取消极绿色创新决策则不花费. 对于任意采取积极绿色创新决策的上市企业 i ,用 w_i 表示此企业的度(即连边数量,连接其他企业的数量),企业 i 在其邻域(包含与其有连边的企业)内总共参与 $w_i + 1$ 个公共物品博弈,由于邻域节点的争用性,企业 i 对于其参与的每个公共物品博弈做出的贡献可表示为 $\frac{c}{w_i + 1}$,则在该情况下对于企业 i ,在以邻域内的企业 i 为中心的公共物品博弈中,积极和消极策略的收益分别表示为

$$\pi_i^0 = s_l \sum_{k \in \Omega_i} \left(\frac{r}{w_j + 1} \right) \sum_{l \in \Omega_j} \left(\frac{c}{w_l + 1} \right) \quad (3)$$

$$\pi_i^1 = s_l \sum_{k \in \Omega_i} \left(\frac{r}{w_j + 1} \right) \sum_{l \in \Omega_j} \left(\frac{c}{w_l + 1} \right) - c \quad (4)$$

其中 Ω_i, Ω_j 表示企业 i, j 邻域内有连接的其他企业集合; π_i^0 表示为公司 i 采取消极绿色创新策略经过博弈之后所获得的收益, π_i^1 表示为公司 i 采取积极绿色创新策略经过博弈之后所获得的收益,其上角标表示演化进行的期数; $s_l = 1$ 表明公司 j 邻域内的公司 l 采取积极绿色创新策略, $s_l = 0$ 表示其采取消极绿色创新策略;

在影响层网络中,电力上市企业各自的影响因素的相互影响关系不变,因此 $t + 1$ 时期的影响因素 $y_i(t + 1)$ 和决策 $x_i(t + 1)$ 是受到 t 时期博弈的结果 π_i^z 与影响因素 $y_i(t)$ 影响. 依据上述观点,基于公共物品博弈的动力学模型可修改为如下公式

$$y_i(t+1) = (1 - u_i) \sum_{l=1}^m a_{il} y_l(t) + u_i \pi_i^z \quad (5)$$

同时,每一轮演化结束后,上市企业 i 在演化中会更换其邻域中的连边,即在每一轮博弈结束后,节点企业 i 会随机从邻域 Ω_i 内选择一个节点 m 和从邻域外随机选择一个企业 n , 在比较他们的收益 π_m^z, π_n^z 后,依据费米公式以概率 P 断开 m , 连接 n , 具体表示为

$$P = \frac{1}{1 + e^{\frac{\pi_m^z - \pi_n^z}{K}}} \quad (6)$$

其中 K 表示企业对更换邻居的意愿度.

3 数据处理与网络映射拟合

基于上述企业绩效与绿色科技创新的动态演化模型,本节主要讨论模型中初始参数确定、网络映射拟合的方法. 在两类模型中, $t = 1$ 表示样本数据中第一期,并根据企业数据统计的分布,每期决策执行长度与间隔定为一年.

3.1 影响层与决策层的参数处理

电力上市企业 i 的影响因素 y_i 由企业的规模与财务绩效情况表示,由此,本研究选取 76 家电力上市公司从 2009 年—2019 年的数据,数据来源于中国研究数据服务平台数据库与国泰安数据库(CSMAR),其中缺失数据采用插值法补足,季度数据采用平均处理为年度数据,并且为了去除量纲影响,将结果进行了标准化处理,并根据数据

库指标(中国研究数据服务平台数据库与国泰安数据库)构建如表1所示指标体系.

表1 指标体系

Table 1 Index system

一级指标	二级指标	统计	一级指标	二级指标	统计
比率结构	流动资产比率	35	披露财务指标	非经常性损益	9
	现金资产比率			现金流量净额	
	∴			∴	
	流动负债比率			基本每股收益	
	经营负债比率			稀释每股收益	
偿债能力	资产负债率	28	公司研发支出	研发人员数量占比	6
	权益乘数			研发支出	
	∴			∴	
	产权比率			资本化研发支出	
	长期资本负债率			费用化研发支出	
发展能力	营业总成本增长率	57	现金流	净利润现金净含量	32
	销售费用增长率			营业收入现金含量	
	∴			∴	
	管理费用增长率			企业自由现金流	
	可持续增长率			营运指数	
股利分配	股利分配率	10	相对价值指标	市盈率	28
	每股股利变动值			市销率	
	∴			∴	
	每股股利变动比率			市值	
	收益留存率			本利比	
每股指标	每股营业总收入	88	盈利能力	资产报酬率	68
	每股营业利润			流动资产净利润率	
	∴			∴	
	每股负债			营业毛利率	
	每股留存收益			财务费用率	
风险水平	财务杠杆	3			
	经营杠杆				
	综合杠杆				

表1总结了电力公司的业务指标,将它们分成一级和二级指标进行分类.一级指标包括比率结构、偿债能力、发展能力、股利分配、每股指标、披露财务指标、公司研发支出、现金流、相对价值指标、盈利能力和风险水平等多个方面.对应的二级指标则进一步细化,如流动资产比率、资产负债率、营业总成本增长率、股利分配率、每股营业总收入、非经常性损益等.表中的数字代表了每个二级指标的个数,显示出这些业务指标的复杂性和多样性.指标数量不同,如“每股指标”下的二级指标数量最多,达到88个,而“风险水平”下的二级指标数量最少,只有3个.这个概览性的介绍提供了一个大致的框架,对于详细的指标内容

可以联系作者获取完整表格或访问数据来源网站.

同时针对76家电力上市公司,收集其从2009年—2019年绿色发明和绿色实用新型年度专利总数.本研究利用绿色专利的获得数量表示积极企业采取绿色创新策略或消极绿色创新策略^[12],具体为:如果占比超过或等于平均值,则认为其积极进行绿色科技创新,记录值为1;小于平均值的企业认为是采取消极绿色科技创新,记值为0.

3.2 两层网络间映射拟合

本研究将标准化后的企业基本面数据作为影响因素 y_i ,将上一节定义的各上市企业绿色科技专利数作为 x_i ,即 y_i 为输入数据, x_i 为标签数据,并以relu函数激活.本研究具体构建的深度学习

模型基本设置为：第一层网络为 364 个节点，激活函数为 relu 函数；第二层网络为 182 个节点，激活函数为 relu 函数；第三层网络为 91 个节点，激活

