

【产业经济】

中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究

刘华军¹, 刘传明¹, 孙亚男²

(1. 山东财经大学经济学院, 山东 济南 250014;

2. 山东财经大学工商管理学院, 山东 济南 250014)

[摘要] 本文基于1995—2012年中国省际能源消费数据,利用社会网络分析(SNA)方法对能源消费空间关联的网络结构特征及其效应进行了经验考察。研究发现:①中国能源消费的空间关联呈现网络结构形态;样本考察期内,空间关联的紧密程度逐步提高,等级森严的空间网络结构逐渐被打破,网络稳定性逐步增强。②上海、天津、江苏、浙江、广东等沿海省份处于网络中心位置,发挥“桥梁”和“中介”的作用。③在能源消费空间关联网络中,环渤海地区属于“双向溢出”板块,长三角和珠三角地区属于“净受益”板块,新疆和山西等资源丰富的省份属于“净溢出”板块,湖南、湖北等中部地区属于“经纪人”板块。④能源消费空间关联的整体网络紧密程度及稳定性的提升、网络等级结构的破除能显著降低能源强度,提高能源消费的空间公平性。而个体网络中心性的提升对能源强度的降低具有显著促进作用。能源消费空间关联的网络结构为能源政策的制定和实施带来严峻挑战,但为跨区域协同节能机制的构建创造了有利条件。

[关键词] 能源消费; 空间关联; 社会网络分析; 能源强度

[中图分类号]F206 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1006-480X(2015)05-0083-13

一、问题提出

能源是人类生存和发展的重要物质基础,关系国计民生和国家安全。伴随着资源环境约束的日益趋紧,“新常态”下中国经济发展面临的能源挑战愈发严峻。一方面,能源消费总量呈现出逐年攀升态势,2014年达到42.6亿吨标准煤;另一方面,在经济发展、产业结构、能源结构等多种因素的共同作用下,能源消费呈现出显著的空间非均衡特征^[1-4]。为了破解资源环境约束,“十二五”时期以来,中国制定了更为严格的节能目标,并综合考虑各地经济社会发展水平、区位和资源特点等因素将全

[收稿日期] 2015-03-18

[基金项目] 国家社会科学基金青年项目“碳排放约束下中国能源效率的区域差异及节能指标分解研究”(批准号12CJL066);山东省社会科学规划研究重大委托项目“金融产业优化与区域发展管理协同创新研究”(批准号14AWTJ01-12);山东省自然科学基金项目“基于SNA的产学研合作协同创新网络风险演化与仿真”(批准号ZR2013GQ004)。

[作者简介] 刘华军(1979—),男,山东广饶人,山东财经大学经济学院教授,经济学博士;刘传明(1990—),男,山东茌平人,山东财经大学经济学院硕士研究生;孙亚男(1980—),男,山东蓬莱人,山东财经大学工商管理学院副教授,管理学博士。

国总体节能目标分解到各省份。如果各省份能源消费之间相互独立,那么无疑各省份完成各自节能任务的加总即为全国完成的节能任务。然而,在多种因素的共同作用下,省际之间能源消费并非独立存在,而是呈现出一定的空间关联^[9]。因此,在省际之间空间关联实际存在的条件下,各省份要实现各自的节能任务,不仅要考虑自身的能源消费情况,还需要充分考虑并有效“牵制”与之关联省份的能源消费^①。随着旨在促进能源跨区域流动的工程项目(如西气东输、北煤南运、西电东送)的实施和市场化进程的不断推进,能源消费的空间联系更加普遍和广泛,已经超越了单纯地理学意义上的“近邻”关系,逐步呈现出多线程的复杂网络结构形态。在此背景下,精确刻画能源消费空间关联的整体网络结构特征及其演变趋势,明确各省份在能源消费空间关联网络中的地位和角色,深入揭示空间关联网络结构对于能源消费的影响效应,对于能源政策的制定和实施以及跨区域协同节能机制的构建均具有重要的理论意义和应用价值。

现有研究采用探索性空间数据分析(ESDA)揭示了中国能源消费存在的显著空间相关性和空间集聚特征^[3,5,9],然而已有研究却存在三个局限:一是所揭示的能源消费的空间集聚特征仅考虑了地理上的“邻近”或“相邻”效应,由此得出的政策含义往往局限于“局部”,因此难以从整体上把握省际能源消费之间的空间关联特征,不利于中国能源消费总量目标的实现。二是均基于“属性数据”而非“关系数据”^②,使之难以刻画能源消费空间关联的整体网络结构特征,而结构往往决定属性数据的表现,更具有分析价值^[7]。三是并未进一步揭示能源消费空间关联的结构形态和空间聚类方式,而且传统的空间计量方法只能在考虑空间因素的基础上考察能源消费“量”的效应,却无法揭示能源消费空间关联“关系”的影响效应。本文基于关系数据和网络视角,利用1995—2012年中国省际数据,构建修正的引力模型确定能源消费的空间关联关系,并借助社会网络分析(Social Network Analysis, SNA)方法对能源消费的空间关联网络结构及影响效应进行再考察。通过测度网络密度(Density)、网络关联度(Connectedness)、网络等级度(Hierarchy)、网络效率(Efficiency)反映能源消费空间关联网络的整体特征及演变趋势;通过中心性分析(Centrality)考察各省份在能源消费空间关联网络中的地位和作用;通过块模型(Block Modeling)揭示能源消费的空间聚类方式;并实证检验了能源消费空间关联网络结构的影响效应。

二、方法与数据

社会网络分析以“关系”作为基本分析单位,采用图论工具、代数模型技术描述关系模式并探究这些关系模式对结构中成员或整体的影响,是一种针对“关系数据”(Relation Data)的跨学科分析方法,在社会学、经济学、管理学等领域得到广泛应用,已成为一种新的研究范式^[8-11]。

1. 能源消费空间关联关系的确定

关系的确定是网络分析的关键^[12]。根据现有文献,关系的确定主要采用引力模型^[13-15]和 VAR Granger Causality 检验方法^[16]。本文选择引力模型确定能源消费的空间关联关系,这样做出于两方面的考虑:一是基于 VAR 模型构建的网络无法刻画空间关联网络的演变趋势;二是 VAR 模型对滞

① 本文用简单的例子来说明:假定总的节能任务为20个单位,将其平均分配给A和B区域。如果不存在空间关联,若A、B均能完成10个单位,此时A和B完成任务则总的节能任务也能顺利完成。但是如果存在空间关联,假定此时A仍能完成10个单位,此时A和B的关联可能会导致B只能完成8个单位。也就是说,在存在空间关联的条件下,B完成任务的程度不仅仅取决于B自身,还与A和B的关联密切相关。换言之,当A区域和B区域存在关联时,区域A完成节能任务时,将影响区域B任务的实现,从而影响整体节能任务的完成。因此,在对全国节能目标进行区域分解时,不仅要考虑区域经济发展、区位、资源等因素,而且也要注意考量省际能源消费之间的联系,换言之,能源政策的制定应该充分考虑空间关联的存在。

