

引用格式:汪小英,王宜龙,沈镭,等. 信息化对中国能源强度的空间效应: 基于空间杜宾误差模型[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1752-1763. [Wang X Y, Wang Y L, Shen L, et al. Spatial effect of informatization on China's energy intensity: Based on spatial Durbin error model[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1752-1763.] DOI: 10.18402/resci.2021.09.04

# 信息化对中国能源强度的空间效应 ——基于空间杜宾误差模型

汪小英<sup>1</sup>, 王宜龙<sup>1</sup>, 沈 镭<sup>2</sup>, 李小漫<sup>1</sup>, 杜强涛<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 武汉 430074;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要:**信息化的外部性导致技术溢出,促使信息化对能源强度产生空间效应。本文利用2006—2017年中国省级面板数据,运用空间杜宾误差模型并基于区域发展的空间分异性与空间自相关性,研究信息化对能源强度的影响大小以及不同区域间的空间效应,测度了中国30个省(市、区)的能源强度和信息化水平,揭示了信息化水平对能源强度的空间效应机制。结果表明:①信息化水平和能源强度地区空间集聚现象十分显著,中国30个省(市、区)之间相邻地区呈现出相似聚集的分布情况;②信息化水平、城镇化和能源消费结构对地区能源强度均具有显著的负向影响,但产业结构对能源强度的影响并不显著;③信息化对能源强度的影响呈现出显著的空间溢出效应,某一地区的相邻地区信息化水平提升会促进该地区能源强度的降低,相邻地区信息化水平每变动1%,空间效应使得本地区能源强度朝着相反的方向变动1.396%。建议各地区重视信息化水平在降低地区能源强度的作用;构建信息化发展推动能源强度降低的政策体系;加强区域间的协同合作与共同发展;统筹推进信息化建设与地区间合作交流;优化能源消费结构。

**关键词:**能源强度;信息化;空间效应;空间杜宾误差模型;莫兰指数

DOI: 10.18402/resci.2021.09.04

## 1 引言

人工智能时代,伴随着大数据、云计算以及物联网等新一代信息技术的快速发展,全社会信息化水平大大提高,信息传送速度明显加快,传送效率大幅上升,交易成本随之降低,与此同时,传统的生产运作模式也发生了巨大的变化,高能耗低产出的生产方式逐渐被抛弃,低能耗高产出的新技术和新模式逐步成为主流,信息化水平的提升在降低能源强度方面有着巨大的作用。因此,理清信息化水平与地区能源强度之间的关系,分析其影响机制和效应大小,对于优化国内能源消费结构具有十分重要的意义。

信息化通常是指信息通讯技术(Information and Communication Technology, ICT)的快速发展,并促进应用对象进步发展的过程<sup>[1]</sup>,信息化水平则是ICT的一种量化形式。国内外文献关于信息化与能源强度之间关系的研究较为丰富,综合分析现有文献,主要是从4个方面展开研究。一是研究信息化与能源消耗之间的关系。王溪薇<sup>[2]</sup>采用投入产出分析方法,测算了信息化对中国产业能源强度的影响,并分析出中国信息化影响能源强度的主要方式为“能源要素替代”。曾岚婷等<sup>[3]</sup>采用半参数空间向量自回归模型,发现ICT具有正向的节能、增产和引流效应,分别以倒V和V型形态推进,但是发展的初

收稿日期:2020-11-28;修订日期:2021-08-22

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19040102);国家自然科学基金项目(41771566);中国地质调查局项目(DD20211413)。

作者简介:汪小英,女,江西井冈山人,博士后,副教授,研究方向为资源环境经济、能源战略和政策。E-mail: 924292540@qq.com

通讯作者:沈镭,男,湖北麻城人,研究员,博士生导师,研究方向为能源安全、资源经济、环境与管理、资源法律与政策、资源型城市及区域可持续发展。E-mail: shenl@igsrr.ac.cn

2021年9月

级阶段却没有任何影响作用,认为加速ICT应用,智能化和信息化商业、生产模式转型将有助于更少能耗的经济高质量发展。二是研究ICT资本投入对能源强度的影响。樊轶侠等<sup>[4]</sup>通过构建完整的数字经济指标和绿色GDP指数进行实证检验发现,中国当前数字经济与经济绿色化之间符合“倒U形”曲线关系,即随着数字经济水平的提升,经济绿色化水平会表现出先上升后下降的变化趋势,同时数字经济与能源强度间呈现U形曲线关系,表明“能源回弹效应”是构成“倒U形”约束的主要原因。樊茂清等<sup>[5]</sup>认为ICT投资对优化产业结构、降低能源强度有着重要的现实意义,ICT资本投入能够有效地降低中国大部分部门的能源强度。胡剑锋等<sup>[6]</sup>分析了信息化资本对能源强度的影响特征,研究表明信息化资本与能源强度之间存在着显著的负相关关系。三是通过构建信息化指标实证研究信息化和能源效率之间的关系。刘洪涛<sup>[7]</sup>基于动态面板数据模型研究发现,信息化能够显著降低地区的碳强度,达到节能减排的效果。四是研究信息化与工业化的融合对能源强度的影响。陈庆江等<sup>[8]</sup>测度了信息化和工业化融合水平,探讨了信息化和工业化融合对能源强度的影响,结果表明信息化和工业化融合能够显著降低地区能源强度。李标等<sup>[9]</sup>通过资本、劳动和能源三要素生产函数研究了城镇化、工业化、信息化与能源强度之间的关系,利用信息化发展指数测算信息化水平,研究结果表明信息化水平的提升可以有效地提升能源强度,长期的影响作用较短期更为显著。也有部分学者考虑到了空间效应的存在,运用空间计量的方法对能源强度展开研究。沈小波等<sup>[10]</sup>利用空间杜宾模型研究了技术进步以及产业结构对能源强度的影响,认为提高能源价格、加强对外贸易能够有效降低地区能源强度。刘晓红等<sup>[11,12]</sup>研究了能源强度对环境污染的影响,发现能源强度与环境污染均存在显著的空间溢出效应。廖敬文<sup>[13]</sup>分析了中国能源强度的空间效应与区域特征,认为能源强度存在显著空间集聚特征,整体呈现出西北地区高能源强度集聚区和东部沿海地区低能源集聚区的特征。

