

8-20-2024

Research and implications of the US clean energy strategy

Lanchun LI

Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; Department of Information Resources Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

See next page for additional authors

Recommended Citation

LI, Lanchun; LIU, Qing; CHEN, Wei; TANG, Yun; and CHEN, Jun (2024) "Research and implications of the US clean energy strategy," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 39 : Iss. 8 , Article 6.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20240117001>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol39/iss8/6>

This Policy & Management Research is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.



Research and implications of the US clean energy strategy

Abstract

As the world enters a new period of carbon neutrality, the US government is actively building a clean energy innovation ecosystem through both internal and external measures. Systematically tracking and in-depth analysis of the intent, structure, approach, and other characteristics of the new phase of the US clean energy strategy is of practical significance to Chinese energy revolution. The US focuses on the strategic objectives of science and technology innovation, energy security, and infrastructure, and has constructed an innovation ecology characterized by technology lists, planning blueprints, full-chain research, and innovative subjects from the perspective of whole-government coordination, cross-institutional decision-making, deep research, and development organization, and participation of the whole society. It is recommended that China should strengthen its macro-strategic objectives, improve its innovation promotion mechanism, construct an all-round integrated innovation path by condensing a number of technology lists, updating the development roadmap, reinforcing, restructuring or setting up a special research plan to stabilize support, organizing and promoting the technological research of strategic scientific and technological forces, and promoting in-depth international cooperation, among other initiatives.

Keywords

clean energy, strategy, policy paradigm, US, scientific and technological innovation

Authors

Lanchun LI, Qing LIU, Wei CHEN, Yun TANG, and Jun CHEN

引用格式:高俊莲,张博,张国生,等.数字经济时代我国能源模型的创新发展研究.中国科学院院刊,2024,39(8):1336-1347,doi:10.16418/j.issn.1000-3045.20230430002.

Gao J L, Zhang B, Zhang G S, et al. Innovative development of China's energy models in digital economy era. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(8): 1336-1347, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230430002. (in Chinese)

数字经济时代 我国能源模型的创新发展研究

高俊莲^{1,2} 张博^{3*} 张国生⁴ 刘合⁵

1 中国矿业大学(北京) 管理学院 北京 100083

2 湘江实验室 长沙 410205

3 厦门大学 管理学院 厦门 361005

4 中国石油勘探开发研究院 北京 100083

5 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室 大庆 163712

摘要 数字经济时代,爆炸式增长的海量数据和新兴技术为能源模型研发带来了新机遇与新挑战。文章立足能源模型发展的历史脉络与当前动向,重新审视了能源模型的基本内涵及其狭义和广义之分,并从全球视角分别剖析了两类模型的最新研究进展与技术前沿。聚焦国内实践,阐明了数字经济时代我国能源模型研发亟待解决的包括实现自主创新、契合国情、服务“双碳”目标和加速数字技术赋能在内的诸多现实需求,以及面临的数字处理能力水平不足、数据共享壁垒和模型理论技术创新难度升级等系列挑战。最后,文章从提升能源模型的综合集成能力,构建中国特色能源模型学科体系,改善能源模型的可靠性、实用性与灵活性,以及加快能源模型领域的人才培养与开发等4个方面,提出了数字经济背景下推动我国能源模型研发及创新应用的相关建议。

关键词 能源模型, 能源战略, 数字技术, 数字经济

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20230430002

CSTR 32128.14.CASbulletin.20230430002

*通信作者

资助项目:湖南省湘江实验室重大项目(22XJ01008),国家自然科学基金基础科学中心项目(72088101),国家自然科学基金重大项目(72192843),中央高校基础科研业务费(2024SKPYGL02、2023SKPYGL03)

修改稿收到日期:2024年6月11日;预出版日期:2024年7月26日

能源模型是用于模拟和预测能源系统行为的数学模型，是研究和解决能源相关问题的重要工具。20世纪70年代中期，世界性石油危机的发生促使学术界高度关注能源供应安全问题，积极开展能源预测及关联模型研究，能源系统分析工具方法开始不断涌现^[1]。随着计算机技术的发展，能源需求预测和能源供应规划的模型化得以实现，出现了TESOM^[2]、MARKAL^[3]等模型。伴随能源市场化进程，能源模型在更丰富的数据支撑下得到进一步发展，出现了以LEAP^[4]和NEMS^[5]为代表的经典模型。在应对气候变化成为全球性问题并逐步得到重视的背景下，越来越多的能源模型开始考虑并纳入温室气体排放，进而有了综合评估模型的雏形^[6]。随着能源模型的日益功能化，模型开发与应用所关注的焦点从单一的能源供应安全，延伸到能源经济、能源与环境、能源与健康，甚至能源与社会等系列问题。能源模块、经济模块、大气化学模块、地球系统模块等连接、耦合多模块的综合模型逐渐形成^[7]。目前，大多数欧美发达国家和地区的研究机构及主流智库均投入大量人力、物力，开发了成熟的能源模型工具，并不断增加新的应用场景，这些模型工具已在能源战略规划与气候政策的制定过程中发挥了巨大作用。

随着新一代信息技术的广泛应用，数字技术与能源行业逐步融合，并为行业高质量发展赋能。煤矿智能化、智慧油气田、智能电网建设得到快速推进，源、网、荷、储一体化协同配置，煤、油、气、电、氢等多能互补，电网、热网、燃料网甚至水网等多网融合，使得现代能源体系呈现出包容、韧性、绿色、低碳、智慧的特征。面对全新的能源发展格局与能源经济形势，传统的能源模型已无法满足当前复杂多变的决策需求。同时，以数字化、网络化、智能化为特征的数字经济蓬勃发展，正在深刻重塑经济社会发展的模式和动能，数字技术驱动能源系统变革。数字经济和能源革命交织演进，为能源模型创新发展带来重

大机遇，同时也对能源模型的适用性、精准性、创新性提出了更高要求。数字经济时代创新发展能源模式亟须重新定义能源模型及其内涵，充分融合大数据、人工智能等前沿技术，构建出与新型能源体系相适应的智能化建模与决策支持工具。

