

国家天然气安全评价指标体系的构建与应用

周云亨¹, 陈佳巍², 叶瑞克³, 陈牧秦¹, 张雨亭¹, 曹雨辰¹

(1. 浙江大学公共管理学院, 杭州 310058; 2. 浙江工业大学公共管理学院, 杭州 310023;
3. 浙江工业大学经济学院, 杭州 310023)

摘要: 围绕如何测度并改善天然气安全这一核心议题, 引入并修正了 APERC 能源安全“4A”分析框架, 运用层次分析法与德尔斐法, 构建了天然气安全评价指标体系, 对主要天然气净进口国和净出口国的天然气安全状况进行了量化评估。评估发现: (1) 天然气安全四维度(资源可利用性、经济可承受性、贸易可获得性与环境可接受性)的不可或缺性意味着综合表现优异的国家安全水平更高; (2) 8个二级指标中, 可采储量、个体可承受性等指标的权重更大; (3) 天然气净出口国在资源可利用性、经济可承受性和贸易可获得性方面有优势, 整体表现优于进口国。就中国而言, 可从加快资源开发、完善市场机制、扩大进口渠道和提高资源利用效率四个方面提高天然气安全水平。

关键词: 天然气安全; “4A模型”; 指标体系; 综合评价

得益于技术进步、能源需求扩张以及环境治理考量, 天然气作为最清洁的化石燃料在能源领域里扮演着越来越重要的角色。一方面, 勘探技术的进步大幅提高了全球天然气资源储量, 可采储量稳步上升; 另一方面, 近年来非常规天然气开采技术的推广应用迅速提高了全球天然气产能及产量, 使更具环境效益和成本优势的天然气成为煤炭等化石燃料的重要替代能源。数据显示, 在全球一次能源结构中, 天然气的比例从1971年的16%攀升至2017年的22%^[1]。全球主要能源研究机构预测, 天然气在不久的将来会成为仅次于石油的全球第二大能源品种^[2-4]。随着在一次能源结构以及全球能源贸易中地位的提升, 天然气已经成为影响国际政治经济格局的重要因素。天然气进口国愈加关注天然气的供应安全问题, 而天然气价格大幅波动的困扰也使得天然气出口国越来越重视天然气需求的稳定性和出口安全问题。近年来冬季“气荒”使得中国的天然气安全问题更具紧迫性。由于面临着大气治理与温室气体减排的双重压力, 中国天然气需求量已从2008年的819亿m³迅速攀升至2018年的2830亿m³, 进口依存度已经达到43%^[5,6]。然而, 相对于实践中的重要性, 天然气安全的理论研究仍有待加强。有鉴于此, 本文将围绕如何测度并改善天然气安全这一核心议题, 在梳理已有研究的基础上, 构建天然气安全评价指标体系, 测度并对比分析22个主要天然气进口国和出口国天然气安全状况, 并最终为相关国家尤其是我国提高天然气安全水平提供政策参考。

收稿日期: 2019-12-30; 修订日期: 2020-04-05

基金项目: 国家社会科学基金项目(17BGL66); 中央高校基本科研业务费专项(ZT2019)

作者简介: 周云亨(1982-), 男, 浙江临海人, 博士, 副教授, 主要从事国际关系与能源安全研究。

E-mail: yunhengzhou@zju.edu.cn

通讯作者: 叶瑞克(1980-), 男, 浙江温州人, 副教授, 主要从事资源环境经济与公共安全研究。

E-mail: rik_law@zjut.edu.cn

1 研究方法与数据来源

1.1 天然气安全研究评述

近年来,随着天然气在能源安全领域重要性的凸显,天然气安全及其评价已经进入中外学者视野,并逐渐成为能源安全领域的研究热点之一。为全面考察天然气安全评估的研究现状,本文从评估视角、指标体系以及优化方案三方面对相关研究进行梳理和总结。

首先,已有研究主要基于进口国视角探讨天然气供应安全问题。例如,Weisser^[7]与Shaffer^[8]基于供应安全考虑指出,由于过于依赖少数进口来源地导致了欧盟成员国难以摆脱潜在的天然气供应中断风险。Lu等^[9]基于生态网络分析法模拟了中国天然气供应系统并测量了天然气安全水平,认为我国天然气供应安全水平在2000—2011年间得以稳步改善。李宏勋等^[10]通过选取进口安全、国内供应以及需求安全三个层面的13项指标,构建中国进口天然气供应安全预警指标体系。

