

引用格式:周彦楠,何则,马丽,等. 中国能源消费结构地域分布的时空分异及影响因素[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2247-2257.
[Zhou Y N, He Z, Ma L, et al. Spatial and temporal differentiation of China's provincial scale energy consumption structure[J].
Resources Science, 2017, 39(12): 2247-2257.] DOI: 10.18402/resci.2017.12.04

中国能源消费结构地域分布的时空分异及影响因素

周彦楠^{1,2,3}, 何 则^{1,2,3}, 马 丽^{1,2,3}, 杨 宇^{1,2,3}, 张天媛⁴, 陈力原⁴

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

4. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘 要:能源碳排放是全球温室效应最主要的贡献因素,要实现低碳发展,必须调整能源消费结构。本文基于分省能源终端消费数据,采用K-means聚类法和STIRPAT模型,对中国省级层面四大类能源的消费比重、时空分异、演化及其影响因素的研究结果表明:①1990—2014年间,各省煤炭消费比重不断降低,不同省区在不同时段石油消费比重变化呈现多样性特征,各省天然气消费比重整体仍处于较低水平上,电力与热力消费比重整体保持着持续增加的趋势;北京、天津、上海、江苏、广东、海南、甘肃、青海和宁夏处于相对较优的低碳能源消费结构;②1990—2014年期间,中国能源终端消费结构呈现出不断改善的趋势,其地域分布一方面呈现出明显的地带性分布特征,同时也表现出一定的产地消费导向特征;③能源消费强度、第二产业比重、能源生产结构和资本投入等依次对以煤炭为主的能源消费结构有正向促进作用;土地城市化、能源自给度、科技进步和进出口贸易等具有反向抑制作用;而人均GDP、人口城市化和实际利用外商直接投资的作用不显著。建议在省区层面着力调整能源消费结构,关注河北、山西和贵州等地能源产地消费导向问题,并通过加快推进产业结构高级化进程、合理安排城市化进程、提升科技创新能力和增强对外开放水平,以有效改善各省能源消费结构、降低碳排放,实现低碳发展。

关键词:能源消费结构;地域分布;K-means;STRIPAT;时空分异;影响因素;中国

DOI: 10.18402/resci.2017.12.04

1 引言

全球变暖的客观事实要求各经济体必须走“低碳经济”发展之路,降低碳排放、实现低碳发展是遏制全球气候变暖的重大战略举措^[1]。中国是目前世界上最大的碳排放国,作为一个负责任的发展中大国,2015年6月30日,中国在向《联合国气候变化框架公约》秘书处提交的应对气候变化的国家自主贡献文件(INDC)中承诺:CO₂排放2030年左右达到峰值并争取尽早达峰,碳排放强度与2005年相比下降60%~65%,非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右^[2]。这一目标的实现有赖于全国层面社会经济和产业结构的实质性转型,更有赖于省区层面

节能减排的具体行动^[3]。

国际研究表明,影响碳排放的因素包括经济发展水平、产业结构、能源结构和能源强度等,经济、人口、技术等领域的变化均可对碳排放量产生影响^[4]。计量经济学的实证研究也证明,人口增长与碳排放具有同向性,人均碳排放与人均收入表现出明显的空间集聚特征且呈倒“U”型分布^[5,6];城市化是CO₂排放的重要影响因素,固定资产投资对能源消费碳排放具有主导作用^[7]。省级尺度的实证研究表明,中国各省份的碳排放呈一定的空间正自相关性、各地碳强度存在显著的空间相关性^[8],同时,增强对外贸易水平在一定程度上可减少人均碳排放^[9],外商

收稿日期:2017-09-07;修订日期:2017-11-25

基金项目:中华人民共和国科学技术部国家重点研发项目(2016YFA0602800);国家自然科学基金项目(41401132;41371141)。

作者简介:周彦楠,女,河南信阳人,硕士生,从事能源地理与区域发展研究。E-mail:zhouyn.17s@igsnrr.ac.cn

通讯作者:杨宇, E-mail: yangyu@igsnrr.ac.cn

直接投资能有效降低各地的碳强度^[10],地区创新能力的提升对抑制碳排放存在积极影响与空间溢出效应^[11],产业结构调整对能源消费碳排放强度时空格局演变具有重要影响^[12],优化能源结构与控制人口增长能有效抑制碳排放^[13]。总之,学者们采用计量经济学模型在国家、省级和城市尺度,基于经济与人口增长、城市化、工业化、对外开放水平等视角探讨了能源消费、碳排放和环境压力的影响因素,其结果对于不同层次的能源消费结构调整与碳减排具有一定的指导意义。然而,上述研究均相对地关注于碳排放,而对能源结构的地域演化及其机理缺乏系统的探讨。

本文重点关注中国省级尺度能源终端消费结构的演变及其影响因素。通过回溯1990年以来中国各省区四大类能源(煤、石油、天然气和电力热力)消费结构演变基本特征的基础上,探讨了省级尺度上能源终端消费结构地域分布模式的时空分异及演进特征,并通过STIRPAT面板计量模型探讨影响省级尺度上能源终端消费的因素。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 K-means 聚类

为研究一定时期内省级尺度能源消费结构演变及其地域分布模式的演变,引入K-means聚类算法。K-means聚类虽然存在对初始点敏感度低的问题^[14],但因其聚类结构明确而被广泛使用。一般而言,K-means聚类是在给定的聚类数据和目标函数下,通过多次迭代后,当目标函数收敛至阈值时,完成聚类方案。本研究中,首先,基于分省计算煤炭、石油、天然气和电力热力四类能源消费占总能源消费比重;其次,以5年为时段划分,计算每5年的各省能源终端消费结构的均值;最后将各省的5年均值统一编号后进行K-means聚类,多次计算后得到最终聚类结果,以比较能源终端消费结构及其地域分布模式的时空演进特征。