函数为 relu 函数；第四层为 2 个节点，激活函数为 softmax 函数。选择 adam 优化器。其训练模型的评价指标如图 2 所示。

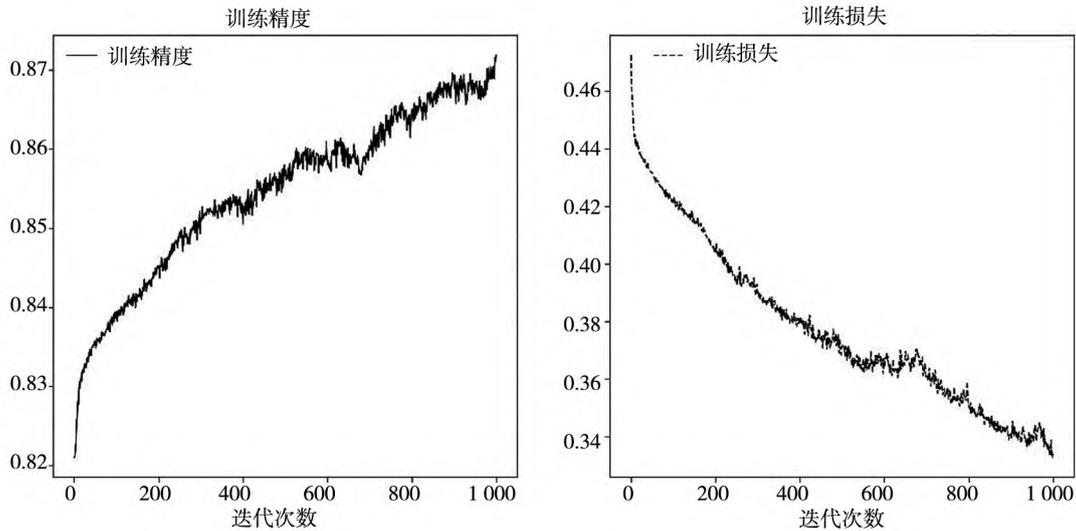


图 2 模型训练结果

Fig.2 Model training results

由上图很直观可以发现，随着迭代次数增加，训练准确度上升，损失函数逐步下降。这证明训练后模型适用性很强，满足模拟两层网络映射的要求。

4 模型仿真分析

4.1 传播模型仿真分析

本研究将决策层和影响层都设置为 ER 随机网络，用复杂度表示随机网络的重连概率。其基本的参数设置如表 2 所示。

表 2 参数设置表

Table 2 Parameter setting table

参数	取值范围	参数	取值范围
a_{il}	[0,1]	b_{ik}	[0,1]
u_i	[0,1]	决策层复杂度	0.5
影响层复杂度	0.5		

本节在基于初始数据拟合网络映射后，采用电力板块 76 家公司 2019 年的数据作为演化模型的初始输入，在迭代 60 次，将其演化过程与网络间相互影响权重的敏感分析结果如图 3 和图 4 所示。

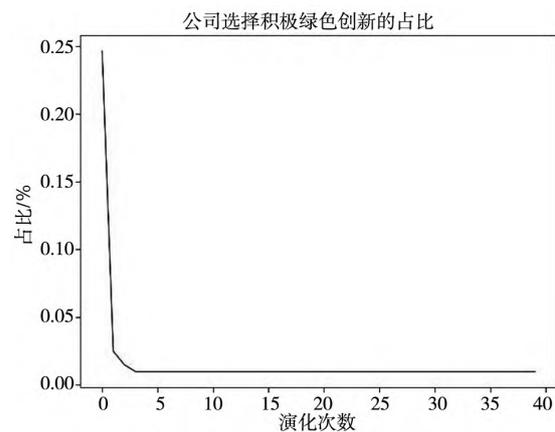


图 3 初始参数演化

Fig.3 Initial parameter evolution

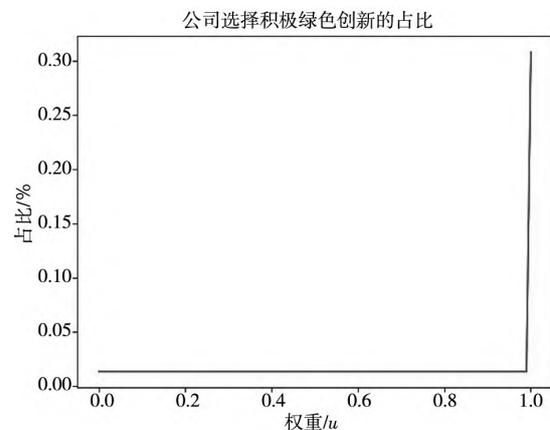


图 4 倾向于决策层比重

Fig.4 Preference for decision weighting

从图3结果中可以直观看出,本研究模型的仿真结果是收敛且平稳的,其中选择积极创新企业的占比随着演化的进程迅速从初始0.25降低,并在接近于0处达到平稳状态,说明当企业之间仅为传播关系时,企业创新决策将逐渐变为采取消极绿色科技创新;图3中结果虽显示企业间交流对决策的影响不明显,但此处的核心原因并非交流失效,而是当将影响因素映射为二元决策变量时(及高于平均为积极,低于平均为消极),交流后影响的数值反映到最终的决策量不变.也就是说,在当前情景下企业绿色科技创新策略的选择主要受制于影响层的制约.在影响层变化不明显的时候,决策层不会有太大的变化,即任意企业的策略无法明显的影响其他的企业的决策.

为了进一步的揭示企业选择积极绿色创新策略的驱动因素,本节探究决策层与影响层对企业决策的影响程度,具体为将变量 u_i 作为横坐标,并 u_i 取不同的值时,取演化过程后20次中企业积极决策占比的平均值作为纵坐标,结果如图4所示.结果显示,两个网络的影响权重变化并不能引起明显的变化,只有完全倾向于企业间沟通、不考虑影响因素时,选择积极绿色创新的企业比例才会迅速上升,这说明上市企业策略选择的严重受制于其影响参数,当忽略影响层后比例就会瞬间增加.

本节接下来分别就影响层和决策层的参数进行敏感性分析.由于初始参数设置中,每个企业在决策层和影响层的影响系数 a_{il}, b_{ik} 是 $[0,1]$ 区间内的随机数,这不利于进行敏感性分析,进而本节将每层网络中个体之间的系数设置为 $[0,1]$ 区间内的同一数值.其结果如图5~图8所示.

