

中国石油安全评价及情景预测

吕 军, 王德运, 魏 帅

摘 要: 基于熵值法 (EM)、粒子群算法 (PSO) 和支持向量机 (SVM) 的嵌套模型对中国石油安全进行评价及情景预测。首先, 利用聚类和灰色关联分析方法构建出石油安全评价指标体系, 并基于熵值法刻画出中国石油安全的历史演化规律。评价结果表明: (1) 我国石油安全指数呈现出先降后升的趋势, 且部分年份的石油安全指数波动较大; (2) 国际原油价格波动、对外依存度不断上升以及市场流动性减弱的状况加剧了我国石油安全的脆弱程度, 且地缘政治风险已成为我国石油安全的重要隐患, 严重威胁着我国石油的供给安全。然后, 在此基础上建立 PSO-SVM 石油安全预测模型, 并通过设定三种情景方案, 利用上述模型对我国 2020 年的石油安全状况进行情景分析。情景分析结果表明: (1) 我国未来石油安全状况依然较为严峻, 基准情景和低情景下石油安全指数仍旧处于很不安全区间; (2) 不同的经济发展模式和政策取向对石油安全状况有着显著的影响。本文提供的“情景—对策”路径可成为相关能源政策制定的依据。

关键词: 石油安全; 熵值法; 支持向量机; 粒子群算法; 情景分析

中图分类号: F426.22 文献标识码: A 文章编号: 1671-0169(2017)02-0086-11

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2017.02.010

一、引 言

随着城市化、工业化进程的不断推进, 我国未来对石油的需求总量也将不断增长。根据《BP Energy Outlook to 2035》的预测, 中国将在 2032 年取代美国成为世界上最大的液体能源 (原油、凝析油等) 消费国, 而石油进口依存度将从 2014 年的 59% 升至 2035 年的 76%, 高于美国在 2005 年的峰值^[1]。受多种因素的影响, 国际原油价格从 2014 年的 100 美元/桶急剧下跌, 在 2016 年一季度跌破 28 美元/桶, 国际原油价格的剧烈波动对石油相关产业的发展以及能源结构调整提出了新的挑战。此外, 全球地缘政治风险已经进入了高发期, 政治利益的博弈、中东问题、恐怖袭击、宗教主义、极端组织等问题愈演愈烈, 对我国石油的供给安全构成了严重威胁。

石油安全是能源安全的核心, 不仅关系到国家经济的稳定、健康与持续发展, 更关乎国家政治、军事等方面的安全, 已经成为我国长期面临的一大战略问题。近年来, 国内外学者对石油安全问题进行了大量的研究, 大致可分为如下四个方面: (1) 石油安全综合评价, 主要通过构建石油安全评价指标体系, 对石油安全进行综合评价^{[2][3][4][5]}。从已有研究文献来看, 学者们主要从资源禀

基金项目: 国家自然科学基金“供应链中生产、存储与运输的协同调度建模与优化研究”(71301153); 教育部留学回国人员科研启动基金“带有批处理约束的多级供应链协同调度建模与算法研究”(2015102003); 湖北省自然科学基金一般面上项目“湖北省地质灾害社会脆弱性时空演变过程及弹性恢复机制”(2016CFB503)

作者简介: 吕军, 管理学博士, 中国地质大学 (武汉) 经济管理学院教授 (湖北 武汉 430074); 王德运 (通讯作者), 自动化博士, 中国地质大学 (武汉) 经济管理学院副教授, 国土资源部国土资源战略研究重点实验室研究人员

赋因素、供给保障因素、需求消费因素等层面来构建石油安全评价指标体系, 但从影响我国石油安全的主导因素来看, 研究各有侧重; (2) 石油供给安全, 相关研究主要集中在石油供给安全量化评价、石油进口来源的多样性与石油安全之间的关系以及石油供给的独立性三个方面。Moerkerk 等基于当前的石油供应组合评估了欧盟、美国、中国、日本和印度到 2035 年的石油供给风险^[6]; Wabiri 等基于投资组合理论通过实证来量化南非 1994—2007 年间的石油进口风险, 分析了供给来源多样性与石油安全风险之间的联系^[7]; Brown 等用两种方法量化美国依赖进口石油产生的附加费, 并考虑国际石油市场状况、市场力量、可能的石油供给中断以及市场对石油供给中断的反应来评估 2010—2035 年美国在此方面的损失^[8]。不难看出, 石油供给安全已经被当作石油进口国能源安全策略的重要组成部分, 且石油供应来源多元化程度越低, 来自供给中断所造成的石油供给风险和脆弱性就越高; (3) 油价波动风险, 相关研究主要集中在油价波动对经济、不同部门以及不同产业所造成的冲击。Chen 等采用全球 84 个国家 1984—2008 年间的面板数据, 研究了石油价格波动对全球贸易的影响^[9]; Zhang 等通过 ARJI 和 GRACH 模型对石油价格波动对全球金属市场和铜、铝两种典型金属市场的影响进行了研究, 结果发现石油价格波动对中国金属市场具有显著的影响^[10]。上述研究表明了国际原油价格波动对经济领域的重要影响; (4) 地缘政治风险, 李岩等、郎一环等、Kollias 等以及 Omar 等展开了相关研究, 认为地缘政治因素直接威胁着全球石油市场的稳定性以及一国石油供给安全, 是当前全球石油市场需要解决的紧迫问题^{[11][12][13][14]}。