其次,就指标体系而言,多数研究更注重考察资源、经济与政治因素,较少兼顾环境与社会因素。Cabalu^[11]根据四个指标(能源强度、对外依存度、国内天然气生产量与国内天然气消费量的比率、地缘政治风险)构建了天然气供应安全评价指标体系,探讨了2008年亚洲七个天然气进口国天然气供应的脆弱性。Biresselioglu等^[12]使用天然气进口量、天然气供应商数量、对单一国家的依赖程度、对外依存度、供应国脆弱性以及天然气占一次能源比例等6个指标评估了2001—2013年间全球23个天然气进口国的供应安全。张珺等^[13]以2002—2012年中国天然气供应数据为样本,构建了含有天然气单位产值能耗、天然气进口依存度、国内天然气产量与天然气消费量之比以及地缘政治风险等4个指标的中国天然气供应安全评价指标体系。

最后,已有研究大多基于单一行为体的视角对天然气供给安全提出优化方案。李兰兰等^[14]强调基础设施效应一直是促进中国居民天然气增长的主要动因,提高天然气可得性有赖于基础设施的完善。杨艳等^[15]对比分析了市场需求、成本与价格等因素在中、美页岩气开发利用过程中起到的作用,强调中国需要通过突破核心技术瓶颈等手段以便降低页岩气开发成本。丁克永等^[16]认为在亚太地区天然气供需格局日趋紧张的背景下,中国天然气安全供给形势不容乐观,中国应加快LNG进口来源多样化,争取亚太地区天然气定价权,形成天然气调峰储备体系。Austvik^[17]认为,欧盟亟需加强成员国之间的天然气互联互通,只有建立起统一的天然气市场才能积极应对外部供应风险。

综上所述,现有研究呈现以下特征:(1)作为能源安全的重要组成部分,天然气安全逐渐成为能源安全研究的热点领域,传统的构建指标体系进行定量评估仍是主流;(2)多数研究聚焦于天然气供给安全,忽视了需求安全对于天然气出口国的重要性,基于需求视角和供需综合视角的研究较少,亦鲜有进口国和出口国天然气安全的比较评估研究;(3)在指标体系构建中,主要考虑资源、经济与政治因素,较少考虑环境与社会因素;(4)在优化方案方面,基于单一行为体及供给视角的解决方案较多,基于全球及供需两端视角的综合方案有所欠缺。上述不足正是本文试图加以完善的。

1.2 天然气安全评价的分析框架

鉴于天然气进口国与出口国间存在日益密切的相互依赖关系,本文将沿袭以国家为主体的传统能源安全研究范式,基于供需综合视角对主要出口国和进口国的天然气安全状况进行综合研判。为了更好地反映天然气安全的多维性,在天然气安全评估中引入亚太能源研究中心(APERC)提出的能源安全“4A”分析框架,从资源可利用性(Availability)、

经济可承受性 (Affordability)、贸易可获得性 (Accessibility) 以及环境可接受性 (Acceptability) 四个维度构建分析框架^[18], 将这四个维度作为天然气安全评价指标体系的“基本指标”, 进而将四个“基本指标”分解为若干“评估指标”, 并基于精确、均衡、通用及数据可得性等标准, 从中筛选8个“评估指标”(图1)及其对应的“要素指标”。

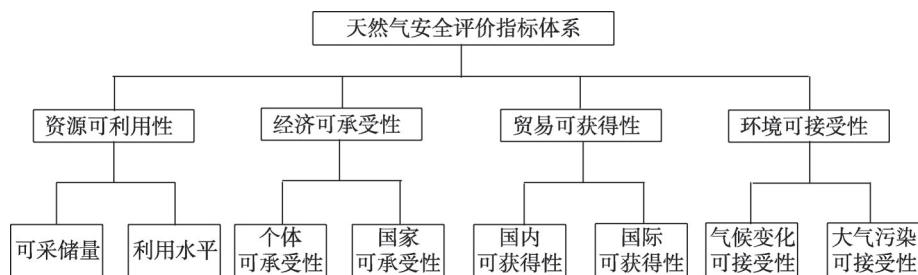


图1 “天然气安全评价指标体系”的概念模型

Fig. 1 Conceptual model of the "natural gas security indicator system"

相关指标筛选理由及说明如下：

一国天然气资源可利用性取决于该国天然气的资源储量、开发水平与经济价值等要素。其中，可采储量是最重要的表征指标，因为它已经考虑了地质、技术与经济等因素的制约。可采储量越高，表明该国资源可利用性条件越好。储采比反映了一国天然气资源的可持续开发水平。如果两个国家的天然气产量相当，一国的天然气资源储采比越高，则表明该国天然气资源的可持续开发条件越好，反之亦然。

经济可承受性是指天然气利用的经济成本，涉及个体与国家两个层面。个体可承受性主要取决于单位能源价格与个体的购买力水平，两者之间的比值越低说明个体能源消费的经济负担越小。国家可承受性主要是为了考察天然气进出口收支对于该国经济发展的影响。如果一国用于进口天然气的支出占GDP比例过高，或者天然气出口收入占该国GDP比例过大，则意味着这一类国家越容易遭受国际天然气价格大幅波动的影响。

