

引文：李宏勋，高达，李昆鹏，等. 中国进口天然气运输安全评价[J]. 天然气工业，2022，42(5): 131-141.

LI Hongxun, GAO Da, LI Kunpeng, et al. Transportation safety evaluation of imported natural gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 131-141.

中国进口天然气运输安全评价

李宏勋 高达 李昆鹏 许寒 卡哈尔·热扎克

中国石油大学（华东）经济管理学院

摘要：运输是天然气进出口贸易中的重要环节，系统评估中国进口天然气的运输安全状况，对于保障天然气持续有效供应意义重大。为此，筛选了供给端安全性、运输过程安全性、接收端安全性 3 个层面 14 项指标，构建了中国进口天然气运输安全评价指标体系，并利用主成分分析 (PCA) 和 K-Means 聚类分析建立了安全评价模型，对中国进口天然气运输安全状况进行分析。研究结果表明：① 气源国政治稳定性、主要气源国数量、与气源国外交关系、境外输气管道长度、管道气年运输量、LNG 接收站数量、LNG 接收站接卸能力、天然气对外依存度、LNG 年运输量、海上事故发生次数、自有船队运力供给、天然气储采比、天然气进口价格、海盗及武装抢劫攻击次数这 14 项指标对中国进口天然气运输安全的影响较大；② 2006—2020 年间中国进口天然气运输安全经历了 4 种状态：不安全状态（2006—2008 年）、较不安全状态（2009—2011 年）、较为安全状态（2012—2016 年）和安全状态（2017—2020 年）。结论认为，为确保中国进口天然气运输安全，应当采取以下措施：① 完善设施，加大进口天然气运力投资；② 深化外交，优化天然气进口来源；③ 以军护商，加强运输活动安全保障；④ 合作定价，提升天然气进口价格话语权。

关键词：中国；天然气；进口；运输安全；安全评价；指标体系；主成分分析；K-Means 聚类分析

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.05.014

Transportation safety evaluation of imported natural gas in China

LI Hongxun, GAO Da, LI Kunpeng, XU Han, KAHAER·Rezhake

(School of Economics and Management, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

Natural Gas Industry, Vol.42, No.5, p.131-141, 5/25/2022. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Transportation is an important link in natural gas import and export trade, and a systematic evaluation on the transportation safety of imported natural gas is of great significance to ensure the continuous and effective supply of natural gas energy. In this paper, China's evaluation index system of transportation safety of imported natural gas is constructed by selecting 14 indexes in terms of supply side safety, transportation process safety and receiving side safety. In addition, a safety evaluation model is established by means of principal component analysis (PCA) and K-means clustering analysis, and the transportation safety situation of China's imported natural gas is analyzed. And the following research results are obtained. First, the transportation safety of China's imported natural gas is influenced more by 14 indexes, including political stability of gas source countries, number of major gas source countries, diplomatic relations with gas source countries, length of overseas gas pipelines, annual transportation of pipeline gas, number of LNG terminals, receiving and unloading capacity of LNG terminals, natural gas external dependence, annual LNG transportation, number of maritime accidents, transport capacity supply of self-owned fleet, natural gas reserve/production ratio, import price of natural gas, and number of pirate and armed robbery attacks. Second, the transportation safety of China's imported natural gas experienced four states during 2006-2020, i.e., unsafe state (2006-2008), less safe state (2009-2011), relatively safe state (2012-2016) and safe state (2017-2020). In conclusion, to ensure the transportation safety of China's imported natural gas, it is necessary to take the following measures: improve facilities and increase the investment in the transportation capacity of imported natural gas; deepen diplomacy to optimize the import sources of natural gas; strengthen the security of transportation activities by protecting commerce with troops; and carry out cooperative pricing to have more say in natural gas import prices.

Keywords: China; Natural gas; Import; Transportation safety; Safety evaluation; Index system; Principal component analysis (PCA); K-Means clustering analysis

基金项目：国家社会科学基金项目“我国天然气进口安全战略研究”（编号：20BJY078）。

作者简介：李宏勋，1964 年生，教授，硕士研究生导师；主要从事石油与天然气工业经济方面的研究工作。地址：（266580）山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号。ORCID: 0000-0002-4896-1447。E-mail: lhongxun56@163.com

0 引言

2020 年, 中国已成为全球第三大天然气消费国、第二大 LNG 进口国、第五大管道气进口国, 天然气进口量呈逐年上升趋势, 天然气市场在未来的一段时间内仍将处于发展期^[1-2]。保障运输线路的安全和稳定, 是中国实现天然气能源安全和国家发展的重要环节^[3-4]。尽管中国通过建设中亚、中缅、中俄天然气管道以及海上 LNG 通道和接收站等, 形成了天然气进口西北、西南、东北和东南沿海四大战略通道的多元供应格局^[5], 然而中国进口天然气的运输安全形势并不乐观: 在管道运输方面, 中国需应对中亚、缅甸、俄罗斯等国家或地区在地缘政治方面的不稳定性^[6]、中亚气源国在中国冬季北方用气高峰时的突然减供^[7]或供气中断^[8]以及中缅输气管道的泄漏燃爆等问题^[9]; 在船舶运输方面, 需应对海上基础设施联通滞后、海域地缘政治波动^[10]以及频繁发生的台风和飓风^[11]等威胁。

为此, 笔者对中国进口天然气的运输状况进行系统评估, 并识别出影响中国进口天然气运输安全的主要因素, 以期为中国天然气产业的安全发展及制定合理的产业发展战略提供理论参考。

1 天然气运输安全研究简况

天然气运输是天然气进出口贸易的重要环节之一。为全面考察进口天然气运输安全评估的研究现状, 本文从研究内容和研究视角两方面对相关文献进行梳理。

从研究内容来看, 大多数研究对天然气运输安全的研究指标还不够细致, 且将天然气运输安全或风险作为整体进口安全评价体系的一级指标。Shaikh^[11]等基于生态网络分析方法, 从国内生产、国内消费、进口运输和外部供应 4 大供应关键环节构建中国天然气供应安全评价模型, 提出中国应该通过气源国和运输线路的多元化来降低天然气供应风险; Shaikh 等^[12]从多样化、低依赖性、供应商出口能力、最小化进口成本、运输距离、出口国的政治不稳定性等 6 个角度, 构建了 2015—2020 年中国进口天然气计划的决策模型, 但在模型指标的选取上只涉及运输距离, 未考虑运输过程中的风险因素; Kong 等^[13]从资源风险、政治风险、运输风险、价格波动风险、购买力风险和依赖风险等 6 个层面构建天然气进口网络评价框架, 利用线性规划模型,

