



DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-2255

“双碳”目标下能源安全定量评价方法

梁金强^{1,2}, 刘丹竹^{2,3}, 徐庶亮², 叶茂^{1,2}, 刘中民^{1,2,3}

(¹中国科学技术大学化学与材料科学学院, 安徽 合肥 230026; ²中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为应对全球气候变化, 中国提出了“2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和”的“双碳”目标。在“双碳”目标下, 中国的能源消费结构由传统化石能源为主向可再生能源为主转变, 能源结构的转变导致能源安全的内涵发生了改变, 能源安全评价方法也将随之发生变化。本文主要总结了各类能源安全的定量评价方法, 对比和分析了这些方法的优缺点以及适用范围, 详细阐述了基于能源供应安全评价和基于国家或区域能源安全评价方法。在“双碳”目标下, 能源安全指标参数与以往化石能源供应安全的评价指标不同, 在参数选择上更加关注二氧化碳、二氧化硫、颗粒物的排放等环境指标, 以及与之相关的水、粮食等也作为重要的评价指标纳入到能源安全定量评价体系中。在“双碳”目标下, 特别是能源结构转型的过渡期, 建立合理的能源安全定量评价体系具有重要的现实意义。

关键词: “双碳”目标; 能源; 安全; 环境; 可再生能源; 安全评价

中图分类号: TE3; TK01

文献标志码: A

文章编号: 1000-6613 (2022) 03-1622-12

Quantitative evaluation method of energy security under dual carbon target

LIANG Jinqiang^{1,2}, LIU Danzhu^{2,3}, XU Shuliang², YE Mao^{1,2}, LIU Zhongmin^{1,2,3}

(¹ School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

² Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116021, Liaoning, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: China has put forward the ambitious goal of “carbon peak by 2030 and carbon neutral by 2060” in order to cope with global climate change. Under the dual carbon target, China’s energy structure will transform from the traditional fossil energy to the renewable energy. The transformation of energy structure changes the connotation and evaluation methodology of energy security. The quantitative evaluation methods of energy security are summarized. The advantages and disadvantages of these quantitative methods are analyzed and the scope of their application is marked. The evaluation methods based on energy supply security and national and regional energy security are elaborated. Under the dual carbon target, the parameter of energy security index is different from the previous evaluation index of fossil energy supply security. In parameter selection, more attention is paid to environmental indicators such as emissions of carbon dioxide, sulfur dioxide and particulate matter, and related water and food are also included in the quantitative evaluation system of energy security as important evaluation indicators.

收稿日期: 2021-11-03; 修改稿日期: 2021-12-14。

第一作者: 梁金强 (1983—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事能源安全模型及量化研究工作。E-mail: lj@dicp.ac.cn。

通信作者: 徐庶亮, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为化工流体力学和能源安全。E-mail: shl@dicp.ac.cn。叶茂, 研究员, 博士生导师, 研究方向为催化反应工程、多相流模拟与测量和人工智能与机器学习。E-mail: maoye@dicp.ac.cn。

引用本文: 梁金强, 刘丹竹, 徐庶亮, 等. “双碳”目标下能源安全定量评价方法[J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1622-1633.

Citation: LIANG Jinqiang, LIU Danzhu, XU Shuliang, et al. Quantitative evaluation method of energy security under dual carbon target[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1622-1633.

Under the dual carbon target, especially during the transition period of energy structure transformation, it is of great practical significance to establish a reasonable quantitative evaluation system of energy security.

Keywords: dual carbon target; energy; safety; environment; renewable energy; security evaluation

随着我国提出“2030年碳达峰、2060年碳中和”的目标，以化石资源为主导的能源消费结构亟需转型，而逐步建立以可再生能源为主导的能源体系成为能源革命的主要内容。传统化石资源主要包括煤炭、石油和天然气，我国的资源禀赋是油气资源不足而煤炭相对丰富。因此，在以化石资源为主导的能源消费结构中，2020年煤炭的消费占比高达56.8%，导致碳排放急剧上升，随着全球能源绿色化的推进，碳排放等环境因素必然成为限制我国发展的重要因素。

能源安全是国家安全系统中的重要组成部分，在全球气候变化和碳中和的大背景下，新时代的能源安全已成为世界各国重要关注点之一^[1-3]。但是，能源安全是一个动态变化的概念，在不同的国家地区、不同的历史时期甚至不同的能源结构下，具有不同的内涵^[4-6]。Yergin^[7]认为，能源消费国与能源生产国在能源安全的理解上存在差异。对于能源出口国来说，能源安全是指“需求安全”。相比之下，对于能源消费国来说，能源安全是“供应安全”，能源供应充足可靠，价格合理。

随着全球气候变化及《巴黎协定》的签订^[8]，碳排放等环境因素被纳入能源安全的范畴之内。在中国提出“双碳”目标之后，能源安全在我国的内涵也将随之发生大的变化，特别是在传统的化石资源为主的能源结构向以可再生能源为主的能源结构的转型期，影响能源安全的因素将发生重大变化。作为能源安全研究的重要方面，“双碳”目标下的能源安全定量评价也需作出适当的调整。

本文梳理了能源安全研究的历史演变，总结了关于能源安全定量评价的指标以及方法，希望为“双碳”大背景下中国能源安全评价提供参考，最后讨论了“双碳”目标下能源安全定量评价面临的挑战和机遇。

1 能源安全研究进展

社会发展的进程伴随着技术革命和能源革命^[9]，每一次社会的进步和重大变革都离不开技术的突破，技术的变革带动能源结构的变化^[10]。回顾能源发展的历史，每一次工业化都伴随着能源脱碳^[11]。能源利用方式从早期以木材直接燃烧，发展

到煤炭、石油和天然气为主。在不久的将来，化石燃料将最终被新能源所取代，能源利用将进入清洁、智能化时代（图1）。不同的能源结构赋予不同的能源安全内涵^[12-13]。

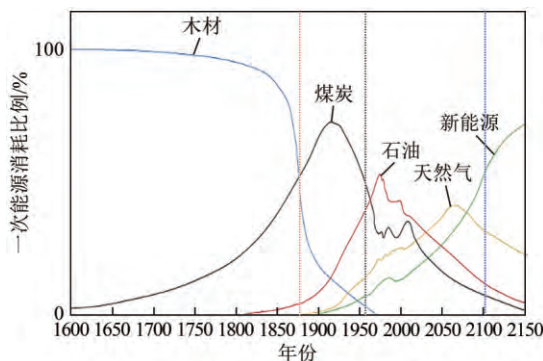


图1 世界能源结构中主导能源的演变^[9]

能源安全的概念由国际能源署在1974年第一次提出，主要是针对第一次世界石油危机可能引发的石油供应中断，其核心是“稳定原油供应和价格”。随后，世界各国不断扩展能源安全定义的内涵，将其延伸到生产安全、运输安全、消费安全、经济安全、生态环境安全等多个方面^[14]。美国对能源安全的思考起始于1973年的石油危机，时任美国总统尼克松提出“美国能源独立”口号，研究可再生能源等替代技术，保障美国能源安全。2005年之前，美国的能源消费结构中煤炭和煤电占比分别维持在24%和50%以上，2005年以后，随着美国页岩气的大规模发展和风电、光伏发电经济性的不断提高，煤炭和煤电的占比进入快速下降通道。2019年，美国煤炭地位发生了历史性的变化，降至11.3%，而可再生能源占比提高到11.4%，美国首次实现了能源生产量超过能源消费量，由原来的能源进口国转变为能源出口国，其能源安全由原来的供应安全向环境安全和需求安全转变。2011年中国一次能源消费总量超过美国，成为第一大能源消费国，大量的石油和天然气进口，形成极高的油气对外依存度，国家能源安全存在较大风险。同时，较高的化石能源消费比例伴随着较高的二氧化碳排放量。因此，中国能源消费结构转型迫在眉睫，需同时兼顾经济可持续发展和环境友好。