为此，本文系统梳理了能源模型的基本内涵和研究范畴，全面总结了当前主流模型的构建思路。在此基础上，探讨了全球能源模型研究的最新进展，深入剖析了数字经济时代我国能源模型的研发需求和当前研究与实践面临的现实挑战，进而为主动把握数字经济的变革趋势，推进有中国特色的能源模型研发及其方法体系的构建，提供研究、应用及管理决策参考。

1 能源模型的基本内涵与范畴界定

在数字经济时代，能源模型研发正在经历由依赖传统的能源转化过程分析或经济学的理论假设向基于数据驱动和技术创新引领的新范式转变。这种变革不仅拓展了能源模型的传统范畴，也增加了其复杂性和功能性，以适应新兴技术和不断变化的能源复杂系统与经济社会系统。基于此，对能源模型的理解与认知需要从狭义和广义两个层面进行界定。

1.1 狭义的能源模型

狭义的能源模型即传统的能源模型，通常基于运筹、优化等数学方法，聚焦于能源生产、转化/转换、分配和消费的数学模拟。模型参数往往依赖于人工提取的结构化数据和先验知识，包括能源消费、生产能力、资源分布等，以及与经济、环境和技术进步相关的外部数据。模型功能主要专注于预测未来的能源需求和供应情况，探讨优化资源配置，评估不同能源政策的潜在影响，常用于处理线性系统和稳定条件下的能源问题，从而服务于中长期的能源政策和战略规划制定。根据不同的分类方式，传统的能源模型分类也不同。根据模型的功能和使用目的，有研究将其分为能源系统优化模型、能源系统仿真模型，以及定性

和混合方法模型^[8]。根据应用的数学方法划分,将能源模型分为线性规划、混合整数规划、动态规划、随机规划及基于Agent的建模等类型^[9]。

一般而言,最常用的分类方式是按照建模逻辑及模型分析方法,将能源模型划分为自上而下的模型、自下而上的模型与混合模型^[10]。前两种模型的本质区别在于处理消费者行为、企业行为,以及市场表现的方法不同^[11]。

(1) **自上而下的模型**。自上而下的模型是一种基于经济学理论的能源系统建模方法,侧重于将能源系统与其他宏观经济部门建立联系,简化能源系统的组成部分和复杂性。此类模型包括可计算一般均衡(CGE)模型、投入产出模型^[12]、计量经济模型^[13]、系统动力学模型^[14]及多智能体^[15]等。其中,CGE模型是自上而下的模型中最为典型的代表。CGE模型通过构建福利、就业以及经济增长之间的互馈关系,一般以最大化社会福利为目标,利用生产要素(劳动力、资本等)分配来实现均衡(图1)。模型对于能源技术的考虑主要是基于价格相关政策,如税收、补贴等。

技术进步通常利用基于学习或研发的学习曲线来刻画,对特定部门详细的规划能力较弱。

(2) **自下而上的模型**。自下而上的模型的主要特征是基于能量及物质平衡原理,从能源系统最小单元(如单个技术或者设备)的输入、输出及效率入手,构建局部能源模块,进而通过能源从供给到需求的全过程,自下而上地构建和分析整个能源系统(图2)。模型搭建过程依赖于大量的技术及设备参数,并依据技术及设备的投入产出,基于工程技术原理,实现对能源供给与需求的分析。自下而上的能源模型能够较好地刻画能源系统的物理特性和技术特征,分析不同能源部门之间的相互联系,但缺少能源系统对宏观经济系统影响的反馈分析。由于对能源活动产生的成本评估局限在所分析的系统内部,一般情况下,自下而上的模型对于给定减排目标的成本估计小于自上而下的模型。

