

欧洲能源危机成因、影响与应对措施

邹洋¹, 王剑晓², 戴璟³, 周越⁴, 张天策⁵, 秦佩欣³, 许庆宇³, 宋洁^{1,2}, 吴建中⁴

(1. 北京大学工业工程与管理系, 北京市 100871; 2. 大数据分析与应用技术国家工程实验室(北京大学), 北京市 100871;

3. 清华大学能源互联网创新研究院, 北京市 100089; 4. 卡迪夫大学工程学院, 卡迪夫 CF24 3AA, 英国;

5. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206)

摘要: 能源安全是国家安全的重要组成部分,在世界格局动荡、气候风险不断升高的当下,保证国家能源安全具有重要意义。2021年,欧洲爆发能源危机,为各国政治经济带来巨大挑战。新冠疫情后的经济复苏、极端天气导致供暖需求增加、欧洲各国激进的能源转型政策以及俄乌冲突导致的能源格局变化是这次能源危机的主要原因。欧洲能源危机对中国在能源转型过程中的政策制定、科技创新等方面带来一定启示。文中首先分析了近年来欧洲能源危机的现状、成因及影响因素;然后,研判欧洲各国采取的能源韧性提升措施;最后,归纳总结应对能源危机的解决策略,对中国能源安全战略发展提出政策建议。

关键词: 欧洲能源危机; 能源安全战略; 能源系统; 低碳转型; 能源供给; 极端天气

0 引言

随着全球气候变暖趋势加剧,气候风险水平提高。为加强气候治理、保护人类生存环境,各国应对气候变化的能源政策不断加码,碳达峰、碳中和、清洁化发展道路已经成为国际社会基本共识^[1]。然而,当前世界格局动荡,各类“黑天鹅”事件频发,新冠疫情、极端天气、中美博弈、俄乌冲突等事件为世界各国能源安全带来巨大风险,能源短缺已经成为突出的全球性挑战。

能源安全不仅关乎国家经济社会发展,更是推动社会主义生态文明建设和高质量发展的关键,稳定的能源供应是对国家安全的基础保障^[2]。在当今复杂多变的国际环境下,必须牢牢把握国家能源安全,确保国家长治久安。然而,中国能源安全面临多种挑战和风险。到2021年,中国能源生产规模达44.1亿t目标煤,但对外部能源的依赖性水平较高,能源自给率为82%。此外,对石油和天然气资源的依赖程度正在逐年增加,这一状况令人担忧^[3]。地缘政治风险、全球低碳行动等对全球能源结构造成的冲击增加了中国获得外部能源供应的不确定性。此外,中国仍存在能源地方壁垒、供需错配等原因导致的结构性能源短缺问题,部分地区的阶段性缺电

情况仍较为严重,为人民经济生产和生活带来诸多影响^[4]。

当前,全球能源面临转型,中国的能源可持续发展正逐步推进^[5]。在中国能源发展战略中,推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系是一项关键举措^[6]。在2020年9月,中国明确提出了实施“碳达峰·碳中和”的“双碳”增长方向,为了实现社会经济的绿色低碳发展,中国能源系统正面临具有挑战性的转型进程。随着新能源占比不断提升,传统电力系统面临着具有挑战性的转型过程,这一过程既需要可接受的经济成本,又需要保障能源供应的安全稳定。

在低碳能源转型领域,作为全球碳中和进程的主要推动者,欧洲进行了较多能源转型的探索和部署,然而仍未能避免能源危机的发生。2021年,能源价格暴涨,全球能源供应紧张,给各国的政治经济带来了极大的挑战。新冠疫情后,各国经济复苏,加上极端天气导致的供暖需求增加,使得能源市场需求上升。然而,欧洲各国激进的能源转型政策、对俄罗斯能源的高度依赖,以及俄乌冲突发生后来自俄罗斯进口天然气的大幅下降等多种因素共同导致了本次能源危机的发生。

欧洲能源危机的发生表明,居安思危、强化能源底线思维是必要的。通过对欧洲能源危机的分析和研究,可以帮助中国吸取教训,完善能源安全战略;借鉴国外经验,加强能源风险应对能力;优化低碳能

收稿日期: 2023-01-29; 修回日期: 2023-06-22。

上网日期: 2023-07-30。

国家重点研发计划资助项目(2022YFB2405600)。

源转型布局,提升中国能源系统韧性。因此,本文首先分析近年来欧洲能源危机的现状、成因及影响因素;然后,研判欧洲各国国家采取的能源韧性提升措施;最后,归纳总结应对能源危机的解决策略,对中国能源安全战略发展提出建议。

1 历史上的能源危机

能源市场中价格波动颇为常见,通过价格波动,市场向消费者、生产者以及投资者传递能源商品的稀缺程度,对其行为产生影响。然而,能源短缺和价格激增将给经济社会带来巨大挑战。从1973年至1990年,全球能源市场经历了3次剧烈波动并以石油价格波动为主要特征。

1973年10月,中东爆发战争,随后以沙特阿拉伯为主的阿拉伯石油输出小组成员国宣布,对支持以色列的国家实施石油禁运^[7],从而引发了第1次能源危机。由于这次石油禁运,全球石油价格上涨近300%,从3美元/桶上涨至近12美元/桶^[8]。这给西方国家带来了巨大的国际收支逆差,最后导致了1973至1975年战后资本主义社会最严峻的市场经济挑战^[9]。1979年至1982年初,伊朗爆发伊斯兰革命,引爆了第2次能源危机。两伊战争的爆发使得伊朗和伊拉克的原油日产量急剧减少,原油价格从15美元/桶飙升至最高39美元/桶,这一系列经济变动导致西方工业国遭遇了重大经济衰退。1990年,第3次能源危机开始,伊拉克由于海湾战争受到了各国制裁,导致原油供给停滞,沙特阿拉伯油田产出也遭到严重威胁,从而使原油价格从21美元/桶飙升至46美元/桶^[10]。

2 2021年欧洲能源危机

与历史上3次能源危机均体现为石油危机不同,由于天然气在能源转型过程中对能源供应起到越来越重要的作用,2021年欧洲能源危机主要体现为天然气价格急剧上涨、屡创新高。

如图1所示,2021年4月起,英国国际石油交易所天然气期货结算价格不断攀升,2021年12月达到453便士/色姆,短暂下跌后于2022年3月升至501便士/色姆,2022年8月价格升至570便士/色姆。受天然气价格影响,国际原油期货价格也不断上升,如图2所示,2022年3月布伦特原油期货结算价格上升至最高点,达128美元/桶,年同比上涨87.5%。

由于欧洲采用边际定价的电力定价机制,电价与天然气价格直接挂钩,高昂的天然气发电成本使

得欧洲电力价格随之飙升,引发电力危机。如图3所示,2022年8月,德国批发电价的月均值达到466欧元/(MW·h),年同比增长459.5%,而法国、意大利和英国的电价分别上涨70.6%、64.0%和53.8%。

