

DOI: 10.5846/stxb201306091520

赵春富, 刘耕源, 陈彬. 能源预测预警理论与方法研究进展. 生态学报, 2015, 35(7): 2399-2413.

Zhao C F, Liu G Y, Chen B. Advances in theories and methods of energy forecasting and early warning. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2399-2413.

能源预测预警理论与方法研究进展

赵春富, 刘耕源, 陈彬*

环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875

摘要: 能源作为一种稀缺性的战略资源是国民经济增长和社会进步的物质基础, 但是随着化石能源耗竭及能源使用造成的环境问题日趋严重, 能源安全问题逐渐成为关注的焦点, 而能源预测预警也成为能源系统科学领域的新兴学科, 其内容包含能源安全理论、基于模型的能源供需预测和基于安全评价指标体系的能源预警等方面内容。通过系统回顾能源安全的理论及其演变的历程, 重点综述了自上而下、自下而上和混合建模 3 种建模思路的能源预测模型, 探讨了三类模型的优点和局限性, 并根据能源安全预警评价指标浓缩信息的程度, 将现有预警评价体系划分单个型指标评价体系和聚合型指标评价体系两大类。通过对以上研究内容的总结分析, 明确了当前能源预测预警研究各领域的研究进展, 及其在理论和应用方面的优势与不足。在未来研究中, 建议从供应链的角度出发, 考虑能源系统内部各因素及与外部因素的相互作用, 构建基于链式的预警体系, 以有效弥补现有研究中的不足。

关键词: 能源安全; 预测模型; 预警体系; 文献分析; 链式预警

Advances in theories and methods of energy forecasting and early warning

ZHAO Chunfu, LIU Gengyuan, CHEN Bin*

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Energy as a scarce strategy resource is the physical base for national economic development and social progress. Along with the fossil fuel depletion and environmental problems induced by energy utilization, the early-warning of energy security has gradually attracted more attention and thereby emerged as a rising discipline of energy sciences, covering the energy security theory, energy demand forecasting models and energy security early warning index systems. After reviewing the evolution of energy security theory, we summarized the merits and limitations of three kinds of commonly used forecasting models including top-down models, bottom-up models and hybrid energy models. Top-down models such as CGE could give a detailed description about the interaction among different economic sectors. However, these models fail to provide a concrete description for energy technologies. For bottom-up model, although a detailed consideration of technologies related to energy production and consumption has been incorporated into modeling, few economies can be described adequately based on such an engineering perspective. In order to integrate the advantage of both modelling approaches, more and more hybrid models have been constructed to overcome the weakness in recent years. Although more dimensions such as environmental, social, and economic aspects have been integrated to the hybrid model, the simulation for water environment and biodiversity is still insufficient. In terms of the modelling technique, the issues like boundary difference, database difference for hybrid model need to be concerned. Additionally, the current energy demand forecasting models can only predict the future energy demand without consideration of energy security. It is therefore necessary to develop the energy security evaluation indicator system. The existing energy security evaluation indicator systems can be

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2012BAK30B03); 国家自然科学基金 (41271543, 91325302); 国家基金委创新研究群体科学基金 (51121003); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20130003110027)

收稿日期: 2013-06-09; **网络出版日期:** 2014-07-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

divided into two categories: individual indicator-based system and aggregate indicator-based system. Individual indicator system attempts to employ various individual indicators such as reserve to production ratio, strategic fuel stocks, and net energy import dependency to quantitatively assess the energy security level, while aggregated indicator system as a combination of individual indicators usually develops a composite index to evaluate the energy security. Despite many efforts have been devoted to energy demand forecasting models and energy security evaluation indicator system, a universal early-warning framework of energy security, however, has not been constructed. The limitation for current early-warning system of energy security can be summarized as follows: 1) Interaction mechanism among the dimension of energy security, environmental protection, and economy for energy security evaluation indicator is still unclear. 2) Theoretical research and practical application for existing early-warning system of energy security remain separate. 3) Weights of the indicators are still determined by subjective judgment rather than objective methods. According to the summary of advances in various energy forecasting and early warning studies and their advantages and limitations as well, it is suggested that in the future research, a chain-based early warning system should be established in perspective of supply chain considering the interactions between internal and external factors of the energy system so as to promote the current energy early-warning system.

Key Words: energy security; forecasting model; early-warning index system; literature analysis; chain-based early-warning system

预警是对于某一系统未来的演化趋势进行预期性评价,以提前发现特定系统未来运行可能出现的问题及成因,为危机的防范和化解提供依据。关于预警的研究最早起源于经济领域,法国经济学家 Alfred Fourille 通过对经济进行监测,最先提出了监测预警的思想。到 20 世纪 40 年代,随着雷达、计算机的出现和战争的需要,雷达预警系统应运而生,并正式提出了预警系统的科学概念,随后预警思想和理论方法迅速渗透到粮食安全、环境安全和水资源安全等研究中^[1-4]。

能源预测预警引起各国重视源于 20 世纪 70 年代两次世界范围内的石油危机,阿拉伯石油输出国家将石油禁运作为政治武器,致使西方各国经济陷入严重衰退,因此与能源系统相关的监测、预警和分析逐渐成为人们关注的焦点。能源预测预警是指在对能源系统运行机制和演化趋势进行预期性评估的基础上,预报不正常的时空范围及危害程度,最终提出防范措施保证能源安全。由于能源预测预警的最终目的是保证能源安全,随着能源安全内涵的不断演变,对能源预测预警体系的构件也提出了新的要求。能源安全最初的概念以稳定原油供应和价格为核心,因此,能源预测预警主要关注能源供应和能源价格两个维度^[5]。随后能源安全内涵的不断扩展至技术、公共关系等维度,能源预测预警的研究范畴也随之不断延伸^[6-8]。但总的来看,能源预测预警的研究内容主要包括能源安全理论、基于预测模型的能源预测和基于安全评价指标体系的能源预警三部分研究内容,许多国家已将能源预测预警制定为国家安全战略的一个重要内容。然而在多数情况下,现阶段国家能源预测与预警研究脱节,客观预测与主观预警存在接口偏差,缺少科学的系统分析。因此,本文试图从能源安全的理论及其演变出发,综述现有能源预测模型和预警评价体系,通过文献分析方法把握当前能源预测预警的研究动态,旨在为完善我国能源预测预警研究体系构建提供有益参考。

1 能源安全的内涵及预测预警研究的演化分析

1.1 从能源预警范围的泛化到能源安全定义的延伸

能源预测预警是对能源系统未来的演化趋势做出预期性评价,提前发现可能出现的问题,为采取防范和化解措施提供依据。其目标是:(1)正确评价和诊断一国能源系统当前的总体运行状态;(2)正确预测一国能源安全状态的演变并及时发出预警指示;(3)采取防范化解措施。由此可见,能源安全是能源预测预警的对象,也是能源预测研究的核心内容,所以能源安全的内涵是什么?如何对能源安全的状态进行预测?如