然而,纵观国内外学者的研究,现有文献对信息化影响能源强度的分析还不够全面。一是主要选取ICT资本或者单一指标来度量信息化水平,缺

少更加全面的度量方法。二是定量分析主要是从传统计量模型的角度去分析信息化对能源强度的影响,没有应用空间计量模型对信息化与能源强度进行更深入的研究。根据地理学第一定律,相邻地区往往会存在着空间上的关联性,无论是信息化水平还是能源强度都会受到相邻区域经济和社会发展的影响<sup>[14]</sup>,传统计量模型并没有考虑空间因素的影响。为此,本文着手于两个方面:第一,采用信息化指数指标体系对信息化水平进行综合评价。第二,运用空间计量模型研究信息化对能源强度的空间效应。基于2006—2017年中国省级面板数据,测算出中国30个省(市、区)的信息化水平和能源强度,并检验其能源强度和信息化水平的空间自相关性,通过构建空间杜宾误差模型,实证分析在考虑空间效应情况下的信息化对中国能源强度的影响。

## 2 空间效应机制

信息化是通过ICT的渗透应用来改变现有生产方式和管理模式的过程,其本质上是用来解决信息的供需不平衡问题。信息化通过解决信息的供需问题,降低交易成本,使得企业的资源配置效率以及决策效率提高,促进了经济的降本增效。信息化水平主要通过提高技术创新效率、优化资源配置以及升级产业结构3种途径降低地区能源强度<sup>[15,16]</sup>(图1)。①信息化通过提高部门技术创新效率,促进企

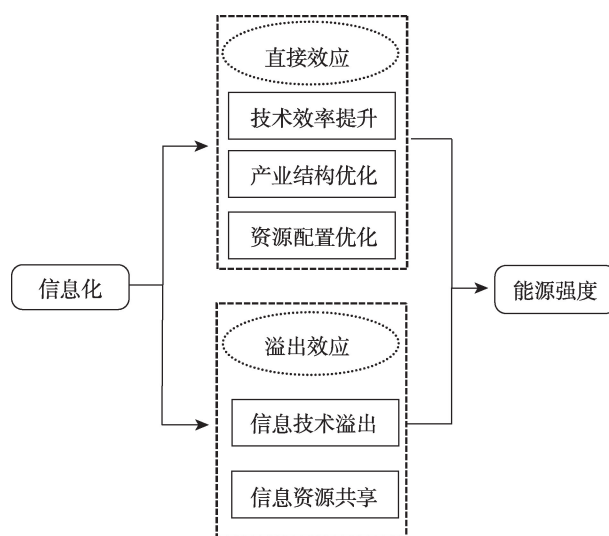


图1 信息化对能源强度的空间效应机制

Figure 1 Mechanism of the spatial effect of informatization on energy intensity

业生产技术的提高和机器设备的更新换代以及提升企业生产制造的柔性<sup>[17]</sup>,降低企业生产和生产过程中的能源消耗,由此可以从总量上减少管理和生产过程中的能源消耗。②信息化过程有效减少了要素配置和使用中的信息不对称,使包括能源在内的各生产要素能够配置到使用效率最高的领域和环节,优化企业生产结构,提升企业生产环节的资源配置效率,提高单位能源的经济产出。③信息化通过促进不同产业之间的相互渗透与融合,改变了不同能源密集度的产业之间的比例结构,使能源要素密集的第二产业比重逐渐下降,而对能源依赖程度相对较低的第三产业的比重则逐渐上升,推动产业结构优化升级<sup>[8]</sup>;此外,产业结构的调整对能源消费结构的优化具有正向效应,进而可以改善传统的能源要素禀赋所带来的不利条件,推动能源强度的降低<sup>[18]</sup>。同时中国各地区存在的能源冗余问题<sup>[14]</sup>,通过调节信息化水平可以在一定程度上缓解。

信息化具有显著的空间溢出效应。从信息技术溢出的角度来看,信息化不仅可以通过推动能源技术进步降低能源消耗,而且还可以通过技术的外溢效应促进各地区行业的技术进步,使得整个行业的生产率提高<sup>[19]</sup>。ICT作为一种通用技术,具有知识产品的属性,可以使经济主体获取信息的途径更加广泛,并且通过经济主体间的模仿学习和示范效应,促进技术的知识外溢性的传播,使得社会的技术进步加快,降低地区能源强度。从信息资源共享的角度来看,随着社会信息化程度的提升,人员、资本等生产要素流动加快,资源共享程度加大,进一步推进技术溢出,促进能源技术进步,推动地区能源强度降低。因此,在研究信息化对能源强度的影响时,加入空间效应就显得更加必要。

### 3 研究方法

#### 3.1 中国信息化水平和能源强度的测度

##### 3.1.1 信息化发展指数评价

本文所有指标与数据均来源于2006—2018年《中国统计年鉴》、中国信息网统计数据库和国务院发展研究中心信息网统计数据库以及国泰安金融数据库。考虑到单一的测度指标已不能全面反映出中国的信息化水平,本文采用国家统计局统计科研所“信息化统计评价”研究组制定的信息化发展指数指标体系对中国30个省(区、市)(由于数据缺失,未包括西藏、港澳台地区)的信息化水平进行综合评价,该指标体系分别从基础设施、产业技术、应用消费、知识支撑以及发展效果等5个方面对信息化水平进行评估<sup>[20]</sup>,鉴于数据的可获得性以及新旧指标的替换,对上述指标体系中的部分三级指标进行修改与调整,删除电视机拥有率和计算机拥有率,加入互联网宽带拥有率,以及用信息传输计算机服务与软件业固定资产投资代替人均电信业产值和人均信息消费额。具体指标体系如表1所示。

##### 3.1.2 能源强度测度

能源强度是一种单要素能源效率的测度指标,又称单位国内生产总值的能源消耗<sup>[21]</sup>,具体为能源投入与产出的比值,在国家层面,能源强度可以用能源投入与国内生产总值之比来表示,即:

$$E_t = E/GDP \quad (1)$$

式中:  $E_t$  表示  $t$  年的能源强度;  $E$  表示能源投入量;  $GDP$  表示国内生产总值。沿用式(1),计算地区能源投入量与地区生产总值比值作为对地区能源强度的测度。