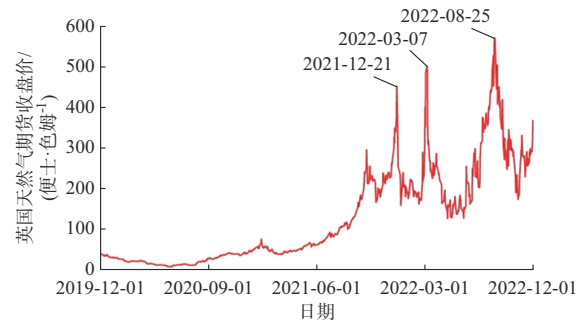


图1 英国国际石油交易所天然气期货收盘价格走势
Fig. 1 Run chart of closing price of natural gas futures from British International Petroleum Exchange

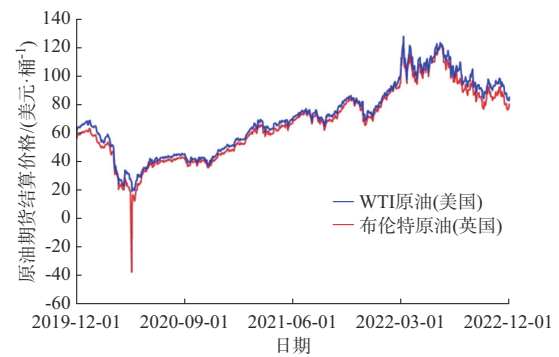


图2 原油期货结算价格走势图
Fig. 2 Run chart of settlement prices of crude oil futures

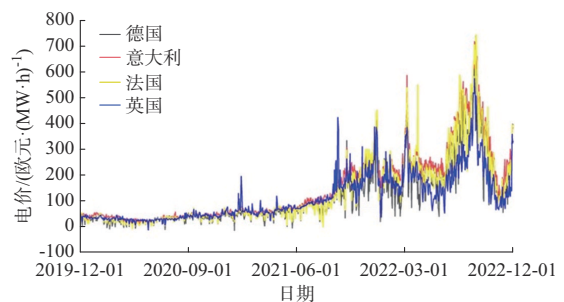


图3 欧洲多国批发电价走势图
Fig. 3 Run chart of European wholesale electricity prices

3 欧洲能源危机成因

历史上前3次能源危机均有各自的主导诱发因素。然而,本次欧洲能源危机是多种因素共同作用的结果:既受到新冠疫情大规模传播、自然气候变化等因素的影响,也与俄乌冲突、欧洲激进的能源转型策略以及对俄能源过度依赖有关。本文将从需求侧

和供给侧分别探究欧洲能源危机的成因。

3.1 新冠疫情后的经济复苏与寒冷的冬季导致欧洲能源需求旺盛

欧洲能源危机主要体现在天然气的短缺,天然气需求可分为工业、电力需求和住宅、商业需求两大类。

3.1.1 工业、电力能源需求增加

一般情况下,受经济活动影响,工业、电力的能源需求变化与国内生产总值(GDP)增速高度相关。2020年新冠疫情在全球范围内大规模蔓延,经济停摆、消费萎缩,使得全球大宗商品需求大幅下降,短期内对全球贸易造成巨大冲击^[11],天然气、石油等能源的消费需求也相应降低。具体而言,2020年全球贸易额减少3%,天然气需求下降1.9%^[12]。然而,进入2021年后,随着疫情限制的放松,世界经济复苏强劲,消费回暖,天然气需求陡然增加。欧盟在2021年第2季度GDP大幅反弹,同比增长13.2%。如图4所示,从2021年第2季度起,欧盟27国的电力需求量基本恢复至疫情前水平,电力消耗量达到2018—2019年同期均值的99.4%。如图5所示,2021年第2季度欧盟27国天然气消耗量提升至疫情前(2018—2019年)同期均值的114.2%。图中:s1至s4分别表示第1季度至第4季度。

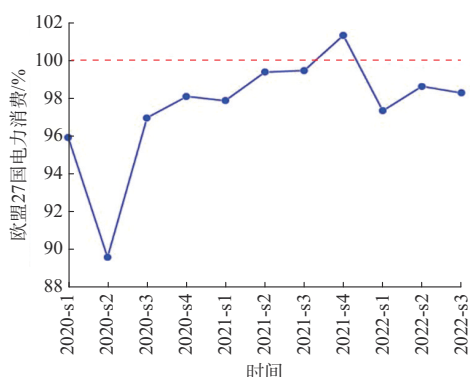


图4 欧盟27国电力消费走势图

Fig. 4 Run chart of electricity consumption in 27 countries of European Union

此外,随着液化天然气贸易的增长,天然气市场呈现日益紧密的区域一体化趋势,亚洲、欧洲对天然气的竞争愈加激烈。为满足经济增长所需能源消耗,中国对液化天然气采购的增加、印度对抗疫封锁政策的放宽,也导致天然气的工业需求呈恢复态势^[13]。亚洲地区消费量的回升使得液化天然气的价格不断上涨,并于2021年3月至6月短短3个月内实现价格翻倍。尽管如此,为了消除长期合作中价格固定带来的约束,欧盟减少了长协贸易合同,导致其对冲能源风险的能力大幅降低^[14]。

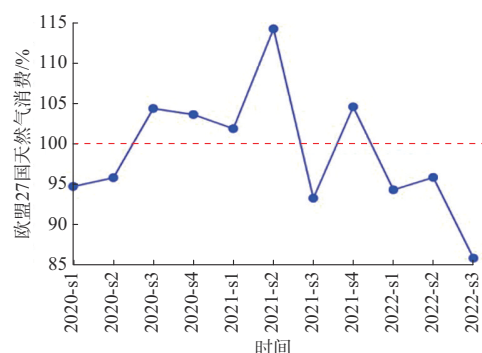


图5 欧盟27国天然气消费走势图

Fig. 5 Run chart of natural gas consumption in 27 countries of European Union

3.1.2 住宅、商业能源需求增加

受季节变化影响,天然气市场具有显著的周期特性,由于每年11月至第2年3月北半球国家的冬季取暖需求强烈,该时间段也成为天然气市场的需求旺季。天然气市场在该时间段完成去库存后,从第2年4月开始补充库存,并持续到下一个需求旺季。然而,2020年至2021年之间,欧洲的冬季漫长而寒冷,居民供暖需求格外旺盛。研究发现,欧洲在经历2020年疫情导致的天然气库存高位后,于2020年至2021年冬季取暖季期间天然气快速消耗,并在2021年4月达到底部,此后未能如期进行库存回补^[15]。

3.2 气候变迁、地缘政治等多种因素叠加导致能源供给不足

多种因素叠加导致的天然气等能源供给不足,也是形成本次欧洲能源危机的重要原因。

3.2.1 基础设施投资不足与激进的低碳政策

欧洲能源危机体现了世界能源市场投资长期不足这一深层原因。尽管能源需求呈上升趋势,2021年石油、天然气上游产业的投资额仅为2014年的50%,对可再生能源的投资也远远无法满足需求^[16]。

近年来,石油和天然气价格相对较低,以2020年新冠疫情期间为著。各国政府政策制定者高度重视气候变化、环境保护、低碳能源系统等议题。投资者、生产商担忧未来化石能源需求减少,投资风险增加,降低了对石油、天然气新项目的投资意愿。为适应全球绿色低碳转型的大方向,越来越多的国际油气巨头正加快低碳转型的脚步^[17]。在投资下降、液化天然气市场增长放缓的背景下,生产商几乎没有可用于弥补短期能源短缺的剩余产能^[18]。据国际能源署预估,未来对化石能源需求的不确定性较大^[19]。除此之外,由于建设能源供应所需基础设施