何针对未来状态进行预警?是当前能源预测预警研究的重点和难点。

正确的把握能源安全内涵,是建立有效能源预测预警体系的基础。自 1974 年,国际能源署(IEA)率先提出以稳定原油供应和价格为核心的能源安全的概念后,随后不同学者和研究机构分别从不同角度就能源安全的内涵提出见解^[5]。传统的能源安全定义主要从能源供应和能源价格两个维度诠释能源安全的内涵。例如 Bohi 和 Toman^[9]认为“能源安全是能源价格波动或能源供给中断导致的经济福利损失”。而 Dorian 等^[10]将能源安全定义为“以合理的价格保证能源的持续的供应,从而支持工业和经济的正常运转”。此后随着由能源使用引发的关注点不断增多,能源安全所涉及的维度也不断拓宽,特别是 20 世纪 80 年代以来,随着研究者对全球气候变暖和因能源使用引发的大气环境质量恶化等问题的深入研究,能源安全的内涵在保障供给安全的基础上增加了生态环境安全的内容,并由此促成了联合国“环境和发展”大会的召开、京都议定书草案的形成,以及后续的巴厘岛气候谈判和哥本哈根会议等的召开。如张雷^[11]将国家能源安全划分为能源供应保障的稳定性和能源使用的安全性两部分。此后,2001 年美国 9.11 恐怖事件和 2007 年美国卡特里娜和丽塔飓风的的发生,使能源安全的概念进一步延伸到国家基础设施和供应链安全方面,并推动了美国相关立法^[12]。由此可见,能源安全的概念已经以最初的仅考虑供应安全为出发点逐步向着能源安全综合发展观过渡,其在发展的过程中被赋予了越来越多新的内涵^[13]。从综合能源安全的角度出发:国家能源领导小组^[14]指出能源安全既是经济问题,又是社会问题,是关系国计民生、涉及政治、经济、社会 and 军事的大安全问题。宋杰鲲等^[15]提出能源安全是指一个国家或地区可以足量、经济、稳定地从国内外获取能源和清洁、高效地使用能源,保障经济社会平稳健康可持续发展的能力。亚太能源研究中心(The Asia Pacific Energy Resource Centre, APERC)^[16]通过总结之前的研究,将能源安全归纳为 4 个维度,即可利用性(Availability)——地质因素;可得性(Accessibility)——地缘政治因素;可接受能力(Acceptability)——环境和社会因素;可负担性(Affordability)-经济价格的合理性。Vivoda^[17]提出,应将能源安全政策概念纳入能源安全的概念中,从而建立一个涉及能源供给、需求管理、能源效率、经济、环境、人类安全、军队社会文化、公共关系、技术、国际关系和公共政策七个维度的能源安全的概念。Sovacool^[18]在 Vivoda 研究的基础上,通过广泛征求专家的意见进一步将能源安全概念拓宽至 20 个维度。史丹^[19]又进一步提出能源安全的内涵应与时俱进,随着世界能源格局的改变,能源安全已不仅仅是供应安全,还应包括运输安全、价格合理和高效清洁消费等多个方面。

从上述研究中可发现,虽然众多学者从不同角度对能源安全的定义进行了阐述,但是截止目前对能源安全的理解仍未达成共识。主要源于三方面的原因:首先,能源安全是一个涉及多学科交叉的复杂性问题,不同研究者多结合自己的研究背景诠释能源安全,不同程度的存在随意性的增加研究范畴等问题。其次,能源安全不仅是一种状态,而且具有动态性的特征。随着能源系统面临的挑战和人们的关注点的不断变化,能源安全涉及的维度也在不断拓宽,容易出现不同维度之间边界模糊、涵义重叠的问题。最后,能源安全的研究需要结合具体的背景,由于经济、环境和能源政策不同,同样的能源安全影响因素对不同国家的相对重要性不同^[20],所以需要因地制宜、设定研究边界。能源安全的本质有两个方面:一是能源系统的风险,另一个是能源系统的脆弱性。能源系统风险是指特定能源系统中所发生的非期望事件的概率和后果,如由于自然灾害或国家政治经济因素使能源供给终端,从而对宏观经济系统造成严重的负面影响。能源系统脆弱性是指在一定社会、经济、文化背景下,某一能源系统对非预期事件表现出的易于受到伤害和损失的性质。能源安全研究旨在评价能源系统的风险,通过改善能源应对风险的抵抗和恢复能力来提高能源安全。

对于能源安全而言,风险表征了非预期事件发生的概率和后果,相对来说它更多考虑了突发事件的危害,对危害管理的主动性和积极性较弱;而能源系统脆弱性应该是能源安全的核心,通过脆弱性分析和评价,可以识别能源安全的威胁因素,分析这些因子是如何相互作用,可以通过什么样的调控手段提高能源安全程度等。

1.2 国际能源安全及预警文献分析

为了定量追踪能源预测预警研究的演变历程及其内在规律性,本研究借助 ISI Web of Science 检索数据库资源进行能源安全及预警研究文献分析。Web of Science 检索数据库是美国科学情报研究所(Institute for

Scientific Information, ISI) 出版,由 SCI (Science Citation Index)、SSCI (Social Science Citation Index)、A&HCI (Art & Humanities Citation Index) 3 个独立的数据库整合而成,所收录的文献覆盖了全世界最重要和最具影响的研究成果,是目前世界公认的自然科学领域最为重要的评价工具。本研究利用检索式 TS = “energy security” OR TS = “security of energy supply” OR TS = “energy early warning”对 1990—2012 年以“能源安全”或“能源预警”为主题的文章进行检索,并从文章发表数量、引用频次、研究区域和研究涉及的学科领域等角度对检索结果进行分析。

文献总量反映了一定时期内科研活动的绝对产出,是衡量科研活动的一个重要因子,而引文数量反应了一个领域研究成果被吸收及关注的程度。从 1990—2012 年期间 ISI Web of Knowledge 数据库中检索得到的 1769 篇文章来看(图 1):自 1990 年起以“能源安全”或“能源预警”为主题的文章不仅在文献发表量上逐年攀升,其被引用的频次也呈现逐渐上升的趋势。其中,在 1990 年到 2002 年期间能源安全相关的研究及文章引用虽逐年上升,但其增速相对缓慢。2002 年以后,伴随着格林斯潘低利率政策所引起的房地产泡沫越来越大,以及全球经济开始互联网泡沫后逐渐复苏,国际原油价格从 2002 年 1 月 31 日的最低每桶 15.52 美元一路飙升至 2008 年 7 月 11 日的 147.5 美元,上涨幅度达 894.6%。此时能源安全问题作为热点问题受到了不同领域专家和学者的关注,以“能源安全”或“能源预警”为主题的文章发表及引用频次迅猛增加。2008 年金融危机爆发后,国际原油价格再次出现大起大落,因此到 2009 年对能源安全进行研究及关注再次达到高峰。在随后的 3a 文献的发表数量虽然有所波动,但依然保持较高的数量。由此可见,随着全球化石能源的耗竭,全球能源供需矛盾的日益凸显,以及全球气候变化的背景下,以“能源安全”或“能源预警”为主题研究成果逐年攀升,相关研究的关注程度也日益增加。

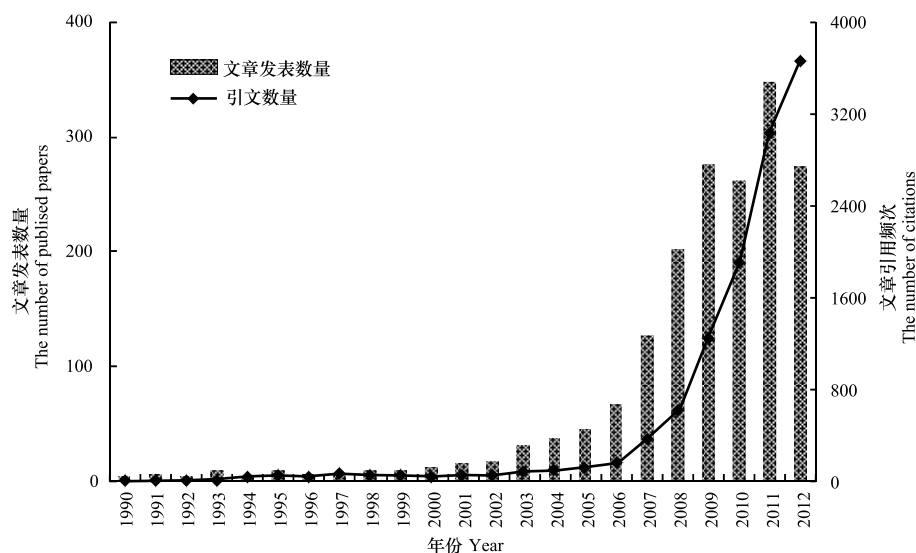


图 1 文献年发表数量及引文数量

Fig.1 The numbers of annual paper publication and citation

从研究的学科类型来看(图 2),目前以“能源安全”或“能源预警”为主题的研究主要涵盖能源燃料科学、环境生态学、计算机科学、国际政治学、计量经济学和地缘政治学等多个学科。这是由于能源安全问题是涉及自然资源学、社会学、经济学、地理学等多学科交叉的复杂性问题,同时能源与社会和经济存在一系列的复杂因果关系和联动效应。因此从不同视角对能源安全问题进行研究有助于阐明能源系统各因素之间复杂的因果联系,定量把握能源系统安全状态及其演变趋势,从而为科学合理的能源安全战略制定提供科学参考依据。从国际关系角度出发,可以分析出如何通过各国协作更好的解决当前全球面临的能源问题。从经济学角度出发,可以分析如何影响能源供需的因素,建立能源模型,从而指导能源的供需管理。从地缘政治的角度出发,可以研究如何减少能源进口中的不安全因素,从而保证能源供应安全。同时在全球气候变化背景下,能源的

