

# 科技创新、产业结构升级与碳排放的传导效应

——基于半参数空间面板VAR模型

叶娟惠<sup>1</sup>, 叶阿忠<sup>2</sup>

(1.福州市社会科学院,福州 350007; 2.福州大学 经济与管理学院,福州 350116)

**摘要:** 为了实现碳减排目标和碳中和愿景,在中国30个省市(因数据缺失,不包括西藏和港澳台地区)的面板数据基础上,构建半参数空间面板向量自回归模型(SSPVAR),利用脉冲响应函数和导数散点图实证分析了科技创新、产业结构合理化和产业结构高级化、碳排放之间的双向空间传导效应,以及环境规制的非线性影响。结果表明:①科技创新、产业结构升级和碳排放之间存在时间滞后效应和空间传递效应。科技创新和碳排放存在显著的正向自强化效应和正向空间溢出效应,而产业结构合理化和产业结构高级化存在负向空间溢出效应。②科技创新促进本地和邻地产业结构合理化和产业结构高级化,但是产业结构合理化和产业结构高级化均对本地和邻地的科技创新产生不同程度的时间滞后性的抑制作用。③科技创新减少本地二氧化碳排放,但不利于邻地的碳减排;产业结构合理化和产业结构高级化有利于邻地碳减排,但增加了本地的二氧化碳排放,且产业结构高级化的碳减排效应比产业结构合理化更显著。④环境规制对科技创新、产业结构升级、碳排放都存在显著的非线性影响。

**关键词:** 科技创新; 产业结构合理化; 产业结构高级化; 碳排放

**中图分类号:** F124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2022)10—0012—12

环境问题已经成为全球面临的巨大挑战,以二氧化碳为首的温室气体过量排放是造成全球生态环境恶化的重要原因。2020年,我国在联合国大会上明确提出了二氧化碳排放要力争在2030年前实现碳达峰、在2060年前实现碳中和等目标。党的十九大报告指出,中国碳减排的主要驱动力在于科技创新和产业结构升级,二者既是实现碳减排目标与发展绿色低碳经济的决定性因素,也是推动中国经济高质量发展的内在要求。而碳减排的要求也在不同程度上通过环境规制倒逼企业进行科技创新与产业结构升级。虽然,中国的科技创新指数在全球排名第14位,第二、三产业占GDP的比例已高达93%,但是科技创新动能不足、产业结构区域发展不平衡等问题依然突出,而且已成为制约中国经济高质量发展与碳减排的瓶颈因素。那么,科技创新、产业结构升级与碳排放三者之间存在怎样的相互关系? 科技创新对碳减排的影响作用大,还是产业结构升级对碳减排的贡献大? 碳排放是否通过环境规制对科技创新和产业结构升级产生影响? 通过上述问题的回答,对于实现碳减排和碳中和目标,促进中国经济高质量发展具有重要的现实意义。

## 一、文献综述

科技创新、产业结构升级与碳排放已经成为国内外学者研究的热门话题。但大部分学者主要关注科技创新、产业结构升级与碳排放其中两两之间的关系。

### (一) 科技创新与产业结构升级

关于科技创新与产业结构升级的研究,大多数文献聚焦于科技创新对产业结构升级的促进作用,较少文献直接研究产业结构升级对科技创新的影响。一方面,大部分学者认为科技创新促进产业结构升级,并且存在区域异质性。如陈堂和陈光(2020)从产业结构高级化和产业结构合理化两个角度分析了科技创新对产业结构升级的促进作用及空间外溢效应。Lager(2016)认为制造业转型升级过程中必须依靠创新驱动。Lucchese(2011)通过对德国等6个主要欧洲国家的实证分析发现,技术创新的差异对一个国家产业结构变化和发展具有推动作用;另一方面,也有少部分学者认为产业结构升级对科技创新存在推动作用。比较有代表性的是赵庆(2018)研究发现产业结构优化升级显著促进技术创新效率,并且表现出地域依赖和路径依赖特征。因此,科技创新与产业结构升级存在双向互动影响。如王慧艳等(2019)研究发现,科技创新是推动产业

收稿日期:2022-06-02

基金项目:国家自然科学基金“半参数全局向量自回归模型的理论研究及其应用”(71571046)

作者简介:叶娟惠,硕士,福州市社会科学院经济研究所副所长,助理研究员,研究方向:区域经济增长;叶阿忠,博士,福州大学经济与管理学院教授,博士研究生导师,研究方向:计量经济理论与应用。

升级的核心动力,产业升级对科技创新也具有明显的拉动作用,二者存在相互促进的良性互动关系。夏业领和何刚(2018)、李政和杨思莹(2017)也验证了科技创新与产业升级存在相互促进的双向互动关系。

## (二)科技创新与碳排放

关于科技创新与碳排放的研究,大多聚焦于环境库兹涅茨(EKC)曲线分析科技创新、经济增长与碳排放的关系,而直接研究碳排放对科技创新影响的文献很少。一方面,研究关于科技创新对碳排放的作用。有的学者认为科技创新可以促进碳减排。例如,王鑫静等(2019)基于“一带一路”沿线国家的面板数据发现,科技创新通过提高能源的利用效率,提升碳排放效率,有效促进碳减排。马艳艳等(2016)考虑了不同区域技术进步对碳排放强度的影响,发现省域间技术进步促进碳减排的显著作用存在差异性。但也有少部分的学者认为科技创新增加碳排放。如张兵兵等(2017)研究发现,技术进步在碳减排中存在双刃效应,低能源效率行业的技术进步增加二氧化碳排放,通过技术进步改进能源效率带来的碳减排效应不能抵消其推动经济增长带来的二氧化碳排放增长效应。另一方面,较少文献探究碳排放对科技创新的反向作用。比较有代表性的如刘志华等(2022)通过面板向量自回归(PVAR)模型分析发现,短期内碳排放效率可以倒逼科技创新水平提升,但长期来看,这种正向影响不断减弱并且逐渐变为负向影响。因此,科技创新与碳排放存在双向互动影响。

## (三)产业结构升级与碳排放

关于产业结构升级与碳排放的研究,学者主要基于LMDI分解法(迪氏对数指标分解法,log mean Divisia index)、投入产出法等探析产业结构升级对碳排放的影响,同时从区域异质性角度进行了研究。一方面,关于产业结构升级对碳排放的影响。大部分学者认为,产业结构升级促进碳减排。如杨筱茜等(2022)、孙丽文等(2020)都验证了产业结构升级可以显著减少碳排放;但也有学者认为,产业结构调整不会促进碳减排。如郭朝先(2012)采用LMDI分解法研究发现,产业结构变动驱动了碳排放增长,但通过产业结构变动值的预测发现,未来产业结构变动将有助于碳减排。另一方面,关于碳排放对产业结构升级的影响。如孟浩和张美莎(2021)研究发现,二氧化碳排放等污染物的排放阻碍了产业结构合理化和高级化进程,并且存在显著的空间溢出效应。张翔祥和邓荣荣(2021)通过耦合协调模型分析发现,中部六省碳排放效率和产业结构优化的耦合协调度偏低。因此,产业结构升级与碳排放存在双向互动关系。如丁涵等(2021)通过构建PVAR模型和脉冲响应函数分析发现,产业结构高级化和碳排放之间存在双向动态关系。陶长琪等(2015)基于PVAR模型分析发现,产业结构与碳排放存在双向动态关系,产业结构是影响碳排放的重要因素,从长期来看增加碳排放量有利于促进产业结构优化升级。

