

3E 系统视角下能源结构合理度评价研究

曹静¹, 贾娜¹, 李根², 范德成¹

(1. 哈尔滨工程大学经济管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 江苏科技大学经济管理学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对传统的能源结构评价方法多是重指标轻评价的局限性, 提出了一种基于 3E 系统视角的熵权-集对分析评价方法. 文章首先以 DPSIR 模型为基础构建了能源结构合理度评价指标体系. 然后通过熵权集对分析评价模型实证分析, 对我国 30 年的能源结构合理度进行评价. 结果表明, 熵权-集对评价方法能够很好的拟合我国能源结构合理度变化趋势; 提高能源结构合理度需从能源、经济和环境三管齐下; 政府应增加对固定资产的投资, 严格控制能源价格的同时坚持实行低碳经济政策, 保护环境, 从而保证经济与能源、环境系统的可持续同步发展.

关键词: 3E 系统; 能源结构合理度; 熵权法; 集对分析

中图分类号: F014

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2018)05-0698-12

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2018.05.012

Research on the evaluation of the sanity degree of energy structure based on the perspective of 3E system

Cao Jing¹, Jia Na¹, Li Gen², Fan Decheng¹

(1. School of economics and management, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. School of Economics and Management, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: To overcome the limitation of traditional energy structure evaluation methods of emphasizing indices while underestimating evaluation method, this paper puts forward an entropy-set pair analysis method from the 3E (energy-economy-environment) systematic perspective. The paper firstly sets up an evaluation index system of energy structure reasonable degree based on the DPSIR model; then it gives the evaluation and empirical analysis through the entropy-set pair analysis method; and thirdly evaluates the reasonable degree of energy in China over 30 years time period. The result shows that the entropy-set pair evaluation method could fit well the variation trend of the reasonable degree of Chinese energy structure; the reasonable degree of Chinese energy structure could be improved from three aspects: the energy, the economy and the environment. It is suggested that the government should increase the investment, strictly control the energy price and simultaneously implement the low-carbon economic policy to protect environment, thus guaranteeing the sustainable and synchronous development between the economy, energy and the environmental system.

Key words: 3E (energy-economy-environment)system; the sanity degree of energy structure; entropy method; set pair analysis

收稿日期: 2016-11-22; 修订日期: 2017-02-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71373059); 国家自然科学基金资助项目(71503106); 教育部人文社会科学研究规划基金资助项目(16YJA630002); 黑龙江省社会科学基金资助项目(15GLB05,15GLB03); 黑龙江省自然科学基金资助项目(G201313); 中央高校基本科研业务费专项基金(HEUCF1809011).

1 引言

伴随着工业化的发展,能源供需结构之间的矛盾愈发尖锐,能源结构优化的必要性凸显.2016年,国内外油气行业发展报告公布2015年我国石油对外依存度首次突破60%.当前国际政治经济形势错综复杂,中国经济发展进入新常态,能源作为经济发展的基础与动力,其结构合理与否将直接影响到国家的经济、环境系统的稳定性,因此能源结构优化一直以来都是我国战略决策层长期重视的热点.

目前,相关学者对能源结构合理度的内涵大都从广义及狭义两方面理解:狭义表现为能源结构使碳生产力提高的程度;广义表现为提高3E(能源、经济、环境)系统间的运行协调度,具体涵盖各子系统内部协调以及系统间运行协调度.合理的能源结构是指不以牺牲经济发展,减缓经济增长作为代价来实现低碳目标.因此,在研究包含复杂、不确定性、多领域的能源范式下的结构合理度时应基于3E(能源、经济、环境)系统的协调运行过程来分析能源结构与经济、环境之间的相互作用与相互影响的内在关系,并以此作为能源结构合理度评价的基础^[1-3].

文献[4]以能源经济学理论为基础,从环境、社会经济与能源发展这三个维度对能源结构合理度进行实证分析,发现能源结构合理度呈持续波动状态,还有文献[5-8]就此三个维度中的一个或多个进行研究分析,探讨能源消耗和废气排放的关系,从经济与能源两个维度切入,对比分析中国能源成本和能源技术发展的演化趋势;文献[9]就能源结构视角构建了一个包含3E三个子系统的综合能源利用效率评价指标体系;文献[10]利用一般均衡模型分析能源与环境问题,预测了我国经济增长速度与碳排放强度和能源强度发展趋势;文献[11,12]用阈值非线性模型分析降低能源强度的因素,得出GDP与技术进步两大因素对我国能源强度影响最大.

国外学者们对能源系统和经济、环境系统做了许多理论和实证方面的研究,对能源结构合理度评价方法较少研究,多以评估能源间的可替代性为主要内容^[13,14].文献[15]的研究表明原油、原煤以及电力资源包括水电和火电可以互相替代,从而缓解能源短缺问题.文献[16-18]同样也得出了这样的结论.文献[19,20]对能源之间的替代系数与替代弹性等等一些衡量变量估计的定量研究方法做了探讨.就能源结构层面,文献[21,22]主要建立了对于能源消费的研究框架,文献[23]使用控制论思想进行能源结构分析,而文献[24]则使用模拟的方法对能源消费结构进行模拟和组合.

通过文献梳理发现,国内外学者对能源结构以及能源系统本身均进行了较为深入的研究,为本文研究提供了有益借鉴.能源结构合理度评价是评判能源结构优化结果的标准,评价体系以及评价方法的科学性是不容忽视的.但是,现有研究却忽略了这个重点,对能源结构合理度评价较少研究,在指标选取、评价体系建立以及最终科学评价方面具有不精确性、广泛性.就评价这个单一的环节而言,传统的方法多是基于评价体系,分析影响因素之间的计量关系或是以权重与样本数据乘积值来诠释评价结果,单一的定量或定性的评价方法往往只能从某一层面分析评价结果,并不能系统、全面的统筹兼顾评价样本的确定性与不确定性间相互影响,同时存在权值确定方法粗糙、分级模糊、评价结果粗糙的缺陷.