终端消费及对环境和人群健康的损害问题逐渐得到重视,从环境科学的角度对能源安全问题进行研究的文献逐年增加。

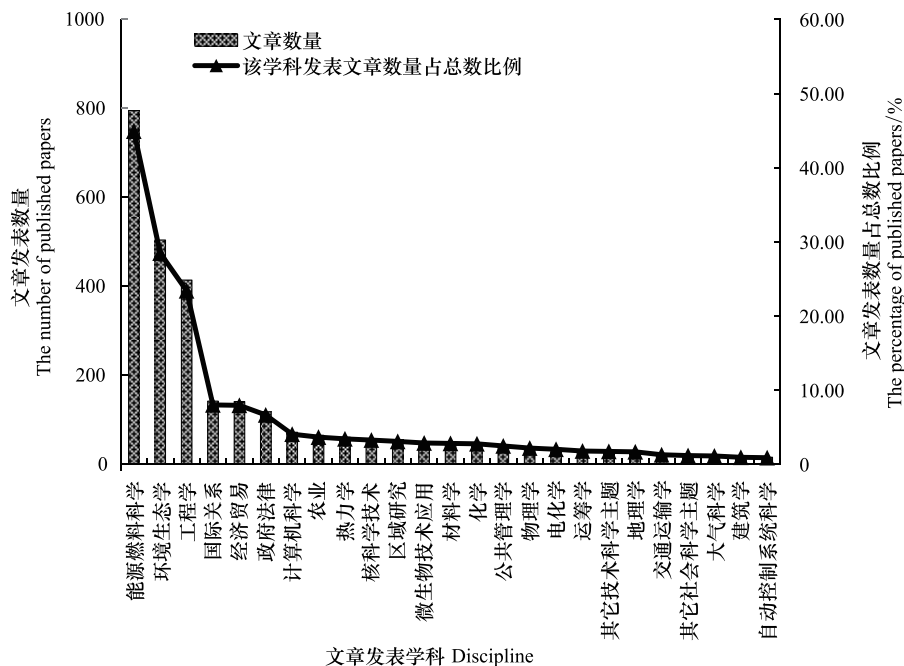


图2 各学科发表文章数量及其占总数比例

Fig.2 The numbers and proportion of paper publication indifferent disciplines

从研究的区域来看(图3),目前以“能源安全”或“能源预警”为主题的研究在美国开展的研究最多,其次是英国、德国、中国和加拿大等国家。可以看出,对能源安全研究较多的国家中往往面临能源消耗总量大、能源结构不合理和高度依赖进口的能源问题。因为就全球能源生产与消费格局来看,能源的存储地与能源的消费地存在严重空间错位,能源消费大国如中国、印度等国其国内能源消费量相较存储量表现出严重不

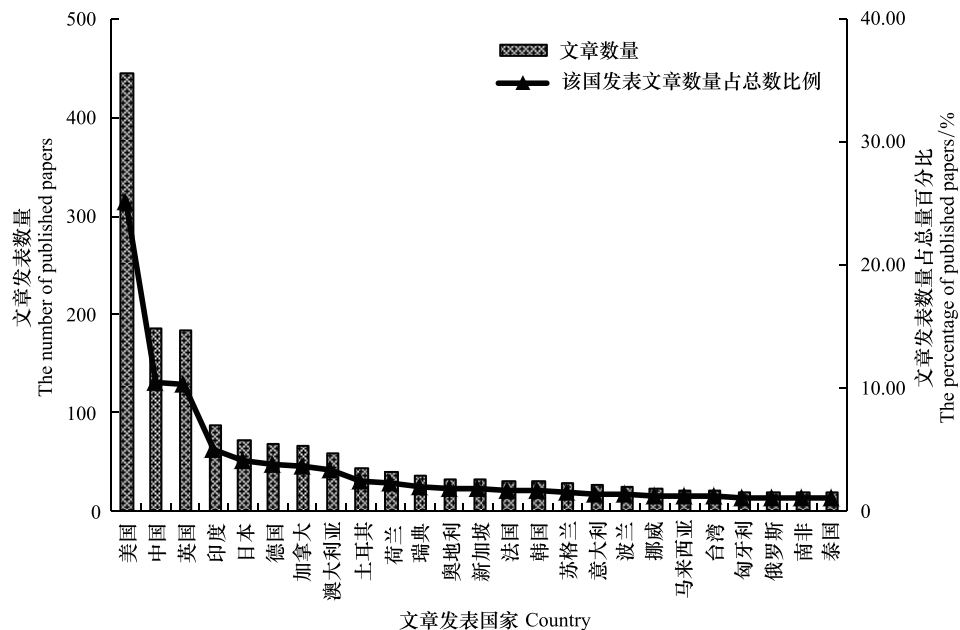


图3 各国家发表文章数量及其占总数比例

Fig.3 The numbers and proportions of paper publication in the top-25 countries

足。以石油为例,全球约有半数以上的石油被经济合作与发展组织国家消费,但是全球的石油资源却主要集中在中东地区,据统计中东地区石油储量占全球总储量的 54.4%。因此导致中国、美国等石油消费大国超过半数的石油严重依赖进口。为了保障这些能源消费大国的正常的能源供应和社会经济运转,其更加重视对于能源安全这一议题的研究,因此从文章发表的数量来看,这些国家相较其他国家较高。如何使能源的使用不胁迫人类自身的生存和发展成为了当前研究的热点问题。

由此可见,随着全球化石能源耗竭及由于能源使用造成的环境问题日趋严重,各国对于能源预测预警问题的关注度持续上升,其中又以能源消费量高同时资源禀赋相对贫乏的国家表现的最为显著。从研究的角度上,不同领域学者从国际关系、工程技术、环境生态等不同学科角度切入对能源预测预警这一复杂性议题进行剖析。其中,从环境科学角度出发对能源预测预警问题的研究越来越受关注,主要源于全球气候变化的大背景,因此能源使用对生态环境的影响愈发受到重视。

2 能源预测模型研究进展

能源预测预警是在能源系统运行的过程中,采用科学的评价方法和模型对能源系统运行的相关数据进行分析,对能源系统发展趋势进行预测,以便在危害发生前发出警报,从而为国家能源管理部门提供参考,将能源系统的风险遏制在萌芽状态的一种机制。因此以能源安全为核心的能源预测预警研究实际上包含能源预测和能源预警两方面工作^[21]。能源预测是对能源系统的未来形势发展进行预料、估计、分析、判断和推测,是实现能源预警的基础,主要通过构建能反映能源系统内部活动与外部联系的数学的模型实现。由于当前能源安全问题不仅涉及到能源需求和供给,同时也涵盖能源利用导致的环境影响以及能源系统对于经济系统的影响等问题,因此能源预测模型的构建是一项涉及能源-环境-经济综合性模型工程。