(3) **混合模型**。混合模型是将自上而下模型和自下而上模型相结合,包括“软链接”和“硬链接”两种方式。“软链接”需要人为地将数据及参数在模型

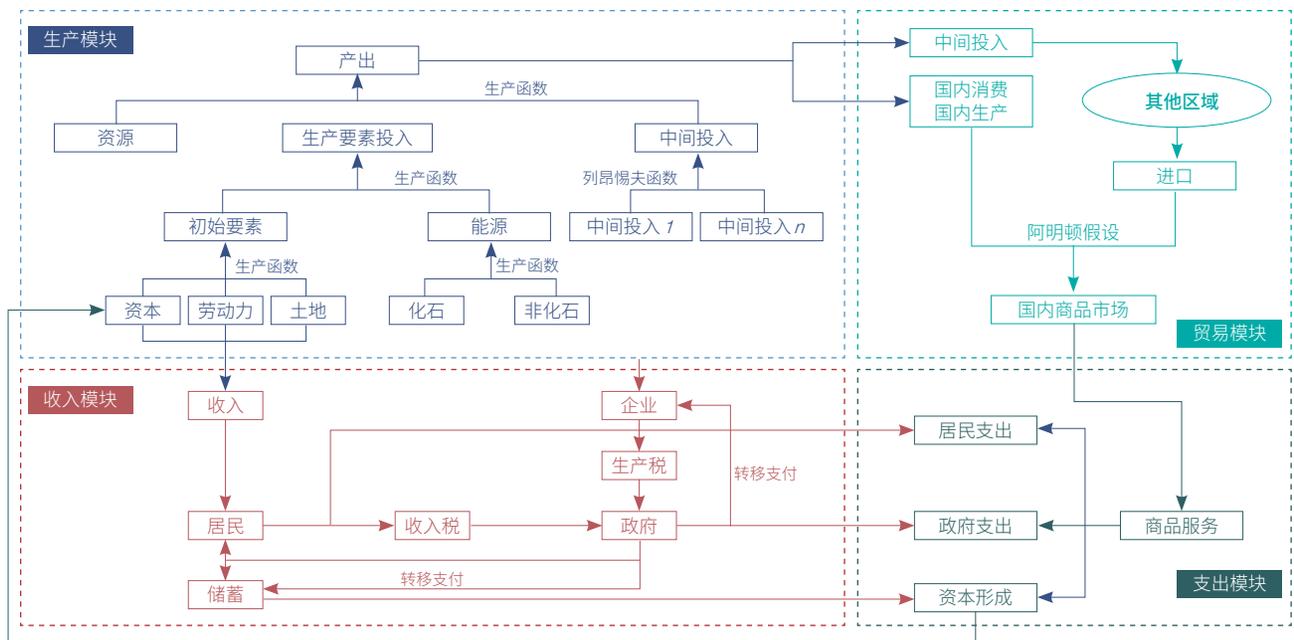


图1 可计算一般均衡 (CGE) 模型的机理

Figure 1 Mechanism of CGE model

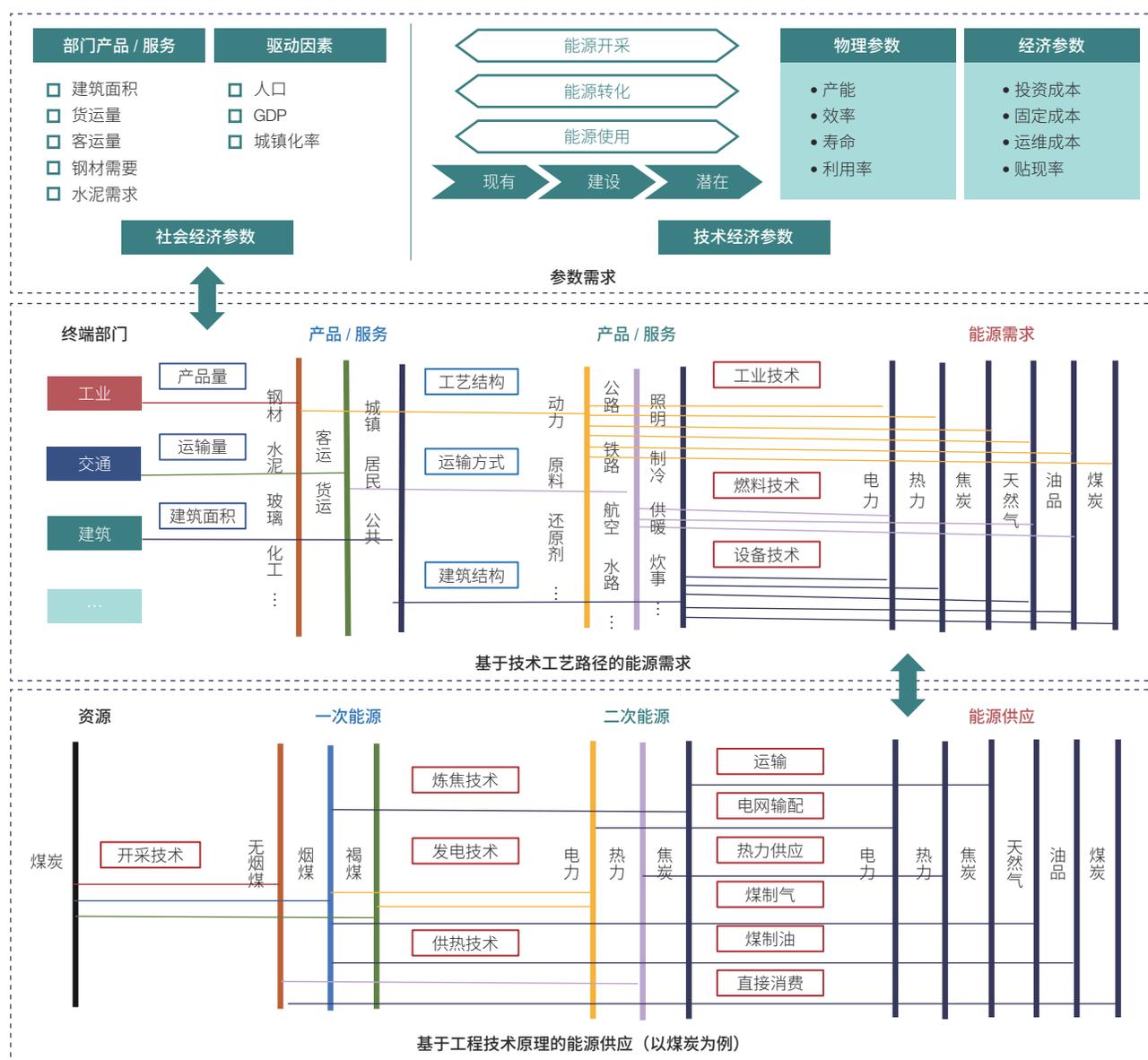


图2 自下而上能源模型的机理及参数

Figure 2 Mechanism and parameters of bottom-up energy model

间传输，而“硬链接”借助程序实现数据和参数在模型间的传输。近年来，常见的气候变化综合评估模型均是将气候、经济、环境和能源模块相互耦合形成闭环，是混合模型的典型代表^[16]。自下而上的能源模型可以与自上而下的经济模型相结合进行不断的迭代优化，还可以进一步与大气循环模块、气候模块及相关的影响评估模块进行链接，实现人类活动与地球系统的双向耦合，进而形成多种形式的闭环模拟（图3）。

1.2 广义的能源模型

在数字经济发展的背景下，能源模型不断融合大数据分析、人工智能、机器学习和物联网等各种数字技术，以提高模型的预测精度、适应性和交互性。模型的形态已经不仅仅是预测和优化的工具，更是实时监控和动态调整能源系统的平台，可以实时收集和分析来自各种智能设备的数据，以优化能源流和提升系统的整体效能。不同于传统模型侧重于中长期预测和静态优化，广义模型强调实时性和动态性，能够及