贸易可获得性是指地缘政治、运输通道安全、基础设施等因素是否会阻碍天然气持续供应。国内可获得性主要用一国天然气的自给程度来表征，一国天然气自给率越高则国内的可获得性就越好。国际可获得性旨在评估天然气进口国进口来源多元化程度，以及天然气出口国出口市场多元化水平。一般来说，不管是天然气进口国还是出口国，其在国际市场的贸易伙伴越多且份额越均衡，就能更好地规避国际贸易中断的风险。

环境可接受性主要是考察天然气消费带来的环境效益。天然气的低污染、低排放特点使其在利用过程中产生的污染物排放率显著低于煤炭与石油，由此，它也被视为是人类通向可持续的能源与气候未来的桥梁能源^[19]。鉴于各国环境可持续性的显著差异，天然气在各国能源转型中扮演着不同角色。对于那些碳减排压力较小、空气污染不严重的国家，天然气替代煤炭与石油的紧迫性较低；对于那些碳减排压力较大，尤其是空气污染严重的国家，天然气替代煤炭与石油的紧迫性更高。

1.3 指标权重的确定

为了保证指标权重测度的科学合理，本文运用层次分析法和德尔斐法，向来自于国际能源署、国家发改委能源研究所、自然资源部油气资源战略研究中心以及中石油等单位的能源问题专家发放以指标权重专家判断矩阵问卷，将判断矩阵输入层次分析法软件(yaahp 7.0)检验专家判断矩阵的一致性，若不一致则邀请专家修订判断矩阵；最终成功

回收 43 份有效问卷, 即 43 位专家的判断矩阵通过一致性检验 (CR 数值小于 0.1); 最后运行 yaahp 7.0 软件计算得到各项指标权重 (表 1)。

表 1 国家天然气安全评价指标体系
Table 1 Natural gas security indicator system

| 基本指标 | 评估指标 | 要素指标 | 指标方向 | 权重 |
|--------|----------|-----------------------------|------|--------|
| 资源可利用性 | 可采储量 | 国内人均天然气资源可采储量 | 正 | 0.1685 |
| | 利用水平 | 天然气储采比 | 正 | 0.1153 |
| 经济可承受性 | 个体可承受性 | 单位电价与人均 GDP 比值 ^① | 负 | 0.1490 |
| | 国家可承受性 | 天然气净进/出口额与 GDP 比值 | 负 | 0.0663 |
| 贸易可获得性 | 国内可获得性 | 天然气自给率 | 正 | 0.0927 |
| | 国际可获得性 | 天然气净进/出口多元化指数 ^② | 正 | 0.1308 |
| 环境可接受性 | 气候变化可接受性 | 人均能源消费碳排放 | 负 | 0.1188 |
| | 大气污染可接受性 | PM _{2.5} | 负 | 0.1587 |

如表 1 所示, 国内人均资源可采储量权重最大, 说明专家认为资源禀赋对于天然气安全至关重要; 天然气净进/出口额与 GDP 比值的权重最小, 而为个体消费者所接受的价格水平更为重要; 相对于气候变化因素而言, 专家们认为大气污染治理是促进天然气消费更为重要的驱动力; 相对于追求天然气的自给自足而言, 专家们显然更为重视如何通过进出口的多元化以降低进出口风险。

1.4 评估对象与数据来源

本文基于各国在天然气领域的重要性的数据的可获得性原则, 选取了墨西哥、法国、德国、意大利、土耳其、英国、乌克兰、中国、印度、日本以及韩国等 11 个天然气净进口国与美国、加拿大、荷兰、挪威、俄罗斯、伊朗、卡塔尔、阿尔及利亚、澳大利亚、印度尼西亚以及土库曼斯坦等 11 个天然气净出口国作为被评估国。为了便于指数计算和结果分析, 所选国家的天然气进口与出口数量均采用进出口净值进行统计。BP 数据显示, 2017 年, 这些国家的天然气可采储量、产量、消费量与国际贸易量分别占全球总量的 74.7%、74.3%、72.2% 与 75.9%^[20]。除了在天然气领域有着举足轻重的重要性, 这些国家在地理位置上覆盖了欧洲、亚洲、美洲、非洲与大洋洲, 具备地理区位代表性。天然气资源可采储量、储采比、年度生产量、年度消费量、年度国际贸易量、地区交易价格、能源消费碳排放等相关数据均来自《BP 世界能源统计年鉴》(Statistical Review of World Energy), 各国人口数量、人均 GDP、GDP 来自于美国中情局的《世界概览》(World Factbook), 单位电力价格来自全球能源价格网 (globalenergyprices.com), PM_{2.5} 数据来自于世界卫生组织的《空气污染指数》(Ambient air pollution), 上述数据获取时间截至 2019 年 5 月。为了确保数据的完整性和统计口径的一致性, 对于 BP 统计年鉴中缺失的数据, 由《世界概览》的数据加以补充。