② 属性数据指的是反映各省份自身性质的数据,如能源消费量、GDP、人口等,这些数据与其他省份的相应数据无关;而关系数据则是反映两个或多个省份之间相互关系的数据,其大小由两个或多个省份共同决定。

后阶数的选择过于敏感,在一定程度上降低了网络结构特征刻画精确性。而引力模型不仅更加适用于总量数据,而且可以综合考虑经济地理距离因素,进而可以利用截面数据刻画空间关联网络的演变趋势。因此,采用引力模型构建网络在揭示能源消费空间关联网络的动态演变趋势上更具优势。基于上述考虑,本文将引力模型引入到能源消费领域,同时为了增强适用性,对引力模型进行修正,修正后的引力模型如式(1)所示。其中, i, j 代表省份; y_{ij} 为省份*i*和省份*j*能源消费之间的引力; E_i, E_j 分别为省份*i*和省份*j*的能源消费总量; P_i, P_j 为省份*i*和省份*j*的年末总人口数; G_i 和 G_j 为省份*i*和省份*j*的实际地区生产总值; k_{ij} 表示省份*i*在省份*i, j*之间能源消费联系中的贡献率。为了同时考虑经济距离和地理距离因素对能源消费空间关联的影响,本文以*i*和*j*的省会城市之间的距离(D_{ij})比上*i*和*j*人均GDP的差值($g_i - g_j$)表征省份之间的“距离”。依据公式(1),本文计算出省际能源消费之间的引力矩阵。引力矩阵的各行取平均作为临界值,引力高于该行临界值的记为1,表示该行省份对该列省份能源消费具有关联关系;反之若引力低于该行临界值则记为0,表示该行省份对该列省份能源消费不存在关联关系。

$$y_{ij} = k_{ij} \frac{\sqrt[3]{P_i E_i G_i} \sqrt[3]{P_j E_j G_j}}{\left(\frac{D_{ij}}{g_i - g_j}\right)^2}, \quad k_{ij} = \frac{E_i}{E_i + E_j} \quad (1)$$

2. 网络特征指标^①

(1)整体网络特征。整体网络结构特征通常采用网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率进行刻画。其中,网络密度可以反映能源消费空间关联网络的紧密程度,网络密度越大,则省际能源消费之间的联系就越紧密,能源消费空间关联的网络结构对各省能源消费产生的影响也越大。网络关联度反映了能源消费空间关联网络自身的稳健性和脆弱性。如果网络中很多线都与某一个省份相连,那么能源消费空间关联网络对该省份的依赖性就很高,换言之,一旦排除该省份,网络就可能崩溃。网络等级度表达的是网络中省份之间在多大程度上非对称地可达,它反映网络中各省份的等级结构,网络等级度越高则能源消费空间关联网络中省份之间的等级结构越森严,越多的省份在能源消费空间关联网络中将处于从属和边缘地位。网络效率反映了能源消费空间关联网络中各省份之间的连接效率。若网络效率越低,则说明省份之间存在更多的连线,省份能源消费之间的联系更加紧密,能源消费的空间关联网络就越稳定,也更容易通过能源消费空间关联网络促进能源的空间流动,缩小省际之间的比较优势。

(2)各节点的网络特征。根据社会网络分析方法,各节点的网络结构特征可以采用点度中心度、中介中心度和接近中心度等网络中心性指标进行刻画。其中,点度中心度(Degree Centrality)可以根据网络中的连接数来衡量各省份在能源消费空间关联网络中处于中心位置的程度,点度中心度越高,则说明该省份在能源消费空间关联网络中与其他省份之间的联系越多,该省份也更加处于网络的中心地位。中介中心度(Betweenness Centrality)反映了某个省份在多大程度上控制其他省份之间的关联关系,中介中心度越高则意味着该省份越能控制其他省份能源消费之间的相互行动,该省份也就更加处于网络的中心。接近中心度(Closeness Centrality)则刻画了网络中某个省份在能源消费联系过程中“不受其他省份控制”的程度。某个省份的接近中心度越高,该省份能源消费与其他省份之间存在更多的直接关联,该省份在网络中就是中心行动者。

(3)空间聚类分析。块模型是社会网络分析中进行空间聚类分析的主要方法。块模型可以对各个位置(块)在网络中的角色进行分析^[7]。通过块模型分析,能够从新的维度考察能源消费空间关联网络的发展状况,揭示和刻画能源消费空间关联网络的内部结构状态,找到网络中板块的个数以及每个板块所包含的省份,进而分析板块之间的关系及联接方式。本文将能源消费空间关联网络中的块的角色划分为四种类型。一是净受益角色,此类板块中的成员既接收来自其他板块成员的关系,

^① 网络特征指标的具体计算公式可以参阅文献[17]和[18]。

也有来自板块内部成员的关系,而接收来自板块外部的关系明显多于它对其他板块的溢出关系;二是净溢出角色,此类板块对其他板块发出的联系要明显多于它接收其他板块对该板块发出的联系;三是双向溢出角色,此类板块成员既发出联系也接收其他板块的联系,而来自板块内部成员的联系相对较多;四是经纪人角色,此类板块既对其他板块发送联系,也接收来自其他板块成员的联系,而且该板块与其他板块成员之间的联系较多。

3. 数据来源

本文以中国 30 个省份(不含西藏及港澳台地区)作为网络节点,实证考察能源消费的空间关联,样本的时期跨度为 1995—2012 年。引力模型测算所需数据的来源及处理如下:分省份能源消费总量来源于相应年份的《中国能源统计年鉴》;分省份地区生产总值、人口数来源于相应年份的《中国统计年鉴》,其中,地区生产总值按照 1995 年=100 进行平减,以消除价格因素对地区生产总值的影响。省际之间的地理距离以省会城市之间的球面距离表示,以 ArcGIS 计算而得。

三、中国省际能源消费空间关联的网络结构特征

1. 整体网络结构特征及演变趋势

本文根据修正的引力模型,确定了省际能源消费的空间关联关系并建立关系矩阵。为了展示能源消费空间关联网络结构形态,本文利用 UCINET 可视化工具 Netdraw 绘制了 2012 年的网络图,如图 1 所示。由图可以发现,中国省际能源消费的空间关联呈现出较为典型的网络结构形态。