的项目周期较长,当政策制定者、投资者、能源行业本身判断有误时,周期性能源短缺和能源价格极端波动的风险将大大提升^[20]。

作为全球碳中和进程的主要推动者,欧洲的减碳目标较为激进。由于欧洲能源供给高度依赖外部,为提升自给能力,欧洲国家大力推动传统能源的退出与新能源装机比例的增加。然而,在新能源装机水平能够支撑能源需求之前,过早退出传统化石能源,加剧了能源风险。

3.2.2 气候条件不利于发电

自2007年起,为降低碳排放,欧洲主动对能源发电结构进行改革,鼓励和推广使用风力、水力等绿色能源发电。2015年《巴黎协议》签署以来,欧洲能源结构发生了重大变化,传统“非清洁”能源的发电量比例逐年下降,并且这一趋势正在加速。2011年至2020年,欧洲煤炭发电比例从25%降至13%。与此同时,随着天然气、风力、水力、太阳能发电占比不断提升,欧洲对清洁能源发电的依赖程度逐年增加^[21-23]。西欧大部分地区,特别是德国和荷兰,几乎1/5的电力供应来自风力发电。然而,风力、水力等清洁能源的发电能力稳定性差,不仅具有明显的季节特性,而且极易受气象因素影响,在极端天气下,发电量可能发生剧烈波动^[24]。2021年欧洲风能发电同比降低17%,这是由于欧洲超高压天气持续,海上风速显著降低,导致风力发电大幅减少,并间接导致欧洲国家对天然气和煤炭需求的提升。

欧洲国家夏季气候干燥,水力发电量下降也对能源供应造成影响。高温使得江河、湖泊和水塘的蒸发量增加,水位下降。2022年1月至7月,欧盟水力发电量较去年同期降低约20%。以法国为例,核电发电量占总发电量的70%,水电则为其第二大电力来源。受老旧核反应堆维护、河流水位下降、水温升高等因素的影响,法国的核电发电量显著降低,跌至数十年来的最低点^[25]。与此同时,干燥的气候导致水电装机量占法国全国总量约70%的罗纳河谷、阿尔卑斯山区及蓝色海岸地区的水力发电量降低60%。

3.2.3 俄乌战争加剧欧洲能源危机

俄罗斯天然气对外出口积极,境内天然气探明储量约 $32 \times 10^{12} \text{ m}^3$,居世界首位。作为世界上天然气产量第一大国,俄罗斯天然气工业股份有限公司2020年天然气产量达 $4.727 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[26]。

一直以来,天然气市场都是买方市场,价格自由化给欧洲客户带来了巨大的经济利益。然而,对俄罗斯能源供应的高度依赖也是欧洲国家能源战略的严重缺陷。2021年欧洲消耗的天然气能源中有高达1/5来自俄罗斯^[27]。尽管在2014年克里米亚事

件后,欧洲增加了相关基础设施的建设,以多样化石油、天然气等能源的进口来源。然而,来自俄罗斯的天然气占欧洲天然气总需求的比例从2005至2010年的年均30%提升至2015至2020年的年均40%,对于部分成员国,该比例接近100%。因此,在能源危机背景下,俄天然气占据市场主导地位,对欧洲的能源安全形成巨大威胁。

2022年2月以来,俄乌冲突的持续发酵使得美欧围绕能源的博弈愈演愈烈。美国、欧洲对俄罗斯实施了多轮制裁,俄罗斯也采取相应的反制措施。俄乌冲突爆发前,德国希望通过建设海上天然气管道北溪二号增加从俄罗斯的天然气进口,满足本国及欧洲其他国家的能源需求。然而,俄乌冲突爆发后,德国停止了该项目^[28]。这些事件的发生使欧洲的天然气供应受到巨大冲击,短期内电力供应紧张,价格急剧增长。长期来看,欧洲的政治、经济、对未来的能源战略布局都受到严重影响^[29]。

此外,从俄罗斯经乌克兰和波兰管道出口到欧洲的天然气于2021年显著降低。2022年4月1日,俄罗斯颁布卢布结算令,要求“不友好”国家和地区的客户用卢布购买天然气;2022年4月27日俄方宣布暂停向波兰、保加利亚供气,并关闭亚尔马输气管道,此后欧洲气价一度上涨20%^[30]。自2022年6月14日起,北溪一号输气量降低至正常状态的40%;7月26日起降低至20%;9月俄方宣布因检修原因无限期关闭北溪一号。至此,俄罗斯向欧盟国家出售的天然气总量与此前相比降低了80%。此后,位于丹麦和瑞典附近水域的北溪一号和北溪二号天然气管道先后被发现至少4处泄漏,致使其输送能力短期内难以恢复。

俄罗斯对欧洲能源系统的影响不止天然气和石油。欧洲的煤炭、铀、化肥,以及对清洁能源转型进程至关重要的矿物和金属也受到严重影响。一直以来,俄罗斯是欧洲最大的煤炭进口来源地,然而,为制裁俄罗斯经济,欧洲主动放弃了最大的外部煤炭供应源,对俄罗斯实施了煤炭进口禁令,并于2022年8月生效。

受上述三方面因素影响,欧洲能源危机不断发展演化且愈演愈烈,其演化路径如图6所示。

4 欧洲能源危机的影响

能源安全不仅关系到经济发展和社会稳定,而且对世界政治、经济格局,乃至军事形势均会产生深远影响^[31]。在本次能源危机中,居高不下的能源价格严重影响了欧洲的社会、经济、环境以及国家安全。

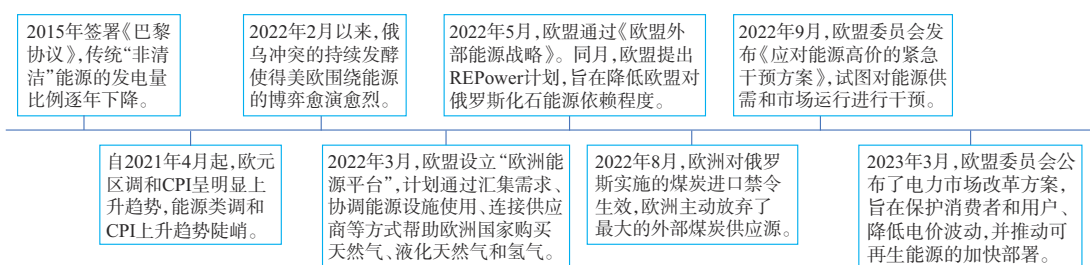


图6 欧洲能源危机的演化路径
Fig. 6 Evolution path of European energy crisis

4.1 环境污染和可再生能源系统部署

能源短缺和价格上涨对环境 and 再生能源的部署将产生一定影响。天然气的短缺使欧洲不得不用煤炭等非清洁能源代替清洁能源,从而导致更多的环境污染。这种反向转换的趋势也使全球范围内的煤炭需求量和利润达到创纪录水平。

此外,能源危机导致的连锁反应在一定程度上影响了可再生能源系统的部署,阻碍了低碳转型的进程。全球可再生能源系统的建设和部署需要依赖较为廉价的化石燃料和大规模生产的燃煤工业。然而,能源短缺严重影响了太阳能电池板制造,导致太阳能和风能等新能源成本在连续多年下降后,迎来首次上涨。