从模型的构建方法来说,能源预测模型可分为数据外推模型和集成结构模型^[22]。数据外推模型仅仅从数据的相关关系进行外推预测,缺乏对能源过程机理的考虑,主要适用于短期预测。而集成结构模型可以反应变量之间的相互关联与相互影响,但其建模过程相对复杂。从建模思路来看,能源预测模型可以分为:自上而下模型(top-down)、自下而上模型(bottom-up)、以及混合模型(hybrid)三类^[23]。自下而上模型以工程技术作为出发点,着重对能源生产和消费过程中所运用的技术进行详细描述,并以能源消费、能源生产方式为主进行供需预测及环境影响分析^[24]。但是由于这类模型不包含宏观经济模块,所有的宏观经济与结构变量都需要外生确定,因而不能反映政策对宏观经济的影响。目前常用的自上而下模型以各种经济学模型为主,以能源价格和经济弹性作为纽带,集中表现它们与能源消费、能源生产的关系,这类模型能很好的反应价格在经济活动中的作用,且能刻画经济主体间的相互关系和经济活动的反馈,但是这类模型缺乏对能源技术的描述,从而低估技术进步对于社会经济部门的影响。当前基于自上而下建模思路的能源预测模型主要以 CGE 模型为主,由于该模型对能源政策模拟具有良好效果,因此 CGE 模型已成为分析不同政策情景下未来能源需求分析的重要工具^[25]。同时在气候变化的背景下,越来越多的研究开始尝试在标准 CGE 模型中拓展环境反馈模块,从而在能源、环境条件约束条件下分析能源系统演变趋势^[25-27];自下而上模型主要包括美国能源部(EIA)的 SAGE 模型、IEA 的 Markal 模型、日本 NIES 的 AIM/Enduse 模型、IIASA 的 Message-IV 模型、清华大学核能和新能源研究院开发的 TH-3EM 模型和瑞典斯德哥尔摩环境研究所开发的 LEAP 模型等^[34](表 2);近年来,混合模型成为能源预测模型构建的趋势,混合模型同时融合了自下而上和自上而下两种建模方法,将能源系统和宏观经济系统链接起来从而大大拓宽了研究的范畴,其在系统的描绘经济主体与环境之间相互关系的基础上,同时对能源生产和消费模块进行刻画,因此可以实现能源、经济和环境之间的交互作用作用以及能源系统的准确仿真。根据模型在相同功能部门处理方式的不同,混合模型可以分为软连接和硬连接两种^[45]。在软连接中,信息传递与控制都通过模型使用者完成,其优势在于易于操作、公开透明、连接思路清晰,但是计算效率较低,连接过程的主观判断性较强。而硬连接中所有模型间的信息处理和交互都通过程序自动完成,在模型重叠的部分使用新的算法来保持一致,因此硬连接的输出结果较为一致,但是以取消模型功能和各自独

立性为代价。目前常用的混合模型主要包括 MARKAL-MACRO 模型、ETA-MACRO 模型、NEWS 模型和 IPAC 模型等(详细见表 3)。

表 1 自上而下的能源预测模型

Table 1 Energy forecasting models based on top-down approach

模型名称 Name	开发者、时间 Developer	研究区域 Region	涵盖能源部门 Sectors modeled	动态性 Dynamic	研究内容 Research content
WW	Whalley 和 Wigle (1991) ^[28]	全球	3	静态	研究环境政策对于 CO ₂ 减排的效果影响
RICE	Nordhaus 和 Yang (1996) ^[29]	全球	1	完全动态	分析不同国家气候变化政策的减排效果
BFR	Böhringer 等 (1998) ^[30]	欧盟	23	静态	互补形式在 CGE 模型中的应用
MS-MRT	Bernstein 等 (1999) ^[31]	全球	6	完全动态	气候变化政策规定对国际贸易方面的影响,主要包括对经济福利、国际贸易、投资的影响的区域分布规律,以及附属国对非附属国 CO ₂ 排放限值的溢出效应、碳泄漏、贸易与工业输出方面的变化、以及对国际排放权交易的影响
CGE-LI	Galiniš. A. (2000) ^[32]	立陶宛	1	完全动态	运用 CGE 模型研究了在不同的经济增长、能源价格与核能发展潜力的情景下,立陶宛政府应如何调整国家未来核能发展的政策与策略
改进的 CGE 模型 Improved CGE model	Francisco 等 (2009) ^[33]	西班牙	1	静态	西班牙燃油消费税对 Extremadura 区域的影响

表 2 自下而上模型列表

Table 2 Energy forecasting models based on bottom-up approach

模型类型 Model type	模型名称 Name	研究机构 Developer	模型结构 Structure of the model	研究内容 Research content
能源系统 核算模型 Energy system accounting model	MEDEE ^[35]	法国能源经济研究所(IEPE)	模型共划分为工业、交通运输、居民消费、服务业和农业 5 个部门	对技术有详细的描述,反映了技术的潜力。但是可直接评价技术选择的成本。但是该模型缺少经济分析,未能考虑技术成本
	MED-PRO ^[36]	法国研究所	基于 MEDEE 模型,增加了对于电力负荷和温室气体排放的模拟	在 MEDEE 模型基础上增加了对温室气体排放的预测和电力负荷的模拟,其中温室气体排放预测采用 UNFCCC 提供的方法
	LEAP ^[37]	瑞典斯德哥尔摩环境研究所和美国波士顿 Telles 研究所	由能源需求、能源转化、资源分析、环境影响评价和费用分析五部分组成	拥有灵活的数据结构,同时内置可修改的技术和环境数据库。但是很难反映各经济部门的相互影响作用,以及微观因素对于宏观因素的反馈影响
能源系统动态 优化模型 Energy system optimization model	MARKAL ^[38]	国际能源机构能源技术系统分析项目组(ETSAP)与国际能源署(IEA)	包括费用函数、安全函数、斜率函数、环境函数、核能函数、化石能源函数、非可再生能源函数和可再生能源函数 8 类函数,各种能载体的平衡约束、系统总投资增长约束等 21 类约束方程	能对能源系统中各种能源开采、加工、转换和分配环节以及终端用能环节进行详细的描述,模型的优化目标是规划期内总成本最低,但是由于各部门的能源服务需求是外生给定,因此不能反映价格对能源服务需求的影响
	MESSAGE ^[39]	奥地利国际应用系统分析研究所(IIASA)	提供了一个能源系统框架:从资源的获取、进出口、转化、运输和分配,到能源终端服务提供如灯光、空间调节、工业生产过程和运输	所有的热生成、可再生能源、存储和转换以及多重传输技术都可用 MESSAGE 模拟为碳封存
	AIM/ end-use ^[40]	日本国立环境研究所((NIES))	模拟一个经济体中的能量流和物质流,从一次能源和材料的供应,通过转化以及二次能源和材料的供应,到满足终端服务	模型考虑了技术进步对减排政策制定及减排成本的影响,但是未将未来行为纳入模型的考虑范畴

续表

模型类型 Model type	模型名称 Name	研究机构 Developer	模型结构 Structure of the model	研究内容 Research content
能源系统仿真模型 Energy system simulation model	EFOM 模型 ^[41]	欧盟	将能源系统分为能源供给、能源转换和能源利用 3 个部分。	模型主要应用于能源系统规划。在假定不同经济增长水平的情景下,可实现对石油进口价格、固体燃料的作用和核能影响的分析
	SAVE Production ^[42]	荷兰能源研究中心 (ECN)	通过构建终端节能技术模块和热电联产模块模拟能源技术改进对于能源系统的影响	模型考虑了能源价格变动及能源政策实施引起风险、心里效应因素,但是这些参数主要源于专家判断,缺乏实证基础
	POLES ^[43]	法国国家研究中心 (CNRS) 工业经济研究实验室 (LEPII) 领导,经济学家 Patrick Criqui 开发	能源供给与需求通过能源市场连接,同时将世界划分成 47 个国家或地区,并为这些国家或地区规划相应的年度能量平衡。	模型可以反映能源效率改善对于能源终端需求的影响
	CIMS ^[44]	加拿大西蒙弗雷泽大学能源和材料研究小组	基于 ISTUM 模型发展而来,涵盖了所有能源需求和供给部门	基于市场异质性决策者偏好和无形成本与效益 3 个参数对原有模型进行了扩展,但是行为数据和偏好数据收集是该模型的难点