#### 3.2 空间自相关性检验

关于信息化和能源强度的空间自相关性检验,

表1 信息化发展指数的指标体系

Table 1 Indicator system of informatization development

总指标	分类指数	三级指标
信息化发展指数	基础设施指数	移动电话拥有率/(部/百人) 互联网宽带接入端口拥有率/(个/百人)
	产业技术指数	信息传输计算机服务与软件业固定资产投资/亿元 单位地区生产总值专利申请受理量/(个/亿元)
	应用消费指数	互联网普及率/%
	知识支撑指数	软件和信息服务业从业人数/人
	发展效果指数	人均地区生产总值/元



2021年9月

本文主要分为两个步骤:第一步,全局空间自相关性,利用全局莫兰指数(Global Moran's  $I$ )检验信息化和能源强度在空间分布上是否存在空间集聚或者空间分异的特征;第二步,局部空间自相关性,利用 Moran 散点图以及局部空间自相关指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)来检验中国 30 个省(区、市)的信息化和能源强度的局部空间自相关性。

### 3.2.1 全局空间自相关检验

全局莫兰指数(Global Moran's  $I$ )的计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}} \quad (2)$$

式中:  $S^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ;  $n$  是研究地区总数;  $(i, j)$  代表空间的两个点位;  $y_i$  代表区域  $i$  经济变量的观测值;  $y_j$  代表区域  $j$  经济变量的观测值;  $\bar{y}$  代表区域间经济变量的平均值;  $w_{ij}$  为空间权重值,本文中的空间权重矩阵采用邻近指标来构造,若空间单元  $i$  与空间单元  $j$  共用一个边界或者一个节点,那么空间权重矩阵的元素  $w_{ij} = 1$ ,若不满足条件,那么  $w_{ij} = 0$ 。何江等<sup>[22]</sup>的研究指出,传统的莫兰指数公式只适合于空间截面数据的计算,对于空间面板数据,在计算 Moran's  $I$  时,要将空间权重矩阵  $W$  替换成分块对角矩阵  $C = I_T \otimes W$ ,  $\otimes$  表示克罗内克积,用于任意大小的两个矩阵之间的运算。

### 3.2.2 局部空间自相关检验

局部空间自相关描述一个空间单元与其领域的相似程度,能够表示每个空间局部单元服从总体趋势的程度,其常用反映指标为 Moran's  $I$  散点图、Local Moran's  $I$  统计量等。

根据 Global Moran's  $I$  的计算公式,可以分解为每个区域和其周围地区的局部相关性的求和,分解过后可以得到 Local Moran's  $I$  值,公式为:

$$I_i = \frac{n(y_i - \bar{y})}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2} \sum_{j \neq i}^n w_{ij} (y_j - \bar{y}) \quad (3)$$

如果  $I_i > 0$ ,则表示该空间单元与邻近单元的

属性值相似,呈现出高(低)观测值的空间单元为同是高(低)值的区域所包围的空间分布模式,如果  $I_i < 0$ ,则表示该空间单元与邻近单元的属性值不相似,呈现出高(低)观测值的空间单元为同是低(高)值的区域所包围的空间分布模式。

### 3.3 空间面板计量模型

构建空间面板计量模型探究信息化与能源强度的关联关系,空间面板数据通常能够同时捕捉观测单位在空间与时间维度上的特征变化,与截面数据相比能够为空间建模提供更多的可能性。现有的空间模型主要包括空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM),SLM 认为一个空间单元的因变量会通过空间传导机制影响其他空间单元的因变量,而 SEM 则认为空间外溢性或相互作用是随机冲击的结果,SDM 实质上是 SEM 和 SLM 的综合。考虑到中国省域的能源强度主要取决于各省自身的能源禀赋等强外生因素,故在模型中加入能源强度的空间滞后项是不准确的。忽略误差项中的空间自相关性的代价很大,因此本文通过建立空间杜宾误差模型(SDEM)来探究信息化是否对能源强度具有显著的空间溢出效应<sup>[25]</sup>,为与 SDEM 比较,本文还建立了普通面板数据模型(PDM)。

$$Et_{it} = c + \beta_1 Idi_{it} + \beta_2 (I_T \otimes W) Idi_{it} + \phi X_{it} + u_{it} \quad (4)$$

$$u_{it} = \lambda (I_T \otimes W) u_{it} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

$$Et_{it} = c + \beta Idi_{it} + \phi X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

其中(4)和(5)式为空间杜宾误差模型(SDEM)的表达式;(4)式中的  $u_{it}$  为服从正态分布的随机误差向量,其中  $i$  表示区域,  $t$  表示年份。(6)式为普通面板数据模型(PDM)的表达式。式中:能源强度  $Et$  为被解释变量;信息化指数  $Idi$  为解释变量;  $(I_T \otimes W) Idi$  则表示信息化的空间滞后项;  $X$  为控制变量,因信息化测算时囊括 GDP 相关数据,为避免多重共线性,控制变量不选取 GDP 相关指标。本文主要从影响能源强度的结构因素入手,选取了城镇化率( $Ur$ )和产业结构系数( $Idu$ )以及能源消费结构( $Ei$ )作为影响能源强度的 3 个主要控制变量<sup>[9]</sup>,其中城镇化率采用城镇人口数占总人口数的比重来度量,产业结构系数为第三产业产值占 GDP 的比

重,能源消费结构利用煤炭消费量占能源消费总量的比值来衡量; $c$ 是截距项; $\phi$ 和 $\beta$ 是系数向量; $\lambda$ 为空间误差系数; $(I_T \otimes W)u_{it}$ 为误差项的滞后; $\varepsilon$ 为服从正态分布的随机误差项。

出于简化模型的需要,假设空间数据观测单元的地理位置或者邻近关系不随时间的变化而变化,也就是说空间权重矩阵是不随时间变化的,此外,假设随机误差滞后项的空间权重矩阵与自变量滞后项的空间权重矩阵相同。对空间杜宾误差模型

(SDEM)的参数进行估计时,若用最小二乘法(OLS)估计,则会产生无偏但非有效的估计,Blomquist提出的极大似然估计法(ML方法)能对空间模型进行有效的估计并且可以避免变量内生性问题,因此本文选择ML方法对SDEM进行估计<sup>[25]</sup>。