1.5 指标合成方法

鉴于所选国家在资源储量、人口规模、经济总量等方面相差悬殊, 为了追求指标核

① 由于各国单位天然气价格数据不可得, 此处以相关度很高的单位电力价格作为替代。

② 天然气净进/出口多元化指数采用 HHI 指数计算方法, 公式如下:

$$HHI_k = \sum_{j=1}^n (X_{ji} - X_{ej}/X_i)^2$$

式中: HHI_k 表示 k 国的天然气净进/出口多元化指数; X_{ji} 表示进口于 j 国的天然气 (10^9 m^3); X_{ej} 表示出口到 j 国的天然气 (10^9 m^3); n 表示与 k 国存在天然气贸易的国家数 (个); X_i 表示 k 国对 n 个国家的天然气净进/出口之和 (10^9 m^3)。

算的合理性与公平性，天然气安全评价指标体系所选的指标大多采用相对指标，即一个统计量相对于另一个参照统计量的比值，如国内人均天然气资源可采储量等指标。在数据处理方面，本文采用压缩数据法和归一化法，对于部分指标先进行压缩处理，最后进行归一化处理，以平衡不同国家间单项数据的悬殊差异：（1）对样本间数据去除极值后分布仍不符合线性趋势的指标进行对数化处理，对去除极值后分布符合线性趋势的指标不进行处理；（2）利用均值方差对指标数值设置上下限，并去除极值，再对数据进行归一化处理；（3）根据指标权重进行加总计算，得到结果。计算公式如下：

利用均值方差设置上下限，去极值：

$$up = \text{mean}(X) + n \times \text{std}(X), \text{down} = \text{mean}(X) - n \times \text{std}(X), n = 1.2 \quad (1)$$

$$X_i = \begin{cases} up & \text{if } X_i > up \\ down & \text{if } X_i < down \end{cases} \quad (2)$$

对负相关的指标取负数：

$$X_i = -X_i, i = 3, 4, 7, 8 \quad (3)$$

最大值最小值归一化：

$$X_i = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (4)$$

某国家的综合指标计算：

$$Y = \sum w_i \times X_i \quad (5)$$

式中： w_i 为某国第*i*个指标的权重（表1）； X_i 为第*i*个指标，对去除极值后数据分布仍不符合线性趋势的 X_1 、 X_2 、 X_5 、 X_8 进行对数化处理：

$$X_i = \ln(X_i), i = 1, 2, 5, 8 \quad (6)$$

2 结果分析

2.1 综合评价结果分析

从综合评价结果看（表2），表现相对良好的国家都在天然气资源禀赋方面具有比较优势，且在其他方面表现尚可。在排名前50%的国家中，无一例外都是天然气出口国。其中，挪威、俄罗斯、阿尔及利亚、卡塔尔、澳大利亚、伊朗、美国和加拿大同时还是天然气年产量位列全球前十的生产大国，这说明一国天然气总体安全状况在很大程度上取决于该国的资源可采储量与生产能力，而提高本国天然气的可采储量与自给率是保障天然气安全的基础。在天然气进口国中，乌克兰、中国和印度三国的国内资源禀赋更出色，使其综合表现在天然气进口国中处于中上游水平。英国、法国、日本、德国、意大利、韩国、墨西哥、土耳其等OECD国家的主要短板是资源可利用性指数表现不佳，要么过于依赖某些天然气出口国，要么国内的能源使用成本过高，导致这些国家天然气的综合表现不是很理想。

2.2 指标结果分析

相对于综合指数表，图2更直观地反映了各类国家在各项安全指标上的差异。（1）在资源可利用性方面，天然气与人口在全球的高度不均衡分布，为卡塔尔、土库曼斯坦、伊朗、俄罗斯、阿尔及利亚等国带来了资源红利，而大多数OECD国家表现不佳。（2）在经济可承受性方面，OECD国家由于经济相对发达，对于天然气价格波动的承受力更强；印