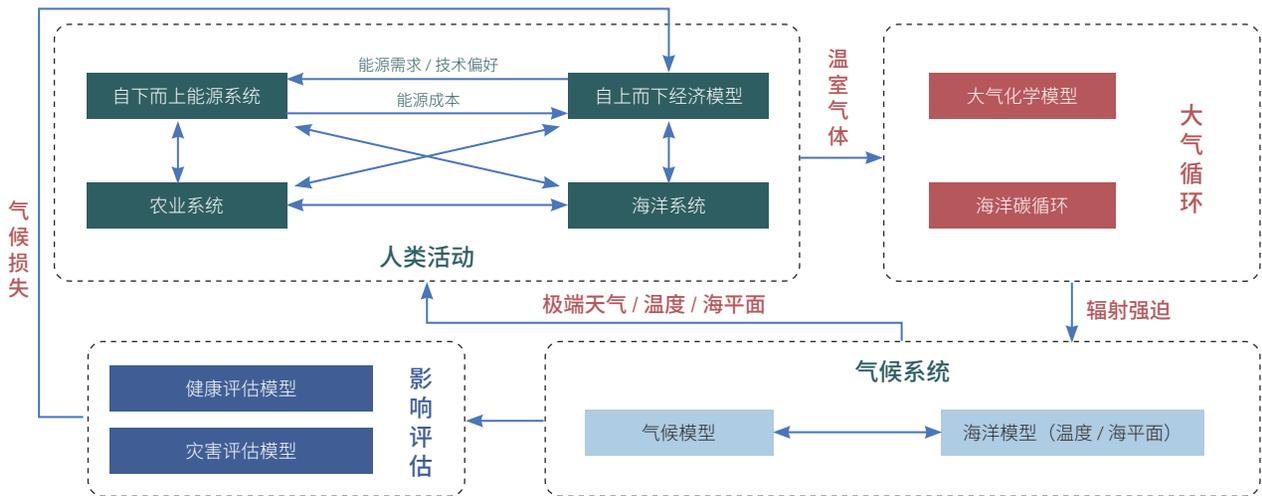


图3 混合模型机理

Figure 3 Mechanism of hybrid model

时响应外部变化，及时优化决策。

广义能源模型是伴随数字经济时代能源系统数字化、智能化的新趋势而逐步兴起的新事物，其内涵外延还处在不断丰富和拓展之中，尚未形成统一、规范、成熟的定义和分类体系。一方面，不同研究视角和应用场景对广义能源模型的理解和界定各有侧重，尚未达成普遍共识。例如，部分模型突出呈现数据驱动和人工智能视角，部分模型聚焦于能源系统和数字技术的融合，还有部分模型关注于多能互补和智慧能源，也有部分模型的研发立足于能源区块链和能源互联网视角等。另一方面，由于广义能源模型尚处在快速发展演进之中，新模型、新内涵、新应用不断涌现，其内在逻辑和外在表征尚未完全清晰和稳定，不同模型之间的异同、联系和边界有待进一步厘清。因此，对广义能源模型的界定和分类还有待学界和业界在理论、方法和实践上进一步探索、积累和凝练，形成较为成熟的知识体系。

尽管广义能源模型的定义和分类尚不成熟，但其代表了能源模型发展的新方向、新趋势，对探索数字经济时代能源系统新模式具有重要意义。未来，广义能源模型的研发及应用无疑将引领能源模型领域的理论创新、方法突破和应用拓展，成为支撑能源体系变

革和能源行业数字化转型的关键力量之一。

2 全球能源模型发展的前沿动态

2.1 传统能源模型的研发趋势

传统能源模型在建模理念、技术路线上相对稳定，虽然还未能广泛融入数字经济时代的新技术和特征，但也在不断与时俱进，呈现出一些新的发展趋势。

(1) **集成度不断提高。**随着研究需求及技术水平的提高，能源模型的集成度不断提高，主要体现在数据、软件和学科上的集成。① **从数据层面看**，能源模型从最开始的经济、能源数据扩展到了生态、环境、健康、气象等数据类型。随着数据范围的持续扩大，能源模型也逐步拓展为综合评估模型，涵盖气候、经济、社会、生态、水资源、土地利用等多个模块，其应用范围也不断扩大。② **从软件层面看**，能源模型从最初的模型优化求解软件出发，随着技术的进步，目前大部分模型通常需要使用各种软件工具，包括数据处理工具、可视化工具等，更好地集成了各种软件工具，提高了模型的易用性和效率。③ **从学科层面看**，能源模型从能源科学、经济学出发，随着社会需求的发展，模型开发涉及更多的学科，包括但不限于信息

科学、管理科学、环境科学、地球科学及工程技术科学等方面的知识。随着多学科交叉与融合，以及建模技术的不断发展，能源模型可以更好地整合各种学科的知识，提高模型的综合性能。总体来看，集成度的提升可以大幅提高能源模型的准确性和可靠性，使得政策制定者与研究者可以更加科学地拟订政策，并且更好地预测评估政策的实施效果和可能影响、提高政策的综合性和协调性。

(2) **程序代码开源化**。早期的能源模型通常由政府、大型企业和学术机构等专业组织开发和使用，这使得公众很难获得详细信息，也限制了研究人员和其他组织在能源模型领域开展工作。网络社区的出现是数字经济时代的重要产物，各种在线社区（如 Github、Stack Overflow 等）聚集了大量的专业人士和技术开发爱好者，尤其是能源建模爱好者开始在此类社区分享知识、讨论问题。2014 年，开源能源建模倡议（OEMI）作为一项国际性的倡议，旨在促进能源领域的开源建模和数据共享^[17]，大多数模型可以在 Github 上公开获取。截至 2024 年 5 月已有超过 250 个开源能源模型加入，编程语言以 Python、R 为主，并且开源的能源模型逐渐接近商业模型的功能^[17]，能源模型情景研究的透明度问题也出现了相应的标准^[18]。目前，大型研究机构的模型都陆续做了开源化处理，模型的开源化有利于被不同研究小组用于涵盖全球和区域尺度的能源问题研究^[19,20]。总体来看，能源模型朝开源化的方向发展是一种必然的趋势，有助于弥合理论和实践的差距，产生更大社会影响，增加模型透明性，加速模型改进，促进模型的交叉验证和准确性提升。应当强调的是，我国的能源模型研究团队在模型代码的透明度上还整体落后于国际水平，大部分并未实现自主化和开源化。