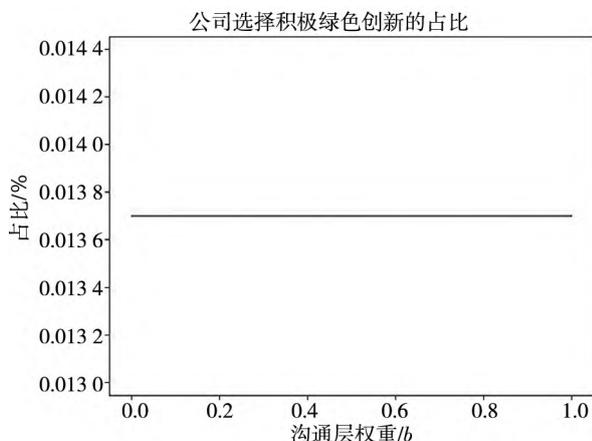


图5 决策层权重
Fig. 5 Decision-making weights

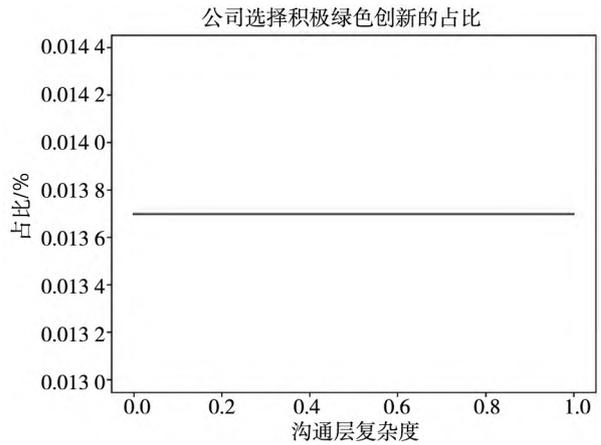


图6 决策层复杂程度
Fig. 6 Complexity of the decision-making level

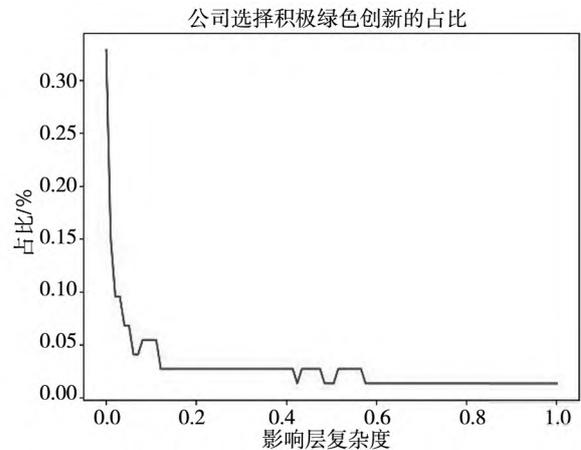


图7 影响层复杂程度
Fig. 7 Complexity of the influence layer

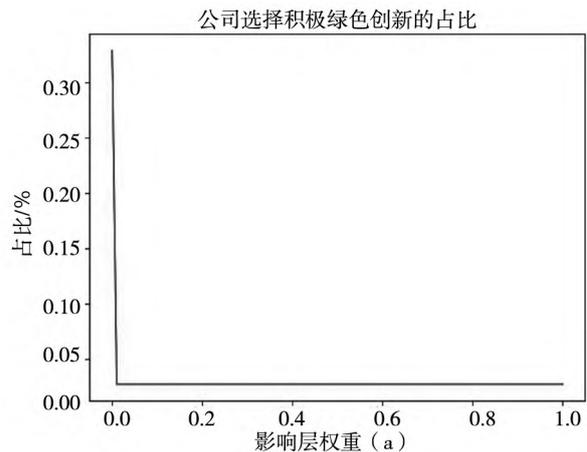


图8 影响层权重
Fig. 8 Influence layer weights

从图5~图8中可以看出,决策层的复杂程度和企业的影响系数都对均衡没有产生影响,意味着企业的度对企业决策影响较小,这主要仍是因为受到影响层的制约作用,即企业 i 当期的决

策由当期影响因素直接决定,而其他企业的决策只能通过对下一期影响因素作用反映到企业 i 的下一期决策.而对于影响层,其复杂程度和权重的增加都对积极科技创新的比例选择产生了负向的影响,这说明决策层的演化趋势是倾向于积极策略,但是影响层的影响都是倾向于消极策略,这些结果都意味着公司进行绿色创新的先决条件是要首先考虑改善公司的经营.

此外,由于二级指标过多不利于分析,本节对指标体系中的一级指标也进行了敏感性分析.然

而,指标体系中的变量是作为初始数据输入进深度学习网络中的,具体的设置映射参数无法显示.因此在此处采取放大倍数的方法加以分析,即在演化开始的时候,将一级指标下的每个二级指标都乘以一个倍数,这个倍数就代表了该指标的重要程度;随后,以其放大倍数作为横坐标,演化过程中选择积极策略企业占比的后 20 次数值的平均值作为纵坐标,并作出演化结果.首先分析其公司经营能力的变化,其结果如图 9 ~ 图 11 所示.

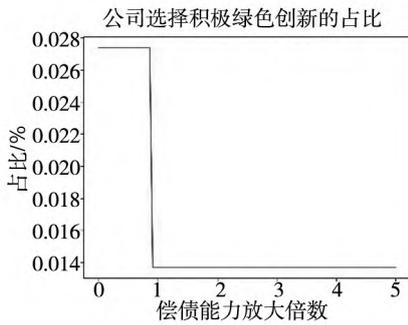


图 9 偿债能力
Fig. 9 Debt solvency

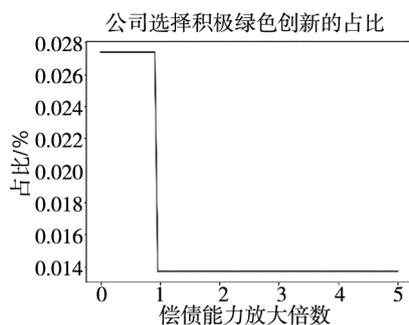


图 10 盈利能力
Fig. 10 Profitability

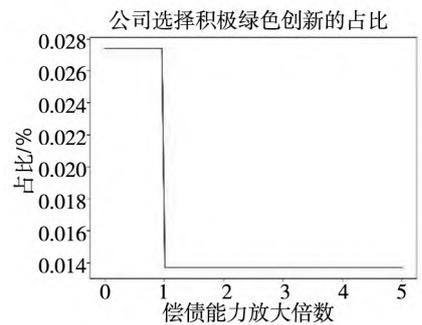


图 11 发展能力
Fig. 11 Development capacity

从图 9 ~ 图 11 的结果中可以看出,偿债、盈利和发展能力在模型中的重要程度上近似一致,并且对企业选择积极策略的影响是负向的.尤其是当倍数大于 1 的时候,三种能力都导致选择 PP

的企业降低了一半.此现象的原因是,从短期来看,积极绿色科技创新需要大量资金,使得企业财务负担较大,PP 的选择对公司是不利的.接着对公司的财务水平进行分析,其结果如图 12 ~ 图 14 所示.

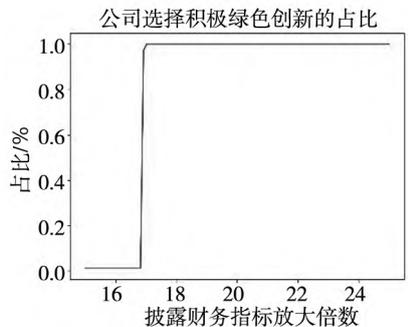


图 12 披露财务指标
Fig. 12 Disclosure of financial indicators

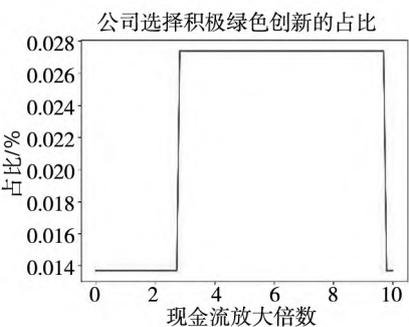


图 13 现金流指标
Fig. 13 Cashflow indicators

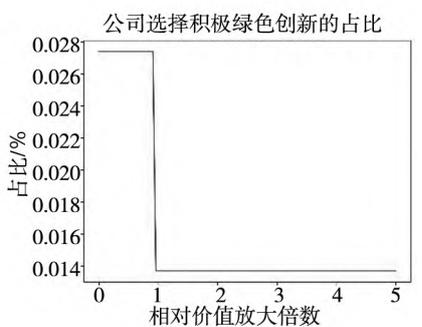


图 14 相对价值指标
Fig. 14 Relative value indicators

图 12 的结果直观的显示出上市企业的财务水平越高,选择积极创新策略的比例就越高,尤其是在该指标放大到 19 的时候比例会迅速到达 1.图 13 则显示出现金流指标的结果是阶跃的,现金流的适当的增幅(放大 2 倍 ~ 4 倍)会有利于公司的经营状况,使得公司有更多抵御风险而将较大财力投入在绿色创新上.但过多的现金流不利于绿色科技创新,这意味着企业存在较大的空闲资金时,其潜在选择变多,导致绿

色科技创新不是企业的最优选择,资金将会应用到其他领域中.图 14 中结果表明,企业的相对价值指标与股票市场息息相关,但积极绿色创新策略依赖企业资金投入于实际研发,而相对价值指标上升表明资金会过多的流入金融市场从而降低了选择积极策略的比例.除了每股指标和股利分配两个指标对均衡没有产生作用之外,本节对其他的指标分析如图 15 ~ 图 17 所示.