K-means聚类算法的基本过程如下。

(1)随机选取 k 个聚类质心点为 $u_1, u_2, \dots, u_k \in R^n$;

(2)重复如下过程直到收敛:

①对每一个参与聚类的单位 i ,计算其与与质心点的距离,以确定其所属的类:

$$c^{(i)} = \arg \min_j \|x^{(i)} - u_j\|^2 \quad (1)$$

②对于每一类 j ,重新计算质心:

$$u_j = \frac{\sum_{i=1}^m 1\{x^{(i)}=j\}x^{(i)}}{\sum_{i=1}^m 1\{c^{(i)}=j\}} \quad (2)$$

式中 k 为事先设定的聚类数,一般根据经验或具体研究内容而定。经过多次计算,发现当聚类结果为5类时,其结果既具有相对稳定的地域分布特征,又有比较明确的能源消费特征指向性,因此本研究中 k 取值为5; $c^{(i)}$ 为参与聚类的单位 i 与 k 个类中距离最近的类; u_j 代表质心点。

2.2 STIRPAT 模型

Ehrlich 等于1971年首次提出“IPAT”方程以反映人口环境压力影响,此后,Dietz 等于1997年在IPAT方程的基础上提出STIRPAT模型,旨在改善原方程不能区分最主要因素的缺陷^[15]。基于IPAT方程、STIRPAT模型以及各同类该模型的拓展与变体进行能源消费与碳排放影响因素的探讨,是目前被广泛用的一种研究模式^[16-19]。

STIRPAT模型的基本形式为:

$$I = aP^bA^cT^de \quad (3)$$

式中 I 、 P 、 A 、 T 分别为环境、人口、富裕度和技术进步水平; a 为模型系数; b 、 c 、 d 为构建模型需要估计的指数; e 为误差项。

将公式(3)两边分别取对数后,将得到包括固定效应、混合效应和随机效应的模型:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + e \quad (4)$$

STIRPAT模型由于其灵活性与开放性,研究者可根据研究目的及需要来增加控制因素。采用STIRPAT模型分析中国省区尺度能源终端消费结构的影响因素,除了考虑该模型的一般组成外,仍需要考虑能源终端消费结构和社会经济发展状态。因此,本研究的初始模型设计中包含六类影响因素(表1):①能源禀赋因素,包含了能源生产结构和能源自给度2项指标;②城市化水平因素,包含了人口城市化水平和土地城市化2项指标;③工业化水平因素,包含了人均国内生产总值(人均GDP)和以第二产业比重2项指标;④对外开放水平,包含了

2017年12月

表1 模型的因素与变量列表

Table 1 Factors and variables in the STIRPAT model

影响因素	变量	定义
因变量	能源终端消费结构(ES)/%	煤炭消费占终端消费总量的比重
能源禀赋	能源生产结构(EPS)/%	煤炭生产量占能源生产量比重
	能源自给度(SR)/%	能源生产量与能源消费量比值
城市化水平	人口城市化(PU)/%	城市人口占总人口比重
	土地城市化(LU)/ km^2	城市建成区规模
工业化水平	人均GDP($PGDP$)/亿元	GDP与总人口比值
	第二产业比重(IS)/%	第二产业增加值占GDP比重
对外开放水平	货物对外开放水平(TR)/万元	进出口贸易总额
	资本对外开放水平(FDI)/万元	实际利用外商直接投资总额
资本投入	资本要素投入水平(FA)/万元	全社会固定资产投资总额
技术进步	专利授权量(PA)/项	专利授权量
	能源消费强度(EI)/(tec/万元)	单位GDP能源终端消费量

货物对外和资本对外开放水平2项指标;⑤资本投入因素,为资本要求投入水平;⑥技术进步因素,包含了专利授权量和能源消费强度2项指标。拓展后的STIRPAT面板模型的表达式为:

$$\ln ES_{it} = a + \beta_1 \ln EPS_{it} + \beta_2 \ln SR_{it} + \beta_3 \ln PU_{it} + \beta_4 \ln LU_{it} + \beta_5 \ln PGDP_{it} + \beta_6 \ln IS_{it} + \beta_7 \ln TR_{it} + \beta_8 \ln FDI_{it} + \beta_9 \ln FA_{it} + \beta_{10} \ln PA_{it} + \beta_{11} \ln EI_{it} + \varepsilon \quad (5)$$

式中因变量 ES 为能源终端消费结构; i 为第 i 个省区; t 为时间; EPS 为能源生产结构; SR 为能源自给度; PU 为人口城市化; LU 为土地城市化; $PGDP$ 为人均GDP; IS 为第二产业比重; TR 为货物对外开放水平; FDI 为资本对外开放水平; FA 为资本要素投入水平; PA 为专利授权量; EI 为能源消费强度; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{11}$ 为弹性系数,表示当各因素变化1%时,其分别引起 ES 变化为 $\beta_1\%, \beta_2\%, \dots, \beta_{11}\%$ 。

2.3 数据来源与处理

研究所使用的数据来源于《中国统计年鉴》^[20]、《中国能源统计年鉴》^[21]、《新中国六十年统一资料汇编》^[22]、《中国城市统计年鉴》^[23]、《中国科技年鉴》^[24]、《中国对外经济统计年鉴》^[25]等。分省区数据中,重庆并入四川计算。由于数据获取困难,本次研究不包括香港、台湾、澳门和西藏。涉及的指标主要有年末总人口(万人)、国内生产总值(GDP,亿元)、三次产业产值(亿元)、固定资产投资(亿元)、城市建设用地面积(km^2)、能源生产总量(万tec)和能源消费总量(万tec)、进出口总额(万美元)、实际利用外