首先,为应对指标体系的不精确性,本文以3E系统视角为切入点,DPEIR模型为指标筛选基础,构建了一个以能源结构合理度评价为目标层的多指标、全方位的综合测度与评价指标体系.其次,由于3E系统表现出诸多不确定性与复杂性,而集对分析在处理不确定性问题层面已经取得了巨大的成就,本文提出将其应用于管理科学中关于能源结构合理度的评价领域.采用熵权-集对分析模型,从“同-异-反”三个维度量析样本与标准间的联系度并对样本进行评价,将评价等级划分为五个等级,该方法改变传统主观评价为数据驱动的较为精确的评价,具有较强的推广价值.最后,对我国30年来能源结构合理度的变化趋势进行实证研究,识别影响能源结构的关键因子,进而揭示能源结构在这个复杂大系统中如何最优化达到能源结构合理度的要求.

2 3E 系统能源结构作用机理

3E 系统,是由能源、经济和环境三个子系统并联构成的一个有机大系统,其中能源系统是 3E 系统运行的动力支持,经济系统为其他系统提供物资支持,环境系统是 3E 系统的空间支持,是环境中各种关系的整体,也是能源系统的载体.王柳叶等^[1]认为 3E 系统理论是结合系统工程理论思想,全面深入的分析能源、经济、环境系统间的关联关系.3E 系统结构分析见图 1.

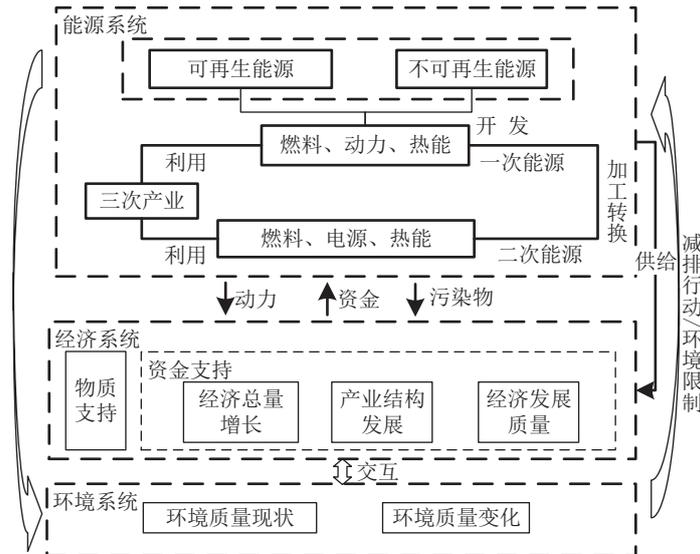


图 1 3E 系统能源结构关系框图

Fig. 1 Relationship of energy structure in a 3E system

总的来说,环境保护、社会经济和能源开发是个有机整体,社会经济发展要以能源开发为基础,但能源开发过程中不可避免要污染环境,只有经济发展了才能为环境保护.因此,在实现 3E 各系统的和谐稳步发展时,不能孤立考虑单个系统的问题,应以能源系统为媒介,通过提高能源加工转换效率,开发新能源,调整能源结构,兼顾环境系统承载能力,实现经济环境的稳定协调发展.

本文将 3E 复杂系统协调运行机制诠释为 3E 系统达到系统和谐稳步状态时,三个子系统内部运行过程以及各子系统之间运行的过程.3E 系统中,能源消费是经济提升的动力和基础,包含能源结构调整和技术开发;经济稳步增长有助于能源飞速发展,若能源消费总量和经济总量之比与能源消费提升速度和经济增加速度之比呈区间稳态状态,则“能源-经济”系统的替代关系为能源与经济增长间的关系.因此,若经济形式出现短期高速增长,由于能源资源的限制,该状态将不会持续,最终经济发展将被严重抑制.能源大量开采同时会导致能源系统运转失效,能源消费继发性导致的大量污染物产生.如图 1 所示,“能源-环境”系统之间的主要关系表现为能源系统加工转换环境中的各类资源,能源工业活动产生污染物排放到环境系统中此两点.能源从开发运输到加工、转换和利用的过程,均会对环境系统产生影响.掠夺式、粗放式能源开发更是对环境造成不可逆破坏,尤其是战争对环境系统的巨大破坏力.环境系统对能源系统的逆效用表现在各系统的内资源状态彼此影响,与此同时,能源结构的转型,能源产业的运作,环境受到破坏的程度均会对能源开采产生不同等级的影响,因此,能源结构合理度研究的最优视角为 3E 大视角.

3 基于 DPSIR 模型的能源结构合理度测度指标体系

DPSIR 模型即驱动力、压力、状态、影响和响应五维度模型,是基于 PSR 模型即(压力-状态-响应)模型的理论基础上由经济合作与发展组织(OECD)于 1993 年提出,研究对象所处状态引起变化对人类社会的影

响^[1,4]. 该模型将社会、经济、环境与资源因素集合在一起, 清晰再现了经济社会发展以及人类生产活动对环境的影响, 同时也体现了由于人类纷繁社会行为引起的环境状态对社会、经济的影响. 因此, DPSIR 模型涵盖了 3E 系统的内容, 本文即选择该模型进行能源结构合理度的测度研究.

3.1 建立能源结构合理度指标体系

本文基于 DPSIR 模型, 根据能源结构合理度的内在本质, 构建能源结构合理度评价体系. 范德成等^[4]认为模型中的驱动力因素是导致能源结构发生变化的内在影响因子之一, 包括我国经济相关部门活动、消费趋势以及经济发展趋势等, 本文将制约 3E 系统稳定运行的约束视为正负评判标准. 模型中“压力”一词指代因群众日常生活给生态环境及社会资源造成的不可逆影响, 导致能源结构不符合作为低碳经济及 3E 系统稳定运行约束的条件, 从而出现能源结构合理度失衡的现象. 这种现象多来自于环境系统所要求的直接压力, 诸如能源使用效率低、二氧化硫排放量和碳排放量等因素, 为防止出现由压力影响因子显示出的信息复现, 本文从能源使用和环境污染两方面来描述压力因素. 模型中状态因素原本指代因压力因素的影响所显示的系统情况, 多显示为资源供给情况、资源消耗情况、环境污染程度及经济发展水平四个方面, 本文中该词代表能源结构因压力影响而显示的系统情况. 模型中影响因素指标源于状态因素在 3E 系统下各系统改变情况, 主要有能源系统、经济系统及环境系统三种影响因素; 响应因素则是由技术创新及政府响应两个影响因素组成, 本文的能源结构合理度测度指标筛选逻辑如图 2 所示.