表2 主要天然气进口国和出口国的天然气安全指数

Table 2 Natural gas security index for major import and export countries

| 国家 | 资源可利用性 | 经济可承受性 | 贸易可获得性 | 环境可接受性 | 总得分 | 进口国/出口国 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 挪威 | 18.053 | 17.353 | 19.747 | 23.744 | 78.896 | 出口国 |
| 俄罗斯 | 23.273 | 15.380 | 19.730 | 16.735 | 75.118 | 出口国 |
| 阿尔及利亚 | 20.968 | 17.087 | 17.573 | 15.830 | 71.459 | 出口国 |
| 卡塔尔 | 28.380 | 21.530 | 21.142 | 0.000 | 71.052 | 出口国 |
| 土库曼斯坦 | 28.380 | 21.530 | 7.270 | 9.741 | 66.921 | 出口国 |
| 伊朗 | 28.380 | 15.983 | 9.845 | 9.148 | 63.355 | 出口国 |
| 澳大利亚 | 20.094 | 7.305 | 16.538 | 18.639 | 62.577 | 出口国 |
| 美国 | 12.466 | 14.074 | 13.162 | 19.606 | 59.308 | 出口国 |
| 印度尼西亚 | 16.084 | 1.987 | 17.515 | 22.460 | 58.046 | 出口国 |
| 荷兰 | 15.026 | 9.284 | 17.256 | 15.852 | 57.418 | 出口国 |
| 加拿大 | 13.403 | 14.036 | 6.731 | 19.662 | 53.832 | 出口国 |
| 乌克兰 | 18.651 | 4.447 | 5.458 | 20.021 | 48.576 | 进口国 |
| 英国 | 5.301 | 6.937 | 11.421 | 21.421 | 45.079 | 进口国 |
| 中国 | 13.392 | 6.320 | 15.957 | 9.047 | 44.716 | 进口国 |
| 法国 | 2.987 | 8.741 | 9.550 | 22.221 | 43.498 | 进口国 |
| 日本 | 3.765 | 4.099 | 11.985 | 18.857 | 38.707 | 进口国 |
| 印度 | 11.231 | 1.371 | 13.870 | 11.880 | 38.351 | 进口国 |
| 德国 | 8.255 | 2.397 | 9.213 | 18.085 | 37.950 | 进口国 |
| 意大利 | 3.559 | 3.878 | 11.764 | 18.620 | 37.821 | 进口国 |
| 韩国 | 3.765 | 11.536 | 11.337 | 9.918 | 36.556 | 进口国 |
| 墨西哥 | 4.001 | 9.143 | 4.953 | 18.158 | 36.255 | 进口国 |
| 土耳其 | 2.987 | 8.999 | 8.378 | 12.602 | 32.965 | 进口国 |

度、印度尼西亚等国由于经济发展水平相对落后、人均GDP较低导致其承受力较差。(3)在贸易可获得性方面,中国、印度、卡塔尔、俄罗斯等陆海复合型国家往往比土库曼斯坦等内陆国拥有更多选择;加拿大、墨西哥及乌克兰由于与大国毗邻而居,导致其过于依赖单一消费市场或者出口国,面临着更高的市场风险或地缘政治风险。(4)在环境可接受性方面,大多数OECD国家基本完成了由煤炭向清洁能源的转型进程,空气质量较好;印度、中国由于能源转型滞后,国内空气质量亟待改善;卡塔尔由于人均能源消耗碳排放过高,面临着巨大的碳减排压力。

2.3 进出口国家比较分析

如图3所示,相较于天然气进口国而言,天然气出口国在资源可利用性、经济

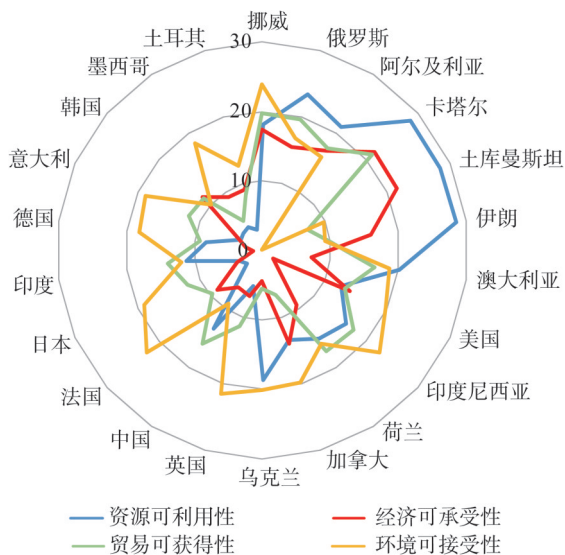


图2 22个国家天然气安全基本指标(“4A”维度)表现

Fig. 2 Performance of natural gas security indicators in 22 countries



图3 天然气进、出口国天然气安全指数对比

Fig. 3 Comparison of security indexes between natural gas import and export countries

可承受性和贸易可获得性方面都有更好的表现，其中前两项优势更加明显，表明天然气出口国的天然气安全度普遍高于进口国，也是学术界更关注供应安全而非需求安全的原因。天然气进口国在环境可接受性方面的整体表现优于天然气出口国，是由于天然气出口国中的部分国家（如卡塔尔）糟糕的环境可接受性表现拉低了出口国的整体水平。