商直接投资(万美元)、专利申请授权量(项)等。能源类型分为煤炭、石油、天然气、电力与热力,单位为万tec。数据获取时间长度为1990—2015年,但因能源数据缺少1991—1994年和2015年,为统一分析时段,并考虑到中国能源消费的实际演变轨迹与特征,本研究中的分析时段为1990—2014年(不包含1991—1994年)。GDP采用价格指数换算为以1990年为基础的不变价格。进出口总额与实际利用外商投资总额,以当年汇率统一换算为人民币。少量缺失数据,以插值法补齐。

3 省级尺度能源消费结构时空分异及其演变

3.1 各省能源消费结构差异及其时空分异

3.1.1 能源消费结构的相对比重分级

为评价各省区各类能源终端消费相对比重的时空分异及其演变,将1990—2014年各省区四类能源比重以5年时间为间隔,进行分时段计算,然后在SPSS中对四类能源消费比重逐项进行K-means聚类,得到5类聚类结果及其聚类质心,并将其按照质心分布递增原则分为5级(表2)。聚类结果显示,煤炭消费比重分级的聚类中心由低到高分别是18.79%、37.14%、51.31%、63.89%和75.15%;石油消费比重分级的聚类中心由低到高依次是10.84%、19.61%、27.95%、36.96%和49.19%;天然气消费比重分级的聚类中心由低到高分别是1.76%、9.50%、17.73%、25.49%和35.50%;电力与热力的消费比重

表2 1990—2014年中国分省各类能源终端消费比重
分级(K-means聚类中心)

Table 2 Classification of consumption proportion of various energy
in China from 1990 to 2014 (K-means cluster center)

能源消费比重等级	(%)				
	I低	II较低	III中	IV较高	V高
煤炭	18.79	37.14	51.31	63.89	75.15
石油	10.84	19.61	27.95	36.96	49.19
天然气	1.76	9.50	17.73	25.49	35.50
电力热力	12.85	18.24	23.71	29.56	38.64

分级的聚类中心由低到高依次是12.85%、18.24%、23.71%、29.56%和38.64%。

3.1.2 各类能源消费比重时空演化

根据中国各省四大类能源消费比重演变图谱(图1),1990—2014年期间,各省煤炭消费比重皆呈现出降低特征;不同省区在不同时段石油消费比重的增、降与保持不变的变化,呈现多样性特征;天然气消费比重整体处在低水平上,但局部省区近年来消费比重增加明显;电力与热力消费方面,整体保持着持续增加的趋势,部分省份增加明显。综合来

看,北京、天津、上海、江苏、广东、海南、甘肃、青海和宁夏处于相对较优的低碳能源消费结构。

从煤炭的消费比重变化来看,河北、山西、内蒙古和贵州省尽管消费比重呈下降趋势,但仍占60%左右的消费比重;而北京、上海、浙江和广东省自1990年以来,煤炭消费比重下降明显,目前均处于低消费比重状态,比重在20%左右;天津、辽宁、黑龙江、江苏、安徽、福建、湖北、湖南、广西、四川、甘肃、青海、宁夏和新疆等省份煤炭消费比重相对下降,目前基本处于较低或中等水平。山东自1990年以来,煤炭消费比重一直处于中等水平未变;而海南省则一直处于低水平,目前比重为10.13%,显示出较优的能源消费结构。

从石油的消费比重变化来看,上海(49.25%)、广东(36.22%)和海南(37.14%)的石油消费比重在各省处于相对较高的水平,其中,广东和海南近年来略有下降。河北、山西、内蒙古、安徽、河南、四川、贵州、云南、青海和宁夏等省份处于较低水准,目前处在10%~20%的比重水平,尤其是河北、山西、

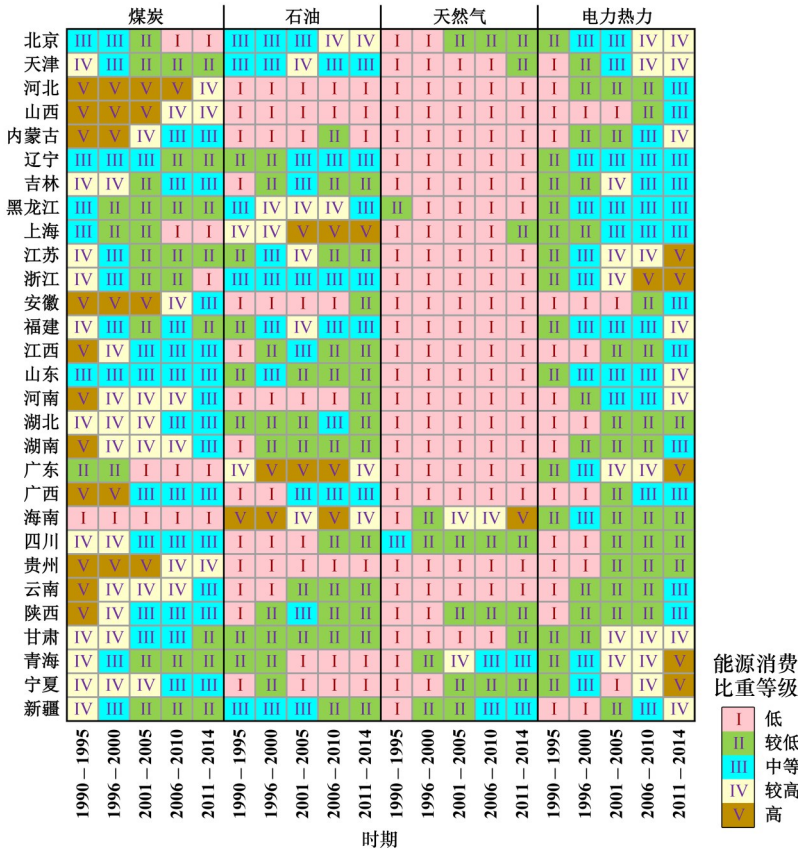


图1 1990—2014年中国各省各类能源消费比重演变图谱

Figure 1 The map of proportion of energy consumption in various provinces in China from 1990 to 2014