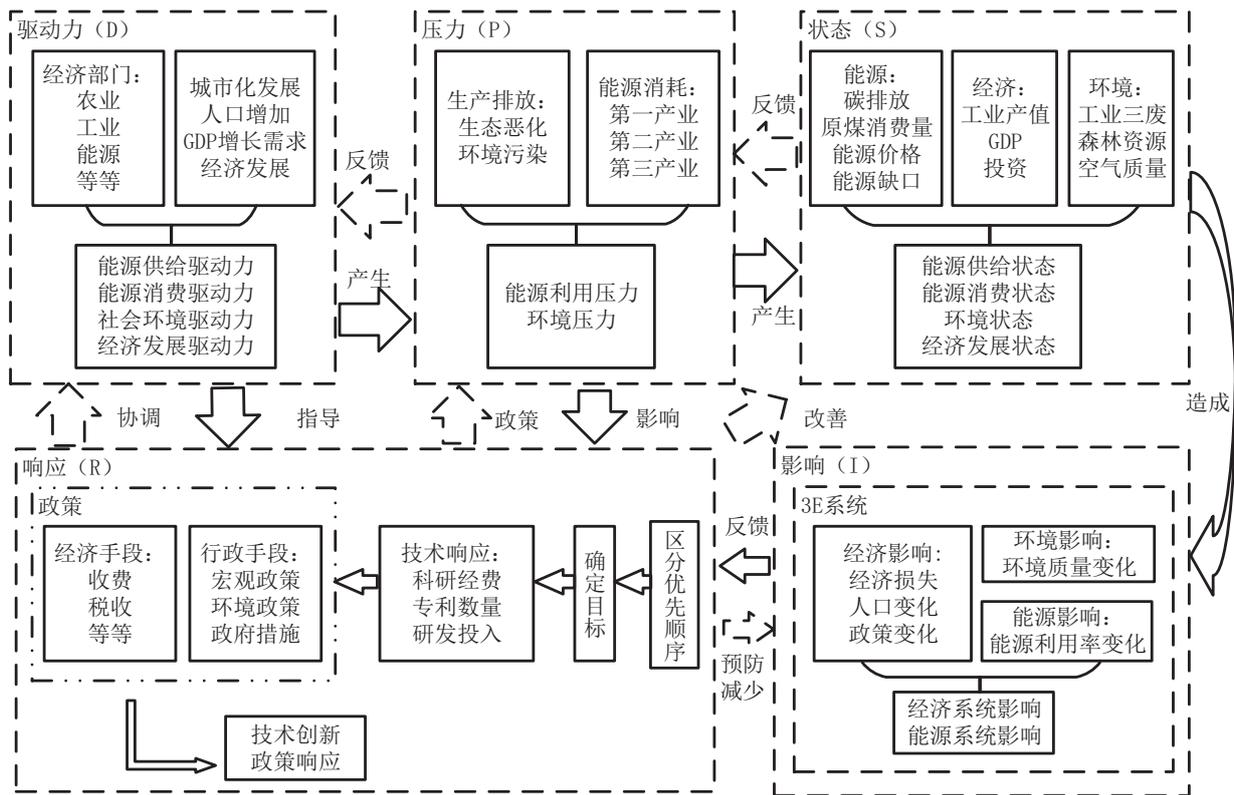


图 2 能源结构合理度测度指标筛选逻辑图

Fig. 2 Screening logic of energy structure measure index

本文以 DPSIR 模型为基础, 根据图 2 筛选出能源结构合理度测度初始指标见表 1.

3.2 熵权法(Delphi method)确定指标权重

熵权法是一种根据实际的样本数据值观测指标的信息量大小的客观赋权方法. 熵权法作为客观赋权法, 一定程度上能避免主观因素引起的误差, 熵权法是“差异”驱动, 反映信息熵的最优效用价值, 具有较高的再现性和可信度, 本文将其应用于指标筛选. 求指标权重的具体计算过程如下:

步骤1 建立原始数据的决策矩阵, X_{ij} 表示对象集相对于指标集的原始样本数据值, 即第 i 个指标在第 j 年的实测值, 其中 $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$. 则决策矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

步骤2 标准化决策矩阵: 因属性量纲间存在差异, 导致无法建立属性间的联系. 为了实现评价间的度量统一, 确定各属性的重要程度, 需要对评价值的预处理, 将每个属性变为无量纲.

效益型指标

$$Y_{ij}^+ = (X_{ij} - X_j^{\min}) / (X_j^{\max} - X_j^{\min}), \quad i \in I_1, \quad (2)$$

成本型指标

$$Y_{ij}^- = (X_j^{\max} - X_{ij}) / (X_j^{\max} - X_j^{\min}), \quad i \in I_2, \quad (3)$$

适度型指标

$$Y_{ij} = 1 - |X_j^{\max} - X_{ij}| / X_j^{\max}, \quad i \in I_3, \quad (4)$$

其中 I_1 、 I_2 和 I_3 分别对应表 1 中的指标方向为正、负、适度指标的集合, 最后, 本文采用标准 0-1 变换以实现矩阵 \mathbf{Y} 的同趋化处理结果;

步骤3 计算 Y_{ij} 在第 i 个指标项目下的比重值. 设 Y_{ij} 在第 i 个指标下的比重为

$$\rho_{ij} = Y_{ij} \left(\sum_{i=1}^m Y_{ij} \right)^{-1}; \quad (5)$$

步骤4 计算指标 i 的熵

$$E_i = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m \rho_{ij} \ln(\rho_{ij}), \quad (6)$$

其中当 $\rho_{ij} = 1$ 或 $\rho_{ij} = 0$ 时, $\rho_{ij} \ln(\rho_{ij}) = 0$, 熵大小与反映信息量的大小成负相关;

步骤5 $\theta_j \leftarrow 1 - E_j$, 指标差异性大小与熵意义相反, 因此本文计算熵权的数据作为指标间的差异系数;

步骤6 设 ω_i 表示指标 i 在指标体系中所占的权重

$$\omega_i = \theta_i \left(\sum_{i=1}^m \theta_i \right)^{-1}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

由于原始数据量纲差异化导致运算受阻, 首先应标准化处理数据以消除量纲差异性的影响, 本文采用归一化方法对数据进行无量纲处理, 具有鲁棒性较好、缩放无关性与总量恒定性均较优的特点, 初始指标体系赋权结果见表 1.