根据国家可持续发展战略的要求,在《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中明确提出,到2025年,中国非化石能源消费比重达到20%左右;到2030年,非化石能源消费比重达到25%左右,到2060年,绿色非化石能源消费比重达到80%以上,顺利实现碳中和目标。中国的能源安全将从保障化石能源供应逐渐过渡到保障可再生能源的稳定大规模供应,结构转型期内能源安全的定量评价具有特别重要的意义。

2 能源安全评价方法

能源安全是一个随时间而不断丰富的概念,能源安全的研究逐步从定性向定量研究转变,能源安

全评价范围从单一国家或地区的能源子系统(煤炭、石油、天然气等)安全评价延伸到多个国家或全球的综合能源安全评价^[15],从单一因素到经济、政治、军事、环境等多因素综合评价分析。随着能源结构的转型、大数据信息技术的发展,能源安全评价体系还将会进一步扩展。

能源安全评价方法^[16]种类繁多,表1中列举了各种不同情景下能源安全评价指标和方法。这些方法大致可分为两大类:基于能源供应的安全评价和基于国家或区域的能源安全评价。在能源安全指标评价中,变量的数量和类型的选择对能源安全评价结果特别重要^[17],同时,还应特别注意评价所包含变量之间的相关性,其可能导致能源安全指标^[18]的重复或出现误导性结果。

表1 能源安全评价指标

序号	名称	指标	区域	年份	指标数	方法
1	石油进口风险指数 ^[19]	石油进口与世界石油进口总量之比、地缘政治石油供应市场集中、美元指数波动性、油价波动、石油进口价值与国内生产总值之比、运输风险、石油进口依赖、石油进口来源多样化	中国	1993—2011	8	DEA
2	能源供应安全指数 ^[20]	能源出口垄断风险指数、能源进口多样化指数、经济脆弱性指数、原油价格波动风险指数、清洁能源发电比率、能效、准备金与消费比率	中国	1994—2011	7	标准化、均方
3	能源安全风险预测 ^[21]	煤炭、石油、天然气、可再生能源	中国	2020—2029	4	灰色模型
4	能源安全风险 ^[22]	能源生产、能源潜力、能源独立性和能源多样化、能源价格、电力成本和能源支出、每户平均能耗、室内平均取暖面积、总能源消耗的电力百分比、有天然气的人口百分比、供电的可靠性、每户家庭的平均停电时间、输电线路的长度和容量、天然气管道里程、能源转换效率、电力的利用率、电厂用电量与发电量之比、输配电损失、能源强度、研究强度、烟尘排放量、二氧化硫排放量、二氧化氮排放量、能源工业投资、政府效率以及政府节能环保支出占总支出的百分比	中国	2005—2017	28	AHP
5	能源安全指标 ^[23]	自给率、人均能源生产、人均能源消耗、人均用电量、能量强度、CO ₂ 人均排放量、碳强度、二氧化硫排放量、环境污染控制投资、能源行业投资、油价、电价、人均国内生产总值	中国	2004—2017	13	熵权重法
6	能源安全性能 ^[24]	一次能源生产、人均化石燃料储备、自给率、能源消费的多样性、汽油价格稳定性、燃煤电价、电力在总能耗中所占份额、人均国内生产总值(GDP)购买的汽油数量、能量强度、输配电损失、每户平均停电时间、发电厂的利用、森林覆盖率、人均废水排放量、单位GDP温室气体排放量、人均二氧化硫排放量、人均二氧化氮排放量、能源工业投资、研究强度、节能环保	中国	2013	20	AHP
7	能源安全状况 ^[25]	煤炭储备与生产比率、石油进口依存度、天然气储备与消费比率、传统热电的可用性系数、非热电(包括核能和可再生能源)的可用性系数、能源强度、化石燃料发电厂的总发电效率、原油加工能力、开采行业的专利、能源行业技术更新改造投资/能源行业国有单位固定资产投资、中国CO ₂ 的份额、全球CO ₂ 排放量排放、中国的SO ₂ 排放量、中国烟尘排放量、可再生能源在总发电量中所占份额、核能在总发电量中所占份额、(煤炭、石油、电力)出厂价格指数、煤炭价格波动、人均能源消耗	中国	1980—2010	20	4-AS框架分析
8	中国能源安全综合指数 ^[26]	能源储备/生产比率、能量强度、人均能源消耗、能源自给率、能源价格波动比、能源储备率、能源进口多样化比率、能源多样化指数、能源生产安全指数、碳排放强度、单位能耗碳排放指数、二氧化硫单位能耗排放、电力在能源最终用途中所占份额、清洁和可再生能源的份额	中国	1996—2009	14	AHP

