

引用格式: 黄杰. 中国能源环境效率的空间关联网络结构及其影响因素[J]. 资源科学, 2018, 40(4): 759-772. [Huang J. The spatial network structure of energy-environmental efficiency and its determinants in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(4): 759-772.] DOI: 10.18402/resci.2018.04.10

# 中国能源环境效率的空间关联网络结构及其影响因素

黄 杰

(信阳师范学院商学院, 信阳 464000)

**摘 要:** 提升能源环境效率不仅是中国生态文明建设的客观要求, 也是实现经济社会可持续发展的必然选择。文章以 1995—2015 年中国省际面板数据为样本, 采用非径向、非角度、双导向的窗口 DEA 模型测度出 30 个省份的能源环境效率, 并利用 VAR 格兰杰因果检验方法识别中国省际能源环境效率的空间关联关系, 在此基础上通过社会网络分析(SNA)方法揭示中国省际能源环境效率的空间关联网络特征及其影响因素。结果表明, 中国省际能源环境效率呈现出显著的、复杂的空间关联网络结构。板块分析显示: 东部省份主要位于“净溢出板块”, 是中国能源环境效率提升的“发动机”, 在网络中处于核心地位, 而西部省份主要位于“净受益板块”, 在网络中处于边缘地位; 经济发展水平、能源消费结构、产业结构、环境规制和技术创新的地区差异与能源环境效率的空间关联网络呈显著相关关系, 相似的经济水平和发展阶段及相近的技术水平有利于中国省际能源环境效率空间关联网络的形成。能源环境效率空间关联的网络结构为中国节能减排政策的制定和实施带来严峻挑战, 同时也为新时代区域协调发展战略的实施、能源环境效率跨区域协同提升机制的构建创造了条件。

**关键词:** 能源环境效率; 窗口 DEA 模型; 格兰杰因果检验; 空间网络结构; 影响因素; 中国

DOI: 10.18402/resci.2018.04.10

## 1 引言

能耗总量增加, 环境污染加剧, 已成为制约中国经济社会可持续发展的重要障碍。近年来, 党和政府相继出台《关于加快推进生态文明建设的意见》<sup>[1]</sup>、《生态文明体制改革总体方案》<sup>[2]</sup>等重大纲领性文件, 旨在建立起节约循环高效的资源利用体系, 全面提升能源环境效率, 推动经济发展方式转变, 实现绿色发展, 这不仅是中国长远发展的战略选择, 也是解决资源环境问题、收获“金山银山”和“绿水青山”的必然要求。然而, 中国省际能源环境效率在不同的经济结构、技术水平、能源消费模式等因素的共同作用下呈现出显著的区域差异<sup>[3-7]</sup>, 同时在区域协调发展战略以及市场机制双重力量的共同推动下, 能源环境效率的空间关联已经呈现出

系统的、复杂的网络结构形态, 因此从网络视角重新审视中国能源环境效率的时空关系及其提升策略已成为学术界的未来研究趋势<sup>[8]</sup>。在此背景下, 科学测度中国的能源环境效率, 深入分析中国省际能源环境效率的空间关联网络结构及其影响因素, 明确各地区在空间关联网络中的地位和作用, 对新常态下构建中国能源环境效率的跨区域协同提升机制具有重要的理论意义和应用价值。

学术界对能源效率的测度主要从单要素和全要素两种视角。由于单要素能源效率在测度过程中忽略了能源本身作为一种生产投入要素, 并不能独立对经济增长产生作用的基本事实, 学者们逐渐倾向在全要素框架下对能源效率进行综合评价。如 Hu 等率先使用全要素能源效率指标对中国的能

收稿日期: 2017-03-13; 修订日期: 2017-10-06

基金项目: 河南省哲学社会科学项目(2017CJJ095); 河南省政府决策招标项目(2017B255); 信阳师范学院“南湖学者奖励计划”。

作者简介: 黄杰, 男, 河南驻马店人, 博士, 讲师, 主要研究方向为资源环境经济学。E-mail: huangjiernn@163.com

源环境效率展开分析,然而其并未把非期望产出考虑在内<sup>[9]</sup>。Wu等和Mandal等指出,忽略非期望产出的DEA模型将导致能源效率测度结果出现偏差<sup>[10,11]</sup>。Wang等在随后的研究中通过对比包含非期望产出的能源效率和不包含非期望产出的能源效率,证实了这种偏差的存在<sup>[12]</sup>。李兰冰在全要素和多产出框架下从静态和动态两个视角对中国区域能源效率进行测度发现,忽略非合意产出将导致中国全要素能源效率被高估<sup>[13]</sup>。朱德米等将工业“三废”以及烟(粉)尘等污染物作为环境因素纳入全要素能源效率框架下的DEA模型,对中国省际能源效率测度,发现环境因素是导致中国能源效率较低的重要因素<sup>[14]</sup>。此后,王娟等采用包含非期望产出的DEA模型对中国工业能源环境效率进行了测度<sup>[15]</sup>。

随着学者们对空间因素的重视以及空间计量分析技术的发展,针对能源环境效率空间关联关系的研究也日渐增多。已有文献主要从能源效率的空间关联关系及时空收敛性两个维度展开。如余永泽等认为从本质上来看,效率属于“技术”范畴,而技术创新具有空间外溢效应<sup>[16]</sup>。徐盈之等研究证实中国区域能源效率之间存在显著的空间相关性,且有不断增强之势<sup>[17]</sup>。关伟等通过对中国能源生态效率的空间格局和空间效应研究发现,中国相邻地区之间的能源生态效率存在着明显的空间溢出效应<sup>[18]</sup>。潘雄锋等,于斌斌采用探索性空间分析方法证实了中国省际能源效率在空间上存在显著的相关性和依赖性<sup>[4,7]</sup>。Hu等研究发现,中国省际间能源效率的差异性在降低,能源效率存在着一定的趋同性<sup>[9]</sup>。师博等运用能源效率变异系数,考察发现中国整体的能源效率是趋异的,西部显示出发散的特征,东部表现出趋同的特征,而中部则有向东部收敛的态势<sup>[19]</sup>。

现有文献为本文的研究奠定了良好基础,但也存在着一些不足之处。一是传统的DEA模型只能测算出某一个时间点上的静态效率指数,无法对该效率指数进行动态对比<sup>[20]</sup>。二是已有研究多数认为能源环境效率的空间溢出关联关系主要来自于相邻地区能源环境效率的溢出影响,且溢出效应大小受地区间距离远近影响,缺少从更大范围、更广空

间关联关系视角的定量测度和刻画。三是现有研究均是基于“属性数据”而非“关系数据”,“属性数据”只能反映各地区能源环境效率的现状,而无法准确刻画能源环境效率的空间关联“关系”的网络结构特征。

鉴于此,本文采用考虑环境约束的、非径向、非角度、双导向窗口DEA模型对中国1995—2015年省际能源环境效率进行测度,从“关系”角度出发,在VAR模型框架下利用格兰杰因果检验方法识别中国省际能源环境效率的空间关联关系,并以此为基础构建空间关联网络矩阵,借助社会网络分析(Social Network Analysis, SNA)方法对中国省际能源环境效率空间关联网络的结构特征及其影响因素进行分析,旨在从网络化视角为优化中国能源环境效率的整体空间格局、实现能源环境效率的跨区域协同提升提供对策建议。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 能源环境效率的测度及空间分析