(3) **模型尺度精细化**。数字经济时代下的数据处理技术及数据获取方式为传统能源模型尺度的精细化提供了技术和数据支撑。① **高性能的计算机、并行计**

算、分布式计算等技术为能源模型提供了更多的计算资源，可以保证模型的稳定性和运行效率。能源模型尤其是电力系统的模型时间分辨率已经从早期的年度、月度提高到了日、小时，甚至更高的时间分辨率^[21]（图 4）。在空间上，模型从大洲、国家尺度细化到了网格及点源尺度^[22]。② **数据获取技术提供了更准确、更丰富的能源数据**。互联网、物联网、传感器等技术收集的大量设备级数据，使得模型具备了更丰富的技术细节，可以在更细致的层面上描述或刻画不同的技术、设备和情景，如电力系统的旋转备用^[23]、储能设备^[24,25]等。③ **应用需求进一步促进了模型精度的提高**。随着供给与需求界限的模糊，电力规划为了更好地适应需求，需要更高精度的模拟分析。总体来看，随着数据处理技术、数据获取方式及应用需求的不断发展，能源模型的时空精度也在不断提高，有助于模型应用于更多的领域，在更加微观的层面上，以更高的时空分辨率，采用更加全面准确的信息和手段来模拟和预测未来的能源供需情况及其与经济社会、生态环境等系统的互动耦合，这有助于制定更加切实可行的战略与政策。

2.2 广义能源模型的研发趋势

广义能源模型正以数字化、智能化、网络化为牵引，以体系化、生态化、平台化为导向，呈现出下述演进趋势。

(1) **模型智能化**。通过集成机器学习技术，包括深度学习和强化学习等子领域，来赋予能源模型更高级的认知能力。① **自主学习和自我调整**。通过持续的学习和数据分析，智能化的能源模型能自动识别和适应能源市场和环境变化的新模式。例如，自动调整预测算法，根据实时天气条件、用户行为或市场需求变化来优化能源分配策略。② **复杂数据分析**。深度学习和强化学习等技术特别适用于处理非线性和高维度的问题，处理和分析来自各种传感器和智能设备的大规模实时数据集，提取有价值的洞察。③ **智能决策支**

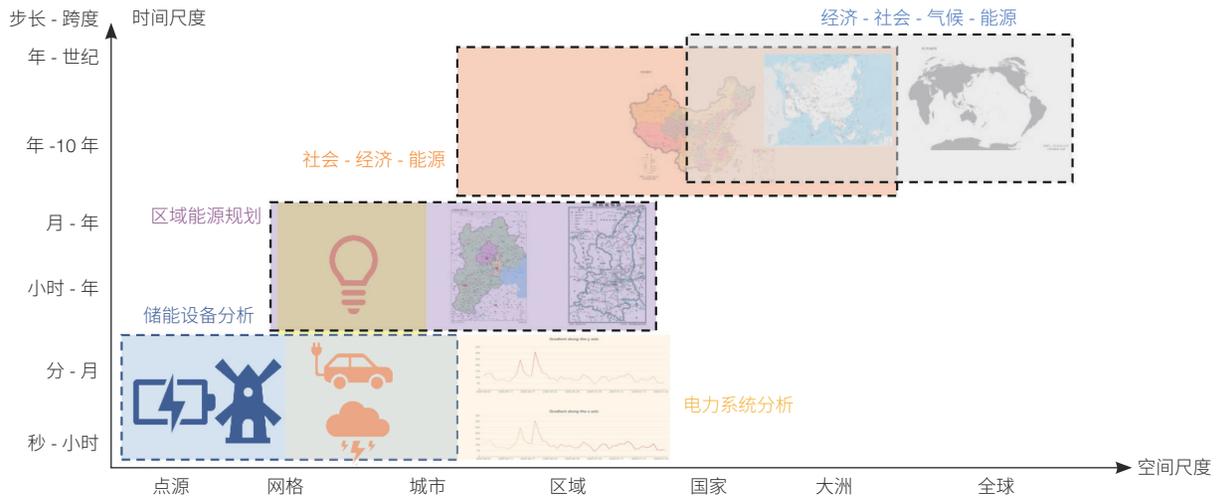


图4 能源模型时空尺度

Figure 4 Spatial-temporal scale of energy model

图中中国地图审图号为GS (2016) 2923; 京津冀都市圈区域图审图号为GS (2016) 610; 陕西省地图审图号为陕S (2021) 023; 亚洲地图审图号为GS (2023) 2761; 世界地图审图号为GS (2016) 1561

The map approval number for China is GS(2016)2923; for the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Area, the approval number is GS (2016)610; and for Shaanxi Province, the approval number is Shaanxi S(2021)023, the map approval number for Asia is GS(2023) 2761, the map approval number for the world is GS(2016)1561

持。模型的智能化使其能够提供基于数据驱动的决策支持（如自动调节电网负载）优化能源储备使用，以及预测和管理能源系统的风险。

(2) **多模型混合**。通过集成优化模型、物理模型、统计模型、智能模型等多种范式的优势，构建高度融合、高维可视化的混合智能模型体系，全方位分析复杂能源系统。① **模型间的高度融合**。多模型混合通过算法和数据层面的集成，实现了模型间的无缝对接和相互补充。例如，数字孪生技术、物理模型可提供关于能源系统物理和化学过程的深入洞见；统计模型则擅长处理和预测大规模历史数据模式；智能模型（如基于机器学习的模型）则能从数据中学习并预测未来趋势，优化系统性能。② **多能流系统的整合分析**。随着能源形态的多样化，如电力、热能、冷能等不同形式能源的综合管理变得越来越重要。多模型混合允许进行跨能源形态的协同优化和规划，通过模拟不同能源之间的交互作用，实现能效最大化和成本最小化。

(3) **模型生态化**。通过构建模型组件库、模型算

法库、知识图谱等，将各类能源模型按照标准接口有机地组合起来，形成灵活定制、功能多样的综合建模平台。① **模型组件库和算法库**。通过开发和维护一个包含各种模型组件和算法的库，使模型开发者可以轻松访问和使用资源来构建或优化自己的能源模型。组件可以是预处理数据的工具、优化算法或是特定能源应用的模拟技术等。② **跨平台模型的服务**。利用最新的API技术和微服务架构，构建跨平台的模型服务，允许模型功能以服务的形式被部署在云平台上，支持多种客户端访问，实现模型的即用即走。云边端协同则进一步拓展了模型的应用场景，使模型能够在云中进行大规模计算，同时在边缘端快速响应本地数据。