续表1

序号	名称	指标	区域	年份	指标数	方法
9	新加坡能源安全指数 ^[27]	能源强度、原油价格、天然气价格居民电价、能源在制造业成本占比、能源进口依赖度、燃油在总能源中的比例、国内石油消耗量与炼油厂产量之比、战略石油储备、发电技术多样性、电力负荷系数、系统平均中断时间指标、系统平均中断频率指标、人均能耗、发电热效率、人均GDP能耗、陆地运输燃料多样性、人均碳排放、碳强度、碳排放因子、可再生能源比例、公共交通的占比	新加坡	1990—2010	22	指标归一化乘以权重
10	能源安全指数 ^[28]	石油进口依赖、天然气进口依赖、对石油运输燃料的依赖、零售价、汽油价格、客车的公路燃料强度、能源强度、人均用电量、二氧化硫排放、二氧化碳排放量	经济合作与发展组织（简称经合组织）	1970—2010	10	标准化
11	天然气供应安全指数 ^[29]	气体强度、进口依赖、生产与消费比率、地缘政治风险	亚洲经济体	1996—2009	4	标准化权重
12	天然气供应安全指数 ^[30]	气体强度、进口依赖、生产与消费比率、地缘政治风险	亚洲天然气净进口国	2006—2008	4	标准化权重
13	能源供应安全指数 ^[31]	能源供应多样化、能量强度、单位发电成本、进口电力与总用电量之间的货币份额、单位发电量CO ₂ 排放量	泰国	2010—2030	5	权重
14	能源依赖指数 ^[32]	净进口占一次能源的份额、进口支出占国内生产总值比例、出口与生产比率、出口收入占GDP的比重、贸易伙伴市场集中度、主要贸易伙伴的政治稳定、全球能源贸易开放、能源组合的多样性、国内储备生产、自给自足、贸易伙伴的SWI多样性、可能供应商、合同年期限、战略应急储备、存储容量	东南亚	2012	15	聚类
15	能源安全指数 ^[33]	能源自给率、能源多样性、电力可用性系数、能量强度、电力和热电厂总热效率、配电效率、碳强度、人均能耗、化石在一次能源消耗总量中所占份额	新加坡、韩国、日本和中国台湾	1990—2012	9	主成分分析
16	综合能源安全指标 ^[34]	一次能源总和、人均能耗、人均用电量、一次能量强度、最终能量强度、传输损失、转化损失、储备生产率（原油、天然气、煤炭）、工业能源强度、农业能源强度、商业能源强度、人均家庭用电、人均家庭用电、运输能量强度、可再生能源在总发电量中所占的份额、可再生能源占总能源的份额、可再生能源占化石能源的份额、净能源进口依赖性、人均排放量、单位GDP排放、家庭用电、用于电力的收入份额、每户住宅能源	泰国	1986—2030	25	主成分分析
17	能源安全性 ^[35]	可用性、可负担性、效率、可接受性	印度尼西亚	2010—2030	12	主成分分析
18	能源安全指标 ^[36]	石油供应风险指标、石油进口强度、石油强度、石油份额和石油净进口依赖性、天然气供应风险指标、天然气进口强度指标、天然气强度指标、天然气份额指标、天然气净进口依赖性、燃料份额多样性、非碳基燃料份额、可再生燃料份额、碳排放强度和人均碳排放量	斯里兰卡、泰国和越南	1990—2010	15	优化模型
19	马来西亚能源安全 ^[37]	人均一次能源供应、电气化水平、获得现代居民生活燃料水平、净进口与消费比率（煤炭、原油、成品油、天然气、电力）、已探明储量与产量比率（煤炭、原油、天然气）、生产多样性指数（煤炭、原油、天然气）、燃料混合多样性指数（一次能源、发电、运输部门）、炼油厂产出与产能比率、实际发电量与发电潜力比率、库存与年消费总量比（原油、成品油）、电力零售价格与GDP之比（工业、商业、住宅）、液体燃料零售价格与GDP之比（柴油、汽油）、能源补贴与政府预算比率、能源进口成本与出口总额之比、居民生活人均能源消耗、运输部门人均公里能源消耗、能源强度（工业、商业、农业）、单位能源排放量、人均排放量	印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、泰国和越南	2002—2008	35	标准化、加权
20	能源安全指数 ^[38]	可用性、可负担性、效率、环境管理	经合组织	1970—2007	10	主成分分析
21	能源安全性能 ^[39]	一次能源供应总量、一次能源燃料（煤炭、石油和天然气）的平均储备与生产比率、自给率、可再生能源在一次能源供应总量中所占份额、电价稳定性、拥有高质量电网连接的城乡电力用户比例、依赖传统燃料的家庭、汽油价格、碳排放强度、能量强度、能源效率、能源资源和库存、森林覆盖、供水、人均碳排放、人均二氧化硫排放量、全球治理评级、能源出口、人均能源补贴、能源信息质量理	主要经济体和东盟国家	1990—2010	20	主成分分析
22	能源不安全指数 ^[40]	石油的重要性、依赖进口石油（特别是从中东进口石油）	亚太地区 and 欧洲	1995—2015	3	主成分分析
23	能源安全水平 ^[41]	从技术性、经济性和社会性三个维度七个大类（电、气、油、煤、核、生物、热）共计61个因素，如技术中：电力总装机容量与最大电力需求之比、电厂最大容量与整个系统装机容量之比等	立陶宛	2007—2010	61	权重

续表1

序号	名称	指标	区域	年份	指标数	方法
24	能源安全水平 ^[42]	从技术性、经济性和社会性三个维度七个大类(电、气、油、煤、核、生物、热)共计61个因素,如技术中:电力总装机容量与最大电力需求之比、电厂最大容量与整个系统装机容量之比等	立陶宛	2007—2010	68	标准化、权重
25	能源供应指数 ^[43]	能量强度、碳强度、进口依存度(煤炭、石油和天然气)、能源多样性、发电能力、运输能源需求	欧盟	2010—2030	8	加权平均聚合
26	国家能源安全指数 ^[44]	国外能源供应安全(外部)和国家能源基础设施(内部)	意大利	2014	2	情景和概率分析
27	能源供应安全 ^[45]	碳排放量、能源花费、事故、死亡率、事故频次、最大伤亡、井喷、恐怖袭击、消费多样性、能源多样性、世界(石油、天然气、煤炭)市场多样性	欧盟	2050	13	MCDA分析
28	石油进口脆弱性指数 ^[46]	进口依赖、价格、进口多样化、石油在能源进口总额中所占份额	土耳其	1968—2007	4	主成分分析
29	能源供应风险指标 ^[47]	原油、天然气	德国和美国	1980—2004	1	标准化
30	供求指数 ^[48]	需求强度、工业、住宅、服务业、运输、供应、能源转换和传输(电力、气、热、油)、一次能源供应(油、气、煤、核、可再生能源)	爱尔兰	2008—2014	39	供需指数分析
31	外部能源供应对欧盟能源风险的贡献 ^[49]	煤炭、石油、天然气	欧盟成员国	2006	2	主成分分析
32	能源安全价格指数和物理可用性指数 ^[50]	价格、物理可用性	法国	2004—2030	2	集中度
33	能源安全指数 ^[51]	能源和经济效益、可负担性、可用性、环境管理	欧盟	2005—2014	11	主成分分析
34	能源安全指数 ^[52]	能源供应多样性、内部政治稳定、国内能源效率	中欧和东欧	2005	12	主成分分析
35	能源安全指数 ^[53]	能量强度、消费、依附、国内生产总值、碳强度、可再生能源和核能份额	欧盟	1990—2012	6	主成分分析
36	石油脆弱性指数 ^[54]	石油消费、市场流动性、多样化、进口依赖、地缘政治风险	欧盟	1995—2007	6	主成分分析
37	综合能源安全指标 ^[55]	能量强度、碳强度、高消费电子中能量比重、中型工业用户的电价、能源进口依赖性、石油进口来源多样化、能源组合的多样化、可再生能源在能源组合中所占份额	波罗的海国家	2008—2012	9	DEA
38	能源安全指数 ^[56]	可用性、时间可访问性、当前可访问性、可负担性、可接受性	向加拿大东部出口石油的国家	1998—2008	5	主成分分析
39	美国能源安全风险指数 ^[57]	地缘政治、经济、可靠性、环境等	美国	1970—2040	37	主成分分析
40	国家/地区特定指数 ^[58]	原油、天然气	主要国家	1990—2008	2	比重
41	能源可持续性指数 ^[59]	人口密度、人居能耗、人均GDP、人居可再生能源生产、人均化石燃料消耗量、可再生发电比例、可再生发热比例、可再生电力/火电、当地居民与旺季游客的比例	农村社区	2009	9	主成分分析
42	脆弱性综合指数 ^[60]	GDP、能源进口依赖性、CO ₂ 排放与能耗的比率、电力供应脆弱性、运输燃料的多样性	工业化国家	2003	5	ED标准化
43	石油脆弱性指数 ^[61]	石油进口价值与GDP、单位GDP石油消费、人均GDP和石油在能源供应总量中所占份额、国内储备与石油消费之比	石油净进口国	2014	7	主成分分析
44	国际能源安全风险指数 ^[62]	全球燃料、燃料进口、能源支出、价格和市场波动、能源使用强度、电力部门、运输部门、环境等	能源消费大国	1980—2004	29	主成分分析
45	能源架构性能指数 ^[63]	经济增长和发展、环境可持续性、能源获取和安全	全球	2015	18	标准化、聚合
46	能源安全指数 ^[64]	人均能源生产、自足率、储量(石油、天然气、煤炭)与生产比率、SWI指数、生产充足率、石油产品价格与人均GDP之比、电价与人均GDP之比、电气化比率、生物质利用的人口百分比、千人车辆拥有率、单位能源的排放量、排放强度、能量强度、配电损失	全球	2008—2013	14	主成分分析
47	能源亲和力指数 ^[65]	国际能源关系(竞争和互补)	全球	2000—2008	2	主成分分析