4 结果与分析

4.1 信息化与能源强度演变特征分析

从表2信息化指数和能源强度的计算结果来看,北京、上海、广东、江苏和浙江在2006—2017年

表2 2006、2017年中国30个省份信息化指数和能源强度

Table 2 Informatization index and energy intensity of 30 provinces and municipalities in China, 2006 and 2017

区域	信息化发展指数			能源强度		
	2006	2017	均值	2006	2017	均值
北京	0.30	0.85	0.59	0.76	0.26	0.48
天津	0.18	0.56	0.38	1.07	0.43	0.71
河北	0.06	0.38	0.21	1.90	0.89	1.32
山西	0.05	0.33	0.21	2.89	1.44	1.96
内蒙	0.05	0.38	0.24	2.41	1.06	1.55
辽宁	0.10	0.47	0.33	1.77	0.93	1.16
吉林	0.06	0.42	0.23	1.59	0.52	0.96
黑龙江	0.07	0.35	0.21	1.41	0.77	1.02
上海	0.27	0.67	0.50	0.87	0.39	0.62
江苏	0.14	0.78	0.46	0.89	0.38	0.61
浙江	0.16	0.65	0.40	0.86	0.41	0.61
安徽	0.02	0.41	0.19	1.17	0.49	0.79
福建	0.10	0.57	0.34	0.91	0.41	0.65
江西	0.03	0.32	0.15	1.02	0.45	0.69
山东	0.10	0.52	0.30	1.23	0.53	0.85
河南	0.03	0.35	0.18	1.34	0.53	0.90
湖北	0.06	0.43	0.23	1.46	0.49	0.93
湖南	0.04	0.36	0.19	1.35	0.47	0.88
广东	0.20	0.74	0.48	0.77	0.37	0.56
广西	0.03	0.36	0.18	1.19	0.53	0.83
海南	0.05	0.35	0.21	0.91	0.48	0.69
重庆	0.05	0.41	0.24	1.37	0.49	0.91
四川	0.05	0.42	0.21	1.5	0.59	1.01
贵州	0.01	0.31	0.14	3.19	0.81	1.83
云南	0.03	0.27	0.14	1.71	0.68	1.16
陕西	0.06	0.42	0.24	1.43	0.60	0.93
甘肃	0.02	0.28	0.15	2.2	1.01	1.49
青海	0.03	0.34	0.19	3.12	1.52	2.22
宁夏	0.04	0.36	0.20	4.10	1.90	2.65
新疆	0.05	0.35	0.21	2.09	1.68	1.76

注:受篇幅限制,文中只给出了2006、2017年的结果,下同。

2021年9月

的信息化发展指数均值分别为0.59、0.50、0.48、0.46和0.40,在中国30个省(区、市)中排名前5,同时它们在2006—2017年的能源强度均值是0.48、0.62、0.56、0.61和0.61,排名分别为倒数第1、倒数第5、倒数第2和并列倒数第3。能源强度均值排名前10的省份为宁夏、青海、山西、贵州、新疆、内蒙、甘肃、河北、云南和辽宁,而它们的信息化发展指数均值较低,排名较为靠后。其余省份的信息化发展指数均值以及能源强度均值的排名大多处于中游水平。总体来看,由于中国近年来经济与文化的飞速发展,各地区的信息化发展指数在逐年上升,而能源强度则在逐年下降,同时信息化水平越高的地区其能源强度反而越低,反之亦然。由此可见,一个地区的信息化指数和能源强度存在显著的负相关关系,具体的计算将在后文给出。

## 4.2 信息化对能源强度的空间效应分析

### 4.2.1 空间相关性检验

表3给出了全局莫兰指数计算结果,可以看出,信息化的全局Moran's  $I=0.277$  大于0,且 $P$ 值远小于0.01,说明在0.01的置信水平下,拒绝随机分布的原假设,表明信息化水平的空间分布存在显著的空间集聚效应;能源强度的全局Moran's  $I=0.412$  大于0,且 $P$ 值等于0.004远小于0.01,同样在0.01的置信水平下拒绝随机分布的原假设,表明能源强度的分布存在显著的空间集聚效应。两变量均通过检验,表明各地区的信息化水平与该地区的能源强度具有显著的空间依赖关系,因此有必要使用空间面板计量模型进一步研究二者之间的空间溢出效应。

图2、图3给出了2017年信息化和能源强度的Moran's  $I$ 散点图。从图2可知,大部分散点分布在第一、第三象限中,即大多数省份位于“高-高”或者“低-低”聚集的区域,说明大多数省份信息化水平的地理空间分布存在空间集聚的现象;图3中的散点同样大部分位于第一、第三象限,少数点位于第四象限,说明大多数省份的能源强度处于聚集的区

