

引用格式:孙涵,聂飞飞,胡雪原.基于熵权TOPSIS法的中国区域能源安全评价及差异分析[J].资源科学,2018,40(3):477-485. [Sun H, Nie F F, Hu X Y. Evaluation and difference analysis of energy security in China based on entropy-weight TOPSIS modeling[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 477-485.] DOI :10.18402/resci.2018.03.02

# 基于熵权TOPSIS法的中国区域能源安全评价及差异分析

孙 涵<sup>1,2,3</sup>, 聂飞飞<sup>1</sup>, 胡雪原<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 武汉 430074;

2. 国土资源部国土资源战略研究重点实验室, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)资源环境研究中心, 武汉 430074)

**摘 要:**近年来,中国多个地区相继出现了能源“四荒”问题,说明区域能源安全仍然是中国发展中一个重要的问题。本文从能源供应、使用、经济与环境安全四方面,构建了相应的指标体系,利用熵值法确定指标权重,克服了传统赋权法的主观性,与TOPSIS法相结合,对中国区域能源安全进行评价。结果表明:中国区域能源安全性普遍处于中低水平。能源安全值高于全国平均水平的只有山西、新疆、内蒙古等9个省份,仅占研究省份的30%,其余21个省份普遍低于全国能源安全平均值。中国能源安全性大致呈现“由西北向东南”逐渐降低的特点。西北地区能源储量丰富,能源消耗量相对较低,能源安全值偏高;东部及中部地区能源储量较为匮乏,并且能源消耗量巨大,导致能源安全值偏低。最后,提出了相应的政策建议。

**关键词:**区域能源安全;熵权TOPSIS法;安全评价;差异分析

DOI :10.18402/resci.2018.03.02

## 1 引言

中国区域能源的可持续生产与消费仍然是中国发展中一个重要的问题<sup>[1]</sup>。尤其是近年来,中国多个地区相继出现了以能源“四荒”(煤荒、油荒、电荒、气荒)为代表的能源供应中断事件。通过对区域能源安全事件案例的收集,发现在1999—2015年发生了将近30余起区域能源安全事件<sup>[2]</sup>,其中具有代表性的是2008年发生在中国的特大冰雪灾害,造成煤炭公路运输严重受阻,导致火电供应紧张,这为区域能源安全敲响了警钟。也证实了中国区域能源安全问题客观存在且不容忽视<sup>[3]</sup>。当前,中国东部省份经济发达,但能源基础储量薄弱、能源消费量巨大。另外,中部省份能源储量分布不均,且高污染、高能耗企业众多,西部地区能源储量丰富,

但能源利用方式粗放,环境破坏严重。除此之外,由于中国缺油少气,对外依存度持续上升。据统计,2016年中国原油对外依存度已超过65%,天然气对外依存度也达到35%。可以说,中国区域能源安全承受着来自国内外双重压力。鉴于此,对中国区域能源安全进行有效评价及差异性研究,对于把握中国区域能源安全形势具有十分重要的现实意义。

目前,国内外学者在影响能源安全的能源生产、消费与能源安全政策等方面开展了大量研究,取得了丰富的研究成果,为国家制定相关能源政策起到了一定的支撑作用<sup>[4]</sup>。

国外对能源安全研究,最初聚焦于石油资源的安全,缘于20世纪70年代的两次石油危机。Yergin等认为能源安全的目的是以合理的价格和不危害

收稿日期:2017-08-30,修订日期:2018-02-06

基金项目 国家社会科学基金项目(17BJY063);教育部人文社科基金项目(15YJC790091);中国地质大学(武汉)青年学者“摇篮计划”(CUGW17401)。

作者简介 孙涵,男,湖北黄冈人,博士,副教授,研究方向为能源和环境管理和项目管理。E-mail: sunhan2004@126.com

通讯作者 聂飞飞, E-mail: 975869936@qq.com

主要国家的价值观和目标的方式保证充足的、可靠的能源供应,也主要是针对石油进口国的能源安全而言<sup>[5]</sup>。随着全球能源格局的变化以及更多国家对能源安全的关注,能源安全成为包括石油、煤炭、天然气以及电力在内的能源系统的安全,能源安全的内涵及内容也进一步扩展。如:Schepers等建立了供需安全指标和风险能力指标论证了欧盟的能源供给安全<sup>[6]</sup>。Loschel A等创立了事前和事后能源安全指标,评估了几个发达国家的能源供应安全<sup>[7]</sup>。Sovacool等从可利用性、可承受性、技术性、持续性、规则性五个方面构建能源安全评价指标体系,并对18个国家1990—2010年的能源安全绩效进行了评价<sup>[8]</sup>。Cherp等将能源安全定义为重要能源系统的物理和经济低脆弱性,他们认为从长期来看,气候政策可减少能源供应、能源结构、能源贸易对化石能源消费及经济增长的依赖性<sup>[9]</sup>。总之,大量的研究工作关注于能源安全评价工作,其构建能源安全模型大多采用能源安全多样性指数,如香农-维纳指数和赫芬达尔-赫希曼指数<sup>[10,12]</sup>。其中,又以英国能源供应安全联合研究小组(JESS)、荷兰能源研究中心(ECN)、国际能源署(IEA)以及亚太能源研究中心(APERC)所开发的能源安全模型较具有代表性<sup>[3]</sup>。

