

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

刘志华¹, 徐军委², 张彩虹¹

(1. 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083; 2. 中国劳动关系学院经济管理学院, 北京 100048)

摘要: 基于PVAR模型, 以我国30个省(市、自治区)2010—2018年数据为例, 从全国和东中西区域层面分析科技创新、产业结构升级与碳排放效率的动态关系。结果表明: (1) 从全国层面看, 科技创新、产业结构升级与碳排放效率自身具有较强的协调性且相互间能够产生正向的促进作用。(2) 从区域内部来看, 自东向西, 科技创新、产业结构升级与碳排放效率的协调程度逐步递减。东部地区基本实现了三个变量的协调发展, 中部地区产业结构升级与碳排放效率尚未形成双向互动关系, 碳排放效率对产业结构升级提升的推动力不足; 西部地区科技创新水平偏低, 产业结构不合理、碳排放效率较低, 三者均未形成良性互动。

关键词: 科技创新; 产业结构升级; 碳排放效率; PVAR模型

环境问题是21世纪全球面临的重大挑战, 中国作为世界碳排放量最多的国家, 减排压力尤为严峻。中国政府已经多次表明碳减排的决心和立场, 2009年哥本哈根气候大会上承诺到2020年碳排放强度比2005年下降40%~45%; 2014年巴黎气候大会上提出“到2030年碳排放达到峰值, 较2005年下降60%~65%的目标”; 2020年9月在75届联合国大会上又提出了二氧化碳排放要力争在2030年前达峰和在2060年前实现碳中和等目标。党的十九大报告指出, 科技创新与产业结构升级已经成为我国碳减排的主要驱动力量, 二者既是实现碳减排目标与发展低碳经济的决定因素, 也是实现我国经济高质量发展的内在要求, 而碳排放效率的提升也在不同程度倒逼政府与企业进行科技创新与产业结构升级转型。中国作为最大的发展中国家, 一直十分重视科技创新与产业结构的转型升级问题, 世界知识产权组织发布的《2020年全球创新指数(GII)报告》显示, 我国的全球创新指数排名已经由2012年第34位跃升至2019年第14位。根据第四次全国经济普查的结果, 我国二三产业占GDP的比例已经高达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, 而且已成为制约我国经济发展与碳减排的瓶颈因素。在此背景下, 厘清科技创新、产业结构升级与碳排放效率之间的逻辑关系, 探索其内在影响机制, 对于实现2030年减排目标, 促进国民经济高质量发展具有重要意义。

1 文献综述

科技创新、产业结构升级与碳排放效率已经成为国内外学者研究的热门话题。对于

收稿日期: 2020-11-09; 修订日期: 2021-05-10

基金项目: 北京市社会科学基金项目(19GLB015)

作者简介: 刘志华(1988-), 女, 山西平定人, 博士研究生, 研究方向为碳生态补偿、林业经济理论与政策。

E-mail: liuzhihua268@126.com

通讯作者: 张彩虹(1965-), 女, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 研究方向为林业经济与生物质能源发展。

E-mail: rainbow_zhang2008@163.com

科技创新与产业结构升级关系的研究,已有文献主要集中在以下两方面:一方面认为科技创新对产业结构升级具有单向推动作用。通过提升行业生产率可以有效推动产业结构整体的优化升级^[1,2],此外科技创新对产业结构升级具有显著的空间溢出效应,增加科技创新投入对本地及相邻地区的产业结构升级都会带来显著影响^[3]。另一方面认为科技创新与产业结构优化具有双向互动作用。通过构建面板模型对二者的双向互动关系进行了研究,认为二者间存在相互作用的良性互动关系^[4]且地区差异显著,具体表现为东部地区互动关系较为明显,而中西部地区的互动关系有待进一步疏通^[5]。

就科技创新与碳排放效率而言,主要探究了二者的互动作用。从科技创新对碳排放效率的作用来看,有的学者认为科技创新可以促进碳排放,其原因在于科技创新可以有效促进清洁能源取代传统能源,从而降低碳排放成本,减少碳排放量^[6,7];有的则认为科技创新带动经济增长带来的碳排放效应要高于其自身的碳减排效应,因此科技创新在一定程度上会带来更多碳排放^[8];还有学者^[9]认为“回弹效应”导致产出水平、碳排放量和能源消耗都在大幅增加,因而并不能确定科技创新与碳排放效率的关系。从科技创新对碳排放效率的影响来看,通过构建面板向量自回归、误差修正等面板回归模型,学者们分别从全球视角、国家视角和省域视角对二者关系进行了实证研究,认为在不同情形下,科技创新投入对碳排放效率的提升具有促进或抑制作用^[10-12]。

关于产业结构与碳排放的研讨较多:一是基于面板向量自回归模型对二者的互动关系进行研究,认为碳排放强度与第三产业占GDP比例呈负相关^[13],与第二产业的增加值呈正相关^[14]。此外,产业结构升级对碳排放的影响具有显著的区域差异,在全国和东部地区可以抑制碳排放,而在中西部地区却增加了碳排放^[15]。二是从耦合视角研究二者的关系。从全国层面来看,各省市产业结构水平与碳排放效率的耦合水平较低,碳排放效率远高于其产业结构升级水平^[16];从区域层面来看,二者的耦合水平较高,处于中度耦合阶段^[17]。三是认为产业结构通过影响能源消费总量与能源强度进而对碳排放总量带来间接影响。因此,不同地区产业结构水平的差异导致其碳排放效率各不相同^[18,19]。

综上所述可以看出,国内外学者对科技创新、产业结构升级与碳排放效率的关系进行了比较成熟的研究,但仍然有许多问题值得进一步探讨。首先,现有文献大部分都是对科技创新、产业结构升级与碳排放效率中的两两关系进行研究,缺少将三者纳入同一个框架探究其相互关系的研究成果;其次,大多数文献采用时间序列数据或者普通的面板回归模型,没有充分考虑变量的内生性问题;最后,在确定评价指标时,多以科技创新投入来表示科技创新水平,具有一定的片面性。因此,本文以2010—2018年省际面板数据为基础,建立面板向量自回归(PVAR)模型,并构建科技创新评价指标体系,重新界定各省(市、自治区)科技创新水平,在此基础上研究科技创新、产业结构升级与碳排放效率三者的动态关系及其区域异质性。

