

2AST 能源安全概念框架及集成评价研究

余 敬, 王小琴, 张 龙

摘 要: 在 APERC 的“4A”能源安全概念框架基础上, 提出一个融数量维、质量维和时空维的“2AST”的能源安全概念框架; 建立可用性 (Availability)、可获性 (Accessibility)、可持续性 (Sustainability)、技术发展 (Technology Development) 四维度的能源安全评价体系; 提出 AGA-EAHP-EM-GRA-TOPSIS 一种改进的集成评价方法, 给出集成算法及步骤, 对 2001—2010 年中国石油、天然气、煤炭安全水平进行了评价; 针对评价结果, 提出了可用性、可获性、可持续性和技术发展四大策略, 为提高中国能源安全水平提供借鉴。

关键词: 能源安全; “2AST”概念框架; 集成评价

中图分类号: F206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2014)03-0070-08

一、引 言

能源安全以其重要性备受学者们关注, 目前对其内涵的界定主要围绕三个层面展开: (1) 从能源供给连续性上, 将能源安全界定为“能源供给连续、不中断”、“能源供给连续地保障能源需求的能力”或“能源供给中断的风险很低”^{[1][2]}。根据这一概念, 通过获取能源供给与能源需求的相关数据, 计算供给与需求之间的缺口, 以了解能源的安全状态; (2) 从能源价格的可承受性层面对能源安全的概念进行阐述^{[3][4]}, 将能源安全定义为“在可支付的价格水平下, 可获得的能源供给对需求的满足程度”; (3) 能源开发和利用过程带来的外部性问题, 即对生态环境造成的污染与破坏。目前, 大多数学者综合这三个方面的含义来研究能源安全^{[5][6]}, 将能源安全定义为“满足国家经济发展需求的、可靠的、买得起的、持续的能源供应, 同时能源的生产和使用不会破坏生态环境的可持续发展”^[7]。这一定义将能源安全问题的内涵进行了拓展, 增加了能源开发和使用过程中的环境效益, 将能源安全与可持续发展结合起来, 赋予能源安全更深层次的含义, 但同时也增加了能源安全度量的难度。

对能源安全的代表性研究如表 1 所示, 其中, 比较典型的是: APERC 指出能源安全受到地质存在 (可用性 Availability)、地缘政治元素 (可获性 Accessibility)、经济因素 (可购性 Affordability)、环境及社会因素 (可接受性 Acceptability) 四个方面的影响^[8]。Sovacool 等在此基础上, 认为能源安全应该包含 5 个维度: 可用性、可购性、技术发展及效率、环境及社会可持续性、监管和治理^[9]。现在研究工作大多集中在能源安全概念、影响因素、评价体系与安全战略方面, 且在评价过程中较多采用单一的评价方法, 如加和求平均或者乘积求根^{[3][10]}、因子分析^[11]、系统动力学^[12]等, 缺乏对于概念框架和集成评价的研究, 因而在能源安全框架及评价方面, 尤其是在评价方法的选择上仍有一定的研究空间。因此, 本文试图

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目“重要矿产资源安全集成评价与战略研究”(13YJA790143); 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目“经济全球化背景下中国矿产资源战略研究”(12JZD034); 中国地质大学(武汉)资源环境经济研究中心开放基金重点项目“中国重要矿产资源可持续供给战略研究”(H2013003A)

作者简介: 余敬, 理学博士, 中国地质大学(武汉)经济管理学院教授、博士生导师(湖北武汉 430074); 王小琴, 中国地质大学(武汉)经济管理学院博士研究生

解决以下四个问题: 中国能源安全概念框架如何表征? 科学的集成评价方法是怎样的? 如何测度能源安全水平? 又如何保障能源安全? 基于以上背景, 在现有研究基础上, 试图提出能源安全的概念框架, 并运用 AGA-EAHP-EM-GRA-TOPSIS 集成方法对中国 2001—2010 年石油、天然气、煤炭的安全状况进行评价, 最后有针对性地提出保障能源安全的战略对策。