因此本文样本数据中 $m = 53, n = 30$, 即 53 个指标在 1985 年~2014 年, 共计 30 年的统计值. 根据熵权法确定的权重值对指标采取末位淘汰制, 即将指标按照权重大小排列, 舍去权重靠后的 40% 的指标, 同时结合 Delphi 专家打分法. 选取五位行业专家, 在熵权法筛选指标的基础上, 规定指标评价范围为 [0, 1], 由五位专家对各指标情况进行评分, 取评分误差为 30%. 评分差额大于 30% 的情况, 则由专家碰面头脑风暴重新商定指标问题, 讨论后确定各自分数, 直至评分差额小于 30%, 最后根据专家打分结果排序确定最终的指标体系并对各指标的权重作归一化处理^[1], 构成集合 W . 约简后的测度指标体系及其赋权结果见表 2.

表 1 能源结构合理度测度初始指标

Table 1 Initial index of measure of energy structure

目标	准则层	影响因素	指标名称	单位	指标	指标方向
能源结构合理度指标	驱动力 (D)	能源供给驱动力	原煤生产量	10 ⁴ tce	D ₁	—
			发电量	10 ⁴ tce	D ₂	—
			工业固定资产投资额	亿元	D ₃	(+)
	驱动力 (D)	能源消费驱动力	能源消费总量	10 ⁴ tce	D ₄	(-)
			人口数量(总人口)	万人	D ₅	—
			人口自然增长率	%	D ₆	—
	驱动力 (D)	社会环境驱动力	城市化率	%	D ₇	—
			城镇居民家庭恩格尔系数	%	D ₈	(-)
			人均 GDP	元	D ₉	(+)
	驱动力 (D)	经济发展驱动力	城镇居民家庭人均收入	万元	D ₁₀	(+)
			GDP 增长率	%	D ₁₁	(+)
			工业产值增长率	%	D ₁₂	(+)
	压力 (P)	能源利用压力	单位 GDP 耗能(能源强度)	tce/万元	P ₁	(-)
			人均电力消费量	tce	P ₂	(-)
			人均能源消费量	tce	P ₃	(-)
			电力消费量	10 ⁴ tce	P ₄	(-)
能源缺口			10 ⁴ tce	P ₅	(-)	
环境压力		单位 GDP 工业废气排放量	亿 m ³ /亿元	P ₆	(-)	
		工业废气排放总量	亿 m ³	P ₇	(-)	
		单位 GDP 的工业 SO ₂ 排放	t/万元	P ₈	(-)	
		工业 SO ₂ 排放量	10 t	P ₉	(-)	
		烟尘排放	10 t	P ₁₀	(-)	
状态 (S)	能源消耗状态	原煤消费量占比	%	S ₁	(-)	
		单位能源碳排放	10 t/10tce	S ₂	(-)	
	能源供给状态	能源对外依存度	%	S ₃	(-)	
		能源价格		S ₄	—	
		碳排放强度	10 t/万元	S ₅	(-)	
		人均碳排放量	10 t/万人	S ₆	(-)	
		工业废水排放量	10 t	S ₇	(-)	
	环境系统状态	工业固体废物生产量	10 t	S ₈	(-)	
		森林覆盖率(碳汇指标)	%	S ₉	(+)	
		人均森林面积(碳汇指标)	ha/万人	S ₁₀	(+)	
		森林面积	10 ⁴ ha	S ₁₁	(+)	
	经济发展水平	GDP 总量	亿元	S ₁₂	(+)	
		财政收入	亿元	S ₁₃	(+)	
		工业总产值	亿元	S ₁₄	(+)	
		固定资产投资额	亿元	S ₁₅	(+)	
		第三产业产值比重	亿元	S ₁₆	(+)	
影响 (I)	能源系统影响	能源消费弹性系数		I ₁	(-)	
		电力消费弹性系数		I ₂	(-)	
	经济系统影响	就业率	%	I ₃	(+)	
		进出口贸易总额	%	I ₄	(+)	
响应 (R)	技术创新	科技经费支出	亿元	R ₁	(+)	
		人均科技经费支出	元	R ₂	(+)	
		高等教育在校学生人数	万人	R ₃	(+)	
	响应 (R)	能源加工转换效率	%	R ₄	(+)	
		环境污染治理费用	亿元	R ₅	(+)	
		环境保护投资占 GDP 比例	%	R ₆	(+)	
		政策响应	可再生能源规划	%	R ₇	(+)
	政策响应	工业治污投资额	万元	R ₈	(+)	
		工业废水排放达标率	%	R ₉	(+)	
		工业固体废物综合利用率	%	R ₁₀	(+)	
		自然保护区面积占例	%	R ₁₁	(+)	

表 2 指标权重表
Table 2 Entropy weight of each index

目标层	准则层	权重	指标	权重	组合权重
能源 结构 合理 度 评价	D	0.200 8	D_3	0.033 4	0.064 7
			D_8	0.021 7	0.042 1
			D_9	0.025 2	0.048 9
			D_{10}	0.023 3	0.045 2
	P	0.039 9	P_7	0.039 9	0.039 9
	S	0.358 5	S_5	0.026 1	0.050 6
			S_6	0.031 7	0.061 4
			S_7	0.031 4	0.060 7
			S_8	0.026 5	0.051 3
			S_{10}	0.023 6	0.045 7
			S_{11}	0.023 2	0.045 0
S_{13}			0.022 6	0.043 7	
I	0.064 1	I_1	0.016 5	0.032 0	
		I_3	0.016 6	0.032 1	
R	0.336 6	R_5	0.020 2	0.039 0	
		R_6	0.021 7	0.042 0	
		R_7	0.020 2	0.039 1	
		R_8	0.025 7	0.049 8	
		R_9	0.029 9	0.057 9	
		R_{10}	0.025 2	0.048 8	
		R_{11}	0.031 0	0.060 0	