#### 2.1.1 能源环境效率测度

结合已有研究,本文将能源环境效率定义为在全要素框架下考虑环境约束时的能源效率。假设有 $J$ 个被评价单元 $DUM_j(j=1, 2, \dots, J)$ ,每个单元在生产中使用 $I$ 种非能源投入 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, I)$ 和 $R$ 种能源投入 $e_{ij}(r=1, 2, \dots, R)$ ,生产出 $K$ 种期望产出 $y_{ij}(k=1, 2, \dots, K)$ 和 $H$ 种非期望产出 $p_{hj}(h=1, 2, \dots, H)$ 。在Färe等构建的环境生产技术分析框架<sup>[21]</sup>下,可以建立起CCR模型,即规模性报酬不变条件下投入导向的径向DEA模型<sup>[22]</sup>。然而,传统DEA模型在进行效率测度时存在两方面缺陷:①如果仅从一个角度(投入角度或产出角度)而忽略另一个角度的测度结果并不准确<sup>[23]</sup>,且基于两个角度分别测度出效率值往往会存在冲突<sup>[21]</sup>,并不具可比性;②如果变量存在非零松弛时,径向DEA模型则会高估决策单元的效率<sup>[24]</sup>。为克服径向和角度DEA模型的不足,提升测度结果的准确性,本文选择非径向、非角度、双导向能源环境DEA模型。

$$E = \min \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \theta_r + \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \phi_h \right) \quad (1)$$

2018年4月

$$\begin{aligned}
& \text{s.t. } \sum_{j=1}^J \lambda_j x_{ij} + s_i^x = x_{i0} \\
& \sum_{j=1}^J \lambda_j e_{rj} + s_r^e = \theta_r e_{r0} \\
& \sum_{j=1}^J \lambda_j y_{kj} + s_k^{y^+} = y_{k0} \\
& \sum_{j=1}^J \lambda_j p_{hj} = \varphi_h p_{h0} \\
& \lambda_j, s_i^x, s_r^e, s_k^{y^+} \geq 0; j=1, 2, \dots, J; i=1, 2, \dots, I; \\
& r=1, 2, \dots, R; k=1, 2, \dots, K; h=1, 2, \dots, H
\end{aligned} \quad (2)$$

式中  $E$  为能源环境效率值;  $s_i^x, s_r^e, s_k^{y^+}$  为模型中的松弛变量, 如果  $E=1$ , 且  $s_i^x = s_r^e = s_k^{y^+} = 0$ , 则认为该决策单元为 DEA 有效, 否则认为被评价单元存在改进空间;  $\theta_r$  为能源投入效应;  $\varphi_h$  为污染排放效应;  $\lambda_j$  为相对于被评价决策单元而重新构造的一个有效决策单元组合中第  $j$  个决策单元的组合比例。由于模型(1)测度出的是静态效率值, 无法反映各省份能源环境效率在时间序列上的变化趋势, 因此, 需在模型(1)的基础上构建能源环境 DEA 窗口模型<sup>[25]</sup>。

$$\begin{aligned}
E_{mn} &= \min \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \theta_r^{mn} + \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \varphi_h^{mn} \right), \\
m &= 1, 2, \dots, (T-W+1); \quad n = 1, 2, \dots, W \\
& \text{s.t. } \sum_{j=1}^{W \times J} \lambda_j^{mn} x_{ij}^{mn} + s_i^{x, mn} = x_{i0}^{mn} \\
& \sum_{j=1}^{W \times J} \lambda_j^{mn} e_{rj}^{mn} + s_r^{e, mn} = \theta_r^{mn} e_{r0}^{mn} \\
& \sum_{j=1}^{W \times J} \lambda_j^{mn} y_{kj}^{mn} + s_k^{y^+, mn} = y_{k0}^{mn} \\
& \sum_{j=1}^{W \times J} \lambda_j^{mn} p_{hj}^{mn} = \varphi_h^{mn} p_{h0}^{mn} \\
& \lambda_j^{mn}, s_i^{x, mn}, s_r^{e, mn}, s_k^{y^+, mn} \geq 0; j=1, 2, \dots, W \times J; \\
& i=1, 2, \dots, I; r=1, 2, \dots, R; k=1, 2, \dots, K; \\
& h=1, 2, \dots, H
\end{aligned} \quad (4)$$

式中各变量的含义与模型(1)相同,  $m$  和  $n$  表示该变量是在第  $m$  个窗口内的第  $n$  个时点上的变量; 在本文中,  $J=30, I=2, R=1, K=1, H=2, W=3$ 。在选择带宽为  $W$  时, 如果样本时间长度为  $T$ , 则需要对每一个决策单元建立起  $T-W+1$  窗口进行效率测度。每一个决策单元在第  $m$  个窗口上就会有  $W$  个

效率值, 最后采用移动平均法求出各个时点上的平均效率, 以此作为被评价单元可以在时间序列上进行比较的效率值。

### 2.1.2 能源环境效率空间关联网络的构建

关系的确定是网络分析的关键<sup>[26]</sup>。现有文献主要采用引力模型和 VAR 格兰杰因果检验方法来确定变量之间的关系, 本文选择 VAR 格兰杰因果检验方法来确定中国省际能源环境效率之间的关联关系, 以此构建空间关联网络矩阵。首先, 定义两个地区的能源环境效率时间序列分别为  $\{x_t\}$  和  $\{y_t\}$ , 其次, 构造两个 VAR 模型来检验两地区间的能源环境效率变动是否存在格兰杰因果关系:

$$x_t = \alpha_1 + \sum_{i=1}^m \beta_{1,i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^n \gamma_{1,i} y_{t-i} + \varepsilon_{1,t} \quad (5)$$

$$y_t = \alpha_2 + \sum_{i=1}^p \beta_{2,i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^q \gamma_{2,i} y_{t-i} + \varepsilon_{2,t} \quad (6)$$

式中  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i (i=1, 2)$  为待估参数;  $\{\varepsilon_{i,t}\} (i=1, 2)$  为残差项, 服从标准正态分布;  $m, n, p, q$  为自回归项的滞后阶数。如果检验结果为  $A$  地区是  $B$  地区之间的格兰杰因时, 则表示  $A$  地区对  $B$  地区存在显著的空间关联效应。据此, 在两个地区之间画一条由  $A$  指向  $B$  的有向连线, 以此类推构建出中国 30 个省份 (不包括港澳台和西藏) 的空间关联网络。

### 2.1.3 网络结构特征的刻画

本文以“关系数据”为基础, 采用网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率四个指标对中国省际能源环境效率空间关联网络结构的整体特征进行衡量<sup>[27]</sup>。其中, 网络密度是衡量能源环境效率空间关联效应大小的重要指标, 密度越大, 说明能源环境效率的空间关联关系越紧密。网络关联度主要用来衡量能源环境效率空间关联网络的稳健性, 如果关联度等于 1, 说明所有省份均处于整体网络当中, 网络的稳健性较强, 否则认为至少有一个省份游离于整体网络之外, 网络缺乏稳健性。网络等级度是用来描述网络节点中的非对称可达程度, 等级度越高, 反映出各省份在能源环境效率空间关联网络中的地位差异越大, 少数省份在网络中处于核心地位, 而其余省份则在能源环境效率空间关联网络中处于边缘地位。网络效率主要用来反映能源环



境效率空间关联渠道的多少,效率越低,能源环境效率空间关联渠道就越多,空间关联网络就越稳定。

中国省际能源环境效率空间关联网络的个体特征主要从度数中心度、接近中心度和中介中心度三个维度来刻画<sup>[27]</sup>。其中,度数中心度可以反映出各省份在空间关联网络中的地位,度数越高,说明该省份在网络中与其他省份之间的联系就越紧密,同时反映出该省份在能源环境效率空间关联网络中处于的核心地位。接近中心度主要用来刻画各省份能源环境效率“不受其他省份控制”的程度,度数越高,说明该省份与网络中其他省份的“距离”越短,该省份就更容易与其他省份产生直接关联,是空间关联网络中的中心行动者。中介中心度主要用来反映某个省份在多大程度上控制其他省份之间的关联关系,度数越高,说明该省份越能控制其他省份在能源环境效率方面的空间关联关系,即,该省份在省际能源环境效率的空间关联网络的形成中,起着关键的桥梁中介作用。