续表1

序号	名称	指标	区域	年份	指标数	方法
48	能源安全指数 ^[66]	能源生产总量与能源消耗总量之比、净燃料进口占能源使用百分比、已探明储量(天然气、煤炭、原油)、能源供应的多样性、发电的多样性、获得永久电力连接的天数、配电损失与净发电量之比、人均最终能源消耗、有电力供应的人口百分比、获得非固体燃料的人口百分比、汽油价格、非化石燃料占一次能源供应总量的比重、可再生能源发电量占总发电量的份额、碳因子、能量强度、政治稳定、监管质量、政府效力、法治、控制腐败、人均国内生产总值	全球	2014	23	BSM
49	能源过渡指数 ^[67]	系统性能得分、过渡准备分数	全球	2013—2018	40	主成分分析
50	能源可持续性指数 ^[68]	能源安全、社会公平、减轻环境影响、政治力量、社会力量、经济实力	全球	2011	22	主成分分析
51	能源三叶草指数 ^[69]	能源安全、能源权益、环境可持续性	全球	2017	35	主成分分析
52	能源安全指数 ^[70]	能源强度、人均能耗、碳排放强度、研究强度、(石油、天然气、电力)价格、人均二氧化碳排放量、(煤炭、石油、天然气、总能源)储产比、能源依存度、人均二氧化硫排放量、二氧化硫排放量、人均电力供应、自给率、二氧化碳排放量、石油依存度、能源进口、人均GDP、转换损失、森林覆盖率、净能源依存度、能源出口、用水量、人均能源补贴、温室气体排放、政策稳定性、电力效率、能源信息质量、居民对传统燃料的依赖、市场流动性	全球	1997—2017	18	PCA、DEA
53	能源安全指数 ^[71]	自然资源消耗(化石燃料消耗、可再生能源消耗、电力消耗、人均能耗、单位GDP能耗、能源进口净额、燃料进口)、枯竭(能源消耗、矿物消耗、自然资源枯竭、森林净耗)、有效利用(一次能源的能源强度、单位GDP能耗、输配电损失、燃料出口)、新能源(可再生能源消耗、替代能源和核能、可燃可再生能源和废物、可再生能源发电量占比、可再生能源发电量)、污染(颗粒物排放、二氧化碳排放、人均碳排放)、获得性(可获得电力比值、农村可获得电力比值、城市可获得电力比值)	全球	2000—2020	29	主成分分析

2.1 基于能源供应的能源安全评价

根据不同地区资源禀赋差异,能源安全的定量评价主要聚焦于主导能源的供应。Iqbal等^[72]针对石油进口国家的能源石油供应安全,发展了石油供应脆弱性评估系统,用于定量评估能源安全。该系统将石油进口费用与GDP比率、市场流动性、人均GDP、地缘政治风险、运输风险、油价波动和美元波动等作为评价因子,得到石油脆弱性函数(OVI)。该函数可表示为式(1)。

$$OVI = 0.21Cost + 0.12GDP \text{ per capita} + 0.16GOPR + 0.08ML + 0.07ODE + 0.17DIV + 0.05UDVI + 0.12OPVI + 0.04TR + \varepsilon \quad (1)$$

式中, Cost是指进口原油的费用占GDP的比例; GDP per capita是人均GDP; GOPR为地缘政治风险; ML为市场流动性; ODE为石油依赖性; DIV为美元指数的波动; UDVI为美元指数波动率; OPVI为石油价格脆弱指数; TR为运输风险; ε 为常数项。

使用该评价方法可以评估进口石油国家的石油供应风险。研究发现,各国在石油供应脆弱性上存在相当大的差异,安全性最高的国家是加拿大、新加坡、英国和法国、意大利、德国和美国。风险最高的国家是阿富汗、巴基斯坦、尼泊尔、不丹、斯

里兰卡和孟加拉国。中国、比利时、泰国、西班牙、荷兰、日本、韩国、印度处于风险较低的水平。基于单一能源子系统的石油供应安全,国内外众多专家和学者发展了石油供应安全的定量评价方法^[19, 46, 54, 58, 73],考察了石油进口国、欧盟和中国等国家的能源安全水平。第二次工业革命后,石油作为一个重要的战略资源,石油中断带来的能源安全危机,对世界各国影响很大,尤其是石油进口国。但是,随着能源多样化和低碳化发展,石油在一次能源中的地位逐渐下降,石油供需矛盾向能源低碳化和绿色化利用转变。因此,该评价方法中各指标权重会随着时间发生变化,石油脆弱性指标在整个能源安全体系中影响也会降低。

目前,煤炭资源在我国能源消费结构中占主导地位。Yang等^[74]发展了熵重法和神经网络相结合的方法,综合考虑了煤炭储备、煤炭工业发展水平、环境可持续性、煤炭供应、煤炭需求和煤炭进出口等因素,从国家和省级两个层面分长期和短期制定不同的评价指标参数,定量评价了中国各个省份的煤炭资源供应安全。研究发现,东南部沿海省份的煤炭资源安全水平相当低,西部和北部省份的煤炭资源安全较高。福建、山东、湖南、广东等地的煤炭资源安全一直处于较低水平。陶然等^[14, 75-76]基于

单一能源(煤炭)子系统的供应安全评价方法,分别考察了中国和波兰等国家的能源安全水平。单一能源(煤炭)子系统的供应安全评价方法主要用于煤炭消费占比较高的少数几个国家或地区,煤炭区域供应安全是研究的一个方向。在“双碳”目标下,煤炭供应安全向煤炭利用的环境安全方向聚焦。

天然气因具有较高的氢碳比,是当下全球着力发展利用的清洁资源,在实现碳中和的过程中发挥着重要的作用。Cablu等^[29]建立了气体强度、进口依赖、生产与消费比率、地缘政治风险4个因素关联的天然气脆弱性指数,考察了2008年亚洲7个天然气进口国天然气供应中断的相对脆弱性。因为国内天然气产量很大,且其在能源结构中所占份额很小,印度和中国相对受到天然气供应中断的影响较小。此外,Cabalu^[30]和Glynn等^[48]发展了基于天然气供应,建立了天然气供应安全指数评价体系,天然气进口多样化和能源结构多样化可以降低天然气进口中断带来的影响。政府还可以选择通过鼓励研究和开发提高天然气使用效率的技术,从而减少对天然气的总体依赖。天然气作为清洁能源,是未来可以大力发展的重要能源,且天然气在全球能源消费中的占比逐年增加,天然气供应安全评价方法将是未来一个重要的能源安全评价方法。同时,天然气参与供热和供电两大功能将会与可再生能源耦合互补,弥补可再生能源在时空上的不平衡。

可再生能源作为未来大力发展的主要替代能源,在脱碳进程中发挥着重要的作用^[77]。在新的能源体系下,环境友好也是能源安全的重要因素,因此,有学者研究了可再生能源对传统电力的冲击和挑战^[78]。可再生能源的投资成本在持续下降,再加上众多的激励措施,导致可再生能源在能源消费结构中的比例迅速上升。以上这些变化给电力调控带

来了巨大的挑战 and 不确定性,可再生能源的渗透使传统电力在调度方面面临更多的竞争^[79]。可再生能源在时间和空间上存在巨大的不平衡性,当光伏发电在傍晚时分减少,而且没有足够的替代发电能力来满足需求时,就会给能源安全带来负面影响。能源安全水平不仅取决于可再生能源份额的增加,还取决于各国能源资源综合体的结构以及各种可再生能源的发展水平^[80]。