4 基于集对分析法建立能源结构合理度评价模型

集对分析法, 是赵克勤^[25]于 1989 年提出的一种关于复杂系统“同-异-反”定量分析的系统分析方法. 该方法可完整有效地刻画“确定-不确定系统”的对立统一关系, 符合自然辩证法和人类思维方式, 具有方法论的意义, 本文从定性、定量两个角度分析不同指标的“同-异-反”程度, 能够较好的衡量样本之间的联系度. 集对分析法分析步骤如下:

步骤 1 对一个不确定性问题, 定义样本属性实测值构成集合 A , 属性的分级标准值为集合 B , 则集合 A 与集合 B 构成集对 H , 集对 H 共包含 N 个特性, 其中 S 个为共有, P 个为对立, 其余 $F = N - S - P$ 为既不对立也不统一的, 被称为“比值”.

$$\bar{\mu} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj, \quad (8)$$

其中 S/N 表示同一度, 记为 a ; F/N 表示差异度, 记为 b ; P/N 表示对立度, 记为 c ; i 为差异度标记, j 为对立度标记. l 为用来划分等级的限值数, 当集合 B 的分级标准具有多等级即 $l > 3$ 时, 可根据系统不确定性将差异度 b_i 规范化处理.

本文采取均值法用 4 个分界限值对联系度的取值范围划分为 5 个等级即 $l = 4$.

$$\bar{\mu} = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \cdots + b_{i-2}i_{l-2} + cj = a + b_1i_1 + b_2i_2 + cj; \quad (9)$$

步骤 2 s_k 为评价指标的门限值, 指标评价等级划分见下表 3;

步骤 3 集合 A 的决策矩阵见式(1), 针对不同指标存在指标值最优的趋向不同, 分为正向型指标与负向型指标, 通过对 a, b, c 的比较即可初步描述合理度的差异, 不同等级的“同-异-反”隶属度不同, 评价指标值相对于能源结构合理度联系度如下, x 表示第 j 年的第 i 项评价指标的实测值.

正向型指标

$$\bar{\mu}^+ = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0j, & x \in [s_1, +\infty) \\ \frac{x - s_2}{s_1 - s_2} + \frac{s_1 - x}{s_1 - s_2}i_1 + 0i_2 + 0j, & x \in [s_2, s_1) \\ 0 + \frac{x - s_3}{s_2 - s_3}i_1 + \frac{s_2 - x}{s_2 - s_3}i_2 + 0j, & x \in [s_3, s_2) \\ 0 + 0i_1 + \frac{x - s_4}{s_3 - s_4}i_2 + \frac{s_3 - x}{s_3 - s_4}j, & x \in [s_4, s_3) \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 1j, & x \in (-\infty, s_4], \end{cases} \quad (10)$$

负向型指标

$$\bar{\mu}^- = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0j, & x \in (-\infty, s_1] \\ \frac{s_2 - x}{s_2 - s_1} + \frac{x - s_1}{s_2 - s_1}i_1 + 0i_2 + 0j, & x \in (s_1, s_2] \\ 0 + \frac{s_3 - x}{s_3 - s_2}i_1 + \frac{x - s_2}{s_3 - s_2}i_2 + 0j, & x \in (s_2, s_3] \\ 0 + 0i_1 + \frac{s_4 - x}{s_4 - s_3}i_2 + \frac{x - s_3}{s_4 - s_3}j, & x \in (s_3, s_4] \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 1j, & x \in [s_4, +\infty); \end{cases} \quad (11)$$

表 3 指标限值表

Table 3 Table of limits of different indexes

	S_4	S_3	S_2	S_1
D_3	0.015 6	0.715 6	1.415 6	2.115 7
D_8	-0.814 3	-0.282 8	0.248 8	0.780 4
D_9	-0.229 7	0.455 1	1.140 0	1.824 8
D_{10}	-0.329 1	0.358 3	1.045 7	1.733 2
P_7	-0.732 8	-0.125 8	0.481 2	1.088 2
S_5	-0.603 2	0.085 9	0.774 9	1.464 0
S_6	-0.896 3	-0.281 2	0.333 9	0.949 0
S_7	-1.610 4	-0.887 1	-0.163 8	0.559 5
S_8	-0.947 1	-0.364 1	0.218 8	0.801 8
S_{10}	-0.543 8	0.067 3	0.678 4	1.289 5
S_{11}	-0.654 8	-0.037 4	0.579 9	1.197 3
S_{13}	-0.085 8	0.586 6	1.259 0	1.931 4
I_1	0.648 3	1.716 6	2.784 9	3.853 1
I_3	-2.058 1	-0.846 2	0.365 7	1.577 5
R_5	-0.252 4	0.430 4	1.113 2	1.795 9
R_6	-0.174 5	0.625 4	1.425 3	2.225 2
R_7	-1.386 8	-0.652 6	0.081 6	0.815 7
R_8	-0.223 1	0.581 3	1.385 7	2.190 0
R_9	-0.931 2	-0.355 5	0.220 2	0.795 9
R_{10}	-0.969 3	-0.310 2	0.349 0	1.008 1
R_{11}	-0.987 3	-0.425 0	0.137 3	0.699 6

步骤 4 综合评价指标联系度的表达式为

$$\mu_j = \mathbf{W}\bar{\mu}_j\mathbf{v}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

其中 μ_j 表示第 j 年的综合评价指标联系度, 式中 \mathbf{W} 表示指标权重矩阵即表 2 所示组合权重项, $\bar{\mu}_j$ 表示第 j 年各指标的值相对于标准集的“同-异-反”联系度矩阵, \mathbf{v} 表示本文所取联系度的不确定系数矩阵。