(1)网络密度。图 2 描述了样本考察期内省际能源消费空间关联网络密度的演变趋势。由图可以直观发现,样本考察期内省际能源消费的空间关联关系总数呈逐年上升趋势,1995 年的关联关系为 168 个,2012 年上升到 210 个,与之相对应,省际能源消费空间关联的整体网络密度也呈现逐年上升趋势^①,从 1995 年的 0.193 上升到 2012 年的 0.241。网络密度逐年上升表明中国省际之间能源消费的空间关联愈发密切。但同时本文也发现,2000 年以后空间关联网络密度增速要快于 2000 年之前,主要原因在于 2000 年以后西气东输、西电东送、北煤南运等工程的实施促进了能源资源的跨区域调配,同时包括能源在内的生产要素领域的市场化推进进一步促进了能源的跨区域流动,上述两种力量的共同作用增强了省际能源消费间的空间关联。

尽管样本考察期内的网络密度呈上升趋势,但是从数值上看中国省际能源消费空间关联的紧密程度并不是很高,所有省份之间的最大可能关系总数为 870 个(30×29),而样本考察期内省际能源消费之间实际的关系数最大仅为 210 个(2012 年),因此促进省际之间能源消费的联系还存在较大空间。同时,尽管网络密度越高表明省际能源消费之间的空间关联越来越密切,但随着网络密度的不断提升,网络中的冗余连线可能增多,一旦超过网络的容纳能力,将会增加省际之间能源流动的交易费用,降低能源的利用效率,进而对能源配置和要素流动产生抑制作用,所以必须维持合适

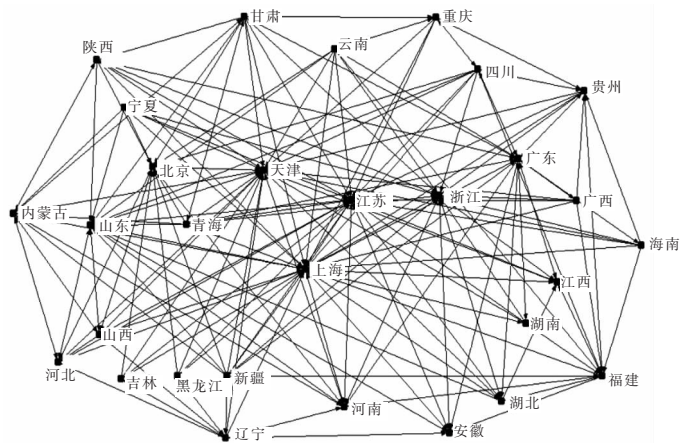


图 1 2012 年中国能源消费空间关联网络

资料来源:作者利用 Netdraw 工具绘制。

^① 网络密度以实际关系数与最大可能关系数的比值测度,本文中省际能源消费空间关联的最大关系数为 $30 \times 29 = 870$ 。

的网络密度才能保证能源消费的空间优化配置。

(2)网络关联性。本文利用社会网络分析中的网络关联度、网络等级度与网络效率等指标衡量中国省际能源消费空间关联的网络关联性。网络关联度的测度结果显示 1995—2012 年的网络关联度均为 1,表明中国省际能源消费之间的联系非常密切,存在十分明显的空间关联和溢出效应。网络等级度的测度结果显示样本考察期内中国省际能源消费空间关联的网络等级度呈阶梯下降态势,如图 3 所示。其中,2003 年之前网络等级度稳定在 0.472 左右,2003—2008 年网络等级度下降至 0.431 左右,而 2008 年之后网络等级度出现大幅度下降至 0.297 左右,这一结果表明以往相对森严的能源消费空间关联结构逐渐被打破,省际能源消费之间的相互联系和相互影响逐步增强。网络效率的测度结果显示样本考察期内中国省际能源消费空间关联的网络效率呈逐年下降趋势,如图 3 所示。网络效率从 1995 年的 0.740 下降至 2012 年的 0.675,这说明能源消费空间关联网络中连线增多,网络的稳定性得以提升。综合考虑上述三个指标的测度结果,本文认为,随着市场化进程的不断推进,行政指令对资源配置的干预有所减弱,一定程度上破除了以往等级森严的能源消费空间结构。与此同时,由于中国的市场体系尤其是要素市场体系的逐步完善,市场对能源资源的配置作用不断被发挥出来,降低了区域能源消费之间联系的交易成本,从而使得省际之间能源消费的关联关系增多,进而增强了网络的稳定性。

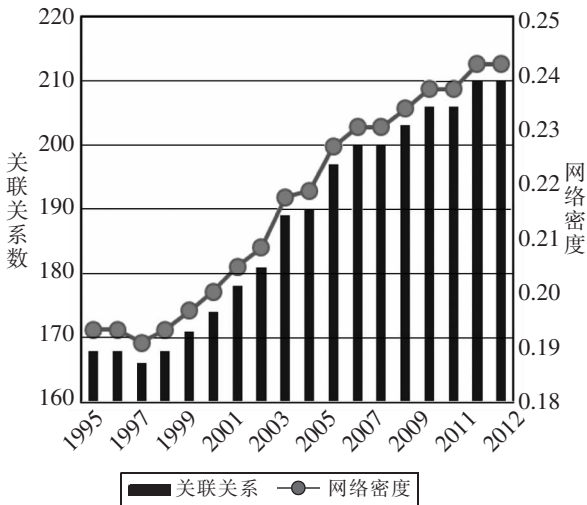


图 2 空间关联关系与网络密度

资料来源:作者绘制。

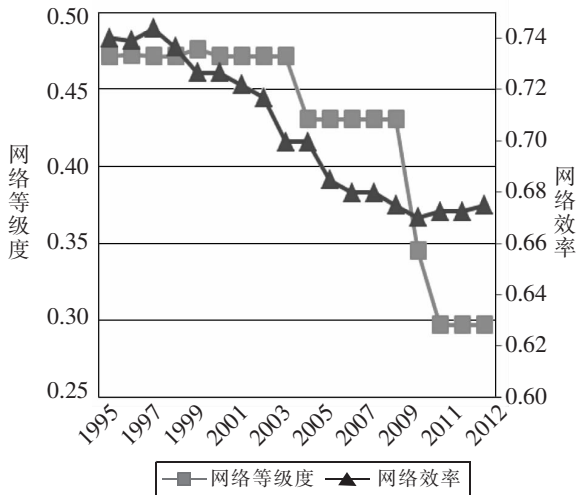


图 3 网络等级度与网络效率

资料来源:作者绘制。

2. 中心性分析

本部分通过测度点度中心度、中介中心度、接近中心度等指标进行网络中心性分析,考察并揭示各省份在能源消费空间关联网络中的地位和作用,表 1 报告了 2012 年的测度结果^①。