表 1 能源安全代表性研究

研究方向	学者/年份	主要内容或观点
概念	IEA/2001	在可支付的价格水平下, 可获得的能源对需求的满足程度 ^[3]
	Leung/2011	从能源的供给与需求两个方面研究能源安全 ^[13]
影响因素	Blum & Legey/2012	强调了对生态环境和可持续发展的重要性 ^[14]
	Xia, <i>et al.</i> /2011	能源供应安全受到经济、政治、环境、地质等因素的影响 ^[15]
评价	Sovacool, <i>et al.</i> /2012	能源使用者视角, 影响因素包括人口、地理、能源生产模式和文化形态等 ^[9]
	APERC/2007	可用性、可获性、可购性、可接受性 ^[8]
战略	Sovacool, <i>et al.</i> /2011, 2012	可用性、可购性、技术发展及效率、环境及社会可持续性、监管和治理 ^{[9][16]}
	Hughes/2012	从可用性、可购性和可接受性构建了能源安全评价的一般框架 ^[17]
	Hughes/2009	4R 理论, 即 Review: 了解能源供应情况; Reduce: 能源节约、能源效率; Replace: 能源供应多元化, 改变能源结构; Restrict: 限制新的需求 ^[18]

二、能源安全概念框架

在构建能源安全概念框架时, 本文在魏一鸣等^[7]、APERC^[8]和 Sovacool 等^[9]的基础上, 综合考虑了可用性、可获性、可购性、可接受性、技术发展、社会、经济、国家保障等方面。首先, 可用性表示的是地质存在, 即资源禀赋, 其重要作用已得到学者们的公认, 因此本文将可用性单独作为一个维度; 可获性, 即从国内外两个市场获取能源的能力, 在全球化进程中对能源安全的影响程度逐渐凸显; 经济因素作为一国的经济实力, 可以看作国家对能源安全的支撑, 可纳入到可持续性的维度中。同时, 可持续性维度还考虑了环境、社会等因素。经济因素和环境及社会因素等构成了可持续性的维度; 而在地质研究、勘查等技术不断发展和更新的时代, 技术发展通过影响能源的开发利用、清洁可再生能源的使用等, 对能源安全产生重要影响。据此, 本文综合 4A 概念框架^[8]和可持续力概念模型^[19], 最终提出了“2AST”的能源安全概念框架, 其中“2A”是指可用性 (Availability) 和可获性 (Accessibility), “S”是指可持续性 (Sustainability), “T”是指技术发展 (Technology Development) (如图 1 所示)。

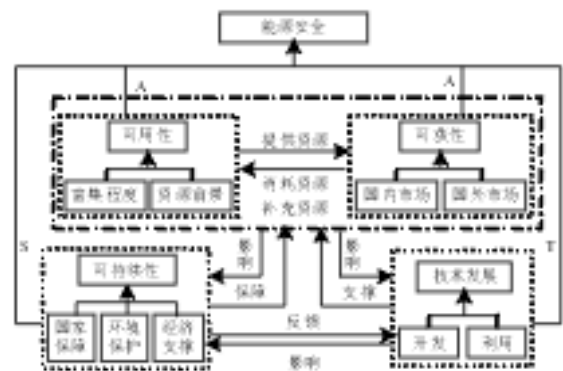


图 1 2AST 能源安全概念框架

由图 1 可见, 可用性是从资源禀赋的角度来分析能源安全, 是能源安全系统的基础和支撑, 体现了能源安全的数量维; 可获性是指能源的国内外市场及其获取渠道, 为系统获取基础物质提供渠道, 体现了能源安全的空间维; 可持续性既是能源安全系统的状态, 也是其目标, 从国家保障、环境保护和经济支撑三个方面影响和保障能源安全系统的稳定和协调, 体现了能源安全的时间维和质量维。技术进步是能源安全系统的动力和保障, 反映了技术发展对能源安全的推动作用。由此可见, 能源安全是一个融数量维、质量维和时空维的系统概念, 能源安全系统是一个特定的复杂系统, 各子系统的有序运行和协同作用是整个系统发挥整体功能的基础。