本文的主要创新点包括: 第一, 基于石油安全评价初始指标集, 通过聚类分析和灰色关联分析相结合的定量方法构建出石油安全评价指标体系, 析出影响中国石油安全的关键因素; 第二, 在使用 PSO-SVM 模型模拟石油安全非线性演化规律的基础上, 通过设定三种不同情景方案 (基准情景、低情景和高情景) 研究了我国未来石油安全状况并给出了相应的政策建议。

二、EM-PSO-SVM 模型

本文通过构建 EM-PSO-SVM 嵌套模型对中国石油安全状况进行评价及情景预测, 以下为 EM-PSO-SVM 嵌套模型中各关键模块的简要概述。

(一) 熵值法

熵值法 (Entropy Method, EM) 是利用信息论中的信息熵来确定多指标评价体系中各指标权重。EM 方法根据各评价指标的数据来确定信息熵, 信息熵越小, 说明信息的无序度越低, 其信息的效用值越大, 指标的权重就越大; 反之, 指标的权重就越小^[15]。熵值法通过权重比较各个指标的重要程度, 具有较强的客观性。

(二) 支持向量机

支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 由 Vapnik 等于 1995 年提出^[16], 其基本思想是基于结构风险最小化原则, 通过非线性映射函数把输入变量映射到高维特征空间进行非线性回归。其基本步骤如下:

步骤 1: 设样本集为 $\{(x_i, y_i)\}$, $i=1, 2, \dots, n$, $x_i \in R$, $y_i \in R$, n 为样本数量。SVM 通过式 (1) 进行函数回归估计:

$$f(x) = \omega \times \phi(x) + b \quad (1)$$

其中, $f(x)$ 为回归输出, ω 为 m 维向量, $\phi(x)$ 为非线性映射函数, $b \in R$ 为阈值;

步骤 2: 选取核函数 $K(x_i, x)$ 和惩罚系数 c , 根据机构风险最小化原则, 可以转化为如下求解最优化问题。其中, 惩罚系数 c 表示对离群点带来的损失的重视程度, c 值越大, 对目标函数的损失也越大; 反之, 则越小。

$$\text{Min}\left\{\frac{1}{2}\sum_{i=1}^j\sum_{j=1}^i[y_i y_j \alpha_i \alpha_j K(x_i, x_j)] - \sum_{j=1}^l \alpha_j\right\} \quad (2)$$

$$\text{S. t.} \quad \sum_{i=1}^l y_i \alpha_i = 0$$

其中, $0 \leq \alpha_i \leq c$, $i=1, \dots, l$, l 为输入向量维数。通过引入拉格朗日对偶定理, 可求得上述最优化问题的最优解为: $a^* = (\alpha_1^*, \dots, \alpha_l^*)^T$;

步骤 3: 选取 a^* 的一个正分量 α_i^* , $0 < \alpha_i^* < c$, 并根据式 (3) 计算阈值;

$$b = y_i - \sum_{i=1}^j y_i \alpha_i^* K(x_i - x_j) \quad (3)$$

步骤 4: 构造决策函数, 可得到如式 (4) 所示的支持向量机回归函数。

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i, x) + b \quad (4)$$

其中, $K(x_i, x)$ 为满足 Mercer 条件的核函数。为保证 SVM 模型的全局收敛性, 本文采用收敛性较强的径向基 (RBF) 函数作为核函数, 即:

$$K(x_i, x) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

(三) 粒子群算法

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是由 Kennedy 等于 1995 年提出的一种基于群体智能的优化算法^{[17](P1942-1948)}。在种群中, 粒子移动的方向和距离取决于粒子的速度, 而速度依据自身及其他粒子的移动经验进行动态调整, 使得个体在解空间中获得最优解。

设在 n 个粒子组成的 d 维搜索空间中, 粒子 i 的速度表示为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})^T$, 位置表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T$, $i=1, 2, \dots, n$, $pbest$ 为第 i 个粒子经历过的最优位置, $gbest$ 为群体经历过的最优位置。在每一次迭代中, 粒子通过个体极值 $pbest$ 和全局极值 $gbest$ 来更新自己的速度和位置, 更新公式为:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gbest_{id}^k - x_{id}^k) \quad (6)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (7)$$

其中, v_{id}^k 为粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 维的速度, k 为当前迭代次; ω 为惯性权重, c_1 和 c_2 为加速因子, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

(四) EM-PSO-SVM 模型设计思路

本文通过构建 EM-PSO-SVM 嵌套模型来对中国石油安全状况进行评价及情景预测, 其中, EM 方法用来实现对石油安全的评价, SVM 模型用来实现对未来石油安全的情景预测。为进一步提高 SVM 模型的预测性能, 本文使用 PSO 算法对其惩罚系数 c 和核参数 g 进行优化, PSO-SVM 预测模型的具体步骤如下:

步骤 1: 初始化 PSO 算法参数, 包括种群规模 n 、粒子最大速度 v_{Max} 、最大迭代次数 t 、惯性权重 ω 、加速因子 c_1 和 c_2 、随机数 r_1 和 r_2 以及惩罚系数 c 和核参数 g ;