(1)点度中心度。根据表 1 中点度中心度的测度结果,全国 30 个省份的点度中心度均值为 37.011,高于这一均值的省份有 9 个,从高到低依次是上海、天津、江苏、浙江、山东、广东、北京、福建、甘肃,这些省份在能源消费空间关联网络中与其他省份的关系系数较多。其中,上海的点度中心度最高达到 93.103,原因在于上海的能源消费与其他 29 个省份中的 27 个省份之间均存在空间关联和空间溢出,说明上海在中国能源消费空间关联网络处于中心地位。高于点度中心度均值的省份除甘肃以外均位于沿海地区,说明沿海地区对整体能源消费空间关联及空间溢出效应具有很强的影响力。而根据表 1 的测度结果,黑龙江、吉林、湖南、宁夏、重庆的点度中心度排在全国最后 5 位,说

^① 对其他年份的测度结果感兴趣的读者可以随时向作者索取。

明这些省份的能源消费与其他省份之间的关系系数较少。原因可能在于它们的经济规模相对较小以及它们所处的地理位置相对偏远,从而导致其能源消费和其他省份之间的空间关联较弱。更进一步地,根据表 1 中点度中心度的点出度和点入度测算结果,全国 30 个省份的点出度均值为 7,点出度大于均值的省份有 9 个,从高到低依次是广东、甘肃、四川、新疆、云南、青海、辽宁、湖北、陕西,上述省份对其他省份有较强的能源溢出效应。全国 30 个省份的点入度均值为 7,上海、天津、江苏、浙江、北京、山东、广东等省份的点入度不仅均远高于全国点入度的均值而且也高于其自身的点出度,这些省份大都位于环渤海、长三角和珠三角等沿海经济发达地区,能源消费量较大,而从能源禀赋角度看,这些地区的能源自给能力又相对较弱,因此对其他省份的能源依存度较高,其他省份将集中地向这些地区进行能源溢出。

表 1 省际能源消费空间关联的网络中心性分析

省 份	点度中心度				中介中心度		接近中心度	
	点出度	点入度	中心度	排 序	中心度	排 序	中心度	排 序
北 京	4	13	44.828	7	2.696	6	63.043	7
天 津	5	23	79.310	2	13.393	2	82.857	2
河 北	6	6	27.586	19	0.325	21	58.000	19
山 西	7	5	27.586	20	0.325	22	58.000	20
内 蒙 古	7	7	34.483	10	0.893	14	60.417	10
辽 宁	8	3	31.034	15	1.129	9	59.184	15
吉 林	5	1	17.241	29	0.143	29	54.717	29
黑 龙 江	5	1	17.241	30	0.143	30	54.717	30
上 海	7	27	93.103	1	18.179	1	93.548	1
江 苏	5	22	75.862	3	9.977	3	80.556	3
浙 江	5	16	55.172	4	4.130	4	69.048	4
安 徽	3	7	24.138	22	0.443	19	55.769	27
福 建	7	9	41.379	8	2.021	8	63.043	8
江 西	6	6	24.138	23	0.194	24	56.863	22
山 东	7	12	51.724	5	2.667	7	67.442	5
河 南	6	10	34.483	11	1.061	10	60.417	11
湖 北	8	5	27.586	21	0.338	20	58.000	21
湖 南	6	3	20.690	28	0.194	25	55.769	28
广 东	11	12	51.724	6	3.449	5	67.442	6
广 西	7	1	24.138	24	0.194	26	56.863	23
海 南	7	1	24.138	25	0.194	27	56.863	24
重 庆	7	4	24.138	26	0.189	28	56.863	25
四 川	10	2	34.483	12	0.939	12	60.417	12
贵 州	7	6	34.483	13	0.583	16	60.417	13
云 南	9	2	31.034	16	0.755	15	59.184	16
陕 西	8	2	31.034	17	0.461	17	59.184	17
甘 肃	11	3	37.931	9	0.894	13	61.702	9
青 海	9	1	31.034	18	0.461	18	59.184	18
宁 夏	7	0	24.138	27	0.304	23	56.863	26
新 疆	10	0	34.483	14	1.061	11	60.417	14
均 值	7	7	37.011	-	2.258	-	62.226	-

资料来源:作者计算整理。

(2)中介中心度。根据表1的中介中心度测度结果,全国30个省份的中介中心度均值为2.258,高于这一均值省份从高到低依次是上海、天津、江苏、浙江、广东、北京、山东,这些省份在能源消费空间关联网络中控制其他省份之间能源交流的能力较强。其中,上海的中介中心度达到18.179,远远高于其他省份,说明上海作为国际化大都市在能源消费的空间关联网络中处于核心地位并发挥着“中介”和“桥梁”的作用。随着上海在全国资源贸易、物流航运、能源信息服务等中心地位的进一步确立,这种控制和支配作用将愈发增强。此外,2012年能源消费空间关联网络的中介中心度总量为67.735,而排名前7位省份的中介中心度之和占了总量的80%以上,这些省份大都位于能源消费量较大的东部发达地区,而排名最后五位省份的中介中心度均小于0.2,只占总量的1.2%,这些省份具有人口少、经济规模小、地理位置偏远等特点,因而难以对网络中的其他省份起到控制和支配作用。能源消费空间关联网络中各个省份的中介中心度参差不齐呈现出非均衡特征,相当多的能源联系通过上海、北京、天津、广东等经济发达省份来完成。

(3)接近中心度。根据表1中接近中心度的测度结果,全国30个省份的接近中心度均值为62.226,高于这一均值的省份有8个,从高到低依次是上海、天津、江苏、浙江、山东、广东、北京、福建,较高的接近中心度说明了上述省份在能源消费空间关联网络中能够更快速地与其他省份产生内在连接,换言之,上述省份在网络中扮演着中心行动者的角色。究其原因在于,上述省份大都位于东部沿海地区,这些省份与其他省份之间能源流动的效率更高,同时也具有较强的获得能源资源的能力。在上述省份中,上海的接近中心度达到93.548,远高于其他省份,这说明其他省份与上海在能源消费空间关联网络中最为“接近”,上海居于整个能源消费空间关联网络的中心。而接近中心度排名最后5位的省份分别是黑龙江、吉林、湖南、安徽、宁夏,这些省份受其经济发展水平与地理位置的限制,在网络中扮演着边缘行动者的角色。

