

“能源气候协同治理机制与路径”栏目主编寄语

促进能源气候协同治理机制与路径 跨学科研究

张希良 教授，清华大学能源环境经济研究所所长，国家973计划“我国2020年温室气体控制目标、实现路径及支撑体系”项目首席科学家，国家社科基金重大项目“中国应对气候变化国家方案政策措施中的关键问题研究”首席专家。研究方向为碳市场，能源经济。

姜克隽 研究员，中国宏观经济研究院能源研究所。主要研究以模型应用为主，包括未来能源和温室气体排放预测和情景分析，温室气体排放控制对策，区域环境对策评价等。

赵英汝 教授，厦门大学能源学院能效工程研究所所长。研究方向为能源系统工程，多能互补综合能源系统的建模与优化，城市能源系统、能源互联网、化工动力多联产、智慧综合能源规划等应用研究。

鲁宗相 长聘副教授，清华大学电机工程与应用电子技术系。主要研究方向为电力系统可靠性，风电/太阳能发电并网分析与控制，分布式电源及微电网，能源与电力宏观规划。

赵晓丽 教授，中国石油大学经济管理学院，低碳经济与政策研究中心主任。主要研究方向为能源经济与可持续发展，环境管制政策，电力经济与可再生能源激励政策等。

鲁玺 长聘副教授，清华大学环境学院。主要研究方向为能源、气候变化与环境复杂系统建模与评估，风能与太阳能综合评估技术，低碳能源与大气污染协同治理，温室气体与大气污染物排放，绿色低碳智慧城市系统等。

黄瀚 教高，全球能源互联网发展合作组织研究院副院长。主要研究方向为电力系统规划、运行与控制、智能电网技术、新能源发电与并网技术等。

白恺* 教高，《全球能源互联网》主编。主要研究方向为新能源发电与并网、储能等。

低碳甚至零碳能源系统是气候解决方案的基础。为实现各类供能系统的碳减排，诸多综合性、系统性的技术和政策研究从自然学科、工程学科、经济学科、社会学科的不同角度和层次开展，并应用于工程实践，对中国2019年碳排放强度较2005年降低48.1%做出了重要贡献。

2020年，中国提出2030年前碳达峰和2060年前碳中和的新战略目标，主动提高国家自主贡献指标，吹响了能源领域加速减排行动的号角。研究表明，大多数减排措施都需要多学科、多产业、多部门的深度合作；同时，碳排放的演化和发展是个长周期的过程，中观尺度的行业脱碳发展规划、碳市场机制以及微观尺度各类脱碳综合技术研究，迫切需要宏观尺度能源系统层面提出中长期远的定量约束、目标和路径方案。但受限于行业和学科条块分割等历史原因，当前宏观尺度能源系统研究在学科融合、量化研究深度方面尚显不足。

通过分析能源系统互联互通的发展趋势以及能源系统微观、中观和宏观尺度研究之间的密切相互影响，提出大框架下的宏观能源系统跨学科融合和定量研究方法学的重要性，倡导学术期刊积极主动为能源气候研究搭建跨学科交流平台。

■ 互联互通成为能源系统发展的重要特征

能源系统的核心是化学能、热能、机械能、电磁能、原子能等多种能源形式转换。在以化石能源为主导的二十世纪，传统能源领域形成了相对稳定的基础理论体系、学科体系和部门或行业。以电力部门为例，形成了以火电、水电、核电等同步发电机组为主力电源，通过不同电压等级的交流输电网给用户电能提供电能的系统格局。

在当前世界能源转型的共识下，能源生产与消费向清洁化和电气化方向加速发展，多种能源的转换、应用和相互关系更加复杂。特别是随着随机性、波动性的风能、太阳能发电逐渐成为很多区域电网的主导电源，不但使电力系统的特性发生根本转变，

也给整个能源系统的结构和运转机理带来革命性影响。

从能源技术角度看，为获得更低成本的绿色用能，各类相同或不同形式间能量的转换技术蓬勃发展；同时，非水可再生能源的随机性和分布特征使得电力系统的时间和空间维度特性日益复杂，必须采用更多系统性、综合性技术方案保证电力系统的安全、可靠和经济运行，包括以互联实现更大范围、更多种类资源的低成本配置，用各类储能实现能量在不同时间尺度的转移，用市场机制和互联网技术激活用户侧需求响应等。随着越来越多的国家、城市和大企业做出碳中和承诺并开展行动，能源系统中可再生能源比例和电气化用能比例将持续提高，这将驱动各类能源的转换、存储、源网荷储协调控制以及多能源综合利用等技术不断创新。