#### 2.1.4 块模型分析

块模型是社会网络空间聚类分析的重要手段。通过块模型分析,可以揭示和刻画出能源环境效率空间关联网络的内部结构状态以及各节点(省份)在板块中的位置和作用,进而可以对各板块之间的关联关系展开深入分析。参考刘华军等的研究<sup>[28]</sup>,本文将能源环境效率空间关联网络中的板块划分为四种类型。一是净溢出板块,此类板块对其他板块发出的关系远多于其接收来自其他板块的溢出关系;二是双向溢出板块,此板块成员既发出关系也接收来自其他板块的溢出关系,而来自板块内部成员的联系相对较多;三是净受益板块,此板块中的成员既接收来自其他板块成员的溢出关系同时也接受来自板块内部关系的溢出,而接收来自板块外部的关系明显多于他对其他板块的溢出关系;四是经纪人板块,此板块既对外产生联系也接收来自其他板块的溢出,且该板块与其他板块成员之间的联系要多于该板与板块内部成员之间的联系。

#### 2.2 能源环境效率空间关联的影响因素分析

影响能源环境效率的因素很多,主要涉及结构因素、行为主体因素和外部冲击三个方面。其中结

构因素包括产业结构、产权结构和能源消费结构及内生禀赋结构(资本-劳动比)等方面<sup>[29-31,7]</sup>;行为主体因素包括政府对环境的影响(环境规制)和企业生产的环境自控能力等方面<sup>[32-34]</sup>;外部冲击因素包括对外开放程度、技术进步和经济发展水平等方面<sup>[35-38]</sup>。潘文卿和刘华军等指出区域差异是影响空间关联紧密程度的重要因素<sup>[39,28]</sup>,据此推测能源环境效率影响因素的区域差异对中国省际能源环境效率的空间关联效应具有重要影响。借鉴已有文献,本文将能源环境效率空间关联关系的影响因素设定如下:① 经济发展水平的地区差异。在市场机制的作用下,生产要素更容易在经济发展水平相近的区域流动,因此能源环境效率在经济发展水平相近的区域间更容易产生关联;② 能源消费结构的地区差异。能源消费结构的差异主要表现在化石燃料的使用上,在不同能源消费结构下,能源环境效率具有较大差异,这种差异可能更有利于能源环境效率空间关联关系的形成;③ 产业结构的地区差异。能源环境效率与第三产业的发展密切相关,第三产业的迅速发展有利于强化能源环境效率空间关联关系;④ 环境规制的地区差异。省际环境规制的差异越大,环境规制较高省份的企业则有向环境规制强度低的地区转移,从而引起生产要素的流动,会增强能源环境效率在省际间的关联效应;⑤ 技术创新水平的地区差异。省际间技术创新水平的差异可能会阻碍新技术在区域间的转移吸收,不利于能源环境效率在省际间关联作用的形成。基于上述影响因素,构建模型如下:

$$D=f(PG_c, ES_c, IS_c, ER_c, TI_c) \quad (7)$$

式中被解释变量  $D$  是指根据 VAR 格兰杰因果检验确定的省际能源环境效率空间关联关系的二值网络矩阵; $PG_c$  为经济发展水平的差异矩阵; $ES_c$  为能源消费结构的差异矩阵; $IS_c$  为产业结构的差异矩阵; $ER_c$  为环境规制强度的差异矩阵; $TI_c$  为技术创新水平的差异矩阵。除  $D$  外,其余指标数据均是由 1995—2015 年各省份均值的绝对差异构成。由于本文采用的是“关系数据”,解释变量之间具有较高的相似性,为避免多重共线性带来的测量误差,本文采用社会网络分析中的非线性二次指派程序(Quadratic

2018年4月

Assignment Procedure, QAP)方法对中国省际能源环境效率空间关联网络的影响因素进行实证考察。

### 2.3 数据来源及处理

在能源环境效率测度方面,根据能源环境DEA窗口模型的要求,本文选择能源投入、非能源投入(资本和劳动力)、合意产出和非合意产出作为投入产出数据,各指标的计算法见表1。在能源环境效率空间关联影响因素分析方面,参考前人研究,本文主要考虑经济发展水平、能源消费结构、产业结构、环境规制和技术创新水平5种因素的地区差异对我国省际能源环境效率空间关联关系的影响,各影响因素的测度见表2。根据数据的可获得性,本文选择1995—2015年中国30个省份(不包含港澳台和西藏)的为样本,数据主要来源于1996—2016年《中国统计年鉴》<sup>[42]</sup>、《中国环境年鉴》<sup>[43]</sup>、《中国能源统计年鉴》<sup>[44]</sup>、《中国人口和就业统计年鉴》<sup>[45]</sup>和《新中国六十年统计资料汇编》<sup>[46]</sup>。

## 3 省际能源环境效率的空间关联网络特征

### 3.1 空间分布格局

中国省际能源环境效率的测度结果如表3所示,在样本考察期内,东部地区的能源环境效率均值在0.681~0.726之间,中部地区在0.343~0.497之间,西部地区在0.333~0.402之间,东中西三大区域

间的能源环境效率呈现出显著差异。为进一步了解中国能源环境效率的省域和区域差异,本文以2015年为例,利用ArcGIS中的趋势分析工具对中国省际能源环境效率的空间分布趋势进行可视化描述,如图1所示,Z轴代表省际能源环境效率值,X为西东方向,Y为南北方向。倒“U”型趋势线表明,中国省际能源环境效率在空间上存在显著的区域差异,在东西方向上,东部地区要高于西部地区;在南北方向上,南部地区要高于北部地区,呈现出显著的空间非均衡特征。

### 3.2 空间关联网络结构特征

通过VAR格兰杰因果检验构造出中国省际能源环境效率的空间关联关系矩阵,基于Ucinet可视化工具Netdraw绘制出中国30个省份的空间关联网络,如图2所示。结果表明,中国省际能源环境效率空间关联关系总数为236,整体网络密度是0.275。这说明在样本考察期内中国省际能源环境效率呈现出显著的空间关联关系,但从数值上看中国省际能源环境效率的空间关联关系的紧密程度并不高,30个省份之间的最大关系数为870(30×29),而格兰杰因果检验识别的实际关系数只有236。因此,加强中国省际能源环境效率之间的空间关联关系,提升空间关联网络的稳定性还存在较大空间。

整体网络特征的其余指标显示,中国省际能源

表1 DEA模型投入产出因素与变量说明

Table 1 Input-output factors and variables in the DEA model

投入产出要素	变量	定义
能源投入	能源消费总量/万 tce	各省按标准煤折算的能源消费总量
非能源投入	资本投入/亿元	参考单豪杰的研究 <sup>[40]</sup> 采用“永续盘存法”计算
	劳动力投入/万人	各省份年底就业人数数据
合意产出	地区生产总值/万亿元	以1978年为基期计算出的各省份实际地区生产总值
非合意产出	二氧化碳排放量/万 t	根据《国家温室气体排放清单指南》 <sup>[41]</sup> 提供方法计算
	二氧化硫排放量/万 t	二氧化硫排放总量

表2 能源环境效率空间关联影响因素与变量说明

Table 2 Factors and variables of energy-environmental efficiency spatial correlation

影响因素	变量	定义
经济发展水平	人均GDP地区差异( $PG_c$ )	以1978年为基期计算的各省份实际人均GDP的地区差异
能源消费结构	能源消费结构地区差异( $ES_c$ )	煤炭消费量占能源消费总量之比的地区差异
产业结构	产业结构地区差异( $IS_c$ )	第三产业占GDP之比的地区差异
环境规制	环境规制强度地区差异( $ER_c$ )	污染治理投资占工业增加值之比的地区差异
技术创新水平	技术创新地区差异( $TI_c$ )	每百名科技人员拥有的授权专利数量的地区差异