3. 块模型分析

下面本文通过块模型分析揭示各个省份在能源消费关联网络的空间聚类特征。采用CONCOR方法(Convergent Correlations),本文选择最大分割深度为2,集中标准为0.2,把全国30个省份划分为四个板块(Block),划分结果如表2所示。其中,位于第I板块的成员有5个,分别是北京、天津、辽宁、内蒙古、山东,这些省份主要分布在环渤海地区。位于第II板块的成员有5个,分别是广东、江苏、福建、上海、浙江,这些省份主要集中在长三角和珠三角地区。位于第III板块的成员有10个,包括新疆、山西、吉林、甘肃、河北、宁夏、黑龙江、河南、青海、陕西,这些省份的能源储量相对比较丰富。位于第IV板块的成员有10个,主要由中部地区的省份组成,分别是湖南、重庆、湖北、贵州、云南、广西、安徽、海南、江西、四川。

表2 能源消费空间关联板块的溢出效应

板块	接收关系数合计(个)		发出关系数合计(个)		期望内部关系比例(%)	实际内部关系比例(%)
	板块内	板块外	板块内	板块外		
板块 I	6	52	6	25	14	19
板块 II	6	80	6	29	14	17
板块 III	4	25	4	70	31	5
板块 IV	10	27	10	60	31	14

注:板块内接收关系数(发出关系数)合计为接收关系矩阵中主对角线上的关系数;板块外接收关系数(发出关系数)合计为接收关系矩阵中每列(行)除自身板块之外的关系数之和。期望内部关系比例根据“(板块内省份个数-1)/(网络中所有省份个数-1)”计算;实际内部关系比例根据“板块内部关系数/板块的溢出关系总数”计算。

资料来源:作者计算整理。

下面本文进一步通过块模型分析揭示四个板块在能源消费空间关联网络中的位置(表2)。根据前文测算,在能源消费的整体关联网络中存在210个关联关系,而板块内部之间的关联关系有26个,板块和板块之间的关联关系有184个,说明板块之间的能源消费存在着明显的空间关联和

溢出效应。其中,第 I 板块的溢出关系有 31 个,属于板块内部的关系有 6 个,接收其他板块溢出的关系有 52 个;期望内部关系比例为 14%,实际的内部关系比例为 19%,根据前文的定义,第 I 板块为“双向溢出”板块,该板块成员既发出联系也接收其他板块的联系,而来自板块内部成员的联系相对较多。第 II 板块的发出关系有 35 个,属于板块内部的关系有 6 个,接收其他板块发出的关系有 80 个;期望内部关系比例为 14%,实际的内部关系比例为 17%。该板块成员主要位于长三角和珠三角地区,它们的能源消费量大,主要接收来自能源资源储量丰富地区的能源溢出,因此第 II 板块为“净受益”板块。第 III 板块的发出关系有 74 个,属于板块内部的关系有 4 个,接收其他板块发出的关系有 25 个;期望内部关系比例为 31%,实际的内部关系比例为 5%,因此第 III 板块为“净溢出”板块。该板块成员在实现能源的自给自足的同时还对其他地区进行能源溢出。第 IV 板块的发出关系有 70 个,属于板块内部的关系有 10 个,接收其他板块发出的关系有 27 个;期望内部关系比例为 31%,实际的内部关系比例为 14%,因此第 IV 板块为“经纪人”板块,该板块既对其他板块发送关系,也接收来自外部成员的联系,在能源消费空间关联网中扮演着“中介”与“桥梁”作用。

为了考察板块之间能源消费的关联关系,本文根据关联关系在板块之间的分布情况(表 2),计算出各个板块的网络密度矩阵。同时,依据前文测算,2012 年中国省际能源消费空间关联的网络密度为 0.241,在四个板块中任何一个板块的网络密度高于 0.241 即板块的网络密度大于整体的网络密度,则能源消费将更加集中于该板块。本文将板块网络密度大于整体网络密度的情形赋值为 1,将板块网络密度小于整体网络密度的情形赋值为 0,可以将多值密度矩阵转化为像矩阵,密度矩阵和像矩阵具体如表 3 所示,图 4 直观地描述了四大板块间的关联关系。根据表 3 和图 4,第 I 板块和第 II 板块不仅自身内部存在着能源消费的关联关系,而且还接收来自第 III 板块和第 IV 板块的溢出,说明经济发展水平高、能源消费量大的京津冀、长三角和珠三角地区能源供给相对紧张,更加需要来自其他省份尤其是能源储量丰富地区的能源输入。第 III 板块和第 IV 板块蕴藏着丰富的煤、石油、天然气,为京津冀、长三角和珠三角等地区提供丰富的能源资源,因而成为全国能源消费空间关联网中的发动机。此外,板块间关联网中还存在第 I 板块对第 III 板块、第 II 板块对第 IV 板块的能源溢出,这表明在省际能源消费关联网中各板块之间发挥着比较优势,“全国一盘棋”的联动效应愈加明显。

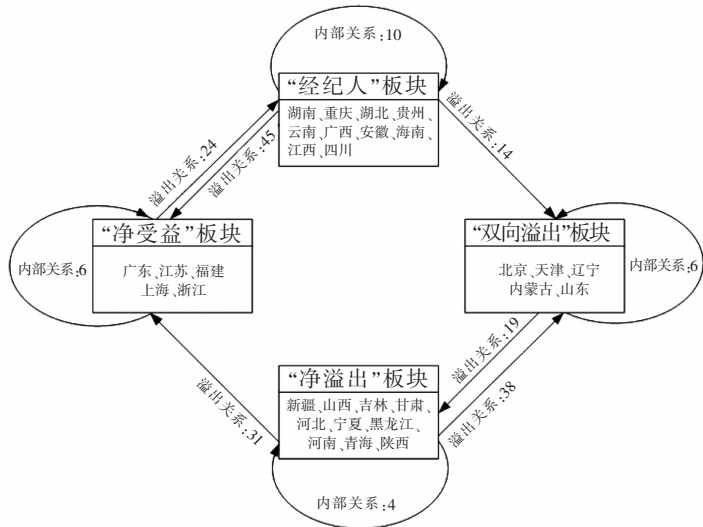


图 4 能源消费四大板块之间的关联关系

资料来源:作者绘制。

表 3 能源消费空间关联板块的密度矩阵与像矩阵

板 块	密度矩阵				像矩阵			
	板块 I	板块 II	板块 III	板块 IV	板块 I	板块 II	板块 III	板块 IV
板块 I	0.300	0.160	0.380	0.040	1	0	1	0
板块 II	0.000	0.300	0.100	0.480	0	1	0	1
板块 III	0.760	0.620	0.044	0.010	1	1	0	0
板块 IV	0.280	0.900	0.010	0.111	1	1	0	0

注:“1”表示存在指向列的关联关系,“0”表示没有关联关系。

资料来源:作者计算整理。

四、中国省际能源消费空间关联网络的效应分析

如引言中所述,结构往往决定属性数据的表现,更具分析价值^[7]。在刻画了中国省际能源消费空间关联的网络结构特征基础上,本文更加关心能源消费空间关联的网络结构究竟对能源消费的“属性数据”存在何种效应。为了揭示能源消费空间关联网络的效应,本文从整体网络结构、个体网络结构两个方面实证考察能源消费空间关联网络结构对于能源强度及其省际差异的影响。