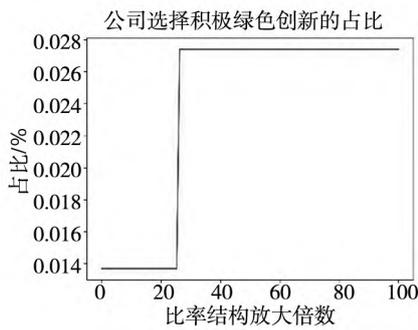


图 15 比率结构
Fig. 15 Ratio structure

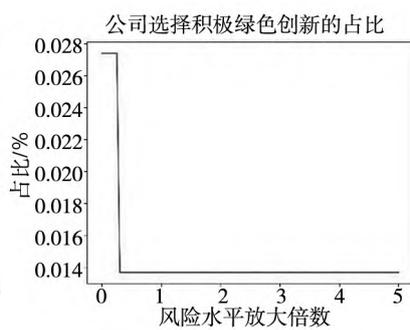


图 16 风险水平
Fig. 16 Risk level

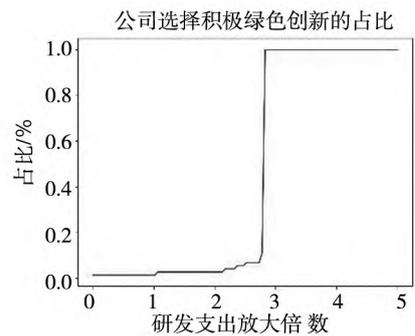


图 17 公司研发支出
Fig. 17 R&D expenditures

从图 15 的结果看,显然比率结构指标对积极策略的选择是促进作用,因为比率结构指标包含的流动资产比率、现金资产比率、流动负债比率、经营负债比率等二级指标都有助于公司降低经营风险,而经营风险越低企业选择积极策略的比例就会越高. 鉴于绿色创新的投入是一个长期的过程,一个安全稳定企业运营环境是基本保障,这也是图 16 中风险水平指标倍数增加导致积极创新策略选择比例下降的原因. 风险水平指标包含的是金融杠杆类的指标,杠杆越高风险越大,且企业越发不愿意选择积极创新. 图 17 中,研发支出指标直接关系到绿色科技创新的投入,支出越大选择积极创新的比例就越高,尤其是研发支出扩大 3 倍之后,选择创新策略的比例上升速率飞升.

以上敏感性分析结果表明,当绿色科技创新决策在企业间仅存在传播关系时,企业之间的交流对其决策影响不明显,创新决策仍基于企业绩效驱动,尤其依赖于企业的财务水平,研发支出等指标.

4.2 基于公共物品博弈的传播模型仿真分析

本研究沿用上一节的设定,仍将决策层和影响层都设置为 ER 随机网络,用复杂度表示随机网络中节点间的重连概率. 其基本的参数设置如表 3 所示.

表 3 公共物品博弈参数设置表
Table 3 Table of PGG parameter settings

参数	取值范围	参数	取值范围
a_{il}	[0,1]	b_{ik}	[0,1]
u_i	[0,1]	决策层复杂度	0.5
影响层复杂度	0.5	K	0.1
r	1	c	0.1

在基于初始参数的情况下,并且采用电力板块 76 家公司 2019 年的数据作为演化模型的初始输入,其演化过程和网路重要程度的结果如图 18 和图 19 所示.

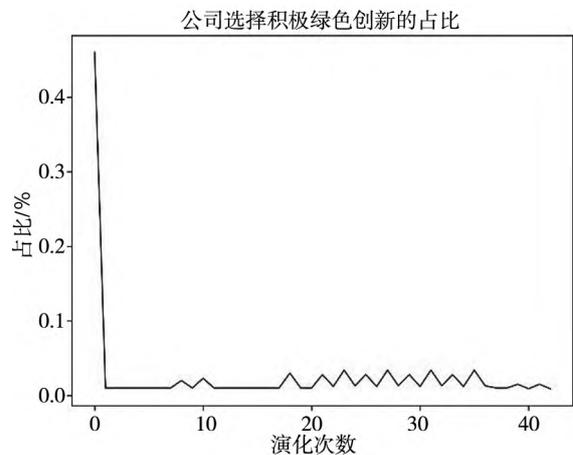


图 18 初始参数演化
Fig. 18 Initial parameter evolution

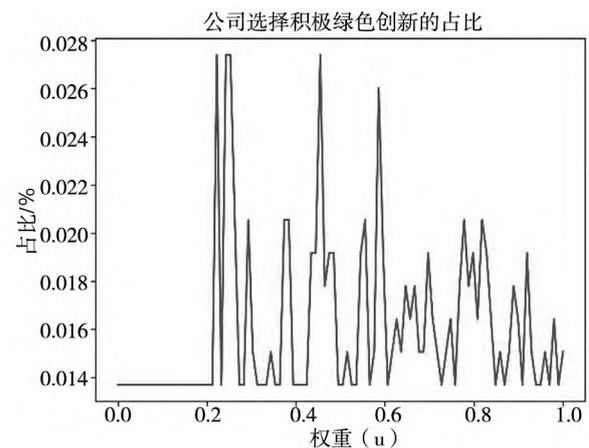


图 19 倾向于决策层的比重
Fig. 19 Weighting in preference to the decision level

从图 18 中可以看出,选择积极策略的企业随着演化的进程迅速从 0.5 降低,接近于 0 之后达到平稳状态,相较于单纯的传播状态,搭便车机会

的存在反而促进了企业选择积极绿色科技创新的比例. 为揭示外部环境为公共物品博弈情况下企业选择积极绿色创新策略的驱动因素, 本节仍探究决策层与影响层的影响程度对其作用程度. 同样将变量 u_i 作为横坐标, 取演化过程后 20 次中积极策略企业占比的平均值作为纵坐标, 结果如上图 19 所示. 结果表明, 决策层的权重上升引起明显的变化, 当比重高于 0.2 之后上市企业选择

积极策略的比例明显上升, 在 0.014 ~ 0.028 之间波动. 此结果表明, 决策层经过博弈之后其对下一期影响因素的作用程度要明显高于之前传播模型.

本节接下来分别就影响层和决策层的影响系数进行敏感性分析. 本节仍按照之前的设置, 将每个个体之间的权重设置为 $[0, 1]$ 区间内的同一数值, 其结果如图 20 ~ 图 23 所示.