未来，传统能源模型与广义能源模型相互借鉴、交叉融合将成为必然趋势。二者优势互补，有机结合，必将不断催生能源模型的新理念、新范式，为建设新型的能源复杂系统提供坚实的模型工具和方法支撑。

3 数字经济时代我国能源模型研发需求与面临的挑战

3.1 我国能源模型研发的现实需求

我国正处在能源革命、数字经济两大变革叠加期，能源体系正经历前所未有的深刻变革，亟须研发自主创新、体系完备、适应国情的能源模型。同时，从国际视野审视，我国能源模型发展还存在短板，研发及应用需要进一步强化。

(1) 实现模型研发的自主创新方面。在国内能源模型研发领域，长期依赖于引进和模仿国外的成熟模型，虽然在技术空白期能迅速补齐短板，但随之而来的是一系列深层次问题。例如，限制了国内研发在原创性、适应性及技术深度上的发展。由于缺少对模型底层逻辑和核心算法的掌握，导致国产模型在复杂的国际场景中往往无法展示其应有的适应性和解释力，国内模型服务于国际能源治理和国际气候谈判面临较大挑战。由于缺乏能够独立支撑决策的模型系统，我国在重要的全球性议题中话语权受限，不仅影响了我国的国际影响力，也制约了我国在全球能源与气候政策形成中的参与度和主导能力。国内模型的局限性反映了一个更广泛的技术依赖问题，即在关键技术和理论研究方面未能实现自主突破。在日益复杂的地缘政治博弈与国内外经济形势，以及资源环境领域国际竞争加剧的背景下，急需我国科研力量在能源模型领域进行深入和系统的自主创新研究。

(2) 构建适应国情的模型体系方面。各国的资源环境条件差异要求能源模型拥有能够精准反映国家特点的模型体系，而我国的能源系统展现出能源资源禀赋多样、能源需求持续增长，以及政策调控性强、约束条件多等独特性。尽管如此，目前国内运用的能源模型常常缺乏足够的本土化定制，未能充分反映出能源系统的复杂性与时空差异。国内现有的模型多聚焦于特定技术或经济过程，而在国家层面缺乏整合，尤

其是聚合多尺度（从地方到国家级）、多领域（涵盖产业、居民和交通多个能源消费领域）、多场景（正常供需平衡、突发事件响应等情境）的能源模型体系缺失，导致现有模型在应对复杂的国家能源战略政策制定和应急管理时显得难以适配。更为重要的是，从国家能源安全的高度考虑，构建一个能够全面反映和预测能源流动、市场反应及政策影响的协同模型体系，不仅能处理常规的能源经济活动，还能在能源危机、环境变化等非常态事件中提供决策支持，其对保障国家能源安全与可持续发展，显得尤为迫切。

(3) 服务“双碳”目标的模型研发及应用方面。实现“双碳”目标，给我国现有能源系统带来前所未有的挑战，也对能源绿色低碳转型提出了阶段性要求。目前，国内关于如何实现这一转型的能源模型刻画存在显著分歧，尤其是在路径选择和政策评估方面，分歧的原因部分源于现有的模型在覆盖领域、数据质量、方法论等方面的局限。国内的能源模型主要集中在传统的能源消费和生产模拟，而对于纳入金融、经济和社会维度的温室气体排放预测（以碳排放为主）及具体减排路径的综合模拟分析能力尚显不足。模型难以为“双碳”进程预测、路径优化及具体政策的制定提供全面的、科学的决策支持，尤其是在评估各种气候政策和减排技术的经济和社会影响方面。

(4) 加速数字技术赋能模型研发方面。随着大数据、人工智能等数字技术的飞速发展，能源系统的数字化、智能化和网络化转型对能源模型提出了新的高标准，不仅需要模型在传统的预测和分析能力上更加精确，还要求模型能够实时互动、迅速适应变化并进行智能优化。然而，当前我国能源模型在智能化应用方面还存在一定的短板。多数模型还停留在依赖传统算法和人为调整的阶段，这使得能源模型在处理复杂、动态的能源数据时效率低下、响应迟缓，难以满足实时数据处理和决策支持的需求。特别是在数字经

济背景下,这种不足更加突出,需要深度融合能源技术与数字技术,打造一批智能预测、智能优化、智能调控的新型数字化能源模型。

3.2 数字经济时代我国能源模型研发面临的挑战

(1) **数据处理能力水平不足**。随着大量传感器、智能计数器的发展及数字化能源资产的增加,能源行业的数据量呈现爆炸性增长,涵盖了从能源供给到终端消费的各个环节,具有高维度、高频率和大体量的特性。这对能源模型的数据处理能力提出了新的要求。我国能源行业庞大复杂,数据基础设施总体薄弱,远程在线监测系统覆盖率低,各环节智能传感器布局不足,难以实现高效实时获取全面的数据支撑,对海量数据收集存在瓶颈。大数据分布式处理、实时流数据处理、并行计算等基础技术和工具的应用相对滞后,数据处理能力不足制约了模型的实时性和高维度。高效的数据处理不仅需要先进的技术,也依赖于具备相关技能的人才,能源数据的处理需要掌握能源行业知识和数据智能处理技能的复合型人才,但目前这类人才的培养模式单一,人才匮乏已成为瓶颈。

(2) **数据共享壁垒有待突破**。由于一些能源数据涉及国家能源安全问题,数据共享的同时需要保证数据的安全性和隐私性,能源模型数据的共享已有进展,仍不如计算机科学或生物医学领域普遍。目前,大部分能源模型关联的公开数据为宏观数据,如人口、国内生产总值(GDP)、城镇化率等^[26]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)一直强调加强模型的透明度,但是《全球升温1.5°C特别报告》所用的支撑模型也只对外公布了结果数据,输入参数未公开发布,影响报告科学性和权威性^[27]。国际能源署(IEA)、国际能源经济学家协会(IAEE)等国外大型组织提供了一些公开数据,但数量和范围还远远不够。我国在数据共享方面也较为落后,详细的微观数据,特别是企业和个体级别的能源消费数据均不易获取,限制了我国能源模型的深入研究。在强调数据共