2 研究方法与数据来源

2.1 模型构建

相关研究^[20-22]表明,科技创新、产业结构升级与碳排放效率之间存在复杂动态关系,并且可能存在滞后效应,导致采用POOL模型回归会带来内生性与序列相关问题。而面板向量自回归(PVAR)模型的优势就是允许所有变量内生并反映多个变量的动态影响关

系,不仅能够考虑到每个个体的差异,在模型中引入变量滞后项也可以有效解决变量内生性问题。鉴于此,选取PVAR模型研究科技创新、产业结构升级与碳排放效率之间的动态关系,具体如下:

$$Y_{it}=a_0+\sum_{j=1}^na_jY_{i,t-j}+\beta_i+\gamma_i+\varepsilon_{it}$$

(1)

式中: Y_{it} 是一个 1×3 阶的列向量,包含科技创新水平 ($INNO$)、产业结构升级水平 (IS) 和碳排放效率 (CEF) 三个内生变量; a_0 为截距项; j 为滞后阶数; a_j 为滞后 j 阶的参数矩阵; β_i 为个体固定效应; γ_i 为个体时点效应; ε_{it} 为随机扰动项。

2.2 变量选择

本文涉及科技创新水平、产业结构升级水平与碳排放效率三个变量:

(1) 科技创新水平 ($INNO$)

在已有研究^[23,24]的基础上利用熵权法^[25]从创新投入、产出与环境三方面(表1)来测度各省(市、自治区)科技创新水平。其中,创新投入主要指科技创新活动过程中投入的R&D人员、R&D经费及开展科研协作的企业等要素;创新产出的表现形式主要有专利发明、科技论文及其他科技产出等;创新环境主要指科技创新活动依赖的外部条件。

表1 我国省域科技创新水平评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of provincial science and technology innovation index in China

一级指标	二级指标	三级指标	单位	指标权重
科技创新	创新投入	R&D人员全时当量	人	0.0651
		R&D经费投入强度	%	0.0403
		科学研究和技术服务业新增固定资产占全社会新增固定资产比例	%	0.0817
		R&D项目(课题)数	项	0.0895
	创新产出	国内三种专利申请授权数	件	0.0930
		高新技术企业新产品开发项目数	个	0.1017
		国外主要检索工具收录我国科技论文数	篇	0.0672
		技术市场成交额	亿元	0.1389
	创新环境	研究与开发机构数量	个	0.0278
		互联网普及率	%	0.0151
		地方财政科技拨款占财政总支出比例	%	0.1015
		高技术产业企业数量	个	0.0914
		规模以上工业企业R&D经费内部支出额中获得金融机构贷款额	万元	0.0868

(2) 产业结构升级水平 (IS)

对于产业结构升级水平的测度,本文借鉴于春晖等^[26]、郭彬等^[27]的研究成果,运用熵权法从产业结构的合理化、高级化与高效化三方面构建评价指标体系(表2)来衡量。其中,产业结构合理化重点衡量各产业的协调发展程度,产业结构高级化重点关注产业结构从低级向高级演进的过程,而产业结构高效化则更加关注产业发展的效率,认为随着经济的不断发展高效率产业的占比应逐步提升。

上述指标中,除了泰尔指数外,其他指标都可以通过统计年鉴计算得来。本文参考于春晖等^[26]的研究,运用泰尔指数来度量产业结构合理化水平:

表2 我国省域产业结构升级水平评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of provincial industrial structure upgrading index in China

一级指标	二级指标	三级指标	单位	指标权重
产业结构升级	产业结构合理化	泰尔指数	/	0.1326
		高新技术产业占GDP比例	%	0.1564
	产业结构高级化	第二三产业产值占GDP比例	%	0.1144
		第二产业投入产出比	/	0.0846
		第三产业投入产出比	/	0.1870
		第二产业人均产值	亿元/万人	0.1488
	产业结构高效化	第三产业人均产值	亿元/万人	0.1762

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

(2)

式中： TL 为产业结构合理化指数； Y_i 、 L_i 分别代表各省份第*i*个产业的GDP值（亿元）与就业人数（万人）。

(3) 碳排放效率（ CEF ）

构建SBM-DDF模型来计算各省（市、自治区）碳排放效率，以各省（市、自治区）资本、能源、劳动力为投入，GDP为期望产出，CO₂排放量为非期望产出，计算我国30个省（市、自治区）（不包含西藏和港澳台地区）的碳排放效率。其中，资本为各省资本存量，根据张军等^[28]的研究采用永续盘存法计算；劳动力为各省份的年末就业人数，能源为各省份煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气的消费总量（转换为标准煤），期望产出GDP为以2010年为基期的各省份实际GDP，非期望产出通过计算能源消耗、工业生产活动、农业、畜牧业和固体废弃物的CO₂排放量得来。

2.3 数据来源与描述性统计

鉴于数据的可获取性，选用2010—2018年中国30个省（市、自治区）的相关数据，并将其分为东、中、西部三大区域进行研究。所需数据主要来自EPS全球统计数据平台及《中国区域创新能力评价报告》，各个变量的描述统计特征如表3所示。为缓解异方差带来的影响，对科技创新指数、产业结构升级指数与碳排放效率做对数处理。

从表3可以看出，东部地区的科技创新水平最高且高于全国平均水平，其次为中部地区，西部地区的科技创新水平最低；从产业结构升级水平来看，从东到西逐渐递减，东部的产业结构升级水平要高于中部和西部，不难看出我国的产业结构水平发展不均衡，各地区差异比较显著；从碳排放效率来看，东部地区的碳排放效率最高，其次为中西部地区，且东部地区的碳排放效率高于全国平均值，而中西部的碳排放效率要低于全国平均值。

