中国能源供给安全综合评价及障碍因素分析

薛静静[1,2],沈 镭[1],刘立涛[1],高天明[1,2],陈枫楠[1,2]
(1.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:作为能源生产和消费大国,中国的能源供给安全问题一直备受关注,甚至有一些别有用心的国际机构大肆宣扬"中国能源威胁论"。针对中国能源供给存在的实际突出问题,开展能源供给安全综合评价研究,有助于深刻认识中国能源供给安全形势,找出中国能源供给安全的主要影响因子和强化政策保障。从能源供给安全的概念出发,构建中国能源供给安全综合评价指标体系,基于集对分析方法构建能源供给安全评估模型,借鉴指标评价标准模型建立指标评价标准值,运用熵值法确定各评价指标的权重,对近年来中国能源供给安全的等级、演变特征及主要影响因素进行了深入分析。研究结果表明:2000-2008年中国能源供给安全评价等级为III,2009年和2011年上升为I级,2010年为II级。中国能源供给安全指数与最优评价集I的联系度由2000年的-0.46增至2011年的0.23,呈波动上升趋势。中国能源供给安全影响因素分析显示,能源产品价格指数和能源加工转换效率是第一位的影响因素,在各年份的出现频率达到91.67%,其次为可再生能源所占比重和储采比,出现频率达到83.33%。

关键词:能源供给安全;集对分析;评价标准;障碍度;中国
DOI: 10.11821/dlyj201405004

1 引言

能源安全的概念诞生于20世纪70年代两次石油危机，初衷主要是为了防止石油供应中断，确保石油供应安全。随着社会经济发展对资源、环境的需要，能源安全涵盖的内容日益多元化。张雷认为国家能源安全的概念由两个有机部分组成，分别为能源供应的稳定性（经济安全性）和能源使用的安全性，即能源供给安全和能源消费安全[1]。沈镭将广义的能源安全界定为能源供给安全、能源生产和使用安全、能源运输安全、能源环境安全及能源安全预警机制[2]。对能源安全的研究源于能源供给安全，能源供给安全是能源安全的核心内容。本研究着重强化能源供给安全问题研究。能源供给安全是一个受多种因素影响的复杂系统，早在90多年前，温斯顿·丘吉尔针对能源供给安全就曾做出回答"石油供应的稳定和安全，关键在于多样化"[3]。能源品种、来源地和能源市场供应商多元化是应对能源供应风险的重要手段[4-7]。在对未来社会经济长远发展认知有限甚至未知的情况下，多样化策略被认为是保障长期能源供应安全的最好选择[8]。APERC（2007）[5]认为影响能源供应安全的因素主要来自以下5个方面：① 燃料储备及国内外供给者情况；② 经济体满足预期能源需求的供给能力；③ 经济体能源资源和供给者多样化水平；④ 获取能源资源的便利性，与可得性相关的能源基础设施如能源运输基础设施；

收稿日期：2013-03-20；**修订日期**：2013-09-28
基金项目：国家自然科学基金项目（41271547）；中国科学院先导项目（XDA05010400）
作者简介：薛静静（1986-），女，山东省聊城人，博士生，主要研究方向为能源经济与政策研究。E-mail: xuejj.11b@igsnrr.ac.cn
通讯作者：沈镭（1964-），男，湖北麻城人，研究员、博导，中国自然资源学会秘书长。E-mail: shenl@igsnrr.ac.cn

⑤ 地缘政治因素。据此，本研究将能源供给安全定义为：综合考虑能源来源（品种和来源地）、运输、战略储备、地缘政治、支付能力、技术、制度等多种因素，满足一定地域范围当前和未来获取充足的、符合社会经济发展需要的能源产品。

如何系统优化能源供给安全对于国民经济健康、有序发展越来越重要。进入21世纪以来，国际主要能源研究机构对能源供给安全展开了系统研究。2001年7月，英国贸易工业部（Department of Trade and Industry，DTI）与天然气电力市场办公室（The Office of the Gas and Electricity Markets，OFGEM）成立能源供应安全联合研究小组（Joint Energy Security of Supply Working Group，JESS）对英国未来天然气与电力供应安全进行研究[9-11]。为保障欧洲能源供应安全，MNP与CPB 就2040年欧洲能源可持续发展前期研究展开合作[12]。MNP委托ECN（Energy Research Centre of the Netherlands）承担欧洲能源供应安全前期研究工作[13]。前期研究主要着眼于两个科学问题：第一，设计长期能源供应安全指数是否可行，如何设计；第二，天然气（长期）供应中断形成原因，预期的响应机制及相应成本[4]。伴随着APEC（Asia-Pacific Economic Cooperation）地区经济和人口的快速增长，如何应对快速增长的能源需求，保障能源安全供给成为APEC地区经济社会可持续发展的关键一环，亚太能源研究中心（APERC，2007）[5]对能源供给安全展开了深入研究。随着中国经济快速发展，确保能源安全供给已成为中国的核心利益。煤炭工业可持续发展是保障能源安全供给的需要，煤炭转化替代石油对保障我国能源供应具有重要意义[14]。李红欣[15]和闫广宇[16]分别针对中国石油供给安全面临的严峻挑战和存在的一些新问题，提出有效的政策建议。祝佳对欧盟能源供给当前存在的问题进行了分析，发现欧盟当前能源对外依存度很高且呈上升趋势、进口来源集中在少数国家[17]。周勤以中日俄之间的“安大线”与“安纳线”之争为案例，借助价格拍卖（the First-price Sealed Auction）模型，对基于能源供给安全的国家之间能源政策博弈进行了研究[18]。