基于能源供应的安全评价方法一般用于评价单一能源子系统,这些安全评价方法针对性较强,能够准确的评价某单一能源子系统的供应安全水平,但是用于评价综合能源的安全性还存在很大不足。

2.2 基于国家或区域的能源安全评价

能源安全的定量评价一直受到国际社会的广泛关注,世界各国纷纷开发了适合本国特点的能源安全定量评价体系^[15]。如世界经济合作组织建立了能源安全指数评价体系,该体系采用4个维度(可用性、可承受度、能源效率和环境影响)来评价经合组织内各个国家的能源安全水平(见表2)。通过对经合组织内22个国家1970—2010年期间的数据分析,发现许多工业化国家在保障安全、可靠和可负担的能源供应以及向低碳能源系统过渡等方面存在一定的问题,这些问题的发现可为能源政策的制定提供理论依据^[38]。

Wu等^[70]使用数据封装分析法评价了全球能源安全,研究数据的时间跨度为1997—2017年,研究对象为全球125个国家。结果表明,欧洲国家在全球能源安全排名中名列前茅,而非洲国家则排在底层。此外,瑞士在能源安全排名中保持了21年的榜首。澳大利亚、英国和爱尔兰都属于进步的群体和能源安全最高的群体。相比之下,尼泊尔、厄立特里亚、贝宁、刚果民主共和国、津巴布韦和海地在21年间的倒退幅度最大,尼泊尔也是最近几

表2 经合组织国家的能源安全性能评价体系指标

维度	解释	指标
可用性	使用于提供能源服务的燃料多样化,以及使用这些燃料的设施的位置多样化,促进能够迅速从攻击或中断中恢复过来的能源系统,并尽量减少对外国供应商的依赖	石油进口依存度 天然气进口依存度 对石油运输燃料的依赖
经济性	为消费者提供负担得起的能源服务,最大限度地减少价格波动	居民电价 汽油价格
能源和经济效益	提高能源设备性能,改变消费者态度,降低能源价格风险,缓解能源进口依赖	客车的公路燃料强度 单位GDP能耗强度 人均用电量
环境管理	保护自然环境	二氧化硫排放 二氧化碳排放量

年表现最差的国家之一。该方法应用到全球125个国家，适用范围较广，但由于每个国家能源安全指标数据的提供有限，能源安全选定的维度和指标必然受到限制。因此，得到的评价结果或许与客观实际存在差异。

Gong等^[23]采用熵权重法对中国30个省份的能源安全进行了定量评价。该方法克服了过程中指标权重的主观性，避免了主观权重引起的数据差异。结果显示，内蒙古、山西和陕西的能源安全水平在2017年位列全国前三。从2004—2017年，中国能源安全经历了变革、衰退、波动、下降和改善5个阶段。Geng等^[20]针对中国的能源供应安全，从能源外部供应风险、能源进口可负担性、能源技术与能效发展、能源资源储备4个维度提出了包括7个综合评价指标的定量评价体系。该体系中7个指标归一化处理后，得出了1个综合指标 I_0 表征中国能源供应安全形势。上述两种能源安全评价方法分别从区域和时间上评价了中国能源安全性，对中国的能源安全和政策的制定具有一定的参考价值。但是，这两种方法均没有考虑可再生能源消费数据，没有考虑可持续性对能源安全的影响。因此，在“双碳”目标下，上述两种能源安全评价方法在评价和量化当前的能源安全方面具有一定的局限性。

城市是能源消费中的重要基本单位，Li等^[7]基于生态网络分析了城市系统能源安全与可持续性，以唐山市为研究对象，建立城市能源生态网络，分析了唐山的城市能源系统。在网络中，节点是部门，路径是部门之间的流动。供热、炼焦、燃气、煤炭产品等行业是系统整体能源的提供者，工业和家庭部门是接收者。研究显示，随着系统能源流动的稳步增加，对干扰的抵抗力也有所增强，该系统更加稳定。然而，工业部门的整体消费最高，家庭部门仍然消耗大量热量。通过引入天然气、太阳能等低碳排放能源，可以增强城市能源系统的稳定性，提高能源安全性。城市能源安全是未来研究的重要方向，生态网络模型可以刻画能源在区域或行业间的流动，与大数据相结合形成智慧能源、智慧城市、智慧交通对未来的城市群或区域经济带的能源互补和产业互通有着非常重要的应用价值。

我国省级能源安全呈现较大差异，Huang等^[8]采用模糊模型和数据封装混合模型评估了我国区域能源安全水平，东部和南部沿海省份的能源安全等级均优于西部和北部地区。中国东南部的能源供应

最为多样化，甚至实现了能源独立。西北地区也是主要能源生产地之一，但偏远恶劣的自然条件阻碍了当地经济发展，导致经济产出低下。尽管东北地区在计划经济时代拥有雄厚的工业基础设施和显著的经济成就，但面临着同样的形势。黄河中西部、东北、中游是三大能源安全等级最差的地区，虽然该地区具有丰富的化石能源和可再生能源，然而，地理偏远、工业结构单一和技术落后阻碍了矿物燃料的有效利用和可再生能源的发展。但是，Li等^[82]根据能源的可得性和稳定性、能源使用维度的可持续性和可接受性建立了能源安全评价体系，却得出截然不同的结果，山西、陕西、四川等自然资源丰富的西北和东北省份能源安全水平较高，而浙江、广西、江西等资源短缺地区的能源安全水平较低。因此，为了加强省级能源安全，建议根据各省不同能源安全水平发展清洁能源，优化终端能源消费结构，提高能效。相同的区域，因为选择的模型和参数的不同，却得出截然不同的结果。模型本身没有好坏之分，模型和参数的选择应充分考虑区域特点，选择适合该区域的模型和参数才能得出可靠的结论。同时，模型和参数也不是适用范围越广就越好。

Zhang等^[22]引入模糊分析（AHP）、灰色关系分析（GRA）和排序优选技术（TOPSIS）混合模型来评估能源安全，将能源安全分为可用性和多样性、可负担性、社会性和平等性、能源基础设施、技术和效率、环境可持续性和治理7个维度28个指标。首先通过绩效分数来评估能源安全，从而确定国家或区域能源安全绩效状态。为了进一步探究导致能源安全性好或差的原因，通过连续问为什么进行定性分析，最终给出根源的解决方案。这两种技术回答了关于能源安全不同问题，一种侧重于如何解决，另一种侧重于原因。应用该模型对2005—2017年河南省能源安全进行了评价。结果表明，这一时期该省能源安全呈上升趋势。2005—2010年，该省的能源安全绩效仍然很低，主要原因是能源结构简单、设备和基础设施陈旧、能源效率和技术落后、能源产品和服务不足以及对能源治理和环境可持续性的认识不足。随着国家和地方经济的发展、科学技术的进步，能源效率不断提高，促进了河南省能源安全水平的提高。2010—2015年，河南省能源消费量逐步上升到2亿多吨标准煤的历史高位，阻碍了能源安全水平的提高，甚至导致一定程度的下降。随着中国经济增长速度放

缓, 政府开始调整产业结构, 减少过剩产能, 实现经济转型。这些都解释了能源安全性能在2010—2015年间震荡和小幅下滑后缓慢而稳定的好转。可以预见, 当中国经济进入“新常态”阶段时, 河南省的能源安全性将继续上升。但是, 河南省要实现较高水平的能源安全还有很长的路要走, 尽管这些年取得了持续改善, 但发展势头依然不强。