综上所述可以看出,虽然国内外学者对科技创新、产业结构升级与碳排放关系的研究文献很丰富,但是仍然有值得进一步深入探讨的方面。一是,现有相关研究主要关注科技创新、产业结构升级和碳排放其中两两之间的关系,而部分文献对三者之间关系的研究没有充分考虑变量的内生性问题。二是,现有的关于科技创新、产业结构升级和碳排放三者关系的相关研究主要局限于非空间层面,而有研究表明这三者之间的相互影响存在空间异质性。因此,有必要从空间视角研究三者之间的双向传导效应。三是,不能忽视政府在这三者之间发挥的重要调节作用。由于碳排放等环境污染的负外部性,“市场失灵”情形下要发挥政府“有形之手”的调节作用,环境规制是政府通过制定相应政策措施达到环境保护和经济发展相协调的重要手段。如吴茵茵(2021)等研究发现,政府行政干预对碳减排具有显著影响。因此,有必要将环境规制作为政府对三者影响的外生变量引入研究框架中。基于此,本文将科技创新、产业结构升级与碳排放纳入一个整体研究体系中,在理清三者的影响机制基础上,通过构建半参数空间面板向量自回归模型(SSPVAR),并利用脉冲响应函数刻画三者在时间和空间维度上的传导效应,以及环境规制作为政府对三者影响的外生变量在这个体系中的非线性影响。

# 二、科技创新、产业结构升级与碳排放的影响机制

## (一)科技创新与产业结构升级的互动关系

一方面,科技创新主要通过供给和需求影响产业的投入、产出及生产要素的配置效率,进而推动产业结构升级。从供给角度来看,科技创新促进劳动分工的精细化,提高劳动生产率,推动社会资源重新分配,促进生产要素在不同行业间迅速流动,进而推动产业结构的调整、升级;从需求角度来看,科技创新通过满足消费

者的消费需求、生产者的生产需求等,促进生产结构、投资结构的改变,进而推动产业结构调整。同时,科技创新在促进新兴产业发展的同时,也推动了传统产业的改造升级。另一方面,产业结构通过影响需求,进而促进科技创新。根据市场需求的变化,可能会出现某一新兴产业快速发展的趋势,为了保持新兴产业的竞争优势,不断提升产品和服务质量,这一产业的生产企业会不断加大技术投入,提升劳动生产率,或加大固定资产投资力度,这个过程将对科技创新产生较大的需求,从而推动科技创新发展。但也有学者发现,产业结构升级对科技创新存在抑制作用。由于产业结构升级存在路径依赖,其对科技创新表现出时间滞后性的影响(涂建军等,2021)。产业结构升级对创新的影响路径有两个步骤:一是产业结构升级促进分工的专业化和深化,带动第二产业内部升级和第三产业新服务的发展;二是产业结构升级通过需求拉动等效应对科技创新产生影响。根据区域经济发展阶段的差异,产业升级的创新路径存在较大差异。基于上述分析,本文提出如下假设:

科技创新通过影响供给和需要促进产业结构升级(H1a);

产业结构升级对科技创新的影响随着区域经济发展变化而变化,且存在时间滞后性(H1b)。

## (二) 科技创新与碳排放的互动关系

一方面,关于科技创新对碳排放的影响。有学者认为,科技创新可以促进碳减排。科技创新通过提升绿色技术水平,提高能源效率,促进清洁可再生能源的开发和使用,进而推动碳减排。同时,科技创新可以提高劳动生产率,促进生产要素流动,提高生产要素的配置效率和质量,推动经济增长方式从粗放型向集约型转变,进而减少生产过程中二氧化碳排放(孙丽文等,2020);也有学者认为,科技创新带来的碳减排效应不能抵消其推动经济增长带来的二氧化碳排放增长效应。科技创新在推动产出和消费增长的同时,增加了生产中所需的能源消耗,引致二氧化碳排放增加,当科技创新倾向于清洁能源行业和绿色低碳技术的创新,将通过提高能源效率抵消经济增长带来的二氧化碳排放,进而促进碳减排,当科技创新朝着非绿色低碳创新发展,不能抵消其推动经济增长带来的二氧化碳排放增长效应(张兵兵等,2017)。另一方面,有学者发现,碳排放可以倒逼科技创新发展(刘志华等,2022)。碳排放主要通过环境规制的中介作用对科技创新产生影响。由于环境的负外部性,导致市场调节机制失灵,需要依靠政府“有形之手”进行调节。而环境规制作为政府解决二氧化碳排放等环境污染的主要措施,可能通过“创新补偿效应”对科技创新产生正向影响,也可能遵循“成本效应”对科技创新产生负向影响(李巍和郝永勤,2017)。基于上述分析,本文提出如下假设:

科技创新对碳排放存在双刃效应,科技创新既可能增加碳排放,也可能会减少碳排放(H2a);

碳排放可以通过环境规制对科技创新产生反向影响,既可能通过“创新补偿效应”对科技创新产生正向影响,也可能遵循“成本效应”对科技创新产生负向影响(H2b)。

## (三) 产业结构升级与碳排放的互动关系

产业结构升级是指三次产业向高级化和合理化调整优化的过程。一方面,关于产业结构对碳排放的影响。有学者认为,产业结构升级促进碳减排。产业结构升级过程中,产业生产要素从劳动密集型为主,向资本密集型再向技术密集型转移,推动技术密集型产业发展,同时,产业自身逐渐向高技术产业、高附加值产业转变,降低对能源资源的消耗,将有利于减少二氧化碳排放。但也有学者认为,产业结构升级不会促进碳减排。产业结构合理化过程中,劳动、资本等生产要素资源在各产业间流动,资源要素得到合理再配置,提高了劳动生产率,产业结构逐渐向合理化方向调整,如果调整方向为污染密集型产业,将增加二氧化碳排放,如果向绿色清洁型产业调整,将减少二氧化碳排放(龚梦琪和刘海云,2020)。目前,中国的产业结构调整以第一产业向第二产业转移为主,高污染、高能耗部门主要集中在第二产业,部分产业的调整可能促进能源消耗,增加二氧化碳排放。另一方面,关于碳排放对产业结构升级的影响机制。碳排放对产业结构升级的影响效应主要基于环境规制的视角。随着二氧化碳等环境污染物排放的增加,环境质量恶化,环境规制强度随之提升,污染密集型产业生产成本不断增加,既可能因挤占了企业的转型投资成本而抑制产业结构升级,也可能倒逼企业加快低碳产业和绿色生产工艺的调整,促进产业结构转型升级(钟茂初等,2015)。基于上述分析,本文提出如下假设:

产业结构升级对碳排放的影响具有不确定性,产业结构合理化和产业结构高级化可能促进碳减排,也可能增加二氧化碳排放(H3a);

碳排放主要通过环境规制对产业结构升级产生反向影响,既可能对产业结构升级产生促进作用,也可能对产业结构升级产生抑制作用(H3b)。

### 三、实证模型、变量与数据说明

#### (一)模型构建

考虑到科技创新、产业结构升级与碳排放之间存在的内生性问题,单方程模型不能准确反映各变量之间的双向作用关系,也不能有效描述三者空间层面的相互传导效应。同时,环境规制作为政府对三者影响的外生变量,与其他经济变量往往存在非线性关系,参数估计模型不能满足非线性关系的研究需要(叶阿忠和郑万吉,2016)。因此,本文构建以科技创新、产业结构升级与碳排放为内生变量,以环境规制为非参数外生变量的半参数空间面板向量自回归模型(SSPVAR)。该模型既考虑了科技创新、产业结构升级与碳排放之间的同期影响和时间滞后一期影响,还考虑了三者时间和空间均滞后一期所产生的影响。构建模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} INNO_{it} = \beta_{12}IS_{it} + \beta_{13}CI_{it} + \theta_{11}INNO_{i,t-1} + \theta_{12}IS_{i,t-1} + \theta_{13}CI_{i,t-1} + \sigma_{11}\widetilde{INNO}_{i,t-1} + \\ \quad \sigma_{12}\widetilde{IS}_{i,t-1} + \sigma_{13}\widetilde{CI}_{i,t-1} + G_1(ER_{it}) + u_{1t} \\ IS_{it} = \beta_{21}INNO_{it} + \beta_{23}CI_{it} + \theta_{21}INNO_{i,t-1} + \theta_{22}IS_{i,t-1} + \theta_{23}CI_{i,t-1} + \\ \quad \sigma_{21}\widetilde{INNO}_{i,t-1} + \sigma_{22}\widetilde{IS}_{i,t-1} + \sigma_{23}\widetilde{CI}_{i,t-1} + G_2(ER_{it}) + u_{2t} \\ CI_{it} = \beta_{31}INNO_{it} + \beta_{32}IS_{it} + \theta_{31}INNO_{i,t-1} + \theta_{32}IS_{i,t-1} + \theta_{33}CI_{i,t-1} + \\ \quad \sigma_{31}\widetilde{INNO}_{i,t-1} + \sigma_{32}\widetilde{IS}_{i,t-1} + \sigma_{33}\widetilde{CI}_{i,t-1} + G_3(ER_{it}) + u_{3t} \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)中等号右边的同期变量移到左侧,并将所提取的系数矩阵的逆矩阵乘以等号右边的滞后变量,用向量形式表示如式(2)所示。