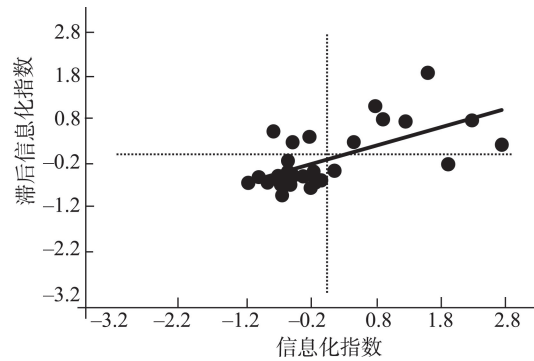


图2 2017年信息化Moran's  $I$ 散点图

Figure 2 Scatter plot of informatization Moran's  $I$ , 2017

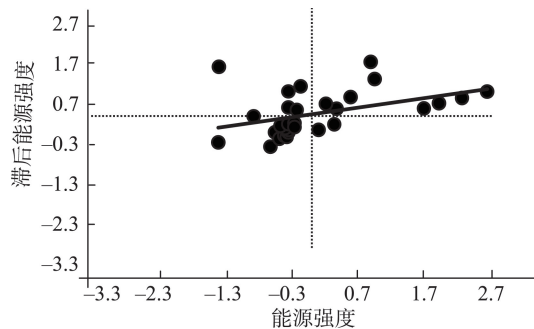


图3 2017年能源强度Moran's  $I$ 散点图

Figure 3 Scatter plot of energy intensity Moran's  $I$ , 2017

域,少数省份处于空间分异的区域,即呈现出“高-低”的分布模式。

表4给出了部分地区信息化以及能源强度的局部Moran's  $I$ 指数检验结果。LISA检验结果显示与Moran's  $I$ 散点图结果基本一致。从表4来看,总体上,中国东部沿海、南部沿海及中部地区的信息化程度较高且能源强度较低,北部及西部地区的信息化程度较低且能源强度较高,表现出了明显的空间集聚效应。浙江、上海、江苏等东部沿海发达城市正位于信息化水平较高的“HH”聚集区域,陕西、广西、四川、重庆等西南地区则处于信息化水平差异较为明显的“HL”聚集区域。上海、浙江、安徽、江西以及福建均位于能源强度较低的“LL”聚集区域,能源强度呈现出从东部沿海发达省份向中部地区扩散的趋势。河南、河北、湖南、湖北、山西等中部地区同样位于信息化水平较高的“HH”且能源强度较低的“LL”聚集区域。而甘肃、云南、青海、新疆、贵州、黑龙江、吉林、辽宁等地区由于经济发展、基础设施建设等各方面的原因,形成了能源强度较高的

表3 2017年全局自相关检验结果表

Table 3 Global autocorrelation test results, 2017

指标	信息化	能源强度
Moran's $I$	0.277	0.412
$P(I)$	0.006	0.004

表4 2017年局部自相关检验结果表  
Table 4 Local indicators of spatial association test results, 2017

区域	信息化发展指数			能源强度		
	局部莫兰指数	P值	聚集类型	局部莫兰指数	P值	聚集类型
上海	6.942	0.012	HH	1.109	0.044	LL
浙江	4.435	0.002	HH	2.365	0.012	LL
江西		-		2.369	0.010	LL
福建		-		1.487	0.032	LL
安徽		-		1.805	0.026	LL
内蒙古	0.264	0.046	LL		-	
陕西	-0.212	0.046	HL		-	
甘肃		-		4.432	0.004	HH
青海		-		5.019	0.050	HH
新疆		-		5.832	0.038	HH
贵州	0.943	0.046	LL		-	

注:文中只给出了局部聚集显著的区域。

“HH”和信息化水平较低的“LL”聚集圈。

综合全局空间自相关和局部自相关检验结果,可以得出区域的信息指数和能源强度存在显著的负相关关系,同时,信息化和能源强度均存在显著的空间自相关性,二者在地理空间上均呈现出空间集聚的特征,即信息化水平(能源强度)较高的地区,其周边地区的信息水平(能源强度)也普遍较高,信息化水平(能源强度)较低的地区,其周边地区的信息水平(能源强度)也普遍较低。意味着本地区的信息化水平和能源强度对邻近地区有一定的辐射影响作用,即存在显著的空间溢出效应。

4.2.2 空间溢出效应分析

通常研究位于一个连续区域中的邻近空间单位的面板数据时,固定效应模型要比随机效应模型更加合适,因此本文在建立普通面板数据模型和空间面板数据模型<sup>[23]</sup>时,均选择固定效应模型。根据对空间和时间异质性的不同设定,将SDEM的固定效应模型分为4种类型:无固定效应模型(nonF)、空间固定效应模型(sF)、时间固定效应模型(tF)、以及既有时间又有空间的固定效应模型(stF)。本文以下模型估计结果均利用Matlab(R2014b)计算得出。

(1)模型估计。从表5空间效应的模型估计结果可以发现,具有空间固定效应的空间杜宾误差模型为本文估计的最优模型。Anselin提出空间模型的拟合优度 $R^2$ 与普通面板模型的拟合优度 $R^2$ 不

一样,不能根据其大小来进行模型的比较,因此给出了Log likelihood(对数似然值),Akaike Info Criterion(赤池信息准则)以及Schwarz Criterion(施瓦茨信息准则)3种统计量来比较模型<sup>[28]</sup>。本文通过Log likelihood和 $R^2$ 统计量来判定模型的拟合优度,Log likelihood和 $R^2$ 统计值越高,表明模型的拟合优度越好<sup>[25]</sup>。且无论从拟合优度 $R^2$ 还是Log likelihood来看,SDEM均优于普通面板模型;对普通面板模型的残差进行拉格朗日乘子检验(LM检验),检验统计量通过1%的显著性水平,说明残差序列存在自相关,由此也说明忽略空间效应会导致模型的估计性能差,因此不能选择普通面板模型。尽管 $R^2$ 和Log likelihood的大小均显示出空间时间双固定模型的估计结果要优于无固定效应、时间固定效应以及空间固定效应模型,但是空间时间双固定效应模型的空间误差系数 $\lambda$ 为-0.001,并不显著异于0,与模型设定以及假设不符,进一步比较 $R^2$ 以及likelihood的大小,选取具有空间固定效应的空间杜宾误差模型为最优模型。

(2)模型的结果分析。信息化对能源强度的影响呈现出显著的空间溢出效应。最优模型空间固定效应模型,其信息化指数(Idi)的系数为-0.752,并且在1%的置信水平下显著,表明信息化水平上升1%,地区能源强度会下降0.7%。同时信息化指数的滞后项 $W \times Idi$ 也通过1%显著性检验,空间溢出



2021年9月

表5 信息化对能源强度的空间效应模型估计结果

Table 5 Estimation results of the spatial effect of informatization on energy intensity

变量	普通面板模型	空间杜宾误差模型(SDEM)			
		nonF	sF	tF	stF
<i>Constant</i>	0.779*** (3.903)	0.101 (0.046)			
<i>Idi</i>	-2.484*** (-9.261)	-1.281*** (-4.161)	-0.752** (-2.401)	-0.523 (-1.361)	0.915*** (3.292)
<i>W×Idi</i>		-1.482*** (-3.471)	-1.396 (-4.725)	0.224 (0.333)	0.165 (0.418)
<i>Ei</i>	0.629 (6.107)	0.745*** (7.215)	-0.322 (-2.259)	0.788*** (7.518)	-0.232 (-1.697)
<i>Idu</i>	1.693*** (3.894)	1.672*** (4.239)	0.772 (0.351)	1.888*** (4.605)	1.247*** (2.047)
<i>Ur</i>	-0.338 (-1.008)	-0.031 (0.924)	-3.575*** (-6.378)	-0.661* (-1.752)	-2.442*** (-4.143)
$\lambda$		0.489***	0.219***	0.441***	-0.001
$R^2$	0.447	0.522	0.939	0.557	0.947
<i>Log likelihood</i>	-250.46	-195.18	152.71	-188.56	171.49