4.2 工业生产受到阻碍

高昂的能源价格给能源密集型公司带来的经济压力是巨大的^[32]。一方面,公司经营利润因此大幅下降;另一方面,由于脱碳进程成本不菲,能源价格的上涨也间接阻碍了工业生产的脱碳进程。

受能源危机影响,部分欧洲公司被迫停产并考虑迁址。“欧洲天然气需求缩减计划”要求各成员国将天然气使用量降低15%。由于目前工业用气量占欧盟总天然气使用量的38%,为达到该目的,欧洲国家需将工业用气降低40%。截至2022年10月,德国钢铁产业已减产约5%,化工产业减产约8%,化肥行业关闭产能约70%。有专家认为,受能源危机影响,欧洲经济复苏阻碍重重。

4.3 国家经济通胀

几乎所有产品均可通过供应链、价值链追溯到上游的化石燃料。因此,能源价格的飙升导致了通货膨胀的加剧。

2022年1月以来,海运、钢铁、油气等全球多数中上游行业价格纷纷达历史高位。能源危机迫使欧美能源密集型企业减产甚至停产,相关行业的产能弹性降低。由于中上游行业产能受到限制,一定程度上导致全球通货膨胀难以降温。2022年10月欧元区通胀率按年率计算达10.7%,再创历史新高,能

源和食品价格持续飙升,通胀压力居高不下。居民消费价格指数(consumer price index, CPI)是反映居民家庭购买消费商品及服务的价格水平变动情况的宏观经济指标。如图7所示,自2021年4月起欧元区调和CPI呈明显上升趋势,能源类调和CPI上升趋势陡峭。电费、燃气费及食品开销增加严重削弱了民众的消费能力,受能源危机和高通胀影响,欧元区经济增长开始放缓^[33]。

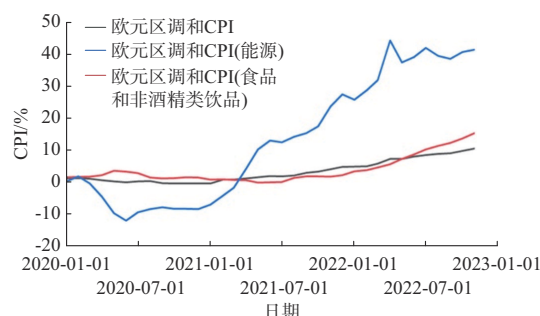


图7 欧元区调和CPI走势图
Fig. 7 Run chart of harmonic CPI of Eurozone

4.4 国家安全风险

国家安全与社会稳定同样与能源安全密不可分,这一点在本次欧洲能源危机中得到充分体现。持续飙升的天然气价格可能引发粮食危机,这是由于食品的生产离不开化肥,而生产化肥需要用到的氨来源于天然气。因此,天然气价格飞涨也引起了食品价格的快速上涨。一些化肥生产厂家由于难以承受高昂的天然气价格而停产,粮食和农业组织对可能发生的粮食短缺危机作出了警告^[34]。能源短缺带来的负面影响不止于此,当粮食安全无法保证时,社会稳定失序和政治动荡的风险极大增加。例如,2011年初以北非突尼斯小贩自焚为开端的“阿拉伯之春”与粮食危机所造成的高通胀和高失业亦是关系密切。

国际能源市场连接紧密,欧洲能源危机不仅会对其自身产生影响,也将影响欧洲以外的其他国家。高昂的能源价格使全球范围内粮食价格不断上涨,进一步推高了本已不容乐观的通货膨胀,从而可

能加剧政府治理不善、生活水平下降所引起的民众不满,导致大规模移民、重大动乱甚至暴力冲突事件的发生。

5 欧洲国家采取的应对措施

为应对能源危机,欧盟及欧洲各国提出了多项政策和措施,旨在缓解能源供给短缺。

5.1 短期行政手段干预能源价格

由于能源价格不断上涨,捷克、德国、法国、意大利等多个国家爆发大规模游行抗议活动,要求政府解决能源通胀问题。欧盟各国亟须降低能源价格上行对居民生活带来的负面影响,避免出现政治动荡。通过行政手段直接干预能源价格在短期内抑制价格上涨是有效的。2022年9月14日,欧盟委员会发布《应对能源高价的紧急干预方案》,试图对能源供需和市场运行进行干预,9月30日欧洲理事会宣布正式批准有关控制能源价格的紧急措施。然而,欧盟国家对是否直接限制天然气价格的想法不一,11月25日欧盟能源部长举行的特别会议中,未能就此此前欧盟委员会提议的天然气限价机制达成一致。

已经通过的《应对能源高价的紧急干预方案》具体包括限电、限价和征收暴利税三方面干预措施。限电措施要求欧盟成员国从2022年12月1日至2023年3月31日主动减少10%的用电量,在用电高峰时段减少5%;限价措施将对欧盟内使用可再生能源、核能、褐煤的发电企业设定180欧元/MW的收入上限,这些企业在能源危机期间受益于电价定价机制,获得了超额收益;征收暴利税政策旨在对石油、天然气、煤炭和炼油部门产生的超额利润征税,用来补贴因电价上涨而受损的家庭和企业。由于欧盟各成员国对于该方案内容分歧较大,各国各自采取行政手段对能源价格进行干预。然而,补税、减税等行政手段导致欧洲国家财政压力巨大,难以长期坚持。

5.2 长期重新赋能(REPower)计划

针对俄乌冲突导致的能源供应短缺以及全球能源市场价格飞涨问题,欧盟提出REPower计划,旨在降低欧盟对俄罗斯化石能源的依赖程度,推动新能源转型,帮助欧洲获得安全、廉价和可持续的能源供应。REPower计划提出的措施包括节能、能源供应多样化、加快推动新能源转型进程、为产业能源转型提供资金支持的智慧投资4个方面^[35]。

节能是解决能源危机、降低电费最快且最有效的方法之一。计划鼓励在短期内通过改变用能行为实现节能,并倡导欧盟成员国采取促进节能行为的财政措施。此外,针对长期节能需要,以2030年欧

盟温室气体净排放量较1990年至少减少55%为减排目标的“减碳55”一揽子计划中提出的能效目标由9%提升至13%。

能源危机发生以来,欧盟努力促进与其他国家的合作,提升能源供应的多元化水平,液化天然气进口量创历史新高,管道天然气输送量也不断提升。2022年3月,欧盟设立“欧洲能源平台”,计划通过汇集需求、协调设施、连接供应商等方式帮助欧洲国家购买天然气、液化天然气和氢气。2022年5月,欧盟通过《欧盟外部能源战略》,与供应商建立长期伙伴关系,加强能源外交,促进能源多样化供应。未来,欧盟也将考虑发展“联合采购机制”,代表成员国进行天然气采购的谈判以及合同签订,并考虑通过立法,要求成员国实现天然气的多元化供应。

长期来看,欧洲将坚持加快推动新能源转型进程,尽早实现有利于能源独立的措施。REPower计划提出,将欧盟2030年可再生能源在能源结构中占比的目标由“减碳55”一揽子计划中提出的40%提升至45%,可再生能源装机容量从1 067 GW提升至1 236 GW。此外,REPower计划提出多项在工业和交通领域的电气化、清洁化转型措施,为提升清洁能源占比、降低化石能源依赖提供支持。