$$\begin{pmatrix} INNO_{it} \\ IS_{it} \\ CI_{it} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\beta_{12} & -\beta_{13} \\ -\beta_{21} & 1 & -\beta_{23} \\ -\beta_{31} & -\beta_{32} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \theta_{23} \\ \theta_{31} & \theta_{32} & \theta_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} INNO_{i,t-1} \\ IS_{i,t-1} \\ CI_{i,t-1} \end{pmatrix} + \\ \begin{pmatrix} 1 & -\beta_{12} & -\beta_{13} \\ -\beta_{21} & 1 & -\beta_{23} \\ -\beta_{31} & -\beta_{32} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \widetilde{INNO}_{i,t-1} \\ \widetilde{IS}_{i,t-1} \\ \widetilde{CI}_{i,t-1} \end{pmatrix} + \\ \begin{pmatrix} 1 & -\beta_{12} & -\beta_{13} \\ -\beta_{21} & 1 & -\beta_{23} \\ -\beta_{31} & -\beta_{32} & 1 \end{pmatrix}^{-1} G(ER_{it}) + \begin{pmatrix} 1 & -\beta_{12} & -\beta_{13} \\ -\beta_{21} & 1 & -\beta_{23} \\ -\beta_{31} & -\beta_{32} & 1 \end{pmatrix}^{-1} u \quad (2)$$

其中: $u = (u_{1t}, u_{2t}, u_{3t})'$ ;  $G(ER_{it}) = [G_1(ER_{it}), G_2(ER_{it}), G_3(ER_{it})]'$ 。

同时,将公式(2)中同期变量的逆矩阵与滞后期的系数矩阵相乘,得到估计模型如式(3)所示。

$$\begin{pmatrix} INNO_{it} \\ IS_{it} \\ CI_{it} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} INNO_{i,t-1} \\ IS_{i,t-1} \\ CI_{i,t-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \eta_{13} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \eta_{23} \\ \eta_{31} & \eta_{32} & \eta_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \widetilde{INNO}_{i,t-1} \\ \widetilde{IS}_{i,t-1} \\ \widetilde{CI}_{i,t-1} \end{pmatrix} + M(ER_{it}) + v \quad (3)$$

其中: $\gamma = \beta^{-1} \times \theta$ ;  $\eta = \beta^{-1} \times \sigma$ ;  $M(ER_{it}) = \beta^{-1} \times G(ER_{it})$ ;  $v = \beta^{-1} \times \mu$ 。  $i$ 为省份;  $t$ 为年份;  $INNO_{it}$ 、 $IS_{it}$ 、 $CI_{it}$ 分别为内生变量科技创新、产业结构升级和碳排放;  $INNO_{i,t-1}$ 、 $IS_{i,t-1}$ 、 $CI_{i,t-1}$ 分别为各内生变量的时间滞后一期项;  $\widetilde{INNO}_{i,t-1}$ 、 $\widetilde{IS}_{i,t-1}$ 、 $\widetilde{CI}_{i,t-1}$ 分别为各内生变量的时间及空间均滞后一期项;  $\gamma$ 为时间滞后一期项的系数矩阵;  $\eta$ 为时间及空间均滞后一期项的系数矩阵;  $v$ 为残差项;  $ER_{it}$ 为外生变量环境规制;  $M(ER_{it})$ 为环境规制的半参数函数形式。

#### (二)变量选择

##### 1. 科技创新

科技创新采取每万人国内三种专利申请授权量进行衡量(尹迎港和常向东,2021)。科技创新包含创新投入和创新产出,创新产出可以更加直接的反映科技创新水平。因此本文选取每万人国内三种专利申请授权量衡量科技创新水平,该数值越大,表示创新产出效率越高,科技创新水平越高。

## 2. 产业结构升级

借鉴于春晖等(2011)的做法,从产业结构合理化和产业结构高级化两个维度衡量产业结构升级水平。

### (1) 产业结构合理化

产业结构合理化采用泰尔指数的倒数进行衡量(于斌斌,2015)。泰尔指数越大,表示经济发展越偏离了均衡状态,产业结构越不合理。采用泰尔指数的倒数对产业结构合理化指标进行度量,该数值越大,表示产业结构合理化程度越高。产业结构合理化的计算方法如式(4)所示。

$$ISR = \frac{1}{TL} = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \left( \frac{Y_i}{Y} \right) \ln \left( \frac{Y_i}{L_i} / \frac{Y}{L} \right)}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

其中:ISR为产业结构合理化;TL为泰尔指数; $Y_i$ 为第*i*产业增加值;Y为地区生产总值; $L_i$ 为第*i*产业的就业人数;L为地区总就业人数。

### (2) 产业结构高级化

产业结构高级化(ISU)采用第三产业增加值与第二产业增加值的比重进行衡量。该比重的数值越大,表示经济在朝着服务化的方向发展,产业结构向服务化方向推进,产业结构高级化趋势越显著。

## 3. 碳排放

碳排放使用单位GDP所产生的二氧化碳排放量进行衡量。借鉴路正南和罗雨森(2021)的做法,选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气8种主要化石能源的消费量,根据IPCC(2006)的方法测度各省份的二氧化碳排放量,碳排放的计算方法如式(5)所示。

$$CI = \frac{CE}{GDP} = \frac{\sum_{i=1}^8 E_i \times NCV_i \times CEF_i}{GDP} \quad (5)$$

其中:CE为8种主要化石能源的二氧化碳排放量; $E_i$ 为第*i*种化石能源的消费量; $NCV_i$ 为第*i*中化石能源的平均低位发热量; $CEF_i$ 为第*i*种化石能源的二氧化碳排放系数;GDP为各省份的地区生产总值。

## 4. 环境规制

环境规制使用工业污染治理完成投资占地区生产总值的比重进行衡量。根据陶静和胡雪萍(2019)的研究,环境污染治理投资的强度可以更为直观的反映地方政府实施环境规制政策的力度,环境污染治理投入越大,环境规制力度越大。

### (三) 数据说明

鉴于数据的可得性和有效性,本文选取2004—2019年中国30个省(市、自治区)的面板数据进行研究(由于数据缺失,研究样本暂未包括西藏和港澳台地区)。相关数据均来源于历年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国科技统计年鉴》和国家统计局网站。为减少异方差的影响,对科技创新、产业结构合理化、产业结构高级化和碳排放指标做对数化处理。

## 四、实证结果分析

### (一) 实证模型检验

#### 1. 单位根检验和格兰杰因果检验

由于面板数据也包含时间因素,为避免伪回归现象的出现,在回归之前需要对各变量进行平稳性检验。常用的面板数据平稳性检验方法包括LLC检验、IPS检验、ADF-Fisher检验、PP-Fisher检验4种检验方法,各变量的单位根检验结果详见表1。从表1可知,各变量的单位根检验结果均在10%的显著性水平上拒绝了“存在单位根”的原假设。因此各变量都是平稳的,可以构建面板VAR模型。