表3 1995—2015年中国省际能源环境效率

Table 3 Energy-environmental efficiency of China from 1995 to 2015

年份	1995	2000	2005	2010	2015	年份	1995	2000	2005	2010	2015
北京	0.735	0.810	1.000	0.976	1.000	江西	1.000	0.903	0.836	0.717	0.654
天津	0.597	0.609	0.744	0.610	0.562	河南	0.463	0.461	0.354	0.329	0.309
河北	0.433	0.435	0.346	0.331	0.309	湖北	0.466	0.524	0.331	0.340	0.355
辽宁	0.433	0.447	0.348	0.325	0.340	湖南	0.418	0.488	0.316	0.274	0.286
上海	0.981	1.000	0.949	0.961	0.976	中部均值	0.497	0.511	0.440	0.368	0.343
江苏	0.682	0.964	0.664	0.806	0.942	广西	0.491	0.496	0.401	0.329	0.283
浙江	0.734	0.757	0.595	0.568	0.571	重庆	0.460	0.385	0.376	0.323	0.345
福建	0.910	1.000	0.455	0.376	0.344	四川	0.329	0.392	0.287	0.263	0.290
山东	0.492	0.526	0.409	0.444	0.450	贵州	0.298	0.290	0.241	0.278	0.290
广东	0.987	1.000	1.000	0.975	1.000	云南	0.447	0.454	0.333	0.282	0.254
海南	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	陕西	0.366	0.432	0.365	0.332	0.314
东部均值	0.726	0.777	0.683	0.670	0.681	甘肃	0.440	0.651	0.794	0.466	0.618
山西	0.308	0.285	0.294	0.263	0.231	青海	0.350	0.339	0.350	0.350	0.350
内蒙古	0.447	0.518	0.702	0.425	0.350	宁夏	0.420	0.326	0.474	0.381	0.289
吉林	0.435	0.487	0.416	0.356	0.352	新疆	0.418	0.418	0.378	0.348	0.292
黑龙江	0.512	0.509	0.379	0.313	0.279	西部均值	0.402	0.418	0.400	0.335	0.333
安徽	0.421	0.426	0.327	0.295	0.271	全国均值	0.541	0.569	0.507	0.458	0.452

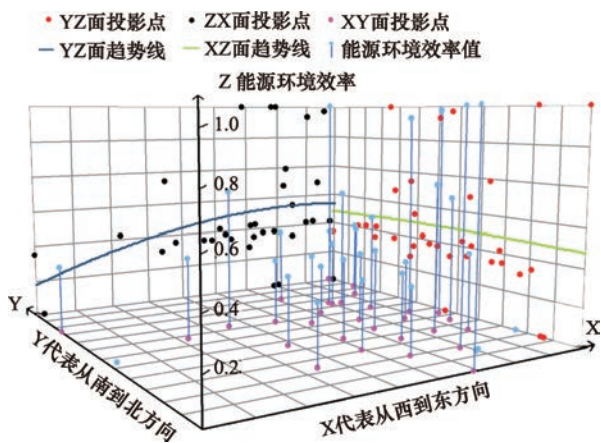


图1 1995—2015年中国省际能源环境效率的演变趋势  
Figure 1 Evolution trend of energy-environmental efficiency of China from 1995 to 2015

环境效率之间存在显著的空间关联溢出效应。其中,网络关联度为1,说明所有省份均处于能源环境效率的空间关联网络当中,网络节点间具有较好的联通性,即中国各省份能源环境效率之间存在显著的空间溢出效应。网络等级度为0.025,这说明中国省际能源环境效率空间关联网络中的各个省份之间并不存在明显的等级性,在各个层次上的能源环境效率均有可能对其他省份产生溢出效应。网络效率为0.544,表明该网络当中存在较多的冗余连

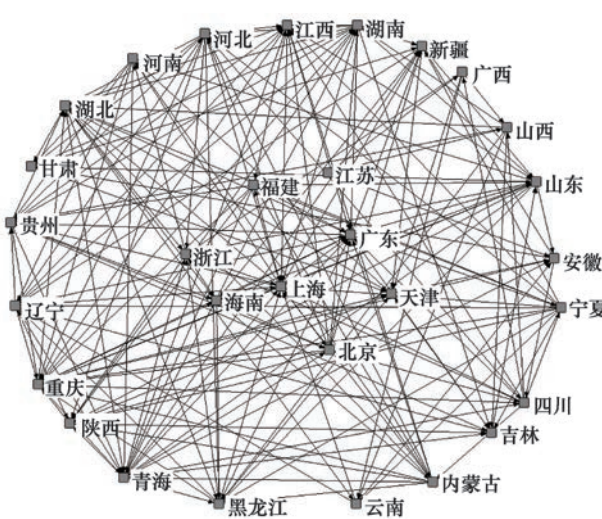


图2 1995—2015年中国省际能源环境效率空间关联网络  
Figure 2 Spatial network structure of energy-environmental efficiency of Chian from 1995 to 2015

线,同时也反映出中国省际能源环境效率之间的空间溢出效应存在显著的多重叠加现象,增强了网络的联通性和稳定性。上述结果产生的可能原因在于,随着市场化进程的加快,各省份之间的行政壁垒逐渐被打破,市场在资源配置过程中开始发挥主导作用,从而强化了各地区之间在能源、贸易、技术方面的交流与合作,增加了省际能源环境效率的空



2018年4月

间关联渠道,增强了网络的稳定性。

为揭示各省份在能源环境效率空间关联网络中的地位和作用,本文对中国30个省份的个体网络特征进行测度,如表4所示,在全国30个省份中,度数中心度均值为45.977,超过均值且位居前五的省份分别为上海、江苏、浙江、天津和安徽,这些省份主要集中于东南沿海地区,经济发展水平较好、能源环境效率较高,较高的点出度和较低点入度则反映出这些省份主要是对其他省份的能源环境效率产生溢出效应,在省际能源环境效率空间关联网络中处于核心位置,原因在于这些省份主要位于东南沿海地区,经济发达、技术先进,从技术溢出的角

度看,这些地区更容易向能源环境效率较低地区产生技术外溢效应。排名居于后五位的省份是贵州、黑龙江、陕西、内蒙古和青海,这些省份主要集中于东北和西北地区,较低的点出度和较高的点入度则反映出这些省份在中国省际能源环境效率空间关联网络中主要以接收来自其他省份的溢出关系为主,受其他省份的影响较大,原因可能是这些省份的经济发展相对落后、能源环境效率较低以及它们所处的地理位置相对偏远,从而导致这些省份的能源环境效率与其他省份之间的空间关联较弱。全国30个省份能源环境效率空间关联网络的溢出与接收关系,如图3所示,东南沿海地区各省份的能源

表4 1995—2015年中国省际能源环境效率空间关联网络的中心性

Table 4 Network centrality of energy-environmental efficiency of China from 1995 to 2015

省份	度数中心度				接近中心度		中介中心度	
	点出度	点入度	中心度	排序	中心度	排序	中心度	排序
北京	15	4	55.172	10	69.048	10	3.713	6
天津	16	7	65.517	4	74.359	4	5.772	4
河北	6	3	31.034	23	59.184	23	0.858	16
山西	5	5	31.034	24	59.184	24	0.698	21
内蒙古	6	4	27.586	27	55.769	28	0.510	23
辽宁	6	10	51.724	11	67.442	11	0.960	15
吉林	10	8	58.621	7	70.732	7	3.719	5
黑龙江	5	4	20.690	29	55.769	29	0.214	27
上海	10	1	86.207	1	87.879	1	8.376	2
江苏	14	5	82.759	2	85.294	2	8.460	1
浙江	19	5	72.414	3	78.378	3	6.356	3
安徽	15	11	65.517	5	74.359	5	3.379	7
福建	11	5	62.069	6	72.500	6	2.052	8
江西	8	8	44.828	14	64.444	14	0.478	24
山东	10	10	48.276	13	65.909	13	0.978	14
河南	9	5	41.379	15	63.043	15	0.266	26
湖北	9	7	51.724	12	67.442	12	1.313	10
湖南	9	5	58.621	8	70.732	8	1.694	11
广东	15	3	58.621	9	70.732	9	1.778	9
广西	2	9	37.931	18	61.702	18	0.836	17
海南	2	10	41.379	16	63.043	16	1.105	13
重庆	2	7	31.034	25	58.000	26	0.207	29
四川	3	8	34.483	19	60.417	19	0.746	19
贵州	1	15	20.690	30	54.717	30	0.159	30
云南	6	14	34.483	20	60.417	20	1.143	12
陕西	5	4	24.138	28	56.863	27	0.209	28
甘肃	5	15	41.379	17	63.043	17	0.782	18
青海	3	16	31.034	26	59.184	25	0.561	22
宁夏	2	13	34.483	21	60.417	21	0.733	20
新疆	7	15	34.483	22	60.417	22	0.320	25
均值	7.8	7.8	45.977	—	65.681	—	1.946	—