在天然气出口国中，挪威、俄罗斯和阿尔及利亚由于各项指标都较为出色，进入第一梯队。卡塔尔、土库曼斯坦和伊朗，尽管其资源可利用性指数表现优异，但它们在环境可接受性或贸易可获得性方面表现不佳，处于第二梯队。澳大利亚、美国、印度尼西亚、荷兰和加拿大的资源可利用性指数远逊于第二梯队，综合表现也远不及第一梯队，属于天然气出口国的第三梯队（图4）。

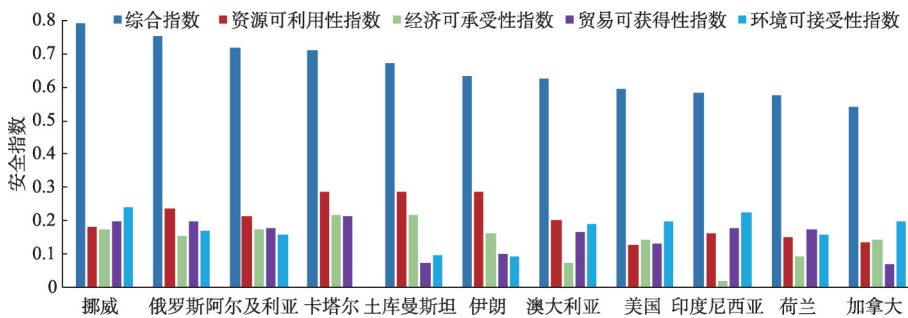


图4 天然气出口国安全指数

Fig. 4 Security index of natural gas export countries

在天然气进口国中，英国、法国、日本、德国等OECD国家的环境可接受性指数得分普遍较高，这主要得益于清洁能源在这些国家一次能源占比较高，但是这类国家的资源可利用性指数得分却远不及乌克兰、中国和印度。得益于在经济可承受性、贸易可获得性方面的较好表现，英国、法国、日本等国的天然气安全度与乌克兰、中国和印度处于同一层次，而德国与意大利、韩国、墨西哥、土耳其则相对落后（图5）。

2.4 中国评价结果分析

就中国而言，（1）环境可接受性、经济可承受性表现较差，在22个国家中分别排名倒数第二和倒数第七。中国经济的快速增长以及国内民众对于清洁能源的旺盛需求都促成了国内天然气需求量的迅速攀升，在可预见的未来，中国的天然气消费量仍将保持高速增长，这给中国的天然气供给安全带来严峻考验^[21]。（2）贸易可获得性、资源可利用性在22个国家中分别排名第八和第十二，在11个进口国中分别排第一和第二。进口多元化是中国天然气安全的优势所在，与“一带一路”沿线国家（如：俄罗斯、土库曼斯坦、卡塔尔、缅甸）的能源合作有效提升了其天然气安全水平；然而，囿于富煤、缺油、少气的国内资源禀赋，天然气尤其是页岩气开发利用技术水平与国际先进水平仍存

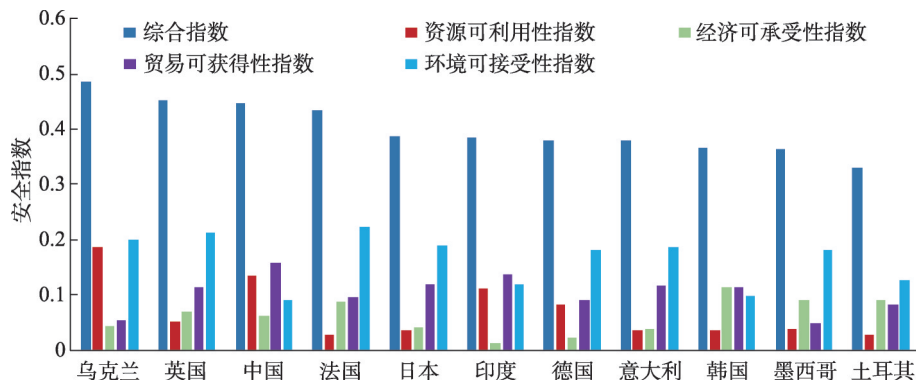


图5 天然气进口国安全指数

Fig. 5 Security index of natural gas import countries

在不小差距^[22]，以及国内天然气市场机制仍不完善，目前国内天然气产量越来越难以满足日趋旺盛的消费需求，这给中国的天然气安全带来了风险和挑战。

3 结论与讨论

3.1 结论

综上所述，本文引入并修正了APEREC能源安全“4A”分析框架，运用层次分析法和德尔斐法，构建了天然气安全综合评价的概念模型及其指标体系，并对全球主要国家的天然气安全状况进行量化评估。评估发现：(1)一国的天然气安全水平可以通过四个维度来评估，即资源可利用性、经济可承受性、贸易可获得性以及环境可接受性；天然气安全四维度的不可或缺性意味着综合表现优异的国家安全水平更高。(2)问卷调查发现，可采储量、个体可承受性、国际可获得性和大气污染可接受性四个指标更为重要；由此观之，确保资源的可利用性是一国天然气安全的重要基础，提高经济的可承受性和贸易的可获得性是维护本国天然气安全的重要手段，而关注环境的可接受性则是更高的目标追求。(3)天然气出口国安全状况的整体表现优于天然气进口国，它们在资源可利用性、经济可承受性和贸易可获得性三方面有着明显的优势。