在产业能源转型投资方面,作为REPower计划的核心,欧洲复苏基金将为跨国以及国家能源基础设施的协调规划和融资提供支持。为支持产业转型,提升能源自给能力,REPower计划到2027年增加2 100亿欧元投资,到2030年需达到3 000亿欧元投资。

5.2.1 节约用能、降低能源需求

在REPower计划中,为节约用能、降低能源需求,部分欧洲国家已经部署减少能耗的多项措施,具体包括限制空调和暖气温度、非营业时间关闭照明、缩短供暖时间等。目前,瑞士明确规定,冬季室内暖气温度不得超过19℃,热水不超过60℃,多次故意违规最高可处罚3年有期徒刑;法国要求所有居民降低电器使用频率,否则将推出国家层面的“强制法案”,强制要求居民节约10%能源;西班牙限制公共场所恒温器,并要求建筑大门保持关闭、晚上10点后关闭商店橱窗照明等。

5.2.2 多元化天然气供给,提升天然气库存

由于欧洲自身天然气供给能力较弱,进口比例高达83%,为获得充足天然气供给,欧洲正努力扩大全球天然气合作伙伴。欧盟通过“欧盟能源平台”帮助成员国以及乌克兰、摩尔多瓦、格鲁吉亚、西巴尔干地区购买天然气、液化天然气和氢气,拓展国际合作伙伴,建立长期合作关系,促进天然气供给多

元化。

一直以来,欧洲天然气的主要进口来源为管道气,然而,跨国供气管道主要建设于俄罗斯和高加索地区,短期内难以建设其他管道进行输气。俄乌冲突后,为解决天然气短缺的燃眉之急,欧洲增加了主要来源于美国和北非的液化天然气进口。2022年3月,欧盟委员会和美国发布联合声明,宣布成立联合能源安全工作组,帮助欧洲摆脱对俄罗斯的能源依赖。此外,意大利分别与阿尔及利亚、埃及、安哥拉和刚果签署增加天然气供应的协议。2022年6月,欧盟从美国进口的液化天然气首次超过从俄罗斯进口的管道天然气。

为保证欧洲天然气供应,应对寒冬可能带来的能源需求激增,欧盟设定了天然气最低储气率义务法案,并于2022年6月投票通过。欧盟要求确保2022年11月前天然气储气率达80%。

5.2.3 短期增加化石能源,长期加速能源转型

受欧洲能源危机影响,多个欧洲国家宣布计划暂缓化石能源的退出,并采取多项措施增加能源供应。如重新启动已经关闭的燃煤电厂、增加油气运输能力、推进核电建设等。德国Uniper重启燃煤发电厂至2023年4月供暖季结束,且允许封存的煤电产能重新入网;英国撤回页岩气开采禁令且计划加大北海油气开发;法国重新发展核电,计划建成6座新一代欧洲先进压水堆核反应堆,且将现有核电站使用年限延长至50年以上。

尽管为缓解能源短缺的燃眉之急,欧洲国家纷纷重启化石能源^[36],一定程度上减缓了碳中和进程,但长期来看,本次能源危机更加坚定了欧洲国家通过加速能源转型实现能源自给自足、降低对进口化石能源依赖的发展方向。欧盟提出的可再生能源占比目标不断提升,REPower计划重点提出加大对新能源转型相关领域的投资,而欧洲各国也在俄乌冲突后加速新能源建设的部署。以德国为例,2022年4月,德国发布《复活节一揽子计划》,将100%电力来源于可再生能源产生的时间点从2050年提前至2035年。

5.3 欧盟新版电力改革方案

欧洲能源危机揭示了欧盟的电力市场机制设计存在缺陷。由于欧盟的电价受以化石燃料为基础的发电成本的高度影响,能源价格的飙升使得家庭和企业承担了过高的用电成本。为解决这些问题,欧盟委员会提议对欧盟的电力市场机制设计进行改革,修订欧盟相关立法,以确保欧洲能源主权和碳中和目标的实现。

2023年3月,欧盟委员会公布了备受关注的电力市场改革方案,该电力市场改革方案以保护消费者和用户、降低电价波动、推动可再生能源部署为主要目的。为在短期市场和消费者支付的电费之间建立缓冲区,减少电费对化石能源价格的依赖,提升欧盟电力市场抵御未来价格冲击的能力,提案涵盖一系列措施。具体包括提出购电协议、差价合约和远期合约等方案。其中,购电协议是电力客户和发电商之间的商业合同,发电机组以一定的价格向客户出售电力。差价合约可保证发电商从电力生产中获得稳定收入,在双向差价合约中,如果市场价格低于执行价格,则发电商接收差额;如果市场价格高于执行价格,则发电商偿还差额。远期合约是客户和发电商之间的合同,用于约定未来以一定的价格购买或出售一定数量的电力,从而对冲价格风险,减少对短期价格的依赖。

此外,该提案还旨在促进可再生能源在电力系统中的整合,改善灵活性解决方案的使用条件,加速可再生能源的部署,从而逐步减少天然气发电。拟议措施还将提高短期市场效率,使可再生能源市场参与者有更多交易机会;提高如储存和需求响应等非化石燃料技术带来的电力系统灵活性;最终,将促进更便宜的可再生能源整合,从而为家庭和工业带来更稳定的能源价格。

6 对中国能源安全的启示

能源供应安全、经济安全和环境安全是能源安全的3个层次。在保证能源供应安全、经济安全和环境安全三者之间协调平衡的前提下,进行能源转型和能源革命是应对能源危机的行动宗旨。过度关注任何一个方面都会由于连锁反应导致最初设定的目标难以实现。未来亚洲、欧洲对天然气、液化天然气的竞争仍会一直存在。此外,在对未来能源市场和能源供应进行预测和模拟时,应当充分考虑各方面因素,对全球能源市场的紧缩性以及地缘政治带来的能源风险做出更充分的准备,制定更为完善的应急计划。同时,还要警惕多个极端情况共同存在,例如极端天气和个别能源供应国家发生断供同时发生。长期来看,提升可再生能源占比、减少对天然气的依赖是避免受到难以预估的全球能源市场影响的最有力手段。

中国作为一个新兴市场国家,对能源需求不断上升,2022年在全球能源危机的背景下,中国多地因煤炭供应短缺而导致电力需求暴涨,限电潮发生。如何以合理的价格获得稳定的能源供应,应对

环境污染和全球气候变化问题是中国社会经济可持续发展过程中面临的重要课题^[37]。因此,本文基于能源系统建设中的关键要素,总结和探讨了欧洲能源危机对中国能源安全问题的启示。

6.1 保障合理能源储备,鼓励倡导节约用能

合理的能源储备是应对能源危机的关键。欧洲能源危机暴露了过度依赖进口能源和缺乏足够的储备措施所带来的风险。因此,应该建立健全的能源储备体系,包括战略性储备和应急储备,以应对可能出现的能源供应紧张局面,从而确保能源的稳定供应,在紧急情况下提供支持。能源储备体系的建设和完善具有缓解用能高峰能源短缺的作用。一方面,通过加强政府和企业的能源储备的共建,统筹布局,将有效提升跨区域供应保障能力;另一方面,对煤炭、石油、天然气等多种能源进行战略储备建设将有利于提升能源系统的调峰和应急能力^[38]。