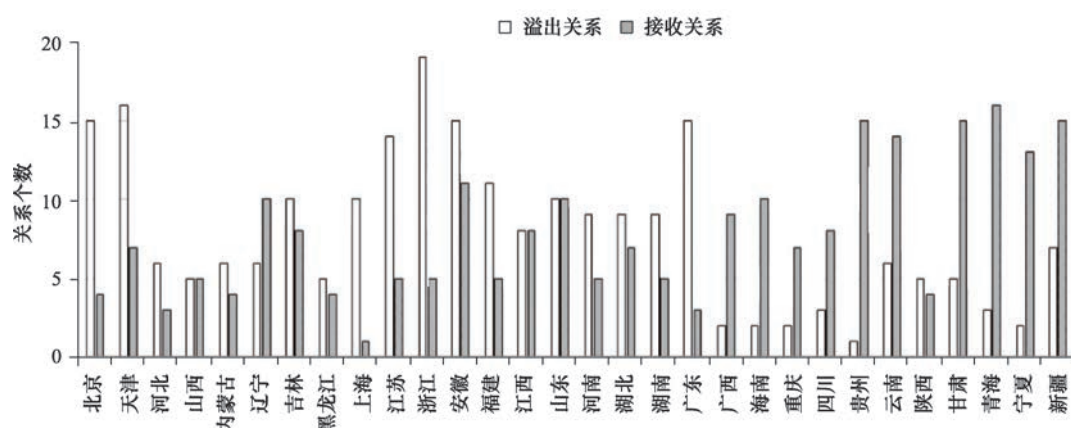


图3 1995—2015年中国30个省份能源环境效率的溢出与接收关系

Figure 3 The spillover and receive relationship of energy-environmental efficiency of China from 1995 to 2015

环境效率对外发出的溢出关系大都高于其所接收的关系,而西部省份与其他省份的关联关系大都以接收其他省份的效率溢出为主。

接近中心度的全国均值为65.681,超过均值且位居前五的省份分别为上海、江苏、浙江、天津和安徽,说明这些省份在省际能源环境效率空间关联网络中与其他省份之间的距离较短,能够与其他省份快速发生关联,在网络中具有“引领”作用。其原因在于上述省份主要位于东南沿海地区与内陆地区经贸联系较为密切,所以这些省份与其他省份之间关联效率更高,同时也具有较强的能源环境效率提升能力。贵州、黑龙江、内蒙古、陕西和重庆、等省份的接近中心度较低,这些省份受其能源环境效率较低及其地理位置的限制,在网络中处于边缘地位。

中介中心度的全国均值为1.964,超过均值且位居前五的省份分别为江苏、上海、浙江、天津和吉林,说明在中国省际能源环境效率空间关联网络中,上述地区对省际间能源环境效率空间关联关系的形成起“桥梁”中介作用,对整个网络的形成具有较强控制力,是网络中的关键节点。原因可能是随着上海、江苏、浙江等地在金融服务、物流航运、能源技术、信息服务等方面的中心地位进一步确立,这些省份对我国能源环境效率空间关联网络的控制和支配能力显著提升。贵州、重庆、陕西、黑龙江、河南等省份的中介中心度远低于全国均值,这些省份经济发展相对迟缓、地理位置较偏、能源环

境效率较低等,在中国省际能源环境效率空间关联网络中很难影响和控制其他省份。

### 3.3 块模型分析

采用Ucinet软件中的CONCOR模块,以深度为2、集中度为0.2的标准,并结合各节点接收和发出的关系总数及其期望比例与实际比例的大小对中国省际能源环境效率的整体网络进行板块划分,即聚类分析。结果显示,第一板块由北京、天津、江苏、广东、内蒙古、上海、浙江7省份构成;第二板块由江西、辽宁、湖北、山东、安徽、福建6省份构成;第三板块由吉林、贵州、湖南、广西、海南、四川、重庆7省份构成;第四板块由青海、黑龙江、河南、河北、云南、山西、甘肃、宁夏、新疆、陕西10省份构成。区域板块划分结果显示,在第一板块中除内蒙古外,其他节点均来自于以溢出关系为主的东部地区,而在第四板块中除了河南、山西两省外,其余节点均来自于以接收关系为主的西部地区。

块模型分析结果如表5所示:在中国省际能源环境效率空间关联网络中,各个板块内部间共有49条空间关联关系,占到关系总数的20.8%。板块间的空间关联关系共有187个占到关系总数的79.2%,这说明省际能源环境效率的空间溢出效应主要以区域间溢出为主。其中,第一板块内部的关系总数为7个,来自其他板块的溢出关系总数高达16个,向其他板块溢出关系总数为52个,期望内部比例关系为21%,大于实际内部比例关系12%,属于“净溢出板块”,该板块的成员主要来自能源环境效



2018年4月

表5 1995—2015年中国省际能源环境效率板块间空间关联关系

Table 5 Spatial correlation of China's energy-environmental efficiency among different blocks from 1995 to 2015

板块	接收关系数合计/个		发出关系数合计/个		期望内部 比例关系/%	实际内部 比例关系/%
	板块内	板块外	板块内	板块外		
第一板块	7	16	7	52	21	12
第二板块	20	40	20	40	17	33
第三板块	7	41	7	55	31	11
第四板块	15	90	15	40	21	27

率较高的东部地区,对其他地区有显著的空间外溢效应,在中国能源环境效率提升中扮演“发动机”角色。第二板块内部的关系总数为20个,来自其他板块的溢出关系为40个,向其他板块溢出关系总数为40个,期望内部比例关系为17%,小于实际内部比例关系33%,属于“双向溢出板块”。第三板块内部的关系总数为7个,来自其他板块的溢出关系为41个,向其他板块溢出关系总数为55个,期望内部比例关系为31%,大于实际内部比例关系11%,属于“经纪人板块”,该板块成员的能源环境效率大都居于中等水平,在省际能源环境效率空间关联网络中起着“承上启下”的“桥梁”中介作用。第四板块内部的关系总数为15个,来自其他板块的溢出关系为90个,向其他板块溢出关系总数为40个,期望内部比例关系为21%,小于实际内部比例关系27%,属于“净受益板块”,该板块成员主要来自西部地区,其能源环境效率相对较低,主要以接收其他板块的效率溢出为主。

为进一步考察能源环境效率板块之间的空间关联关系以及各板块在整体网络空间中所扮演的角色,本文利用中国省际能源环境效率的空间关联网络密度(0.275),将各板块的网络密度矩阵转化为像矩阵如表6所示,并利用Netdraw工具画出各板块间的空间关联关系图,如图4所示。