近年来，能源安全的定量评价研究方法日益多元化，国际上具代表性的能源安全模型有JESS模型、ECN模型、IEA模型和APERC能源安全模型，此外，中断概率法、多样化指数法、衡量期望福利损失法，以及指标加权法、因子分析法、主成分分析法等统计分析方法，在能源安全评价中的应用也日益广泛。但专门对能源供给安全进行定量评价的研究相对较少。陈军运用模糊综合评判法，对中国、美国与俄罗斯3个国家的非再生能源供给安全状况进行了比较与评价[19]。张阿玲在参考国外研究方法的基础上，结合中国的具体情况，提出了量化中国石油供应安全的赫芬达尔-赫施曼（Herfindahl-Hirschman, HHI）方法。即在经典H方法的基础上增加供应来源的风险因素[20]。苏飞在对能源安全供给脆弱性概念进行界定的基础上，采用因子分析法确定评价指标的权重系数，并对全国30个省（市、区）“十五”时期的常规能源（煤炭、石油和天然气）安全供给脆弱性进行定量评估[21]。

解决能源问题的关键在于供给。能源供给安全已成为中国社会经济可持续发展的一个重大问题，能源供应保障是国家能源安全的基本目标所在[1]。近年来中国能源供给安全形势如何，存在何种变化趋势，最主要的影响因素有哪些，解决上述命题有助于更加深入地研究中国能源供给安全问题。集对分析模型在生态领域运用广泛[22-27]，集中于水安全、土地生态安全、环境质量安全评价，并且日益涉足于矿产、电力、运输、建筑施工、网络、食品等越来越多的安全评价研究领域。与其他模型、方法相比，集对分析方法计算简单，可以同时考虑信息的确定性和不确定性问题。能源供给安全受历史与现实、内部与外部、经济与技术等不确定性因素和随机性因素的影响，本文基于集对分析方法对中国能源供给安全形势进行客观评价，依据客观值运用熵值法赋予指标权重值、

确定评价标准值，使评价结果更具有客观性；揭示中国能源供给安全变化趋势、特征及主要影响因素，为保障中国能源供给安全提供政策参考和建议。

2 指标体系与数据来源

2.1 指标体系的构建

对能源供给安全做出评价是一个庞大复杂的命题。考虑到数据获取的限制，很难实现面面俱到的综合评价，因此，关键性指标的选取和把握十分重要，从而也规避了大而全导致无法进行深入研究的问题。从国情出发，在科学性、系统性、全面性、实用性、与评价方法一致性原则的指导下，根据能源供给安全综合评价的科学内涵，参考相关能源安全评价文献[28-32]，并咨询能源安全领域的专家，初步构建中国能源供给安全综合评价指标体系，并对指标计算公式和指标变量进行了详细说明（表1）。

中国能源供给安全综合评价可以从可获得、可支付、效率、技术研发4个重要维度展开，其细化指标直接或间接反映了能源供给安全的科学内涵。可获得从能源资源来源方面强调能源产品的可获得性，包括储采比（考虑煤炭、原油和天然气3种主要化石能源）、生产多元化指数、可再生能源所占比重、能源进口多元化指数、市场流动性、人均能源生产量、自给率、中国能源产量占世界总产量比例（考虑煤炭、原油和天然气3种主要化石能源）8项正向指标和能源进口量占世界总进口量比例（考虑煤炭、原油和天然气3种主要化石能源）一项负向指标；可支付从价格方面强调能源供给的安全性，选取能源产品价格指数一项负向指标；提高能源利用效率是促进能源供给安全的重要一环，选取能源加工转换效率（正向指标，综合发电、电站供热、炼焦、炼油）和能源消耗强度（负向指标）作为反映能源效率水平的重要指标；技术研发和创新在能源供给安

表1 中国能源供给安全综合评价指标体系

Tab.1 Indicator system for the energy supply security of China

准则层	指标名称及单位	计算公式	变量说明	指标权重
可获得	储采比(Z1)	$\sum_i r_i p_i$	r_i为化石能源i的储量与产量之比；p_i为i能源所占比重	0.1194
	生产多元化指数(Z2)	$\sqrt{\sum_i p_i^2}$	p_i为i能源所占比重	0.0596
	可再生能源所占比重(Z3)	e_{re}/e_{pro}	e_{re}为可再生能源生产量；e_{pro}为能源生产总量	0.0807
	能源进口多元化指数(Z4)	$1-\sqrt{\sum_j I_j^2}$	I_j为原油进口中从第j个国家进口的原油所占比重	0.0393
	市场流动性(Z5)	I_w/I_c	I_w为世界原油出口量；I_c为中国原油进口量	0.0957
	人均能源生产量(Z6)	$e_{pro}/population$	e_{pro}为能源生产总量	0.0784
	自给率(Z7)	e_{pro}/e_{con}	e_{pro}为能源生产总量；e_{con}为能源消费总量	0.0585
	中国能源产量占世界总产量比例(Z8)	$\sum_i o_i p_i$	o_i为中国i化石能源的产量与i化石能源的世界总产量之比；p_i为i能源所占比重	0.0701
	能源进口量占世界总进口量比例(Z9)	$\sum_i I_i p_i$	I_i为中国i化石能源的进口量与i化石能源的世界总进口量之比；p_i为i能源所占比重	0.0539
可支付	能源产品价格指数(Z10)	$(100\times f_{y+1})/f_y$	f_y为y年燃料的价格	0.0875
效率	能源加工转换效率(Z11)	p_{op}/p_{ip}	p_{op}为能源加工转换产出量；p_{ip}为能源加工转换投入量	0.1102
	能源消耗强度(Z12)	e_{con}/GDP	e_{con}为能源消费总量	0.0806
技术研发	研发支出占财政总支出比例(Z13)	r_e/f_e	r_e为研发支出额；f_e为财政总支出额	0.0659