在最小化进口风险的基础上对中国天然气进口源进行优化, 其中“运输风险”只涉及进口量、运输距离、气象因素和军事因素; Gong 等^[14]利用 BoD 方法, 基于资源、结构、依赖、地缘政治、市场、流动性、基础设施和运输 8 个方面的风险指标, 提出了评估亚太国家天然气供应安全的综合指数, 但“运输风险”只涉及海运距离和进口量; 范秋芳等^[15]利用改进物元可拓模型, 从资源安全、政治安全、经济安全、运输安全 4 个层面选取 12 个指标, 构建中国 2006—2018 年天然气进口安全评价模型, 但“运输安全”只涉及运输量、途径海峡数、运输距离和对运输线路的控制力。

从研究视角来看, 学者们主要从 LNG 海上运输和管道运输的角度进行单独研究。在运输通道的安全方面, 孙家庆等^[16]从供应港安全、运输船舶安全、运输航线安全、装卸港安全 4 个方面选取指标, 运用投影寻踪方法构建 LNG 海上运输安全评价指标体系, 对中国 18 条 LNG 海上运输通道进行了评价; 马晓雪等^[17]从自然环境、社会经济、人为因素 3 个方面, 构建中国海上运输通道安全脆弱性演化机理分析的系统动力学模型, 识别了中国海上运输通道面临的风险; 杨亮亮^[18]基于投影寻踪定权的 K-Means 算法, 从政治、经济、军事、外交、自然 5 个方面构建指标评价体系, 对中国与天然气来源国之间 LNG 运输通道的风险进行评估。此外, 吕靖等^[19-22]对中国海上运输关键节点的安全状况进行了评价。在有关管道运输安全评价的研究中, Coq 等^[23]提出一种包含天然气依赖、运输路线多元化、运输政治风险、管道破裂概率等因素的管道运输风险指数, 来评估欧盟成员国从俄罗斯进口管道气的风险; 朱汝霞^[24]从地缘政治关系的角度构建指标体系, 系统评估了中缅油气管道运营面临的现实风险和潜在风险; 谢来风等^[25]以缅甸为例, 定性分析了宗教、内战等原因对中缅共建“一带一路”油气管道等项目建设和建设方面的影响。

迄今为止, 有关中国进口天然气运输安全的研究尚不全面, 大多研究仍将运输安全作为天然气进口安全评价体系的一级指标, 或从海上运输或管道运输某一方面单独进行研究, 鲜有研究将中国进口天然气海上运输和管道运输二者结合起来, 系统地评估中国进口天然气运输安全。因此, 笔者基于中国进口天然气运输的全过程, 参考现有的研究成果, 从供给端、运输过程、接收端 3 个方面选取 14 项指标构建中国进口天然气运输安全评价体系。由于中

国从 2006 年开始大量进口天然气，2021 年绝大部分相关数据尚未被公开，所以笔者选取 2006—2020 年共计 15 年的数据，对进口天然气的运输安全情况进行评价：首先运用主成分分析和 K-Means 聚类分析建立模型，再对天然气运输安全状况进行评估分析，最终提出保障中国进口天然气运输安全的对策建议。

2 指标体系构建与指标解释

2.1 指标体系及数据来源

笔者遵循科学性、代表性、动态性、可操作性的原则，从进口天然气“供给端安全”“运输过程安全”“接收端安全”3 个层面，各选取 4~6 个指标进行指标体系的搭建（表 1）。

表 1 中国进口天然气运输安全指标体系表

目标层	准则层	指标层	变量	数据来源
运输安全	供给端安全	气源国政治稳定性	X_1	《全球治理指数》（世界银行）
		与气源国外交关系	X_2	根据中华人民共和国外交部官网数据整理
		主要气源国数量	X_3	Trade Map 官方网站
		天然气进口价格 / (美元 · MMBtu ⁻¹)	X_4	《BP 世界能源统计年鉴》
		境外输气管道长度 / 10 ⁴ km	X_5	根据维基百科、百度百科相关数据整理
		LNG 年运输量 / 10 ⁹ m ³	X_6	《BP 世界能源统计年鉴》
	运输过程安全	管道气年运输量 / 10 ⁴ t	X_7	Trade Map 官方网站
		海盗及武装抢劫攻击次数 / 次	X_8	IMB Piracy Report（国际海事局）
		海上事故发生次数 / 次	X_9	GISIS 数据库（国际海事组织）
		自有船队运力供给 / 10 ⁴ t	X_{10}	Clarksons Shipping Intelligence Network
		LNG 接收站接卸能力 / (10 ⁴ t · a ⁻¹)	X_{11}	根据国际燃气网相关数据整理
		LNG 接收站数量 / 个	X_{12}	根据国际燃气网相关数据整理
	接收端安全	天然气储采比	X_{13}	《BP 世界能源统计年鉴》
		天然气对外依存度	X_{14}	根据维基百科、百度百科等相关数据整理

注：1 MMBtu = 1.055 GJ。

2.2 指标解释与计算方法

本研究的指标解释和计算方法如下，整理得到原始数据（表 2）。

2.2.1 供给端安全

1) 气源国政治稳定性：参考世界银行发布的《全球治理指数》，由于“政治稳定和无暴力”衡量的是对政治不稳定及出于政治动机的暴力（包括恐怖主义）的可能性，故笔者使用该指标衡量气源国的政治稳定性，按照从各气源国进口的天然气数量进行加权平均，最终得出气源国的政治稳定程度。

2) 与气源国外交关系：与气源国的外交关系稳定程度越高，则天然气运输的供给端安全性越高。根据气源国与中国的战略关系类型赋予相应分数（表 3），再根据从各气源国进口的天然气数量进行加权平均，最终得出当年与气源国之间的外交关系。

3) 主要气源国数量：表示当年向中国出口天然

气超过 50×10^4 t 的国家数量。气源国越单一，中国对其依赖性越强；而主要气源国越多元化，供给风险越分散。

4) 天然气进口价格：由于亚太天然气市场没有统一的定价方式，而日本 LNG 的 CIF 价格能够在一定程度上反映亚太天然气价格的总体水平^[26]，故笔者用日本 LNG 的 CIF 价格表示天然气进口价格。

2.2.2 运输过程安全

1) 天然气管道长度：表示进口天然气运输的管道长度。由于中国与国外连接的管道数量及管容数据未公开，故笔者采用管道长度表示中国进口管道气的运力，管道越长，代表中国进口管道气的运力越高。