表 3 混合模型列表

Table 3 List of mixed energy models

模型名称 Name	研究机构 Developer	国家 Country	研究领域 Research field	模型的基本结构 Structure of the model	研究内容概述 Research content
MARKAL-MACRO	美国 Brookhaven 国家实验室和 Stanford 大学,1992 ^[46]	美国	经济影响	MAEKAL 模型与 MACRO 模型	以规划期内消费的总贴现效用最大为目标,将 MARKAL 模型与 MACRO 模型通过能源服务需求进行耦合,从而建立一个动态非线性规划模型
ETA-MARCO	Manne 和 Richels,1978 ^[47]	美国	能源系统优化	ETA 模型与 MARCO 模型	采用动态非线性优化程序,用以研究能源供给增长、煤及原油生产的环境约束、替代能源的有效性
MESSAGE-MACRO	MESSNER 和 Strubegger,1995 ^[48]	—	经济影响	MESSAGE 模型与 MACRO 模型	通过 MESSAGE 模型的能源需求,计算出能源供给的总成本和边际成本的价格,然后将价格提供给 MACRO 提供二次需求函数,通过 MACRO 模型调整能源需求。将调整后的能源需求再次输入 MESSAGE 模型,从而建立一个循环,直至调整到价格与能源需求相稳定
ASF (Atmospheric Stabilization Framework)	Lashof 和 Tirpak,1990 ^[49]	美国	温室气体排放	工程-经济耦合模型	研究能源、农业、工业等领域的温室气体排放情况
Global 2100	Manne and Richels,1992 ^[50]	美国	能源经济模型	ETA-MACRO	结合生产消费水平,对五个世界地区能源消费部门进行模拟
12RT	Manne,1994 ^[51]	美国	能源经济模型		通过能源的物质处理过程对能源供给部门进行详细描述,并对 CO ₂ 的减排成本进行分析
CRTM	Rutherford,1992 ^[52]	美国	能源经济模型	Carbon Rights Trade Model	温室气体排放模型
CETA	EPRI ^[53]	美国	能源经济模型	基于 Global2100 模型	基于 Global2100 模型,并将 5 个世界地区合并为一个区域,同时对碳循环、全球气温变化、全球变暖危害进行描述
MERGE	EPRI ^[54]	美国	能源经济模型	基于 Global2101 模型	模拟全球及地区温室气体减排政策的影响,并对减排成本、温室气体排放危害进行估值和贴现的研究

续表

模型名称 Name	研究机构 Developer	国家 Country	研究领域 Research field	模型的基本结构 Structure of the model	研究内容概述 Research content
MIT-EPPA	MIT, 1993/2004 ^[55]	美国	温室气体排放、成本控制、可计算一般均衡	MIT-Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) model	基于社会核算矩阵及弹性估计,对生产部门排放可能性进行描述,基于工程过程数据,对特定设备的排放可能性进行描述
Mini-CAM	PNNL, 1994 ^[56]	美国	能源及农业部门的耦合评估模型,气候变化	Mini-Climate Assessment Model 与 MAGICC 模型相结合	将能源部门及农业部门的耦合,集中于温室气体及二氧化硫排放的估测,通过与 MAGICC 模型相结合,预测温室气体排放对气候变化及海平面上升的结果
ICAM-1/ ICAM-2	CMU, 1995 ^[57]	美国	气候变化综合评价	Integrated Climate Assessment	研究气候政策制定时的不确定性、气候变化下生态系统建模、海岸线影响、地球工程政策等
NEMS	EIA, 1993 ^[58]	美国	能源系统分析	涵盖国际能源市场、宏观经济、能源转换、供给等 13 个模块	综合考虑宏观经济、财政、世界能源市场等因素,分析不同能源政策和能源市场条件下能源、经济、环境以及安全之间的相互影响
TH-3EM	清华大学, 2006 ^[59]	中国	能源系统分析	能源-经济-环境综合评价模型(3E 模型)	利用可计算一般均衡模块描述经济系统整体,应用跨时段能源系统优化模块描述能源系统微观细节,通过在 2 个模块间建立双向闭合连接,描述能源系统与经济系统之间的互动关系,并保证模块结果的一致性
IPAC	国家发改委能源研究所, 1992 ^[60]	中国	能源环境政策综合评价	主要包括能源与排放模型、环境模型和影响模型 3 个部分	研究不同政策情景条件下对能源、经济和环境综合影响。同时该模型还可以将 IPACSGM、IPAC-Material 等 12 个子模块单独应用,从而可对环境影响、能源需求预测等进行特定分析
WEM	IEA, 1993 ^[61]	—	能源经济模型	由能源终端需求、电力供应、精炼油生产和加工、化石能源供应、碳排放和能源投资六个模块组成	基于终端部门能源消费预测全球能源需求,同时分析能源利用、能源政策和科技进步和能源投对环境 and 能源需求的影响

上述分析表明,仅从自上而下或自下而上角度出发建立能源预测模型无法反映能源系统与经济系统的相互作用,而混合模型的建立可以同时融合两种建模的思路,吸取了自下而上模型与自上而下模型各自优点,因而得到了更加广泛的关注。随着当前计算技术的迅猛发展,混合模型所涵盖的领域广度不断延伸,更多能源、社会、经济和环境因素纳入混合模型建模的考虑范畴。但是,现有混合模型对于可持续发展涉及的水环境、生物多样性等问题的模拟仍然相对缺乏,有待进一步加强^[62]。同时,目前基于混合建模思路的能源预测模型侧重于预测,不具有预警功能,未能实现预测与预警的耦合。此外,在建模技术方面,混合模型构建还存在诸如系统边界不一致、数据基础不同、变量设置不同等问题。

3 能源预警评价指标体系研究进展

能源预警是指发现威胁国家能源安全的潜在威胁因素,进而采取措施,消除危险、确保国家能源安全的行动。而能源预警评级指标体系是能源安全状态评价的依据,只有建立完整能源安全指标评价体系才能对能源系统现状做出科学评价,并最终实现能源预警。目前国外众多学者和研究机构都开展了能源安全评价指标体系的研究工作,提出了各自的指标体系。按照指标浓缩信息的程度,这些指标体系可以划分为单个型指标体系和聚合型指标体系。

3.1 单个型指标评价体系

单个型指标侧重于对能源系统基本情况的描述,每个指标涵盖信息的综合程度较低,故基于这种指标形成指标评价体系包含的指标数量相对较多。根据具体的评价所涉及的内容,可进一步划分为针对整个能源系统的综合性评价体系和针对代表性领域的专题性评价体系。

3.1.1 综合性评价体系

综合评价体系是指从整个能源系统出发,分析影响能源的因素,在界定能源安全内涵的基础上对能源系统进行综合评价。因此这类指标体系不仅涵盖了对能源系统运行状况的测度,同时也将与能源系统相联系的社会、经济系统纳入到指标构建的考虑范畴。由于综合性评价指标体系的构建是建立在对能源安全内涵诠释的基础上,随着能源安全所涉及的维度不断延伸,综合性评价指标体系也向着更加综合的方向发展。早期的能源安全的概念强调能源供应稳定、经济价格合理,因此主要从影响供应稳定的政治、资源禀赋、运输等因素,以及影响经济运行的价格因素入手构建能源安全指标体系。如中科院地理所王礼茂^[63]从影响资源安全的资源、运输、政治、经济和军事 5 个方面入手,选取 14 项指标,初步组成了资源安全的评估指标体系。并运用该体系对我国粮食和石油的安全状况进行了评估。此后的研究在气候变化的背景下,部分重点放在了能源的使用安全及环境安全等方面,不少学者在传统能源安全评价指标体系的基础上扩充了环境维度的评价指标。如中国石油大学郭小哲、段兆芳和段兆芳^[64]建立了涵盖能源安全的灾变、效益、供需、环保、效率的能源安全监测系统。张生玲^[65]以保障国家经济安全为核心,分 4 个层次构建了中国能源安全指标体系并对中国能源安全状况进行评估。该指标体系涵盖了能源生产、能源消费和能源储备三个方面,包括石油储采比、进口集中度和能源运输能力在内的 11 项具体指标。李继尊^[66]选取了涵盖煤炭、电力、石油和综合子系统 4 个子系统的 54 个预警指标构建了中国能源预警指标矩阵,并运用主成分分析和二阶回归方法建立了中国能源预警模型,在此基础上创建了中国能源预警指数对中国能源的安全状况进行了测度。刘强等^[67]分 3 个层次、4 个能源子系统、从供需平衡、运输能力、突变影响、经济安全和生态环境 5 个方面进行对中国能源安全进行考量,构建了中国能源安全预警指标体系。王思强^[21]构建了涵盖整个能源领域的预测预警框架体系。该能源预测预警系统由煤炭、电力、石油、天然气、可再生能源和新能源、能源经济子系统组成,从能源系统的构成出发,设计了各子系统的预警指标,初步形成了能源预测预警需求的指标体系。以上评价指标体系主要关注能源供应侧的评价,在随后的研究中,研究者又增加了能源需求侧的技术、需求管理和能源政策因素等。如 Von Hippel^[68]认为能源安全评价应涵盖环境、技术、需求管理和社会文化与政治 4 个维度,初步建立了针对亚洲各国的能源安全评价的概念框架。Vivoda^[17]在 Von Hippel 基础上,又增加了从能源供给、需求管理、能源效率、经济、环境、人类安全、军队社会文化、公共关系、技术、国际关系和公共政策七个维度,分别选取定性和定量指标构建了针对亚洲区域的能源安全指标评价体系。Sovacool^[18]指出 Vivoda 构建的能源安全指标体系未能结合亚洲地区的实际情况,并且该体系忽略了部分对该区域能源安全有重要影响的因素。为进一步完善该指标评价体系,在 Vivoda 建立的能源安全评价指标体系的基础上,通过专家广泛征求专家的基础上,进一步将能源安全的维度拓宽至 20 个维度,共选取 200 余个指标建立了针对亚洲区域的更加综合的能源安全评价指标体系。