全领域具有不可或缺的功能，为未来提供可开发和可利用的潜力，本文选取研发支出占财政总支出比例（正向指标）反映技术研发的投入水平。

2.2 数据来源与说明

各项指标统计数据主要来源于《BP世界能源统计年鉴》（2000-2011年）、《中国统计年鉴》（2000-2011年）和《中国海关统计年鉴》（2000-2011年），其中储采比来源于《BP世界能源统计年鉴》，市场流动性和能源进口量占世界总进口量比例由《BP世界能源统计年鉴》的基础数据计算得出；可再生能源所占比重、能源产品价格指数和能源加工转换率来源于《中国统计年鉴》，生产多元化指数、人均能源生产量、自给率、能源消耗强度和科研经费所占比例由《中国统计年鉴》基础数据计算得出；能源产量占世界总产量比例根据《BP世界能源统计年鉴》和《中国统计年鉴》的基础数据计算得出；能源进口多元化指数由《中国海关统计年鉴》基础数据计算得出。

3 研究方法

3.1 指标权重的确定

目前，确定指标权重的方法可划分为主观赋权法和客观赋权法两大类，前者在确定指标权重方面存在较强的主观性，后者以指标本身所提供的信息为基础，客观性和科学性较强。熵值法是一种常用的客观赋权法，直接利用评价指标的固有信息对指标进行赋权，在一定程度上避免了主观因素导致的偏差。熵是对不确定性的一种度量，信息熵值越高，系统结构越均衡，差异越小，或者变化越慢；反之信息熵越低，系统结构越是不均衡，差异越大，或者变化越快。根据熵值大小，即各项指标值的变异程度，可以计算出权重[33]。各项指标之间的量纲不完全一致，因此计算指标权重之前首先需要进行无量纲化处理。正向指标的值越大越好，计算公式为：$u'_{ij}=\dfrac{u_{ij}-\min(u_j)}{\max(u_j)-\min(u_j)}$，$u_{ij}$为第$i$年份的第$j$个指标的数值，$(i=1,2,...,n;j=1,2,...,m)$。负向指标的值越小越好，计算公式为：$u'_{ij}=\dfrac{\max(u_j)-u_{ij}}{\max(u_j)-\min(u_j)}$。

第一步，计算第j项指标下第i年份占该指标的比重：

$$w_{ij}=u'_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{n}u'_{ij},\quad (i=1,2,...,n;j=1,2,...,m) \tag{1}$$

第二步，计算第j项指标的熵值：$e_j=-k\sum_{i=1}^{n}w_{ij}\ln(w_{ij}),\ k>0,\ k=1/\ln(n),\ e_j\geq 0$ (2)

第三步，每项指标的指标值之间差异越大，对方案评价的左右就越大，熵值就越小。计算第j项指标的差异度系数：$o_j=\dfrac{1-e_j}{m-E_e},\ E_e=\sum_{j=1}^{m}e_j,\ 0\leq o_j\leq 1,\ \sum_{j=1}^{m}o_j=1$ (3)

第四步，计算指标的权重：$s_j=o_j\Big/\sum_{j=1}^{m}o_j,\ 1\leq j\leq m$ (4)

3.2 指标评价标准的确定

能源供给安全评价涉及多种指标类型，有关评价标准的研究相对薄弱。本文尝试以能源供给安全指标中的最大值、最小值及其差值来建立评价标准[22]。设有n个年份能源供给样本组成样本集W，每个样本有m项评价指标，组成$m\times n$阶能源供给指标矩阵$W_{m\times n}=(w_{ij})(i=1,2,...,m;j=1,2,...,n)$。对于每项评价指标$w_{mj}=(w_{m1},w_{m2},...,w_{mj})(j=1,2,...,n)$

有最大值 $w_{mj[\max]}$ 和最小值 $w_{mj[\min]}$ 及其差值 $w_{mj[\max]}-w_{mj[\min]}$。由此，建立评价标准方程为：

$$\Delta w = w_{mj[\min]} + \rho(w_{mj[\max]} - w_{mj[\min]}) \quad (5)$$

式中：Δw 表示分级标准值；ρ 表示评价标准系数，且 $0<\rho<1$。

3.3 集对分析评价模型

集对分析是由中国学者赵克勤于1989年提出的一种关于确定不确定系统同异反定量分析的系统分析方法，用联系度来描述系统的各种不确定性，从而把对不确定性的辨证认识转化成定量分析[34]。具有某种联系的两个集合 A 和 B 组成集对 $H=(A, B)$，对集对 H 展开分析，得到 N 个特性，其中 S 为集对中两个集合共同具有的特性数，P 为两个集合相互对立的特性数，$F=N-S-P$ 为两个集合既不共同也不相互对立的特性数。集合 A 与集合 B 的联系度表达式为：

$$\mu_{(A,B)} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj \quad (6)$$

式中：i 为差异度标记和系数，取值介于[-1，1]之间；j 为对立度标记和系数，取值恒为−1。$a=S/N$，$b=F/N$，$c=P/N$，a、b、c 分别为集合 A 和集合 B 的同一度、差异度和对立度，且满足归一化条件 $a+b+c=1$。