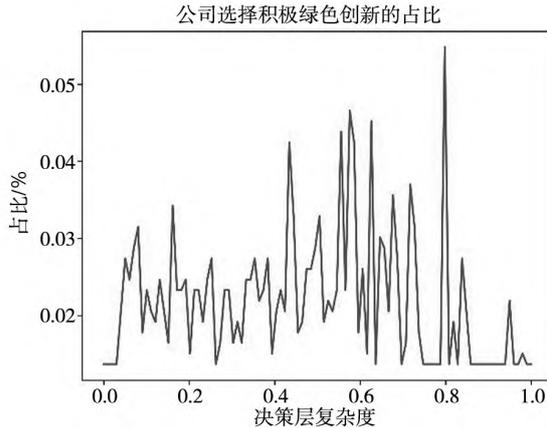


图 20 决策层复杂度
Fig. 20 Decision layer complexity

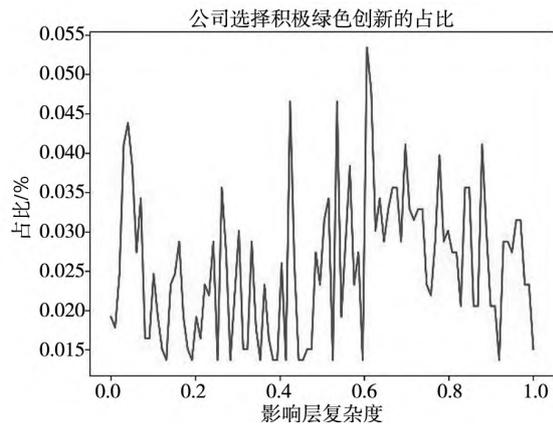


图 21 影响层复杂度
Fig. 21 Impact layer complexity

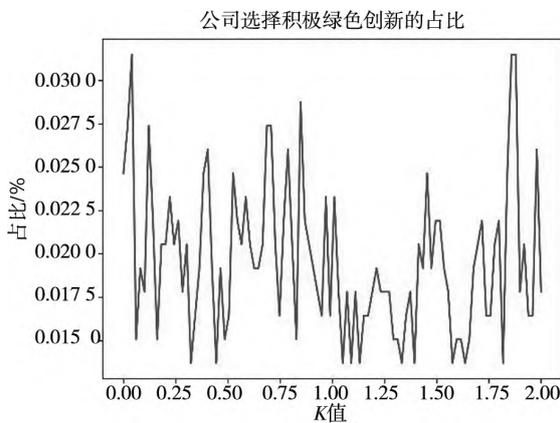


图 22 K 值
Fig. 22 K-value

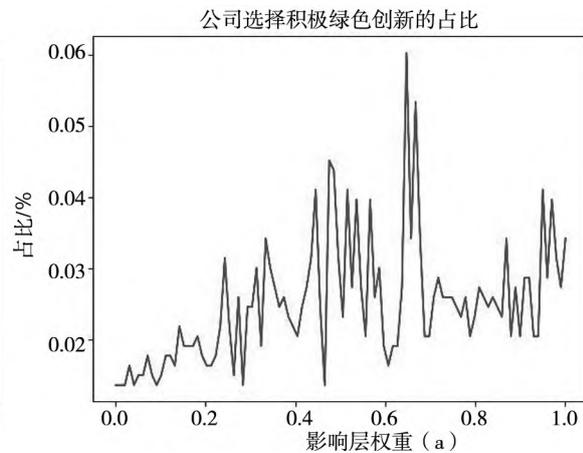


图 23 影响层权重
Fig. 23 Influence layer weights

从图 20、图 21 的结果来看, 当决策层存在空间公共物品博弈时, 企业间的交流参数(ER 网络复杂度与影响层的影响系数)对于决策有了明显的作用. 从影响层复杂度的敏感分析结果可以看出影响因数对下阶段决策的影响由于当期决策层影响作用加强而效果减弱了, 但相对的, 从影响层的影响系数变化可以看出, 系数的增加有助于增加企业选择积极创新的比例. 对于理性程度参数 K 来说, 图 22 显示当 K 值在 1 附近的时候, 选择积极策略的比例最小, 而 K 值过低或者过高都增

加了积极创新的比例, 意味着公司理性程度过低或者过高都有助于促进积极创新的选择. 图 23 展示了随着企业越重视影响层, 即为影响层赋予更多权重的时候, 选择积极绿色创新的企业数量呈现出先增加后减少, 随后稳定的变化趋势. 这说明影响层对于企业的绿色创新策略有明显的促进作用, 但同时过度关注影响层而忽视决策层的企业间沟通, 那么企业对绿色创新的积极性也会受到限制. 也就是说, 影响层和决策层共同作用才能最大限度的促进企业选择积极的绿色创新策略.

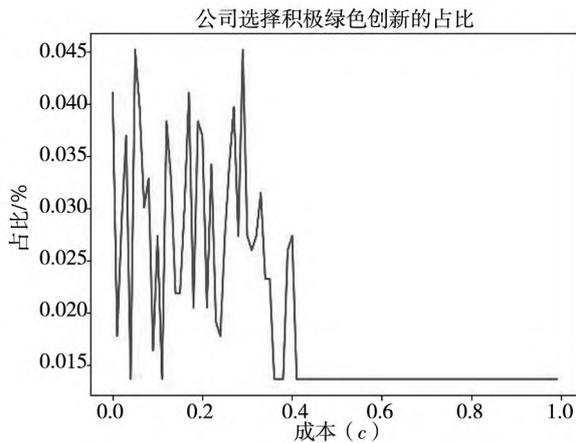


图 24 成本
Fig. 24 Cost

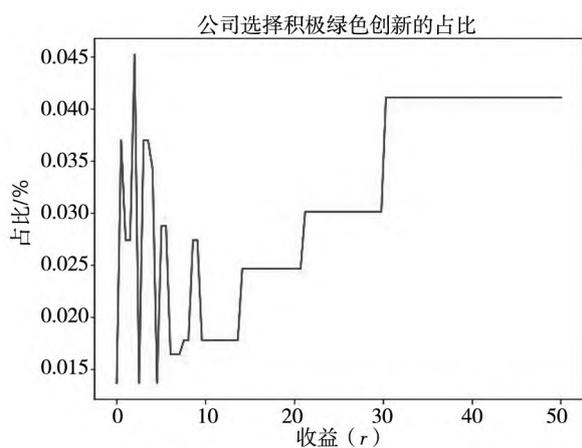


图 25 收益
Fig. 25 Profit

图 24 的结果直观的显示如绿色科技创新投入成本过大会极大的抑制企业创新,其中初段低投入时的波动是由于演化博弈中个体的有限理性导致的.图 25 表明当收益比较低的时候,有限理性使得企业中积极创新的比例上下波动,而当收益逐步上升的时候,理性程度

就会增加使得企业中选择积极策略的比例上升.

同样本节对指标体系也进行了敏感性分析,以其放大倍数作为横坐标,演化结果的后 20 次数值的平均值作为纵坐标.仍然先分析其公司经营能力的变化,其结果如图 26 ~ 图 28 所示.

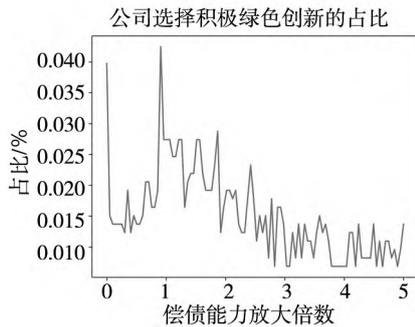


图 26 偿债能力
Fig. 26 Solvency

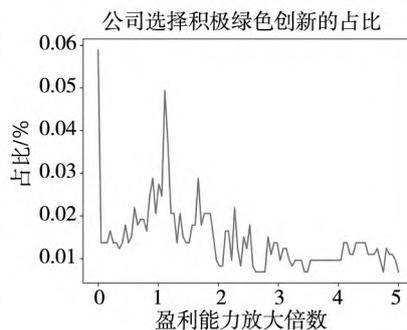


图 27 盈利能力
Fig. 27 Profitability

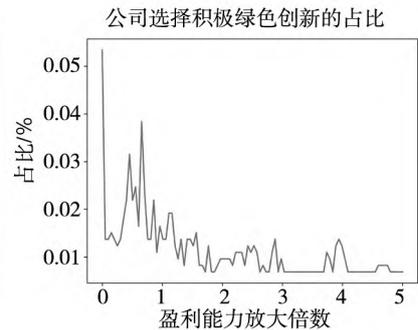


图 28 发展能力
Fig. 28 Development capacity

从图 26 ~ 图 28 的结果中可以看出,偿债、盈利和发展能力对积极策略的选择影响与仅存在传播关系时一样是负向的,但不一样的是其下降的速度相较于之前更慢,且表现为有序波动的下降.

这是因为这三种能力在公司进行公共物品博弈的过程中起到了正向的促进作用,与能力越强的公司合作所获得的收益就更多.本节还对公司的财务水平进行分析,其结果如图 29 ~ 图 31 所示.