步骤 2: 确定适应度函数, 并计算每个粒子的适应度值。本文将适应度函数定义如下:

$$g(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 \quad (8)$$

其中, y_i 为样本数据的实际值, y_i^* 为样本数据的预测值;

步骤 3: 找出具有最大适应度值的粒子所对应的个体位置, 并将其作为初始种群最优位置 $gbest$;

步骤 4: 通过式 (6) 和式 (7) 更新粒子的速度、位置和适应度值;

步骤 5: 计算每个粒子在更新后的位置上的适应度值, 并将其与 p_{best} 和 g_{best} 进行比较, 如果优于 p_{best} 和 g_{best} 对应的适应度值, 则用该粒子位置替代 p_{best} 和 g_{best} ;

步骤 6: 判断是否满足终止条件。若满足, 则寻优结束, 输出 SVM 模型的惩罚系数 c 和核参数 g ; 否则转至步骤 4。

三、实证研究

本文首先运用聚类分析和灰色关联分析方法^{[18][19]}构建石油安全评价指标体系; 然后, 通过熵值法测算出各评价指标的权重, 计算出历年石油安全指数; 最后, 基于 PSO-SVM 模型对中国 2020 年的石油安全状况进行了情景预测。

(一) 石油安全评价指标体系构建

本文根据科学性、客观性、系统性、动态性等原则, 并借鉴国内外已有文献中的石油安全评价指标体系和能源安全评价指标体系^{[2][3][4][5][20][21][22][23]}, 从资源禀赋、需求消费状况、供给保障能力、地缘政治风险四个层面筛选出 12 个影响石油安全的指标, 构建出石油安全评价初始指标集 (如表 1 所示)。在该初始指标集中, 第一层为目标层, 即石油安全; 第二层为准则层, 包括资源禀赋、国内需求消费状况、供给保障能力以及地缘政治风险四个方面; 第三层为指标层, 本文使用储产比和国内储量占世界储量的比重两个指标来表征资源禀赋, 使用石油在能源消耗中所占比重等四个指标来表征国内需求消费状况; 使用国内产量占世界产量的比重等三个指标来表征供给保障能力; 关于地缘政治风险的表征方式, Gupta 认为, 国际上测度地缘政治风险的指标主要有进口依存度、进口多样性、石油供应国政治风险、市场流动性^[24], 由于石油供应国政治风险难以量化, 因此, 本文选取石油对外依存度、石油进口集中度以及石油市场流动性三个指标来衡量地缘政治风险。

本文研究的时间区间为 2000—2015 年, 数据来源于《中国统计年鉴 2016》、《中国能源统计年鉴 2015》、《中国能源发展报告 2016》以及《BP 世界能源统计年鉴 2016》。

表 1 石油安全评价初始指标集

目标层	准则层	指标层	作用方向	编号
石油安全	资源禀赋	储产比	+	x_1
		国内储量占世界储量的比重 (%)	+	x_2
	需求消费状况	石油在能源消耗中所占比重 (%)	-	x_3
		石油消耗强度 (吨/万元)	-	x_4
		石油消费弹性系数	-	x_5
		人均石油消费量 (吨/人)	-	x_6
	供给保障能力	国内产量占世界产量的比重 (%)	+	x_7
		国际原油价格 (美元)	-	x_8
	地缘政治风险	石油进口能力 (%)	+	x_9
		石油对外依存度 (%)	-	x_{10}
		石油进口集中度 (%)	-	x_{11}
		国际市场流动性 (%)	+	x_{12}

下面对表 1 中各指标的意义做简要介绍。储产比指剩余石油可采储量与当年产量之比, 是石油开采潜力的衡量指标; 国内储量占世界储量的比重反映了一国石油富集程度; 石油在能源消耗中所占比重反映了石油资源在整个能源消费中的重要程度; 石油消耗强度指单位 GDP 所消耗的石油总量; 石油消费弹性系数指某个时期石油消费增长率与国民经济增长率的比值, 反映了国民经济增长与石油消费之间的关系; 人均石油消费量反映人民物质生活对石油的需求程度; 国内产量占世界产量的比重指国内原油产量在世界总产量中所占的份额, 反映了国内石油的生产能力; 国际原油价格

反映了原油进口的成本, 本文采用 WTI、Brent、Dubai 三大国际原油市场原油价格的平均值来表示历年国际原油价格; 石油进口能力指石油进口金额在 GDP 中所占比重, 反映了一国在国际市场上获取石油的能力大小; 石油对外依存度反映出本国石油消费量对国外石油的依赖程度; 石油进口集中度反映出石油进口来源的集中程度, 本文选取石油进口来源国中前 5 位国家的石油进口量和占一国总进口量的比例 (CR_5) 表征石油进口集中度; 石油市场流动性能有效减少市场供给集中带来的地缘政治风险, 本文采用一国石油进口量与世界出口量的比值来衡量市场流动性。

1. 聚类分析。由于各指标之间存在的相关性及多重共线性会在一定程度上造成信息的重叠与冗余, 从而对评价结果造成一定的影响。因此, 本文先对 12 个初始指标进行聚类分析, 再对类间指标进行灰色关联分析, 使得筛选出的指标在其所在类别中具有最显著的影响, 从而消除类间的冗余指标。本文采用基于欧式距离的系统聚类方法得到如表 2 所示的聚类