享的同时,如何平衡数据安全性、可用性和隐私保护是一大难题。

(3) **理论技术创新难度升级**。由于能源系统呈现出更加复杂多变的非线性和动态性特征,传统的建模方法论在数字经济时代受到严峻挑战。数字技术与能源系统的深度融合,使得能源系统的结构日益复杂,能源流、信息流、价值流汇聚,能源系统的行为愈发依赖于海量异构数据的交互作用。单一学科的理论视角难以揭示其内在机理。同时,大数据、人工智能、区块链等颠覆性技术在能源领域得到广泛应用,数字孪生、智慧能源、能源互联网等新模式、新业态不断涌现,使得能源供给与需求界限日益模糊,能源供需预测趋于复杂,而能源技术创新、商业模式创新与能源模型系统的交互影响机制尚不明晰,缺乏系统性理论阐释。此外,数字经济发展大大拓展了能源系统边界,各类主体行为更加活跃,能源生产、消费行为更趋复杂多样,供需博弈更趋激烈,进一步加大了建模理论与技术突破的难度。

4 新时期我国能源模型创新发展的对策建议

抓住数字经济时代机遇,准确把握全球能源模型发展动态与技术前沿,研发具有自主知识产权和中国特色的大型能源模型,并加快其推广应用,有效服务于国家及区域重大战略需求,是今后我国各类型能源模型创新发展亟须解决的问题。

(1) **强化关联数据基础设施建设,提升能源模型的综合集成能力**。① **立足我国数字经济发展基础,建立国家级能源大数据中心**。加快能源领域传感器、智能仪表等数据采集设备的部署,构建覆盖能源全产业链、全价值链的数据感知网络。统筹能源数据采集、存储、管理和应用,推动能源数据标准化、规范化,提高数据质量和可用性,为跨领域数据汇聚融合奠定坚实基础。② **加大海量能源数据处理关键技术攻关,提升数据处理效率**。面对海量、异构、非结构化的能

源数据,实现从数据到信息、从信息到知识、从知识到智慧的跃升。③加强能源模型集成技术研发与应用研究,吸收数字技术的新理念、新方法。借鉴人工智能、多智能体等前沿理论,推动能源、经济、气候、环境等不同领域模型的深度耦合集成,全面提高模型的综合性和系统性。

(2) 夯实能源模型基础理论研究,构建中国特色能源模型学科体系。①加强重大理论和方法的原创性研究。针对能源系统的不确定性、动态性等特点,结合我国丰富的应用场景与海量数据资源优势,加强不确定性理论、系统优化理论、多能融合理论、多主体博弈理论等能源模型基础理论研究。结合人工智能、区块链等新技术发展,加强智能优化、深度学习、多智能体等智能化建模新方法研究,形成一批原创性理论成果。②推进能源模型领域的学科交叉融合与知识创新。加强能源模型研发与数学、物理、信息、经济、管理等学科的交叉融合,深入研究能源系统建模的一般规律和中国特色的政策环境、社会经济条件及区域发展需求,提炼能源模型研发的“中国经验”。③加强中国区域特色和新兴领域的模型研发。考虑区域能源资源条件,加强区域能源互联网与综合能源系统研究,提高多尺度能源系统整体优化能力水平。顺应数字化、智能化趋势,强化能源模型与智慧能源系统、综合能源服务等新业态、新模式融合创新。

(3) 创新数据共享机制,改善能源模型的可靠性、实用性与灵活性。①建立开放共享的能源模型数据平台。明确数据的产权归属和使用权限,确保跨领域数据汇聚的法律和政策支持。通过搭建国家、行业和企业级的共享平台,促进政府、企业、研究机构的数据共享,从而丰富能源模型的数据源。②创新能源模型参数的辨识与动态更新技术。基于能源物联网等新型数据采集手段,获取能源系统运行的动态数据,应用机器学习、数据同化等智能算法,实现能源模型关键参数的自动识别和实时更新。③强化数据安全和

隐私保护能力。制定统一的数据安全管理制度,明确数据分级分类管理要求。借助区块链等新技术,实现数据的可追溯、不可篡改,保证数据溯源的真实性和完整性。

(4) 以重大战略需求为牵引,加快能源模型领域的人才培养与开发。①完善能源模型领域人才培养体系。面向数字经济与绿色经济发展需求,加快建设多层次、多类型、学科交叉的能源模型人才培养体系。在高校开设能源模型相关专业课程,培养具备扎实理论基础和专业技能的高素质人才。鼓励能源企业、互联网企业等参与人才培养,开展订单式、项目制人才的定制化培养。②加强能源模型领域人才开发与领军人才培养。制定能源模型领域专业化人才支持政策,完善人才评价和激励机制。重点支持一批能源模型领域具有战略眼光、战略思维、扎实理论基础的拔尖创新人才。③以科技攻关牵引能源模型人才队伍成长。加大科技投入,支持能源模型领域基础理论、共性技术、重大工程的攻关,鼓励能源企业、科研机构等建立能源模型创新中心、应用创新实验室等科技转化平台,打造人才聚集的“高地”。

参考文献

- Hoffman K C, Wood D O. Energy system modeling and forecasting. *Annual Review of Energy*, 1976, 1(1): 423-453.
- Kydes A S, Rabinowitz J. Overview and special features of the time-stepped energy system optimization model (TESOM). *Resources and Energy*, 1981, 3(1): 65-92.
- Fishbone L G, Abilock H. MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the bnl version. *International Journal of Energy Research*, 1981, 5(4): 353-375.
- Heaps C G. LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. Software version: 2020.1.91. Somerville, 2020. <https://leap.sei.org>
- Gabriel S A, Kydes A S, Whitman P. The national energy modeling system: A large-scale energy-economic equilibrium