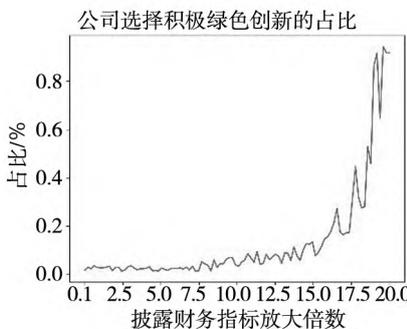


图 29 披露财务指标
Fig. 29 Disclosure of financial indicators

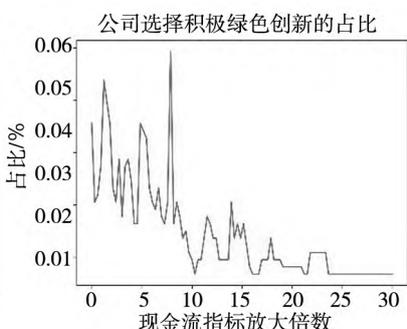


图 30 现金流指标
Fig. 30 Cash flow indicators

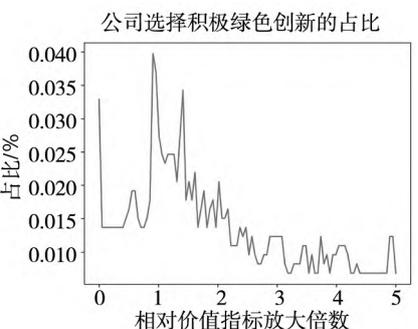


图 31 相对价值指标
Fig. 31 Relative value indicators

从图 29 ~ 图 31 的结果可以看出,公司的财务水平越高,选择积极策略的企业占比就越高. 同样由于存在博弈的关系,财务水平对创新的促进作用增强,即使是很小的财务水平倍数都可以引起积极策略的占比的上升. 然而,现金流指标则呈现不同的变化趋势,企业创新比例随着其指标值增大而减小. 注意到当现金流放大

倍数较小时,企业选择积极创新的比例一直维持在较高的状态,这证明公共物品博弈中的合作与搭便车行为减小了企业绿色科技创新所需的资金投入,节约了现金流储备. 图 31 中,相对价值指标对企业选择积极策略比例的影响也是反向的,但是下降速率明显小于只存在传播关系的时候.

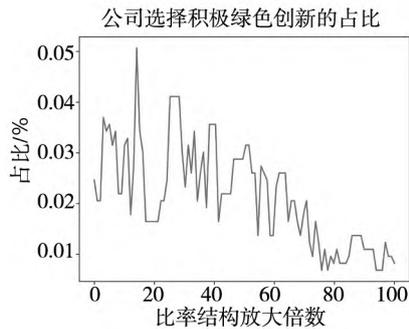


图 32 比率结构
Fig. 32 Ratio structure

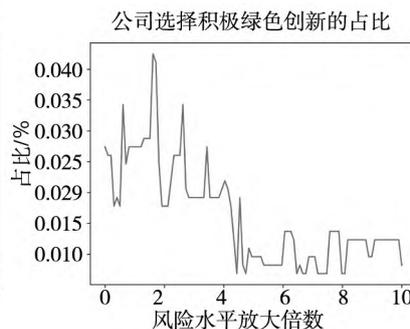


图 33 风险水平
Fig. 33 Risk level

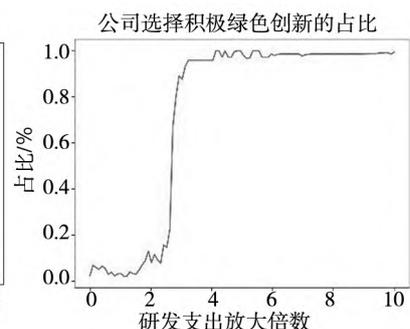


图 34 公司研发支出
Fig. 34 R&D expenditure

从图 32 ~ 图 34 的结果看,比率结构指标和公司研发指标对公司选择积极创新策略的影响与上一节基本一致,而风险水平指标则存在明显不同. 相较于传播模型中风险水平指标的倍数高于 1 的时候企业选择积极策略比例就急速下降,而存在公共物品博弈关系时直到

倍数高于 4 倍之后选择积极创新的企业数才接近于最低水平,此结果证明企业间合作有利于公司抵御由于绿色创新带来的风险. 最后,本节探究每股指标和股利水平两个指标对策略选择产生的影响,具体结果如图 35 和图 36 所示.

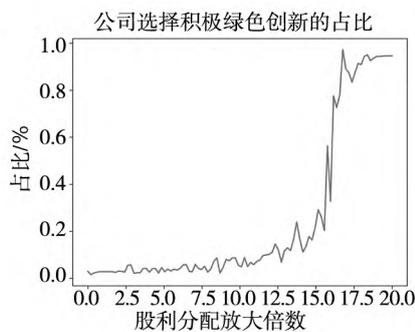


图 35 股利分配
Fig. 35 Dividend distribution

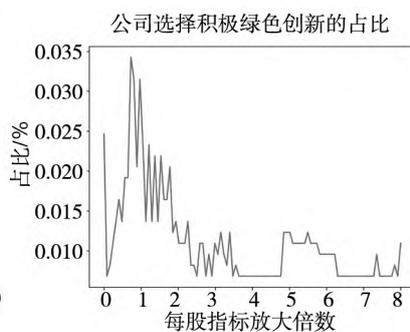


图 36 每股指标
Fig. 36 Per share indicator

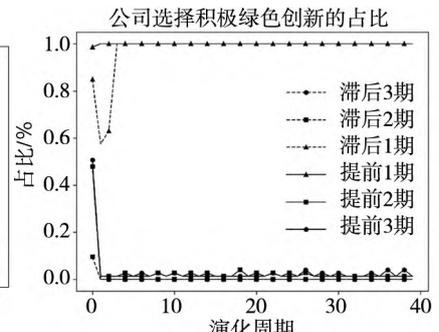


图 37 时间差异性对比
Fig. 37 Time difference

股利分配是代表了企业分红水平,每股指标代表了公司的利润水平. 从图 35 的结果可知,股利分配越高选择积极策略比例就越高. 这是因为有公共物品博弈时公司可以通过合作来实现更高的收益,而公司之间的合作需要决策层的配合,也正是因为此,决策层的影响程度较之于仅存在传播关系时有了明显的提升,股利分配也产生明显的作用,尤其股利分配体现的是股东的收益,而且

他们刚好也是正是决策层产生明确影响的主体. 而对于每股指标而言,图 36 的结果显示其对企业选择积极策略比例产生的效果是波动下降的,这个指标越高说明公司的留存收益越高,意味着公司已经度过绿色创新的艰难时期而到达了收获利润的阶段,这也就降低了企业持续进行积极创新策略的占比.

可见当企业间关系为公共物品博弈时,绿色

创新决策与企业绩效间相互影响显著,呈正向促进.其中企业间交流越频繁,积极创新决策比例越高且绩效影响作用越强.

最后,本研究考虑到决策层与因素层之间时间上的差异性,补充了新的仿真结果,包括决策层滞后于因素层 1 期~3 期对企业策略选择演化方向的影响和决策层提前于因素层 1 期~3 期的企业策略选择演化方向的影响,如图 37 所示.从图中可以看出,这份分析的经济和管理意义在于揭示了企业在绿色科技创新决策过程中的时间敏感性.短期内(滞后 1 期或提前 1 期)的因素对企业策略选择的影响显著,表明企业必须迅速响应当前的经营状况和市场动态,以保持其竞争力和创新能力.长期滞后(3 期)的较弱影响强调了快速适应和前瞻性策略的重要性;企业需要不仅关注即时的操作效率,也要投资于对未来市场趋势的预测和准备.此外,提前期的高一致性和稳定性表明,具有预见性的决策可以为企业提供更稳定的策略方向和绩效结果.因此,企业管理者应重视及时的分析和环境分析,并在此基础上构建灵活的策略规划,以促进绿色科技创新和企业绩效的协同增长.这不仅是对单一企业的指导,也是整个行业和政策制定者在鼓励和支持绿色创新时应考虑的因素.