3.1.2 专题性评价体系

专题型指标是选择能源安全问题涉及的代表性专题领域制定相应的指标体系。这类指标首先需要对能源安全的评价对象和评价目标进行重点剖析,明确影响评价对象和评价目标的主要专题领域,结合专题的特征,构建能够全面反映专题内容的指标评价体系。目前,专题型指标主要从能源效率、能源系统可持续发展和初次能源的短期供应安全几个专题入手构建能源安全指标评价体系。

(1) 世界能源理事会(WEC)^[69]为进行能源效率及节能政策的国际比较研究而建立的能源效率指标体系。该指标体系拥有 23 个评价指标,按性质不同分为两类,一类是经济性指标,用于在整个经济或全行业层面上测度能源效率,如:一次能源强度(内含不计传统燃料和按照欧盟水平调整)、终端能源强度、工业能源强

度、服务业能源强度、农业能源强度、家庭能源强度等;另一类是技术性指标,即单耗指标,用于测度子行业、终端用能的能源效率,如:钢单耗、交通能源强度、标准小汽车和公交平均能耗、家庭人均电耗等。

(2)联合国经济社会事务部(United Nations Department of Economic and Social Affairs, UNDESA)^[70]从能源安全问题涉及的能源效率和能源管理政策方面入手,构建的能源系统的可持续发展评级指标体系。该指标体系涉及社会、经济和环境维度,分7项、19个子项(附表)。在社会维度上,能源安全指标主要反映公平性和健康性,其中公平性包括“可得性”、“可支付性”、和差异性3项。在经济维度上主要考虑生产模式和安全2项,生产模式涉及综合利用、综合生产力、生产效率、生产、终端使用、能源体制多样性和能源价格7个子项。而安全主题则主要考虑能源进口和战略能源储备2个子项。环境维度主要大气、水和土地利用3项。大气主要考虑气候变化和空气质量两个子项,水则主要考虑水质,而土地利用主要考虑土壤质量、森林和土壤废物产生及管理3个方面。

(3)国际能源署(IEA)^[71]针对一次能源和二次能源的短期安全问题,从能源系统的风险(Risk)和应对风险的恢复能力(Resilience)两个方面出发构建能源安全的评价指标体系,同时按能源类型划分短期能源安全的评价阈值。该指标体系主要涉及能源系统面对的国内外风险及面对国内外能源供给中断的恢复能力4个维度,风险和恢复能力的量化主要通过IEA的统计数值,同时结合专家的经验判断,共选取29个指标。

(4)英国工业贸易部(Department of Trade and Industry, DTI)与天然气电力市场办公室(The Office of the Gas and Electricity Markets, OFGEM)^[72]成立能源安全联合研究小组(Joint Energy Security of Supply Working Group, JESS)对英国天然气与电力供应安全进行研究。围绕着天然气与电力的供应安全JESS从能源供需预测、市场信号和市场响应3个角度出发构建了能源安全指标评价体系。同时在构建能源安全指标体系对能源安全现状进行评价的基础上,开创性地研究了不确定因素对于预测和相关要素的影响。

3.2 聚合型指标评价体系

聚合指标是指在确定的研究框架中,对大量有关信息加以综合与集成,从而形成一个具有明确含义的指标。聚合指标对于信息的浓缩程度较高,涵盖的信息量较大,基于聚合指标的能源安全评价体系通常采用一个综合指数进行表征。但是,它并不是对低层次同类指标进行简单加权所计算得出,而是对于一个复杂系统,识别潜在的问题加以进一步分析,以明确问题所在从而加以解决。在聚合型指标体系的构建方面:

Jasen 等^[73]基于 Shannon-Wiener Index(SWI)评估了长期能源安全风险。首先,分析影响长期能源安全的风险因素,主要包括能源供应品种多样化、对外依存情况、进口多样化、进口可靠性以及资源枯竭程度,从而选取了各能源品种的供应占比、进口依存度、进口来源国进口量占比、进口来源国的长期社会政治稳定性、资源储采比等指标。接着,从能源供应品种多样化出发,利用SWI构造能源安全指数 $I = - \sum_i c_i x_i \ln x_i$, 式中 x_i 为品种 i 占能源总供应的比重, c 为风险调整因子。其他风险因素都通过对 c 调整来实现,例如,考虑各品种的进口依存度 m , 调整为 $c_i = 1 - m_i$;再考虑进口来源多样化和进口来源国的长期社会政治稳定性, c 调整为 $c_i = 1 - m_i (1 - \sum_j -r_j s_{ij} \ln s_{ij} / (\sum_j -r_j s_{ij} \ln s_{ij})_{\max})$, 式中 S_{ij} 为从国家 j 进口占能源 i 总进口量的比重, r_j 为进口来源国 j 的长期政治稳定性指标, $\max$ 表示进口来源多样化指数的最大值。最后,通过该方法诠释各影响因素得到能源安全指数 I , 该结果是一个无量纲值,可以进行不同时间和不同国家间的对比分析,从而评价一个国家长期能源安全风险的相对大小和变化态势。

荷兰能源研究中心(Energy research Centre of the Netherlands, ECN)^[74]通过集成风险管理指数和供给-需求指数构建能源安全评价体系。风险管理指数主要对短期能源供应中断的问题进行研究,由风险评估与应急管理两部分构成。供给-需求指数侧重于对中长期能源安全研究,主要包括最终能源需求、能源转化与运输和一次能源供应3方面内容。该指标评价体系的特点在于:综合考虑了短期与长期能源安全,且认为能源安全评价是能源供、求共同作用的结果,同时其综合考虑了能源系统要素对于能源安全评价的影响。目前,S/D指数模型已被广泛运用于欧洲能源供应安全的研究之中,如能源供应安全现状分析;能源供应安全脆弱性分析;

现在与未来能源发展情景分析;不同能源政策影响分析;能源供应安全对温室气体排放、可再生能源发展的影响等。

Gupta^[75]选取影响石油安全的七个因素:石油出口额占 GDP 比重、单位 GDP 石油消费量、人均石油消费量、石油供给份额在总能源供给中的比例、国内石油消费量与储量比重、石油进口依赖度和供给多样性,通过主成分分析的方法构建一个综合指数——石油脆弱性指数,从而对石油安全进行评价。由于该方法是采用协方差对指标赋予权重,相较于传统的专家经验判断的方法,这种赋权的方法更加客观,因此该方法评价的稳定性更强。