1. 整体网络结构的效应分析

本文分别以省际能源强度的标准差和全国能源强度作为被解释变量,分别对网络密度、网络等级度、网络效率三个整体网络结构特征指标进行简单的 OLS 回归(解释变量、被解释变量均取自然对数),表 4 报告了回归结果。回归结果显示,所有回归系数均通过了 1% 的显著性水平检验,且具有较高的 R²,拟合效果良好。

表 4 整体网络结构效应的 OLS 回归结果

被解释变量 模型	全国能源强度			省际能源强度的标准差		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
常数项	-1.980***	2.425***	3.361***	-6.084***	1.319***	2.607***
网络密度	-2.317***	-	-	-3.774***	-	-
网络等级度	-	0.973***	-	-	1.848***	-
网络效率	-	-	5.055***	-	-	8.211***
R ²	0.676	0.483	0.652	0.812	0.788	0.779

注:***、**、* 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平。

资料来源:作者计算整理。

(1)整体网络结构对能源强度的影响效应。根据表 4 的回归结果,能源消费空间关联的网络密度、网络等级度和网络效率的回归系数分别为-2.317、0.973、5.055,这一估计结果表明能源消费空间关联的网络结构对能源强度存在显著的影响,能源消费空间关联网络密度的提升以及网络等级度和网络效率的降低均能够显著降低能源强度。产生这一结果的具体原因在于:①网络密度的提升意味着整体网络链接数量的增加,有效限制并缩小了省际能源强度的空间差异,这将有助于降低能源强度。因此,从提升网络密度的角度,为了实现节能目标,应继续发挥政府和市场的能源调控作用,从全国整体出发创造出更多能源空间联系的“管道”,不断加强能源消费的空间关联。②网络等级度下降意味着网络的等级结构变小,更多的省份在能源消费关联中,由过去单向链接导致的从属地位转变为双向链接的平等地位,增加了处于从属地位省份的话语权,从而对其他省份的能源消费行为产生约束,促进了各省能源强度的降低。因此,从降低网络等级度的角度,应进一步通过简政放权不断减少行政指令对能源领域的直接干预,最大限度地破除以往等级森严的能源消费空间关联结构。③网络效率的降低意味着能源消费空间关联网络中的连线增加,破除了某些省份在节能方面的“比较优势”,使得网络中各省份之间在经济、技术、人才等方面的差距不断缩小,进而有效降低各自能源强度。因此,从降低网络效率(即增加网络连线)的角度,应继续加快推进能源市场体系建设,进一步发挥市场对能源配置的决定性作用,增强省际能源消费之间的联系,降低能源空间交流和联系的成本,提高能源消费空间关联网络的稳定性。

(2)整体网络结构对省际能源强度差异的影响效应。本文用省际能源强度的标准差衡量省际能源强度差异,该指标在很大程度上也反映出能源消费的空间公平性,若省际能源强度之间的差异越小,则能源消费的空间公平性就越高。根据表 4 的回归结果,能源消费空间关联的网络密度、网络等级度和网络效率的回归系数分别为-3.774、1.848、8.211,这一估计结果表明网络密度的提升以及网络等级度和网络效率的降低能够显著缩小省际能源强度差异,提高能源消费的空间公平性,这一结

果也同时意味着,强化能源消费空间关联的网络结构是区域间能源强度收敛的重要驱动机制。产生这一结果的具体原因在于,网络密度的提升增加了整体网络链接数量,逐渐增大了整体网络结构对各省能源消费的影响,有效抑制了省际能源消费的空间差异和极化趋势。而网络等级度的下降,通过增加双向链接,提高了能源消费空间关联网络中各省的地位。此外,网络效率的降低,增加了网络连线,破除了中介中心度较高的省份对能源消费关联网络中技术、人才等社会资源的支配和控制力,提高了整体网络的稳定性。在能源消费空间关联网络结构不断强化的条件下,能源强度的省际差异不断缩小,能源消费的空间公平性得以持续提高。

2. 个体网络结构的效应分析

本文以样本考察期内分省能源强度作为被解释变量,分别以各省份的点度中心度、接近中心度、中介中心度为解释变量构建面板数据模型进行回归分析(解释变量、被解释变量均取自然对数),根据 Hausman 检验在固定效应(FE)和随机效应(RE)之间进行选择,表 5 报告了回归结果。表 5 中最后两行给出了 Hausman 检验结果,其中模型(1)和模型(3)的检验结果支持固定效应,模型(2)的检验结果支持随机效应。根据表 5 的回归结果,三个中心性指标的回归系数均为负值,且均通过了 1%的显著性水平检验,这表明能源消费空间关联网络中各省的中心性对能源强度的降低具有显著的促进作用。

表 5 个体网络结构效应的面板数据回归结果

模型	(1)	(2)	(3)
常数项	2.946***	0.303***	13.001***
点度中心度	-0.754***	-	-
中介中心度	-	-0.142***	-
接近中心度	-	-	-3.075***
F	96.580***	-	68.370***
Wald	-	36.990***	-
R ²	0.237	0.242	0.227
Hausman	3.390*	0.020	5.550**
FE/RE	FE	RE	FE

注:***、**、* 分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平。

资料来源:作者计算整理。

根据表 5 中模型(1)的回归结果,点度中心度的回归系数为-0.754,说明点度中心度每提高 1%,则能源强度下降 0.754%。这意味着各省份在能源消费空间关联网络中与其他省份关联越广泛,则网络局部关联程度就越高,提高了整体网络密度、降低了网络等级度和网络效率,增强了整体网络对个体省份的影响,促进了能源强度的降低。因此,对于点度中心度较小且能源强度较高的省份,如宁夏、山西、河北、青海、云南等,可以通过加强与其他省份的能源联系有效促进其能源强度的降低。根据表 5 中模型(2)的回归结果,中介中心度的回归系数为-0.142,说明中介中心度每提高 1%,则能源强度下降 0.142%。这意味着各省份在现有能源消费空间关联网络中,中介中心度提高的省份拉大了与其他省份的比较优势,这些省份的比较优势在网络关联条件下通过整体网络可以更加精准地控制和引导各省份能源流动的方向和数量,强化了对其他省份的“空间溢出”效应,从而促进了能源消费空间关联网络中各省份能源强度的降低。因此,对于中介中心度较小且能源强度较高的省份,如宁夏、山西、河北、青海、贵州等,可以通过提高自身在能源消费空间关联网络中的地位,加强与其他关联省份之间的能源联系,有效降低本省的能源强度。根据表 5 中模型(3)的回归结果,接近中心度的回归系数为-3.075,说明接近中心度每提高 1%,则能源强度下降 3.075%这意味着接近中心度的提高使得网络中各省份的相互依赖关系更为密切,从而提高了整体网络结构对各省能源消费的影响,有利于能源强度的降低。因此,对于接近中心度较小且能源强度较高的省份,如吉林、