联系度的确定是集对分析的关键，确定被评价年份能源供给安全水平的等级，即比较被评价年份指标值集合与各评价等级标准指标值集合（I、II、III）的联系度大小，联系度最大的等级为被评价年份能源供给安全水平等级，即若 $\mu_{(A,B_1)}$ 最大，则被评价年份能源供给安全水平等级属于I级；若 $\mu_{(A,B_2)}$ 最大，则被评价年份能源供给安全水平等级属于II级；若 $\mu_{(A,B_3)}$ 最大，则被评价年份能源供给安全水平等级属于III级。

以 $\mu_{(A,B_1)} = \frac{S_1}{N} + \frac{F_1}{N}i + \frac{P_1}{N}j$ 为例进行说明。在联系度的确定中，差异度系数 i 的确定是关键，通过对 i 信息的挖掘最终得出：

$$\mu_{(A,B_1)} = \left(\frac{S_1}{N} + \frac{F_1}{N} \times \frac{S_{(1)}S_{(2)}}{(S_{(1)}+S_{(2)})x}\right) + \frac{F_1}{N} \times \frac{(S_{(2)}-x)(x-S_{(1)})}{(S_{(1)}+S_{(2)})x}i + \left(\frac{F_1}{N} \times \frac{x}{S_{(1)}+S_{(2)}} + \frac{P_1}{N}\right)j \quad (7)$$

式中：x 为处于II级标准的指标值，$x\in[S_{(1)},S_{(2)}]$，$S_{(1)}$、$S_{(2)}$ 为该指标I、II级标准的限值。$\mu_{(A,B_2)}$ 和 $\mu_{(A,B_3)}$ 的计算方法同 $\mu_{(A,B_1)}$，$\mu_{(A,B_2)}$ 中所讨论的指标值 x 的取值范围有两种可能 $x\in[0,S_{(1)}]$ 或 $x\in[S_{(2)},S_{(3)}]$。

4 研究结果

4.1 中国能源供给安全指标评价标准

基于上述指标评价方法（公式5）和实际的指标值，得到中国能源供给安全指标的3级分类标准（表2）。I级为较好，表明中国能源供给安全水平有较大幅度提高；II级为一般，表明中国能源供给安全水平一般，有一定的提高潜力；III级为较差，表明中国能源供给安全水平较低，进一步提高的潜力较大。能源进口量占世界总进口量比例、能源消耗强度和能源产品价格指数为三项反向指标，因此分级标准与其他指标有一定差异。

4.2 中国能源供给安全评价结果分析

4.2.1 中国能源供给安全的总体特征 运用集对分析方法（公式7），得到中国能源供给安全评价结果（表3），可以看出2000-2008年中国能源供给安全评价等级为III，2009年和2011年上升为I级，2010年为II级。2000年能源供给安全指数与评价级III的联系度最

表2 基于实际指标值计算的中国能源供给安全指标评价标准

Tab.2 Computed evaluation criterions of energy supply security of China based on actual index values

指标类型	分级标准		
	I	II	III
储采比	>71.16	52.60-71.16	<52.60
生产多元化指数	>0.78	0.77-0.78	<0.77
可再生能源所占比重	>8.65	7.90 -8.65	<7.90
能源进口多元化指数	>0.70	0.69-0.70	<0.69
市场流动性	>21.80	15.67-21.80	<15.67
人均能源生产量	>1.97	1.58-1.97	<1.58
自给率	>93.41	91.16-93.41	<91.16
能源产量占世界总产量比例	>34.69	30.32-34.69	<30.32
能源进口量占世界总进口量比例	<7.49	7.49-10.42	>10.42
能源产品价格指数	<102.71	102.71-110.21	>110.21
能源加工转换率	>73.54	71.61-73.54	<71.61
能源消耗强度	<1.03	1.03-1.25	>1.25
科研经费所占比例	>7.22	6.49-7.22	<6.49

高为0.46；2010年能源供给安全指数与评价级II的联系度最高为0.14；2011年能源供给安全指数与评价级I的联系度最高为0.23。2000年能源供给安全水平最低，同一度（a）、差异度（b）和对立度（c）分别为0.27、0和0.73，表明评价指标中27%、0%和73%的指标分别符合相应的I级标准、II级标准和III级标准。2011年能源供给安全水平最高，同一度（a）、差异度（b）和对立度（c）分别为0.62、0和0.38，表明评价指标中62%、0%和38%的指标分别符合相应的I级标准、II级标准和III级标准。