3 结果分析

为了避免伪回归现象，需要进行单位根检验。同时为了确保检验的准确性，采用LLC检验、IPS检验、Fisher-ADF及Fisher-PP检验四种方法同时进行检验，结果表明，科技创新指数（lnINNO）、产业结构升级水平（lnIS）和碳排放效率（lnCEF）这三个变量均为一阶单整，可以构建面板向量自回归（PVAR）模型。

表3 变量描述性统计分析
Table 3 Descriptive statistical analysis of variables

	变量	样本数/个	均值	标准差	最小值	中位数	最大值
全国	<i>INNO</i>	270	0.1064	0.1067	0.0075	0.0700	0.5770
	<i>IS</i>	270	0.0873	0.0890	0.0269	0.0590	0.7666
	<i>CEF</i>	270	0.7642	0.2194	0.5110	0.7172	1.8509
东部	<i>INNO</i>	99	0.1879	0.1362	0.0078	0.1507	0.5770
	<i>IS</i>	99	0.1415	0.1281	0.0385	0.1102	0.7666
	<i>CEF</i>	99	0.9269	0.2715	0.6414	0.8273	1.8509
中部	<i>INNO</i>	72	0.0764	0.0316	0.0344	0.0694	0.1779
	<i>IS</i>	72	0.0560	0.0231	0.0330	0.0516	0.2248
	<i>CEF</i>	72	0.7094	0.0811	0.5646	0.7184	0.8492
西部	<i>INNO</i>	99	0.0468	0.0328	0.0075	0.0352	0.1501
	<i>IS</i>	99	0.0560	0.0168	0.0269	0.0524	0.1228
	<i>CEF</i>	99	0.6413	0.0975	0.5110	0.6098	0.9700

3.1 模型滞后期选择

在进行PVAR估计前，依据连玉君等^[29] Stata 13.0的PVAR2程序包，构建AIC、BIC和HQIC信息准则来确定模型的最优滞后阶数（表4），结果显示三个准则下全国、东部、中部与西部的最优滞后阶数均为1阶，因此构建一阶PVAR模型。

表4 不同准则下模型滞后期选择

Table 4 Selection of model lag period under different criteria				
Area	Lag	AIC	BIC	HQIC
全国	1	-6.8629*	-5.9589*	-6.5066*
	2	-6.2768	-5.2379	-5.8662
	3	-5.8112	-4.6214	-5.3396
东部	1	-6.4896*	-5.6990*	-6.1687*
	2	-6.2539	-5.2482	-5.8454
	3	-6.3093	-5.0662	-5.8042
中部	1	-7.8650*	-7.0985*	-7.5537*
	2	-6.9255	-5.9061	-6.5119
	3	-3.4839	-2.1872	-2.9586
西部	1	-5.7601*	-4.9695*	-5.4392*
	2	-5.0004	-3.9946	-4.5919
	3	-3.9099	-2.6667	-3.4047

注：*表示在该准则下的最优滞后阶数。

3.2 稳健性检验

为了确保后续模型估计、脉冲响应与方差分解的有效性，需要对模型进行稳健性检验，即动态矩阵特征值的模是否小于1（在单位圆内），从图1可以看出，本文构建的PVAR模型是稳健的。

3.3 模型GMM参数估计

在确定最优滞后阶数与单位根检验后，进一步运用Stata 15.0对科技创新、产业结构升级与碳排放效率三个变量进行GMM估计，具体参数如表5所示：

从上述结果可知，当科技创新（lnINNO）为被解释变量时，本年科技创新水平易受到滞后一期科技创新水平高强度的影响。其中，在全国、东部和中部地区均在1%的水平下高度显著，表明这些区域上一期的科技创新水平会对当前科技创新产生正向影响；滞后一期的产业结构升级对科技创新水平存在正向影响，但在西部地区影响不显著；在全国和东、中、西部地区，滞后一期的碳排放效率对科技创新水平均存在显著正向影响。

当产业结构（lnIS）为被解释变量时，其滞后一期的值对当期发展水平具有显著正向影响。这种影响在东部地区较为显著，在中西部地区不显著；滞后一期的科技创新水

平与碳排放效率对当期产业结构升级水平具有正向影响，在全国和东部、中部地区均在 1% 的水平下显著，而这种影响在西部地区不显著。

当碳排放效率（lnCEF）为被解释变量时，滞后一期的碳排放效率对当期碳排放效率产生显著正向影响。从全国范围来看，滞后一期的科技创新对当期碳排放效率提升在 10% 的水平上显著，在其他地区影响不显著；东部地区滞后一期的产业结构升级对当期碳排放效率提升在 10% 的水平上显著，在其他地区产业结构升级对碳排放效率提升没有显著影响。

3.4 脉冲响应分析

GMM 是对模型进行静态分析，为了进一步对科技创新、产业结构升级与碳排放效率的交互关系进行动态分析，本节借助蒙特卡洛方法，通过 200 次模拟得到全国及东部、中部和西部地区滞后十期的脉冲响应图（图 2~图 5），图中横轴表示滞后期数，中间虚线表示给某一冲击变量一个标准差的冲击后响应变量的脉冲响应值。

根据图 2~图 5 的脉冲响应图可以得出以下结论：

第一，科技创新、产业结构升级与碳排放效率面对自身一个标准差的冲击时，均表现出显著的正向影响，表明科技创新、产业结构升级与碳排放效率均有相对的经济惯性。

第二，当碳排放效率面对产业结构升级一个标准差的冲击时，在全国、东部及中部地区当期影响为 0，随后呈现先扩大后缩小的倒“U”型正向影响，表明碳排放效率对产业结构升级的影响具有一定的滞后性，西部地区碳排放效率对产业结构升级的