2) LNG 年运输量：表示每年通过船舶运输的 LNG 进口数量，数量越多，代表能够满足国内生产和消费需求的程度越高。

3) 管道气年运输量：表示每年通过输气管道进

表 2 中国进口天然气运输安全评价指标基础数据表

年份	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
2006	0.869	0.800	1.000	7.138	4.810	1.047	0	239.000	503.000	0.000	657.000	1.000	28.752	7.400
2007	1.237	1.522	2.000	7.730	5.450	4.051	0	258.000	411.000	0.000	657.000	1.000	32.569	7.500
2008	1.818	2.106	5.000	12.548	5.830	4.647	0	293.000	343.000	14.655	807.000	2.000	33.492	8.400
2009	2.048	3.064	5.000	9.058	6.910	7.997	0	410.000	290.000	36.583	1 737.000	4.000	33.375	8.500
2010	1.690	1.830	8.000	10.909	7.850	13.020	259.414	445.000	492.000	36.583	1 737.000	5.000	28.454	9.400
2011	1.281	1.402	13.000	14.729	8.330	16.880	1 036.649	439.000	376.000	36.583	2 987.000	7.000	27.589	8.400
2012	1.752	2.035	10.000	16.748	9.160	20.069	1 580.070	297.000	462.000	44.845	3 737.000	9.000	28.166	9.700
2013	1.666	2.039	13.000	16.169	9.850	25.068	2 007.426	264.000	519.000	44.845	4 957.000	12.000	27.703	10.200
2014	1.828	2.438	21.000	16.329	10.570	27.266	2 302.304	245.000	434.000	52.921	5 989.000	15.000	27.263	11.300
2015	1.838	2.559	14.000	10.305	10.870	27.002	2 468.412	246.000	377.000	81.348	5 989.000	15.000	34.491	12.100
2016	1.757	2.296	15.000	6.937	11.340	36.761	2 797.484	191.000	370.000	100.392	6 289.000	16.000	39.722	13.300
2017	1.936	2.497	19.000	8.095	11.930	52.933	3 043.170	180.000	343.000	166.996	6 604.000	18.000	40.687	13.800
2018	2.021	2.517	23.000	10.049	12.230	73.453	3 660.898	201.000	234.000	232.936	7 304.000	20.000	39.398	14.300
2019	2.045	2.760	22.000	9.945	12.660	84.747	3 631.415	162.000	219.000	290.110	7 524.000	23.000	47.301	15.300
2020	1.891	2.845	22.000	7.808	13.420	94.019	3 453.108	195.000	37.000	290.110	8 324.000	24.000	43.288	15.900

表 3 国家关系类型及赋分情况表

战略关 系类型	建立外 交关系	建设性战略 伙伴关系	友好合作伙伴关系 / 重要合作伙 伴关系 / 新型合作伙伴关系	全面合作 伙伴关系	战略伙 伴关系	全面战略 伙伴关系	战略合作 伙伴关系	全面战略合 作伙伴关系	全面战略协 作伙伴关系
赋分	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	1

口的天然气数量，数量越多，代表能够满足国内生产和消费需求的程度越高。

4) 海盗及武装抢劫攻击次数：中国 LNG 海上运输须经过马六甲海峡、霍尔木兹海峡、曼德海峡、亚丁湾等海盗袭击和武装抢劫多发地，海盗及武装抢劫的次数越多，海上运输面临的潜在风险越大。

5) 海上事故发生次数：简称“海事”，指船舶在航行或停泊过程中发生的导致灭失或损害的事故，如碰撞、触礁、搁浅、沉没、火灾等以及其他自然灾害或人为因素所造成的事故。

6) 自有船队运力供给：中国进口 LNG 的运输，由自有船队承担的比重越大，运输风险越低。

2.2.3 接收端安全

1) LNG 接收站接卸能力：LNG 接收站是中国接收进口 LNG 的中转站，其接卸能力是衡量中国天然气接收端安全的重要指标。

2) LNG 接收站数量：LNG 接收站数量越多，则接收端的风险越小。

3) 天然气储采比：为当前年末剩余天然气可采储量与当年产气量的比值，比值越高，代表可供开采的年限越长，意味着中国能够抵抗外界风险的能力越强。

4) 天然气对外依存度：该指标通常用天然气净进口量与国内天然气总消费量的比值进行表示，天然气的对外依存度越高，越容易受到国际天然气市场波动等各种不可控因素的影响，因此对外依存度低将直接减轻进口运输压力。

3 中国进口天然气运输安全评价

3.1 研究方法

笔者选取主成分分析和 K-Means 聚类分析搭建进口天然气运输安全评价模型。主成分分析能够降低指标间的多重共线性^[27]，是一种将多个指标转化为少数几个综合指标，从而使问题简化和直观化的综合评价方法^[28]。K-Means 聚类分析是以距离为衡量

标准的聚类算法，将数据划分成类间相似性低、类内相似性高的 K 类数据集^[29]。

构建进口天然气运输安全评价模型，分为以下 7 个步骤。

1) 构建数据矩阵 X 。整理 p 个指标 n 年数据，搭建天然气运输安全样本数据矩阵：

$$X=(x_{ij})_{n \times p} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $j = 1, 2, 3, \dots, p$; x_{ij} 表示第 i 个指标的第 j 年数据。

2) 数据标准化。为消除不同指标间数据量级的差异，增强数据间的可比性，采用 Z-score 法进行数据标准化。Z-score 法标准化公式为：

$$Z_{(ij)n \times p} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n} \\ S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \end{cases}$$

式中 $\bar{x}_j$ 表示所有样本值的平均值； S_j 表示样本数据的标准差。

标准化矩阵为：

$$Z=(z_{ij})_{n \times p} = \begin{pmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{np} \end{pmatrix} \quad (3)$$

3) 计算相关系数矩阵 R 。

$$R=(r_{ij})_{p \times p} = \frac{z'_i - z_j}{n-1} \quad (4)$$

4) 计算特征值和载荷矩阵。计算相关系数矩阵 R 的特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_p \geq 0$ ，及对应的特征向量 $u_1, u_2, \dots, u_p$ 其中 $u_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{pj})^T$ ，由特征向量组成 p 个新的指标向量：

$$\begin{cases} y_1 = u_{11}z_1 + u_{21}z_2 + \cdots + u_{n1}z_n \\ y_2 = u_{12}z_1 + u_{22}z_2 + \cdots + u_{n2}z_n \\ \vdots \\ y_p = u_{1p}z_1 + u_{2p}z_2 + \cdots + u_{np}z_n \end{cases} \quad (5)$$