黑龙江、宁夏、河北、山西等,可以通过加强与能源消费空间关联网络中的中心省份如上海、天津、江苏、浙江等的关联降低其能源强度。而对于中心度排名较为靠前省份如上海、天津等,其能源强度的排名与其中心度的排名并未一致,它们的能源强度仍有进一步下降空间,因此,对于这些省份可以进一步发挥它们在能源消费空间关联网络中的中心地位,促进其能源强度持续降低。

五、结论与政策含义

1. 研究结论

本文基于 1995—2012 年中国大陆分省份数据,从网络结构视角重新审视能源消费的空间关联,构建修正的引力模型确定省际能源消费的空间关联关系并建立网络,在此基础上,利用社会网络分析方法对中国省际能源消费空间关联网络结构及其效应进行了实证考察。主要研究发现如下:

(1)从整体网络结构特征看,样本考察期内,中国省际能源消费空间关联的网络密度呈现逐年提高的趋势,省际之间能源消费的联系越来越密切。网络关联度的测度结果表明中国省际能源消费空间关联网络的连通效果比较好,省际之间的能源消费具有普遍的空间关联和空间溢出效应;网络效率和网络等级度逐年下降,网络稳定性逐步提高,“等级森严”的空间结构逐渐被打破。

(2)从个体网络结构特征看:①上海、天津、江苏、浙江、山东、广东、北京、福建、甘肃 9 个省份的点度中心度高于全国均值。黑龙江、吉林、湖南、宁夏、重庆的点度中心度排在全国最后 5 位。②上海、天津、江苏、浙江、广东、北京、山东 7 个省份的中介中心度高于全国均值,这 7 个省份中介中心度之和占了总量的 80%以上,而排名后 5 位省份的中介中心度只占总量的 1.2%。上海、北京、天津、广东等经济发达省份在能源消费空间关联网络中发挥重要的中介和桥梁作用。③上海、天津、江苏、浙江、山东、广东、北京、福建 8 个省份的接近中心度高于全国均值,在网络中扮演着中心行动者的角色。而接近中心度排名最后 5 位的黑龙江、吉林、湖南、安徽、宁夏,在网络中扮演着边缘行动者的角色。

(3)块模型分析结果显示,集中在环渤海地区的北京、天津、辽宁、内蒙古、山东 5 个省份组成的板块在能源消费空间关联网络中扮演“双向溢出”角色。集中在长三角和珠三角地区的广东、江苏、福建、上海、浙江 5 个省份组成的板块在网络中扮演“净受益”角色。集中在能源储量相对丰富地区的新疆、山西、吉林、甘肃、河北、宁夏、黑龙江、河南、青海、陕西 10 个省份在能源消费空间关联网络中扮演“净溢出”角色。其他 10 个省份组成的板块在网络中扮演“经纪人”角色。

(4)效应分析结果显示,能源消费空间关联的网络结构对能源强度存在显著的影响,整体网络密度的提升、网络效率和网络等级度的下降能显著降低能源强度,缩小小能源消费的区域差异,提高能源消费的空间公平性。因此,强化能源消费空间关联的网络结构成为区域间能源强度收敛的重要驱动机制。同时,在现有整体网络结构下,个体网络中心性指标包括点度中心度、中介中心度、接近中心度的提升对能源强度的降低也具有显著促进作用。

2. 政策含义

(1)全面认识能源消费空间关联关系及其网络结构特征,创新协同节能思路,实现能源政策的有效转向。一方面,能源消费空间关联的网络结构为能源政策的制定带来了严峻挑战。根据中国目前的能源政策,全国总体的节能目标需要分解到各省份来落实完成。国家对节能目标的分解已经充分考虑了各个省份的经济发展水平、区位及资源等因素,然而省际能源消费存在较强的空间关联性,而且这种关联不是简单的单个省份对单个省份(点对点)的关系,而是多个省份之间的复杂网络关系,由上述关系决定的网络结构使得各省份节能任务的完成不仅取决于自身而且也与其他省份存在密切联系,这无疑增加了能源政策实施的难度,因此,要通过宏观调控和市场机制为能源跨区域交流和空间优化配置创造更多有利条件。另一方面,能源消费的“属性数据”和“关系数据”的表现存在较大差异。以 2012 年为例,能源消费量最大的 5 个省份依次是山东、河北、广东、江苏、河南;能源强度最大的 5 个省份依次是宁夏、青海、山西、新疆、贵州。若从属性数据出发,无疑这些省份是节

能的重点省份。然而,从关系数据的角度,点度中心度最大的5个省份依次是上海、天津、江苏、浙江、山东;中介中心度和接近中心度最大的5个省份依次均是上海、天津、江苏、浙江、广东。上述省份应发挥节能的中心和主导作用。为顺利完成全国总体节能目标,在能源政策的制定和实施过程中不仅要考虑“属性数据”(即数量)的表现,也要更加重视能源消费的空间联动效应(结构),逐步形成“数量—结构”驱动型的协同节能思路,推动能源政策从“局部”转向“整体”、从“点”转向“面”。

(2)不断调整和优化能源消费的空间关联网结构,提高能源的空间配置效率,实现空间协同节能。尽管能源消费在地理上存在明显的近邻效应,为地理上邻近地区的跨区域协同节能创造了条件,然而省际能源消费的空间关联关系呈现复杂的网络结构形态,从空间维度上为跨区域协同节能机制的构建提供了新的驱动力量,因此,跨区域协同节能不能仅局限于地理上的邻近地区,而应从“全国一盘棋”的网络结构视角重新审视和构建跨区域协同节能机制。一方面,进一步发挥政府宏观调控与市场机制两种力量对于能源消费空间关联的促进作用,在继续实施“西气东输”“北煤南运”“西电东送”等跨区域能源工程的同时,紧紧抓住“一带一路”战略机遇,促进能源资源的空间联系和空间格局优化,实现能源消费的互联互通。同时,也要更加充分认识市场在能源配置中的决定性作用,减少行政指令对能源市场的干预,利用价格、竞争、供求等市场机制进一步加强省际之间的能源联系。另一方面,除了从能源消费“量”的层面进行节能之外,要更加注重从“关系”的角度利用好不同省份在网络中的作用,实现空间协同节能。例如,通过能源空间格局优化,充分发挥上海、北京、天津、广东等省份在能源消费空间关联中的“中介”和“桥梁”作用。考虑到长三角、珠三角、京津冀等经济发达地区的能源消费量比较大,政府要增加这些地区与能源丰富地区的联系以保障这些地区经济发展。对于能源资源丰富裕的中西部省份,要发挥这些地区的资源优势以保障能源的有效供给。