依据熵权法定义, 计算不同年份样本数据与标准集合间不同指标的“同-异-反”联系度, 篇幅限制本文列举 2010 年各指标的联系度如下.

$$\bar{\mu}_{2010} = \begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.771\ 1 & 0.228\ 9 & 0.000\ 0 \\ 1.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.185\ 1 & 0.814\ 9 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.280\ 4 & 0.719\ 6 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 1.000\ 0 \\ 0.790\ 5 & 0.209\ 5 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 1.000\ 0 \\ 0.470\ 5 & 0.529\ 5 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.642\ 7 & 0.357\ 3 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 1.000\ 0 \\ 1.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.930\ 5 & 0.069\ 5 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 1.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.665\ 8 & 0.334\ 2 & 0.000\ 0 \\ 0.956\ 7 & 0.043\ 3 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 1.000\ 0 \\ 1.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.921\ 0 & 0.079\ 0 \\ 1.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 1.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 1.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

朱兵等^[26]认为不确定系数 i 的取值与序列之间的相关系数 r , 序列变差系数 C_v 以及标准系数 等因素有紧密关系, 但不确定系数的取值不影响趋势, 这里将其赋值为 0.5, 即

$$v = [1, i_1, i_2, j]^T = [1, 0.5, 0.5, -1]^T. \quad (14)$$

5 实证研究

以我国能源结构合理度为评价对象, 查阅“中国统计年鉴”、“中国环境统计年鉴”、“中国工业经济年鉴”等文献中 1985 年~2014 年共计 30 年的相关数据. 依据式(12) 计算能源结构合理度综合评价等级, 本文列举 2000 年~2014 年各指标“同-异-反”综合联系度计算结果见下表 5, 最后对照表 4 对集对分析结果进行分级.

根据表 5 所得结果, 作我国能源结构合理度发展趋势图见下图 3, 图中折线即为我国能源结构合理度发展趋势线, 其余四条直线表示能源结构合理度分级界限.

结合表 5 与图 3, 可以得出以下结论: 2000 年以来, 我国能源结构合理度趋于合理, 尤以 2008 年至 2014 年, 我国能源结构合理度均为合理, 但距离非常合理级别还有一定上升空间. 就这 30 年的评价样本来看, 20 世纪前数据波动较大, 20 世纪后除 2002 年~2006 年与 2009 年~2011 年呈现“U型”趋势, 其他年份均呈现稳定上升状态. 自邓小平同志 1992 年南巡讲话后的五年里, 我国改革开放与经济发展速度显著提升, 改变了原本垄断的能源供需市场, 不断发展的第三产业逐步兴起, 能源需求链的增长加速了能源结构的不合理走势. 2002 年~2006 年间, 我国正处于工业化中期, 这一阶段我国经济发展较快, 对能源需求也较大, 而当时社会的现实情况是经济发展与环境保护之间的矛盾冲突日益明显. 2005 年开始, 政府开始重视能源结构问题, 能源结构合理度呈现先降后升的趋势. 能源结构合理度很大程度上与能源价格、能源供需市场等政府的宏

观调控有关,在 2009 年之后,经济系统对能源系统的反馈效用表现的愈发明显. 2009 年~2014 年,我国能源市场还存在经济机制不稳定、不健全兼能源改革不彻底等问题,2009 年欧债危机的爆发直接威胁我国经济市场,国内经济疲软、石油价格一降再降,迅速涉及整个工业市场,能源结构合理度呈现下降趋势. 2012 年能源各领域“十二五”规划相继面世,行业发展的基本思路初步成型,各项目的发展目标浮出水面,为能源行业未来发展定下了基调. 2013 年,一系列能源价格改革进入密集出台联动煤炭,石油和天然气等传统行业的发展;风电,光伏等新能源也在不断地发展. 我国能源结构合理度总体呈稳定提升趋势,并且我国近两年能源结构优化的努力已经初见成效,说明近年来我国不断出台的能源结构优化相关政策是有效的,我国应继续加强能源结构优化力度.

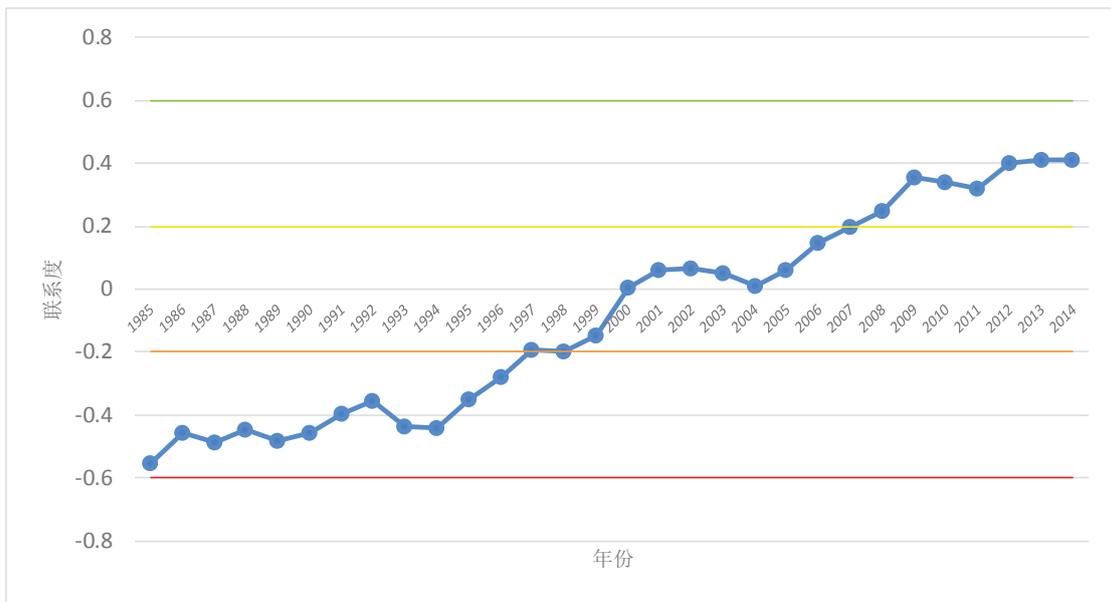


图 3 我国能源结构合理度趋势图

Fig. 3 Trend chart of the sanity degree of energy structure in China

表 5 1985 年~2014 年各指标“同-异-反”综合联系度

Table 5 Each index with identical discrepancy contrary connection degree from 1985 to 2014