式中 y_1 表示第 1 主成分； y_2 表示第 2 主成分； y_p 表示第 p 主成分。

5) 确定主成分个数。首先计算特征值 λ_j 的信息贡献率和累计贡献率，根据累计方差贡献率高于 0.85^[30] 的原则确定主成分数目。即

$$\begin{cases} b_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \\ a_m = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \end{cases} \quad (6)$$

式中 b_j 表示主成分 $y_1, y_2, \dots, y_p$ 的信息贡献率； a_m 表示主成分 $y_1, y_2, \dots, y_p$ 的累计贡献率。当 $a_m > 0.85$ 时，则选取前 m 个指标变量 $y_1, y_2, \dots, y_m$ 作为 m 个主成分，代替原来的 p 个指标变量，进而对 m 个主成分进行综合分析。

6) 计算主成分综合得分 $F_{\text{综}}$ 。

$$F_{\text{综}} = \sum_{j=1}^m b_j y_j \quad (7)$$

式中 b_j 表示第 j 个主成分的信息贡献率，根据综合得分值可对各年度的进口天然气运输安全状况进行评价。

7) 确定安全等级界限。利用 K-Means 算法，确定 4 个聚类中心，作为安全等级界限的中心。其过程如下：

随机挑选 4 个数据 m_1, m_2, m_3, m_4 ，作为初始的聚类中心，计算所有数据与所选聚类中心的平方欧氏距离：

$$d_{ij} = |x_i - m_j| = \sum_{k=1}^m (z_{ik} - z_{jk})^2 \quad (8)$$

根据所有数据与 4 个聚类中心的距离远近重新分簇，并在此基础上重新确定新的聚类中心：

$$m_j^{(t+1)} = \frac{1}{N^{t+1}} \sum F \quad (j=1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

式中 N 表示在第 $t+1$ 次迭代时聚类中心的总数。

当下一次迭代的结果与上一次发生改变时，继续重复上述步骤，直至结果不再发生变化，输出最终聚类结果，并将最终计算出的聚类中心作为运输安全等级的临界点。

3.2 计算过程

3.2.1 相关性分析

在对原始数据标准化后，借助 SPSS 21.0 对标准化的数据进行相关性分析，得到相关系数矩阵（表 4）。统计发现，大部分指标间的相关系数的绝对值超过 0.6，各指标呈较强的线性关系，因此可通过主成分分析法降低指标的维度，以降低复杂性。

3.2.2 主成分分析

通过主成分分析，得到特征值、方差贡献率和累计方差贡献率（表 5）。

表 4 中国进口天然气运输安全指标相关性分析表

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
X_1	1.000	0.850	0.833	0.068	0.945	0.739	0.827	-0.323	-0.407	0.716	0.856	0.853	0.496	0.857
X_2	0.850	1.000	0.813	-0.178	0.860	0.796	0.900	-0.599	-0.548	0.770	0.937	0.927	0.664	0.859
X_3	0.833	0.813	1.000	-0.043	0.790	0.964	0.919	-0.501	-0.680	0.940	0.921	0.953	0.686	0.914
X_4	0.068	-0.178	-0.043	1.000	0.203	-0.229	-0.054	0.343	0.406	-0.304	-0.037	-0.088	-0.602	0.096
X_5	0.945	0.860	0.790	0.203	1.000	0.677	0.858	-0.349	-0.306	0.619	0.894	0.859	0.378	0.911
X_6	0.739	0.796	0.964	-0.229	0.677	1.000	0.897	-0.620	-0.785	0.990	0.890	0.936	0.819	0.856
X_7	0.827	0.900	0.919	-0.054	0.858	0.897	1.000	-0.698	-0.542	0.855	0.988	0.983	0.677	0.979
X_8	-0.323	-0.599	-0.501	0.343	-0.349	-0.620	-0.698	1.000	0.359	-0.599	-0.645	-0.650	-0.656	-0.570
X_9	-0.407	-0.548	-0.680	0.406	-0.306	-0.785	-0.542	0.359	1.000	-0.818	-0.569	-0.630	-0.802	-0.487
X_{10}	0.716	0.770	0.940	-0.304	0.619	0.990	0.855	-0.599	-0.818	1.000	0.843	0.901	0.869	0.800
X_{11}	0.856	0.937	0.921	-0.037	0.894	0.890	0.988	-0.645	-0.569	0.843	1.000	0.992	0.651	0.974
X_{12}	0.853	0.927	0.953	-0.088	0.859	0.936	0.983	-0.650	-0.630	0.901	0.992	1.000	0.717	0.959
X_{13}	0.496	0.664	0.686	-0.602	0.378	0.819	0.677	-0.656	-0.802	0.869	0.651	0.717	1.000	0.568
X_{14}	0.857	0.859	0.914	0.096	0.911	0.856	0.979	-0.570	-0.487	0.800	0.974	0.959	0.568	1.000

表 5 主成分特征值及方差贡献率表

成分	特征值	方差贡献率	累计方差贡献率
λ_1	10.264	73.313%	73.313%
λ_2	2.003	14.304%	87.617%
λ_3	0.773	5.524%	93.141%
λ_4	0.508	3.630%	96.772%
λ_5	0.188	1.344%	98.115%
λ_6	0.119	0.848%	98.963%
λ_7	0.074	0.529%	99.492%
λ_8	0.047	0.335%	99.827%
λ_9	0.012	0.086%	99.913%
λ_{10}	0.007	0.053%	99.967%
λ_{11}	0.003	0.018%	99.985%
λ_{12}	0.002	0.012%	99.997%
λ_{13}	接近 0	0.003%	接近 100%
λ_{14}	接近 0	接近 0	接近 100%

表 6 载荷矩阵及特征向量表

指标	载荷矩阵			因子得分系数		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 1	主成分 2	主成分 3
X_1	0.909	0.194	-0.029	0.162	-0.014	-0.182
X_2	0.828	0.295	0.314	0.101	-0.075	0.146
X_3	0.847	0.484	0.056	0.095	0.143	-0.204
X_4	0.316	-0.631	-0.547	0.213	-0.227	-0.351
X_5	0.969	0.013	0.011	0.201	-0.153	-0.073
X_6	0.727	0.624	0.205	0.035	0.190	-0.092
X_7	0.894	0.276	0.328	0.117	-0.103	0.163
X_8	-0.403	-0.191	-0.850	0.016	0.284	-0.787
X_9	-0.318	-0.899	-0.016	0.080	-0.504	0.367
X_{10}	0.661	0.698	0.203	0.010	0.248	-0.118
X_{11}	0.915	0.282	0.266	0.125	-0.078	0.094
X_{12}	0.887	0.376	0.257	0.105	-0.011	0.048
X_{13}	0.361	0.779	0.438	-0.086	0.254	0.122
X_{14}	0.948	0.197	0.172	0.153	-0.099	0.026