与国外相比,中国对能源安全问题的研究起步较晚、大多数研究集中于定性分析能源安全战略,多关注能源供应与需求的关系<sup>[3,13,14]</sup>。对能源安全问题广泛运用各种模型方法进行研究主要是在近期,且研究成果较少。何贤杰等分别采用主成分分析方法和德尔菲法对中国和美国的石油安全度进行了定量测算<sup>[15]</sup>。彭鸿斌等从能源供应安全、消费安全和能源生态安全3个方面,运用模糊综合评价方法指出中国能源安全整体趋势先下降后上升,能源供应安全一直呈现快速下降趋势,能源消费安全整体趋势基本一致,而能源生态安全不断提高<sup>[16]</sup>。苏飞等对中国30个省能源安全供给脆弱性进行了定量评估<sup>[17]</sup>。刘立涛等从能源供应稳定性与使用安全性两个方面构建中国能源安全评价模型,借助因子分析等方法对中国区域能源安全时空演进特征展开研究<sup>[3]</sup>。李根等以上海市为例,运用改进AHP-FCE法实证评价了上海市能源安全状况<sup>[18]</sup>。Long

Zhang等从五个维度分析了中国能源安全,结论认为所有省份都面临着与能源可用性和多样性有关的威胁,区域之间能源安全存在差异性<sup>[19]</sup>。

综上所述,整体上能源安全的研究成果丰富且角度多样,但目前针对中国区域能源安全的研究成果仍然较少,多对某省进行分析,且存在以下不足之处:①研究视角主要集中在能源供应与使用安全,在国家高度重视生态文明建设的时代背景下,由能源消费带来的环境问题被社会大众高度关注;与此同时,国家及各区域政府对新能源产业、能源节能与环境保护和科研投入不断增加,因此能源安全评价的内涵应该进一步扩大经济和环境层面,但是相关研究仍然较少,尤其是能源与环境影响<sup>[20,21]</sup>。②多数学者在确定评价权重选取上采用主观赋权法,所确定的权重受主观因素影响较大;而因子分析法在快速提取主成分时,不可避免地会造成信息的流失,且损失的信息与指标数量成正相关。鉴于此,本文运用熵权和TOPSIS法相结合的方法,在研究能源供应稳定与安全使用的基础上,增加了能源经济投入与环境保护两个维度,用四个维度对中国区域能源安全保障水平进行定量评估与分析,为区域政府或企业制定能源安全或环境保护政策提供科学参考。

## 2 区域能源安全评价模型

### 2.1 构建评价指标体系

区域能源安全是一个综合复杂的系统问题,需要构建综合的、全面的指标体系来做出科学的评价。因此,区域能源安全评价指标体系的建立应该充分考虑能源系统中的开采、加工转换、资金投入、终端消费、环境影响各个环节<sup>[22]</sup>。参考国内外能源安全文献,许多学者从供应安全、使用安全两个度量进行分析<sup>[3]</sup>。经济安全度量层主要是从投资的角度来研究经济投入对能源安全的驱动作用。环境安全度量层是近几年来能源安全研究的新热点,近来也有学者采用了环境可持续这一维度<sup>[19]</sup>。因此,本文建立了能源供给、使用安全、经济投入与环境保护四个维度的评价指标体系,研究能源供给、使用、经济与环保安全之间的关系,从而评价各省份能源安全程度<sup>[23-25]</sup>。中国区域能源安全评价模型由1个目标、4个度量层以及16个具体指标构成,如表1

2018年3月

所示。其中能源生产/消费多样化指数请参见文献[3],常用指标,由于篇幅原因不再做详细介绍。

## 2.2 研究方法

本文采用熵权TOPSIS方法对构建的能源安全模型进行评价。该方法根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序的方法,在现有的对象中进行相对优劣的评价。TOPSIS法没有特别要求样本量的大小,不受参考序列选择的干扰,具有几何意义直观、信息失真小、运算灵活及应用领域广等优点<sup>[26,27]</sup>。

在确定指标权重方面有多种方法,可以分为主观赋权法和客观赋权法两类。主观赋权法主要有专家打分法、层次分析法(AHP)等,一般存在着较大的主观随意性。客观赋权法来确定评价指标的权重系数,能够较为真实、客观的反应变量对目标的影响程度。因此,本文选取客观赋权法中常用的熵权法,计算出各变量的权重系数。

TOPSIS综合评价方法具体步骤如下:

(1)根据原始数据建立矩阵,由 $n$ 对象的 $m$ 个指标构成的空间矩阵 $X$

$$X = [X_{ij}]_{n \times m}, i = 1, 2, 3, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