通过面板数据的格兰杰因果关系检验可知,科技创新、产业结构升级(产业结构合理化、产业结构高级化)和碳排放两两之间存在显著的因果关系(由于篇

表1 各变量的单位根检验

变量	LLC 检验	IPS 检验	ADF-Fisher 检验	PP-Fisher 检验
lnINNO	-5.402***	-2.988***	87.867**	87.867**
lnISR	-1.720**	-1.446*	122.075***	110.599***
lnISU	-6.629***	-1.324*	163.942***	80.748**
lnCI	-2.536***	-6.328***	250.102***	250.102***
lnER	-4.474***	-5.608***	81.901**	77.199*

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平上拒绝变量存在单位根的原假设。

幅有限,未列出详细检验结果)。因此,可以利用面板VAR模型分析各变量之间的动态关系。

## 2. 空间相关性检验

本文基于 queen 邻近的 0-1 空间权重矩阵对各变量进行空间相关性检验,并利用 Moran'  $I$  值检验变量的空间相关性,各变量的 Moran'  $I$  值和  $P$  值如图 1 所示。从图 1(a) 可以看出,产业结构合理化的空间相关性最强,碳排放和科技创新的空间相关性次之,产业结构高级化的空间相关性最弱。产业结构合理化的空间相关性波动性较小,碳排放的空间相关性呈现小幅稳步下降的趋势,科技创新的空间相关性呈现小幅稳步上升的趋势,产业结构高级化的空间相关性从负值到正值,呈现显著上升的趋势。从图 1(b) 可以看出,科技创新、产业结构合理化和碳排放几个变量各年份的 Moran'  $I$  值都在 5% 显著性水平下通过检验并且都为正数,表明各变量存在显著的正向空间溢出效应,而产业结构高级化水平在 2010 年之前的 Moran'  $I$  值为负数并且不显著,2010 年之后的 Moran'  $I$  值都在 10% 水平上显著并且为正值。因此,可以建立空间面板 VAR 模型。

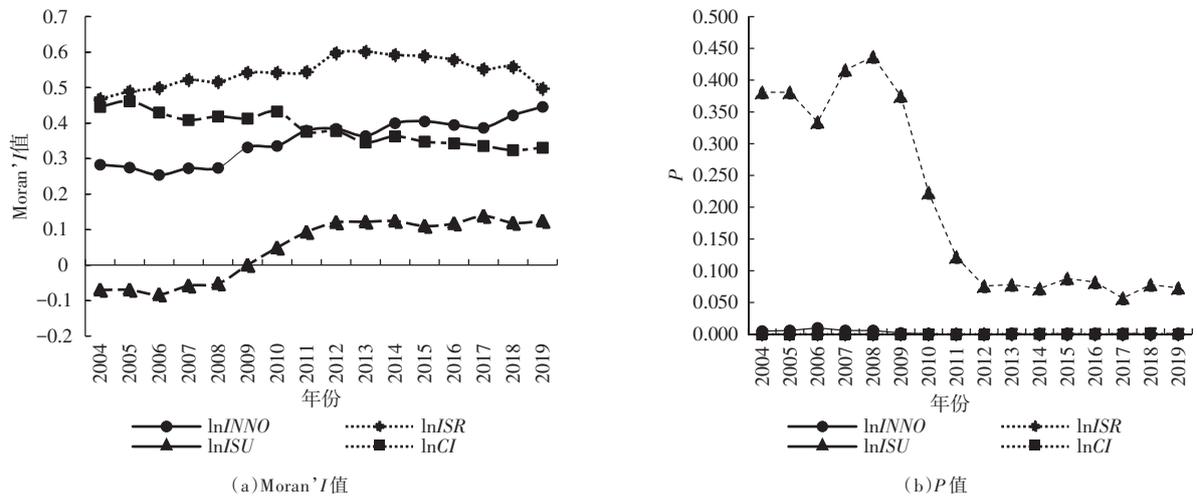


图 1  $\ln INNO$ 、 $\ln ISR$ 、 $\ln ISU$ 、 $\ln CI$  的 Moran'  $I$  值和  $P$  值

## (二) 半参数空间面板向量自回归模型结果分析

利用 R、MATLAB 软件采用局部线性估计和广义矩估计方法(GMM)对半参数空间面板向量自回归模型(SSPVAR)进行估计,参数的估计结果详见表 2。各变量之间的相互影响关系通过时空脉冲响应函数进行分析(图 2~图 7),非参数部分的估计结果如图 8 和图 9 所示。

表 2 SSPVAR 模型参数估计结果统计表

模型 1				模型 2			
变量	$\ln INNO$	$\ln ISR$	$\ln CI$	变量	$\ln INNO$	$\ln ISU$	$\ln CI$
$\ln INNO(-1)$	-0.150 (0.099)	-0.207 (0.102)	-0.024 (0.090)	$\ln INNO(-1)$	-0.179 (0.099)	-0.150 (0.101)	-0.033 (0.090)
$\ln ISR(-1)$	-0.001 (0.088)	-0.087 (0.091)	0.186 (0.080)	$\ln ISU(-1)$	-0.021 (0.086)	-0.106 (0.088)	0.194 (0.078)
$\ln CI(-1)$	-0.069 (0.098)	0.019 (0.102)	-0.150 (0.089)	$\ln CI(-1)$	-0.085 (0.098)	0.005 (0.101)	-0.147 (0.089)
$\ln \widetilde{INNO}(-1)$	0.220 (0.181)	-0.060 (0.166)	-0.306 (0.163)	$\ln \widetilde{INNO}(-1)$	0.310 (0.183)	-0.154 (0.171)	-0.400 (0.175)
$\ln \widetilde{ISR}(-1)$	0.422 (0.161)	-0.101 (0.148)	0.017 (0.145)	$\ln \widetilde{ISU}(-1)$	0.495 (0.160)	-0.104 (0.149)	0.046 (0.153)
$\ln \widetilde{CI}(-1)$	0.256 (0.180)	-0.129 (0.165)	0.284 (0.162)	$\ln \widetilde{CI}(-1)$	0.379 (0.182)	-0.177 (0.170)	0.293 (0.174)
$\widehat{M}_1(\ln ER_{it})$	导数图见图 8(a)			$\widehat{M}_1(\ln ER_{it})$	导数图见图 9(a)		
$\widehat{M}_2(\ln ER_{it})$	导数图见图 8(b)			$\widehat{M}_2(\ln ER_{it})$	导数图见图 9(b)		
$\widehat{M}_3(\ln ER_{it})$	导数图见图 8(c)			$\widehat{M}_3(\ln ER_{it})$	导数图见图 9(c)		

注:系数估计值下括号内的数值为标准差;各变量括号内的-1表示该变量的时间滞后一期。

## (三) 时空脉冲响应分析

与传统的脉冲响应相比,时空脉冲响应不仅反映变量间在时间维度上的“冲击-响应”关系,而且反映变

量在空间维度上的变化。在本文时空脉冲响应函数中,一个地区的一个变量产生一次冲击,中国 30 个省(自治区、直辖市)的 3 个内生变量都会产生一个对应的脉冲,形成 90 幅脉冲响应图。由于篇幅有限,难以对所有模拟结果一一进行展示。本文根据研究目的和空间个体的代表性,选取科技创新水平靠前的广东、产业结构合理化和产业结构高级化均靠前的江苏、二氧化碳排放大省的河北作为核心冲击源,其他在空间上邻近省份的响应情况作为关联变动的代表性样本。