中国坚持立足国内资源优势和发展基础，着力增强能源供给保障能力，进入新世纪，尤其是自2005年以来中国能源生产总量大幅提高。高度重视能源科技的发展和能源供应多元化，国家政策向可再生能源倾斜，水电、核电、风电等可再生能源进入发展的快车道，可再生能源供应量和在能源总量中所占比重不断提高。积极实施“走出去”和“引进来”战略，加强政府能源外交，不断扩大国际合作范围，能源进口来源地更加多元化。加强能源战略储备，石油战略储备已具备一定规模。虽然近年来中国能源供给安全水平不断提高，但总体来看中国的能源供给安全指数并不高，中国能源供给还存在一定安全隐患。2000年以来，中国基本上以超过90%的自给率积极有效地应对了能源供给安全问题，长期来看中国保障能源供给安全的关键仍在于依靠自身力量，继续推行创新有效的政策措施依旧不容忽视。

4.2.2 中国能源供给安全指数与最优评价集的联系度分析 中国能源供给安全指数总体呈上升趋势，但上升过程中具有一定波动性。中国能源供给安全指数与最优评价集I的联系度由2000年的-0.46上升至2011年的0.23（图1），根据波动上升的特点可分为3个时期。

（1）2000-2001年为大幅上升阶段。能源供给安全指数由2000年的-0.46上升至2001年的-0.07。原因在于2001年中国可再生能源产业发展较快，在能源生产中所占比重由6.9%上升至7.9%，能源产量增幅较大，自给率由92.8%上升至95.66%，达到近12年来最高值，同时能源市场流动性也较强，能源产品价格指数较低。

（2）2002-2006年为波动下降阶段。2002年储采比呈大幅梯级下降，由2001年的81.16降至63.95，市场流动性也呈现较明显下降，由此导致能源供给安全指数出现明显下降。2003-2006年中国能源供给安全指数呈现平稳小幅回落，原因在于储采比、市场流

表3 2000–2011年中国能源供给安全水平联系度及评价结果

Tab.3 The relation degree and evaluation result of energy supply security level of China (2000–2011)

年份	$\mu_{(A,B)}$	同一度（a）	差异度（b）	对立度（c）	联系度μ	评价结果
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.27	0.00	0.73	-0.46	
2000	$\mu_{(A,B_2)}$	0.26	0.10	0.64	-0.38	III
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.73	0.00	0.27	0.46	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.46	0.00	0.54	-0.07	
2001	$\mu_{(A,B_2)}$	0.30	0.09	0.61	-0.31	III
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.54	0.00	0.46	0.08	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.38	0.00	0.62	-0.23	
2002	$\mu_{(A,B_2)}$	0.27	0.08	0.66	-0.39	III
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.61	0.00	0.39	0.23	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.38	0.00	0.61	-0.23	
2003	$\mu_{(A,B_2)}$	0.42	0.05	0.53	-0.10	III
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.61	0.00	0.38	0.23	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.35	0.00	0.65	-0.31	
2004	$\mu_{(A,B_2)}$	0.38	0.03	0.59	-0.21	III
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.65	0.00	0.35	0.31	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.35	0.00	0.65	-0.31	
2005	$\mu_{(A,B_2)}$	0.50	0.03	0.47	0.03	III
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.65	0.00	0.35	0.31	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.35	0.00	0.65	-0.30	
2006	$\mu_{(A,B_2)}$	0.50	0.04	0.47	0.03	III
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.66	0.00	0.34	0.31	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.43	0.00	0.57	-0.15	
2007	$\mu_{(A,B_2)}$	0.50	0.04	0.46	0.04	III
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.58	0.00	0.42	0.16	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.42	0.00	0.58	-0.17	
2008	$\mu_{(A,B_2)}$	0.38	0.06	0.56	-0.17	III
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.57	0.00	0.43	0.14	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.58	0.00	0.42	0.15	
2009	$\mu_{(A,B_2)}$	0.30	0.08	0.62	-0.31	I
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.42	0.00	0.58	-0.15	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.54	0.00	0.46	0.08	
2010	$\mu_{(A,B_2)}$	0.53	0.09	0.38	0.14	II
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.46	0.00	0.54	-0.08	
	$\mu_{(A,B_1)}$	0.62	0.00	0.38	0.23	
2011	$\mu_{(A,B_2)}$	0.45	0.10	0.45	-0.01	I
	$\mu_{(A,B_3)}$	0.38	0.00	0.62	-0.23	

动性和自给率呈逐渐缓慢下降趋势，世界经济稳步增长，对能源产品的需求持续增加，受伊拉克战争的影响，石油价格居高不下，并且逐渐抬升。

（3）2007-2011年为快速波动上升阶段。能源供给安全指数由2007年的-0.30上升至2011年的0.23。2007年，国家发改委发布了《可再生能源中长期发展规划》，提出加快推进风力发电、生物质发电、太阳能发电的产业化发展，逐步提高优质清洁可再生能源在能源结构中的比例。2008年，国家发改委又发布了《“十一五”可再生能源发展规划》。包括国家发改委、财政部、建设部、电监会、国家标准委等相关部门，陆续出台了

包括扶持电价、投资补贴在内的20多个相关的配套政策，有力地促进了可再生能源的产业进步。另外，2006-2011年中国一次能源生产总量连续六年居世界第一，发展可再生能源和不断增加一次能源生产使中国维持较高并不断增长的能源自给率。2008-2009年受金融危机影响世界经济增长率极低，2009年甚至出现负增长，到2010年恢复稳步增长。因此，2009世界经济衰退导致对能源需求的短期下降，与此同时能源价格出现短期相对降低。随着科研经费支出比重的增加以及科学技术进步，中国能源加工转换率不断提高，能源消耗强度持续下降。这些都有力地促进了中国能源供给安全保障程度提高。