从能源业态角度看，在各种能源转换技术的支撑下，特别是信息技术融入能源系统，催生大量新的能源业态。如图1所示，过去较为独立的电力、交通、工业、建筑等不同部门已经由能量流紧密联系起来，同时，以信息技术为底层环境，以政策和市场为协调机制，诸多社会行为以多种用能方式被引入到能源系统中，能源系统已经演化为以清洁电力为中心的多部门深度耦合能源系统。

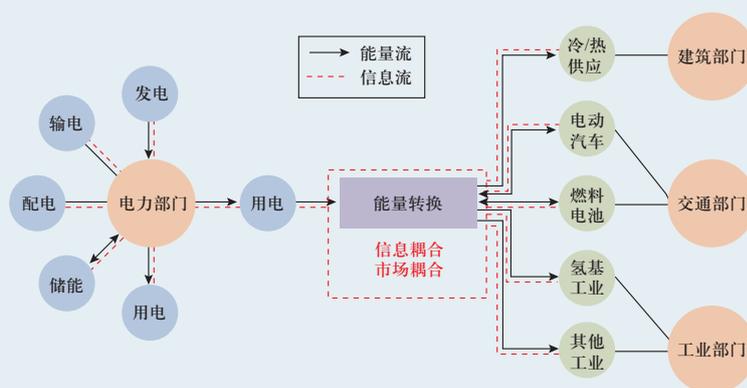


图1 以电力为中心的多部门深度耦合能源系统

Fig. 1 Multi-sector deeply coupled energy system central on electricity

与能源系统上述技术特征和社会经济属性相对应，能源系统研究问题的尺度可以大致分为微观、中观和宏观层次。微观尺度主要涉及基础科学和工程技术，解决各类能源转换和存储的材料和关键装备等问题。中观尺度主要包括系统集成技术以及电、碳市场等技术经济问题。宏观尺度则包涵了更多社会因素，例如能源系统减排问题以及与之密切相关的经济、气变、环境、甚至政治等问题，是建立在中观尺度能源系统上的宏观层次研究，为政策制订提供依据。

微观、中观和宏观能源系统研究的层次划分并非绝对，且三个层次的研究密切相关。例如从微观和中观尺度的综合能源系统研究得到的技术特征，可以为更宏观层面的电力与建筑、交通融合的城镇和区域规划提供建模参数，产业布局、生态环境等宏观尺度研究可以预测区域电力和能源需求、新能源技术发展规模等，反过来为城镇和区域能源规划、电碳市场机制设计等提供依据。在过去主导行业背景和工程技术推动下，行业内微观和中观尺度研究合作历来比较密切，而随着当前能源系统的互联互通特性日益加强，不同学科和部门在微观和中观尺度研究上更深入交流合

作已成为趋势。而宏观能源系统的研究涉及经济、环境、气候变化等领域，研究者多来自完全不同的学科背景和行业，交叉学科交流和合作的重要性更加突出。宏观能源研究需要中观和微观研究的支撑，这也是目前能源战略研究亟需改善的地方，如近期关于更大规模可再生能源接入电网技术性问题的争议，如果技术性问题没有好的解决方案，会影响未来的能源总体发展格局。

■ 宏观能源系统研究需要定量方法学不断推动

近年来，气候变化引起了人们对能源转型这一主题的极大兴趣，宏观能源系统研究正处于新兴领域并在不断丰富。能源系统宏观研究聚焦可持续能源大规模、系统级的长期规划方案，涉及能源系统转型的动态以及利益、成本等经济环境影响，研究需跨越自然、社会和工程科学的许多领域。目前，能源系统宏观尺度研究问题主要包括实现碳中和的能源系统结构，经济系统的转型模式，减少温室气体排放的市场和政策解决方案及其经济、环境和社会福利分配影响，环境和经济对能源需求影响的预测方法，新兴能源技术的经济和环境价值，能源系统中动力学的发展和新技术的采用，环境对当前和未来能源技术的影响等。当前，诸多学科和行业研究人员正在努力理解这些变化，并从不同层次、不同角度开展宏观能源系统研究，研究中已经吸收了来自一系列学科的知识和方法，包括工程、环境科学、运筹学、金融和经济学，特别是随着计算技术进步，一般和非一般均衡模型、生命周期评估、技术学习曲线等共同的定量研究工具已经得到广泛应用。