(2)将原始矩阵作同趋势化处理,得到标准化矩阵 $X'$ :

$$X' = [X'_{ij}]_{n \times m}, i = 1, 2, 3, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

(3)将指标无量纲化,做归一化处理得到标准矩阵 $A$ :

$$A = [a_{ij}]_{n \times m}, a_{ij} = X'_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (X'_{ij})^2} \quad (3)$$

(4)确定指标权重,对度量层下每一个指标,运用熵权法,计算各个指标 $j$ 的权重系 $w_j$ :

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (4)$$

式中  $e_j = -k \sum_{i=1}^n p(A'_{ij}) \ln p(A'_{ij})$ ;  $k = 1/\ln 11$ ;  $p(A'_{ij})$  表示指标值在指标下的比值,信息值表示信息无序度,信息值越大,该属性指标对能源安全评价贡献越小。反之,贡献越大。

(5)根据矩阵得到有限方案中的正理想方案 $A^+$ 和负理想方案 $A^-$ :

$$\text{正理想方案 } A^+ = (a^+_{i1}, a^+_{i2}, a^+_{i3}, \dots, a^+_{im})$$

$$a^+_{ij} = \max(a_{ij}) \quad 1 \leq i \leq n, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (5)$$

$$\text{负理想方案 } A^- = (a^-_{i1}, a^-_{i2}, a^-_{i3}, \dots, a^-_{im})$$

$$a^-_{ij} = \min(a_{ij}) \quad 1 \leq i \leq n, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (6)$$

(6)分别计算各评价对象各指标值与正理想解及负理想解的欧式距离 $D^+_i, D^-_i$ :

表1 中国区域能源安全评价指标体系

Table 1 China's regional energy security evaluation index system

	度量层	指标层	单位	定义	作用方向
中国	供应	自给率(X1)	%	反映区域能源生产与消费之比的指数	+
区域	安全	储量比(X2)	%	反映区域各种类能源基础储量占全国能源基础储量的指数	+
能源		能源生产多样化指数(X3)	-	反映区域能源生产构成多元化程度的一个指数	+
安全		对外依存度(X4)	%	反映区域各种类能源生产量占能源消费总量的指数	-
指标		人均能源产量(X5)	万t/人	反映区域人口生产能源的数量	+
体系	使用	能源强度(X6)	-	反映能源强度是能源利用与经济或物力产出之比	-
	安全	能源消费多样化指数(X7)	-	反映区域能源生产构成多元化程度的一个指数	-
		人均能源消费量(X8)	万t/人	反映区域人口消费能源的数量	+
		电力消费量(X9)	亿kWh	反映区域电力消费总量	-
	经济	能源工业投资(X10)	万元	反映区域能源工业的投资量	+
	安全	节能与环境保护投入量(X11)	万元	反映区域对能源节约与环境保护的投资量	+
		科研投入量(X12)	万元	反映区域对科学技术的投资量	+
	环境	人均废水排放量(X13)	万t	反映区域人均产生的废水量	-
	安全	空气API(X14)	-	反映区域工业生产导致的空气质量程度	-
		人均废物排放量(X15)	万t	反映区域人均产生的固体废弃物量	-
		万元GDP碳耗(X16)	-	反映区域每万元GDP所产生的碳排放量	-



$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (a_{ij}^+ - a_{ij})^2} \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (a_{ij}^- - a_{ij})^2} \quad (7)$$

式中  $w_j$  为  $j$  指标的权重系数。

(7) 计算各评价对象与正理想方案的相对接近程度  $C_i$ :

$$C_i = \frac{D^-}{D^+ + D^-} \quad (8)$$

(8) 按值大小将各评价对象优劣排序, 由于贴近度分值处于 0 到 1 之间, 值越大, 则代表安全性更高, 值越低, 则代表安全性更低。

2.3 研究对象与数据来源

考虑到数据的可得性, 本文以除西藏、台湾、香港与澳门以外的全国 30 个省份(直辖市)作为研究对象。数据均以 2016 年《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》以及各省份统计年鉴中关于区域常规能源的统计数据作为基础研究数据资料<sup>[28,29]</sup>。所选取的指标中, 空气质量指数采用的是各省份省会城

市空气质量指数值。

3 结果及差异性分析

本文通过构建的能源安全模型, 根据公式(4)计算出各指标权重, 并根据公式(5)与公式(6)计算出各指标的理想解, 如表 2。

根据公式(7), 计算各评价对象各指标值与正理想解及负理想解的欧式距离  $D_i^+, D_i^-$ , 如表 3 所示。

最后, 根据公式(8)计算出各评价对象与正理想方案的相对接近程度  $C_i$ , 并按值大小进行排序, 计算出了全国 30 各省份综合能源安全程度, 并对 30 个省份能源安全性进行了排名。同时, 根据本文采用的 4 个维度, 对各省份的能源供应安全、使用安全、经济安全与环境安全分别进行了评价分析。具体结果如图 1 和表 4 所示:

(1) 总体分析。如图 1 所示, 中国区域能源安全程度普遍偏低, 处于中下水平, 大部分省份能源安

表2 各指标的权重和理想解

Table 2 The weight and the ideal solution of each indicator

指标	权重	正理想解	负理想解	指标	权重	正理想解	负理想解
自给率	0.083 3	0.046 6	0.000 1	电力消费量	0.057 5	0.037 0	0.001 9
储量比	0.059 0	0.049 3	0.000 0	能源工业投入	0.070 1	0.030 1	0.001 3
能源生产多元化指数	0.075 1	0.017 4	0.000 9	节能环保投入	0.069 0	0.024 9	0.002 4
对外依存度	0.040 7	0.017 0	-0.023 9	科研投入量	0.066 3	0.041 4	0.000 8
人均能源产量	0.084 3	0.052 4	0.000 1	人均废物排放量	0.025 2	0.014 3	0.000 2
能源强度	0.041 9	0.021 9	0.001 6	空气质量指数	0.032 4	0.014 8	0.001 0
能源消费多元化指数	0.072 6	0.014 0	0.005 3	人均废水排放量	0.046 8	0.015 2	0.004 2
人均能源消费量	0.052 6	0.015 2	0.003 3	万元 GDP 碳耗	0.041 9	0.021 9	0.001 6

注: 排列顺序按照表 1 指标排列。

表3 研究对象指标值与正负理想解的欧氏距离

Table 3 Research object index value and the positive and negative ideal solution Euclidean distance

地区	$D^+$	$D^-$	地区	$D^+$	$D^-$	地区	$D^+$	$D^-$
北京	0.110 0	0.056 0	浙江	0.113 1	0.047 8	海南	0.114 5	0.059 2
天津	0.109 2	0.048 1	安徽	0.116 0	0.044 2	重庆	0.111 8	0.046 0
河北	0.114 2	0.048 4	福建	0.112 2	0.050 7	四川	0.109 5	0.050 2
山西	0.081 5	0.093 8	江西	0.115 2	0.044 9	贵州	0.104 2	0.047 5
内蒙古	0.083 5	0.083 8	山东	0.108 8	0.049 9	云南	0.109 4	0.048 0
辽宁	0.115 2	0.044 0	河南	0.112 0	0.045 3	陕西	0.089 4	0.075 0
吉林	0.115 4	0.038 9	湖北	0.112 9	0.045 4	甘肃	0.117 0	0.035 7
黑龙江	0.108 3	0.051 0	湖南	0.112 4	0.047 9	青海	0.096 0	0.064 3
上海	0.113 8	0.048 8	广东	0.106 4	0.066 4	宁夏	0.113 4	0.040 6
江苏	0.107 6	0.062 8	广西	0.114 8	0.046 5	新疆	0.088 5	0.086 9

2018年3月

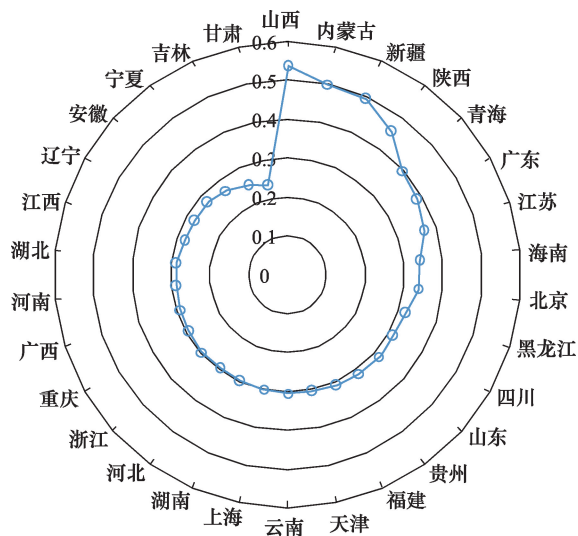


图1 中国区域性能能源安全值雷达图

Figure 1 China's regional energy security radar map

全值普遍在0.5以下,只有山西、内蒙古两省,大于0.5。能源安全程度在0.4~0.5之间的省份包括新疆、青海、陕西3个省份。12个省份的能源安全值位于0.3~0.4之间。剩余13个省份的能源安全值都位于0.2~0.3之间。本文实证结果与现实相符,与相关学者如刘立涛等<sup>[3]</sup>的研究,以及李根等<sup>[18]</sup>的研究结论基本相符,但由于选取指标不同、时间不同和背景不同会导致有所差异。由此体现本文评价指标体系与方法的实用性与科学性。