基于国家或区域的能源安全评价是一种综合能源安全评价方法, 评价模型中的各参数是根据国家或区域的特点选择, 类似于区域特征参数。因此, 不同的国家或区域的模型参数不同, 同一个模型应用到不同的国家或区域效果不同; 同一国家或区域, 如果特征参数选择不同, 得到的结果也不相同。因此, 基于国家或地区的能源安全评价具有地域特征, 该能源安全评价方法的普适性略差。

3 “双碳”目标下能源安全评价

能源系统是一个综合性的复杂系统, 除了考虑能源本身的属性, 越来越多的评价指标中加入了二氧化碳、人均二氧化碳、森林覆盖率等环境因素。另外, 二氧化硫、大气颗粒物等也作为环境指标用来评价能源安全。

Shittu 等^[83]认为能源安全与自然资源、生态环境之间存在紧密的关系, 以亚洲45个国家为研究对象, 采用1990—2018年的相关数据, 根据最小二乘和误差回归法, 得到生态足迹消耗、自然资源指数、环境绩效指数、能源安全、人均GDP之间的函数关系。研究结果显示, 能源安全和生态足迹之间呈现负相关。生态足迹和经济增长之间为非线性关系, 环境绩效指数促进生态足迹, 但人口增长降低了环境可持续性。

人类生存不可或缺的三大物质是水、食物和能源, 有研究人员将这三者关联起来^[84-85]。Yang 等^[86]基于云模型、灰色模型GM(1,1)和相关性分析方法构建了水资源与能源安全风险评价模型, 定量评价了30个省(区、市)2020年的水资源与能源安全风险。能源安全风险与水资源短缺风险的空间分布明显不一致。例如, 新疆、甘肃、宁夏、山西、陕西、内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁等地的水资源严重短缺, 但能源相对丰富, 属于低风险地区; 北京、河北、青海、河南、江苏、湖北、上海、福建、浙江、广东、广西、安徽等地的能源行业用水与能源生产存在紧密的联系, 能源生产用水大约是能源供应用水的三倍, 电力和热能的生产和供应对

能源生产用水和能源供应用水总量的贡献最大^[87]。

二氧化碳的排放已成为各国能源政策中的一个重要决定因素。Lin 等^[88]通过应用MARKAL模型进行能源需求、供应和能源安全分析。由于清洁能源的贡献, 能源需求多样化指数显示能源资源的多样化水平提高, 石油净进口依赖性和脆弱性指数呈下降趋势, 有利于能源安全。可再生能源在一次能源结构中的比例提高, 将有利于减少二氧化碳的排放。

经济增长、能源消耗和环境保护对各国能源安全政策的规划提出了重大挑战。Huang 等^[89]分析了经合组织国家的能源安全和经济增长与CO₂排放脱钩的相关性。结果显示, 澳大利亚、瑞士、德国、丹麦和瑞典的能源安全和脱钩表现比经合组织其他成员国更稳定、更好。因为这些国家已经实现了碳达峰, 即将实现碳中和, 其经济发展与二氧化碳排放之间的相互作用力较弱, 实现碳中和的目标更加容易。

“双碳”目标下的能源安全评价方法是一种综合能源安全评价方法。该方法充分考虑了环境因素, 尤其将二氧化碳排放量和二氧化碳排放强度纳入评价体系。因此, 相较于前面两种评价方法, 该能源安全评价方法更加全面。但是不同的能源安全评价模型选择的因素各不相同, 各分项指标所占权重还存在很多争议。能源安全评价参数的选取非常重要, 不同的参数的选择, 能源安全评价结果也不尽相同。

4 能源安全评价方法对比

基于能源供应的能源安全评价一般是单一能源子系统的安全评价, 比如煤炭、石油、天然气等的供应安全评价, 单一能源子系统的安全评价具有更好的针对性, 指标参数更加明确, 结果准确性更高。但是, 用于全面评估能源安全存在片面性。

基于国家或区域的能源安全评价是一类包含多参数的综合评价方法, 参数涵盖了能源、经济、政策、技术、环境等多因素, 能够比较全面地反应影响能源安全的众多因素发挥的作用。但是, 这类综合定量评价方法适用于特定的国家或区域, 对于其他国家或区域可能不具有普适性。

“双碳”目标下的能源安全定量评价是一种综合评价方法, 在“双碳”目标下, 影响能源安全的因素中需突出考虑环境因素的影响。加入二氧化碳、人均二氧化碳、森林覆盖率、二氧化硫、大气颗粒物等作为环境中的重要指标, 用来评价能源安

全。二氧化碳排放量与化石能源在能源消费结构中的占比有很大关系，可再生能源作为环境友好型新能源，可以有效降低碳排放。因此，可再生能源也是该方法需要考虑的重要因素。同样的，这类能源安全定量评价方法也存在一定的地域性。

5 结语

能源安全具有时间属性，随着时间变化能源结构发生变化，能源安全的具体内涵也随之变化。能源安全不仅仅是能源本身的安全，还与政治、经济、文化、环境、气候等多种因素相关，能源安全的定量评价非常重要。

能源安全定量评价系统中，能源结构及相应的参数选择很重要。在以化石资源为主的能源体系中，油气煤的供应与利用是能源安全的核心，与此相关的参数选取是定量评价的基础。在以可再生能源为主的能源体系中，风电、光伏发电以及生物质能源等随地区和时间的波动将是影响能源安全的关键，与此相关的环境、生态、气象等参数将显示出非常重要的作用。在“双碳”目标下，CO₂、水、粮食等也应作为重要的评价指标纳入能源安全定量评价体系。

中国作为最大的发展中国家，“双碳”目标下能源转型已经成为非常重要的任务。国家能源安全和经济发展、CO₂减排需要协同一致，特别是在能源安全前提下如何实现能源消费结构平稳转型是一个重要挑战。开展能源安全定量评价，合理规划能源结构，实现能源系统平稳转型，避免局部地区出现“电荒、油荒、气荒”等现象，也是亟需研究的重要方向。

局部区域能源安全是未来发展的一个方向，每一个城市或地域在保障经济高质量发展前提下合理规划能源安全，需要充分考虑本地区资源情况和产业布局。建立“双碳”目标下，全新的区域能源安全定量评价体系，对于实现区域与相邻区域多能互补和产业互补，保障区域能源安全具有重大意义。

对于综合指标的能源安全评价方法来说，确定指标和指标权重是综合指标能源安全评价的重点。在“双碳”目标和能源结构转型的过渡期，建立合理的能源安全评价体系，为区域能源安全和国家政策的制定提供参考。