注:括号内为*t*值,\*、\*\*和\*\*\*分别代表估计的参数在10%、5%和1%的置信水平下显著,下同。

系数为-1.396,表明相邻地区信息化水平每变动1%,空间效应使得本地区能源强度朝着相反的方向变动1.396%,说明了信息化水平与能源强度存在显著的负相关关系。这可能是因为随着社会科技的进步与经济的发展,人们对于能源的利用率逐渐提升,信息化水平较高时,同样的能源将会为国家产生更多的经济效益。

此外,能源消费结构(*Ei*)的估计系数为负,这是因为煤炭作为非清洁能源,其效率低且污染较严重,而天然气作为清洁能源,其能效比高并且污染较小,所以能源消费结构与能源强度具有负相关关系。同时产业结构(*Idu*)对能源强度的影响并不显著,可能是由于产业结构在对能源强度产生影响的过程中存在门槛效应,并且各产业对能源强度的影响程度各不相同:第二、三产业的结构因素对能源强度下降产生的抑制作用大于第一产业结构因素的促进作用,因此产业结构对地区能源强度产生的影响并不显著<sup>[26]</sup>。城镇化率(*Ur*)的估计系数也显著为负,说明城镇化率的提高会显著降低地区能源强度,城镇化过程中存在着规模经济和产业集聚效应,有助于降低能源消费和提高能源利用效率。

(3)空间溢出效应分解。空间杜宾误差模型可

将总的空间溢出效应分解为直接效应和间接效应,结果如表6所示,分析可得:

①直接效应即本地区信息化水平的变化对本地区能源强度的影响,结果表明信息化水平对能源强度的直接效应为-0.752,且在1%的置信水平下显著,说明信息化水平的提升对地区能源强度有着显著的负向影响。

②间接效应指的是本地区信息化水平的变化对邻近地区能源强度的影响,结果表明信息化对能源强度的间接效应(累计邻近效应)为-1.396,同时在1%的置信水平下显著。同时间接效应大于直接效应,这意味着信息化对能源强度的影响具有显著的空间溢出效应,相邻地区信息化水平会显著影响中心地区的能源强度。

#### 4.3 稳健性检验

本文之前采用认可范围最广泛的地理邻接矩

表6 信息化对能源强度的直接效应与间接效应

Table 6 Direct and indirect effects of informatization on energy intensity

变量	直接效应	间接效应	总效应
<i>Idi</i>	-0.752*** (2.401)	-1.396*** (-4.725)	-2.148



阵作为对空间单元联系紧密程度的度量,为了避免完全割裂空间单位的相互联系,导致空间关系认定等误差造成模型的不稳定,现将空间杜宾误差模型按照地理距离权重矩阵进行实证分析(表7)。

稳健性检验结果表明,在空间邻接矩阵和空间距离矩阵的估计下,信息化对能源强度的直接效应与间接效应均显著为负。稳健性检验结果与上文得出的结论基本一致,表明信息化水平对能源强度具有显著的负向空间效应,由此证明本文的结论是稳健可靠的。

## 5 结论和建议

### 5.1 结论

本文通过探究信息化影响能源强度的空间作用机制,基于2006—2017年中国省级面板数据,构建了空间杜宾误差模型,对信息化对能源强度的空间效应进行了实证分析。得出以下研究结论:

(1)各地区信息化水平与能源强度存在着显著的空间自相关性,呈现出空间聚集的分布特征。信息化水平(能源强度)较高的地区,其周边地区的信息化水平(能源强度)也普遍较高,信息化水平(能源强度)较低的地区,其周边地区的信息化水平(能源强度)也普遍较低。

(2)信息化水平对地区能源强度具有显著的负

向影响,信息化水平每上升1%,地区能源强度会下降0.7%,即随着一个地区的信息化水平的升高,该地区能源强度会明显的下降。因此信息化水平越高的地区,其能源强度就越低。

(3)信息化对能源强度的影响呈现出显著的空间溢出效应,相邻地区信息化水平的提升会促进中心地区能源强度的降低,相邻地区信息化水平每变动1%,空间效应使得本地区能源强度朝着相反的方向变动1.396%。

(4)能源消费结构对能源强度有显著的负向影响。煤炭作为非清洁能源,其效率低且污染较严重,天然气作为清洁能源,其能效比高并且污染较小,所以能源消费结构与能源强度具有负相关关系。

### 5.2 政策建议

根据上述结论,本文提出以下对策建议:

(1)重视信息化水平在降低地区能源强度的作用。实证分析表明,信息化水平的提升对降低地区能源强度有显著的促进作用,地方政府和企业应统筹规划信息化建设,充分利用信息化技术手段加强对地区节能减排技术的研发利用,积极推进新一代信息技术与生产制造技术的深度融合,提高生产管理过程中的能源使用效率。

表7 稳健性检验

Table 7 Robustness test

变量	普通面板模型	空间杜宾误差模型(SDEM)			
		nonF	sF	tF	stF
<i>Constant</i>	-0.232 (0.612)	-0.654 (0.581)			
<i>Idi</i>	-0.716*** (-7.635)	-0.651*** (-8.112)	-0.447** (-2.501)	-0.625*** (-5.351)	0.471 (1.514)
<i>W×Idi</i>		-1.196* (-1.398)	-1.388*** (-4.235)	-0.967 (-0.559)	-0.986** (-2.013)
<i>Ei</i>	0.279*** (3.145)	-0.638*** (6.421)	-0.468*** (-3.226)	-0.641*** (3.338)	-0.519* (-1.523)
<i>Idu</i>	-0.641** (3.163)	0.004 (0.882)	-0.209 (0.471)	-0.838*** (-2.356)	-0.593** (1.108)
<i>Ur</i>	-0.514 (-0.986)	-0.113 (0.831)	-2.638*** (-5.269)	-0.563*** (-3.255)	-1.211*** (-4.112)
$\lambda$		0.271*	0.298**	0.007	0.001
$R^2$	0.279	0.402	0.566	0.423	0.648
<i>Log likelihood</i>	-229.46	-175.18	142.71	-155.56	151.49