以上结论隐含的政策内涵如下：(1)对于天然气出口国而言，提高天然气的利用率是其提高本国天然气安全的重要手段。鉴于天然气出口国普遍存在着天然气资源利用效率低下的问题，这些国家需要逐步削减化石燃料补贴，并且合理地运用价格和税收等手段提高天然气资源利用效率，这将有利于增强国内资源供应的可持续性，提高经济运行效率与效益，改善天然气安全的环境可接受性。(2)至于天然气进口国，协同促进天然气资源国内开发与国际化战略能有效化解资源短缺对经济可持续发展的束缚，有助于确保能源系统的平衡与生态环境的改善。在国内，它们亟需加快天然气资源，尤其是页岩气资源的勘探开发进程；在海外，为了有效降低依赖海外资源的风险，天然气进口国不仅需要强化进口天然气来源的多元化策略，而且还需要在天然气进口通道、运输方式乃至贸易方式等方面追求多样化。

3.2 对中国的启示

(1) 加快资源勘探开发进程，提高天然气资源可利用性。尽管中国是一个传统意义上缺油、少气的国家，但随着非常规天然气开发技术的进步，亟需加快国内非常规天然

气资源潜力的评估,从而改善和扩大中国天然气的资源基础。对此,中国应该将非常规天然气资源勘探技术的进步作为保障本国天然气安全的重要依托,通过建立更加公平合理的市场准入机制,积极开发本国的天然气资源,这是确保中国天然气安全的根本途径。

(2) 完善国内天然气市场定价机制,形成被国际广泛接受的天然气价格指数,提高经济可承受性。目前亚洲国家进口的天然气价格普遍高于北美和欧洲等地,这与亚洲天然气消费市场远离资源产地有关,同样也与亚太地区缺少类似北美地区的Henry Hub和西欧的Heren NBP Index等具有国际重要影响的定价中心有关。对此,中国应当围绕“管住中间、放开两头”的总体思路持续推进国内天然气价格改革,完善市场定价机制;与此同时,采取积极措施吸引更多的海外资本参与上海和重庆石油天然气交易中心的市场交易,使其成为国际广泛接受的天然气价格指数,以更好地维护本国与区域的天然气安全。

(3) 扩大进口多元化渠道,提高贸易可获得性。天然气供应中断所造成的损失将取决于供应中断出现的概率、供应量的损失以及持续时间。对此,中国需要与更多的诸如俄罗斯、土库曼斯坦、卡塔尔等利益冲突可能性较低,同时天然气安全程度较高的国家建立贸易伙伴关系,积极参与这些国家的天然气资源开发,使其成为稳定可靠的天然气资源供应国。与此同时,中国还有必要不断开拓与挪威、美国、加拿大等国的天然气贸易,以便在传统天然气供应国出现供应中断时,能通过这些国家的供应渠道弥补缺口,这是降低海外天然气供应中断风险的重要手段,同时也是避免过于依赖单一进口来源导致价格居高不下的对冲方案。

(4) 高效利用天然气资源,提高环境可接受性。积极推动天然气产业的健康发展,稳步提高天然气在一次能源结构中的比例,是中国追求能源环境可持续发展的必由之路,也是实现经济繁荣满足民生需求的有效途径。对此,政府在制定相关能源政策时应积极发挥市场机制在天然气资源配置中的决定性作用,建立合理的煤、油、气、电定价机制,使这些能源商品之间的比价关系能更好地反映资源稀缺性与环境外部性,这有助于推动更清洁的天然气替代煤炭和石油,从而加快中国能源转型进程。

参考文献(References):