- model. *Operations Research*, 2001, 49(1): 14-25.
- 6 Hoffert M I, Caldeira K, Jain A K, et al. Energy implications of future stabilization of atmospheric CO₂ content. *Nature*, 1998, 395(6705): 881-884.
- 7 舒印彪, 薛禹胜, 蔡斌, 等. 关于能源转型分析的评述:(一) 转型要素及研究范式. *电力系统自动化*, 2018, (9): 1-15.
Shu Y B, Xue Y S, Cai B, et al. A review of energy transition analysis part one elements and paradigms. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, (9): 1-15. (in Chinese)
- 8 Pfenninger S, Hawkes A, Keirstead J. Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 74-86.
- 9 Hall L M H, Buckley A R. A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation. *Applied Energy*, 2016, 169: 607-628.
- 10 Lopion P, Markewitz P, Robinius M, et al. A review of current challenges and trends in energy systems modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 96: 156-166.
- 11 Sathaye J, Sanstad A H. *Bottom-Up Energy Modeling*. Lawrence Berkeley National Laboratory. Elsevier. *Encyclopedia of Energy*. LBNL Report (LBNL-54851), 2004.
- 12 Oliveira C, Antunes C H. An input-output model for decision support in energy-economy planning—A multiobjective interactive approach. *Systems Analysis Modelling Simulation*, 2002, 42(5): 769-790.
- 13 Barker T, Alexandri E, Mercure J, et al. GDP and employment effects of policies to close the 2020 emissions gap. *Climate Policy*, 2016, 16(4): 393-414.
- 14 Papadelis S, Flamos A, Androulaki S. Setting the framework for a business strategy assessment model. *International Journal of Energy Sector Management*, 2012, 6(4): 488-517.
- 15 Sachs J, Meng Y, Giarola S, et al. An agent-based model for energy investment decisions in the residential sector. *Energy*, 2019, 172: 752-768.
- 16 Prina M G, Manzolini G, Moser D, et al. Classification and challenges of bottom-up energy system models—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 129: 109917.
- 17 Groissböck M. Are open source energy system optimization tools mature enough for serious use? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 102: 234-248.
- 18 Cao K, Cebulla F, Gómez Vilchez J J, et al. Raising awareness in model-based energy scenario studies—A transparency checklist. *Energy, Sustainability and Society*, 2016, 6(1): 28.
- 19 Guo F, Van Ruijven B J, Zakeri B, et al. Implications of intercontinental renewable electricity trade for energy systems and emissions. *Nature Energy*, 2022, 7(12): 1144-1156.
- 20 Jie D, Xu X, Guo F. The future of coal supply in China based on non-fossil energy development and carbon price strategies. *Energy*, 2021, 220: 119644.
- 21 Misconel S, Leisen R, Mikurda J, et al. Systematic comparison of high-resolution electricity system modeling approaches focusing on investment, dispatch and generation adequacy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111785.
- 22 Zhao H, Chang J, Havlík P, et al. China's future food demand and its implications for trade and environment. *Nature Sustainability*, 2021, 4(12): 1042-1051.
- 23 Wierzbowski M, Lyzwa W, Musiał I. MILP model for long-term energy mix planning with consideration of power system reserves. *Applied Energy*, 2016, 169: 93-111.
- 24 Zhuo Z, Du E, Zhang N, et al. Cost increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3172.
- 25 Liu S, Lin Z, Jiang Y, et al. Modelling and discussion on emission reduction transformation path of China's electric power industry under "double carbon" goal. *Heliyon*, 2022, 8(9): e10497.
- 26 Browning M, McFarland J, Bistline J, et al. Net-zero CO₂ by 2050 scenarios for the United States in the Energy Modeling Forum 37 study. *Energy and Climate Change*, 2023, 4: 100104.
- 27 Robertson S. Transparency, trust, and integrated assessment models: An ethical consideration for the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Wiley interdisciplinary reviews. Climate change*, 2021, 12(1): e679.

Innovative development of China's energy models in digital economy era

GAO Junlian^{1,2} ZHANG Bo^{3*} ZHANG Guosheng⁴ LIU He⁵

(1 School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2 Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China;

3 School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

4 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

5 National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil,
Daqing 163712, China)

Abstract In the era of the digital economy, the explosive growth of massive data and emerging technologies has brought new opportunities and challenges to the development of energy models. This study is grounded in the historical context and current trends of energy model development, revisits the basic connotations of energy models and their narrow and broad distinctions, and analyzes the latest research progress and technological frontiers of both types of models from a global perspective. Focusing on domestic practices, it clarifies the urgent needs for China's energy model development in the digital economy era, including achieving independent innovation, aligning with national conditions, serving the "dual carbon" strategy, and accelerating the empowerment of digital technology. Meanwhile, this area also faces several challenges such as insufficient digital processing capabilities, barriers to data sharing that need to be overcome, and increased difficulty in model theoretical and technological innovation. From the perspectives of enhancing the integrated capability of energy models, constructing a discipline system of energy models with Chinese characteristics, improving the reliability, practicality, and flexibility of energy models, and accelerating talent cultivation and development in the energy model field, it is proposed that relevant suggestions for promoting the development and innovative application of China's energy models in the context of the digital economy.

Keywords energy models, energy strategy, digital technology, digital economy

高俊莲 中国矿业大学(北京)管理学院副教授。主要研究领域为资源与环境政策、系统建模与分析等。
E-mail: junliangao@cumtb.edu.cn

GAO Junlian Associate Professor of School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing). Her research focuses on resource and environment policy, systems modeling and analysis, etc. E-mail: junliangao@cumtb.edu.cn

张博 厦门大学管理学院教授。主要研究领域为能源经济与数字经济、工程管理与战略管理等。
E-mail: zhangbo@xmu.edu.cn

ZHANG Bo Professor of School of Management, Xiamen University. His research focuses on energy economies and digital economy, engineering management and strategic management, etc. E-mail: zhangbo@xmu.edu.cn

■责任编辑: 文彦杰

*Corresponding author