2017年12月

内蒙古和贵州呈现出明显的“重煤轻油”的消费状态。北京、辽宁、山东和新疆等地的石油消费比重略有上升。天津、吉林、江苏、福建、江西、湖北和山西等地在1990—2014年期间,石油消费比重呈现出先升后降的趋势,目前大多处于较低或中等水平,比重大致处在20%~30%之间。

从天然气的消费比重来看,北京、天津、上海、海南、陕西、青海、宁夏、新疆等省区表现增高特征,海南比重为35.5%,青海比重为21.04%,其余省区在10%左右;而黑龙江和四川省则表现为降低的特征,目前比重分别为4.45%和11.01%;其他省份基本保持未变且比重相差不大,基本不足10%。

从电力与热力的消费比重来看,整体上各省在1990年以来,电力热力消费比重均有不同程度的增长,其中,江苏、上海、广东、青海和宁夏自1990年以来,电力热力消费比重增长明显,目前处于高消费水平,比重大多超过30%;北京、天津、内蒙古、福建、山东、河南、甘肃和新疆等省份也表现出较好的增长趋势,但目前的消费水平次于前述省份;而海南、四川、贵州等地电力热力消费比重略有增长,目前处于较低水平,电力热力消费比重不足20%。

3.2 各省能源消费结构合理型的地域分布及演变

3.2.1 能源消费结构的合理性分型

为评价各省区能源终端消费结构的合理性,以低碳消费为目标导向,以单位能源消费排放碳比重递减原则,首先将各省不同时段的大类能源消费结构统一进行K-means聚类;其次,依据聚类质心的结果分布,乘以各类能源的碳排放系数,将5个聚类转为5个合理性分型。计算所采用的碳排放系数,以各权威部门公布数据为基础取均值^[26,27](表3),煤炭取0.7329,石油取0.5574,天然气取0.4226。需要说明的是,根据生产电力和热力时的一次能源消费结构、消耗量和电力调配分摊等因素,核算出的电

表3 各种能源碳排放系数

数据来源	煤炭/ (tC/tec)	石油/ (tC/tec)	天然气/ (tC/tec)
DOE/EI	0.702 0	0.478 0	0.389 0
日本能源经济研所	0.756 0	0.586 0	0.449 0
国家科委气候变化项目	0.726 0	0.583 0	0.409 0
国家发改委能源研究所	0.742 6	0.582 5	0.443 5
平均值	0.732 9	0.557 4	0.422 6

力热力的碳排放系数,属于电力生产碳排放系数;一般认为,电力和热力在终端消费的碳排放系数近乎为零,因此本文中电力和热力的碳排放系数取值为0。五类能源消费结构合理性分型结果如表4所示。经计算,最优型能源消费结构的碳密度(单位折标后能源消耗的碳排放量)为0.43t碳/t标准煤,次优型、一般型、较差型和最差型能源消费结构的碳密度分别为0.44tC/tec、0.46tC/tec、0.53tC/tec和0.59tC/tec。

最优型的电力热力消费比重较高,占比32.05%;煤炭消费比重为39.72%,石油消费比重为15.50%,天然气比重的为12.74%。次优型与最优型相比,其煤炭和电力消费重较低,而石油和天然气消费比重较高,根据碳密度计算,次优型比最优型仅差0.01tC/tec;次优型煤炭消费占比为15.79%;石油消费比重较高,占比为46.91%,天然气、电力和热力的消费比重分别为15.53%和21.77%。一般型煤炭和石油消费比重相当且较低,煤炭消费比重为34.01%,石油比重为35.36%,天然气、电力和热力的消费比重分别为3.59%和27.04%。与一般型相比,较差型的煤炭消费比重较高,为53.38%,石油、天然气、电力与热力的消费比重分别为22.40%、3.10%和21.11%。最差型煤炭消费比重最高,为70.38%;其他类型能源消费比重都相对较低,石油、天然气、电力与热力消费比重分别为11.85%、1.88%和

表4 1990—2014年中国分省能源终端消费合理性分型

能源消费结构类型	I:最优型	II:次优型	III:一般型	IV:较差型	V:最差型
煤炭/%	39.72	15.79	34.01	53.38	70.38
石油/%	15.50	46.91	35.36	22.40	11.85
天然气/%	12.74	15.53	3.59	3.10	1.88
电力热力/%	32.05	21.77	27.04	21.11	15.89
碳密度/(tC/tec)	0.43	0.44	0.46	0.53	0.59

15.89%。

3.2.2 能源消费结构地域分布及时空分异

从能源终端消费结构时段演化特征看,1990—2014年期间,中国能源终端消费结构呈现出不断改善的趋势(图2,图3)。总体上,能源终端消费结构不合理的省区逐渐减少,最差型省区的数量从1990—1995年期间的16个减少到2011—2014年期间的3个,即山西、河北和贵州,煤炭消费比重均在60%以上;较差型的省区数量不断波动,在1996—2000年上升峰值后开始下滑,随后逐渐上升值2011—2014年有12个,相较于1990—1995增加了1个;一般型的省区呈先上升后下降的趋势,从1990—1995年的1个(广东)在2001—2005年达到峰值后开始下降,在2011—2014年降至6个;次优型省区由1990—1995年的1个(海南)逐渐增加值2011—2014年的3个省区;最优型变动较为明显,尤其是1990—2000年间最优型数量一直为0,直到2001—2005年首次出现,继而在2006—2010年增加到4个,2011—2014年又增加了甘肃,总量为5个。