### 1. 科技创新的冲击影响

从图 2 和图 3 可以看出,在广东地区科技创新一个正向标准差的冲击下,福建、广西和海南地区的科技创新、产业结构升级和碳排放均产生了不同程度的响应,响应幅度由大到小依次为海南、福建、广西,在一定程度上呈现出空间异质性。具体而言:①从图 2(a)和图 3(a)可以看出,在广东地区科技创新一个正向标准差的冲击下,广东自身在第 1 期的响应值最大,分别为 0.0917 和 0.0847,海南、福建和广西都是滞后一期达到最大正向响应值,模型 1 中的最大响应值分别为 0.0173、0.0058、0.0043,模型 2 中的最大响应值分别为 0.0216、0.0072、0.0054。两个模型的结果均表明,科技创新不仅具有正向自强化效应,而且具有正向空间溢出效应。②从图 2(b)和图 3(b)可以看出,在广东地区科技创新一个正向标准差的冲击下,广东的产业结构合理化和产业结构高级化在第 1 期的响应幅度最大,分别为 0.0098 和 0.0100,海南、福建和广西都是在第 2 期达到最大正向响应值,产业结构合理化的最大响应值分别为 0.0379、0.0126、0.0095,产业结构高级化的最大响应值分别为 0.0412、0.0137、0.0103。该结论表明,科技创新促进本地和邻近地区的产业结构合理化和产业结构高级化,存在正向空间溢出效应,验证了假设 H1a。该结果还表明,科技创新对产业结构高级化的促进作用大于对产业结构合理化的正向影响。③从图 2(c)和图 3(c)可以看出,在广东地区科技创新一个正向标准差的冲击下,海南、福建和广西的碳排放脉冲响应值均在第 2 期达到最大值,模型 1 中的最大响应值分别为 0.0243、0.0081、0.0061,模型 2 中的最大响应值分别为 0.0326、0.0109、0.0081,三个邻近地区的脉冲响应路径均呈现出“N”形波浪式收敛趋势,并且正向效应显著大于负向效应。而广东科技创新的正向冲击,对本地区碳排放的脉冲响应最大值和最小值分别为 0.0075、-0.0073(模型 1)和 0.0078、-0.0083(模型 2)。该结果表明,广东地区科技创新的冲击刺激邻近地区二氧化碳排放强度上升,不利于邻近地区的碳减排,但有利于本地区的碳减排,并且这种影响呈现波动式收敛趋势,验证了假设 H2a。由于广东的科技创新水平较高,在产业链中占据终端位置优势,通过产业转移将高污染、高能耗的产业转向周边经济基础相对薄弱地区,这种产业转移所产生的技术溢出效应存在高能耗特性,不利于周边地区碳减排目标的实现。

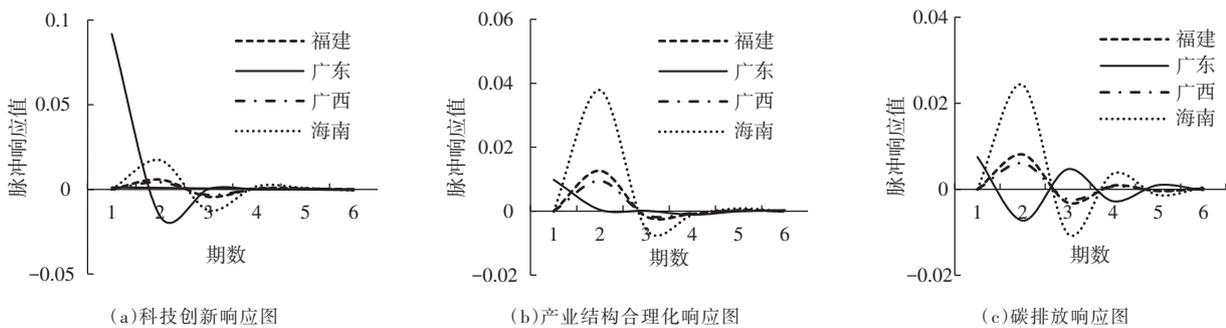


图 2 模型 1 冲击源广东科技创新:样本地区相关变量的响应图

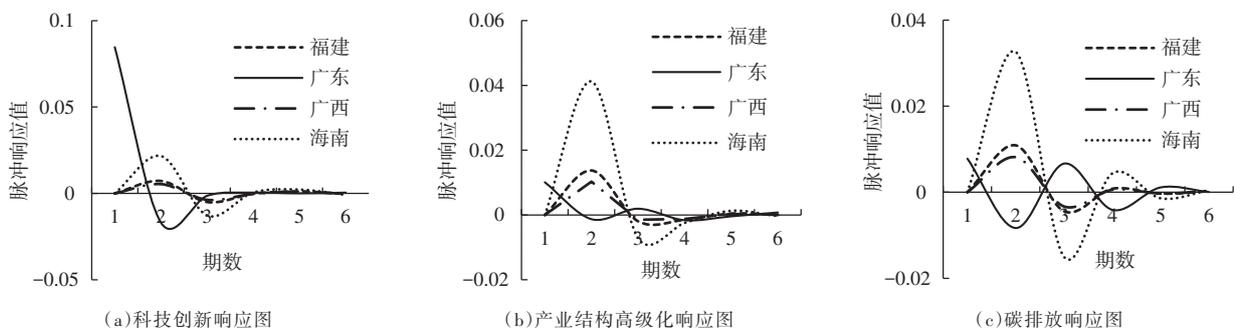


图 3 模型 2 冲击源广东科技创新:样本地区相关变量的响应图

## 2. 产业结构升级的冲击影响

从图4和图5可以看出,在江苏地区产业结构合理化和产业结构高级化一个正向标准差的冲击下,上海、江苏、浙江和山东地区的科技创新、产业结构升级和碳排放均产生了不同的响应路径,响应幅度由大到小依次为江苏、上海、山东、浙江,表现出区域异质性。具体而言:①从图4(a)和图5(a)可以看出,在江苏地区产业结构合理化和产业结构高级化一个正向标准差的冲击下,江苏、上海、山东和浙江地区都是滞后一期表现出显著的负向响应(模型1中和模型2中的最小响应值分别为-0.0130、-0.0030、-0.0019、-0.0015和-0.0087、-0.0066、-0.0033、-0.0026),在第3期则表现出正向响应,并且负向效应显著大于正向效应,该影响在第5期基本收敛趋于零。两个模型的结果均表明,江苏地区的产业结构合理化和产业结构高级化都对本地和邻近地区的科技创新产生不同程度的时间滞后性的抑制作用。该结果还表明,产业结构高级化对邻近地区科技创新的负向效应大于产业结构合理化的负向效应。由于产业结构升级在一定程度上存在路径依赖性,因此表现出时间滞后性。同时,与其他发达国家相比,我国正处于产业结构以第一产业向第二产业转移为主的初级阶段,产业结构向第二产业升级比向第三产业升级更有利于推动科技创新。因此,以产业服务化为主要测度指标的产业结构升级将导致产业结构升级速度与科技创新速度不匹配,进而对科技创新产生短暂的抑制作用,验证了假设H1b。②从图4(b)和图5(b)可以看出,在江苏地区产业结构合理化和产业结构高级化一个正向标准差的冲击下,江苏地区自身在第1期达到最大正向响应值,分别为0.0615和0.0551,而上海、浙江和山东地区的产业结构合理化和产业结构高级化均表现出较弱的负向效应,模型1中和模型2中的最大负向响应幅度分别为-0.0030、-0.0014、-0.0015和-0.0028、-0.0017、-0.0014。结果表明,产业结构合理化和产业结构高级化都具有正向自强化效应,但是对邻近地区产生较弱的负向溢出影响。③从图4(c)和图5(c)可以看出,在江苏地区产业结构合理化和产业结构高级化一个正向标准差的冲击下,上海、山东和浙江地区的碳排放均表现出负向响应,且模型1中和模型2中的最小响应值分别为-0.0023、-0.0012、-0.0009和-0.0031、-0.0016、-0.0013。而江苏地区产业结构合理化和产业结构高级化的正向冲击,对本地区碳排放的脉冲响应最大值和最小值分别为0.0118、-0.0006(模型1)和0.0117、-0.0014(模型2)。该结果表明,江苏地区产业结构合理化和产业结构高级化有助于减少周边邻近地区的二氧化碳排放,但不利于自身的碳减排,验证了假设H3a,并且产业结构高级化的碳减排效应比产业结构合理化的碳减排效应更加显著。同时,结合图2(c)和图3(c)的结果可知,产业结构升级对碳减排的效应高于科技创新对碳减排的效应。