三、能源安全指标体系

基于 2AST 能源安全概念框架, 结合影响能源安全的因素, 在前人研究^{[7][8][9][16][20]}基础上, 本文构建

出由可用性、可获性、可持续性、技术发展四维度组成的能源安全评价体系构架。根据数据的可获性等,最终确定出能源安全指标体系(如表2所示)。

表2 能源安全评价体系

目标层	维度层	准则层	指标层	计算公式
能源安全	可用性 A ₁	资源禀赋 A ₁₁	储量占世界储量的比重 I ₁	国内能源的可采储量/世界能源的可采储量
			储采比 I ₂	剩余可采储量/采出量
			人均能源储量 I ₃	能源储量/人口数
	可获性 A ₂	国内市场 A ₂₁	国内能源产量占世界总量的比重 I ₄	国内能源产量/世界能源总产量
			国内能源生产集中度 I ₅	国内前5位或前10位企业能源产量的和/总产量
			能源自给率 I ₆	能源生产量/能源消费量
		国际市场 A ₂₂	能源价格波动率 I ₇	(第n年能源价格-第n-1年能源价格)/第n-1年能源价格
	可持续性 A ₃	国家保障 A ₃₁	能源进口量占世界总贸易量比重 I ₈	能源进口量/世界总贸易量
			能源进口来源集中度 I ₉	前3位或前5位国家或地区能源进口量的和/总进口量
			进口能源的运输距离及运输线路安全 I ₁₀	—
技术发展 A ₄	开发 A ₄₁	能源进口能力 I ₁₁	长期能源进口能力指数=100-能源进口额/外汇储备额*100	
		政治军事影响力 I ₁₂	—	
		碳排放强度 I ₁₃	碳排放量/GDP	
	经济支撑 A ₃₃	环境污染治理投资占GDP比重 I ₁₄	环境污染治理投资额/GDP	
		三废综合利用率 I ₁₅	(废水排放达标率+废气处理率+固体废弃物综合利用率)/3	
		单位GDP能源消耗量 I ₁₆	能源消费量/GDP	
开发 A ₄₁	地质研究程度 I ₁₇	地质勘查投入/GDP		
	能源加工转换效率 I ₁₈	能源加工转换产出量/能源加工转换投入量		
	清洁可再生能源比例 I ₁₉	水电、核电、风电消费量/能源消费总量		

四、评价模型与案例研究

(一) 改进的集成评价模型及算法

能源安全问题是一个复杂动态的系统,受到诸多因素的共同影响,具有很大的不确定性,因此,本文构建了基于加速遗传算法的扩展层次分析法(AGA-EAHP)^[21]、熵值法(EM)、灰色关联分析(GRA)和逼近于理想值的排序方法(TOPSIS)等方法的集成评价模型,对能源安全进行集成评价。该集成评价模型主要由权重获取(AGA-EAHP和EM)和综合评价(GRA和TOPSIS)两部分组成(如图2所示)。

1. 获取权重(AGA-EAHP和EM)。由于传统的层次分析法无法达到最优一致性,有时候甚至连满意的一致性都达不到,因此本文采用改进的层次分析法——基于加速遗传算法的扩展层次分析法(AGA-EAHP)^[21]来获取主观权重,然后通过熵值法确定客观权重,从而获取组合权重。

(1) 主观权重(AGA-EAHP)。AGA-EAHP是由本研究团队提出来的,并经过了实际应用的验证,具有非常好的科学性和合理性。与传统的层次分析法相同,AGA-EAHP需要首先建立层次结构模型,不同的是,AGA-EAHP将传统层次分析法的九个标度向前后各扩展0.5,将原来的标度扩展为标度区间,这样就得到了由一个个区间构成的判断矩阵群。为了从判断矩阵群中寻找出具有最优一致性的判断矩阵,该方法采用加速遗传算法来进行寻优,然后根据得到的最优一致性判断矩阵来计算各元素的权重。

(2) 客观权重(EM)。EM是一种客观获取权重的方法,因此需要事先收集各个指标的数据,其操作步骤如下:将指标数据标准化之后,计算各个评价对象在各个评价指标下的特征比重,然后计算各个评价对象的熵值及差异性系数,最后据此计算各个指标的权重。