从不同地域来看,如表4所示。东中西部<sup>1)</sup>能源

安全程度存在较大差异,且呈现出“东西部高、中部低”的特征。中国区域地区能源安全值平均得分为西部(0.3512)>东部(0.3212)>中部(0.3172)。

东部省份能源安全值普遍偏低,能源安全值主要分布于0.3~0.4之间,河北、浙江、辽宁3省安全值分布于更低的0.2~0.3之间。主要原因是东部省份能源储量缺乏,大部分省份能源基础储量不足全国1%。经过大量开发后,剩余储量开发难度大、成本高。并且经济发展速度快,工业化程度高,能源需求量很大,使得能源对外依存度高,导致能源安全值处在低水平。广东、江苏两省能源安全值位于东部省份前两位,其核能或可再生能源相对丰富,并且由于技术领先,能源使用效率高。领先的经济水平保证了环保节能的大量投入,使得因能源消费导致的废水、废气、废渣的排放量逐渐减少,在一定程度上提高了两省的能源安全值。海南省在东部地区能源安全值也排在前列,主要原因是工业企业数量少,旅游业发达,能源消费量全国最低,并且各种废物排放量少,直接提高了海南省的能源安全值。

中部省份能源安全值差异较大。山西省能源安全值为0.5353,排全国第一位,主要原因是该省份能源基础储量位于全国第一,能源基础储量占全国35%,并且能源行业投资占据全国第一位,丰富的能源储量及高额的能源投资,保证了该省的能源安

表4 中国区域能源各项安全值分布

Table 4 Distribution of regional energy safety values in China

东部地区	供应安全值	使用安全值	经济安全值	环境安全值	西部地区	供应安全值	使用安全值	经济安全值	环境安全值	中部地区	供应安全值	使用安全值	经济安全值	环境安全值
广东	0.295 4	0.255 4	0.735 7	0.146 8	内蒙古	0.596 9	0.057 7	0.357 3	0.090 5	山西	0.642 6	0.101 1	0.371 9	0.072 8
江苏	0.300 2	0.369 8	0.632 6	0.245 2	新疆	0.575 2	0.134 5	0.402 7	0.097 3	黑龙江	0.349 2	0.275 9	0.195 0	0.095 8
海南	0.301 4	0.700 1	0.001 6	0.774 8	陕西	0.519 2	0.219 3	0.307 8	0.087 4	湖南	0.299 6	0.341 1	0.204 9	0.175 5
北京	0.300 3	0.346 5	0.454 5	0.470 8	青海	0.468 1	0.305 5	0.101 7	0.292 3	河南	0.304 0	0.197 9	0.280 3	0.049 3
山东	0.302 1	0.132 4	0.473 1	0.052 2	四川	0.323 7	0.250 7	0.330 6	0.083 7	湖北	0.299 9	0.225 1	0.266 8	0.075 4
福建	0.301 6	0.375 6	0.181 7	0.251 3	贵州	0.347 6	0.238 7	0.141 9	0.125 7	江西	0.297 3	0.318 9	0.130 7	0.112 6
天津	0.327 1	0.310 9	0.178 7	0.222 4	云南	0.317 8	0.250 4	0.254 5	0.125 6	安徽	0.285 1	0.256 4	0.252 1	0.090 7
上海	0.300 6	0.233 4	0.333 0	0.119 5	重庆	0.307 0	0.319 3	0.177 6	0.144 9	吉林	0.253 4	0.360 0	0.169 5	0.105 7
河北	0.301 1	0.096 8	0.378 8	0.027 6	广西	0.305 5	0.278 8	0.142 9	0.121 3					
浙江	0.293 2	0.189 2	0.395 7	0.113 5	宁夏	0.294 9	0.246 2	0.116 9	0.226 5					
辽宁	0.307 2	0.159 7	0.174 4	0.067 5	甘肃	0.239 7	0.238 9	0.152 4	0.130 6					

1)按地域来分,东部地区包括:北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南;中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南;西部地区包括:四川、重庆、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、广西、内蒙古。

全。湖北、湖南、江西、安徽、河南位于中国中部,该五省份能源基础储量较低,但水能较为丰富,经济居中,导致安全值都较低。黑龙江与吉林作为老工业区,石油储量虽然丰富,但能源生产结构单一,并且随着逐年开采,储量不断减少,开采成本不断提高,加上老工业区技术较为落后,能源强度低,各种工业废物排放量较多,直接导致能源安全值处在低水平。

西部省份能源安全平均值最高,但差异也较大。内蒙古、新疆、陕西作为西部能源安全值最高的三个省份,能源基础储量丰富,三省能源储量总和占据全国能源储量的近33%,并且都能够实现能源自给,对外依存度值为正,同时能源行业的大量投资进一步促进了这些省份的能源生产,保证了能源的安全。青海省人口少,工业数量少,旅游业、畜牧业发展较快,能源消耗量位于全国第28位,能源消耗量小,且各种排放量小,使得能源安全值也处在全国前列。四川、贵州、云南、重庆、广西、宁夏、甘肃七省份的能源安全值位于0.4以下,其中四川、重庆、贵州、云南、广西五省,位于中国西南地区,地形地势复杂,虽然有一定数量的能源储量,但因地形地势开发难度大,开采成本较高,加上能源使用技术相对落后,使用方式粗放,效率不高,致使人均能源消费量较高,导致能源安全值处在低位。宁夏、甘肃位于中国西北地区,能源基础储量较少,但人均能源消费量位居全国前列,加上环保节能意识不强,投资较少,使得两省的能源安全值位于全国末端。