5 结束语

在低碳经济转型的背景下,本研究以企业间交流的相互作用为切入点,以我国电力上市公司的真实数据为例,构建了两层进化网络,系统的分析了电力企业绿色科技创新与企业绩效的协同演化机理.结果表明,第一,在倡导绿色科技创新政策初期(及边际效应较高时),企业间的交流对企业决策影响较弱,此时企业应注重自身经营状况,提高财务绩效,为绿色科技创新提供更加的坚实的资金基础;第二,当企业间绿色科技创新关系为公共物品博弈时,邻域内企业当期决策对下期决

策的影响作用增强,影响层的作用相对减弱,且企业间交流越频繁,企业中选择积极创新的比例越高.值得注意的是,由于决策层地位的提升,提升股利分配使得股东更愿意交流也有助于促进企业积极策略选择.仿真中发现,绿色科技研发的成本是影响策略的核心,过高的成本必然会导致企业选择消极策略.此外,在公共物品博弈中,企业经营能力对积极创新的影响更为明显,同时企业能在更小的风险,以更少的现金流留存进行积极绿色科技创新.

促进企业绿色科技创新是我国经济双碳目标下有效的发展方向,政府需制定有效的激励政策提高企业的创新动力,基于研究结果,本研究提出如下政策建议.第一,由于企业绿色科技创新决策高度依赖企业财务水平、风险水平与创新投入,政府可以通过补贴或者降税等方式降低企业绿色科技创新的财务负担,让企业更积极的参与创新活动.此外,由于我国企业目前的科技创新能力较弱,国家和政府还应当调用多元化的政策手段积极扶持加快推进企业层面的绿色科技创新工程,帮助壮大一批具有创新能力的中小型企业.第二,政府应该积极宣传创新典范企业,并积极举办绿色科技交流会议,产品展览等活动,促进企业间交流以带动绿色科技创新.这一举措可以有效地引导社会绿色创新要素向企业聚集,使企业之间可以进行有效地学习,真正成为研究开发投入地主体.第三,企业应提高自身经营能力,提高财务绩效.如企业管理人员努力提高自己的业务能力等.同时,为了提高企业在领域内的生存力和竞争力,企业还应积极提高自身的自主创新能力,形成一套独特、完整的技术创新体系,以帮助国家和社会促进经济的平稳发展.

本研究还存在一定的局限性,模型并没有将外部环境规制作为变量放入到效用中,但环境政策对绿色创新有着重要影响,下一步研究方向将会把环境规制作为考核函数放入模型中,综合分析其与企业绿色创新协同演化的机理.

参 考 文 献:

- [1]李维安,张耀伟,郑敏娜,等.中国上市公司绿色治理及其评价研究[J].管理世界,2019,35(5):126-133+160.

- Li Wei'an, Zhang Yaowei, Zheng Min'na, et al. Research on green governance and its evaluation of Chinese listed companies[J]. *Journal of Management World*, 2019, 35(5): 126 - 133 + 160. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 《努力推动实现碳达峰碳中和目标》, https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202111/t20211111_1303691_ext.html.
- National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. "Striving to Achieve the Goals of Carbon Peak and Carbon Neutrality," https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202111/t20211111_1303691_ext.html. (in Chinese)
- [3] 人民网. 习近平: 实现“双碳”目标, 不是别人让我们做, 而是我们自己必须要做. <http://politics.people.com.cn/n1/2022/0523/c1001-32428031.html>.
- People's Daily. Xi Jinping: Achieving the "Dual Carbon" Goals is Not Something Others Ask Us to Do, But Something We Must Do Ourselves. <http://politics.people.com.cn/n1/2022/0523/c1001-32428031.html>. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm.
- The Central People's Government of the People's Republic of China. Guiding Opinions of the State Council on Accelerating the Establishment and Improvement of a Green, Low-Carbon, and Circular Economy Development System. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm. (in Chinese)
- [5] 刘春蕊, 田 轩. 中国高校创新成果转移及对创新的影响——以专利转让为例[J]. *管理科学学报*, 2023, 26(9): 23 - 40.
- Liu Chunrui, Tian Xuan. The transfer of innovation in Chinese universities and its effect on subsequent innovation: Evidence from patent trading[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2023, 26(9): 23 - 40. (in Chinese)
- [6] Huang J W, Li Y H. Green innovation and performance: The view of organizational capability and social reciprocity[J]. *Journal of Business Ethics*, 2017, 145(2): 309 - 324.
- [7] Gangopadhyay P, Chawla M, Dal Monte O, et al. Prefrontal-amygdala circuits in social decision-making[J]. *Nature Neuroscience*, 2021, 24(1): 5 - 18.
- [8] Acemoğlu D, Como G, Fagnani F, et al. Opinion fluctuations and disagreement in social networks[J]. *Mathematics of Operations Research*, 2013, 38(1): 1 - 27.
- [9] Lindström B, Jangard S, Selbing I, et al. The role of a "common is moral" heuristic in the stability and change of moral norms[J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 2018, 147(2): 228.
- [10] Gavrillets S, Richerson P J. Collective action and the evolution of social norm internalization[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(23): 6068 - 6073.
- [11] 张 琦, 郑 瑶, 孔东民. 地区环境治理压力、高管经历与企业环保投资——一项基于《环境空气质量标准(2012)》的准自然实验[J]. *经济研究*, 2019, 54(6): 183 - 198.
- Zhang Qi, Zheng Yao, Kong Dongmin. Local environmental governance pressure executive's working experience and enterprise investment in environmental protection: A quasi-natural experiment based on China's "Ambient Air Quality Standards 2012" [J]. *Economic Research Journal*, 2019, 54(6): 183 - 198. (in Chinese)
- [12] 李青原, 肖泽华. 异质性环境规制工具与企业绿色创新激励——来自上市企业绿色专利的证据[J]. *经济研究*, 2020, 55(9): 192 - 208.
- Li Qingyuan, Xiao Zehua. Heterogeneous environmental regulation tools and green innovation incentives: Evidence from green patents of listed companies[J]. *Economic Research Journal*, 2020, 55(9): 192 - 208. (in Chinese)
- [13] 齐绍洲, 林 岫, 崔静波. 环境权益交易市场能否诱发绿色创新? ——基于我国上市公司绿色专利数据的证据[J]. *经济研究*, 2018, 53(12): 129 - 143.
- Qi Shaozhou, Lin Shen, Cui Jingbo. Do environmental rights trading schemes induce green innovation? Evidence from lis-