从能源消费结构的地域分布来看,中国能源终端消费一方面呈现出明显的地带性分布特征,同时也表现出一定的产地消费导向特征。地带性分布特征方面,2000年以前东部沿海省区与西部部分省区,如新疆和甘肃,呈现较差状态;而中部地区与西部部分省区则为最差型,能源消费结构存在严重的煤消费取向。2000年后,内蒙古、云南和河南等省区陆续由最差型转为较差型,能源消费结构得到一定程度的优化。值得一提的是,青海在2000年后能源消费结构转变为最优型,此后一直保持在最优

型;新疆和甘肃在2006年与2011年陆续成为最优型,海南一直保持在次优型,广东则一直保持在一般型;此外,江苏、上海和北京能源消费结构不断优化,近年来,基本保持在最优型或次优型。产地消费导向特征方面,以天然气消费为例,在2001—2005年之前主要集中在西南、东北和西北地区及部分沿海地区,即四川、黑龙江、辽宁、新疆、海南;2001—2005年后,随着中国西气东输、中西部鄂尔多斯(陕甘宁)盆地天然气勘探取得较大进展并已形成一定储量规模以及海域油气的开放,中国中部和东部天然气终端消费在能源消费中占比增加,因此能源消费结构的优化特征随之显现。2011—2014年能源消费仍处于最差型的省区为山西、河北和贵州3个,其中山西和贵州是中国重要的产煤区。

4 能源消费结构影响因素的面板计量分析

4.1 单位根检验及模型选择

(1)数据是否平稳是数据回归估计的前提,为避免伪回归,对面板数据进行单位跟检验。综合使用LLC检验^[28]、IPS^[29]、ADF^[30]和PP^[31, 32]检验方法对数据进行单位根检验,在结论不一致时,则认为变量为非平稳,继续进行差分检验,直至平稳。通过一阶差分,所有变量均具有平稳性,为一阶单整,因此可以对涉及到的变量进行数据协整检验。通过Kao检验,ADF统计值为-4.3881, $p=0.0000$,拒绝无协整性原假设。综上,各变量间存在协整关系,可以纳入模型分析。

(2)在建立面板模型前,要对模型的类型进行

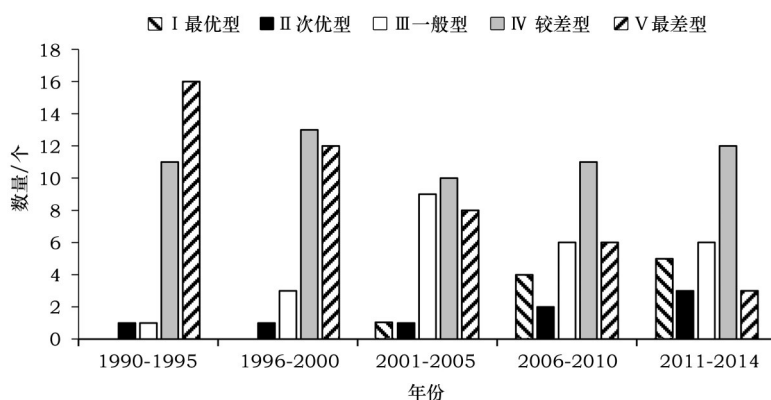


图2 1990—2014年中国各省能源消费结构合理型的数量分布

Figure 2 The distribution of energy consumption structure in the provinces in China from 1990 to 2014