表 2 初始指标集聚类结果

类别	指标	类别	指标
1	x_1	5	x_{10}
2	x_3	6	x_{11}
2	x_7	7	x_{12}
4	x_8	8	x_2, x_4, x_5, x_6, x_9

结果, 初始指标共分为 8 类, 其中, $x_1, x_3, x_7, x_8, x_{10}, x_{11}$ 和 x_{12} 七个指标各自为一类, x_2, x_4, x_5, x_6 和 x_9 五个指标为一类。

2. 灰色关联分析。针对上述聚类结果, 本文对 x_2, x_4, x_5, x_6 和 x_9 这一类指标进行灰色关联分析, 并从中筛选出最重要的一个指标。具体过程如下: 依次以 x_2, x_4, x_5, x_6 和 x_9 为参考序列, 其他四个指标为比较序列, 计算各指标间的灰色关联度, 得到灰色关联度判断矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.5589 & 0.6792 & 0.5958 & 0.6478 \\ 0.5517 & 1 & 0.8888 & 0.8039 & 0.4343 \\ 0.6260 & 0.7179 & 1 & 0.7844 & 0.5293 \\ 0.5274 & 0.7485 & 0.8959 & 1 & 0.4309 \\ 0.6834 & 0.5149 & 0.6150 & 0.5331 & 1 \end{bmatrix}$$

计算以上矩阵中每一行的均值, 均值越大, 说明该指标越重要。对这五个均值进行排序, 选择均值最大的指标作为这一类指标中的代表性指标, 即石油消耗强度 x_4 。基于聚类分析和灰色关联分析的结果可得最终的石油安全评价指标体系, 如表 3 所示。该指标体系共包含储产比、石油在能

表 3 石油安全评价指标体系

时间	储产比	石油在能源消耗中所占比重(%)	石油消耗强度(吨/万元)	产量占世界产量的比重(%)	国际原油价格(美元)	石油对外依存度(%)	石油进口集中度(%)	石油市场流动性(%)
2000	15.31	22.00	0.23	4.50	28.36	26.65	59.21	4.53
2001	14.95	21.20	0.21	4.58	24.39	23.03	60.63	4.15
2002	14.52	21.00	0.21	4.67	24.97	24.91	60.80	4.69
2003	14.34	20.01	0.20	4.54	28.89	30.56	59.20	5.74
2004	13.74	19.90	0.20	4.45	37.78	36.98	60.08	7.14
2005	13.47	17.80	0.18	4.60	53.49	36.49	61.00	6.57
2006	14.81	17.50	0.16	4.66	64.22	39.81	64.30	7.25
2007	15.20	17.00	0.14	4.71	70.93	43.45	61.30	7.37
2008	15.18	16.70	0.12	4.77	97.22	46.82	63.60	8.06
2009	15.56	16.40	0.11	4.87	61.66	51.73	61.20	9.54
2010	15.64	17.40	0.11	5.10	79.00	53.21	57.10	10.83
2011	15.97	16.80	0.10	5.06	104.16	55.37	58.00	11.41
2012	16.06	17.00	0.09	5.04	104.96	56.20	59.00	12.00
2013	16.18	17.10	0.09	5.04	104.04	56.06	59.30	12.04
2014	16.24	17.40	0.08	5.01	96.43	59.40	58.59	12.72
2015	16.29	18.10	0.08	4.92	50.77	60.60	58.40	13.39

源消耗中所占比重、石油消耗强度、产量占世界产量的比重、国际原油价格、石油对外依存度、石油进口集中度以及石油市场流动性 8 个评价指标, 其中, 资源禀赋层面、需求消费状况层面、供给保障能力层面以及地缘政治风险层面分别包含 1 个、2 个、2 个和 3 个指标。

(二) 石油安全评价

基于表 3 所示的石油安全评价指标体系, 本文采用熵值法对各指标赋予权重, 赋值结果如表 4 所示, 其中, W_1-W_8 分别为各评价指标的权重。从表 4 中可以看出石油对外依存度的权重为 0.183, 说明其对石油安全的影响最大, 石油进口集中度的权重为 0.074, 说明其对石油安全的影响最小。通过将准则层内各层中的指标权重进行加总可知, 地缘政治风险的权重最大, 为 0.44, 已经成为中国石油安全面临的重要隐患。

表 4 各评价指标权重

	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8
权重	0.084	0.088	0.121	0.152	0.183	0.169	0.074	0.129

本文采用多目标线性加权函数法来计算历年石油安全指数, 计算公式如下:

$$C_i = \sum_{j=1}^8 x_{ij}^* \times W_j \quad (9)$$

其中, C_i 为第 i 年度石油安全指数, $i=1, 2, \dots, 16$; W_j 为第 j 项指标所占权重, $j=1, 2, \dots, 8$ 。根据公式 (9) 得到 2000—2015 年间中国石油安全指数 (如图 1 所示)。