根据累计方差贡献率大于 0.85 的原则确定主成分, 结果显示前 3 项的累计方差贡献率达到 93.141%, 说明提取的 3 个主成分能够有效反映数据信息。依据因子得分(表 6)和式(4)~(8)可写出主成分得分函数:

$$F_1 = 0.162X_1 + 0.101X_2 + 0.095X_3 + 0.213X_4 + 0.201X_5 + 0.035X_6 + 0.117X_7 + 0.016X_8 + 0.080X_9 + 0.010X_{10} + 0.125X_{11} + 0.105X_{12} - 0.086X_{13} + 0.153X_{14} \quad (10)$$

$$F_2 = -0.014X_1 - 0.075X_2 + 0.143X_3 - 0.227X_4 - 0.153X_5 + 0.190X_6 - 0.103X_7 + 0.284X_8 - 0.504X_9 + 0.248X_{10} - 0.078X_{11} - 0.011X_{12} + 0.254X_{13} - 0.099X_{14} \quad (11)$$

$$F_3 = -0.182X_1 + 0.146X_2 - 0.204X_3 - 0.351X_4 - 0.073X_5 - 0.092X_6 + 0.163X_7 - 0.787X_8 + 0.367X_9 - 0.118X_{10} + 0.094X_{11} + 0.048X_{12} + 0.122X_{13} + 0.026X_{14} \quad (12)$$

以 3 个主成分的方差贡献率为权重，对主成分进行加权求和，得到中国进口天然气运输安全水平的综合得分模型：

$$F = 0.787 F_1 + 0.154 F_2 + 0.059 F_3 \quad (13)$$

将标准化的数据分别代入式 (10)、(11) 和 (12)，得到各主成分得分，再把各主成分得分代入式 (13)，计算得到各年度中国进口天然气运输安全的综合得分 (表 7)。

表 7 2006—2020 年中国进口天然气运输安全综合得分表

年份	主成分 1	主成分 2	主成分 3	综合得分
2006	-12.681	-5.093	-1.713	-10.866
2007	-11.968	-4.023	-1.656	-10.136
2008	-11.186	-4.197	-2.580	-9.603
2009	-6.701	-2.127	-2.518	-5.750
2010	-6.666	-4.164	-3.484	-6.093
2011	-4.943	-3.657	-3.535	-4.662
2012	-1.351	-3.581	-2.207	-1.744
2013	0.813	-3.106	-1.114	0.097
2014	3.329	-1.681	-0.460	2.335
2015	3.602	0.854	1.087	3.031
2016	4.502	2.682	2.707	4.116
2017	7.289	4.170	3.222	6.569
2018	10.556	6.074	3.249	9.434
2019	12.621	8.242	4.520	11.468
2020	12.783	9.609	4.482	11.803

3.2.3 K-Means 聚类分析

利用 SPSS 24.0 对 2006—2020 年中国进口天然气运输安全情况进行 K-Means 聚类分析。首先令 $K = 4$ 并随机确定初始聚类中心 $m_1 = -11.730$, $m_2 = 13.019$, $m_3 = -6.657$, $m_4 = -1.848$ ，再根据每个观测数据点到 4 个类中心的欧式距离大小进行分类，经过 4 次迭代后得到最终聚类中心 $m_1^* = -10.475$, $m_2^* = 10.361$, $m_3^* = -5.313$, $m_4^* = 1.518$ 。根据主成分的原理，最终聚类中心数值越大，表明中国进口天然气运输安全状况越优，以此为基础将其划分成 4 种状态，其中类别 1 对应不安全状态，类别 2 对应较为安全状态，类别 3 对应安全状态，类别 4 对应较不安全状态 (表 8)。

表 8 进口天然气安全情况 K-Means 聚类分析表

聚类	初始聚类中心	最终聚类中心	案例数	比例
1 (不安全)	-11.730	-10.475	3	20.00%
2 (较为安全)	13.019	10.361	5	33.33%
3 (安全)	-6.657	-5.313	4	26.67%
4 (较不安全)	-1.848	1.518	3	20.00%

3.3 结果分析

3.3.1 基于主成分分析

为了直观反映 3 个主成分及中国进口天然气运输安全得分的变化趋势，根据表 7 主成分及综合得分，绘得中国进口天然气运输安全趋势图 (图 1)。

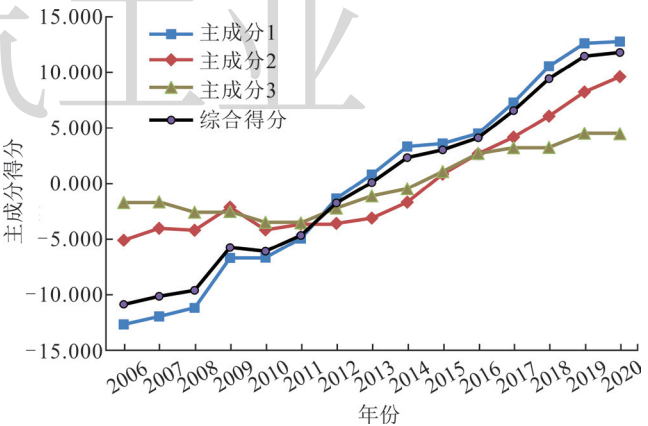


图 1 中国进口天然气运输安全趋势图

1) 从主成分的载荷矩阵 (表 6) 中可以看出，主成分 1 在气源国政治稳定性、主要气源国数量、与气源国外交关系、境外输气管道长度、管道气年运输量、LNG 接收站数量、LNG 接收站接卸能力、天然气对外依存度上的载荷绝对值较高，因而这些指标对于主成分 1 的解释具有较大话语权。由图 1 可知，2006—2020 年主成分 1 的得分变化与综合得分的变化趋势基本一致，总体呈不断上升趋势，说明中国进口天然气运输安全情况逐年向好。主要影响因素包括：①与中国达成输气合作的国家数量不断增加，这在一定程度上分散了气源国的政治稳定性风险，因而主成分 1 的得分不断提升；②主要气源国数量虽有波动，但整体呈上升趋势；③由于中国的经济实力不断增强且积极倡导“一带一路”建设，加之中国“负责任的大国”形象，与中国建立战略合作关系的气源国数量不断增加，这促使了主成分 1 得分的大幅增加；④境外输气管道长度从 2006 年的 3 666 km 增长至 2020 年的 6 292 km，总体来看，中国天然气管