2017年12月

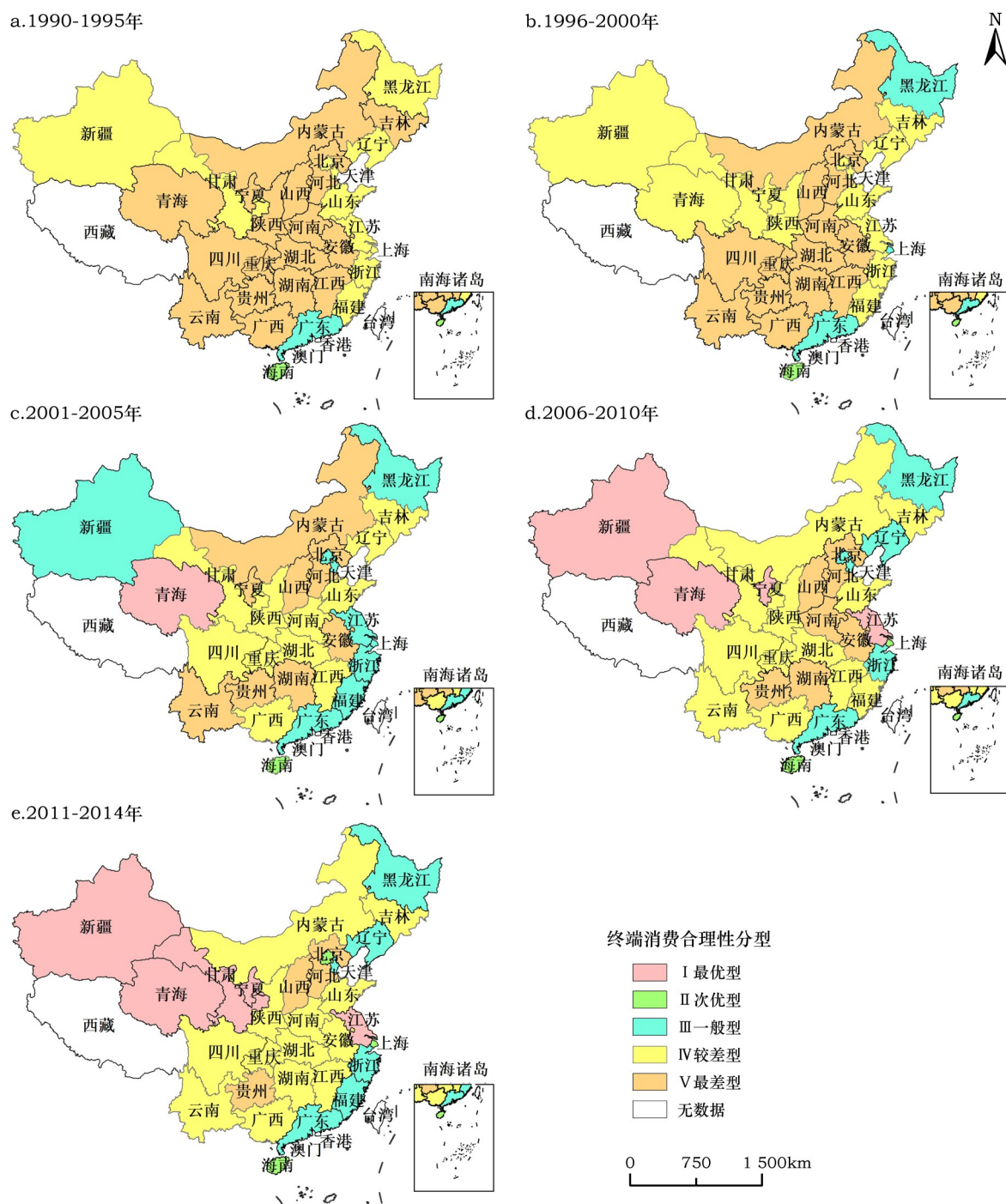


图3 1990—2014年中国分省能源终端消费合理性分型

Figure 3 The distribution of energy consumption structure in the provinces in China from 1990 to 2014

判别。Hausman 检验用于判别应建立个体随机效应模型还是固定效应模型,该检验的原假设是应建立个体随机效应模型,备择假设是应建立个体固定效应模型,结果显示 P 值小于 0.01,所以拒绝原假设,即所建立的个体固定效应模型是合适的。F 检验用于判别模型中是否存在个体固定效应,该检验

的原假设是真实模型是混合模型,备择假设是真实模型是个体固定效应模型。经检验, p 值小于 0.01,所以拒绝原假设,即所建立的个体固定效应模型是合适的。

4.2 能源消费结构影响因素分析

面板模型结果显示(表5),能源生产结构、能源

表5 模型的面板计量结果

Table 5 Results of panel measurement model

变量	系数	t检验	显著性
<i>LnEPS</i>	0.091 1	4.606 3	0.000 0
<i>LnSR</i>	-0.060 5	-3.866 2	0.000 1
<i>LnPU</i>	-0.037 2	-1.423 5	0.155 1
<i>LnPGDP</i>	-0.068 2	-1.280 2	0.201 0
<i>LnEI</i>	0.169 8	6.085 5	0.000 0
<i>LnIS</i>	0.142 3	2.552 1	0.011 0
<i>LnFDI</i>	-0.003 6	-0.663 3	0.507 4
<i>LnFA</i>	0.078 9	3.424 1	0.000 7
<i>LnTR</i>	-0.045 1	-3.644 6	0.000 3
<i>LnLU</i>	-0.064 1	-1.923 8	0.054 9
<i>LnPA</i>	-0.049 0	-4.273 2	0.000 0
<i>C</i>	0.794 7	2.287 7	0.022 5
R-squared			0.919 6
Adjusted R-squared			0.914 1
F-statistic			166.668 5
Prob(F-statistic)			0.000 0

自给度、能源强度、第二产业比重、全社会固定资产投资总额、进出口贸易总额、土地城市化和专利授权量对煤炭的终端消费结构具有显著影响。影响煤炭在能源消费中占比的因素中,正向影响因素依次从高到低为能源消费强度>第二产业比重>能源生产结构>资本投入,而土地城镇化>能源自给度>科技进步>进出口贸易等对以煤炭为主的能源消费结构具有反向抑制作用。

各因素的具体影响如下:

(1)能源禀赋。能源禀赋的各项指标均通过1%的显著性水平检验,但两项指标对煤炭在终端消费比重影响方向不一致;其中,能源生产结构具有显著的正向影响,每提高1%,煤炭在终端消费比例将提升0.0911%;能源自给度与能源终端消费结构呈负相关,其每提高1%,煤炭在终端消费比重将降低0.0605%。

(2)城市化水平。土地城市化通过5%的检验水平而人口城市化对煤炭在终端消费比重影响不显著,土地城市化有利于降低煤炭的终端使用比例,每提高1%,煤炭在能源终端消费比重将降低0.0641%。

(3)工业化水平。人均GDP对降低煤炭的终端消费结构的影响不显著,而第二产业比重通过1%

的显著性水平,对煤炭的终端消费结构具有显著的促进作用,其每增加1%,煤炭的终端消费结构将显著提升0.1423%。

(4)对外开放水平。FDI对煤炭的终端消费结构影响不显著,而TR具有显著的负影响,通过1%的显著性水平,其每正向变化1%,煤炭的终端消费结构将显著降低0.0451%。

(5)资本投入。FA通过1%的显著性水平,对煤炭的终端消费结构具有显著的正向影响,其每正向变化1%,煤炭的终端消费结构将显著促进0.0789%。

(6)技术进步。PA通过1%的显著性水平,对煤炭的终端消费结构具有显著的抑制作用,其每正向变化1%,煤炭的终端消费结构将显著降低0.0490%。EI对于煤炭在终端能源消费比例具有显著的正影响,EI越高越有利于促进煤炭在终端使用比例,其每增加1%,煤炭的终端消费结构将显著提升0.1698%。

5 结论与建议

5.1 结论

采用K-means聚类法和STIRPAT模型,对省级层面煤炭、石油、天然气以及电力热力四大类能源的消费比重、时空分异、演化及其影响因素研究发现:

(1)1990—2014年,各省煤炭消费比重无一例外的皆呈现出降低的特征,不同省区在不同时段石油消费比重变化呈现多样性特征;各省的天然气消费比重整体仍处于较低水平;电力与热力消费比重整体保持着持续增加的趋势。综合来看,北京、天津、上海、江苏、广东、海南、甘肃、青海和宁夏处于相对较优的低碳能源消费结构。

(2)从能源终端消费结构时段演化特征看,1990—2014年期间,中国能源终端消费结构呈现出不断改善的趋势。从能源消费结构的地域分布来看,中国能源终端消费一方面呈现出明显的地带性分布特征,同时也表现出一定的产地消费导向特征。

(3)面板计量模型检验和计算结果显示,影响煤炭在能源消费中占比的因素中,正向影响因素依次从高到低为能源消费强度>第二产业比重>能

2017年12月

源生产结构>资本投入;而土地城镇化>能源自给度>科技进步>进出口贸易等对以煤炭为主的能源消费结构具有反向抑制作用;而人均GDP、人口城镇化和实际利用FDI对煤炭为主的能源消费结构作用不显著。

5.2 建议

在充分认识优化能源消费结构和降低碳密度重要性的基础上,建议各省区未来应通过大力推行煤改电、提升天然气消费比例以及适当提升局部省份的石油消费比例,以替换过高的煤炭消费比重。其次,需重点关注和探索如何改善河北、山西和贵州等地的能源消费结构较差问题,解决能源产地消费导致的能源结构问题。过高的工业比重是一些省份能源结构不优的根本原因,只有不断改善其产业结构,加快推进产业结构高级化进程,才能有效优化这些省份的能源消费结构。不断扩大对外开放水平、着力提升科技创新与技术进步水平,扩大对外开放、科技创新与技术进步的空间溢出效应,可有效抑制碳排放,有利于中国省级层面的能源消费结构转型发展。研究发现城市化,尤其是土地城市化对于带动各省经济社会的发展具有重要作用,从而在一定程度上间接的促进了其能源消费结构的改善与降低了碳排放,但盲目的土地占用与过快的城市扩张将会造成严重的空间低效利用与社会问题,因此必须合理安排和推进城市化进程。

参考文献(References):

- [1] 杨骞,刘华军.中国二氧化碳排放的区域差异分解及影响因素-基于1995—2009年省际面板数据的研究[J].数量经济技术经济研究,2012,(5):36-49.[Yang Q, Liu H J. Regional difference decomposition and influence factors of China's carbon dioxide emissions[J]. *Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2012, (5):36-49.]
- [2] 中央政府门户网站.李克强宣布中国政府将提交应对气候变化国家自主贡献文件[EB/OL].(2015-06-30)[2017-11-01].http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-06/30/content_2887287.htm. [The China's Central Government's Web Portal. Premier Li Keqiang Has Announced that the Chinese Government Will Submit Documents to Respond to Climate Change[EB/OL]. (2015-06-30) [2017-11-01]. http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-06/30/content_2887287.htm.]
- [3] Cheng Y, Wang Z, Ye X, et al. Spatiotemporal dynamics of carbon intensity from energy consumption in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(4):631-650.
- [4] 卫平,周亚细.城市化、能源消费与碳排放-基于STIRPAT模型的跨国面板数据实证研究[J].生态经济,2014,30(9):14-18. [Wei P, Zhou Y X. Urbanization, energy consumption and carbon emission: a empirical study on transnational panel data based on STIRPAT model[J]. *Ecological Economy*, 2014, 30(9):14-18.]
- [5] Shi A. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975- 1996: evidence from pooled cross country data[J]. *Ecological Economics*, 2003, 44(1):24-42.
- [6] 王立猛,何康林.基于STIRPAT模型的环境压力空间差异分析:以能源消费为例[J].环境科学学报,2008,28(5):1032-1037. [Wang L M, He K L. Analysis of spatial variations in environmental impact based on the STIRPAT model-a case study of energy consumption[J]. *Acta Science Circumstantiae*, 2008, 28(5):1032-1037.]
- [7] Shahbaz M, Loganathan N, Sbia R, et al. The effect of urbanization, affluence and trade openness on energy consumption: a time series analysis in Malaysia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47(11):683-693.
- [8] 郑长德,刘帅.基于空间计量经济学的碳排放与经济增长分析[J].中国人口·资源与环境,2011,21(5):80-86. [Zheng C D, Liu S. Empirical research of carbon emission and economic growth in China: based on the spatial econometric analysis[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(5):80-86.]
- [9] 许海平.空间依赖、碳排放与人均收入的空间计量研究[J].中国人口·资源与环境,2012,22(9):149-157. [Xu H P. Spatial and econometric analysis of spatial dependence, carbon emissions and per capita income[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(9):149-157.]
- [10] 姚奕,倪勤.中国地区碳强度与FDI的空间计量分析-基于空间面板模型的实证研究[J].经济地理,2011,31(9):1432-1438. [Yao Y, Ni Q. The impact of foreign direct investment on carbon intensity- empirical study based on Chinese provincial dynamic panel data[J]. *Economic Geography*, 2011, 31(9):1432-1438.]
- [11] 李博.中国地区技术创新能力与人均碳排放水平-基于省级面板数据的空间计量实证分析[J].软科学,2013,27(1):26-30. [Li B. China's regional technological innovation capacity and per capita carbon emission level- empirical analysis of spatial measurement based on provincial panel data[J]. *Soft Science*, 2013, 27(1):26-30.]
- [12] 刘春兰,陈操操,陈群,等.1997年至2007年北京市二氧化碳排放变化机理研究[J].资源科学,2010,32(2):235-241.[Liu