(2)供应安全方面。不同地区能源供应安全平均得分分别为西部(0.3905)>中部(0.3413)>东部(0.3027),区域差异较大,呈现出“西高东低”的变化趋势。具体结果如表4所示。

东部地区能源供应安全值最低,除河北、山东两省外,其他东部省份能源基础储量比普遍低于2%,且大部分省份能源基础储量低于1%,自给率普遍低于0.5,化石能源的对外依存度普遍高,并且化石能源经过高速开发后,呈现开发量不断减少的趋势。虽然新型能源得到不断开发,但化石能源仍占据能源消费结构的主体地位。中部地区能源基础储量区域差异较大,由于山西储量最为丰富,占据

全国能源基础储量的35%,并且能源完全自给,人均能源产量高,但其他省份能源储量较低,不能实现能源自给,并且部分省份因地形地势复杂,开采难度大、成本高,人均能源产量不高,使得中部地区能源供应安全值处在第二位。西部地区能源供应安全值最高,西部地区不仅能源储量处在全国前列,11省份中有6个省份能够实现能源自给,并且大部分西部省份人均能源产量高,其中内蒙古人均能源产量全国最高,陕西人均能源产量也居全国第三位,在很大程度上保证了西部地区的能源供应安全。其研究结论与苏飞等<sup>[17]</sup>研究结果基本相符。

(3)使用安全方面。中国不同地区能源使用安全值平均得分分别为东部(0.2882)>西部(0.231)>中部(0.2269),表现为“中部低,东西高”的现象,区域差异不大,且使用安全值普遍偏低,能源使用方式亟待改善。具体结果如表4所示。

东部地区能源使用最为安全,该地区由于技术先进,注重能源使用效率的提高,能源强度最优,万元GDP能耗普遍小于1tec,这在很大程度上保证了能源使用安全。但是由于能源消费量巨大,电力消费量最多,且由于人们对高生活水平的追求,人均能源消费也较为偏高,虽然能源使用安全值排名最高,但能源使用安全值整体数值不大。西部地区能源使用安全值为0.2310。西部地区工业化、城镇化水平不高,能源消费量与电力消费量低,虽然人均能源消费量偏高,能源效率较低,但在整体上能源使用安全值仍然优于中部地区。中部省份正处在高速发展时期,虽然在技术上使得能源效率得到提高,但是由于承接了东部地区高能耗、高污染的工业企业转移,加上人口回流,数量增多,城镇化速度加快,使得能源消耗与电力消费量不断提高,人均能源消费量也相对较高,导致中部省份的能源使用安全值最低。

(4)经济安全方面。中国不同地区能源经济安全值平均得分分别为东部(0.3582)>中部(0.2341)>西部(0.2263),呈现由东向西逐渐递减的规律。具体结果如表4所示。

东部地区是中国经济最发达地区,由于化石能源的缺乏,所以对新型能源的投资不断增加,例如风能、水能、核能等新型能源在东部省份的能源结



2018年3月

构中的比例不断提高。并且东部地区注重环保与节能的投入,改善了东部地区能源结构与生态环境。另外,东部地区的科研投入远远领先于中西部地区,使得东部地区的能源技术不断革新,保证了东部地区的能源经济安全。中部地区经济安全优于西部地区,但与东部地区差距较大。虽然中部地区能源基础储量比东部地区丰富,部分省份的能源工业投资较为可观,但是对节能环保的关注不如东部地区,并且科研缺乏技术人才,投入力度不够,使得中部地区的经济安全不容乐观。西部地区经济安全值最低。由于能源储量分布不均,个别省份能源投入量较为可观,但由于西部地区技术相对落后,受经济水平的限制,投资力度不够,另外科研投入数量也相对较少,导致西部地区能源效率差,未能将资源优势转化为经济优势,能源经济安全性最低。

(5)环境安全方面。中国不同地区能源环境安全值平均得分分别为东部(0.3422)>西部(0.2494)>中部(0.2364)。区域之间差异较大,东部省份远领先于中西部地区,中西部省份差距不大,整体环境安全数值仍然偏低,各省区域之间差异比较大。具体结果如表4所示。

环境安全方面,东部表现远高于中西部地区,但整体环境安全值仍然偏低。东部省份在经过经济快速发展的时期,逐渐将高污染、高能耗的企业向中西部转移,现在高新技术产业发展迅猛,各种排放量在不断的减少,加上东部地区注重节能减排与环境保护,使得能源环境安全不断改善,但地区之间差异性也很大,比如河北、辽宁等市环境安全值依然很低。西部地区能源环境安全优于中部地区,但差距不大,由于西部地区重工业企业数量少,能源消耗量少于东中部地区,废气、废水、废渣等排放量相对较少,而且近几年国家注重西部地区的环境保护与生态建设,使得西部地区的能源环境安全得到改善,但依然很低。中部地区的能源环境安全最差,自中部承接东部各种高污染、高能耗企业以来,经济获得了快速的发展,在快速发展过程中,部分中部省份对环境保护力度不够,各种排放量迅猛增加,环境污染与空气污染不断加剧,尤其是河南、山西省份,“雾霾”天气不断增加,环境安全问题亟待被加以重视与治理。