- [1] IEA. World Energy Balances 2019. <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-2019>, 2019-09-10.
- [2] IEA. World Energy Outlook 2018. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>, 2018-11-13.
- [3] OPEC. World Oil Outlook 2018. https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm, 2019-12-25.
- [4] EIA. International Energy Outlook 2018. <https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo18/>, 2018-07-24.
- [5] BP. Statistical Review of World Energy 2019. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>, 2019-06-11.
- [6] 沈镭,张红丽,钟帅,等. 新时代下中国自然资源安全的战略思考. 自然资源学报, 2018, 33(5): 721-734. [SHEN L, ZHANG H L, ZHONG S, et al. Strategic thinking on the security of natural resources of China in the New Era. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 721-734.]
- [7] WEISSER H. The security of gas supply: A critical issue for Europe?. Energy Policy, 2007, 35(1): 1-5.
- [8] SHAFFER B. Europe's natural gas security of supply: Policy tools for single-supplied states. Energy Law Journal, 2015, 36(11): 179-201.
- [9] LU W, SU M, FATH B D, et al. A systematic method of evaluation of the Chinese natural gas supply security. Applied Energy, 2016, 165(1): 858-867.
- [10] 李宏勋,吴复旦. 我国进口天然气供应安全预警研究. 中国石油大学学报: 社会科学版, 2018, 34(4): 1-6. [LI H X, WU F D. Study on early warning for imported natural gas supply security in China. Journal of China University of Petroleum: Edition of Social Sciences, 2018, 34(4): 1-6.]
- [11] CABALU H. Indicators of security of natural gas supply in Asia. Energy Policy, 2010, 38(1): 218-225.
- [12] BIRESELIOGLU M E, YELKENCI T, OZ I O. Investigating the natural gas supply security: A new perspective. Energy, 2015, 80(11): 168-176.

- [13] 张琚, 黄艳. 中国天然气供应安全指数构建与建议. 天然气工业, 2015, 35(3): 125-128. [ZHANG J, HUANG Y. Some suggestions on the construction of an integrated gas supply security index in China. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(3): 125-128.]
- [14] 李兰兰, 徐婷婷, 李方一, 等. 中国居民天然气消费重心迁移路径及增长动因分解. 自然资源学报, 2017, 32(4): 606-619. [LI L L, XU T T, LI F Y, et al. Gravity center evolution paths and growth factor decomposition of residential natural gas consumption in China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 606-619.]
- [15] 杨艳, 王礼茂, 方叶兵. 中国页岩气资源开发利用的可行性评价. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2127-2136. [YANG Y, WANG L M, FANG Y B. Feasibility evaluation for exploitation and utilization of China shale gas resources. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12): 2127-2136.]
- [16] 丁克永, 徐铭辰, 吕丹, 等. 亚太天然气供需格局下的中国天然气安全形势及应对策略. 中国矿业, 2018, 27(9): 7-10. [DING K Y, XU M C, LYU D, et al. China's natural gas safety situation and coping strategies under the Asia-Pacific natural gas supply and demand pattern. *China Mining Magazine*, 2018, 27(9): 7-10.]
- [17] AUSTVIK O G. The energy union and security-of-gas supply. *Energy Policy*, 2016, 96(6): 372-382.
- [18] INTHARAK N, JULAY J H, NAKANISHI S, et al. A quest for energy security in the 21st century. *Asia Pacific Energy Research Centre Report*, 2007.
- [19] OGDEN J, JAFFE A M, SCHEITRUMD, et al. Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: Insights from the literature. *Energy Policy*, 2018, 115(4): 317-329.
- [20] BP. Statistical Review of World Energy 2018. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/reports-and-publications.html>, 2018-06-11.
- [21] JI Q, FAN Y, TROILO M, et al. China's natural gas demand projections and supply capacity analysis in 2030. *The Energy Journal*, 2018, 39(6): 53-70.
- [22] 张虹, 张代钧, 卢培利, 等. 重庆市页岩气开采流域地表水资源安全的综合评价. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1451-1461. [ZHANG H, ZHANG D J, LU P L, et al. Comprehensive assessment of surface water resource security in basin with shale gas extraction in Chongqing China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8): 1451-1461.]

Construction and application of national natural gas security indicator system

ZHOU Yun-heng¹, CHEN Jia-wei², YE Rui-ke³, CHEN Mu-qin¹,
ZHANG Yu-ting¹, CAO Yu-chen¹

(1. School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Public Affairs, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 3. School of Economics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to assess the situation of natural gas security in major countries, this study introduces and revises APERC's 4A Energy Security to construct a scientific and quantifiable natural gas security indicator system by using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Delphi method. The study draws the following conclusions. (1) The countries ranking at the top of natural gas security list are natural gas exporters with excellent performance in four dimensions (Availability, Accessibility, Acceptability, and Affordability). (2) The indicators of recoverable reserves of natural gas and affordability of consumers are more important than the other six indicators. (3) Compared with importers, natural gas export countries have obvious advantages in Availability, Affordability and Accessibility. Finally, according to the main findings in this research, China should make efforts to develop its natural gas industry, improve market mechanism, diversify its import sources, and efficiently utilize natural gas resources.

Keywords: natural gas security; "4A model"; indicator system; comprehensive evaluation