此外,欧洲应对能源危机的经验充分体现,鼓励节约用能既是快速有效降低能耗的措施,也是能源转型过程中不可或缺的重要环节。既可通过加强对用户侧主观用电行为的改变倡导节约用能,也可通过客观条件实现节能增效,例如对房屋绝缘等级的提升和设备家电和生产过程的节能增效。

6.2 发展多轮驱动、供应安全的新型能源体系

欧洲能源危机与其新能源转型进程、极端的气候条件、俄乌冲突、地缘政治等因素高度相关。一直以来,欧洲都充当能源转型“领跑者”的角色,却未能避免能源安全问题的发生。与美国、欧洲国家相比,中国能源结构中煤炭和油气占比较高,如图8所示,2022年中国煤炭消费量占能源消费总量的55.8%,石油占比为19.5%,远高于其他国家^[39]。一方面,是由于欧美国家用天然气替代了煤炭;另一方面,也说明中国对煤炭的依赖度较高,绿色低碳转型进程任重而道远。

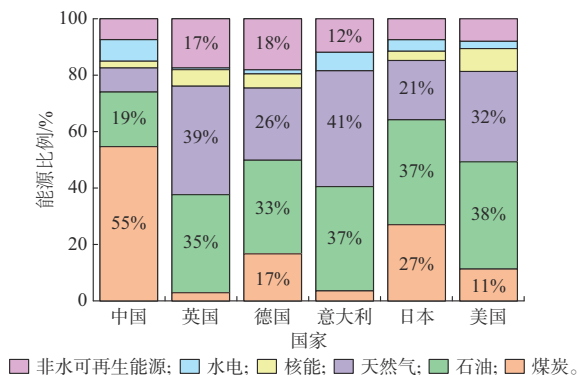


图8 2021年世界多国能源消费结构
Fig. 8 Energy consumption structure of several countries in the world in 2021

尽管中国亟须发展绿色低碳的新型能源体系,然而在转型的过程中,应遵循能源安全原则,实现较为平稳的过渡。近年来,中国电力系统装机结构发生重大改变^[40],新能源装机比例从2010年的3.1%增长到2020年的25.3%^[41]。在大力发展新能源的同时,应对传统能源进行有序退出,提升能源系统韧性,通过多元化的能源供给平稳完成能源转型目标。

在保障传统化石能源供应安全的同时,还应注意保障新能源体系整个产业链的安全。例如,保障所需关键矿物质材料、元器件、设备、软件平台等产业链的战略储备安全。

加快多元分布式储能的应用亦是建设新型能源体系的重要措施。电、氢、气、热等多元分布式储能设施可大幅提升新型能源体系的灵活性,对于调节系统功率、面对突发灾害下的应急调度具有积极意义。目前,中国分布式储能市场仍存空白,亟须通过市场化运行等措施促进多元分布式储能行业的发展。

此外,发展能源互联网,将能源与信息深度融合也尤为重要。通过利用先进的电力电子、信息、智能管理等技术,采集分布式能量,并与能源存储、能源网络相互连通,从而实现能量生产者、消费者的连通,是提升能源利用效率的有效方法。随着分布式能源的增加,能源互联网的发展也将有利于解决工业能源所面临的严峻形势^[42-43]。

6.3 全面推进新型电力系统技术革命

近年来,欧洲能源危机的爆发引起了全球范围内对能源系统的重新思考。面对能源供应紧张和环境压力的双重挑战,欧洲国家积极采取相应措施,推动能源转型和电力系统改革。在这一背景下,中国也认识到了电力系统改革在能源改革中的重要地位。

电力系统改革是中国能源系统改革的重点之一,建设以新能源为主体的新型电力系统、提升整体输配电体系的韧性是能源改革所面临的重要挑战^[44]。中国目前仍处于并将长期处于社会主义初级阶段,经济增长潜力巨大,电力需求在很长时间内仍将保持较高速增长^[45]。

全面推进以新能源为主体的新型电力系统需要更多的灵活资源和先进控制技术,保障电力系统的安全稳定和经济运行^[46-48]。值得注意的是,技术的发展和应用需考虑市场需求和经济性,从而发展具备充分市场竞争力的技术和装备^[49]。此外,在能源转型过程中,应战略性布局能源技术创新体系,对科学研究和技术创新提供更多支持和包容,为中国在

未来能源市场竞争中的技术能力提供储备。

在电力系统改革过程中,需要各环节多方协同。由于新能源随机性和间歇性较大,在大规模接入新能源时,应充分调动能源各环节的灵活性资源,通过利用多源互补、灵活性网络资源、综合需求响应以及多元储能等^[50-51],平抑新能源带来的波动,促进新能源消纳^[52-53]。一方面,可在发电侧提升发电效能^[54],加强新能源供应的稳定性,建立适应市场化改革需要的中长期容量保障机制^[55-56];另一方面,应建立适应大规模新能源系统的能源消耗体系,完善需求侧响应机制^[57]、建立虚拟电厂、提升区域储能能力,加强电力系统的平衡能力^[58]。

随着气象环境变化,极端天气不断增加,城市电网面临日益严峻的外部安全威胁,在建设新型电力系统的过程中,应提高电网抵御外来冲击的能力,提升电网韧性。通过云技术、5G升级等建设数字化、智能化的电网,更好地实现电力系统中源网荷储的深度融合和动态平衡。当电网遭受重大灾害或人为攻击时,具有良好韧性的电网能够改变自身状态,降低故障损失,尽快恢复电力供应,提高电网保供能力。因此,应高效协调输配电网运营商的能源服务^[59],提升整个输配电系统稳定性^[60],发展可有效应对极端事件的高弹性电力系统,保障中国能源生产和消费革命的稳步推进^[61]。

6.4 构建全国统一的能源市场体系

欧洲面临的能源供应紧张和价格暴涨问题引发了对单一能源供应过度依赖、缺乏多元能源供应的能源市场问题的思考。构建合理、高效的能源市场体系是加快能源转型进程、保障能源供应的重要措施。在能源体制革命中,应充分发挥市场本身的资源配置作用,提升企业经营和消费者选择的自主性,保证能源商品和要素自由流动,从而形成有效竞争的能源市场体系^[62]。

在对能源市场的管理和运营中,建立安全高效、低碳、清洁的综合能源系统市场服务机制和能源运营模式也是能源体制革命的重要目标^[63]。一方面,应在考虑能源系统改革和发展的基础上,建立健全的能源法律体系,为能源体制改革和市场机制的建立提供法律保障;另一方面,应加强对能源市场的战略规划引领和运营服务能力,通过合理的战略规划和配套政策、科学的管理方式引领能源市场高效运行和健康发展。

电力市场机制建设是能源市场体系建设的重要环节,通过加快电力市场改革和建设,推进新能源与储能、碳交易等结合^[64],有利于促进新能源的发展

和利用。在政府的监管下,基于市场竞争建立合理高效的电力价格机制和调度策略,考虑供需关系、碳排放等环境成本,是应对电力系统新能源渗透率不断提升的有效方法^[65]。此外,应高度重视机制设计中用户参与市场积极性的提升,充分发挥终端用户参与电力市场的作用。通过促使用户参与需求响应,促进对风能、太阳能等不确定性较强的可再生能源发电的消纳,亦是加快建设多能互补的新型电力系统的重要市场机制。