## 4 结论与建议

本文运用熵权TOPSIS法,通过构建中国区域能源安全评价模型,从供应、使用、经济与环境四个维度分析了当前中国区域的能源安全性,较好地反映了社会经济发展与能源安全系统之间的相互关系及作用,增强能源安全状况分析的全面性。结果表明:中国区域能源安全性普遍处于中低水平。能源安全值高于全国平均水平的只有山西、新疆、内蒙古等9个省份,仅占研究省份的30%,其余21个省份普遍低于全国能源安全平均值。可以看出,中国能源安全性大致呈现“由西北向东南”逐渐降低的特点。西北地区能源储量丰富,能源消耗量相对较低,能源安全值偏高;东部及中部地区能源储量较为匮乏,并且能源消耗量巨大,导致能源安全值偏低。

基于上述研究结论,提出以下能源安全的相关建议:

(1)能源供应方面,要改变当前的能源生产结构,提高能源供应的多元化。各地区应根据自身的特点,应当大力研发新技术、新产品,大力推进水能、核能、风能、太阳能、生物质能等新型能源的开发与发展,改善当前中国区域以化石能源为主的能源生产结构。

(2)能源使用方面,要加大科技研发,提高能源使用强度,使能源消费多元化。同时实现技术转移,改变中国中西部地区能源粗放型使用的现状。

(3)经济方面,有重点的进行能源行业投资,加大对新型能源的投资,增加能源技术改革的投入,加强地区之间的技术交流与迁移。

(4)环境方面,同时也要注意对中西部地区的环保投入,引进与开发新技术、新设备,减少化石能源的废气、废水、废渣的排放,降低碳排放<sup>[26]</sup>。

## 参考文献(References):

- [1] You H Y, Zhang X L. Sustainable livelihoods and rural sustainability in China: ecologically secure, economically efficient or socially equitable?[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 120: 1-13.
- [2] 胡健,孙金花.基于FI-GA-NN融合的区域能源安全外生警源分级预警研究[J]. *资源科学*, 2017, 39(6): 1048-1058.[Hu J, Sun J