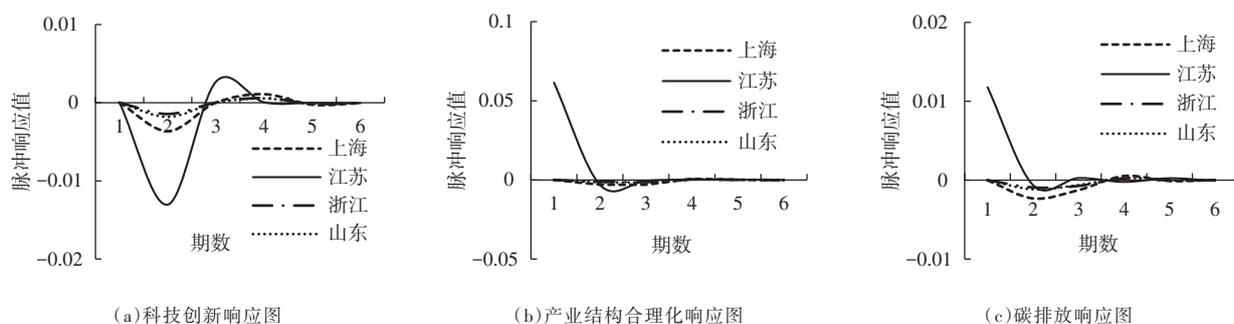


图4 模型1冲击源江苏产业结构合理化:样本地区相关变量的响应图

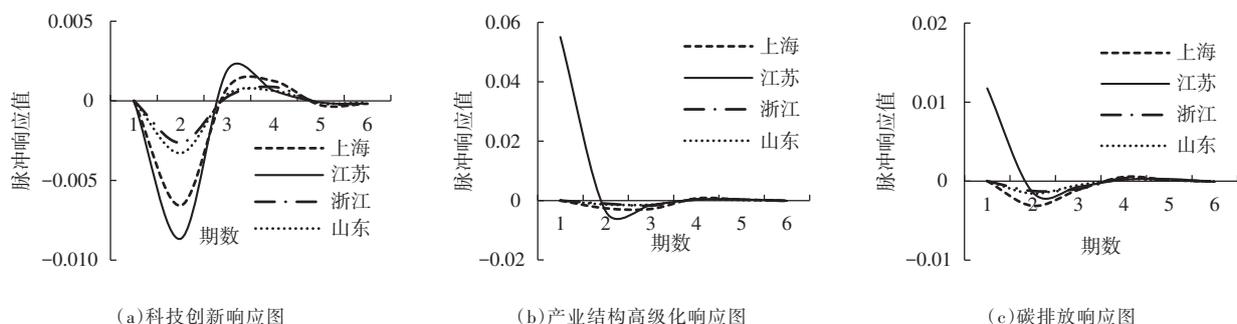


图5 模型2冲击源江苏产业结构高级化:样本地区相关变量的响应图

### 3. 碳排放的冲击影响

从图 6 和图 7 可以看出,在河北地区碳排放一个正向标准差的冲击下,北京、天津和辽宁地区的科技创新、产业结构升级和碳排放均产生了不同的响应路径。具体而言:①从图 6(a)和图 7(a)可以看出,在河北地区碳排放一个正向标准差的冲击下,北京、天津和辽宁地区的科技创新响应值均在第 2 期达到最小值(模型 1 和模型 2 的最小响应值分别为-0.0117、-0.0117、-0.0078 和-0.0138、-0.0138、-0.0092),之后呈现正向收敛趋势,而河北自身的科技创新响应值在第 3 期达到最小值(-0.0060 和-0.0065),该影响在第 6 期基本收敛趋于零。结果表明,河北地区二氧化碳排放强度的上升抑制了本地和邻近地区的科技创新发展,验证了假设 H2b 中的“成本效应”。该结果还表明,河北地区二氧化碳排放强度的上升对邻近地区科技创新的负向效应大于对本地科技创新的负向影响,存在显著的空间负向溢出效应。②从图 6(b)和图 7(b)可以看出,在河北地区碳排放一个正向标准差的冲击下,河北地区产业结构合理化和产业结构高级化的响应值均在第 2 期达到最大值(0.0143 和 0.0133),在第 3 期达到最小值(-0.0063 和-0.0073),总体上表现出正向收敛特征。而北京、天津和辽宁地区的产业结构合理化和产业结构高级化的最大响应值(0.0008、0.0008、0.0007 和 0.0016、0.0016、0.0011)和最小响应值(-0.0016、-0.0016、-0.0013 和-0.0027、-0.0027、-0.0018),总体上表现出负向收敛特征。该结果表明,河北地区二氧化碳排放强度的上升对本地区的产业结构合理化和产业结构高级化的促进作用显著,但是在不同程度上抑制了邻近地区的产业结构合理化和产业结构高级化,且抑制作用微弱,验证了假设 H3b。结合图 6(a)和图 7(a)还可以发现,河北地区碳排放对邻近地区科技创新的负向效应大于对产业结构合理化和产业结构高级化的负向效应,而河北地区碳排放,有利于本地产业结构合理化和产业结构高级化,抑制本地科技创新发展。③从图 6(c)和图 7(c)可以看出,在河北地区碳排放一个正向标准差的冲击下,北京、天津和辽宁地区的碳排放均在第 2 期达到最大响应值(0.0593、0.0593、0.0395 和 0.0101、0.0101、0.0067),而河北本地的碳排放在第 1 期达到最大响应值(0.4618 和 0.0689),在第 2 期达到最小响应值(-0.1601 和-0.0102),且正向冲击效应大于负向冲击效应。该结果表明,河北地区二氧化碳排放的正向冲击具有正向强化效应和显著的正向空间溢出效应,且模型 1 的响应幅度显著高于模型 2。

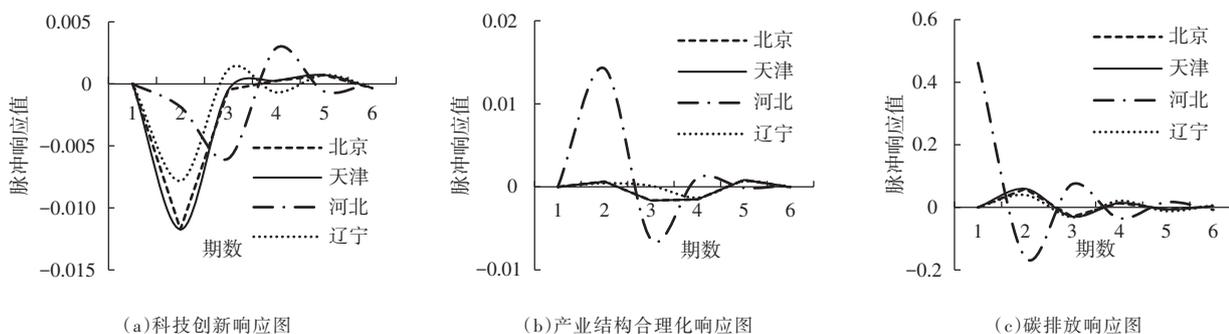


图 6 模型 1 冲击源河北碳排放:样本地区相关变量的响应图

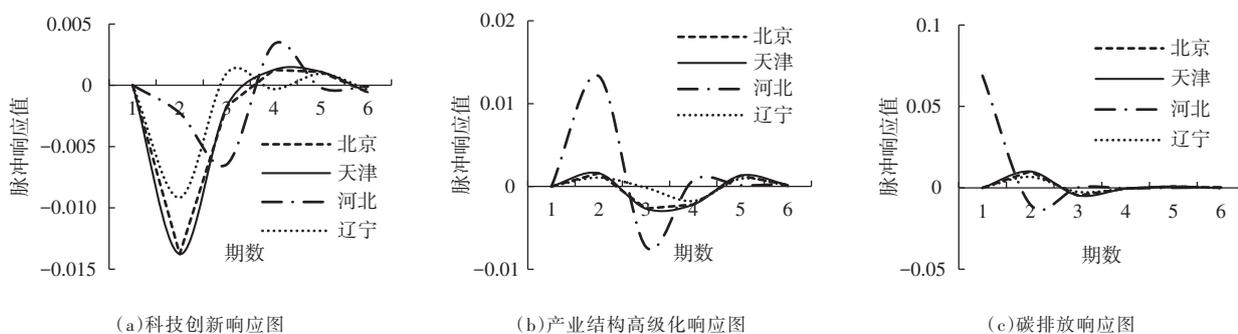


图 7 模型 2 冲击源河北碳排放:样本地区相关变量的响应图

### (四) 环境规制的效应分析

半参数部分通过导数散点图直观的分析环境规制对三个内生变量的具体影响程度。在图 8 和图 9 中,横轴表示环境规制( $\ln ER$ ),数值越大表明环境规制力度越大,纵轴表示各内生变量的导数值,表明环境规制变