(3) 组合权重。通过使用AGA-EAHP和EM,获取了各个指标的主观权重和客观权重,将二者进行

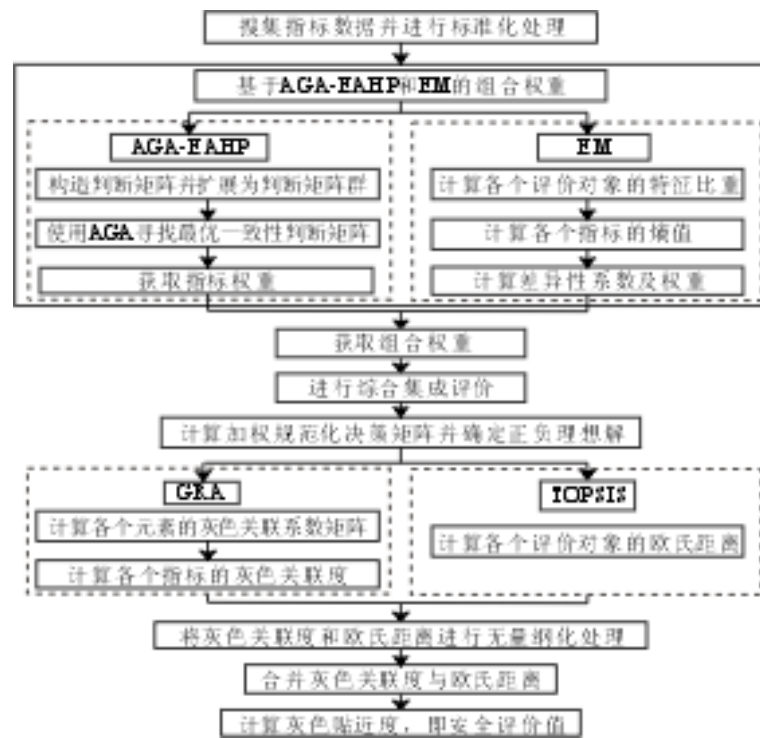


图 2 AGA-EAHP-EM-GRG-TOPSIS 集成评价模型及算法

组合, 组合方式根据研究者对主观权重和客观权重的偏好来决定, 最终得到指标组合的权重。

2. 综合评价 (GRA-TOPSIS)。GRA 通过比较数据序列之间的几何形状的相似程度来对评价对象优劣进行排序, 几何形状的曲线越接近, 则关联度越高, 评价排序也就越优。因此, 对于多准则决策问题, 如果指标某一方面与理想方案的关联度越高, 则认为该方案越接近于理想方案, 因而灰色关联分析十分适用于解决多准则决策问题^[22]。但一般的灰色关联分析都是以最优方案或者最劣方案二者中的一个来作为参考标准, 但最优与最劣方案之间通常无法保持一致性。传统的 TOPSIS 主要是计算评价方案与理想方案 (包括正理想解和负理想解) 之间的欧氏距离, 却不能很好地利用数据之间的关系来进行分析。因此, 有学者提出了将两种方法相结合的灰色关联逼近理想解的排序方法 (GRA-TOPSIS)^[23], 有效克服了各自的缺陷。

(二) 数据来源

本文选取 2001—2010 年中国石油、天然气、煤炭的评价指标的相关数据, 数据主要来源于《BP 世界能源统计》(2012)、《世界矿产资源年评》(2008—2009)、《中国统计年鉴》(2002—2011)、《中国能源统计年鉴》(2002—2011)、《中国矿业年鉴》(2002—2011)、《中国矿产资源发展报告》(2011—2012) 等资料。

(三) 案例研究

本文以石油为例, 具体演示 AGA-EAHP-EM-GRG-TOPSIS 模型在能源安全评价中的应用步骤。

1. 指标权重的获取。

(1) 建立层次结构框架。对指标进行标准化后, 按照一般层次分析法, 通过专家判断法, 建立准则层的判断矩阵。

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 4 \\ 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/4 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/4 \\ 1/3 & 1 & 1/6 \\ 4 & 6 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 3 & 4 \\ 1/7 & 1 & 1/4 & 1/3 \\ 1/3 & 4 & 1 & 2 \\ 1/4 & 3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{33} = [1] \quad A_{41} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, A_{11} 为准则层资源禀赋的判断矩阵, A_{21} 为准则层国内市场的判断矩阵, A_{22} 为准则层国外市场的判断矩阵, A_{31} 为准则层国家保障判断矩阵, A_{32} 为准则层环境保护的判断矩阵, A_{33} 为准则层经济支撑的判断矩阵, A_{41} 为准则层开发的判断矩阵。

(2) 利用 AGA-EAHP 获取主观权重。

步骤 1: 对指标进行标准化后, 按照扩展的层次分析法, 将判断矩阵的判断标度向前后各扩展 0.5, 获得能源安全评价的判断矩阵群:

$$\begin{aligned}
 D_{11} &= \begin{bmatrix} 1 & [4.5, 5.5] & [3.5, 4.5] \\ [1/5.5, 1/4.5] & 1 & [1/2.5, 1/1.5] \\ [1/4.5, 1/3.5] & [1.5, 2.5] & 1 \end{bmatrix} \\
 D_{21} &= \begin{bmatrix} 1 & [2.5, 3.5] & [1/4.5, 1/3.5] \\ [1/3.5, 1/2.5] & 1 & [1/6.5, 1/5.5] \\ [3.5, 4.5] & [5.5, 6.5] & 1 \end{bmatrix} \\
 D_{22} &= \begin{bmatrix} 1 & [6.5, 7.5] & [2.5, 3.5] & [3.5, 4.5] \\ [1/7.5, 1/6.5] & 1 & [1/4.5, 1/3.5] & [1/3.5, 1/2.5] \\ [1/3.5, 1/2.5] & [3.5, 4.5] & 1 & [1.5, 2.5] \\ [1/4.5, 1/3.5] & [2.5, 3.5] & [1/2.5, 1/1.5] & 1 \end{bmatrix} \\
 D_{31} &= \begin{bmatrix} 1 & [2.5, 3.5] \\ [1/3.5, 1/2.5] & 1 \end{bmatrix} \quad D_{32} = \begin{bmatrix} 1 & [3.5, 4.5] & [1.5, 2.5] \\ [1/4.5, 1/3.5] & 1 & [1/3.5, 1/2.5] \\ [1/2.5, 1/1.5] & [2.5, 3.5] & 1 \end{bmatrix} \\
 D_{33} &= [1] \quad D_{41} = \begin{bmatrix} 1 & [2.5, 3.5] & [3.5, 4.5] \\ [1/3.5, 1/2.5] & 1 & [1.5, 2.5] \\ [1/4.5, 1/3.5] & [1/2.5, 1/1.5] & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