- C L, Chen C C, Chen Q, *et al.* Evolution mechanisms of CO₂ emissions in Beijing city during the Period 1997- 2007[J]. *Resources Science*, 2010, 32(2):235-241.]
- [13] 陈青青, 龙志和. 中国省级 CO₂排放影响因素的空间计量分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(11): 15-20. [Chen Q, Long Z H. Spatial econometric analysis on the influence factors of Chinese provincial carbon dioxide emissions[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(11): 15-20.]
- [14] 李创新, 马耀峰, 王永明. 1993-2012 年中国入境旅游时空地域格局分异与动态演进-基于全局 K-Means 谱聚类法的“典型区域”实证研究[J]. 资源科学, 2015, 37(11):2100-2110.[Li C X, Ma Y F, Wang Y M. Regional structure and dynamic evolution of Chinese inbound tourism from 1993 to 2012 based on a spatial and temporal view and K-Means spectrum clustering methods[J]. *Resources Science*, 2015, 37(11):2100-2110.]
- [15] 欧元明, 周少甫. 基于空间面板 STIRPAT 模型的省域碳排放研究[J]. 工业技术经济, 2015, 34(3):58-65. [Ou Y M, Zhou S F. Study of provincial carbon emissions based on the spatial panel STIRPAT model[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2015, 34(3):58-65.]
- [16] Waggoner P E, Ausubel J H. A framework for sustainability science: a renovated IPAT identity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(12):7860-7885.
- [17] York R, Rosa E A, Dietz T. Footprints on the earth: the environmental consequences of modernity[J]. *American Sociological Review*, 2003, 68(2):279-300.
- [18] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and Impact: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecological Economics*, 2003, 46(3):351-365.
- [19] 王永刚, 王旭, 孙长虹, 等. IPAT 及其扩展模型的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 949-957. [Wang Y G, Wang X, Sun C D, *et al.* Research progress on the application of IPAT model and its variants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3):949-957.]
- [20] 国家统计局. 中国统计年鉴 1991-2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991-2015. [National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 1991-2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 1991-2015.]
- [21] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 1991-2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991-2015. [National Bureau of Statistics. China Energy Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 1991-2015.]
- [22] 国家统计局. 新中国六十年统一资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010. [National Bureau of Statistics. China Compendium of Statistics 1949- 2008[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.]
- [23] 国家统计局. 中国城市统计年鉴 1991-2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991- 2015 [National Bureau of Statistics. China City Statistical Yearbook 1991- 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 1991-2015.]
- [24] 国家统计局. 中国科技年鉴 1991-2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010. [National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook on Science and Technology[M]. Beijing: China Statistics Press, 1991-2015.]
- [25] 国家统计局. 中国对外经济统计年鉴 1991-2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991-2015. [National Bureau of Statistics. China External Economic Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1991-2015.]
- [26] 孟昭利. 企业能源审计方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. [Meng Z L. Enterprise Energy Audit Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.]
- [27] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2009 中国可持续发展战略报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.[The Sustainable Development Strategy Team of the Chinese Academy of Sciences. China's Sustainable Development Strategy Report in 2009[M]. Beijing: Science Press, 2009.]
- [28] Levin A, Lin C F, Chu C S J. Unit root tests in panel data: asymptotic and finite- sample properties[J]. *Journal of Econometrics*, 2002, 108(1): 1-24.
- [29] Im K S, Pesaran M H, Shin Y. Testing for unit roots in heterogeneous panels[J]. *Journal of Econometrics*, 2003, 115(1): 53-74.
- [30] Maddala G S, Wu S. A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test[J]. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 1999, 61(S1):631-652.
- [31] Choi I. Unit root tests for panel data[J]. *Journal of International Money and Finance*, 2001, 20(2):249-272.
- [32] Hadri K. Testing for stationarity in heterogeneous panel data[J]. *The Econometrics Journal*, 2000, 3(2):148-161.

Spatial and temporal differentiation of China's provincial scale energy consumption structure

ZHOU Yannan^{1,2,3}, HE Ze^{1,2,3}, MA Li^{1,2,3}, YANG Yu^{1,2,3}, ZHANG Tianyuan⁴, CHEN Liyuan⁴

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. The Key Laboratory of Regional Sustainable Development Analysis and Simulation, Beijing 100101, China;

3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Energy-related carbon emissions are the most important contributor to the global greenhouse effect. Low-carbon development must begin with the adjustment of the energy consumption structure (ECT). Based on four categories of provincial level energy terminal consumption data, using the K means clustering method and the STIRPAT model, we researched the geographical distribution pattern of ECT and spatial and time differentiation, evolution and influence factors. We found that from 1990 to 2014, the provincial coal consumption ratio decreased; oil consumption ratio changed in different periods in different provinces; natural gas consumption was at a low level and showed regional diversity; and power and heat consumption increased. Beijing, Tianjin, Shanghai, Jiangsu, Guangdong, Hainan, Gansu, Qinghai and Ningxia provinces are in a relatively low carbon ECT. China's energy terminal consumption structure showed a trend of continuous improvement over 1990 to 2014. On the one hand, the geographical distribution of ECT shows obvious zonal distribution, while also showing certain characteristic of in-situ consumption orientation. The energy consumption intensity, industrial structure, energy production structure and capital input, in turn, have positive promoting effects on ECT dominated by coal. The urbanization of land, rate of energy self-sufficiency, technology progress and import and export trade, have an inhibiting effect on ECT. GDP per capita, population urbanization and FDI of actual usage are not significant for ECT. In order to effectively ameliorate the provincial energy consumption structure, reduce carbon emissions and achieve low carbon development, China should adjust ECT at the provincial level, focusing on Hebei, Shanxi and Guizhou energy in-situ consumption status, and speed up the process of the fundamentals of industrial structure, advancing urbanization, enhancing the level of science and technology innovation and promoting an international focus.

Key words: energy consumption structure; geographical distribution; K-means; STIRPAT; spatiotemporal differentiation; influencing factor; China