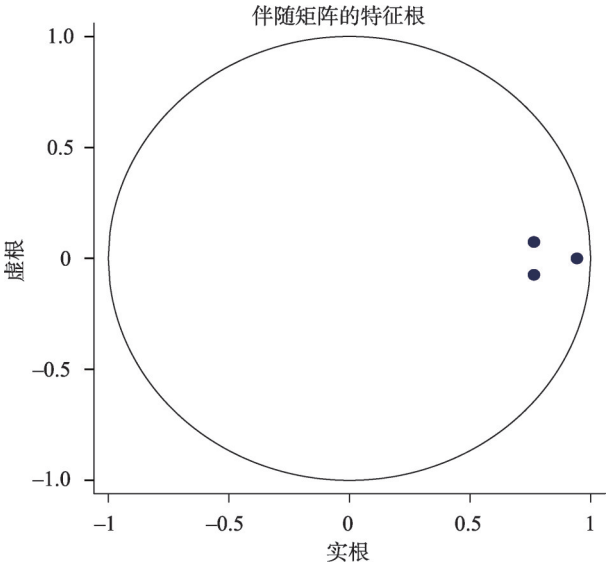


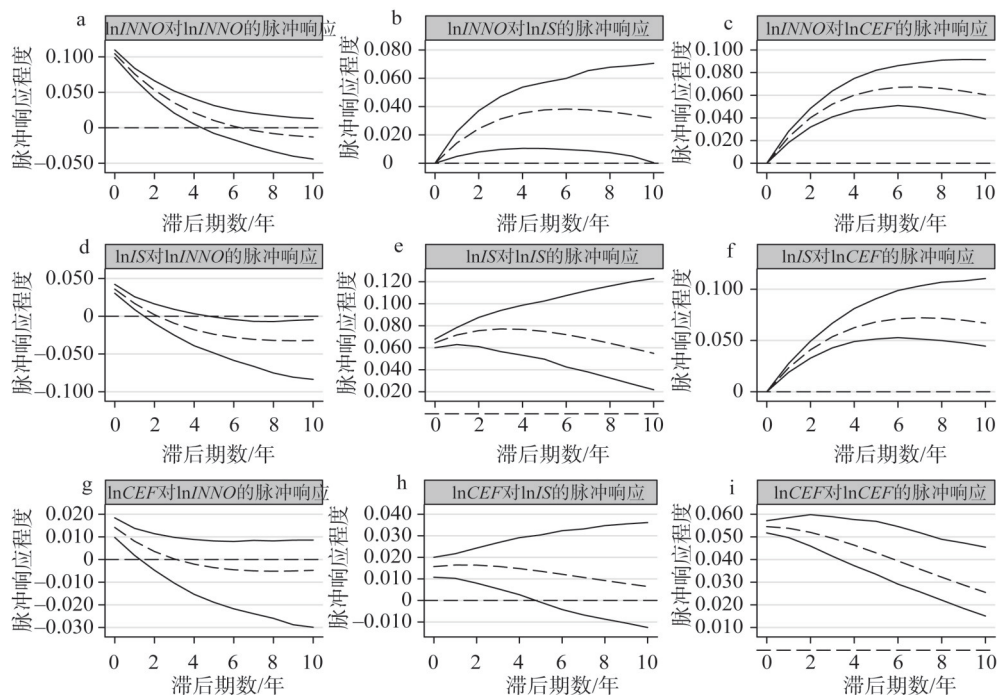
图1 PVAR模型稳健性检验
Fig. 1 Robustness test of PVAR model

表5 PVAR模型GMM估计结果

Table 5 The results of GMM estimation based on PVAR model

变量	区域	lnINNO	lnIS	lnCEF
L. lnINNO	全国	0.6286*** (-8.8339)	0.1183*** (-1.5559)	0.4247*** (-7.1227)
	东部	0.7277*** (-8.9029)	0.1268*** (-1.5348)	0.6025*** (-4.3786)
	中部	0.2468*** (-1.2720)	0.5072*** (-2.5542)	0.6588*** (-4.1325)
	西部	0.0852 (-0.2592)	0.9121 (-2.7161)	0.8082*** (-3.4448)
L. lnIS	全国	0.2424*** (-4.2494)	1.0055*** (-16.0422)	0.4283*** (-9.2186)
	东部	0.1480*** (-2.7887)	1.7763*** (-13.014)	0.5848*** (-6.6336)
	中部	0.0611*** (-1.0257)	0.6001 (-10.254)	0.5972*** (-7.6057)
	西部	0.9385 (-2.7760)	0.7716 (-5.1722)	0.8155 (-3.3404)
L. lnCEF	全国	0.0615* (-1.7881)	0.0148 (-0.4023)	0.9865*** (-25.0555)
	东部	0.0348 (-0.8969)	-0.0794* (-1.7701)	1.0963*** (-11.8905)
	中部	0.0319 (-0.5287)	-0.0782 (-1.2926)	0.9386*** (-11.8641)
	西部	0.2001 (-1.4414)	0.1793 (-1.2998)	1.0325*** (-8.9207)