6.5 加强能源国际合作,参与应对气候变化全球治理

借鉴国外经验,特别是欧洲各国采取的能源韧性提升措施,可以帮助中国加强能源风险应对能力。此外,优化低碳能源转型布局、提升能源系统的韧性,也是应对能源危机的重要策略之一。综合各方面的经验和教训,完善中国能源安全战略,确保能源供应的稳定和可持续发展。

在能源领域国际合作方面,中国应积极开展能源外交,拓宽石油、天然气等进口渠道,实现能源供应的多元化,降低单一化能源依赖的风险。此外,还要保障能源运输通道安全,在复杂的国际政治经济形势下,通过开展外交工作,积极与能源资源国建立战略合作关系,稳定能源供应来源。以和平手段解决领土争端,开展国际战略交流合作,避免潜在冲突影响能源运输通道安全。

中国与欧美国家优势互补,应加大与欧美国家在新能源领域的合作力度^[66]。一方面,欧美国家新能源战略的实施离不开中国制造,应积极参与国际合作,如境外能源基础设施建设和能源工程技术服务合作^[67];另一方面,在科技装备和能源政策等领域,也可以结合自身需求,有选择地对欧美国家的做法进行学习和借鉴^[68];此外,还应积极与国际能源署等机构进行科研合作,开展新能源转型所需关键矿物质产业链的研究。

7 结语

2021欧洲能源危机是多种因素共同作用的结果。新冠疫情后的经济复苏、冷冬导致的供暖需求增加、较为激进的低碳转型政策以及俄乌冲突导致的能源供给不足使欧洲面临能源短缺局面。能源价格的飞涨也使得物价飙升,进一步加剧了通货膨胀。居民用电、食品成本上涨,生活水平下降,工厂生产成本急剧增加,甚至不得不停产迁址。这一系列严重的影响再次证实了能源安全的重要性。

本文通过对欧洲能源危机的成因、影响和应对

措施进行分析,提出了基于能源供应安全、能源经济安全和能源环境安全三者之间协调平衡的解决策略。在此基础上,对中国能源安全战略提出建议,强调发展新能源过程中应保障民生需求,倡导节约用能;注重能源供应安全,建设有强韧性的新型电力系统;积极开展能源领域国际外交与合作。通过能源消费、供给、技术和体制的革命以及积极的能源外交政策,确保中国在能源安全的基础上加速能源转型进程。

参考文献

- [1] 徐潇源,王哈,严正,等.能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J].电力系统自动化,2021,45(16):2-13.
XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (16) : 2-13.
- [2] 梁壮,叶旭东,赵冠一,等.我国能源安全形势及推动煤炭保障能源供应的措施[J].煤炭经济研究,2021,41(11):9-13.
LIANG Zhuang, YE Xudong, ZHAO Guanyi, et al. China's energy security situation and measures to promote coal to ensure energy supply [J]. Coal Economic Research, 2021, 41 (11) : 9-13.
- [3] 姬强,张大永.“双碳”目标下我国能源安全体系构建思路探析[J].国家治理,2022(18):22-26.
JI Qiang, ZHANG Dayong. On the construction of China's energy security system under the target of “double carbon”[J]. Governance, 2022(18): 22-26.
- [4] WU Z Y, WANG J X, ZHONG H W, et al. Sharing economy in local energy markets[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 11(3): 714-726.
- [5] WANG J X, ZHONG H W, YANG Z F, et al. Exploring the trade-offs between electric heating policy and carbon mitigation in China[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 6054.
- [6] 赵云龙,孔庚,李卓然,等.全球能源转型及我国能源革命战略系统分析[J].中国工程科学,2021,23(1):15-23.
ZHAO Yunlong, KONG Geng, LI Zhuoran, et al. Strategic analysis of global energy transition and China's energy revolution [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 15-23.
- [7] SMITH C D. Palestine and the Arab-Israeli conflict[M]. 3rd ed. New York, USA: St. Martin's Press, 1996.
- [8] CBC News Online. The price of oil[EB/OL]. [2022-12-14]. <http://www.cbc.ca/news/background/oil/>.
- [9] 应琛,刘绮黎.历史上的三次能源危机[J].新民周刊,2021(45):44-45.
YING Chen, LIU Qili. Three energy crises in history [J]. Xinmin Weekly, 2021(45): 44-45.
- [10] TAYLOR J B. Discretion versus policy rules in practice [J]. Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy, 1993, 39: 195-214.
- [11] 邹子昂,王淳.欧洲天然气危机的成因、影响及应对[R].北京:中国银行,2021.
- ZOU Ziang, WANG Chun. The causes, effects and countermeasures of European natural gas crisis [R]. Beijing: Bank of China, 2021.
- [12] 何泉吟,王哈,焦成焕.新冠肺炎疫情对全球经济的影响及中国对策[J].重庆三峡学院学报,2020,36(6):65-72.
HE Xiaoyin, WANG Han, JIAO Chenghuan. Influence of COVID-19 epidemic on global economy and China's countermeasures [J]. Journal of Chongqing Three Gorges University, 2020, 36(6): 65-72.
- [13] 路透社.亚洲需求全面增长,液化天然气市场有望蓬勃复苏[EB/OL]. [2022-12-14]. http://www.eworldship.com/html/2021/gas_carrier_market_0616/171956.html.
Reuters. The LNG market is expected to recover vigorously due to the overall growth of Asian demand [EB/OL]. [2022-12-14]. http://www.eworldship.com/html/2021/gas_carrier_market_0616/171956.html.
- [14] 中国石油新闻中心.欧盟能源改革加速去碳化进程[EB/OL]. [2022-12-14]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2022/01/11/030055617.shtml>.
PetroChina News Center. EU energy reform accelerates decarbonization process[EB/OL]. [2022-12-14]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2022/01/11/030055617.shtml>.
- [15] 郭朝晖.欧洲天然气:LNG弹性不足,补库挑战仍存[EB/OL]. [2022-12-14]. <https://finance.sina.com.cn/stock/stockzmt/2022-05-23/doc-imizmscu2847789.shtml>.
GUO Zhaohui. European natural gas: LNG elasticity is insufficient, and the challenge of replenishment still exists[EB/OL]. [2022-12-14]. <https://finance.sina.com.cn/stock/stockzmt/2022-05-23/doc-imizmscu2847789.shtml>.
- [16] IEA. World energy investment 2020[R]. Paris, France: IEA, 2020.
- [17] IEA. The oil and gas industry in energy transitions[R]. Paris, France: IEA, 2020.
- [18] Risk of major underinvesting in oil and gas is real: analysts[R]. New York, USA: S&P Global Commodity Insights, 2021.
- [19] IEA. World energy outlook 2021 [R]. Paris, France: IEA, 2021.
- [20] PARK L, JANG Y, CHO S, et al. Residential demand response for renewable energy resources in smart grid systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13 (6): 3165-3173.
- [21] DHUNGAN D, KARKI R. Data constrained adequacy assessment for wind resource planning [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 219-227.
- [22] SUN Y, LI S H, LIN B, et al. Artificial neural network for control and grid integration of residential solar photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1484-1495.
- [23] AKRAM M N, LOTFIFARD S. Modeling and health monitoring of DC side of photovoltaic array [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1245-1253.
- [24] DELIKARAOGLOU S, MORALES J M, PINSON P. Impact of inter- and intra-regional coordination in markets with a large renewable component [J]. IEEE Transactions on Power