## 4 能源环境效率空间关联网络结构的影响因素分析

### 4.1 QAP相关性分析

本文首先采用QAP相关性分析来检验省际能源环境效率空间关联网络与上述影响因素之间的相关关系,相关系数的大小反映出该变量对能源环境效率空间关联网络结构影响的大小。其中最大值和最小值分别为重复抽样1万次过程中出现的最大值与最小值; $P \geq 0$ 、 $P \leq 0$ 为抽样过程中每一次得到的相关系数大于等于、小于等于最终相关系数的概率。相关性分析结果如表7所示,经济发展水平差异、能源消费结构差异、产业结构差异、环境规制差异和技术创新水平差异与省际能源环境效率空间网络结构的相关系数都在1%的水平上显著不等于零,说明这五种因素对能源环境效率空间关联网络的形成均具有重要影响。其中,经济发展水平差异、产业结构差异和技术创新水平差异这3个变量的相关系数为负,说明相似的发展阶段和产业结构以及相近的技术水平是中国省际能源环境效率产生空间关联和空间外溢的重要因素;能源消费结构和环境规制两个变量的相关系数为正,说明省际间能源消费结构和环境规制的区域差异有利于中国省际能源环境效率空间关联网络的形成。

表6 中国能源环境效率的板块间密度矩阵与像矩阵

Table 6 The density matrix and image matrix of energy environmental efficiency of China

板块	密度矩阵				像矩阵			
	板块一	板块二	板块三	板块四	板块一	板块二	板块三	板块四
板块一	0.300	0.714	0.112	0.420	1	1	0	1
板块二	0.186	0.381	0.179	0.314	0	1	0	1
板块三	0.087	0.179	0.232	0.150	0	0	0	0
板块四	0.100	0.143	0.325	0.150	0	0	1	0

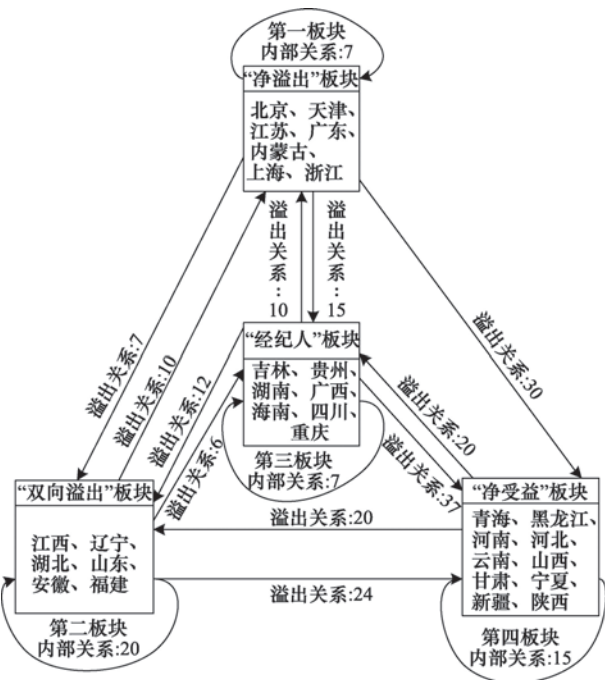


图4 1995—2015年四个能源环境效率板块间的相关关系

Figure 4 Energy environmental efficiency inter-satellite correlation chart of China from 1995 to 2015

4.2 QAP回归分析

QAP回归结果如表8所示,经过1万次随机置换所计算出的调整后可决系数为0.268,这说明地区经济发展水平的差异、能源消费结构的差异、产业结构的差异、环境规制的差异和技术创新水平的差异所构成的差异矩阵大约可以解释中国能源环境效率空间关联网络结构变化的27%,其中概率A和概率B分别表示随机置换过程中产生的回归系数大于等于、小于等于最终回归系数的概率。区域经济发展差异矩阵的回归系数在1%的水平上显著,这说明区域间经济发展差异越小,越有利于能源环境效率空间关联网络的形成。一方面,相似的经济

段,对经济增长和环境改善具有相似的需求,进而导致能源环境效率的趋同,使能源环境效率的空间网络相互联系得到强化;另一方面,在市场机制的作用下,生产要素更容易在经济发展水平相近的区域间流动,从而在客观上为能源环境效率在省际关联效应的产生创造了条件。产业结构差异矩阵的回归系数在10%的水平上显著为负,说明地区间相似性的产业结构对中国能源环境效率空间网络形成具有显著的影响。产业结构的相似一方面意味着相近的发展阶段;另一方面相似的产业结构的会在一定程度上增强区域间在经济和技术上的联系,从而有利于能源环境效率空间关联网络的形成。技术创新差异矩阵的回归系数为负,且在5%的水平上显著,说明地区间相近的技术水平有利于能源环境效率空间关联网络的形成。相近的技术水平是区域间沟通、交流的基础,技术差距越小越有利于区域间资本、技术等方面的溢出和吸收,进而使能源环境效率的空间关联网络结构变得更加稳定。能源消费结构和环境规制的差异矩阵在QAP回归分析中,尽管系数为正,但并不显著,这说明能源消费结构和环境规制的省际差异并不能显著影响中国省际能源环境效率空间关联网络的形成。

5 结论与建议

5.1 研究结论

在对中国省际能源环境效率进行科学测度的基础上,通过VAR格兰杰因果检验模型识别中国省际能源环境效率的空间相关关系,依此构建空间权重矩阵,采用社会网络分析方法揭示中国省际能源环境效率的空间关联网络结构特征,并对其影响因素进行实证考察,得到如下结论:

(1)中国省际能源环境效率的空间关联关系呈现出较为复杂的网络结构,所有省份均处于空间关

表7 中国能源环境效率空间关联影响因素的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of spatial correlation factors of energy environmental efficiency of China

变量名	实际相关系数	显著水平	系数均值	标准差	最小值	最大值	$P \geq 0$	$P \leq 0$
$PG_c$	-0.035	0.000	-0.001	0.011	-0.210	0.225	1.000	0.000
$ES_c$	0.358	0.002	0.000	0.034	-0.251	0.356	0.002	0.998
$IS_c$	-0.106	0.005	-0.003	0.113	-0.225	0.228	0.995	0.005
$ER_c$	0.119	0.000	0.001	0.051	-0.265	0.259	0.000	1.000
$TI_c$	-0.082	0.003	-0.000	0.032	-0.214	0.273	0.998	0.002

2018年4月

表8 中国能源环境效率空间关联影响因素的回归分析

Table 8 Regression analysis of influencing factors of China's energy environmental efficiency

变量	非标准化 回归系数	标准化 回归系数	显著性 概率	概率 A	概率 B
截距项	0.561	0.000	—	—	—
$PG_c$	-0.026	-0.751	0.002	0.998	0.002
$ES_c$	0.031	0.657	0.128	0.128	0.872
$IS_c$	-0.005	-0.063	0.054	0.946	0.054
$ER_c$	0.003	0.216	0.223	0.223	0.777
$TI_c$	-0.012	-0.085	0.014	0.986	0.014

联网络当中,网络整体具有较强的稳定性,各省份的能源环境效率均存在对外溢出的可能。其中,上海、浙江、江苏、天津、安徽等省份在网络中处于主导地位,在全国能源环境效率优化中扮演“发动机”角色,是提升中国能源环境效率的主要驱动力量;贵州、陕西、云南、甘肃、青海等省份在网络中处于边缘地位。

(2)块模型分析表明,北京等7省份属于“净溢出板块”,在网络中处于核心地位,起“引领”作用;江西等6省份属于“双向溢出板块”,在网络中处于中心地位,在板块内外起双向“引领”作用;吉林等7省份属于“经纪人板块”,在网络中处于关键地位,起“桥梁”中介作用;青海等10省份属于“净受益板块”,在网络中处于边缘地位,主要扮演“跟随者”角色。

(3)QAP相关性分析结果表明,能源消费结构差异和环境规制强度差异与中国省际能源环境效率空间关联网络结构呈现出显著的正相关关系;区域经济发展差异、产业结构差异和技术创新水平差异与中国省际能源环境效率空间关联网络结构呈现出显著的负相关关系。QAP回归分析结果表明,相近的经济发展水平和技术水平以及相仿的产业结构均有利于中国省际能源环境效率的空间关联网络结构的形成,而能源消费结构和环境规制的差异对省际能源环境效率空间关联网络的形成影响较小。