目前国内外众多学者虽然针对能源安全评价指标体系的构建进行了有益尝试,但是现存的能源安全评价指标体系多基于能源安全的影响因素、区分各能源子系统构建,然后结合指标体系对当前能源安全状况进行定量或定性评价。综合来看,由于能源安全的内涵不断延伸,归纳的能源安全影响因素也不断增加,因此构建出的能源安全指标体系也不断向更加综合的方向发展。但是,目前的能源安全评价指标体系是一种能源安全的截面分析,其只能反映能源安全在某一时刻的一种状态。同时,现存的指标体系没有考虑指标间的相互联系和相互作用。此外,能源安全预警界限的确定主要采用专家咨询和借鉴国际平均值的方法,这种阈值确定方法的准确性有待商榷。

为了将能源系统内部系统要素之间以及系统与外部要素之间存在复杂关联性纳入能源安全评价体系的考虑范畴,迟春洁和黎永亮^[76]建议引入“压力-状态-响应(PSR)”模型框架构建能源安全指标体系,房树琼^[77]基于 PSR 框架,并结合 CAS 理论构建了一套“六级并行,逐渐收敛,六层三维三度”的复合能源安全指标体系。而 Nguyen^[78]尝试依托食物网理论构建能源安全评价体系。这些研究作为当前研究的有益补充,考虑了能源安全评价指标的相互关联与相互作用,为能源预警指标体系的构建提供了新思路,但是其定量评价尚处于起步阶段。因此未来预警指标体系的构建,可从供给链的角度出发,考虑能源系统各要素的多层次、多目标的相互作用,构建基于链式的预警指标体系。这类预测预警体系的建立将有助于寻找到能源系统“牵一发而动全身”的因素,并能追踪该因素对整体能源系统的影响。同时链式预警指标体系的建立为进一步研究能源供给链中风险的传递、积累和耦合效应提供了可能。可见,链式预警的评价体系作为一种新的研究思路,具有重要的研究潜力。

4 结论与展望

能源预测预警体系建立以实现国家能源安全为核心,主要包括基于模型的能源预测和基于评价指标体系的预警两方面工作。在能源预测模型方面,当前主要选取集成自上而下和自下而上两类模型各自优点的混合模型进行预测。随计算技术高速发展,混合模型模拟的维度从传统的能源、经济角度不断向环境、社会文化等维度延伸。在能源预警评价指标体系方面,随着能源安全内涵的不断扩展,能源安全的影响因素日趋复杂,学者从不同角度出发建构了多样的预警评价指标体系。但是由于能源安全的概念具有动态性特征,其在不同空间和时间范围内侧重点不同,因此当前尚未形成一个普适性的预警评价体系。综合来看,当前对于能源预测预警的研究主要还存在以下几点不足:(1)预警指标体系缺乏能源安全-环境保护-经济运行各因素相互作用机理和影响过程的研究。(2)能源安全测度,预警模型研究因为数据收集,指标口径不统一等困难造成缺乏时效性,理论与实用意义偏离,对指定政策的参考作用有限。(3)预警指标体系的安全预警主要基于专家判断,缺乏客观的评价方法。

当前,我国已经超过美国成为世界最大的能源消费国家,能源需求逐年攀升,能源供需矛盾日益突出。其中作为重要战略资源的石油严重依赖进口,且进口来源主要来源于政治动荡的中东地区。一旦石油价格上涨将对我国宏观经济产生严重的负面影响。同时由于能源结构不合理,以煤为主的能源结构是我国能源消费产生的环境污染问题日趋严重。因此,针对我国实际情况建立一套完整地能源预测预警体系已经迫在眉睫,该体系的建立不仅可以准确评估我国能源安全现状,同时可以及时诊断潜在问题,前瞻性地指导能源管理和政

策制订,从而提升我国能源安全。但是由于能源管理体制不完善,能源信息分散,能源数据不完整,我国尚未建立一个针对整个能源领域的预测预警系统。本文通过对当前能源预测预警研究工作的归纳认为,未来我国能源预测模型应选取集成自下而上和自上而下两类模型各自优点的混合模型,并加强对于可持续发展涉及的水环境和生物多样性等问题的模拟。在预警评价指标体系方面,应从整个供应链角度出发构建链式的预警体系,从而考虑能源系统各要素间的相互作用机理。同时应加强能源预测模型与预警评价体系的耦合,实现一体化输出。

参考文献 (References):

- [1] Hutchinson C F. Use of satellite data for famine early warning in sub-Saharan Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(6): 1405-1421.
- [2] James V, Robert K. Grid-cell-based crop water accounting for the famine early warning system. *Hydrological Processes*, 2002, 16(8): 1617-1630.
- [3] 陈国阶. 对环境预警的探讨. *重庆环境科学*, 1996, 18(5): 1-4.
- [4] 郑通汉. 论水资源安全与水资源安全预警. *中国水利*, 2003, (11): 19-22.
- [5] International Energy Agency (IEA). *Energy Technology Policy*. Paris: OECD/IEA, 1985: 29-29.
- [6] Kruyt B, van Vuuren D P, de Vries H J M, Groenenberg H. Indicators for energy security. *Energy Policy*, 2009, 37(6): 2166-2181.
- [7] Sovacool B K. The methodological challenges of creating a comprehensive energy security index. *Energy Policy*, 2012, 48: 835-840.
- [8] 刘立涛, 沈镭, 刘晓洁. 能源安全研究的理论与方法及其主要进展. *地理科学进展*, 2012, 31(4): 403-411.
- [9] Bohi D R, Toman M A. *The Economics of Energy Security*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [10] Dorian J P, Franssen H T, Simbeck D R. Global challenges in energy. *Energy Policy*, 2006, 34(15): 1984-1991.
- [11] 张雷. 中国能源安全问题探讨. *中国软科学*, 2001, (4): 5-10.
- [12] Yergin D. Ensuring energy security. *Foreign Affairs*, 2006, 85(2): 69-82.
- [13] 崔民选. 中国能源发展报告(2008). 北京: 社会科学文献出版社, 2008: 1-2.
- [14] 国家能源领导小组. 《国家能源安全战略》, 研究报告, 2008.
- [15] 宋杰鲲, 李在旭, 李继尊. 我国能源安全状况分析. *工业技术经济*, 2008, 27(4): 10-13.
- [16] Asia Pacific Energy Research Centre (APERC). A quest for Energy Security in the 21st Century[R/OL], 2007, http://aperc.ieej.or.jp/file/2010/9/26/APERC_2007_A_Quest_for_Energy_Security.pdf.
- [17] Vivoda V. Evaluating energy security in the Asia-Pacific region: a novel methodological approach. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 5258-5263.
- [18] Sovacool B J. Evaluating energy security in the Asia Pacific: Towards a more comprehensive approach. *Energy Policy*, 2011, 39(11): 7472-7479.
- [19] 史丹. 全球能源格局变化及对中国能源安全的挑战. *中外能源*, 2013, 18(2): 1-7.
- [20] Alhajji A F. What is energy security? *Middle East Economic Survey* [2007-11-05]. <http://www.mees.com/postedarticles/oped/v50n45-50D01.htm>.
- [21] 王思强. 中长期能源预测预警体系研究与应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [22] 牟书令, 王庆一. 能源词典. 北京: 中国石化出版社, 2005: 683-687.
- [23] 魏一鸣, 吴刚, 刘兰翠, 范英. 能源-经济-环境复杂系统建模与应用进展. *管理学报*, 2005, 2(2): 159-170.
- [24] Bhattacharyya S C, Timilsina G R. Energy demand models for policy formulation: a comparative study of energy demand models. WPS4866; World Bank. Policy Research Working Paper, 2009.
- [25] 毕清华, 范英, 蔡圣华, 夏炎. 基于 CDECGE 模型的中国能源需求情景分析. *中国人口 资源与环境*, 2013, 23(1): 41-48.
- [26] 王灿, 陈吉宁, 邹骥. 基于 CGE 模型的 CO₂减排对中国经济的影响. *清华大学学报: 自然科学版*, 2005, 45(12): 1621-1624.
- [27] 杨岚, 毛显强, 刘琴, 刘昭阳. 基于 CGE 模型的能源税政策影响分析. *中国人口 资源与环境*, 2009, 19(2): 24-29.
- [28] Whalley J, Wigle R. Cutting CO₂ emissions: the effects of alternative policy approaches. *The Energy Journal*, 1991, 12(1): 109-124.
- [29] Nordhaus W D, Yang Z L. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *The American Economic Review*, 1996, 86(4): 741-765.
- [30] Böhringer C. The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling. *Energy Economics*, 1998, 20(3): 233-248.
- [31] Bernstein P M, Montgomery W D, Rutherford T F. Global impacts of the Kyoto agreement: results from the MS-MRT model. *Resource and Energy Economics*, 1999, 21(3/4): 375-413.
- [32] Galinis A, van Leeuwen M J. A CGE model for Lithuania: the future of nuclear energy. *Journal of Policy Modeling*, 2000, 22(6): 691-718.
- [33] Francisco J D M, Manuel A C, Jesús P. Effects of the tax on retail sales of some fuels on a regional economy: a computable general equilibrium