注：* $p<0.1$ 、** $p<0.05$ 、*** $p<0.01$ ，括号内是该统计量的 t 检验值。



注: 蒙特卡罗法产生的每侧误差为5%, 重复200次。中间虚线为脉冲响应曲线, 虚线上下方的两条曲线分别为95%置信区间的上线和下线, 下同。

图2 全国脉冲响应

Fig. 2 National impulse response chart

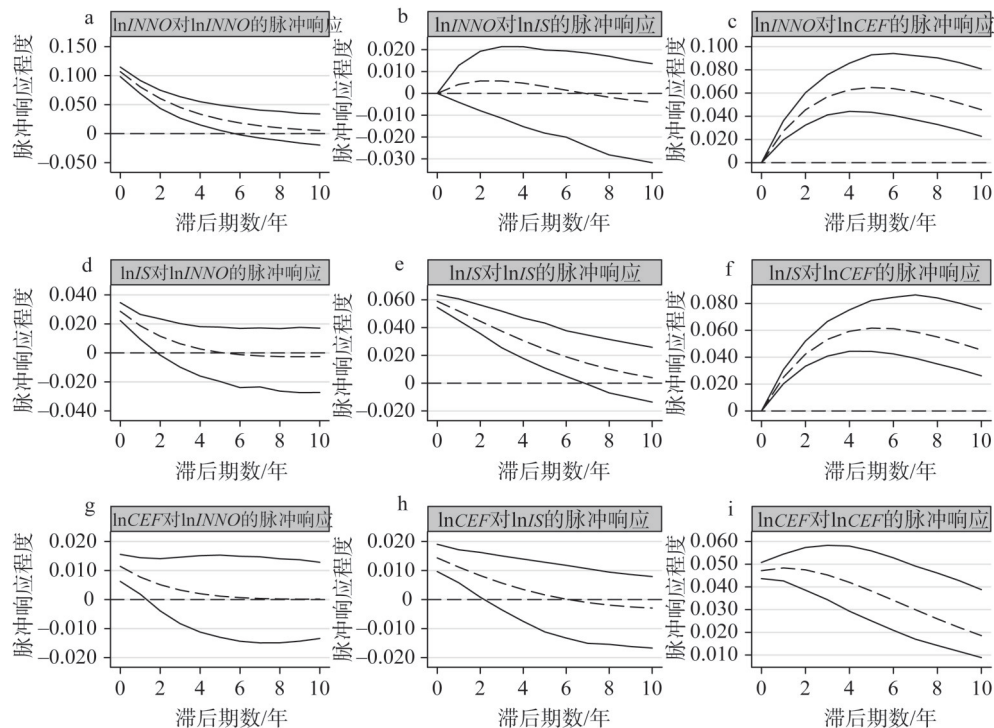


图3 东部地区脉冲响应

Fig. 3 Impulse response of the eastern region of China

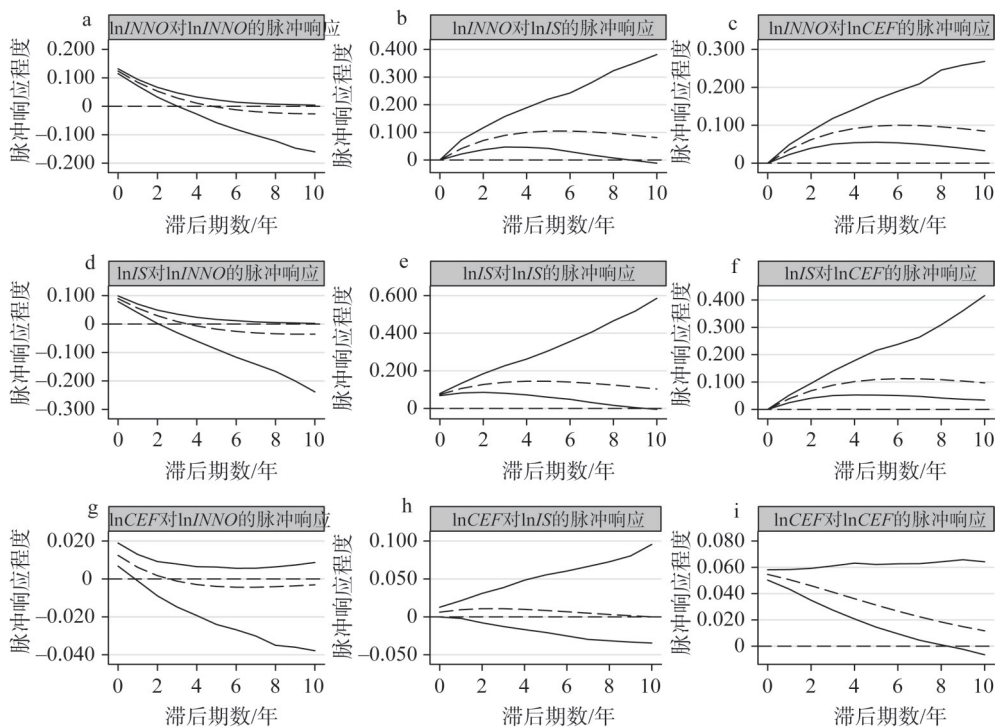


图4 中部地区脉冲响应

Fig. 4 Impulse response of the central region of China

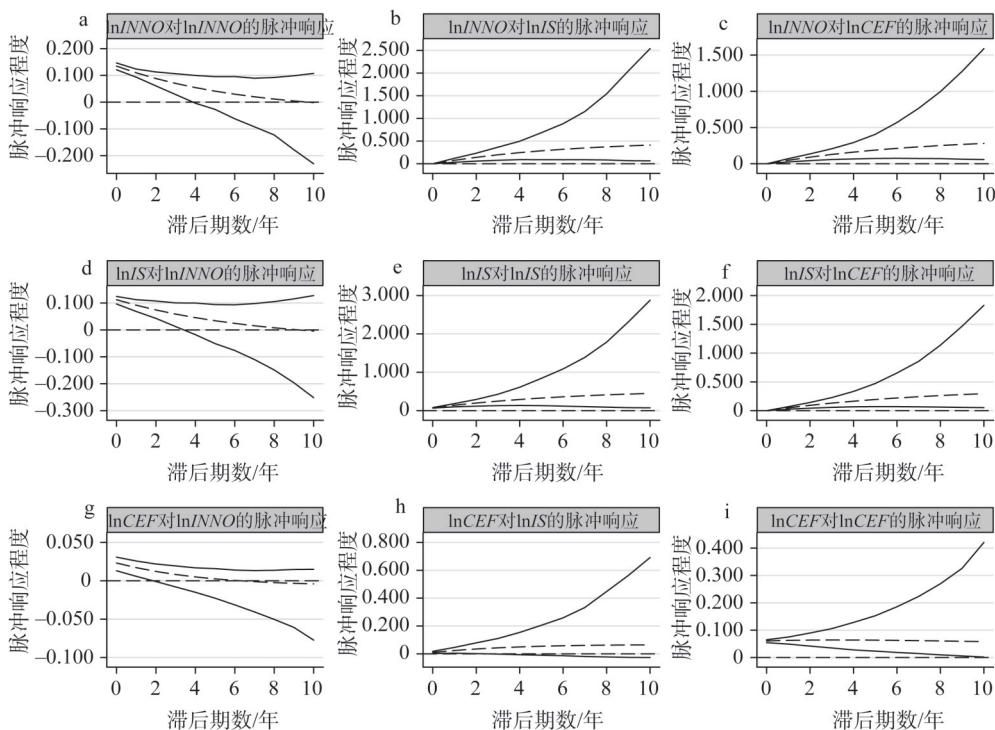


图5 西部地区脉冲响应

Fig. 5 Impulse response of the western region of China

正向影响比较微弱,可能是由于该地区第三产业仍然以高碳排放的传统服务业为主,高新技术产业占比较低,因此短期内产业结构升级不会带来碳排放效率的显著提升。反之,当产业结构升级面对碳排放效率一个标准差的冲击时,在全国和东部地区呈现逐渐减弱的正向影响,在中西部地区影响较为微弱,可能是由于该地区对碳排放效率提升的需求不足,致使其难以发挥对产业结构升级的倒逼作用。因此,从整体来看,碳排放效率与产业结构升级存在长期动态耦合关系,但这种关系在中西部地区有待进一步提升。