宏观能源系统研究的现象和问题具有复杂性、系统性、前瞻性、长期性和协调性等突出特点，需要主动借鉴复杂科学和工程定量模型方法开展研究，逐步建立符合宏观能源系统研究的专门方法，向定量模拟、抽象建模、数据分析方面发展，使研究过程更加符合科学研究范式，研究结果更加贴近现实。这要求研究人员从中、微观尺度能源系统研究中提取知识、方法和观点等信息，开展工程、经济、环境和社会因素的共同分析，对各类因素相互影响进行仔细的比较和恰当的权衡，发掘对宏观能源系统的整体理解，以回答能源转型社会尺度的问题。总之，在宏观能源系统这个研究领域，交叉学科融合需要兼具广度和深度。

然而，围绕宏观能源系统相关研究，目前各学科主要还是从本学科角度出发组织会议交流、发表学术期刊论文等，面临知识分散、术语不完全一致、深度交流合作机会少、跨学科评价困难等问题，不利于包括方法学在内的研究成果共享和快速迭代，也不利于中观和微观能源系统相关研究人员深刻理解宏观能源系统研究的目标以及正确应用该方向已有成果。

■ 促进能源气候协同治理机制与路径的跨学科研究

未来能源系统将是清洁电力为核心的能源系统，为探索促进能源气候研究的跨学科交流和合作，《全球能源互联网》编辑部策划在2021年新设置“能源气候协同治理机制与路径”栏目，邀请跨学科的7位专栏特约主编，尝试为不同学科开展宏观能源系统研究搭建交流平台，探索能源气候协同治理机制与路径的跨学科和定量研究，以期加速该方向学术研究水平进步。

目前该栏目主要包括以下内容：

- 1) 实现碳达峰和碳中和目标的能源-环境-经济系统集成建模与分析；
- 2) 气候治理与大气环境质量协同路径研究；

- 3) 碳中和发展路径及其目标下的电力能源系统规划方法，电力与气候变化关系；
- 4) 不同能源形式及行业的能源效率提升与用能终端电能替代研究；
- 5) 氢能、生物质能及CCUS等零碳和负碳能源技术及系统的建模、评价及发展路径；
- 6) 促进能源转型的电力市场、碳市场等机制设计等；
- 7) 国家或地区能源政策、能源环境经济、能源可持续研究。

本期刊载了该栏目的第一批6篇论文。中国宏观经济研究院能源研究所姜克隽等基于能源-环境-经济集成模型，研究了全球2050年1.5℃场景下低价格零碳电力发展对中国一些工业产业发展布局的影响，提出中国氢基产业战略安排的迫切性；清华大学鲁宗相等考虑影响演化路径的多重不确定性因素，提出基于全局灵敏度方法的中长期电力系统发展情景模拟方法，并以中国西北电网为例，展示高比例可再生能源发展的演化路径；清华能源互联网创新研究院王永真等基于能值分析理论建立了风力发电、光伏发电、燃煤发电、燃气发电和水力发电的可持续性综合评价体系，并对中国未来能源结构进行计及能值的能量、经济及环境可持续性综合评价；国家气候中心常蕊等综述了气候变化对风能资源开发潜力的影响以及风能开发与生态环境和谐发展的气候服务技术进展，提出了能源气候服务技术发展建议。在实践案例方面，挪威Refinitiv的秦炎用欧洲电碳市场最新实际数据分析了欧洲碳市场推动电力减排的作用机制，包括碳价和燃料价格对电力现货市场出清顺序的影响，互联大电网和统一电力市场如何促进碳价机制发挥对清洁能源的配置作用等；东南大学高赐威等建立综合考虑碳排放、能源效率、安全性、经济性的电力系统转型评估指标体系，并以安徽为例提出区域电力部门深度脱碳的建议。

■ 展望

提高宏观能源系统理论研究及应用实践水平，需要自然科学、工程技术和社会科学共同支撑。搭建宏观能源系统研究跨学科交流和方法学研究平台，可以促使更多研究人员致力于一系列共同的问题，共享核心方法学并促进其进步，可靠地审查和评价研究成果的真实性和新颖性，提高学术研究对实践指导的可行性和可靠性。

希望广大研究人员能够关注《全球能源互联网》“能源气候协同治理机制与路径”专栏，积极来稿交流，促进宏观能源系统研究领域学术发展和实践应用，切实推动碳中和目标下中国能源部门加速转型。