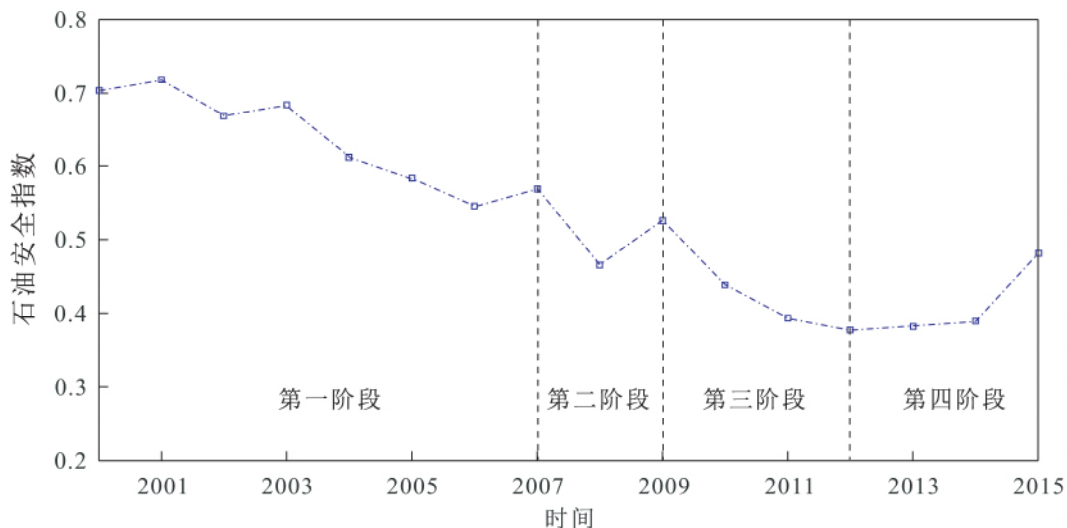


图 1 2000—2015 年间中国石油安全指数

借鉴吴初国等关于能源安全等级的划分标准^{[25][26]}, 本文将石油安全划分为五个等级 (如表 5 所示)。从评价结果来看, 我国石油安全状况总体上处于比较低的层次, 大部分年份的石油安全指数低于 0.6, 且在评价期内, 石油安全指数呈现出先降后升的趋势。石油安全指数下降的主要原因在于国际原油价格、石油对外依存度以及市场流动性的变

表 5 石油安全等级划分

安全等级	安全指数区间	安全程度
I	[1.0, 0.8)	基本安全
II	[0.8, 0.6)	弱安全
III	[0.6, 0.4)	不安全
IV	[0.4, 0.2)	很不安全
V	[0.2, 0.0)	严重不安全

动对石油安全指数造成了较明显的下拉作用,虽然石油消耗强度在逐年下降,但其自身带来的缓和作用仍然无法抵消石油安全指数下降的态势,从而造成石油安全指数在评价期间呈现出先下降的趋势;而国际原油价格的下跌则扭转了石油安全指数恶化的态势,使得其在后期开始上升。由图1可知,我国2000—2015年间石油安全指数的历史演化过程大致可以划分为四个阶段。第一阶段:2000—2007年,石油安全指数整体呈现出逐渐下降的趋势,2000—2004年石油安全指数尚处于等级II(弱安全区间),但从2005年开始,石油安全指数开始进入等级III(不安全区间),且继续下跌;第二阶段:2007—2009年,石油安全指数出现大幅波动,原因在于2008年全球金融危机造成了国际原油价格的剧烈波动,2008和2009年国际油价波动率分别为37.06%和-36.58%;第三阶段:2009—2012年,石油安全指数与第一阶段有着较为相似的变化路径,呈现出持续下降的趋势,在2011年跌入等级IV(很不安全区间),并在2012年下探至历史最低值0.377;第四阶段:2012—2015年,石油安全指数在2012年达到最低值后,开始呈现上升趋势,且在2015年出现较大幅度上升,这主要是由于国际原油价格的断崖式下跌造成的。

(三) PSO-SVM模型的训练和测试

本文以2000—2012年的数据作为训练样本,2013—2015年的数据作为测试样本,然后选取上述8个指标作为PSO-SVM模型的输入,石油安全指数作为模型的输出,对模型进行训练和测试。其中,PSO-SVM模型的参数设置如下:种群数量为20;局部搜索能力为1.5,全局搜索能力为1.7;最大进化数量为200;惩罚参数 c 和核参数 g 的变化范围均设置为 $[2^{-10}, 2^{10}]$ 。运用设置好参数的PSO算法对SVM的参数进行寻优,确定了SVM模型的最优参数如下:惩罚系数 $c=100$,核参数 $g=0.01$ 。PSO-SVM模型的训练和测试结果如图2所示。