第三,当产业结构升级面对科技创新一个标准差的冲击时,在全国及东部、中部地区呈现先扩大后缩小的倒“U”型正向影响,且直到第10期仍然保持较高水平,表明长期来看,科技创新通过提高资源配置效率、催生高新技术企业等有效促进了产业结构升级水平的提升。但在西部地区表现为较为微弱的正向影响,可能是由于西部地区高新技术企业较少、科技人力与财力投入不足,使得科技创新难以发挥对产业结构升级的推动作用。同理,当科技创新面对产业结构升级一个标准差的冲击时,在全国及东、中、西部地区均呈现比较显著的正向影响,且在第2期后逐渐趋向于0,表明短期内产业结构升级的技术需求会刺激科技创新水平的提升,但从长期来看,产业结构升级速度与科技创新速度的不匹配会制约科技创新的发展。因此,科技创新与产业结构升级尚未形成长期良性互动关系,尤其是产业结构升级水平,还有较大的提升空间。

第四,当科技创新面对碳排放效率一个标准差的冲击时,在全国及东、中、西部地区均呈较为显著的正向影响,但这种影响在第2期后逐渐趋向于0,表明短期内碳排放效率可以倒逼科技创新水平的提升。当碳排放效率面对科技创新一个标准差的冲击时,在全国、东部和中部地区呈先扩大后缩小的倒“U”型正向影响,表明通过科技创新可以有效提高能源利用效率并提升碳排放效率,但随着科技创新水平的逐步提升,可能会由于过度重视科技创新的经济效益忽略其环境效益而抑制碳排放效率的提升。这种影响在西部地区影响较为微弱,这与西部地区科技创新投入不足有较大关系。因此,从长期来看,科技创新与碳排放效率的互动关系有待进一步加强。

3.5 方差分解

为进一步评估模型扰动项对内生变量冲击的影响程度及各变量变化过程中不同结构冲击的贡献力度,进一步对PVAR模型进行方差分解(表6),取第10期、第20期和第30期来分析科技创新、产业结构升级与碳排放效率三者相互影响的贡献程度。

就全国而言,科技创新方差贡献率主要受自身的影响,在第30期时仍为57.5%,其次为碳排放效率与产业结构升级水平。东中西部地区的科技创新的方差分解结果与全国相似,在滞后30期时,东部地区科技创新方差贡献率受自身影响为57.3%,中部地区为72.7%,西部地区为66.7%。

就其他变量对产业结构升级的贡献度来看,在滞后20期后基本稳定,全国范围科技创新与碳排放效率对产业结构升级的贡献率基本相同,约在45%左右。东西部地区科技创新对产业结构升级的贡献率不足2.5%,碳排放效率对产业结构升级水平的影响超过了科技创新对其的影响;中部地区科技创新与碳排放效率对产业结构升级的贡献率分别为19.8%与22.4%。

全国碳排放效率的方差贡献率主要来自自身,在滞后30期时高达90%,科技创新与产业结构升级的方差贡献率分别为2%与8%。东部与中部地区的方差分解结果与全国类

似，碳排放效率对自身的方差贡献率分别为89.6与87.7%。西部地区碳排放效率的方差贡献率主要来自自身与产业结构升级，分别为50.4%与48.5%。

4 结论与讨论

本文在梳理已有研究文献的基础上，以2010—2018年中国省级面板数据为基础构建PVAR模型，对全国及东部、中部和西部地区年度科技创新、产业结构升级与碳排放效率之间的互动关系进行了实证研究，具体结论如下：

(1) 从全国层面看，科技创新、产业结构升级与碳排放效率自身具有较强的协调性且相互间能够产生正向的促进作用。但从长期来看，产业结构升级与碳排放效率对科技创新的正向影响会不断减弱并逐渐变为负向影响。

(2) 从区域内部来看，自东向西，科技创新、产业结构升级与碳排放效率的协调程度逐步递减。东部地区基本实现了三个变量的协调发展，中部地区科技创新与碳排放效率相互促进，科技创新对产业结构升级具有正向促进作用，但产业结构升级与碳排放效率尚未形成双向互动关系，碳排放效率对产业结构升级提升的推动力不足；西部地区科技创新水平偏低，产业结构不合理、碳排放效率较低，三者均尚未形成良性互动，协调性有待进一步加强。