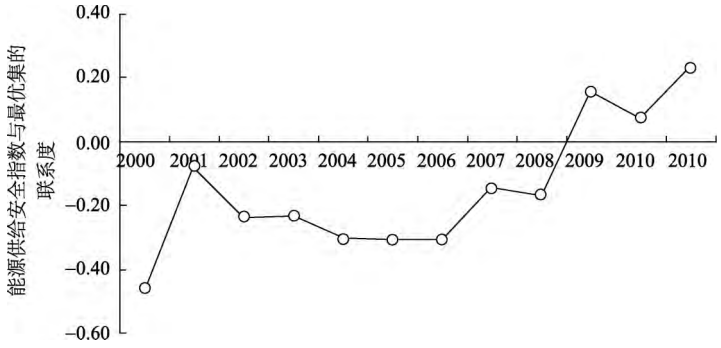

图1　2000-2011年中国能源供给安全变化趋势

Fig. 1　The changing trends of energy supply security of China (2000-2011)

4.3 中国能源供给安全的影响因素分析

在中国能源供给安全综合评价的基础上，确定中国能源供给安全的影响因素，进行影响因素诊断和分析，并提出相关的调整政策和措施，有助于实现能源供应可持续，更好的保障中国能源供给安全。影响因素的诊断结果通过障碍度来体现，中国能源供给安全障碍度(Q_j)计算公式如下[23]：

$$Q_j = (s_j \cdot v_j) / \sum_{j=1}^{13} (s_j \cdot v_j) \tag{8}$$

式中：s_j为因子贡献度，代表单项指标对中国能源供给安全的影响程度，即单项指标的权重；v_j是指标偏离度，表示单项指标与中国能源供给安全目标之间的差距；$v_j = 1 - u'_{ij}$, u'_{ij}为单项评价指标的标准化值。

根据公式（8）计算各项指标的障碍度，确定障碍度$Q_j \geq 5\%$为划分影响因素的标准，影响因素出现的次数及频率见表4。按照出现次数和频率由高到低排序依次为，Z10能源产品价格指数和Z11能源加工转换效率（11次，91.67%），Z3可再生能源所占比重和Z1储采比（10次，83.33%），Z5市场流动性（9次，75%），Z6人均能源生产量、Z7自给率和Z12能源消耗强度（8次，66.67%），Z8中国能源产量占世界总产量比例（6次，50%），Z9能源进口量占世界总进口量比例和Z13研发支出占财政总支出比例（5次，41.67%），Z2生产多元化指数（3次，25%），Z4能源进口多元化指数（2次，16.67%）。可以看出，能源产品价格指数和能源加工转换效率是第一位的影响因素，出现频率达到91.67%，其次为可再生能源所占比重和储采比，出现频率达到83.33%，说明能源产品价格指数、能源加工转换效率、可再生能源所占比重和储采比一直严重制约中国能源供给安全。供求紧平衡、市场投机因素、化石能源储量有限性导致近年来能源产品

表4　2000−2011年中国能源供给安全影响因素出现频率

Tab. 4　Obstacle factors and their frequency of energy supply security of China (2000−2011)

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13
次数	10	3	10	2	9	8	8	6	5	11	11	8	5
频率	83.33	25	83.33	16.67	75	66.67	66.67	50	41.67	91.67	91.67	66.67	41.67

的价格不断提高，并长期居高不下。随着科学技术进步，2000-2011年中国能源加工转换率和可再生能源所占比重分别由69.04%和6.9%上升至75.47%和8.8%，虽然都有一定程度上升，但上升水平有限，整体来看两者的水平仍然不高，因此，两者从根本上制约了中国能源供给安全。近年来，中国能源自给率日益提高与产量不断增加密不可分，产量增加导致储采比明显持续下降，中国能源供给安全的隐患性增强。

5 结论与讨论

（1）集对分析方法的核心是在建立评价指标体系的基础上，确定评价标准，计算同异反联系度，丰富了能源供给安全评价方法体系。与其他模型、方法相比，集对分析方法计算简单，依据客观值运用熵值法赋予指标权重值，使评价结果更具有客观性，可为相关部门制定能源供给安全保障对策提供科学参考，同时对其他研究领域的综合评价也具有一定借鉴意义。

（2）开展能源供给安全综合评价研究，有助于深刻认识中国能源供给安全形势，找出中国能源供给安全的主要制约因子和强化政策保障。本文基于集对分析方法构建了能源供给安全评估模型和指标评价标准模型，运用熵值法确定各评价指标的权重，对近年来中国能源供给安全的等级、演变特征及主要影响因素进行了深入分析。研究表明2000-2011年中国能源供给安全指数总体呈上升趋势，能源供给安全等级由III级逐渐上升为II级和I级；中国能源供给安全指数与最优评价集I的联系度波动上升，由2000年的-0.46上升至2011年的0.23；能源产品价格指数、能源加工转换效率、可再生能源所占比重和储采比是中国能源供给安全的主要影响因素。

（3）近年来中国能源供给安全水平不断提高，这与中国实施积极的能源政策密不可分。立足国内资源优势和发展基础，着力增强能源供给保障能力；科技创新，提高能效；多元发展，深化改革，构建有利于促进能源可持续发展的体制机制；提升能源“走出去”和“引进来”水平。近年来，中国能源消费不断增加，与此同时能源供给的安全性不降反增，上述能源举措卓有成效地促进了中国能源供给安全，同时也为中国能源发展提供了良好的机遇和环境。长远来看，随着中国综合国力增强以及科技进步，能源供给存在较大潜力，能源供给安全具备较大进步空间。

参考文献（References）

[1] 张雷. 中国能源安全问题探讨. 中国软科学, 2001, (4): 7-12. [Zhang Lei. Discussion about the Energy Security of China. China Soft Science, 2001, (4): 7-12.]