	a	b_1	b_2	c	联系度	集对分析等级
1985	0.163 6	0.049 8	0.031 4	0.755 2	-0.551 0	不合理
1986	0.219 2	0.068 2	0.000 0	0.712 6	-0.459 2	不合理
1987	0.160 8	0.124 6	0.003 3	0.711 3	-0.486 5	不合理
1988	0.152 6	0.066 4	0.065 3	0.667 2	-0.448 7	不合理
1989	0.195 0	0.050 5	0.036 0	0.718 5	-0.480 3	不合理
1990	0.213 4	0.020 4	0.057 1	0.709 2	-0.457 1	不合理
1991	0.231 4	0.044 1	0.051 6	0.672 9	-0.393 7	不合理
1992	0.223 1	0.100 1	0.053 1	0.656 6	-0.356 9	不合理
1993	0.176 9	0.085 7	0.053 2	0.684 1	-0.437 8	不合理
1994	0.112 0	0.125 6	0.097 4	0.665 0	-0.441 5	不合理
1995	0.096 0	0.108 8	0.194 8	0.600 3	-0.352 4	不合理
1996	0.106 4	0.167 4	0.170 6	0.555 6	-0.280 2	不合理
1997	0.088 2	0.228 2	0.191 9	0.491 7	-0.193 4	合理
1998	0.088 4	0.221 1	0.196 8	0.493 7	-0.196 3	合理
1999	0.123 6	0.199 4	0.205 2	0.471 7	-0.145 8	合理
2000	0.115 3	0.274 8	0.242 0	0.368 0	0.005 7	比较合理
2001	0.219 0	0.236 0	0.179 1	0.365 9	0.060 6	比较合理
2002	0.231 3	0.173 2	0.228 2	0.367 3	0.064 8	比较合理
2003	0.217 5	0.139 3	0.269 5	0.373 7	0.048 1	比较合理
2004	0.257 9	0.164 6	0.164 3	0.413 2	0.009 2	比较合理
2005	0.271 9	0.164 4	0.180 8	0.382 9	0.061 6	比较合理

表 5(续)
Table 5(Continue)

	a	b_1	b_2	c	联系度	集对分析等级
2006	0.279 7	0.173 1	0.196 9	0.318 3	0.146 4	比较合理
2007	0.279 7	0.228 2	0.198 6	0.293 5	0.199 6	比较合理
2008	0.308 1	0.250 5	0.170 3	0.271 1	0.247 4	合理
2009	0.391 6	0.228 0	0.153 8	0.226 6	0.355 9	合理
2010	0.437 7	0.196 6	0.113 5	0.252 2	0.340 5	合理
2011	0.500 2	0.160 4	0.052 0	0.287 3	0.319 1	合理
2012	0.662 3	0.040 0	0.010 4	0.287 3	0.400 1	合理
2013	0.680 5	0.021 3	0.010 8	0.287 3	0.409 3	合理
2014	0.680 5	0.021 1	0.011 1	0.287 3	0.409 3	合理

由于不同指标权重大小可以反映该指标在指标体系中的重要程度,就评价体系分析我国能源结构优化方向,认为从驱动力角度考虑,政府应以提高 D_3 (固定资产投资额)与 D_9 (人均 GDP)指标为抓手,加大投资力度,继续发展经济,使我国经济保持平稳上升的增长趋势;压力层面应以 P_7 (工业废气排放总量)为着眼点,尽可能控制并降低工业废气排放量,减少对环境的压力,从而降低环境系统对我国经济、能源系统的负反馈作用;状态层面应主要解决 S_5 (能源价格)、 S_6 (人均碳排放量)、 S_7 (工业废水排放量)及 S_8 (森林覆盖率)等问题,将能源价格控制在稳定水平,提高森林覆盖率面积,降低工业废水排放,践行低碳经济;从影响因素得分角度应主要从提高 I_3 (就业率)和 I_4 (进出口贸易总额)着手,实现对响应因素的正向反馈;响应因素层面主要从提高 R_8 (工业治污投资额)、 R_9 (工业废水排放达标率)和 R_{11} (自然保护区面积占比)这三个指标为方向提高对环境的重视程度.综上所述,可以得出,在我国经济发展处于有意放缓速度的当下,我国应继续实施低碳经济以及环境保护政策以实现我国能源结构合理度趋势的正向移动,同时大力发展光伏、太阳能和风能等可再生清洁能源,实现能源结构的优化.

6 结束语

本文以能源结构为研究对象,在 3E 系统的基础上结合能源结构合理度内涵,诠释 3E 系统协调运行过程,分析能源结构合理度测度的影响因素,引入 DPSIR 模型,分别从 5 个维度分析 3E 系统协调运行过程中的各因影响因子,研究支撑能源结构合理度评价指标体系的理论依据和内涵.同时采用“熵权-DELPHI”法对初始评价指标进行筛选并赋值,定性与定量方法结合,科学的实现精简数据的同时降低数据冗余度,改善传统能源结构合理度样本权重乘积判断各指标趋势的评价方法,以集对分析联系度作为评价标准,引入集对分析评价模型能源结构合理度进行评价,实证分析我国 1985 年~2014 年的数据,引入集对分析理论对这 30 年能源结构合理度进行了评价与分析,为未来能源结构优化效果评价提供理论依据.