步骤 2: 利用加速遗传算法找出各判断矩阵群的最优一致性判断矩阵, 并计算出能源安全评价所需要的各个指标的权重, AGA 法参数设置为: 种群个体数 $n=300$, 每次选取优秀个体数 $y_x=10$, 杂交概率 $p_c=1$, 变异概率 $p_m=1$, 最大加速次数 $MAXGEN=100$, 经过 10 次最优搜索, 获取的指标层最优平均权重:

$$\begin{aligned}
 U_{11} &= [0.682 \ 2 \quad 0.125 \ 8 \quad 0.192 \ 0] \quad U_{21} = [0.216 \ 9 \quad 0.095 \ 8 \quad 0.687 \ 3] \\
 U_{22} &= [0.547 \ 5 \quad 0.066 \ 0 \quad 0.231 \ 4 \quad 0.155 \ 1] \quad U_{31} = [0.750 \ 0 \quad 0.250 \ 0] \\
 U_{32} &= [0.538 \ 3 \quad 0.125 \ 9 \quad 0.335 \ 8] \quad U_{33} = [1] \quad U_{41} = [0.621 \ 3 \quad 0.232 \ 5 \quad 0.146 \ 2]
 \end{aligned}$$

步骤 3: 根据专家判断法得出的准则层和维度层的权重, 计算出各个评价指标在整个评价指标体系中的权重。由于维度层和准则层内的维度及准则较少, 可以根据专家判断法直接给出各自的权重, 并结合 AGA-EAHP 算出来的各个准则层内指标的权重, 得出各个指标在整个评价体系中的权重集 U (如表 3 所示)。

表 3 AGA-EAHP 和 EM 计算的各指标组合权重及评价方案的正负理想解

指标	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}
u_j	0.272 9	0.050 3	0.076 8	0.039 0	0.017 2	0.123 7	0.065 7	0.007 9	0.027 8	0.018 6
v_j	0.059 0	0.073 3	0.087 7	0.054 1	0.049 7	0.062 4	0.035 3	0.039 7	0.035 3	0.023 6
w_j	0.136 4	0.025 2	0.038 4	0.019 5	0.008 6	0.061 9	0.032 9	0.004 0	0.013 9	0.009 3
Z_j^+	0.029 5	0.036 7	0.043 8	0.027 1	0.024 8	0.031 2	0.017 7	0.019 8	0.017 6	0.011 8
Z_j^-	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{15}	I_{16}	I_{17}	I_{18}	I_{19}	
u_j	0.060 0	0.020 0	0.032 3	0.007 6	0.020 1	0.060 0	0.062 1	0.023 3	0.014 6	
v_j	0.045 9	0.062 5	0.036 3	0.044 7	0.037 3	0.076 3	0.060 8	0.049 2	0.066 9	
w_j	0.030 0	0.010 0	0.016 1	0.003 8	0.010 1	0.030 0	0.031 1	0.011 6	0.007 3	
Z_j^+	0.023 0	0.031 2	0.018 2	0.022 4	0.018 6	0.038 1	0.030 4	0.024 6	0.033 5	
Z_j^-	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	

(3) 利用熵值法获取客观权重。根据熵值法的计算过程,计算出石油安全评价的各个指标的权重集 V (如表 3 所示)。

(4) 获取组合权重。利用 AGA-EAHP 和 EM 得到的权重,将主客观权重进行组合,得到各个评价指标的组合权重 (如表 3 所示)。

2. 进行集成评价。

步骤 1: 计算加权规范化决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$, 确定加权规范化决策矩阵 Z 的正负理想解 Z_j^+ 和 Z_j^- (如表 3 所示)。