2021年9月

(2)构建信息化发展推动能源强度降低的政策体系。首先,充分利用信息化发展带来的技术进步,改变企业的管理模式和生产方式,减少企业生产过程中的能源消耗;其次,加快信息技术的扩散传播,减少信息的不对称,降低交易费用,提高生产过程中的决策和管理效率;最后,推动形成全社会信息技术和资源共享的理念,加快资本积累和研发合作,推动能源技术进步。

(3)加强区域间的协同合作与共同发展。研究表明,信息化对能源强度的间接效应要大于直接效应,各地方应充分利用信息化带来的技术外溢效应,加强地区间的资源共享,通过加快人员资本等生产要素的流动效应,促进能源技术的外溢,推动产学研用一体的能源平台发展,充分利用信息化技术推动节能减排绿色发展道路建设,实现区域间协调、绿色发展。

(4)目前,在能源消耗和技术进步的影响下,中国形成了低能耗高增长消费模式<sup>[27]</sup>。应继续统筹推进信息化建设与地区间合作交流的同时,大力优化能源消费结构,鼓励多使用清洁能源,推进城镇化的建设,全方位多措施共同促进降低地区能源强度。

## 参考文献(References):

- [1] 谢莉娟,陈锦然,王诗枏. ICT投资、互联网普及和全要素生产率[J]. 统计研究, 2020, 37(9): 56-67. [Xie L J, Chen J R, Wang S X. ICT investment, internet penetration and total factor productivity[J]. Statistical Research, 2020, 37(9): 56-67.]
- [2] 王溪薇. 信息化对我国产业能源强度影响的测算[J]. 统计与决策, 2018, 34(7): 152-154. [Wang X W. Calculation of the impact of informatization on energy intensity of China's industry[J]. Statistics & Decision, 2018, 34(7): 152-154.]
- [3] 曾岚婷,叶阿忠. ICT效应下外商直接投资、经济增长与能源消耗: 基于半参数空间向量自回归模型的研究[J]. 技术经济, 2020, 39(11): 44-51. [Zeng L T, Ye A Z. Foreign direct investment, economic growth and energy consumption under ICT effect: Based on semi-parametric spatial vector autoregressive model[J]. Journal of Technology Economics, 2020, 39(11): 44-51.]
- [4] 樊轶侠,徐昊. 中国数字经济发展能带来经济绿色化吗? 来自我国省际面板数据的经验证据[J]. 经济问题探索, 2021(9): 15-29. [Fan Y X, Xu H. Can the development of China's digital economy bring economic greening? Empirical evidence from China's provincial panel data[J]. Inquiry into Economic Issues, 2021(9): 15-29.]
- [5] 樊茂清,郑海涛,孙琳琳,等. 能源价格、技术变化和信息化投资对部门能源强度的影响[J]. 世界经济, 2012, (5): 22-45. [Fan M Q, Zheng H T, Sun L L, et al. Impact of energy prices, technological changes and investment in information technology on sectoral energy intensity[J]. The Journal of World Economy, 2012, (5): 22-45.]
- [6] 胡剑锋. 信息化资本对能源强度的影响研究: 基于我国省际面板数据的实证分析[J]. 中国经济问题, 2010, (4): 26-32. [Hu J F. The research on the influence of information capital on energy intensity: An empirical analysis based on China's provincial panel data[J]. China Economic Studies, 2010, (4): 26-32.]
- [7] 刘洪涛,杨洋. 信息化与中国碳强度: 基于中国省级面板数据的经验分析[J]. 科技管理研究, 2018, 38(19): 226-233. [Liu H T, Yang Y. Informatization and carbon intensity in China: An empirical analysis based on China provincial panel data[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(19): 226-233.]
- [8] 陈庆江,杨蕙馨. 信息化和工业化融合对能源强度的影响: 基于2000-2012年省际面板数据的经验分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(1): 55-63. [Chen Q J, Yang H X. Effect of integration of informatization and industrialization on energy intensity: An empirical analysis based on provincial panel data from 2000 to 2012[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(1): 55-63.]
- [9] 李标,宋长旭,吴贾,等. 中国新四化对能源强度的影响[J]. 资源科学, 2017, 39(8): 1444-1456. [Li B, Song C X, Wu J, et al. Influence of development of China's four modernizations' on energy intensity[J]. Resources Science, 2017, 39(8): 1444-1456.]
- [10] 沈小波,陈语,林伯强. 技术进步和产业结构扭曲对中国能源强度的影响[J]. 经济研究, 2021, 56(2): 157-173. [Shen X B, Chen Y, Lin B Q. The impacts of technological progress and industrial structure distortion on China's energy intensity[J]. Economic Research Journal, 2021, 56(2): 157-173.]
- [11] 刘晓红,江可申. 能源强度、交通压力与雾霾污染: 基于静态与动态空间面板模型的实证[J]. 系统管理学报, 2019, 28(6): 1161-1168. [Liu X H, Jiang K S. Energy intensity, traffic pressure and haze pollution: An empirical study based on static and dynamic spatial panel model[J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(6): 1161-1168.]
- [12] 赵立祥,赵蓉. 经济增长、能源强度与大气污染的关系研究[J]. 软科学, 2019, 33(6): 60-66. [Zhao L X, Zhao R. Analysis of the relationship between economic growth, energy intensity and air pollution[J]. Soft Science, 2019, 33(6): 60-66.]
- [13] 廖敬文,侯景新. 中国能源强度区域特征、空间效应与区域差异[J]. 内蒙古社会科学(汉文版), 2019, 40(3): 148-156. [Liao J W, provincial panel data[J]. Inquiry into Economic Issues, 2021(9): 15-29.]