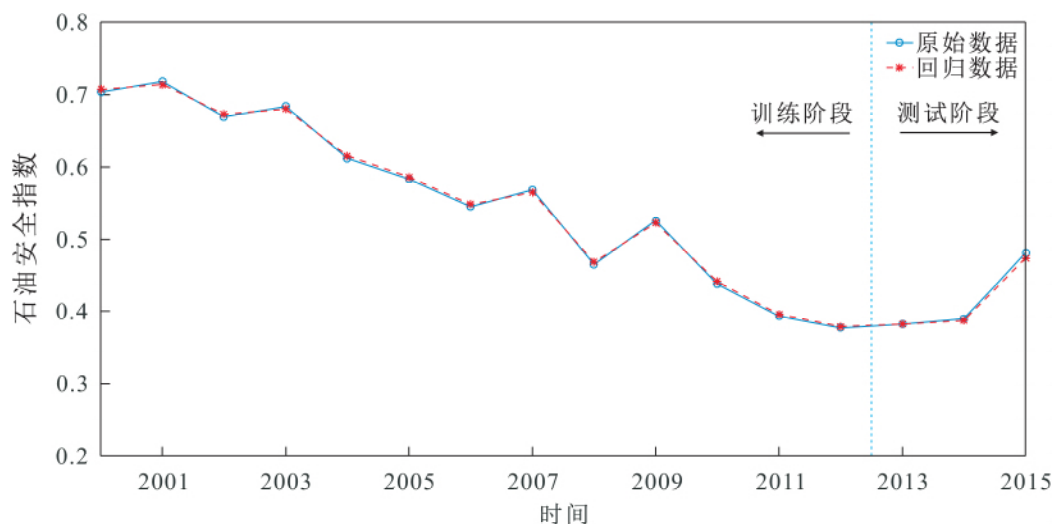


图2 PSO-SVM模型训练和测试结果

其中,PSO-SVM模型训练阶段和测试阶段的平均绝对百分误差(MAPE)分别为0.60%和0.72%,且单个年份最大误差为1.5%,表明PSO-SVM模型有较高的预测精度。

(四) 中国石油安全情景分析

1. 情景方案设定。在上述指标体系中,每一个指标的变动都会对未来石油安全状况产生不同程度的影响。有些指标随时间的变化程度较小,且变化趋势不明显,例如,储产比、石油在能源消费中所占比重、产量占世界产量的比重以及石油进口集中度;而有些指标随时间的变化程度较大,且变化趋势明显,例如,石油消耗强度、国际原油价格、石油对外依存度和市场流动性。因此,为

了更好说明未来石油安全指数在不同指标作用下的变化情况, 本文通过设定三种不同的情景方案对中国在 2020 年的石油安全状况进行预测。由于 2016—2020 年的时间跨度为五年, 故我们根据各指标在过去五年中的变化趋势特征分别设定其在 2020 年不同情景下的取值。在这三种情景方案中, 首先将变化程度较小, 且变化趋势不明显的四个指标分别取其在过去五年的平均值, 然后对石油消耗强度、国际原油价格、对外依存度以及市场流动性四个指标分别作讨论, 具体的情景方案设定及相应指标值分别如表 6 和表 7 所示。

表 6 情景方案设定

情景方案	特征描述	情景内容与设定依据
情景 I: 基准情景	国民经济发展水平一般; 能源政策力度一般; 各项评价指标以现有发展趋势运行, 具体表现为: 储产比、石油在能源消费中所占比重、产量占世界产量的比重以及进口集中度四个指标基本维持不变, 石油消耗强度持续降低, 国际原油价格温和上升、对外依存度继续升高, 市场流动性逐渐放缓。在基准情景下, 石油安全状况按照现有潜力运行, 反映出自然引导型的石油安全发展状态。	在基准情景下, 各指标取值如下: (1) 石油消耗强度按照过去 5 年年均增长率 (-5.89%) 计算; (2) 参照石油输出国组织 (OPEC)、国际能源署 (IEA)、英国石油公司 (BP)、中国社科院等能源机构对未来国际油价的预测 ^{[27][28][29][30]} , 将国际原油价格取为 70.00 美元/桶; (3) 中国社会科学院预测在基准情景下石油对外依存度在 2020 年将达到 63.00%, 年均增长率为 0.75% ^[31] , 据此, 将 2020 年的石油对外依存度取为 63%; (4) 市场流动性按照过去 5 年年均增长率 (4.40%) 计算。
情景 II: 低情景	国民经济发展形势较为繁荣, 政府“十三五”规划中确立的社会经济发展目标能够基本实现; 能源政策力度较为放松, 未采取进一步的能源政策和措施或相关政策和措施较之前减少。相较于基准情景, 低情景下相关评价指标运行状况呈现出恶化的态势, 表现出较大的压力。	参照基准情景, 低情景下各指标取值如下: (1) 石油消费强度按照年均增长率 (-4.89%) 计算; (2) 国际原油价格取为 90.00 美元/桶; (3) 石油对外依存度按年均增长率 (1.00%) 计算; (4) 市场流动性按年均增长率 (5.00%) 计算。
情景 III: 高情景	国民经济发展形势适当紧缩; 政府能源政策干预力度加大, 相关能源政策和措施产生较大作用。相对于基准情景, 高情景下各项评价指标运行状况有改良的趋势, 表明石油安全正处于一个非常乐观、理想的状态。该情景的实现要求在提高能源效率、调整经济和能源结构以及相关能源政策和措施方面有较大突破。	参照基准情景, 高情景下各指标取值如下: (1) 石油消费强度按照年均增长率 (-6.89%) 计算; (2) 国际原油价格取为 50.00 美元/桶; (3) 石油对外依存度按年均增长率 (0.50%) 计算; (4) 市场流动性按年均增长率 (3.80%) 计算。