步骤 2: 计算各评价对象正负理想解 Z_j^+ 和 Z_j^- 的灰色关联系数矩阵 R_i^+ 和 R_i^- , 并计算各个评价对象与正负理想解的灰色关联度 r_i^+ 和 r_i^- 。

$$r_i^+ = [0.667\ 4 \quad 0.544\ 5 \quad 0.494\ 7 \quad 0.480\ 8 \quad 0.472\ 0 \quad 0.511\ 4 \quad 0.484\ 2 \quad 0.502\ 9 \quad 0.561\ 0 \quad 0.641\ 3];$$

$$r_i^- = [0.579\ 2 \quad 0.614\ 9 \quad 0.654\ 5 \quad 0.638\ 0 \quad 0.628\ 8 \quad 0.567\ 6 \quad 0.558\ 7 \quad 0.600\ 7 \quad 0.538\ 5 \quad 0.587\ 9]$$

步骤 3: 根据加权规范化决策矩阵 Z 及正负理想解 Z_j^+ 和 Z_j^- , 运用 TOPSIS 计算各个评价对象与正负理想解的欧式距离 d_i^+ 和 d_i^- 。

$$d_i^+ = [0.120\ 6 \quad 0.187\ 5 \quad 0.196\ 9 \quad 0.230\ 9 \quad 0.231\ 4 \quad 0.184\ 3 \quad 0.174\ 6 \quad 0.183\ 4 \quad 0.178\ 0 \quad 0.175\ 7];$$

$$d_i^- = [0.232\ 0 \quad 0.128\ 8 \quad 0.110\ 3 \quad 0.078\ 4 \quad 0.077\ 0 \quad 0.102\ 4 \quad 0.110\ 3 \quad 0.116\ 2 \quad 0.132\ 9 \quad 0.153\ 1]$$

步骤 4: 分别对灰色关联度 r_i^+ 和 r_i^- 与欧式距离 d_i^+ 和 d_i^- 进行无量纲化处理, 得到 R_i^+ 、 R_i^- 、 D_i^+ 和 D_i^- 。

$$R_i^+ = [1.000\ 0 \quad 0.815\ 8 \quad 0.741\ 2 \quad 0.720\ 5 \quad 0.707\ 2 \quad 0.766\ 3 \quad 0.725\ 5 \quad 0.753\ 5 \quad 0.840\ 6 \quad 0.961\ 0];$$

$$R_i^- = [0.884\ 9 \quad 0.939\ 5 \quad 1.000\ 0 \quad 0.974\ 8 \quad 0.960\ 7 \quad 0.867\ 2 \quad 0.853\ 6 \quad 0.917\ 7 \quad 0.822\ 7 \quad 0.898\ 1]$$

$$D_i^+ = [0.521\ 1 \quad 0.810\ 2 \quad 0.850\ 6 \quad 0.997\ 6 \quad 1.000\ 0 \quad 0.796\ 1 \quad 0.754\ 5 \quad 0.792\ 2 \quad 0.768\ 9 \quad 0.759\ 0];$$

$$D_i^- = [1.000\ 0 \quad 0.555\ 1 \quad 0.474\ 5 \quad 0.338\ 0 \quad 0.331\ 8 \quad 0.441\ 6 \quad 0.475\ 4 \quad 0.501\ 1 \quad 0.572\ 9 \quad 0.660\ 2]$$

步骤 5: 将通过灰色关联分析得到的各个评价对象与正负理想解之间的无量纲化的灰色关联度 R_i^+ 和 R_i^- 与欧式距离 D_i^+ 和 D_i^- 进行组合。在本文中, 取 $\zeta = \tau = 0.5$, 据此可以得到:

$$S_i^+ = [1.000\ 0 \quad 0.685\ 5 \quad 0.608\ 3 \quad 0.529\ 2 \quad 0.519\ 5 \quad 0.603\ 9 \quad 0.600\ 5 \quad 0.627\ 3 \quad 0.706\ 7 \quad 0.810\ 6];$$

$$S_i^- = [0.703\ 0 \quad 0.874\ 8 \quad 0.925\ 3 \quad 0.986\ 2 \quad 0.980\ 3 \quad 0.831\ 7 \quad 0.804\ 1 \quad 0.855\ 0 \quad 0.795\ 8 \quad 0.828\ 6]$$

步骤 6: 计算各评价对象与正理想解的灰色贴近度 $C_i^+ = S_i^+ / (S_i^+ + S_i^-)$, 从而得到 2001—2011 年期间的石油资源安全评价结果:

$$C_i^+ = [0.587\ 2 \quad 0.439\ 3 \quad 0.396\ 7 \quad 0.349\ 2 \quad 0.346\ 4 \quad 0.420\ 7 \quad 0.427\ 5 \quad 0.423\ 2 \quad 0.470\ 4 \quad 0.494\ 5]$$