- H. Early classification warning for regional energy security exogenous sources based on FI-GA-NN Model[J]. *Resources Science*, 2017, 39(6): 1048-1058.]
- [3] 刘立涛, 沈镭, 高天明. 中国能源安全评价及时空演进特征[J]. *地理学报*, 2012, 67(12): 1634-1644. [Liu L T, Shen L, Gao T M. Evaluation and spatial-temporal evolution of energy security in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(12): 1634-1644]
- [4] Radovanović M, Filipović S, Pavlović D. Energy security measurement—a sustainable approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68(2): 1020-1032.
- [5] Daniel Y. Energy security in the 1990s [J]. *Foreign Affairs*, 1988, 67(1): 110-132.
- [6] Scheepers M J, Seebregts A, Jong J, *et al.* EU standards for energy supply[J]. *Gas*, 2007, 52: 67-75.
- [7] Löschel A, Moslener U, Rübbelke D T G. Indicators of energy security in industrialized countries[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(4): 1665-1671.
- [8] Sovacool B K, Mukherjee I, Drupady I M, *et al.* Evaluating energy security performance from 1990 to 2010 for eighteen countries [J]. *Energy*, 2011, 36(10): 5846-5853.
- [9] Cherp A, Jewell J, Vinichenko V, *et al.* Global energy security under different climate policies, GDP growth rates and fossil resource availabilities[J]. *Climatic Change*, 2016, 136(1): 1-12.
- [10] Stirling A. On the Economics and Analysis of Diversity[C]. SPRU Electronic Working Paper Series, 1999.
- [11] Gupta E. Oil vulnerability index of oil-importing countries[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(3): 1195-1211.
- [12] Shakya S R, Shrestha R M. Transport sector electrification in a hydropower resource rich developing country: energy security, environmental and climate change co-benefits[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2011, 15(2): 147-159.
- [13] 王强, 陈爱娇. 福建省能源安全评价及特征分析[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 32(9): 96-105. [Wang Q, Chen A J. The evolution and characteristics of Fujian's energy security[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 32(9): 96-105.]
- [14] 李继尊. 关于中国石油安全的思考[J]. *管理世界*, 2014, (8): 1-3. [Li J Z. Thoughts on China's oil security[J]. *Management World*, 2014, (8): 1-3.]
- [15] 何贤杰, 吴初国, 刘增洁, 等. 石油安全指标体系与综合评价[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(2): 245-251. [He X J, Wu C G, Liu Z J, *et al.* Indicator system and comprehensive appraisal for petroleum security[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(2): 245-251.]
- [16] 彭鸿斌, 路畅. 我国能源安全问题研究—基于模糊综合评价方法[J]. *中国能源*, 2016, 38(8): 10-16. [Peng H B, Lu C. Research on energy security in China—based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Energy of China*, 2016, 38(8): 10-16.]
- [17] 苏飞, 张平宇. 中国区域能源安全供给脆弱性分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(6): 94-99. [Su F, Zhang P Y. Vulnerability analysis of regional energy security supply in China[J]. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2008, 18(6): 94-99.]
- [18] 李根, 张光明, 朱莹莹, 等. 基于改进 A HP-FCE 的新常态下中国能源安全评价[J]. *生态经济*, 2016, 32(10): 27-31. [Li G, Zhang G M, Zhu Y Y, *et al.* Evaluation on energy security in China towards new normal based on improved AHP and FCE[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(10): 27-31.]
- [19] Zhang L, Yu J, Benjamin K, *et al.* Measuring energy security performance within China: toward an inter-provincial prospective[J]. *Energy*, 2017, 125: 825-836.
- [20] 郭玲玲, 武春友, 于惊涛. 中国能源安全系统的仿真模拟[J]. *科研管理*, 2015, 36(1): 112-120. [Guo L L, Wu C Y, Yu J T. A study on simulating energy security system of China[J]. *Science Research Management*, 2015, 36(1): 112-120.]
- [21] 周新军. 能源安全问题研究: 一个文献综述[J]. *当代经济管理*, 2017, 39(1): 1-5. [Zhou X J. Research on energy security: a literature review[J]. *Contemporary Economic Management*, 2017, 39(1): 1-5.]
- [22] 姜巍, 张雷. 中国能源消费变化过程及其时空效应分析[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2005, 24(4): 612-615. [Jiang W, Zhang L. China energy consumption change and its spatial-temporal effect analysis[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2005, 24(4): 612-615.]
- [23] 魏一鸣, 吴刚, 梁巧梅. 中国能源报告(2012): 能源安全研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [Wei Y M, Wu G, Liang Q M, *et al.* China Energy Report(2012): Energy Security Research[M]. Beijing: Science Press, 2012.]
- [24] 胡剑波, 吴杭剑, 胡潇. 基于 PSR 模型的我国能源安全评价指标体系构建[J]. *统计与决策*, 2016, (8): 62-64. [Hu J B, Wu H J, Hu X. Construction of energy security evaluation index system based on PSR model in China[J]. *Statistics and Decision*, 2016, (8): 62-64.]
- [25] Loschel A, Moslener U, Rübbelke D T G. Indicators of energy security in industrialized countries[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(4): 1665-1671.
- [26] 陈兆荣, 雷勋平. 基于熵权可拓的我国能源安全评价模型[J]. *系统工程*, 2017, 33(7): 153-158. [Chen Z R, Lei X P. Evaluating energy security in China based on entropy weight extension model [J]. *Systems Engineering*, 2017, 33(7): 153-158.]
- [27] Tong Z M, Chen Y J, Malkawi A, *et al.* Energy saving potential of natural ventilation in China: the impact of ambient air pollution [J]. *Applied Energy*, 2016, 179: 660-668.
- [28] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [29] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Energy Statistical Yearbook 2016 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]



## Evaluation and difference analysis of regional energy security in China based on entropy-weight TOPSIS modeling

SUN Han<sup>1,2,3</sup>, NIE Feifei<sup>1</sup>, HU Xueyuan<sup>1</sup>

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

2. Key Laboratory for the Land and Resources Strategic Studies, Ministry of Land and Resources, Wuhan 430074, China;

3. Research Center of Resource and Environmental Economics, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In many regions in China, energy shortages (e.g. coal, oil, gas and electricity) are common. There are signs that regional energy security remains an important issue in the development of China and cannot be ignored. Here, we construct a corresponding index system of regional energy security from four aspects: regional energy supply, use, economic and environmental safety in China. The weight of the index is determined by the entropy method, overcoming the subjectivity of the traditional weighting method, and the TOPSIS evaluation method is used to quantitatively evaluate energy security of provinces. The results show that China's regional energy security is generally low. The energy security value is higher than the national average for only Shanxi, Xinjiang, Inner Mongolia and six other provinces, accounting for 30% of provinces. The remaining 21 provinces have lower than average energy security. Energy security in China shows a gradual decrease from the northwest to southeast. In northwest provinces, energy reserves are abundant and energy consumption is relatively low, resulting in high energy security. Energy savings in the eastern and central provinces are scarce and energy consumption is huge, leading to low energy security. Several policy recommendations are discussed, including optimizing energy structure and increasing diversification of energy to improve supply stability, increasing research investment and improving energy efficiency, reducing and diversifying energy consumption, paying attention to environmental protection investment and lessening environmental pollution.

**Key words:** regional energy security; methods of entropy-weight and TOPSIS; safety evaluation; difference analysis