表 7 不同情景方案下各评价指标 2020 年的预测值

关键事件	基准情景	低情景	高情景
储产比	16.150	16.150	16.150
石油在能源消耗中所占比重 (%)	17.280	17.280	17.280
石油消耗强度 (吨/万元)	0.058	0.061	0.055
石油产量占世界产量的比重 (%)	5.010	5.010	5.010
国际原油价格 (美元)	70.000	90.000	50.000
石油对外依存度 (%)	63.000	63.765	62.294
石油进口集中度 (%)	57.530	57.530	57.530
市场流动性 (%)	16.619	17.957	15.915

2. 石油安全情景预测。基于 PSO-SVM 模型, 得到石油安全指数在不同情景方案下的预测结果 (如表 8 所示)。

表 8 2020 年石油安全指数预测结果

情景	情景 I: 基准情景	情景 II: 低情景	情景 III: 高情景
石油安全指数	0.380	0.315	0.435

由表 8 可以看出,我国未来石油安全状况依旧较为严峻,基准情景下,2020 年的石油安全指数为 0.380,较“十二五”末有所下降,再次跌入等级 IV(很不安全区间)。虽然高情景下影响石油安全指标的运行状况得以改善,对应的石油安全指数相比基准情景有所上升,达到 0.435,但仍处于等级 III(不安全区间);而低情景对应的石油安全指数相比基准情景进一步恶化,为 0.315,因此,只有严格执行情景方案 III 才能改善中国石油安全状况。从三种情景方案的预测结果可以看出,情景方案 II 的石油安全指数低于情景方案 I 的石油安全指数,情景方案 I 的石油安全指数又低于情景方案 III,表明不同的经济发展模式和政策取向对石油安全状况有着显著影响。

不难看出,未来我国石油安全依旧面临着诸多挑战,国际原油价格反弹、石油对外依存度持续升高以及市场流动性减弱的状况继续在未来加剧中国石油安全的脆弱程度。但值得注意的是,石油消耗强度在不断下降,在一定程度上缓和着未来石油安全状况的恶化。

四、结论及建议

本文通过聚类分析和灰色关联分析相结合的定量方法构建出石油安全评价指标体系,在使用 PSO-SVM 模型模拟石油安全非线性演化规律的基础上,通过设定三种不同情景方案研究了我国未来石油安全状况,主要得出以下结论:

1. 从评价结果来看,在评价期内,我国石油安全状况总体上处于比较低的层次,大部分年份的石油安全指数低于 0.6。石油安全指数呈现先降后升的趋势,且个别年份的石油安全指数出现较大波动。此外,国际原油价格波动、对外依存度不断上升以及市场流动性减弱的状况加剧着我国石油安全的脆弱程度。地缘政治风险已成为我国石油安全的重要隐患,严重制约着我国石油的供给安全,如何解决能源结构调整过程中能源稳定供应问题应是下一步关注的重点。本文对石油安全的评价结果与李光亮等、何贤杰等的研究在相同时间区间内较为一致^{[32][33]},进一步论证了本文研究结论的合理性。

2. 基于 PSO-SVM 预测模型,通过设定基准情景、低情景和高情景预测了中国 2020 年的石油安全状况。情景预测结果表明:在基准情景和低情景下,由于国际原油价格反弹、对外依存度升高以及市场流动性减弱三个因素的下拉作用促使我国在 2020 年的石油安全指数落入很不安全区间,在高情景下,虽然石油安全指标的运行状况得以改善,使得对应的石油安全指数相比基准情景和低情景下有所上升,但是仍处于不安全区间;第二,对比三种情景方案可以看出,不同的经济发展模式和政策取向对石油安全状况有着显著的影响,基于“情景—对策”的能源政策制定方法可作为能源管理领域的重要工具。

基于以上结论,本文建议:(1)降低石油进口集中度。积极开展与俄罗斯等其他石油输出国石油企业的交往和合作,建立多元石油供应格局;(2)降低石油对外依存度。实行境外石油开发战略,加大国外石油勘探开发力度;调整能源消费结构,推广太阳能、风能、地热能、潮汐能、生物质能、可燃冰等清洁能源,减少对现有石油资源的消耗;(3)积极规避国际油价波动风险。增强国际石油定价话语权;建立石油期货市场,利用金融工具规避国际油价波动给我国石油安全带来的风险;(4)积极克服包括政治、军事、地缘、运输中断等非常态因素对我国石油供给安全带来的威胁及隐患。