(四) 评价结果

根据以上方法和步骤,对天然气和煤炭的安全状态进行评价,得出 2001—2010 年中国能源安全状态(如图 3 所示)。

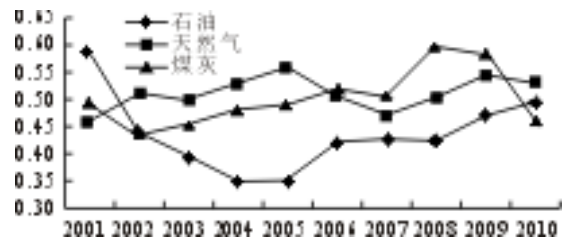


图 3 评价结果折线图

五、分析与结论

(一) 分析

1. 石油安全水平。从评价结果来看,石油价格波动率最高,石油安全程度波动也较大。2001 年石油的安全水平最高,主要是因为 2001 年中国石油资源的可用性(资源禀赋)及可获性(国内生产)等方面

的安全度比较高。随后经济的快速发展对石油的需求持续增加,使石油的安全水平一直处于下降状态,到了2004和2005年达到最低谷。从2006年开始,石油的安全水平又开始缓慢回升,究其原因,一方面是进口量占世界总贸易量的比重、进口来源集中度等指标都开始向有利于提升安全水平的方向变化;另一方面,国内开始关注可持续发展和技术进步,环境污染治理投资、单位GDP的石油消耗量、地质研究程度、清洁能源比例等指标开始好转,这些因素都促进了石油安全水平的回升。综上所述,结合石油数据,制约石油安全的因素主要是可用性和可获性,主要体现在资源禀赋及进口两个方面。

2. 天然气安全水平。在三种能源中,天然气安全状态的波动相对较小,这是因为天然气在开发利用上相对还没有那么成熟。2001—2005年基本依靠国内生产保障供给,天然气安全一直处于稳步上升状态。而在2006—2007年,随着传统的石油和煤炭能源开发利用难度加大,特别是在节能减排和气候变化的压力下,天然气由于其污染小、易获取的优点,消耗量快速增长,相应地,进口量也呈现出快速增长的趋势,可用性和可获性维度的指标安全性降低,天然气安全状态开始出现相对下滑的态势。2008年中国逐渐认识到天然气在能源结构中的重要地位,开始重视天然气的勘探和生产开发,提高了其可用性、可持续性、技术发展等维度的安全性,天然气的安全程度又开始呈现缓慢上升的趋势。综上所述,结合天然气数据,制约天然气安全的因素主要是可用性和技术发展,主要体现在资源禀赋及新技术开发上。

3. 煤炭安全水平。2008年之前,中国煤炭资源安全状况基本处于上升状态,波动较小,煤炭资源可用性和可获性的安全状况较好,即储量、生产集中度以及自给率等指标都显示出比较好的状态。2009年开始急剧下降,随着煤炭需求的激增,煤炭的自给率呈现下降趋势,与此相关的国际市场安全指标、碳排放强度等环境保护和经济支撑能力也开始下降,这是导致2009年之后煤炭资源的安全水平急剧下降的最重要原因。综上所述,结合煤炭数据,制约煤炭安全的因素主要是可获性和可持续性,主要体现在进口及环境保护上。

(二) 结论

本研究从可用性(Availability)、可获性(Accessibility)、可持续性(Sustainability)、技术发展(Technology Development)四维度提出了能源安全的概念框架,并据此构建了包含四个维度的能源安全评价指标体系,为能源安全评价提供了基本框架,提出了AGA-EAHP-EM-GRA-TOPSIS集成评价方法,给出了集成算法及步骤。从能源安全评价的结果来看,中国石油、天然气、煤炭的整体安全水平都不高,基本处于0.35~0.6之间。

六、战略对策

根据评价结果,从可用性、可获性、可持续性和技术发展四个方面,确定了中国能源安全的四大策略。

其一,可用性策略。对于石油,应加强国内油气的勘探、开发,大力探索深海石油以及非常规石油的开发,提高渤海、东海等海域现有油气田采收率,从传统的陆上石油开发量和深海石油的开发量两个方面增加石油资源禀赋,提高其可用性。对于天然气,勘探工作应以预探发现大气田为主,加强天然气勘探开发工作,努力实现天然气储量和产量的快速增长,提高其可用性。对于煤炭,开展大型现代化煤炭开发项目,同时加快现代煤化工产业的发展,延长煤炭加工产业链条,提高煤炭的可用性。