[2] 沈镭, 薛静静. 中国能源安全的路径选择与战略框架. 中国人口.资源与环境, 2011, 21(10): 49-54. [Shen Lei, Xue Jingjing. Development path choice and strategy framework of China's energy security. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2011, 21(10): 49-54.]

[3] Yergin D. Ensuring energy security. Foreign Affairs, 2006, 85(2): 69-82.

[4] Jansen J, van Arkel W G, Boots M G. Designing indicators of long-term energy supply security. http://www.doc88.com/p-219943636088.html, 2004-1-16/2013-06-22.

[5] Asia Pacific Energy Research Centre (APERC). A quest for energy security in the 21st century: resource and constraints. Tokyo: Institute of Energy Economic, 2007.

[6] IEA. Energy security and climate change policy interactions: An assessment framework. International Energy Agency, 2004.

[7] IEA. Contribution of renewables to energy security. International Energy Agency, 2007.

[8] Stirling A. Diversity and ignorance in electricity supply investment: addressing the solution rather than the problem. Energy Policy, 1994, 22(3): 195-216.

[9] Joint Energy Security of Supply Working Group (JESS). Long term security of energy supply. http://www.dti.gov.uk/energy/domestic_markets/security_of_s upply/, 2002-02/2013-06.

[10] Joint Energy Security of Supply Working Group (JESS). Long term security of energy supply. http://www.berr.gov.uk/files/file10729.pdf, 2003-02/2013-06.
[11] Joint Energy Security of Supply Working Group (JESS). Long term security of energy supply. http:// webarchive.nationalarchives.gov.uk/+/http://www.berr.gov.uk/files/file35989.pdf, 2006-12/2013-06.
[12] Mooij R de, Tang P. Four futures of Europe. http://www.cpb.nl/eng/pub/cpbreeksen/bijzonder/49/, 2003-11-10/2013-06-024.
[13] Scheepers M, Seebregts A. EU standards for energy security of supply-updates on the crisis capability index and the supply/demand index quantification for EU. http://www.ecn.nl/docs/library/report/2007/e07004.pdf, 2007/2013.
[14] 濮洪九. 实现煤炭工业可持续发展是保障能源安全供给的需要. http://www.sdpc.gov.cn/rdzt/hjp j/t20050617_7790.htm, 2005-05-26/2013-06-13.[Pu Hongjiu. Realizing Coal Industry Sustainable Development is the Need of Guaranteeing Energy Supply Security. http://www.sdpc.gov.cn/rdzt/hjp j/t20050617_7790.htm, 2005-05-26/2013-06-13.]
[15] 李红欣, 孙长远. 中国石油供给安全分析. 石家庄经济学院学报, 2006(2): 192-197.[Sun Changyuan, Li Hongxin. Analysis of China's Oil Supply Security. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 2006(2): 192-197.]
[16] 闫广宇, 国蕾. 中国石油供给安全问题研究. 价格月刊, 2009(2): 41-42. [Yan Guangyu, Guo Lei. Research on China's Oil Supply Security. Prices Monthly, 2009(2): 41-42.]
[17] 祝佳, 汪前元, 唐松. 欧盟能源供给安全现状分析和前景展望. 广东外语外贸大学学报, 2012, 23(4): 27-32. [Zhu Jia, Wang Qianyuan, Tang Song. The EU's energy supply: Situation and prospect. Journal of Guangdong University of Foreign Studies, 2012, 23(4): 27-32.]
[18] 周勤. 基于能源供给安全的国家之间能源政策的博弈: 兼评中日俄间的"安大线"与"安纳线"之争. 中国工业经济, 2003(12): 57-63. [Zhou Qin. Game on energy resources policies among nations based on the security of energy resources supply: Comment on Sino-Russia's argument on "Angarsk-Daqing Line" and "Angarsk-Nakhodka Line". China Industrial Economy, 2003(12): 57-63.]
[19] 陈军, 成金华, 卢文忠. 中国、美国和俄罗斯非再生能源供给安全国际比较. 中国地质大学学报(社会科学版), 2007(4): 27-32.[Chen Jun, Cheng Jinhua, Lu Wenzhong. An international comparison on the security of non-regeneration supply among China, Russia and America. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2007(4): 27-32.]
[20] 张阿玲, 王翠萍. 用H方法分析我国的石油供应安全. 中国软科学, 2002(11): 110-113. [Zhang Aling, Wang Cuiping. An analysis of oil supply security in China with H method. China Soft Science, 2002(11): 110-113.]
[21] 苏飞, 张平宇. 中国区域能源安全供给脆弱性分析. 中国人口.资源与环境, 2008, 18(6): 94-99. [Su Fei, Zhang Pingyu. Vulnerability analysis of regional energy security supply in China. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2008, 18(6): 94-99.]
[22] 焦士兴, 王腊春, 李静, 等. 区域用水水平评价中的集对分析方法研究. 自然资源学报, 2009, 24(4): 729-736. [Jiao Shixing, Wang Lachun, Li Jing, et al. Study on the application of set pair analysis method in the evaluation of regional water utilization level. Journal of Natural Resources, 2009, 24(4): 729-736.]
[23] 苏飞, 张平宇. 基于集对分析的大庆市经济系统脆弱性评价. 地理学报, 2010, 65(4): 454-464. [Su Fei, Zhang Pingyu. Vulnerability assessment of petroleum city's economic system based on set pair analysis: A case study of Daqing City. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(4): 454-464.]
[24] 张薇薇. 基于集对分析和模糊层次分析法的城市系统评价方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007. [Zhang Weiwei. Evaluation methods of urban systems based on SPA and FAHP [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.]
[25] 陆洲, 马涛. 地下水环境质量评价的一种新方法: 集对分析法. 环境保护科学, 2005, 31(5): 53-55.[Lu Zhou, Ma Tao. A new method to assess the environmental quality of underground water-set pair analysis. Environmental Protection Science, 2005, 31(5): 53-55.]
[26] 贺瑞敏, 张建云, 王国庆, 等. 基于集对分析的广义水环境承载能力评价. 水科学进展, 2007, 18(5): 730-735. [He Ruimin, Zhang Jianyun, Wang Guoqing, et al. Evaluation on generalized water environment carrying capacity based on SPA. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 730-735.]
[27] 吴燕华, 曹叔尤, 杨奉广. 集对分析方法在区域泥石流危险性评价中的应用研究. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(S1): 54-59. [Wu Yanhua, Cao Shuyou, Yang Fengguang. A new approach to regional debris flow risk assessment based on set pair analysis. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S1): 54-59.]
[28] Kruyt B, van Vuuren D P, de Vries H J M, et al. Indicators for energy security. Energy Policy, 2009, 37(6): 2166-2181.
[29] Sovacool B K, Mukherjee I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. Energy, 2011, 36(8): 5343-5355.
[30] 刘立涛. 基于dpsir模型的中国能源安全时空演进及其评价[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2011. [Liu Litao. Evaluation and spatial-temporal evolution of energy security in China [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2011.]
[31] Wu Gang, Liu Lancui, Han Zhiyong, et al. Climate protection and China's energy security: Win-win or tradeoff. Applied Energy, 2012, (97): 157-163.