参考文献

[1] BIELECKI J. Energy security: Is the wolf at the door?[J]. The Quarterly

- Review of Economics and Finance, 2002, 42(2): 235–250.
- [2] GE Fenglong, FAN Ying. Quantifying the risk crude oil imports in China: an improved portfolio approach[J]. Energy Economics, 2013, 40: 72–80.
- [3] BROWN M A, SOVACOOOL B K. Climate change and global energy security: technology and policy options[M]. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2011: 910–912.
- [4] CHESTER L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 887–895.
- [5] SOVACOOOL B K. The methodological challenges of creating a comprehensive energy security index[J]. Energy Policy, 2012, 48: 835–840.
- [6] SOVACOOOL B K, SAUNDERS H. Competing policy packages and the complexity of energy security[J]. Energy, 2014, 67: 641–651.
- [7] YERGIN D. Ensuring energy security[J]. Foreign Affairs, 2006, 85(2): 69.
- [8] BATAILLE C, NILSSON L J, JOTZO F. Industry in a net-zero emissions world: new mitigation pathways, new supply chains, modelling needs and policy implications[J]. Energy and Climate Change, 2021, 2: 100059.
- [9] ZOU Caineng, PAN Songqi, HAO Qun. On the connotation, challenge and significance of China's "energy independence" strategy[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 449–462.
- [10] 李振宇, 黄格省. 推动我国能源生产革命的途径分析[J]. 化工进展, 2015, 34(10): 3521–3529.
- LI Zhenyu, HUANG Gesheng. Analysis on ways to promote energy production revolution in China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(10): 3521–3529.
- [11] 李振宇, 黄格省, 黄晟. 推动我国能源消费革命的途径分析[J]. 化工进展, 2016, 35(1): 1–9.
- LI Zhenyu, HUANG Gesheng, HUANG Sheng. Analysis on ways to promote energy consumption revolution in China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(1): 1–9.
- [12] 中国能源研究会. 中国能源展望2030[M]. 北京: 经济管理出版社, 2016.
- China Energy Research Society. China energy outlook 2030[M]. Beijing: Economy & Management Publishing House, 2016.
- [13] 胡徐腾. 我国化石能源清洁利用前景展望[J]. 化工进展, 2017, 36(9): 3145–3151.
- HU Xuteng. Outlook of clean utilization of fossil energy in China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(9): 3145–3151.
- [14] 陶然, 蔡云泽, 楼振飞, 等. 国内外能源预测模型和能源安全评价体系研究综述[J]. 上海节能, 2012(1): 16–21.
- TAO Ran, CAI Yunze, LOU Zhenfei, et al. Comprehensive research of domestic and foreign energy forecast model and energy safety appraisal systems[J]. Shanghai Energy Conservation, 2012(1): 16–21.
- [15] 李瑶, 沙景华. 欧盟能源政策及其与中国的合作前景[J]. 化工进展, 2011, 30(4): 908–910.
- LI Yao, SHA Jinghua. European Union energy policy and its cooperation prospect with China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(4): 908–910.
- [16] SOVACOOOL B K, MUKHERJEE I, DRUPADY I M, et al. Evaluating energy security performance from 1990 to 2010 for eighteen countries [J]. Energy, 2011, 36(10): 5846–5853.
- [17] ANG B W, CHOONG W L, NG T S. Energy security: definitions, dimensions and indexes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 1077–1093.
- [18] POBREGAR I, ŠIMIĆ G, RADOVANOVIĆ M, et al. The international energy security risk index in sustainable energy and economy transition decision making—A reliability analysis[J]. Energies,

- 2020, 13(14): 3691.
- [19] ZHANG Haiying, JI Qiang, FAN Ying. An evaluation framework for oil import security based on the supply chain with a case study focused on China[J]. *Energy Economics*, 2013, 38: 87–95.
- [20] GENG Jiangbo, JI Qiang. Multi-perspective analysis of China's energy supply security[J]. *Energy*, 2014, 64: 541–550.
- [21] PENG Cheng, CHEN Heng, LIN Chaoran, et al. A framework for evaluating energy security in China: empirical analysis of forecasting and assessment based on energy consumption[J]. *Energy*, 2021, 234: 121314.
- [22] ZHANG L, BAI W, XIAO H J, et al. Measuring and improving regional energy security: a methodological framework based on both quantitative and qualitative analysis[J]. *Energy*, 2021, 227: 120534.
- [23] GONG Xu, WANG You, LIN Boqiang. Assessing dynamic China's energy security: based on functional data analysis[J]. *Energy*, 2021, 217: 119324.
- [24] ZHANG L, YU J, SOVACOOOL B K, et al. Measuring energy security performance within China: toward an inter-provincial prospective[J]. *Energy*, 2017, 125: 825–836.
- [25] YAO L X, CHANG Y. Energy security in China: a quantitative analysis and policy implications[J]. *Energy Policy*, 2014, 67: 595–604.
- [26] WU Gang, LIU Lancui, HAN Zhiyong, et al. Climate protection and China's energy security: win-win or tradeoff[J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 157–163.
- [27] ANG B W, CHOONG W L, NG T S. A framework for evaluating Singapore's energy security[J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 314–325.
- [28] BROWN M A, WANG Yu, SOVACOOOL B K, et al. Forty years of energy security trends: a comparative assessment of 22 industrialized countries[J]. *Energy Research & Social Science*, 2014, 4: 64–77.
- [29] CABALU H, ALFONSO C. Energy security in Asia: the case of natural gas[M]//*Energy economics and financial markets*. Berlin: Springer, 2013: 13–30.
- [30] CABALU H. Indicators of security of natural gas supply in Asia[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 218–225.
- [31] KAMSAMRONG J, SORAPIPATANA C. An assessment of energy security in Thailand's power generation[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014, 7: 45–54.
- [32] KANCHANA K, MCLELLAN B C, UNESAKI H. Energy dependence with an Asian twist? Examining international energy relations in Southeast Asia[J]. *Energy Research & Social Science*, 2016, 21: 123–140.
- [33] LI Yingzhu, SHI Xunpeng, YAO Lixia. Evaluating energy security of resource-poor economies: a modified principle component analysis approach[J]. *Energy Economics*, 2016, 58: 211–221.
- [34] MARTCHAMADOL J, KUMAR S. The Aggregated Energy Security Performance Indicator (AESPI) at national and provincial level[J]. *Applied Energy*, 2014, 127: 219–238.
- [35] PRAMBUDIA Y, NAKANO M. Integrated simulation model for energy security evaluation[J]. *Energies*, 2012, 5(12): 5086–5110.
- [36] SELVAKKUMARAN S, LIMMEECHOKCHAI B. Energy security and co-benefits of energy efficiency improvement in three Asian countries [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20: 491–503.
- [37] SHARIFUDDIN S. Methodology for quantitatively assessing the energy security of Malaysia and other Southeast Asian countries[J]. *Energy Policy*, 2014, 65: 574–582.
- [38] SOVACOOOL B K, BROWN M A. Competing dimensions of energy security: an international perspective[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2010, 35: 77–108.
- [39] SOVACOOOL B K, MUKHERJEE I. Conceptualizing and measuring energy security: a synthesized approach[J]. *Energy*, 2011, 36(8): 5343–5355.
- [40] WU K, FESHARAKI F, WESTLEY S B. Asia's energy future: regional dynamics and global implications[M]. Honolulu: East-West Center, 2007: 98.
- [41] AUGUTIS J, KRIKŠTOLAITIS R, PEČIULYTĖ S, et al. Sustainable development and energy security level after ignalina NPP shutdown[J]. *Technological and Economic Development of Economy*, 2011, 17(1): 5–21.
- [42] AUGUTIS J, KRIKŠTOLAITIS R, MARTISAUSKAS L, et al. Energy security level assessment technology[J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 143–149.
- [43] BADEA A C, ROCCO S C M, TARANTOLA S, et al. Composite indicators for security of energy supply using ordered weighted averaging [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(6): 651–662.
- [44] BOMPARD E, CARPIGNANO A, ERRIQUEZ M, et al. National energy security assessment in a geopolitical perspective[J]. *Energy*, 2017, 130: 144–154.
- [45] ECKLE P, BURGHER P, HIRSCHBERG S. Final report on multi criteria decision analysis (MCDA), security of energy considering its uncertainty, risk and economic implications[R]. EU, Secure, 2011: 1–72.
- [46] EDIGER V Ş, BERK I. Crude oil import policy of Turkey: historical analysis of determinants and implications since 1968[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(4): 2132–2142.
- [47] FRONDEL M, SCHMIDT C M. Measuring energy security—A conceptual note[J/OL]. *Ruhr Economic Paper*. <https://ssrn.com/abstract=1161141>.
- [48] GLYNN J, CHIODI A, Ó GALLACHÓIR B. Energy security assessment methods: quantifying the security co-benefits of decarbonising the Irish energy system[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2017, 15: 72–88.
- [49] LE COQ C, PALTSEVA E. Measuring the security of external energy supply in the European Union[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4474–4481.
- [50] LEFÈVRE N. Measuring the energy security implications of fossil fuel resource concentration[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(4): 1635–1644.
- [51] OBADI S M, KORCEK M. EU energy security—multidimensional analysis of 2005—2014 development[J]. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2017, 7(2): 113–120.
- [52] ONAMICS G. Onamics energy security index—central and eastern europe[M]. Washington DC: Onamics LLC, 2005: 15.
- [53] RADOVANOVIĆ M, FILIPOVIĆ S, PAVLOVIĆ D. Energy security measurement—A sustainable approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 1020–1032.
- [54] ROUPAS C V, FLAMOS A, PSARRAS J. Measurement of EU27 oil vulnerability[J]. *International Journal of Energy Sector Management*, 2009, 3(2): 203–218.
- [55] ZENG S Z, STREIMIKIENE D, BALEŽENTIS T. Review of and comparative assessment of energy security in Baltic States[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 185–192.
- [56] HUGHES L, SHUPE D. Creating energy security indexes with decision matrices and quantitative criteria[C]//*World Energy Council's 2010 Montreal Conference*. Halifax, Nova Scotia, Canada: Energy Research Group, 2010.
- [57] Index of U.S. energy security risk[EB/OL]. <https://www.globalenergyinstitute.org/>.
- [58] COHEN G, JOUTZ F, LOUNGANI P. Measuring energy security: trends in the diversification of oil and natural gas supplies[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(9): 4860–4869.
- [59] DOUKAS H, PAPADOPOULOU A, SAVVAKIS N, et al. Assessing energy sustainability of rural communities using principal component

- analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(4): 1949–1957.
- [60] GNANSOUNOU E. Assessing the energy vulnerability: case of industrialised countries[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(10): 3734–3744.
- [61] Centre for Environmental Law & Policy. Environmental performance index, 2018 Technical appendix[R]. Yale University, 2018.
- [62] International index of energy security risk[EB/OL]. <https://www.globalenergyinstitute.org/>.
- [63] BOCCAUTOR R, HANNA A. Global energy architecture performance index report[R]. World Economic Forum, 2016.
- [64] ERAHMAN Q F, PURWANTO W W, SUDIBANDRIYO M, et al. An assessment of Indonesia's energy security index and comparison with seventy countries[J]. *Energy*, 2016, 111: 364–376.
- [65] MARÍA MARÍN-QUEMADA J, MUÑOZ-DELGADO B. Affinity and rivalry: energy relations of the EU[J]. *International Journal of Energy Sector Management*, 2011, 5(1): 11–38.
- [66] WANG Qiang, ZHOU Kan. A framework for evaluating global national energy security[J]. *Applied Energy*, 2017, 188: 19–31.
- [67] World Economic Forum. Fostering effective energy transition, a fact-based framework to support decision-making[R]. 2018.
- [68] World Energy Council. Assessment of country energy and climate policies, policies for the future[EB/OL]. <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-2011-policies-for-the-future-assessment-of-country-energy-and-climate-policy>.
- [69] World Energy Council, World energy trilemma index. World trade organization, 2018. World trade statistical review[EB/OL]. <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-index-2018>.
- [70] WU T H, CHUNG Y F, HUANG S W. Evaluating global energy security performances using an integrated PCA/DEA-AR technique[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 45: 101041.
- [71] STAVYTSKYI A, KHARLAMOVA G, KOMENDANT O, et al. Methodology for calculating the energy security index of the state: taking into account modern megatrends[J]. *Energies*, 2021, 14(12): 3621.
- [72] IQBAL W, FATIMA A, HOU Y M, et al. Oil supply risk and affecting parameters associated with oil supplementation and disruption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255: 120187.
- [73] GUPTA E. Oil vulnerability index of oil-importing countries[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(3): 1195–1211.
- [74] YANG Yuexiang, ZHENG Xiaoyu, SUN Zhen. Coal resource security assessment in China: a study using entropy-weight-based TOPSIS and BP neural network[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2294.
- [75] YANG Qing, ZHANG Lei, ZHANG Jinsuo, et al. System simulation and policy optimization of China's coal production capacity deviation in terms of the economy, environment, and energy security[J]. *Resources Policy*, 2021, 74: 102314.
- [76] RYBAK A, RYBAK A. Methods of ensuring energy security with the use of hard coal—The case of Poland[J]. *Energies*, 2021, 14(18): 5609.
- [77] LI Aimin, ZHENG Hongmei. Energy security and sustainable design of urban systems based on ecological network analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107903.
- [78] BIGERNA S, D'ERRICO M C, POLINORI P. Energy security and RES penetration in a growing decarbonized economy in the era of the 4th industrial revolution[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 166: 120648.
- [79] TRIFONOV I, TRUKHAN D, KOSHLICH Y, et al. Influence of the share of renewable energy sources on the level of energy security in EECCA countries[J]. *Energies*, 2021, 14(4): 903.
- [80] CHEN Yufang, LIN Boqiang. Slow diffusion of renewable energy technologies in China: an empirical analysis from the perspective of innovation system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121186.
- [81] HUANG Beijia, ZHANG Long, MA Linmao, et al. Multi-criteria decision analysis of China's energy security from 2008 to 2017 based on Fuzzy BWM-DEA-AR model and malmquist productivity index[J]. *Energy*, 2021, 228: 120481.
- [82] LI Jinchao, WANG Lina, LIN Xiaoshan, et al. Analysis of China's energy security evaluation system: based on the energy security data from 30 provinces from 2010 to 2016[J]. *Energy*, 2020, 198: 117346.
- [83] SHITTU Waliu, FESTUS Fatai adedoyinb, MUHAMMAD Ibrahim shah, et al. An investigation of the nexus between natural resources, environmental performance, energy security and environmental degradation: evidence from Asia[J]. *Resources Policy*, 2021, 73: 102227.
- [84] PUTRA M P I F, PRADHAN P, KROPP J P. A systematic analysis of water-energy-food security nexus: a South Asian case study[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138451.
- [85] CHAMAS Z, ABOU NAJM M, AL-HINDI M, et al. Sustainable resource optimization under water-energy-food-carbon nexus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123894.
- [86] YANG Yafeng, WANG Hongrui, ZHANG Yuanyuan, et al. Risk assessment of water resources and energy security based on the cloud model: a case study of China in 2020[J]. *Water*, 2021, 13(13): 1823.
- [87] YANG Lin, YANG Yuantao, LYU Haodong, et al. Water usage for energy production and supply in China: decoupled from industrial growth?[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719: 137278.
- [88] LIN B Q, RAZA M Y. Analysis of energy security indicators and CO₂ emissions. a case from a developing economy[J]. *Energy*, 2020, 200: 117575.
- [89] HUANG S W, CHUNG Y F, WU T H. Analyzing the relationship between energy security performance and decoupling of economic growth from CO₂ emissions for OECD countries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 152: 111633.