(3)充分考虑能源消费空间关联网的板块结构特征,制定并推行区域差别化的能源政策,实现能源的空间分类管理。节能目标的分解不能采取一刀切的政策,要充分发挥能源消费板块之间的关联效应,因地制宜地实行能源空间分类管理政策以降低节能成本、提高节能效率。一方面,对于经济发达、能源需求量较大的“双向溢出”板块和“净受益”板块,应把优化和调整产业结构作为节能减排的核心,大力发展新能源产业,提升高污染、高能耗产业的准入门槛,加快淘汰落后产能。同时要利用这些板块自身的技术和管理优势,大力开发和生产清洁能源,注重调节板块内部的能源消费结构,发展循环经济,促进经济发展方式的转变。当然,“双向溢出”板块和“净受益”板块还要承担更多的节能任务,以保障“经纪人”板块和“净溢出”板块的顺利转型。另一方面,对于能源利用效率相对较低且能源储量丰富的“净溢出”板块和“经纪人”板块,在保障全国能源有效供给的前提下,要制定更为严格的节能措施以加强对能源的控制和管理,积极引入“双向溢出”板块和“净受益”板块先进的能源技术和能源管理手段以降低其能源强度。

(4)充分发挥能源消费空间关联的整体网络结构和个体网络结构对于降低能源强度和提升能源消费空间公平性的积极作用。一是积极探寻促进能源消费空间关联的有效途径,增加省际能源消费空间关联网的链接数量,为能源跨区域调配创造更多“管道”。二是要减少省际之间能源流动的壁垒,使一些省份由过去单向链接导致的从属地位向双向链接的平等地位转变,提高处于从属地位省份的话语权,不断缩小能源消费空间关联网中各省份之间在经济、技术、人才等方面的差距,进而促进整体能源强度的降低。三是要加快推进能源市场体系建设,进一步发挥市场对能源配置的决定性作用,增强省际能源消费之间的联系,提高能源消费空间关联网的稳定性,降低能源空间交流的交易成本。四是发挥能源消费空间关联的溢出效应,在实现能源消费空间关联网中各省份能源强度普遍降低的同时,不断提升能源消费的空间公平。

[参考文献]

- [1]康晓娟,杨冬民. 基于泰尔指数法的中国能源消费区域差异分析[J]. 资源科学, 2010, (3):485-190.
- [2]史丹. 中国能源利用效率问题研究[M]. 北京:经济管理出版社,2011.

- [3]吴玉鸣. 中国区域能源消费的决定因素及空间溢出效应[J]. 南京农业大学学报, 2012,(4):124-132.
- [4]马晓钰,李强谊. 中国能源消费区域差异分解及影响因素分析[J]. 工业技术经济, 2014,(252):114-124.
- [5]吴玉鸣,李建霞. 中国省际能源消费的空间计量经济分析[J]. 中国人口资源与环境, 2008,(3):93-98.
- [6]郝宇,廖华,魏一鸣. 中国能源消费和电力消费的环境库兹涅茨曲线——基于面板数据空间计量模型的分析[J]. 中国软科学, 2014,(1):134-147.
- [7]Wasserman, S., K. Faust. *Social Network Analysis: Methods and Applications* [M]. Cambridge:Cambridge University Press, 1994.
- [8]Borgatti, S. P., A. Mehra, and D. J. Brass. *Network Analysis in the Social Science* [J]. *Science*, 2009,5916(323):892-895.
- [9]Freeman, L. *The Development of Social Network Analysis*[M]. Vancouver:Empirical Press, 2004.
- [10]Scott, J., and P. J. Carrington. *The Sage Handbook of Social Network Analysis* [M]. New York:Sage Publication, 2011.
- [11]徐振宇. 社会网络分析在经济学领域的应用进展[J]. 经济学动态, 2013,(10):62-72.
- [12]Scott, J. *Social Network Analysis* [M]. London:Sage Publication, 2013.
- [13]侯赞慧,刘志彪,岳中刚.长三角区域经济一体化进程的社会网络分析[J]. 中国软科学, 2009,(12):90-101.
- [14]冷炳荣,杨永春. 中国城市经济网络结构空间特征及其复杂性分析[J]. 地理学报, 2011,(2):199-211.
- [15]汤放华,汤慧,孙倩. 长江中游城市集群经济网络结构分析[J]. 地理学报, 2013,(10):1357-1366.
- [16]李敬,陈澍. 中国区域经济增长的空间关联及其解释——基于网络分析方法[J]. 经济研究, 2014,(11):4-16.
- [17]罗家德. *社会网络分析讲义(第2版)*[M]. 北京:社会科学文献出版社, 2010.
- [18]刘军. *整体网分析——UCINET软件实用指南(第2版)*[M]. 上海:格致出版社, 2014.

Spatial Correlation Network Structure of Energy Consumption and Its Effect in China

LIU Hua-jun¹, LIU Chuan-ming¹, SUN Ya-nan²

- (1. School of Economics, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China;
2. School of Business Administration, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China)

Abstract: Based on the data of provincial energy consumption in China from 1995 to 2012, this paper uses the method of social network analysis (SNA) to empirically examine the spatial correlation network structure of energy consumption and its effect. The results show that: ①China's provincial energy consumption presents spatial correlation network structure. During the sample investigated period, network density and network connectedness gradually increase, network hierarchical structure is gradually broken, and network stability is strengthened. ②The coastal provinces including Shanghai, Tianjin, Jiangsu, Zhejiang and Guangdong have a high centrality and are locates in the center of the network playing a role of "bridge" and "intermediary". ③In the spatial correlation network of energy consumption, Bohai Rim is bidirectional spillover block, Yangtze River Delta and Pearl River Delta is net beneficial block, Xinjiang, Shanxi and the other provinces with abundant resource are net spillover block. Hunan, Hubei and the other central areas are broker block. ④The increase of the overall network density and stability and the decrease of network hierarchical degree can significantly reduce energy intensity and improve the fairness of energy consumption space. The promotion of individual network centrality plays a significant role on the reduction of energy intensity. The spatial correlation network structure of energy consumption poses severe challenges to the energy policy formulation and implementation, but creates favorable conditions for the construction of collaboration mechanism of inter-regional energy saving.

Key Words: energy consumption; spatial correlation; social network analysis; energy intensity

JEL Classification: P28 R12 A14

[责任编辑:王燕梅]