参考文献:

- [1] 王柳叶. 我国能源结构合理度测度研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
Wang L Y. Research on Energy Structure Reasonable Degree Measure of China. Harbin: Harbin Engineering University, 2014. (in Chinese)
- [2] Michael G, Jean-Charles H, Karsten N. The three domains structure of energy-climate transitions. *Technological Forecasting and Social Change*, 2015, 98: 290-302.
- [3] Wei L, Hong L. Improving energy consumption structure: A comprehensive assessment of fossil energy subsidies reform in China. *Energy Policy*, 2011, 39(7): 4134-4143.
- [4] 范德成, 王韶华, 张伟. 基于粗糙集理论的能源结构合理度分析统计与信息论坛, 2012, 27(2): 35-42.
Fan D C, Wang S H, Zhang W. Analysis on the sanity degree of energy structure based on rough set theory. *Statistics and Information Forum*, 2012, 27(2): 35-42. (in Chinese)
- [5] 段宏波, 朱磊, 范英. 能源-环境-经济气候变化综合评估模型研究综述. *系统工程学报*, 2014, 12(6): 852-868.
Duan H B, Zhu L, Fan Y. Review on the integrated assessment model of energy-environment-economy for the global climate change. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 12(6): 852-868. (in Chinese)

- [6] Bilgen S. Structure and environmental impact of global energy consumption, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38(5): 890–902
- [7] 石莹, 朱永彬, 王铮. 成本最优与减排约束下中国能源结构演化路径. *管理科学学报*, 2015, 18(10): 26–37.
Shi Y, Zhu Y B, Wang Z. The cost-effective path of energy mix evolution for China under the emissions budgets. *Journal of Management Sciences in China*, 2015, 18(10): 26–37. (in Chinese)
- [8] 王锋, 冯根福. 优化能源结构对实现中国碳强度目标的贡献潜力评估. *中国工业经济*, 2011(4): 127–137.
Wang F, Feng G F. Contribution of improving energy mix to carbon intensity target in China: Potential Assessment. *China Industrial Economics*, 2011(4): 127–137. (in Chinese)
- [9] 韩中合, 孙青琳. 基于能源-经济-环境的综合能效评价体系研究. *中国人口资源与环境*, 2015, 25(5): 38–41.
Han Z H, Sun Q L. Comprehensive energy efficiency based on energy, economy and environment subsystems. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(5): 38–41. (in Chinese)
- [10] 郭正权, 郑宇花, 张兴平. 基于CGE模型的我国能源-环境-经济系统分析. *系统工程学报*, 2014, 10(5): 619–627.
Guo Z Q, Zheng Y H, Zhang X P. Analysis of the energy-environment-economy system in China based on the dynamic CGE model. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 10(5): 619–627. (in Chinese)
- [11] Li K, Lin B Q. The nonlinear impacts of industrial structure on China's energy intensity. *Energy*, 2014, 69(5): 258–265.
- [12] John K, Arthur K. Interfuel substitution and energy consumption in the industrial sector. *Applied Energy*, 1980, 6(4): 275–288.
- [13] Li H Q, Wang L M, Shen L, et al. Study of the potential of low carbon energy development and its contribution to realize the reduction target of carbon intensity in China. *Energy Policy*, 2012, 41(1): 393–401
- [14] Pindyck R S. Interfuel substitution and the industrial demand for energy: An international comparison. *Review of Economics & Statistics*, 1979, 61(2): 169–179.
- [15] Andrikopoulos A A, Brox J A, Paraskevopoulos C C. Interfuel and interfactor substitution in Ontario manufacturing, 1962–1982. *Applied Economics*, 1989, 21(12): 1667–1681.
- [16] Harvey P, Marshall. Inter-fuel substitution, technical change and the demand for energy in the UK economy. *Applied Economics*, 1991, 23(6): 1077–1086.
- [17] Won G, Kiseok N, Jose A. Economic growth and interfactor/interfuel substitution in Korea. *Energy Economics*, 2004, 26(1): 31–50.
- [18] Jones C T. A Pooled dynamic analysis of interfuel substitution in industrial energy demand by the G-7 countries. *Applied Economics*, 1995, 28(28): 815–21.
- [19] Giovanni U. On the identification problem in testing the dynamic specification of factor-demand equations. *Economics Letters*, 1996, 52(3): 205–210.
- [20] Giovanni U. An application of dynamics specifications of factor demand equations to interfuel substitution in US industrial energy demand. *Economic Modelling*, 1999, 16(4): 503–513.
- [21] Nordhaus W, Houthakker H, Solow R. The allocation of energy resources. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1973, 4(3): 529–576.
- [22] Mar B, Bakken O. Applying classical control theory to energy-economics modeling—a tool to explain model behavior in response to varied policy decisions and changing inputs. *Management Science*, 1981, 27(1): 81–92.
- [23] Symons E, Proops J, Gay P. Carbon taxes, consumer demand and carbon dioxide emissions: A simulation analysis for the UK. *Fiscal Studies*, 1994, 15(2): 19–43.
- [24] 雷明, 虞晓雯, 赵欣娜, 等. 动态视角下我国3E全要素生产率的区域差异研究. *运筹与管理*, 2014, 23(2): 1–14.
Lei M, Yu X Y, Zhao X N, et al. China's regional disparity of 3E total factor productivity in a dynamic view. *Operations Research and Management Science*, 2014, 23(2): 1–14. (in Chinese)
- [25] 赵克勤. 集对分析及其初步应用. *大自然探索*, 1994, 13(1): 67–72.
Zhao K Q. Set pair analysis with its application. *Exploration Of Nature*, 1994, 13(1): 67–72. (in Chinese)
- [26] 朱兵, 王文圣, 王红芳, 等. 集对分析中差异不确定系数*i*的探讨. *四川大学学报(工程科学版)*, 2008, 40(1): 5–9.
Zhu B, Wang W S, Wang H F, et al. Probe on variation uncertainty coefficient *i* in set pair analysis. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2008, 40(1): 5–9. (in Chinese)

作者简介:

曹静(1979—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授, 研究方向: 管理系统工程, Email: cdmr2000@sina.com;

贾娜(1993—), 女, 新疆塔城人, 硕士生, 研究方向: 能源结构, Email: jiana0415@163.com;

李根(1984—), 男, 江苏睢宁人, 博士, 讲师, 研究方向: 能源管理, Email: ligen_78@163.com;

范德成(1964—), 男, 山东平原人, 博士生导师, 教授, 研究方向: 管理系统工程, Email: fandch65@hotmail.com.