- ted firms in China[J]. *Economic Research Journal*, 2018, 53(12): 129 – 143. (in Chinese)
- [14] Wang L, Long Y, Li C. Research on the impact mechanism of heterogeneous environmental regulation on enterprise green technology innovation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 322: 116127.
- [15] Calel R, Dechezleprêtre A. Environmental policy and directed technological change: Evidence from the European carbon market[J]. *Review of Economics and Statistics*, 2016, 98(1): 173 – 191.
- [16] Lv C, Shao C, Lee C C. Green technology innovation and financial development: Do environmental regulation and innovation output matter? [J]. *Energy Economics*, 2021, 98: 105237.
- [17] 解学梅, 朱琪玮. 企业绿色创新实践如何破解“和谐共生”难题? [J]. *管理世界*, 2021, 37(1): 128 – 149 + 9.
Xie Xuemei, Zhu Qiwei. How can green innovation solve the dilemmas of “Harmonious Coexistence”? [J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(1): 128 – 149 + 9. (in Chinese)
- [18] 柯劭婧, 马欧阳, 许年行. 竞争对手环保处罚的溢出效应研究——基于企业绿色创新的视角[J]. *管理科学学报*, 2023, 26(6): 21 – 38.
Ke Shaoping, Ma Ouyang, Xu Nianxing. The spillover effects of peer firms’ environmental penalties: Evidence from corporate green innovation[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2023, 26(6): 21 – 38. (in Chinese)
- [19] 苏媛, 李广培. 绿色技术创新能力、产品差异化与企业竞争力——基于节能环保产业上市公司的分析[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(4): 46 – 56.
Su Yuan, Li Guangpei. Green technological innovation ability, product differentiation and enterprise competitiveness: Analysis of energy saving and environmental protection industry listed companies[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(4): 46 – 56. (in Chinese)
- [20] 王先甲, 何奇龙, 全吉. 阈值风险下的多企业合作治理污染的演化博弈分析[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(12): 17 – 22 + 45.
Wang Xianjia, He Qilong, Quan Ji. Evolutionary game analysis of multiple enterprises cooperative reducing emissions with collective risk[J]. *Operations Research and Management Science*, 2017, 26(12): 17 – 22 + 45. (in Chinese)
- [21] 衣博文, 范英. 高比例可再生能源接入下的电力系统规划研究[J]. *管理科学学报*, 2023, 26(10): 21 – 35.
Yi Bowen, Fan Ying. Power system planning with a high share of renewable energy[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2023, 26(10): 21 – 35. (in Chinese)
- [22] Barney J, Wright M, Ketchen Jr D J. The resource-based view of the firm: Ten years after 1991[J]. *Journal of Management*, 2001, 27(6): 625 – 641.
- [23] Du K, Cheng Y, Yao X. Environmental regulation, green technology innovation, and industrial structure upgrading: The road to the green transformation of Chinese cities[J]. *Energy Economics*, 2021, 98: 105247.
- [24] Buysse K, Verbeke A. Proactive environmental strategies: A stakeholder management perspective[J]. *Strategic Management Journal*, 2003, 24(5): 453 – 470.
- [25] Leonidou L C, Christodoulides P, Kyrgidou L P, et al. Internal drivers and performance consequences of small firm green business strategy: The moderating role of external forces[J]. *Journal of Business Ethics*, 2017, 140(3): 585 – 606.
- [26] Delgado-Ceballos J, Aragón-Correa J A, Ortiz-de-Mandojana N, et al. The effect of internal barriers on the connection between stakeholder integration and proactive environmental strategies[J]. *Journal of Business Ethics*, 2012, 107(3): 281 – 293.
- [27] 曹洪军, 陈泽文. 内外环境对企业绿色创新战略的驱动效应——高管环保意识的调节作用[J]. *南开管理评论*, 2017, 20(6): 95 – 103.
Cao Hongjun, Chen Zewen. The driving effect of internal and external environment on green innovation strategy: The moderating role of top management’s environmental awareness[J]. *Nankai Business Review*, 2017, 20(6): 95 – 103. (in Chi-

- nese)
- [28] Li Z, Huang Z, Su Y. New media environment, environmental regulation and corporate green technology innovation: Evidence from China[J]. *Energy Economics*, 2023, 119: 106545.
- [29] Liu M, Shan Y, Li Y. Study on the effect of carbon trading regulation on green innovation and heterogeneity analysis from China[J]. *Energy Policy*, 2022, 171: 113290.
- [30] Anouliès L. Heterogeneous firms and the environment: A cap-and-trade program[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, 84: 84 – 101.
- [31] Xie X, Huo J, Qi G, et al. Green process innovation and financial performance in emerging economies: Moderating effects of absorptive capacity and green subsidies[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2015, 63(1): 101 – 112.
- [32] Dixon-Fowler H R, Slater D J, Johnson J L, et al. Beyond “does it pay to be green?” A meta-analysis of moderators of the CEP-CFP relationship[J]. *Journal of Business Ethics*, 2013, 112(2): 353 – 366.
- [33] Fernando Y, Jabbour C J C, Wah W X. Pursuing green growth in technology firms through the connections between environmental innovation and sustainable business performance: Does service capability matter? [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 141: 8 – 20.
- [34] Climent F, Soriano P. Green and good? The investment performance of US environmental mutual funds[J]. *Journal of Business Ethics*, 2011, 103(2): 275 – 287.
- [35] Soltmann C, Stucki T, Woerter M. The impact of environmentally friendly innovations on value added[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2015, 62(3): 457 – 479.
- [36] Zino L, Ye M, Cao M. A two-layer model for coevolving opinion dynamics and collective decision-making in complex social systems[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2020, 30(8): 083107.
- [37] Young H P. The dynamics of social innovation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(Supplement 4): 21285 – 21291.
- [38] Ramazi P, Riehl J, Cao M. Networks of conforming or nonconforming individuals tend to reach satisfactory decisions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(46): 12985 – 12990.
- [39] Ehrhardt G, Marsili M, Vega-Redondo F. Diffusion and growth in an evolving network[J]. *International Journal of Game Theory*, 2006, 34(3): 383 – 397.
- [40] Ehrhardt G C M A, Marsili M, Vega-Redondo F. Phenomenological models of socioeconomic network dynamics[J]. *Physical Review E*, 2006, 74(3): 036106.
- [41] Hassani H, Razavi-Far R, Saif M, et al. Classical dynamic consensus and opinion dynamics models: A survey of recent trends and methodologies[J]. *Information Fusion*, 2022, 88: 22 – 40.
- [42] Zheng P, Huang Z, Dou Y, et al. Rumor detection on social media through mining the social circles with high homogeneity [J]. *Information Sciences*, 2023, 642: 119083.
- [43] Boutaba R, Salahuddin M A, Limam N, et al. A comprehensive survey on machine learning for networking: Evolution, applications and research opportunities[J]. *Journal of Internet Services and Applications*, 2018, 9(1): 1 – 99.
- [44] Kaviani S, Sohn I. Influence of random topology in artificial neural networks: A survey[J]. *ICT Express*, 2020, 6(2): 145 – 150.
- [45] 全吉, 储育青, 王先甲. 具有惩罚策略的公共物品博弈与合作演化[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(1): 141 – 149.
Quan Ji, Chu Yuqing, Wang Xianjia. Public goods with punishment and the evolution of cooperation[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2019, 39(1): 141 – 149. (in Chinese)
- [46] Yin X, Li J, Li D, et al. When emotional responses conflict with self-interested impulses: A transcranial direct current

stimulation study of cognitive control in cooperative norm compliance [J]. *Journal of Economic Psychology*, 2023, 99: 102675.

The synergistic evolution mechanism of green innovation and performance in the power industry under social networks

FANG De-bin^{1,2}, *WANG Peng-yu*², *CAO Gang-cheng*²

1. Research Center for Forging a Strong Sense of Community for the Chinese Nation, South-central Minzu University, Wuhan 430074, China;
2. Center for Complex Science and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: This study examines how green technology innovation and corporate performance of electric power companies evolve synergistically from the perspective of social networks. In this paper, based on the green patent and basic operation data from power listed companies during 2009 ~ 2019, a two-layer network consisting of a decision layer and an influence layer is constructed. Deep learning is applied to fitting the mapping relationship between the two layers to establish a synergistic evolution mechanism model for enterprise green technology innovation and performance. In this model, enterprises act as nodes in each layer of the network, have social network properties, and exchange information in the network. Meanwhile, viewpoint dynamics simulation of inter-firm exchange is utilized to explain the evolutionary process, and the influencing factors and influence mechanisms behind enterprise green science and technology innovation decision are analyzed by comparing different green innovation game relationships among enterprises. It is found that: First, when the marginal utility of green science and technology innovation is high, the influence of inter-firm exchange on enterprise decision making is weak. At this time, enterprises should focus on their own operating conditions and improve their financial performance to provide a solid foundation for green science and technology innovation. Second, when the inter-firm green science and technology innovation relationship resembles a public goods game, the influence of enterprise decision making in the neighborhood is enhanced. The more frequent the inter-firm exchanges, the more active innovation is chosen by enterprises; the more frequent the inter-enterprise communication, the higher the proportion of enterprises choosing positive innovation, and the more significant the influence of enterprise operational ability on positive innovation. This study provides theoretical support for the decision regarding science and technology innovation in electric power enterprises and enriches the theory of green innovation and enterprise co-development.

Key words: listed electric power companies; green technology innovation; corporate performance; synergistic evolution; social network