## 5.2 政策建议

(1)不断优化中国省际能源环境效率的空间关联网络结构,促进能源环境效率空间关联网络的形成,实现能源环境效率的跨区域协同提升。一方面,积极探寻促进能源环境效率空间关联的有效途径,增加省际能源环境效率的空间关联关系,为能源环境效率的跨区域协同提升创造更多的通道;另

一方面在制定和实施能源环境效率的提升策略时,不仅要关注“属性数据”的大小,也要重视“关系数据”的高低,逐步形成“数量-结构”驱动型的跨区域协同提升机制。

(2)充分把握中国省际能源环境效率空间关联网络结构的板块特征,依据不同板块的社会经济发展特点,制定具有差异化的区域能源环境效率提升策略。一方面,对于经济发达、能源环境效率较高的“净溢出板块”和“双向溢出板块”,要充分利用自身技术和管理方面的优势,加大清洁能源的研发和利用,积极调整板块内部的能源消费结构,减少化石能源的消耗,推动经济绿色发展,以提高能源环境效率;另一方面对于能源环境效率相对不高且经济基础较差的“经纪人板块”和“净收益板块”,在保障经济增长的同时,要制定更为严格的环境规制措施,积极引入“净溢出板块”和“双向溢出板块”的先进能源技术和能源管理手段以提高其能源环境效率。

(3)全面考虑中国省际能源环境效率空间关联网络的影响因素,发挥政府宏观调控和市场机制两种力量对能源环境效率空间关联的促进作用。一方面,政府要通过“有形的手”,积极采取措施提高处于边缘地位省份的能源环境效率,不断缩小能源环境效率空间关联网络中各省份在经济、技术、产业发展等方面的差距,强化省际能源环境效率互联互通,促进中国能源环境效率的整体提升;另一方面,还要充分发挥市场“看不见的手”,减少政府行政干预,利用竞争、供求等市场机制强化核心区域与边缘区域的相互交流,促进边缘地区能源环境效率的提升,以降低中国省域能源环境效率的空间非均衡性。

## 参考文献(References):

- [1] 中国共产党中央委员会,国务院. 关于加快推进生态文明建设的意见[EB/OL]. (2015-04-25)[2017-03-13]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content\\_2864050.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2864050.htm). [The CPC Central Committee and State Council of the PRC. Suggestions on Speeding up the Construction of Ecological Civilization[EB/OL]. (2015-04-25)[2017-03-13]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content\\_2864050.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2864050.htm).]
- [2] 中国共产党中央委员会,国务院. 生态文明体制改革总体方案[EB/OL]. (2015-09-21)[2017-03-13]. [http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-09/21/content\\_2936327.htm](http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-09/21/content_2936327.htm). [The CPC Central



- Committee and State Council of the PRC. Integrated Reform Plan for Promoting Ecological Progress[EB/OL]. (2015-09-21)[2017-03-13]. [http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-09/21/content\\_2936327.htm](http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-09/21/content_2936327.htm). ]
- [ 3 ] 潘雄锋, 杨越, 张维维. 我国区域能源效率的空间溢出效应研究[J]. 管理工程学报, 2014, 28(4): 132-136. [Pan X F, Yang Y, Zhang W W. The spatial spillover effect of China's regional energy efficiency[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2014, 28(4): 132-136. ]
- [ 4 ] 潘雄锋, 刘清, 张维维. 空间效应和产业转移双重视角下的我国区域能源效率收敛性分析[J]. 管理评论, 2014, 26(5): 23-29. [Pan X F, Liu Q, Zhang W W. Analysis of energy efficiency convergence of China from the perspective of spatial effect and industry transfer[J]. *Management Review*, 2014, 26(5): 23-29. ]
- [ 5 ] 关伟, 张华, 许淑婷. 基于DEA-ESDA模型的辽宁省能源效率测度及时空格局演化分析[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 764-773. [Guan W, Zhang H, Xu S T. Spatial and temporal pattern evolution of energy efficiency in Liaoning based on the DEA-ESDA Model[J]. *Resources Science*, 2015, 37(4): 764-773. ]
- [ 6 ] Zhang W, Pan X, Yan Y, et al. Convergence analysis of regional energy efficiency in China based on large-dimensional panel data model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 801-808.
- [ 7 ] 于斌斌. 产业结构调整如何提高地区能源效率?—基于幅度与质量双维度的实证考察[J]. 财经研究, 2017, 43(1): 86-97. [Yu B B. How does industrial restructuring improve regional energy efficiency? An empirical study based on two dimensions of magnitude and quality [J]. *Journal of Finance and Economics*, 2017, 43(1): 86-97. ]
- [ 8 ] 李国平, 王志宝. 中国区域空间结构演化态势研究[J]. 北京大学学报(哲学社会科学版), 2013, 50(3): 148-157. [Li G P, Wang Z B. A study on the evolutionary trend of the regional spatial structure in China [J]. *Journal of Peking University (Philosophy & Social Sciences)*, 2013, 50(3): 148-157. ]
- [ 9 ] Hu J L, Wang S C, Yeh F Y. Total-factor water efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*, 2006, 36(2): 821-833.
- [ 10 ] Wu F, Fan L W, Zhou P, et al. Industrial energy efficiency with CO<sub>2</sub> emissions in China: a nonparametric analysis[J]. *Energy Policy*, 2012, 49(1): 164-172.
- [ 11 ] Mandal S K. Do undesirable output and environmental regulation matter in energy efficiency analysis? Evidence from Indian cement industry[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(10): 6076-6083.
- [ 12 ] Wang Y, Li Y, Kong F Y. Energy efficiency analysis of Beijing using the DEA-Tobit two stage method[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 608-609: 1210-1214.
- [ 13 ] 李兰冰. 中国能源绩效的动态演化、地区差距与成因识别—基于一种新型全要素能源生产率变动指标[J]. 管理世界, 2015, (11): 40-52. [Li L B. Dynamic evolution, regional disparities and causes of China's energy performance: Based on a new index of total factor productivity change[J]. *Management World*, 2015, (11): 40-52. ]
- [ 14 ] 朱德米, 赵海滨. 环境约束下中国能源环境效率区域差异性分析[J]. 南京社会科学, 2016, (4): 15-23. [Zhu D M, Zhao H B. Regional difference analysis of energy environmental efficiency in China under the constraint of environment [J]. *Social Sciences in Nanjing*, 2016, (4): 15-23. ]
- [ 15 ] 王娟, 赵涛, 张啸虎. 2006-2012年中国工业行业能源和环境综合效率及其影响因素[J]. 资源科学, 2016, 38(2): 311-320. [Wang J, Zhao T, Zhang X H. Energy and environmental unified efficiency of industrial sub-sectors and its influencing factors in China [J]. *Resources Science*, 2016, 38(2): 311-320. ]
- [ 16 ] 余泳泽, 刘大勇. 我国区域创新效率的空间外溢效应与价值链外溢效应—创新价值链视角下的多维空间面板模型研究[J]. 管理世界, 2013, (7): 6-20. [Yu Y Z, Liu D Y. The effect of the space outflow of china's regional innovation and the effect of the outflow of value chains: a study, from the perspective of the innovative value chain, on the model of the panel of multidimensional space[J]. *Management World*, 2013, (7): 6-20. ]
- [ 17 ] 徐盈之, 管建伟. 中国区域能源效率趋同性研究: 基于空间经济学视角[J]. 财经研究, 2011, 37(1): 112-123. [Xu Y Z, Guan J W. On the convergence of regional energy efficiency in China: a perspective of spatial economics [J]. *Journal of Finance and Economics*, 2011, 37(1): 112-123. ]
- [ 18 ] 关伟, 张华, 许淑婷. 基于DEA-ESDA模型的辽宁省能源效率测度及时空格局演化分析[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 764-773. [Guan W, Zhang H, Xu S T. Spatial and temporal pattern evolution of energy efficiency in Liaoning based on the DEA-ESDA model[J]. *Resources Science*, 2015, 37(4): 764-773. ]
- [ 19 ] 师博, 张良悦. 我国区域能源效率收敛性分析[J]. 当代财经, 2008, (2): 17-21. [Shi B, Zhang L Y. Convergence analysis of China's regional energy efficiency [J]. *Contemporary Finance & Economics*, 2008, (2): 17-21. ]
- [ 20 ] Charnes A, Clark C T, Cooper W W, et al. . A developmental study of data envelopment analysis in measuring the efficiency of maintenance units in the U. S. air forces [J]. *Annals of Operations Research*, 1984, 2(1): 95-112.
- [ 21 ] Färe R, Kirkley J E, Walden J B. Estimating Capacity and Efficiency in Fisheries with Undesirable Outputs[R]. VIMS Marine Resource Report, No. 2007-6, 2007.
- [ 22 ] Zhou P, Ang B W, Poh K L. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(1): 1-18.
- [ 23 ] Färe R, Lovell C A K. Measuring the technical efficiency of production [J]. *Journal of Economic Theory*, 1978, 9(1): 150-162.
- [ 24 ] Zhou P, Poh K L, Ang B W. A non-radial DEA approach to measuring environmental performance [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 178(1): 1-9.