- approach. *The Annals of Regional Science*, 2009, 43(3): 781-806.
- [34] 张树伟. 能源经济环境模型研究现状与趋势评述. *能源技术经济*, 2010, 22(2): 43-49.
- [35] Chateau B, Lapillonne B. Long-term energy demand forecasting: A new approach. *Energy Policy*, 1978, 6(2): 140-157.
- [36] Enerdata and LEPII. Etude pour une prospective énergétique concernant la France, Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, 2005.
- [37] Heaps C. An Introduction to LEAP, 2008, <http://www.energycommunity.org/documents/LEAPIntro.pdf>.
- [38] Loulou R, Goldstein G, Noble K. Documentation for the MARKAL family of models; 2004, Energy Technology Systems Analysis Programme.
- [39] IIASA-ECS Modeling, <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/ECS/docs/models.html#MESSAGE>
- [40] Kainuma M. The AIM/end-use model and its application to forecast Japanese carbon dioxide emissions. *European Journal of Operational Research*, 2000, 122(2): 416-425.
- [41] Grohnheit P E. Economic interpretation of the EFOM model. *Energy Economics*, 1991, 13(2): 143-152.
- [42] Daniëls B W, van Dril A W N. Save production: a bottom-up energy model for Dutch industry and agriculture. *Energy Economics*, 2007, 29(4): 847-867.
- [43] Russ P, Criqui P. Post-Kyoto CO₂ emission reduction: the soft landing scenario analysed with POLES and other world models. *Energy Policy*, 2007, 35(2): 786-796.
- [44] Nyboer J. Simulating Evolution of Technology: An Aid to Energy Policy Analysis - A Case Study of Strategies to Control Greenhouse Gases in Canada [D]. Simon Fraser University, School of Resource and Environmental Managemesnt, 1997.
- [45] Gürkan K, Reinhard M. Energy and climate policy analysis with the hybrid bottom-up computable general equilibrium model SCREEN: the case of the Swiss CO₂ act. *Annals of Operations Research*, 2003, 121(1/4): 181-203.
- [46] Manne A S, Wene C O. MARKAL-MACRO: A linked model for energy-economy analysis. Brookhaven National Lab. Upton, NY (United States), 1992.
- [47] Manne A S, Richels R G. A decision analysis of the U. S. breeder reactor program. *Energy*, 1978, 3(6): 747-767.
- [48] Messner S, Schrattenholzer L. MESSAGE-MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively. *Energy*, 2000, 25(3): 267-282.
- [49] Lashof D, Tirpak D. Policy Options for Stabilizing Global Climate (including Technical Appendix). Washington, D. C.: Hemisphere Publishing Corp, 1990.
- [50] Manne A, Richels R. Global Climate Change. White J, Wagner W, Beal C. Netherlands; Springer, 1992: 211-239.
- [51] Manne A, Oliveira-Martins J. Comparisons of model structure and policy scenarios: GREEN and 12RT OECD Model Comparison Project (II) (1994) (draft), Annex for the WPI Paper.
- [52] Rutherford T. The Welfare Effects of Fossil Carbon Restrictions: results from a Recursively Dynamic Trade Model. OECD Dept. of Economic Statistics, Resource Allocation Division, Working Paper No. 112(OECD/GD(91), Paris, " 1992.
- [53] Peck S C, Teisberg T J. Global warming uncertainties and the value of information: an analysis using CETA. *Resource and Energy Economics*, 1993, 15(1): 71-97.
- [54] Manne A, Mendelsohn R, Richels R. MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. *Energy Policy*, 1995, 23(1): 17-34.
- [55] Mustafa H B, John M R, Monika M, Richard S E, Ian S W, Robert C H. The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) model: revisions, sensitivities, and comparisons of results. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change Reports, 2001, 71: 4-82.
- [56] Brenkert A L, Kim S H, Smith A J, Pitcher H M. Model Documentation for the MiniCAM; Pacific Northwest National Laboratory Richland, WA; 2003.
- [57] Maria C L, Barbara J M. The co-production of science and policy in integrated climate assessments. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 57-68.
- [58] U.S. Energy Information Administration. The national energy modeling system: an overview, 2009, <http://www.eia.gov/oiaf/aeo/overview/electricity.html>.
- [59] 张阿玲, 李继峰. 构建中国的能源-经济-环境系统评价模型. *清华大学学报: 自然科学版*, 2007, 47(9): 1537-1540.
- [60] 吉平, 周孝信, 宋云亭, 马世英, 李柏青. 区域可再生能源规划模型述评与展望. *电网技术*, 2013, 37(8): 2071-2079.
- [61] WEM: World Energy Model - Methodology and Assumptions. http://www.iea.org/media/weowebsite/energymodel/WEM_Methodology_WEO2011-1.pdf.
- [62] Böhringer C, Löschel A. Computable general equilibrium models for sustainability impact assessment: status quo and prospects. *Ecological Economics*, 2006, 60(1): 49-64.

- [63] 王礼茂. 资源安全的影响因素与评估指标. 自然资源学报, 2002, 17(4): 401-408.
- [64] 郭小哲, 段兆芳. 我国能源安全多目标多因素监测预警系统. 中国国土资源经济, 2005, 18(2): 13-15.
- [65] 张生玲. 中国的能源安全与评估. 中国人口. 资源与环境, 2007, 17(6): 101-104.
- [66] 李继尊. 中国能源预警模型研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2007.
- [67] 刘强, 姜克隽, 胡秀莲. 中国能源安全预警指标框架体系设计. 中国能源, 2007, 29(4): 16-20.
- [68] Von Hippel D F. Energy security analysis: a new framework, 2004. <http://www.energycommunity.org/reCOMMEND/reCOMMEND2.pdf>.
- [69] World Energy Council (WEC), Energy Efficiency Policies around the World: Review and Evaluation, http://www.worldenergy.org/documents/energyefficiency_final_online.Pdf.
- [70] International Atomic Energy Agency, United Nations Department of Economic and Social Affairs, International Energy Agency, Eurostat, European Environment Agency; Energy indicators for sustainable development: guidelines and methodologies, IAEA, Vienna, 2005.
- [71] International Energy Agency (IEA). Energy Technology Policy. Paris: OECD/IEA, Measuring Short-term Energy Security, 2011.
- [72] Joint Energy Security of Supply Working Group (JESS). First Report of the DTI-of gem Joint Energy Security of Supply Working Group [R/OL], 2002.
- [73] Jansen J C, van Arkel W G, Boots M G. Designing indicators of long-term energy supply security. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), 2004.
- [74] Scheepers M, Seebregts A, Jong J. EU standards for energy security of supply updates on the crisis capability index and the supply/demand index quantification for EU-27. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), 2007.
- [75] Gupta E. Oil vulnerability index of oil-importing countries. Energy Policy, 2008, 36(3): 1195-1211.
- [76] 迟春洁, 黎永亮. 能源安全影响因素及测度指标体系的初步研究. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 6(4): 80-84.
- [77] 房树琼, 杨保安, 余垠. 国家能源安全评价指标体系之构建. 中国国情国力, 2008, (3): 32-36.
- [78] Nguyen N. Assessment of Energy Security Using Social Network Analysis and Food Web Analysis [D]. Budapest: Central European University, 2012.