- Hou J X. Characteristics, spatial effects and regional differences of China's energy intensity regions[J]. Inner Mongolia Social Sciences, 2019, 40(3): 148-156.]
- [14] 郭珊, 韩梦瑶, 杨玉浦. 中国省际隐含能源流动及能效冗余解析[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 733-744. [Guo S, Han M Y, Yang Y P. Multiregional embodied energy flows and energy efficiency redundancy in China[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 733-744.]
- [15] 孙早, 刘李华. 信息化提高了经济的全要素生产率吗: 来自中国1979-2014年分行业面板数据的证据[J]. 经济理论与经济管理, 2018, (5): 5-18. [Sun Z, Liu L H. Does informatization improve the tep of Chinese economy: Evidence from China's 1979-2014 sectorial panel data[J]. Economic Theory and Business Management, 2018, (5): 5-18.]
- [16] 茶洪旺, 左鹏飞. 信息化对中国产业结构升级影响分析: 基于省级面板数据的空间计量研究[J]. 经济评论, 2017, (1): 80-89. [Cha H W, Zuo P F. The impacts of informatization on industrial structure upgrading in China: Spatial econometric analysis based on province's panel data[J]. Economic Review, 2017, (1): 80-89.]
- [17] 张三峰, 魏下海. 信息与通信技术是否降低了企业能源消耗: 来自中国制造业企业调查数据的证据[J]. 中国工业经济, 2019, (2): 155-173. [Zhang S F, Wei X H. Does information and communication technology reduce enterprise's energy consumption: Evidence from Chinese manufacturing enterprises survey[J]. China Industrial Economics, 2019, (2): 155-173.]
- [18] 皱璇, 王盼. 产业结构调整与能源消费结构优化[J]. 软科学, 2019, 33(5): 11-16. [Zhou X, Wang P. Study on the mechanism of industrial structure adjustment on the optimization of energy consumption structure[J]. Soft Science, 2019, 33(5): 11-16.]
- [19] 郭美晨, 杜传忠. ICT提升中国经济增长质量的机理与效应分析[J]. 统计研究, 2019, 36(3): 3-16. [Guo M C, Du C Z. Mechanism and effect of information and communication technology on enhancing the quality of China's economic growth[J]. Statistical Research, 2019, 36(3): 3-16.]
- [20] 何强. 2013中国信息化发展指数(Ⅱ)研究报告[J]. 调研世界, 2014, (4): 3-7. [He Q. 2013 China information development index (Ⅱ) research report[J]. The World of Survey and Research, 2014, (4): 3-7.]
- [21] 李双杰, 李春琦. 全要素能源效率测度方法的修正设计与应用[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(9): 110-125. [Li S J, Li C Q. Modification and application of total factor energy efficiency measurement[J]. The Journal of Quantitative and Technical Economics, 2018, 35(9): 110-125.]
- [22] 何江, 张馨之. 中国区域经济增长及其收敛性: 空间面板数据分析[J]. 南方经济, 2006, (5): 44-52. [He J, Zhang X Z. Chinese regional economic growth and its convergence: Spatial panel data analysis[J]. South China Journal of Economics, 2006, (5): 44-52.]
- [23] 孟望生. 经济增长方式转变与能源消费强度差异的收敛性: 基于中国2001-2016年省级面板数据[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1295-1305. [Meng W S. Convergence analysis of interregional differences of economic growth pattern and energy intensity: An empirical study based on provincial data from 2001 to 2016 in China[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1295-1305.]
- [24] 侯孟阳, 姚顺波. 中国农村劳动力转移对农业生态效率影响的空间溢出效应与门槛特征[J]. 资源科学, 2018, 40(12): 2475-2486. [Hou M Y, Yao S B. Spatial spillover effects and threshold characteristics of rural labor transfer on agricultural eco-efficiency in China[J]. Resources Science, 2018, 40(12): 2475-2486.]
- [25] Blonigen B A, Davies R B, Waddell G R, et al. FDI in space: Spatial autoregressive relationships in foreign direct investment[J]. European Economic Review, 2007, 51(5): 1303-1325.
- [26] 马晓微, 石秀庆, 王颖慧, 等. 中国产业结构变化对能源强度的影响[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2299-2309. [Ma X W, Shi X Q, Wang Y H, et al. Impacts of industrial structural change on energy intensity in China[J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2299-2309.]
- [27] 赵娜娜, 王志宝, 李鸿梅. 中国能耗模式演变及其对经济发展的影响[J]. 资源科学, 2021, 43(1): 122-133. [Zhao N N, Wang Z B, Li H M. Change of energy consumption pattern and its impact on economic development in China[J]. Resources Science, 2021, 43(1): 122-133.]
- [28] Anselin L. Spatial Econometrics: Methods and Models[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.



## Spatial effect of informatization on China's energy intensity: Based on spatial Durbin error model

WANG Xiaoying<sup>1</sup>, WANG Yilong<sup>1</sup>, SHEN Lei<sup>2</sup>, LI Xiaoman<sup>1</sup>, Du Qiangtao<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The externality of informatization leads to technology spillover and promotes the spatial effect of informatization on energy intensity. Based on the spatial differentiation and spatial autocorrelation of regional development, this paper studies the influence of informatization on energy intensity and the spatial effect among different regions, using the provincial panel data of China from 2006 to 2017 and the spatial Durbin error model. This paper measures the energy intensity and informatization level of 30 provinces in China, and reveals the spatial effect mechanism of informatization level on energy intensity. The results show that: (1) The spatial agglomeration phenomenon of informatization level and energy intensity is very significant, and the adjacent areas of 30 provinces (cities and districts) in China show similar agglomeration distribution; (2) Informatization level, urbanization and energy consumption structure have significant negative impacts on regional energy intensity, but industrial structure has no significant impact on regional energy intensity. (3) The effect of informatization on energy intensity shows a significant spatial spillover effect. The improvement of informatization level in neighboring areas of a certain region will promote the decrease of energy intensity in the region. For every 1% change of informatization level in neighboring areas, the spatial effect will make the regional energy intensity change in the opposite direction by 1.396%. It is suggested that all regions should pay attention to the role of informatization level in reducing regional energy intensity. To build a policy system that information-based development promotes the reduction of energy intensity; Strengthen regional cooperation and common development; Promote informatization construction and inter-regional cooperation and exchanges; We will improve the energy consumption structure.

**Key words:** energy intensity; informatization; spatial effect; spatial Durbin error model; Moran's  $I$