化一个单位对各内生变量的影响幅度。总体来看,环境规制对科技创新、产业结构合理化和产业结构高级化、碳排放都存在显著的非线性影响,证实了在模型中加入非参数项的合理性和必要性。

### 1. 环境规制对科技创新的影响

从图8(a)可以看出,模型1中的环境规制对科技创新呈现“M”形波动影响,且影响效应大部分为正,表明环境规制对科技创新的促进作用存在正向波动性。从图9(a)可以看出,模型2中的环境规制对科技创新的影响呈现三个阶段特点,首先呈现快速上升趋势,随后保持平稳上升趋势,最后呈现波动式下降趋势,并且影响效应大部分为正。

### 2. 环境规制对产业结构升级的影响

从图8(b)和图9(b)可以看出,环境规制对产业结构合理化和产业结构高级化的影响路径基本一致,总体上呈现“U”形波动趋势,先呈现快速下降趋势,随后保持波动式缓慢上升趋势,且影响效应大部分为正。

### 3. 环境规制对碳排放的影响

从图8(c)和图9(c)可以看出,环境规制对碳排放的影响路径与对产业结构升级的影响路径相似,总体上也呈现“U”形波动趋势。该结果表明,随着环境规制力度的增加,有利于减少二氧化碳排放,但是当环境规制力度增加到一定程度,不利于碳减排目标的实现。

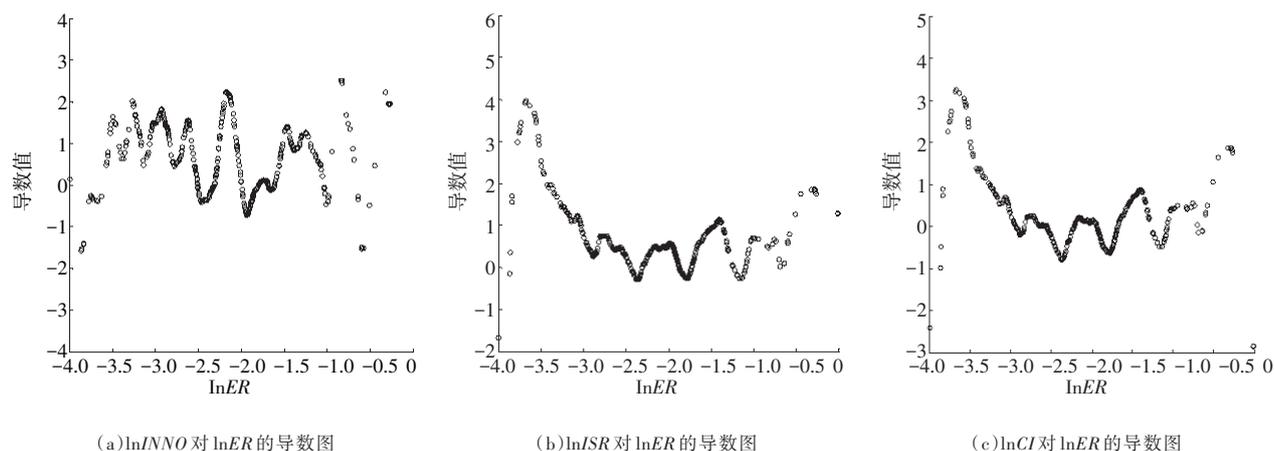


图8 模型1中各变量对 $\ln ER$ 的导数散点图

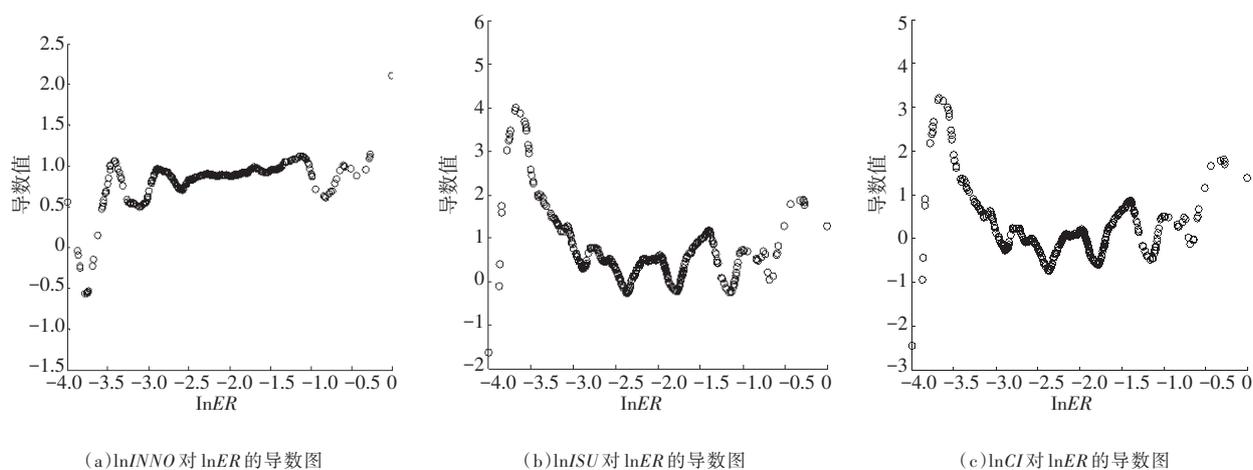


图9 模型2中各变量对 $\ln ER$ 的导数散点图

## 五、结论与建议

### (一) 主要结论

本文基于三者影响机制的分析,以2004—2019年中国30个省(市、自治区)(因数据缺失,未包括西藏和

港澳台地区)的面板数据为样本构建半参数空间面板向量自回归模型(SSPVAR),对科技创新、产业结构合理化和产业结构高级化、碳排放之间的双向空间传导效应进行了实证研究,并将环境规制作为外生变量的半参数项刻画其与三个内生变量的非线性关系。主要结论如下:

(1)科技创新、产业结构升级和碳排放之间存在时空互动关系,即时间滞后效应和空间传递效应。科技创新、产业结构合理化和产业结构高级化、碳排放自身都具有较强的正向自强化效应,科技创新和碳排放均存在显著的正向空间溢出效应,而产业结构合理化和产业结构高级化存在负向空间溢出效应。

(2)科技创新和产业结构升级只存在单向促进关系。科技创新促进本地和邻地产业结构合理化和产业结构高级化,但是产业结构合理化和产业结构高级化均抑制了本地和邻地的科技创新发展。

(3)科技创新和产业结构升级对碳减排的效应存在区域异质性。科技创新有利于本地碳减排,但增加了邻地的二氧化碳排放强度;产业结构合理化和产业结构高级化有利于邻地碳减排,但增加了本地的二氧化碳排放强度,且产业结构高级化的碳减排效应比产业结构合理化更显著。产业结构升级的碳减排效应高于科技创新的碳减排效应。

(4)环境规制对科技创新、产业结构升级、碳排放都存在显著的非线性影响。在环境规制政策实施的初级阶段,随着环境规制力度的增加,有利于减少二氧化碳排放,但是当环境规制力度增加到一定程度,不利于碳减排目标的实现。

## (二)对策建议

基于上述结论,提出以下对策建议:

(1)完善区域间的科技交流和共享机制,构建区域协调发展的科技创新体系。加大区域间技术合作,特别是碳减排和清洁能源领域的技术交流合作,通过发挥发达地区的带动效应,进一步扩大科技创新的正向溢出影响和碳减排效应,减少区域间的技术溢出壁垒和技术转移门槛,增强技术溢出的消化吸收和再创新能力。