基于上述结论，提出政策建议：

(1) 东部地区要进一步发挥创新

表6 PVAR模型方差分解结果

Table 6 Variance decomposition results of PVAR model

响应变量		冲击变量			
		预测期	lnINNO	lnIS	lnCEF
全国	lnINNO	10	0.490	0.160	0.350
	lnINNO	20	0.569	0.166	0.265
	lnINNO	30	0.575	0.164	0.261
	lnIS	10	0.070	0.554	0.376
	lnIS	20	0.094	0.469	0.437
	lnIS	30	0.097	0.459	0.444
	lnCEF	10	0.018	0.084	0.898
	lnCEF	20	0.020	0.079	0.901
	lnCEF	30	0.020	0.080	0.900
东部	lnINNO	10	0.538	0.003	0.458
	lnINNO	20	0.582	0.021	0.396
	lnINNO	30	0.573	0.031	0.395
	lnIS	10	0.024	0.654	0.322
	lnIS	20	0.020	0.723	0.257
	lnIS	30	0.022	0.719	0.259
	lnCEF	10	0.038	0.051	0.911
	lnCEF	20	0.045	0.060	0.896
	lnCEF	30	0.048	0.065	0.887
中部	lnINNO	10	0.750	0.139	0.111
	lnINNO	20	0.732	0.174	0.094
	lnINNO	30	0.727	0.176	0.097
	lnIS	10	0.134	0.654	0.211
	lnIS	20	0.190	0.587	0.223
	lnIS	30	0.198	0.578	0.224
	lnCEF	10	0.043	0.035	0.922
	lnCEF	20	0.067	0.052	0.881
	lnCEF	30	0.070	0.054	0.877
西部	lnINNO	10	0.661	0.045	0.294
	lnINNO	20	0.671	0.013	0.317
	lnINNO	30	0.667	0.009	0.325
	lnIS	10	0.025	0.715	0.260
	lnIS	20	0.008	0.691	0.301
	lnIS	30	0.006	0.679	0.315
	lnCEF	10	0.017	0.377	0.605
	lnCEF	20	0.010	0.485	0.504
	lnCEF	30	0.009	0.524	0.466

引领优势，优化创新环境，提升科技创新投入，加快创新成果转化。在现有产业结构基础上进一步推进新旧动能转化，借助“新基建”契机，推动人工智能、高端装备、生物医药、数字创意等高科技与新兴产业的进一步发展。同时进一步优化能源消费和供给结

构,提升碳排放效率,推动科技创新、产业结构升级与碳排放效率提升深入协调发展。

(2) 中部地区要增加创新投入,构建政府、金融机构、企业、风投等在内的创新投入体系。要加快产业结构升级速度,大力发展低碳绿色产业与高新技术产业,提高产业投入产出效率。同时优化能源消费结构,积极引进先进技术提升碳排放效率,充分发挥碳排放效率对产业结构升级提升的推动作用。

(3) 西部地区要从创新文化、创新政策、创新基础设施等方面进一步加大对科技创新劳动力与资本的投入,完善创新市场与金融支撑体系。改善当地营商环境,承接东部地区产业转移,发展特色产业。通过财税政策、法律保障、市场建设相关机制激发各类创新主体的研发热情,依靠科技创新推动产业向低污染、低能耗与高效率方向发展,推动科技创新、产业结构升级与碳排放效率形成良性互动发展。

参考文献(References):

- [1] VERBANO C, CREMA M. Linking technology innovation strategy, intellectual capital and technology innovation performance in manufacturing SMEs. *Technology Analysis & Strategic Management*, 2016, 28(5): 524-540.
- [2] VARUM C A, CIBRAO B, MORGADO A, et al. R & D, Structural change and productivity: The role of high and medium-high technology industries. *Economia Aplicada*, 2009, 13(4): 399-424.
- [3] 姜海宁, 张文忠, 余建辉, 等. 山西资源型城市创新环境与产业结构转型空间耦合. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 269-283. [JIANG H N, ZHANG W Z, YU J H, et al. Spatial coupling of innovative milieu and industrial structure transformation of resource-based cities in Shanxi province. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 269-283.]
- [4] 王慧艳, 李新运, 徐银良, 等. 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. *统计与信息论坛*, 2019, 34(11): 75-81. [WANG H Y, LI X Y, XU Y L, et al. Research on the interaction between science and technology innovation and industrial upgrading: Based on the calculation of bidirectional contribution rate. *Journal of Statistics and Information*, 2019, 34(11): 75-81.]
- [5] 李政, 杨思莹. 科技创新、产业升级与经济增长: 互动机理与实证检验. *吉林大学社会科学学报*, 2017, 57(3): 41-52, 204-205. [LI Z, YANG S Y. Science and technology innovation, industrial upgrading and economic growth: Interactive mechanism and empirical test. *Jilin University Journal Social Sciences Edition*, 2017, 57(3): 41-52, 204-205.]
- [6] BOSETTI V, CARRARO C, GALEOTTI M, et al. Witch a world induced technical change hybrid model. *Hybrid Modeling*, 2006, 27(2): 13-38.
- [7] GERLAGH R. Measuring the value of induced technological change. *Energy Policy*, 2007, 35(11): 5287-5297.
- [8] 金培振, 张亚斌, 彭星. 技术进步在二氧化碳减排中的双刃效应: 基于中国工业35个行业的经验证据. *科学学研究*, 2014, 32(5): 706-716. [JIN P Z, ZHANG Y B, PENG X. The double-edged effect of technological progress in carbon dioxide emissions reduction: Empirical evidence from 35 sub-industrial sectors in China. *Studies in Science of Science*, 2014, 32(5): 706-716.]
- [9] FISHER V K, WING I S. Accounting for quality: Issues with modeling the impact of R&D on economic growth and carbon emissions in developing economies. *Energy Economics*, 2008, 30(6): 2771-2784.
- [10] 程钰, 孙艺璇, 王鑫静, 等. 全球科技创新对碳生产率的影响与对策研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(9): 30-40. [CHEN Y, SUN Y X, WANG X J, et al. Research on the impact of global scientific and technological innovation on carbon productivity and countermeasures. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(9): 30-40.]
- [11] 王鑫静, 程钰, 丁立, 等. “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. *软科学*, 2019, 33(6): 72-78. [WANG X J, CHEN Y, DING L, et al. Research on the impact mechanism of technological innovation on carbon emission efficiency in countries along the Belt and Road. *Soft Science*, 2019, 33(6): 72-78.]
- [12] 张玉华, 张涛. 改革开放以来科技创新、城镇化与碳排放. *中国科技论坛*, 2019 (4): 28-34, 57. [ZHANG Y H, ZHANG T. Urbanization, technological innovation and carbon emission since the reform and opening up. *Forum on Science and Technology in China*, 2019, (4): 28-34, 57.]
- [13] ZHANG Y J, LIU Z, ZHANG H, et al. The impact of economic growth, industrial structure and urbanization on carbon