其二,可获性策略。对于石油,鼓励国内石油集团和公司参与海外的石油勘探和开发,坚持进口来源多元化战略,扩大来源渠道,把俄罗斯、非洲作为重要的石油进口新增来源,使其成为与中东石油互为补充的供应地。对于天然气,加快国内下游市场的培育和开发,参与境外天然气勘探开发,实施中国—中亚油气大通道建设。对于煤炭,加强国有煤炭企业改革,加强运输环节的监管力度,降低煤炭资源进口的风险。

其三,可持续性策略。对于石油,提高石油战略储备和进口能力及政治军事影响力,积极参与石油定价战略。对于天然气,加快天然气管网的规划和建设,完善天然气定价机制。对于煤炭,应通过限制燃煤的使用量、制定排放标准、改进技术来降低固体废弃物和粉尘与气体污染物的排放量。

其四,技术发展策略。对于石油,加强石油的勘查开发技术,通过技术发展提高油田采收率。对于天然气,加强勘探和天然气科技攻关项目,开展天然气水合物研究。对于煤炭,加强洁净煤技术的研究,加

大对与煤炭相关的工业企业的技术改造。大力加强包括太阳能光热利用、风力发电、生物质能高效利用和地热能新能源技术的发展。

参考文献

- [1] Wright, P. Liberalisation and the security of gas supply in the UK[J]. *Energy Policy*, 2005, (17).
- [2] Department of Energy & Climate Change (DECC). *Energy Markets Outlook Report*[EB/OL]. <http://www.official-documents.gov.uk/document/hc0910/hc01/0176/0176.pdf>, 2009-01-01.
- [3] IEA. *Toward a Sustainable Energy Future*[R]. Paris: International Energy Agency, 2001.
- [4] Asif, M., T. Muneer. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, (7).
- [5] 魏一鸣, 吴刚, 刘兰翠, 等. 能源—经济—环境复杂系统建模与应用进展[J]. *管理学报*, 2005, (2).
- [6] Vivoda, V. Japan's energy security predicament post-Fukushima[J]. *Energy Policy*, 2012, 46.
- [7] 魏一鸣, 吴刚, 梁巧梅, 等. 中国能源报告(2012): 能源安全研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [8] Asia Pacific Energy Research Centre (APEREC). *A Quest for Energy Security in the 21st Century*[EB/OL]. www.ieej.or.jp/aperc, 2007-08-27.
- [9] Sovacool, B. K., S. V. Valentine, M. J. Bambawale, et al. Exploring propositions about perceptions of energy security: An international survey[J]. *Environmental Science & Policy*, 2012, 16.
- [10] Cabalu, H. Indicators of security of natural gas supply in Asia[J]. *Energy Policy*, 2010, (1).
- [11] 刘立涛, 沈镭, 高天明, 等. 中国能源安全评价及时空演进特征[J]. *地理学报*, 2012, (12).
- [12] Sovacool, B. K. An international assessment of energy security performance[J]. *Ecological Economics*, 2013, (4).
- [13] Leung, G. C. K. China's energy security: Perception and reality[J]. *Energy Policy*, 2011, (3).
- [14] Blum, H., L. F. L. Legey. The challenging economics of energy security: Ensuring energy benefits in support to sustainable development[J]. *Energy Economics*, 2012, (6).
- [15] Xia, X. H., G. T. Huang, G. Q. Chen, et al. Energy security, efficiency and carbon emission of Chinese industry[J]. *Energy Policy*, 2011, (6).
- [16] Sovacool, B. K., I. Mukherjee, I. M. Drupady, et al. Evaluating energy security performance from 1990 to 2010 for eighteen countries[J]. *Energy*, 2011, (10).
- [17] Hughes, L. A generic framework for the description and analysis of energy security in an energy system[J]. *Energy Policy*, 2012, 42.
- [18] Hughes, L. The four 'R's of energy security[J]. *Energy Policy*, 2009, (6).
- [19] Yu, J., S. Z. Yao, R. Q. Chen, et al. A quantitative integrated evaluation of sustainable development of mineral resources of a mining city: A case study of Huangshi, Eastern China[J]. *Resources Policy*, 2005, (1).
- [20] Wu, G., L. C. Liu, Z. Y. Han, et al. Climate protection and China's energy security: Win-win or tradeoff[J]. *Applied Energy*, 2012, (C).
- [21] Su, S. H., J. Yu, J. Zhang. Measurements study on sustainability of China's mining cities[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, (8).
- [22] Kuo, Y., T. Yang, G. W. Huang. The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, (1).
- [23] 陈立敏, 杨振. 我国钢铁行业的国际竞争力分析——基于灰色关联度和理想解法的组合评价[J]. 2011, (9).

(责任编辑 朱 蓓)