道运输实力呈上升趋势；⑤管道气年运输量在不断提升，意味着能够越来越多地满足国内天然气消费需求；⑥ LNG 接收站的数量由 2006 年的 1 座增长至 2020 年的 24 座；⑦随着接收站数量的增加和扩建，接卸能力也在大幅提升，由 2006 年的 $657 \times 10^4 \text{ t}$ 增长至 2020 年的 $8\,324 \times 10^4 \text{ t}$ ；⑧天然气对外依存度从 2006 年开始总体呈上升趋势，按照一般的解释，该指标的上升本应当对主成分 1 起到反向作用，而实际上起到了正向作用，笔者认为尽管天然气对外依存度逐年升高，但进口来源却是愈加多元的，且该指标的升高意味着中国天然气行业的投资增加和技术进步，在一定程度上说明接收端的安全性更高。此外，由于主成分 1 的方差贡献率最大，为 73.313%，因此应该重点关注上述 8 个因素对中国进口天然气运输安全的影响。

2) 由表 6 可知，LNG 年运输量、海上事故发生次数、自有船队运力供给、天然气储采比、天然气进口价格在主成分 2 中的载荷绝对值较高，因而对主成分 2 的解释有较大话语权。主成分 2 得分在 2006—2014 年波动较小且基本稳定，但 2009 年出现极大值；从 2014 年开始逐年上升，且上升幅度较大，总体呈上升趋势。主要影响因素包括：① LNG 年运输量不断提升，意味着能够越来越多地满足国内天然气消费需求；②自有船队运力供给从零到有且从 2016 年开始大幅上升；③ 2013 年之前，由于 LNG 年运输量较少，海上事故的发生对于主成分 2 的影响较小，2014 年后中国 LNG 年运输量及自有船队运力供给大幅增加，海上事故数量的减少促成了主成分 2 的得分不断上升；④天然气储采比在 2014 年后明显增加，促成了主成分 2 在 2014 年后明显下降的趋势；⑤面对庞大的天然气进口数量，LNG 供应价格对中国天然气进口长期稳定构成了较大威胁，2006—2008 年，LNG 进口价格从 7.14 美元/MMBtu 骤增至 12.55 美元/MMBtu，2009 年受国际金融危机影响，LNG 价格下跌，这使主成分 2 的得分出现了极大值。此外，由于主成分 2 的方差贡献率为 14.304%，故中国也应重点关注上述 5 个因素对中国进口天然气运输安全的影响。

3) 根据表 6，只有海盗及武装抢劫攻击次数在主成分 3 上的载荷绝对值较高，因而该指标对主成分 3 的解释具有较大话语权。主成分 3 得分从 2006 年开始逐年下降，但降幅较小，2011 年后小幅上升，2016 年后维持在较低水平。主要影响因素是：2006—2010 年间，海盗及武装抢劫次数逐年增加，

尽管 2011 年以后年后海盗及武装抢劫攻击次数大幅下降，但海盗作案装备不断升级、袭击方式更加暴力、袭击对象不断扩大（由劫持近洋供应船和成品油船扩大至绑架船员以索要赎金或抢劫船员私人财物等）给中国进口天然气的运输安全带来较大压力，因此 2011 年后主成分 3 的得分并未显著上升。此外，主成分 3 的方差贡献率仅为 5.524%，但海盗及武装抢劫攻击次数在主成分 3 上的载荷较高，为 -0.850，故中国应当重点关注该指标对中国进口天然气运输安全的影响。

3.3.2 基于 K-Means 聚类分析

依据综合得分，借助 K-Means 聚类分析对中国进口天然气运输安全状况进行等级划分。结果显示，2006—2020 年中国进口天然气运输依次经历了不安全、较不安全、较为安全、安全状态，在未来视角下中国进口天然气运输安全仍有向好发展趋势，具体分析如下：

3.3.2.1 不安全状态（2006—2008 年）

2006—2008 年，中国进口天然气运输处于不安全状态。主要原因如下：① 2010 年之前中国只从海上进口 LNG，进口形式和来源国极为单一，气源国的政治稳定性较低，会增加供给端的风险；②中国在 2008 年才实现中国 LNG 运输自有船舶“零”的突破，2006—2008 年，中国进口的 LNG 全部由国外船舶运输，易受到国际环境的制约；③ LNG 接收站的建设情况处于初期，LNG 接收站仅有广东大鹏一座，接卸能力不足。总之，中国在进口天然气的初期，无论是供给端、运输过程中，还是接收端，运输安全都面临众多不确定因素。

3.3.2.2 较不安全状态（2009—2011 年）

2009—2011 年，中国进口天然气运输处于较不安全状态，主要原因如下：①中国从 2010 年开始进口管道气，当年向中国出口天然气量超过 $50 \times 10^4 \text{ t}$ 的国家数量不断上升，到 2011 年仅有 7 国，此外主要气源国的政治稳定性指标也在 2011 年出现极小值，故气源国数量的增加能够分担的供给端风险有限；②中国天然气市场出现供不应求的状况，天然气消费的增速超过生产增速，中国天然气对外依存度迅速增加；③中国 LNG 接收站的接卸能力比上一阶段有较大提升。总之，在该阶段，中国进口天然气运输安全状况较上一阶段有所改善。

3.3.2.3 较为安全状态（2012—2016 年）

自 2012 年起，中国进口天然气运输进入较为安

全状态,主要原因如下:①天然气进口来源国的数量较上一阶段大幅增加,且主要气源国的政治稳定性和与之外交关系也在稳步提升,这意味着中国天然气运输面临的供给端风险进一步分散;②在运输过程中,随着LNG海运航线的不断丰富和天然气运输管道的投入使用,2016年中国已建成了西北、西南和海上天然气进口通道,虽然截至2015年初,中国自有的LNG船舶数量仅有6艘,船队的规模在一定程度上限制了LNG运输能力,但从2013年开始,中国海盗及武装抢劫供给次数和海上事故发生次数大幅下降,提升了运输过程的安全性;③在接收端,随着LNG接收站的数量不断增加,中国LNG接收站的年接卸能力在2016年首次达到 $6\,289 \times 10^4$ t,天然气储采比也在2016年首次上升至较高水平。