[32] 吴初国, 何贤杰, 盛昌明, 等. 能源安全综合评价方法探讨. 自然资源学报, 2011, 26(6): 964-970. [Wu Chuguo, He Xianjie, Sheng Changming, et al. Comprehensive method for evaluating energy security. Journal of Natural Resources, 2011, 26(6): 964-970.]
[33] 欧向军, 甄峰, 秦永东, 等. 区域城市化水平综合测度及其理想动力分析: 以江苏省为例. 地理研究, 2008, 27(5): 993-1001. [Ou Xiangjun, Zhen Feng, Qin Yongdong, et al. Comprehensive measuring of regional urbanization level and its dynamic analysis: A case study of Jiangsu. Geographical Research, 2008, 27(5): 993-1001.]
[34] 赵克勤. 集对分析及其初步应用. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 9-29. [Zhao Keqin. Set Pair Analysis and Its Initial Application. Hangzhou: Press of Zhejiang Science and Technology, 2000: 9-29.]

Energy supply security assessment of China and the influencing factors based on set pair analysis

XUE Jingjing[1,2], SHEN Lei[1], LIU Litao[1], GAO Tianming[1,2], CHEN Fengnan[1,2]
(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a large energy production and consumption country, China's energy supply security issues have attracted much concern. Even some international organizations which have ulterior motives heavily hype "China energy threat". For the actual outstanding problems of China's energy supply, we need to carry out a comprehensive evaluation of the energy supply security. It helps to make a profound understanding of China's energy supply security situation and identify the major obstacle factors. And based on this we could strengthen policy protection. According to the concept of energy supply security, the paper built comprehensive evaluation index system of energy supply security, the assessment model and indicators evaluation criterion model based on set pair analysis method. The entropy method was applied to determine the index weights. And the level of energy supply security, the evolution feature and the main obstacle factors in recent years were profoundly analyzed. The results of the research show that from 2000 to 2008 China's energy supply security level is III, it rises to II in 2010 and I in 2009 and 2011. The relation degree between China's energy supply security exponent and optimal evaluation set I rises with fluctuations, increasing from -0.46 in 2000 to 0.23 in 2011. The obstacle factors analysis of China's energy supply security shows that the price index of energy products and energy processing and conversion efficiency are the top two obstacle factors, whose occurrence frequency reach to 91.67%, followed by the renewable energy share and the reserve-production ratio reaching to 83.33%. In recent years, China's energy consumption continuously increased, while the energy supply security level improved rather than fall, which is inseparable from the implementation of positive energy policy. Based on domestic resources advantages and development base, enhancing the energy supply support capability; technological innovation; improving energy efficiency; diversified development; deepening reform, building system and mechanism for promoting energy sustainable development; enhancing energy "going out" and "bringing in" level. All the above measures effectively promoted China's energy supply security and provide a good opportunity and the environment for China's energy development. In the long run, with comprehensive national power increasing and technological progress, there is a big potential for China’s energy supply, and the energy supply security has greater room for improvement.

Key words: energy supply security; set pair analysis; evaluation criterion; obstacle degree; China