- emission intensity in China. *Natural Hazards*, 2014, 73(2): 579-595.
- [14] WANG Z, ZHANG B, LIU T. Empirical analysis on the factors influencing national and regional carbon intensity in China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 34-42.
- [15] 王钊, 王良虎. R&D投入、产业结构升级与碳排放关系研究. *工业技术经济*, 2019, 38(5): 62-70. [WANG Z, WANG L H. A study on the relationship among R&D input, upgrading industrial structure and carbon emission. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2019, 38(5): 62-70.]
- [16] 周迪, 王雪芹. 中国碳排放效率与产业结构升级的耦合度及耦合路径. *自然资源学报*, 2019, 34(11): 2305-2316. [ZHOU D, WANG X Q. Research on coupling degree and coupling path between China's carbon emission efficiency and industrial structure upgrade. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2305-2316.]
- [17] 田泽, 景晓栋, 肖钦文. 长江经济带碳排放—产业结构—区域创新耦合度及时空演化. *华东经济管理*, 2020, 34(2): 10-17. [TIAN Z, JING X D, XIAO Q W. Coupling coordination degree and spatio-temporal evolution analysis of carbon emissions-industrial structure-regional innovation in the Yangtze River Economic Belt. *East China Economic Management*, 2020, 34(2): 10-17.]
- [18] ZHAO R, MIM N, GENG Y, et al. Allocation of carbon emissions among industries/sectors: An emissions intensity reduction constrained approach. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 3083-3094.
- [19] 李金铠, 马静静, 魏伟. 中国八大综合经济区能源碳排放效率的区域差异研究. *数量经济技术经济研究*, 2020, 37(6): 109-129. [LI J K, MA J J, WEI W. Study on regional differences of energy carbon emission efficiency in eight economic areas of China. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2020, 37(6): 109-129.]
- [20] 原嫒, 席强敏, 李国平. 产业关联水平对碳排放演化的影响机理及效应研究: 基于欧盟27国投入产出数据的实证分析. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 841-853. [YUAN Y, XI Q M, LI G P. The impact of industrial relevancy on regional carbon emission: Eempirical analysis based on the input-output data of EU countries. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(5): 841-853.]
- [21] 周亚军, 吉萍. 产业升级、金融资源配置效率对碳排放的影响研究: 基于省级空间面板数据分析. *华东经济管理*, 2019, 33(12): 59-68. [ZHOU Y J, JI P. Research on the impact of industrial upgrade and financial resource allocation efficiency on carbon emissions: Based on provincial spatial panel data analysis. *East China Economic Management*, 2019, 33(12): 59-68.]
- [22] 张军. 要素成本、科技创新与产业结构升级. *证券市场导报*, 2019, (11): 24-31. [ZHANG J. Factor cost, technological innovation and industrial structure upgrading. *Securities Market Herald*, 2019, (11): 24-31.]
- [23] 郭爱君, 杨春林, 钟方雷. 我国区域科技创新与生态环境优化耦合协调的时空格局及驱动因素分析. *科技管理研究*, 2020, 40(24): 91-102. [GUO A J, YANG C L, ZHONG F L. Spatial and temporal pattern and driving factor analysis of coupling and coordination between regional scientific and technological innovation and ecological environment optimization. *Science and Technology Management Research*, 2020, 40(24): 91-102.]
- [24] 高晓光, 苟凌宾. 西藏区域创新能力影响因素实证研究. *西藏民族大学学报: 哲学社会科学版*, 2019, 40(4): 144-149. [GAO X G, GUO L B. Study of factors influencing regional innovation capability in Tibet. *Journal of Xizang Minzu University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 2019, 40(4): 144-149.]
- [25] 朱金生, 李蝶. 环境规制、技术创新与就业增长的内在联系: 基于中国34个细分工业行业PVAR模型的实证检验. *人口与经济*, 2020, (3): 123-141. [ZHU J S, LI D. The inherent relationship between environmental regulation, technological innovation and employment growth: An empirical research based on the PVAR model of 34 sub-industrial industries in China. *Population & Economics*, 2020, (3): 123-141.]
- [26] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响. *经济研究*, 2011, 46(5): 4-16, 31. [GAN C H, ZHENG R G, YU D F. Cyclical fluctuations and nonlinear dynamics of inflation rate. *Economic Research Journal*, 2011, 46(5): 4-16, 31.]
- [27] 郭彬, 张笑. 金融集聚与产业结构升级耦合协调性研究. *管理现代化*, 2018, 38(5): 31-34. [GUO B, ZHANG X. Research on the coupling and coordination relationship between financial agglomeration and industrial structure upgrading. *Modernization of Management*, 2018, 38(5): 31-34.]
- [28] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000. *经济研究*, 2004, (10): 35-44. [ZHANG J, WU G Y, ZHANG J P. The Estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000. *Economic Research Journal*, 2004, (10): 35-44.]

- [29] 连玉君, 苏治. 融资约束、不确定性与上市公司投资效率. 管理评论, 2009, 21(1): 19-26. [LIAN Y J, SU Z. Financial constraints, uncertainty and firms' investment efficiency. Management Review, 2009, 21(1): 19-26.]

Technological innovation, industrial structure upgrading and carbon emissions efficiency:

An analysis based on PVAR model of panel data at provincial level

LIU Zhi-hua¹, XU Jun-wei², ZHANG Cai-hong¹

(1. School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. School of Economics and Management, China University of Labor Relations, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on the 2010- 2018 Chinese provincial panel data, a PVAR model is constructed to analyze the dynamic relationship between technological innovation, industrial structure upgrading and carbon emissions efficiency at the national and regional levels. The results show that: (1) From the national level, technological innovation, industrial structure upgrading and carbon emissions efficiency have strong self-coordination and mutual positive promotion; (2) From the regional level, from east to west, technological innovation, industrial structure upgrading and carbon emissions efficiency of coordination degree decrease, the eastern region have basically achieved the coordinated development of the three variables, industrial structure upgrade and carbon emissions efficiency in the central region have not yet formed a two-way interaction, carbon emissions efficiency has insufficient impetus to improve industrial structure upgrade. In the western region, the level of technological innovation is low, the industrial structure is unreasonable, and the carbon emissions efficiency is low as well. There is no positive interaction among the three factors in Western China.

Keywords: technological innovation; industrial structure upgrading; carbon emissions; PVAR model