3.3.2.4 安全状态(2017—2020年)

2017—2020年,中国进口天然气运输处于安全状态,由图1可知,中国进口天然气运输安全得分不断上升,主要原因如下:①天然气进口价格有下降趋势,这预示中国天然气进口成本将不断降低;②受海盗和武装抢劫攻击的次数、海上事故发生次数在这3年间明显低于上一阶段,表明中国天然气进口运输安全面临的海上风险大幅降低;③气源国的数量和政治稳定性及接收端的接卸能力和天然气储采比进一步提升,表明中国天然气进口运输安全状况得到进一步改善。

4 结论和对策建议

4.1 结论

1) 供给端方面的气源国政治稳定性、主要气源国数量、与气源国外交关系、天然气进口价格、运输过程方面的境外输气管道长度、管道气年运输量、LNG年运输量、海盗及武装抢劫攻击次数、海上事故发生次数、自有船队运力供给,接收端方面的LNG接收站数量、LNG接收站接卸能力、天然气储采比、天然气对外依存度这14项指标对中国进口天然气运输安全的影响较大。

2) 中国进口天然气运输安全状态的临界值为-10.475、10.361、-5.313、1.518,2006—2008年中国进口天然气运输安全处于不安全状态,2009—2011年处于较不安全状态,2012—2016年处于较为安全状态,2017—2020年处于安全状态。

4.2 对策与建议

1) 完善设施,加大进口天然气运力投资。由PCA分析结果可知,LNG接受站数量、LNG接收站接卸能力、自有船队运力供给、天然气储采比的影响力度较大,对此应继续完善运输所需基础设施,加大对天然气进口运输和储气相关项目的投资。由于中国LNG接收站分布分散且地理位置规划不均匀,未来的重点投资项目应朝着接收站聚集化方向发展,以克服海岸线、航道等方面的限制因素,完善各LNG接收站与来源国的对接程度。此外,还应该根据建设地经济发展水平、人口密度等因素,推进BOG联合处理工艺、冷能空分技术等新型技术,提升中国的LNG接收能力。在船队建设方面,长期内中国要继续保持LNG运输大船“好中向好”的趋势,同时在小船的持续投资建设上加大力度;短期内应选择灵活性较好的短期期租,调整船队中各船型数量,合理规划船队组成,保障LNG运输效率与安全同步发展。在储气设施建设方面,依托不同类型油气藏型、盐穴、含水层储气库,加强技术攻关,提升储气能力,不断优化储气调峰体系。

2) 深化外交,优化天然气进口来源。由PCA分析结果可知,气源国政治稳定性、主要气源国数量、天然气对外依存度、LNG年运输量及管道气年运输量的影响力度较大,因此,为了保障进口天然气的运输安全,中国应当合理评估气源国的政治稳定性,并将气源国数量控制在合理的范围内,优化进口来源,坚持多元进口。在与土库曼斯坦、俄罗斯、澳大利亚、印度尼西亚等现有气源国强化合作的基础上,拓展与美洲尤其是美国的合作、巩固与非洲的合作,更多地选择来源国政治稳定的进口来源以不断优化中国天然气的进口来源,保证足够的天然气进口量。同时,与运输途径国建立友好关系,与马来西亚、印度尼西亚、乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦以及缅甸等国继续推进战略合作,寻求积极和平的相处方式。

3) 以军护商,加强运输活动安全保障。根据PCA分析结果,境外输气管道长度、海上事故发生次数、海盗及武装抢劫攻击次数的影响力度较大,因此,在管道方面,应对各薄弱环节加强监控,及时排查,预先发现风险。对缅甸境内的部分,需联合缅甸政府,对易遭受袭击的路段进行定时巡逻和保护,必要时军方需采取行动,维护中缅管道的正常运行,保障中国天然气进口运输安全^[31]。在海上运输方面,中国在进行路线规划时应针对事故多发地进行规避,加强对途经海域的气象灾害检测,同时应对关键海峡

或运河实行军事保护机制,积极参与国际社会对海盗的联合打击,对中亚和东南亚地区等不确定性较高的路段加强侦查与布放,实现以军护商。

4) 合作定价,提升天然气进口价格话语权。LNG 进口价格对运输安全有着较大影响力度,鉴于中国目前是世界最大 LNG 进口国和第三天然气消费国的地位,要充分发挥上海、重庆等石油天然气交易中心的作用,合作建立 LNG 进口基准价格,提升中国在国际天然气市场的影响力和定价话语权。限制于我国天然气体系的成熟性,还可从以下 3 个方面发展与现有主要气源国的外交关系,加快建立与国际接轨的定价机制:①与亚太地区的天然气进口大国(日本、韩国和新加坡)合作建立亚太地区天然气贸易定价规则,构建统一定价机制;②与东盟出口大国(印度尼西亚、马来西亚和文莱)加强经济合作,形成更为紧密的联盟,推进亚太天然气交易市场建设进程,提升我国在天然气产业区域的地位;③与“一带一路”沿线国家构建双边和多边综合协调运行机制,合力构建新价格体系,形成我国乃至亚太地区的天然气基准价格。