2018年4月

- [25] 王锋, 冯根福. 基于DEA窗口模型的中国省际能源与环境效率评估[J]. 中国工业经济, 2013, (7): 56-68. [Wang F, Feng F G. Evaluation of China's regional energy and environmental efficiency based on DEA window model[J]. *China Industrial Economics*, 2013, (7): 56-68. ]
- [26] Scott J. Social Network Analysis [M]. London: Sage Publication, 2013.
- [27] 刘军. 整体网分析讲义: UCINET软件实用指南[M]. 上海: 格致出版社, 2014. [Liu J. Lectures on Whole Network Approach: A Practical Guide to UCINET(2nd)[M]. Shanghai: Gezhi Press, 2014. ]
- [28] 刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究[J]. 中国工业经济, 2015, (5): 83-95. [ Liu H J, Liu C M, Sun Y N. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effect in China[J]. *China Industrial Economics*, 2015, (5): 83-95. ]
- [29] 程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1418-1431. [Cheng Y Q, Wang Z Y, Zhang S Z, et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68 (10): 1418-1431. ]
- [30] 王文举, 向其凤. 中国产业结构调整及其节能减排潜力评估[J]. 中国工业经济, 2014, (1): 44-56. [Wang W J, Xiang Q F. Adjustment of industrial structure and potential assessment of energy saving and carbon reduction[J]. *China Industrial Economics*, 2014, (1): 44-56. ]
- [31] 吕明元, 陈维宣. 中国产业结构升级对能源效率的影响研究—基于1978-2013年数据[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1350-1362. [Lv M Y, Chen W X. The study on the impact of industrial structure upgrading on energy efficiency in China based on the data from 1978 to 2013[J]. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1350-1362. ]
- [32] 尤济红, 高志刚. 政府环境规制对能源效率影响的实证研究—以新疆为例[J]. 资源科学, 2013, 35(6): 1211-1219. [You J H, Gao Z G. Can government environmental regulations be good for energy efficiency? An empirical study in Xinjiang[J]. *Resources Science*, 2013, 35(6): 1211-1219. ]
- [33] 吴传清, 董旭. 环境约束下长江经济带全要素能源效率研究[J]. 中国软科学, 2016, (3): 73-83. [Wu C Q, Dong X. Analysis on influencing factors of total factor energy efficiency in the Yangtze river economic belt under environmental constraints[J]. *China Soft Science*, 2016, (3): 73-83. ]
- [34] 王腾, 严良, 何建华, 等. 环境规制影响全要素能源效率的实证研究—基于波特假说的分解验证[J]. 中国环境科学, 2017, 37 (4): 1571-1578. [Wang T, Yan L, He J H, et al. An empirical study on the effect of environmental regulation on total factor energy efficiency—decomposition verification based on Potter hypothesis [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(4): 1571-1578. ]
- [35] Saunders H D. Fuel conserving (and using) production functions [J]. *Energy Economics*, 2008, 30(5): 2184-2235.
- [36] 林伯强, 刘泓汛. 对外贸易是否有利于提高能源环境效率—以中国工业行业为例[J]. 经济研究, 2015, (9): 127-141. [Lin B Q, Liu H M. Do energy and environment efficiency benefit from foreign Trade?—The case of China's industrial sectors[J]. *Economic Research Journal*, 2015, (9): 127-141. ]
- [37] 杨先明, 田永晓, 马娜. 环境约束下中国地区能源全要素效率及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 147-156. [Yang X M, Tian Y X, Ma N. Total-factor energy productivity growth in China: a meta-frontier global Malmquist-Luenberger productivity index approach[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(12): 147-156. ]
- [38] Camiato F D C, Morales H F, Mariano E B. Energy efficiency analysis of G7 and BRICS considering total-factor structure[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 122: 67-77.
- [39] 潘文卿. 中国的区域关联与经济增长的空间溢出效应[J]. 经济研究, 2012, (1): 54-65. [Pan W Q. Regional linkage and the spatial spillover effects on regional economic growth in China[J]. *Economic Research Journal*, 2012, (1): 54-65. ]
- [40] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952—2006年[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, (10): 17-31. [Shan H J. Reestimating the capital stock of China: 1952—2006 [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2008, (10): 17-31. ]
- [41] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Hayama: 2006 IPCC Guidelines, 2006.
- [42] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1996-2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical Yearbook of China[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 1996-2016. ]
- [43] 环境保护部. 中国环境年鉴[M]. 北京: 中国环境年鉴出版社, 1996-2016. [Ministry of Environmental Protection. China's Environmental Yearbook [M]. Beijing: China's environmental yearbook Publishing House, 1996-2016. ]
- [44] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1996-2016. [Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Energy Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 1996-2016. ]
- [45] 国家统计局人口与就业统计司. 中国人口与就业统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1996-2016. [Department of Population and Employment Statistics, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Population & Employment Statistics Yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 1996-2016. ]
- [46] 国家统计局. 中国六十年统计资料汇编 1949-2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Compendium Statistics 1949-2008 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2010. ]

## The spatial network structure of energy–environmental efficiency and its determinants in China

HUANG Jie

*(School of Business, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)*

**Abstract:** Improving energy–environmental efficiency is not only an objective requirement of ecological civilization construction in China, but also an inevitable choice in sustainable economic and social development. In order to measure the energy–environmental efficiency of 30 provinces in China, we used the non-radial, non-angle, dual-oriented DEA window model on the basis of interprovincial panel data from 1995 to 2015. In addition, using the VAR Granger causality test method we identified the spatial association of energy–environmental efficiency in China. Through the use of Social Network Analysis (SNA) methods we revealed the characteristics of the spatial correlation network and its determinants of interprovincial energy–environmental efficiency in China. The results show that there exists a significant and complex spatial network structure in China’s interprovincial energy–environmental efficiency. In the blocks of the spatial association network of energy–environmental efficiency, eastern provinces are mainly located in the “net spillover block”, playing the role of “engine” in the process of improving China’s energy–environmental efficiency. Most of the eastern provinces are in a central location, while western provinces are mainly in the “net benefit block” which lies at an edge position of the spatial correlation network of energy–efficiency. Thus, differences in economic development level, energy consumption structure, industrial structure, environmental regulation and technological innovation were significantly correlated with the spatial correlation network of energy and environmental efficiency. In the meantime, similar economic performance level, industrial structure and technical competence contribute to interprovincial spatial networks of energy–environmental efficiency in China. The spatial correlation network structure of energy–environmental efficiency poses serious challenges to the formulation and implementation of energy efficiency policy, but also creates favorable conditions for the implementation of regional coordinated development and construction of synergy promotion mechanisms of inter-regional energy–environmental efficiency.

**Key words:** energy–environmental efficiency; DEA window model; Granger Causality Test; spatial network structure; determinants; China