参考文献

- [1] British Petroleum (BP). *BP Energy Outlook to 2035*[EB/OL]. <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2016/bp-energy-outlook-2016.pdf>, 2016-01-01.
- [2] 李铭, 王高尚, 于汶加, 等. 中国石油资源安全评价[J]. *地球学报*, 2010, (5).
- [3] 李凤升, 赵俊平, 董金涛. 基于主成分分析的中国石油安全度评价[J]. *中国石油大学学报(社会科学版)*, 2013, (3).
- [4] 薄蓉, 唐旭, 冯连勇, 等. 中国的石油安全令人堪忧[J]. *中国能源*, 2012, (10).
- [5] 范秋芳, 赵亚丽. 基于层次分析法和模糊综合评价模型的中国石油安全预警研究[J]. *中外能源*, 2014, (19).
- [6] Moerkerk, M. V., W. Crijns-Graus. A comparison of oil supply risks in EU, US, Japan, China and India under different climate scenarios[J]. *Energy Policy*, 2016, 88.
- [7] Wabiri, N, H. Amusa. Quantifying South Africa's crude oil import risk: A multi-criteria portfolio model[J]. *Economic Modelling*, 2010, (1).
- [8] Brown, S. P. A., H. G. Huntington. Evaluating U. S. oil security and import reliance[J]. *Energy Policy*, 2015, 79.
- [9] Chen, S. S., K. W. Hsu. Reverse globalization: Does high oil price volatility discourage international trade? [J]. *Energy Economics*, 2012, 34.
- [10] Zhang, C. G, X. H. Tu. The effect of global oil price shocks on China's metal markets[J]. *Energy Policy*, 2016, 90.
- [11] 李岩, 王礼茂. 从地缘政治角度看中国石油进口运输安全[J]. *资源科学*, 2008, (12)
- [12] 郎一环, 王礼茂. 石油地缘政治格局的演变态势及中国的政策响应[J]. *资源科学*, 2008, (12).
- [13] Kollias, C., C. Kyrtou, S. Papadamou. The effects of terrorism and war on the oil price-stock index relationship[J]. *Energy Economics*, 2013, 40.
- [14] Omar, A. M. A., T. P. Wisniewski, S. Nolte. Diversifying away the risk of war and cross-border political crisis[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2016.
- [15] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. *地理科学*, 2013, (11).
- [16] Vapnik, V. *Statistical Learning Theory*[M]. New York: Wiley, 1998.
- [17] Kennedy, J., R. C. Eberhart. *Particle Swarm Optimization*[Z]. IEEE. Proceedings of International Conference on Neural Networks, 1995.
- [18] 周涛, 陆惠玲. 数据挖掘中聚类算法研究进展[J]. *计算机工程与应用*, 2012, (12).
- [19] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, (8).
- [20] 王礼茂, 方叶兵. 国家石油安全评估指标体系的构建[J]. *自然资源学报*, 2008, (5).
- [21] 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).
- [22] 鞠可一, 周德群, 王群伟. 中国能源消费结构与能源安全关联的实证分析[J]. *资源科学*, 2010, (9).
- [23] 刘立涛, 沈镭, 张艳. 中国区域能源安全的差异性分析——以广东省和陕西省为例[J]. *资源科学*, 2011, (12).
- [24] Gupta, E. Oil vulnerability index of oil-importing countries[J]. *Energy Policy*, 2008, (3).
- [25] 吴初国, 刘增洁, 崔荣国. 能源安全状况的定量评价方法[J]. *国土资源情报*, 2011, (1).
- [26] 吴初国, 何贤杰, 盛昌明, 等. 能源安全综合评价方法探讨[J]. *自然资源学报*, 2011, (6).
- [27] Organization of Petroleum Exporting Countries (OPEC). 2016 *World Oil Outlook*[EB/OL]. http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO%202016.pdf, 2016-10-01.
- [28] U. S. Energy Information Administration (EIA). *International Energy Outlook 2016*[EB/OL]. [http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf), 2016-05-01.
- [29] U. S. Energy Information Administration (EIA). *Annual Energy Outlook 2016*[EB/OL]. <http://www.eia>

gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2016).pdf,2016-08-01.

- [30]中国社会科学院世界经济与政治研究所. 世界经济黄皮书:2016年世界经济形势分析与预测[M]. 北京:社会科学文献出版社,2015.
- [31]中国社会科学院世界经济与政治研究所. 世界能源中国展望(2015—2016)[M]. 北京:社会科学文献出版社,2016.
- [32]李小亮,陈彦玲,董正信. 基于PSR框架的我国石油安全评价[J]. 北京石油化工学院学报,2008,(1).
- [33]何贤杰,刘增洁,吴初国,等. 我国石油安全评价及建议[J]. 国土资源情报,2012,(10).

China's Oil Security Evaluation and Scenario Prediction based on EM-PSO-SVM Model

LÜ Jun, WANG De-yun, WEI Shuai

Abstract: This paper builds the nested model combining with Entropy method (EM), Particle swarm optimization (PSO) and Support vector machine (SVM) to conduct evaluation and scenario prediction on the China's oil security. We first construct oil security evaluation indicator system by the methods of Cluster Analysis and Gray Correlation Analysis, and portray the history evolution law of China's oil security index. The evaluation results show that: 1) China's oil security index decreased first and then increased, and there was a dramatic fluctuation in some years; 2) the situation under which international crude oil price is highly volatile, oil external dependence degree is increasing gradually, market liquidity tends to weaken exacerbates the vulnerability of China's oil security; geopolitical risk has become an important risk of oil security in China, which seriously restricts China's supply security. Then we establish the forecasting model based on PSO-SVM model, and set three scenario schemes, conduct scenario analysis of China's oil security in 2020 based on the above model. The results of scenario analysis show that: 1) the status of China's oil security will be much severe in the future; oil security index in benchmark scenario and low scenario will be in very insecure interval; 2) different economic development pattern and policy orientation have a significant impact on the oil security. The scenario-countermeasure path presented in this paper is supposed to be the basis of energy policy formulation.

Key words: oil security; entropy method; Support Vector Machine (SVM); Particle Swarm Optimization (PSO); scenario analysis

(责任编辑 朱 蓓)