参 考 文 献

- [1] 李宝军,贺志明,朱力洋,等. 川渝地区建设中国天然气市场化改革展示示范区的思考[J]. 天然气工业, 2020, 40(11): 1-10.
LI Baojun, HE Zhiming, ZHU Liyang, et al. Thoughts on the construction of China's natural gas market reform and development demonstration zones in Sichuan and Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(11): 1-10.
- [2] 刘剑文,杨建红,王超. 管网独立后的中国天然气发展格局[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 132-140.
LIU Jianwen, YANG Jianhong, WANG Chao. Natural gas development pattern in China after pipeline network independence[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 132-140.
- [3] 张珺,谭金萍. “一带一路”能源投资背景下的中国天然气供应安全分析[J]. 天然气工业, 2020, 40(11): 159-167.
ZHANG Jun, TAN Jinping. China's natural gas supply security under the background of "One Belt and One Road" energy investment[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(11): 159-167.
- [4] 曹婧,于璐源,李赫然,等. 中国参与北极天然气开发的挑战和路径[J]. 科技经济导刊, 2020, 28(26): 86-87.
CAO Jing, YU Luyuan, LI Heran, et al. Challenges and paths for China's participation in Arctic gas development[J]. Science and Technology Economic Guide, 2020, 28(26): 86-87.
- [5] 蒲明,李育天,孙骥姝. 中俄东线天然气管道工程前期工作关键点及创新成果[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 371-378.
PU Ming, LI Yutian, SUN Jishu. The key to the preliminary work of China-Russia Eastern Gas Pipeline Project and innovative achievements[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(4): 371-378.
- [6] 夏荣. 国际 LNG 贸易复杂网络特征及演化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
XIA Rong. Research on the characteristics and evolution of complex network of international LNG trade[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [7] Bloomberg. China's old gas allies fail to meet demand boom in winter[EB/OL]. (2018-02-27)[2022-03-01]. <https://www.bloombergquint.com/china/china-s-traditional-gas-allies-fail-to-meet-winter-demand-boom>.
- [8] 刘晓燕,吕涛. 国际能源应急协同的微分博弈研究[J]. 社会科学家, 2019(5): 40-44.
LIU Xiaoyan, LYU Tao. Differential game research of international energy emergency coordination[J]. Social Scientist, 2019(5): 40-44.
- [9] Reuters. CNPC gas pipeline blast kills 8, injures 35-Xinhua[EB/OL]. (2017-07-02) [2022-03-01]. <https://www.kitco.com/news/2017-07-02/CNPC-gas-pipeline-blast-kills-8-injures-35-Xinhua.html>.
- [10] 赵旭颖. “21 世纪海上丝绸之路”背景下中国能源安全战略研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016.
ZHAO Xuying. A study on China's energy security in the context of the 21st Century Maritime Silk Road[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016.
- [11] SHAIKH F, JI Qiang, FAN Ying. Evaluating China's natural gas supply security based on ecological network analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 1196-1206.
- [12] SHAIKH F, JI Qiang, FAN Ying, et al. Modelling an optimal foreign natural gas import scheme for China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 40: 267-276.
- [13] KONG Zhaoyang, LU Xi, JIANG Qingzhe, et al. Assessment of import risks for natural gas and its implication for optimal importing strategies: A case study of China[J]. Energy Policy, 2019, 127: 11-18.
- [14] GONG Chengzhu, GONG Nianjiao, QI Rui, et al. Assessment of natural gas supply security in Asia Pacific: Composite indicators with compromise Benefit-of-the-Doubt weights[J]. Resources Policy, 2020, 67: 101671.
- [15] 范秋芳,雒倩文,刘浩旻,等. 基于改进物元可拓模型的中国天然气进口安全评价[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2020, 36(6): 11-18.
FAN Qiufang, LUO Qianwen, LIU Haomin, et al. China's natural gas import security assessment based on matter-element extension model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2020, 36(6): 11-18.
- [16] 孙家庆,孙倩雯,许红香. 中国 LNG 进口海上运输通道安全

- 评价[J]. 大连海事大学学报, 2017, 43(1): 72-78.
- SUN Jiaqing, SUN Qianwen, XU HongXiang. Safety evaluation of China's LNG maritime import transport corridor[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2017, 43(1): 72-78.
- [17] 马晓雪. 中国海上运输通道安全脆弱性演化机理论析[J]. 世界经济与政治, 2017(11): 108-129.
- MA XiaoXue. Analysis of the evolution mechanism about safety vulnerability of China's marine transport lanes[J]. World Economics and Politics, 2017(11): 108-129.
- [18] 杨亮亮. 我国海上天然气运输通道安全评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- YANG Liangliang. Safety evaluation of natural gas transportation channel in China[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [19] 吕靖, 王爽. 我国海上运输关键节点安全评价研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(1): 30-36.
- LYU Jing, WANG Shuang. Safety evaluation of China's maritime transport key nodes[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(1): 30-36.
- [20] 李宝德. 基于突变理论的海上运输关键节点风险耦合研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- LI Baode. Study on key node coupling risk of maritime transport based on catastrophe theory[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [21] 蒋美芝, 吕靖. 海上通道关键节点风险预警研究[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(17): 35-44.
- JIANG Meizhi, LYU Jing. Early warning of key nodes of international sea lanes[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(17): 35-44.
- [22] 刘伟. 基于广义网络分析法的我国海上通道关键节点风险分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- LIU Wei. Risk analysis of key nodes of China's sea lines of communication based on generalized analytic network process[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [23] CHLOÉ Le Coq, PALTSEVA E. Assessing gas transit risks: Russia vs. the EU[J]. Energy Policy, 2012, 42: 642-650.
- [24] 朱汝霞. 基于地缘政治视角的中缅油气管道风险研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2016.
- ZHU RuXia. Risk study of China-Myanmar oil and gas pipeline based on geopolitical perspective[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2016.
- [25] 谢来风, 谭慧芳. “一带一路”项目风险管理与香港的角色[J]. 科技导报, 2021, 39(2): 104-116.
- XIE Laifeng, TAN Huifang. The risk management for the Belt and Road Initiative project and the role of Hong Kong[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(2): 104-116.
- [26] 董鑫. 中国天然气进口风险研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- DONG Xin. Study on the risk of natural gas import in China[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [27] 王丙参, 刘鹤飞, 魏艳华. 改进的传统距离聚类方法及应用[J]. 统计与决策, 2021, 37(4): 64-68.
- WANG Bingcan, LIU Hefei, WEI Yanhua. Analysis of improved traditional distance clustering method[J]. Statistics and Decision, 2021, 37(4): 64-68.
- [28] 肖建忠, 肖雨彤, 李佳锶. 基于主成分分析的我国天然气市场高质量发展评价[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2021, 37(1): 20-27.
- XIAO Jianzhong, XIAO Yutong, LI Jiasi. High quality development evaluation of China's natural gas market based on principal component analysis[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2021, 37(1): 20-27.
- [29] 李宏勋, 吴复旦. 我国进口天然气供应安全预警研究[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2018, 34(4): 1-6.
- LI HongXun, WU Fudan. Study on early warning for imported natural gas supply security in China[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2018, 34(4): 1-6.
- [30] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J]. 统计研究, 2005(3): 65-69.
- LIN Haiming, ZHANG Wenlin. The relationship between principal component analysis and factor analysis and SPSS Software: To discuss with comrade LIU yumei, LU wendai etc[J]. Statistical Research, 2005(3): 65-69.
- [31] 李向全. 中国天然气市场现状及发展前景[J]. 上海煤气, 2020(6): 30-33.
- LI Xiangquan. Present situation and development prospect of natural gas market in China[J]. Shanghai Gas, 2020(6): 30-33.

(修改回稿日期 2022-03-16 编辑 罗冬梅)



本文互动