(2)增强区域间产业结构合理化和产业结构高级化的协同减排效应,探索产业碳减排协同发展机制。一方面,要加大产业技术创新投入力度,尤其是低碳和节能关键核心技术,促进产业绿色低碳发展;另一方面,要推动区域产业融合发展,通过产业的内部循环减少二氧化碳排放,还可以通过产业间的合作提高资源的利用效率。

(3)采取分阶段的环境规制力度,推动区域环境联合治理。由于环境规制对科技创新、产业结构升级和碳排放都存在显著的非线性影响。因此在制定环境规制政策时,应根据区域科技创新、产业结构升级和碳排放所处的不同发展阶段,因地制宜采取合理的环境规制治理力度。考虑到碳排放的空间溢出效应,应增强区域间的协同治理能力,促进区域环境的良性循环。

## 参考文献

- [1] 陈堂,陈光,2020.科技创新对产业结构升级的空间外溢效应研究——基于省域空间面板模型的分析[J].云南财经大学学报,36(1):21-31.
- [2] 丁涵,史璐丽,杨丽华,2022.创新投入、产业结构升级与碳排放的关系研究——基于长江经济带省域的实证分析[J].中国国土资源经济,35(4):73-80.
- [3] 干春晖,郑若谷,余典范,2011.中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J].经济研究,46(5):4-16,31.
- [4] 龚梦琪,刘海云,2020.中国双向FDI协调发展、产业结构演进与环境污染[J].国际贸易问题,(2):110-124.
- [5] 郭朝先,2012.产业结构变动对中国碳排放的影响[J].中国人口·资源与环境,22(7):15-20.
- [6] 李巍,郝永勤,2017.创新驱动低碳发展了吗?——基础异质和环境规制双重视角下的实证研究[J].科学与科学技术管理,38(5):14-26.
- [7] 李政,杨思莹,2017.科技创新、产业升级与经济增长:互动机理与实证检验[J].吉林大学社会科学学报,57(3):41-52,204-205.
- [8] 刘志华,徐军委,张彩虹,2022.科技创新、产业结构升级与碳排放效率——基于省际面板数据的PVAR分析[J].自然资源学报,37(2):508-520.
- [9] 路正南,罗雨森,2021.空间溢出、双向FDI与二氧化碳排放强度[J].技术经济,40(6):102-111.
- [10] 马艳艳,逮雅雯,孙玉涛,2016.技术进步、结构调整与碳排放强度——基于中国省区层面空间面板数据模型的实证[J].研究与发展管理,28(5):23-33.
- [11] 孟浩,张美莎,2021.环境污染、技术创新强度与产业结构转型升级[J].当代经济科学,43(4):65-76.
- [12] 孙丽文,李翼凡,任相伟,2020.产业结构升级、技术创新与碳排放——一个有调节的中介模型[J].技术经济,39

- (6): 1-9.
- [13] 陶静, 胡雪萍, 2019. 环境规制对中国经济增长质量的影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 29(6): 85-96.
- [14] 陶长琪, 彭永樟, 琚泽霞, 2015. 经济增长、产业结构与碳排放关系的实证分析——基于PVAR模型[J]. 经济经纬, 32(4): 126-131.
- [15] 涂建军, 姜莉, 徐桂萍, 等, 2021. 长三角城市群科技创新、产业结构升级与新型城镇化的交互影响[J]. 城市发展研究, 28(12): 1-11.
- [16] 王慧艳, 李新运, 徐银良, 等, 2019. 科技创新与产业升级互动关系研究——基于双向贡献率的测算[J]. 统计与信息论坛, 34(11): 75-81.
- [17] 王鑫静, 程钰, 丁立, 等, 2019. “一带一路”沿线国家科技创新对碳排放效率的影响机制研究[J]. 软科学, 33(6): 72-78.
- [18] 吴茵茵, 齐杰, 鲜琴, 等, 2021. 中国碳市场的碳减排效应研究——基于市场机制与行政干预的协同作用视角[J]. 中国工业经济, (8): 114-132.
- [19] 夏业领, 何刚, 2018. 中国科技创新-产业升级协同度综合测度[J]. 科技管理研究, 38(8): 27-33.
- [20] 杨筱茜, 蔡林美, 张金锁, 2022. 空间视角下金融创新、产业结构升级与碳排放的关系研究[J]. 西安科技大学学报, 42(4): 791-799.
- [21] 叶阿忠, 郑万吉, 2016. 经济增长、FDI与环境污染的时空传导效应研究——基于半参数空间面板VAR模型的分析[J]. 软科学, 30(1): 17-21.
- [22] 尹迎港, 常向东, 2021. 科技创新、产业结构升级与区域碳排放强度——基于空间计量模型的实证分析[J]. 金融与经济, (12): 40-51.
- [23] 于斌斌, 2015. 产业结构调整与生产率提升的经济增长效应——基于中国城市动态空间面板模型的分析[J]. 中国工业经济, (12): 83-98.
- [24] 张翔祥, 邓荣荣, 2021. 中部六省碳排放效率与产业结构优化的耦合协调度及影响因素分析[J]. 生态经济, 37(3): 31-37.
- [25] 张兵兵, 朱晶, 全晓云, 2017. 技术进步与二氧化碳排放强度: 理论与实证分析[J]. 科研管理, 38(12): 41-48.
- [26] 赵庆, 2018. 产业结构优化升级能否促进技术创新效率?[J]. 科学学研究, 36(2): 239-248.
- [27] 钟茂初, 李梦洁, 杜威剑, 2015. 环境规制能否倒逼产业结构调整——基于中国省际面板数据的实证检验[J]. 中国人口·资源与环境, 25(8): 107-115.
- [28] LUCCHESI M, 2011. Innovation, demand and structural change in Europe[R]. Urbino: University of Urbino Carlo Bo, WP-EMS Working Paper.
- [29] THOMAS L, 2016. Managing innovation & technology in the process industries: Current practices and future perspectives [J]. Procedia Engineering, 138: 459-471.

## The Transmission Effect of Technological Innovation, Industrial Structure Upgrading and Carbon Emissions: Based on the Semi-parametric Space Panel Vector Autoregression Model

Ye Juanhui<sup>1</sup>, Ye Azhong<sup>2</sup>

(1. Fuzhou Academy of Social Sciences, Fuzhou 350007, China;

(2. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** In order to achieve the carbon reduction target and carbon neutrality vision, based on panel data from 30 provinces and cities in China (Due to the lack of data, the statistical data mentioned here do not include Hong Kong Special Administrative Region, Macao Special Administrative Region and Taiwan Province.), building the semi-parametric space panel vector autoregression model (SSPVAR), using the impulse response function and derivative scatterplot empirical analysis on the bidirectional spatial conduction effect among technological innovation, the rationalization of industrial structure and advanced industrial structure, carbon emissions, and the nonlinear effects of environmental regulation. The results show that firstly there are time lag effects and spatial transfer effects among technological innovation, industrial structure upgrading and carbon emissions. Technological innovation and carbon emission have significant positive self-reinforcing effect and positive spatial spillover effect, while rationalization of industrial structure and upgrading of industrial structure have negative spatial spillover effect. Secondly, technological innovation promotes the rationalization and upgrading of local and neighboring industrial structure, but both the rationalization and upgrading of industrial structure have different degrees of time lag inhibition on local and neighboring technological innovation. Thirdly technological innovation reduces local carbon dioxide emissions, but is not conducive to neighboring carbon reduction. The rationalization of industrial structure and the upgrading of industrial structure are beneficial to the carbon emission reduction of neighboring areas, but increase the local carbon dioxide emission, and the upgrading of industrial structure has a more significant carbon emission reduction effect than the rationalization of industrial structure. Finally, environmental regulation has a significant nonlinear impact on technological innovation, industrial structure upgrading and carbon emissions.

**Keywords:** technological innovation; rationalization of industrial structure; advanced industrial structure; carbon emissions