- Systems, 2016, 31(6): 5061-5070.
- [25] 满凯,唐颖芬. 遭遇500年来最严重干旱,欧洲供电系统如何应对?[EB/OL]. [2022-12-14]. <http://www.esn.com.cn/news/show-1459564.html>.
MAN Kai, TANG Haosu. How does the European power supply system cope with the worst drought in 500 years?[EB/OL]. [2022-12-14]. <http://www.esn.com.cn/news/show-1459564.html>.
- [26] 能源危机席卷欧洲,俄罗斯或因此受益1250亿美元[EB/OL]. [2022-12-14]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1713505992743180834&wfr=spider&for=pc>.
The energy crisis engulfing Europe could benefit Russia by 125 billion dollars[EB/OL]. [2022-12-14]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1713505992743180834&wfr=spider&for=pc>.
- [27] IEA. World energy outlook 2022 [R]. Paris, France: IEA, 2022.
- [28] 吴晓慧,刘政宁. 欧洲能源困境下的滞胀[EB/OL]. [2022-12-14]. <http://www.takungpao.com/finance/236134/2022/1116/787308.html>.
WU Xiaohui, LIU Zhengning. Stagflation in the European energy dilemma [EB/OL]. [2022-12-14]. <http://www.takungpao.com/finance/236134/2022/1116/787308.html>.
- [29] 陈弈凯.“北溪1号”停供3天,欧洲冬储气买家措手不及[N]. 新京报,2022-09-01.
CHEN Yikai. The supply of “Beixi No. 1” was suspended for 3 days, and European winter gas storage buyers were caught unprepared[N]. The Beijing News, 2022-09-01.
- [30] 管娜. 卢布结算令生效满月,欧洲国家要“断气”了[EB/OL]. [2022-12-14]. <https://finance.sina.com.cn/stock/usstock/c/2022-05-01/doc-imcwipii7419931.shtml>.
GUAN Na. The full moon of the Rouble settlement order comes into effect, and European countries will be out of gas [EB/OL]. [2022-12-14]. <https://finance.sina.com.cn/stock/usstock/c/2022-05-01/doc-imcwipii7419931.shtml>.
- [31] 林伯强,黄光晓. 能源金融[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2014.
LIN Boqiang, HUANG Guangxiao. Energy finance [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [32] KWON S, NTAIMO L, GAUTAM N. Optimal day-ahead power procurement with renewable energy and demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3924-3933.
- [33] 秦天弘. 能源危机高通胀加剧,欧洲经济前景持续走弱[EB/OL]. [2022-12-14]. http://www.jjckb.cn/2022-11/10/c_1310675003.htm.
QIN Tianhong. The energy crisis and high inflation aggravate the European economic prospects continue to weaken[EB/OL]. [2022-12-14]. http://www.jjckb.cn/2022-11/10/c_1310675003.htm.
- [34] GRINSCHGL J. A perfect storm: the causes and consequences of the European energy crisis[R]. Hainburg, Austria: AIES, 2022.
- [35] European Commission. REPowerEU: a plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition [EB/OL]. [2022-12-14]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131.
- [36] ANTENUCCI A, SANSAVINI G. Gas-constrained secure reserve allocation with large renewable penetration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 685-694.
- [37] LIU W, LUND H, MATHIESEN B V, et al. Potential of renewable energy systems in China[J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 518-525.
- [38] 赵白浩,李知艺,鞠平,等. 低碳化转型下综合能源电力系统弹性:综述与展望[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):13-23.
ZHAO Yuehao, LI Zhiyi, JU Ping, et al. Resilience of power system with integrated energy in context of low-carbon energy transition: review and prospects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 13-23.
- [39] REVEL D. BP statistical review of world energy [EB/OL]. [2022-12-14]. <https://knowledgesuccess.org/popline-retirement/node/383505>.
- [40] 舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1663-1672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [41] 孟繁林,钟海旺,夏清. 基于非凸报价的高比例新能源现货市场机制[J]. 电网技术,2023,47(1):120-128.
MENG Fanlin, ZHONG Haiwang, XIA Qing. High proportion spot market mechanism of new energy based on non-convex quotation [J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 120-128.
- [42] CAO Y F, REN X X, QIU C, et al. Hierarchical reinforcement learning for blockchain-assisted software defined industrial energy market[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(9): 6100-6108.
- [43] 舒印彪,薛禹胜,蔡斌,等. 关于能源转型分析的评述:(二)不确定性及其应对[J]. 电力系统自动化,2018,42(10):1-12.
SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, et al. A review of energy transition analysis: Part two uncertainties and approaches [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 1-12.
- [44] WU Z, WANG J, ZHOU M, et al. Incentivizing frequency provision of power-to-hydrogen toward grid resiliency enhancement [J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Informatics [2022-12-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9980438>.
- [45] 陈国平,梁志峰,董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):369-379.
CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-379.
- [46] KONG W C, DONG Z Y, JIA Y W, et al. Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 841-851.

- [47] LI P H, SHENG W X, DUAN Q, et al. A Lyapunov optimization-based energy management strategy for energy hub with energy router [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4860-4870.
- [48] 孙宏斌, 潘昭光, 孙勇, 等. 跨界思维在能源互联网中应用的思考与认识[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 63-72.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, SUN Yong, et al. Reflection and understanding of application of transboundary thinking in Energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 63-72.
- [49] YIN C, WANG J X, TANG W Y, et al. Health-aware energy management strategy toward Internet of storage [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(9): 7545-7553.
- [50] MUELLER J A, WUNSCH D C, KIMBALL J W. Forecast-informed energy storage utilization in local area power systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1740-1751.
- [51] ZHANG T C, WANG J X, LI G Y, et al. Characterizing temporal-coupled feasible region of active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 5687-5696.
- [52] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [53] YU M K, WANG J X, YAN J, et al. Pricing information in smart grids: a quality-based data valuation paradigm [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3735-3747.
- [54] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: an overview [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3652-3666.
- [55] 陈政, 尚楠, 张翔. 兼容多目标调控需要的新型容量市场机制设计[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 198-207.
CHEN Zheng, SHANG Nan, ZHANG Xiang. Design of capacity market mechanism with multi-objective regulation [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 198-207.
- [56] ZHANG T C, WANG J X, XIA Q, et al. Extracting umbrella constraint-based representation of local electricity markets [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1632-1641.
- [57] TAO Y C, QIU J, LAI S Y, et al. A human-machine reinforcement learning method for cooperative energy management [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(5): 2974-2985.
- [58] DU E S, ZHANG N, HODGE B M, et al. The role of concentrating solar power toward high renewable energy penetrated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6630-6641.
- [59] ZHANG T C, WANG J X, WANG H, et al. On the coordination of transmission-distribution grids: a dynamic feasible region method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1857-1868.
- [60] RAJ Kumar Aggarwal. 人工智能及其在含可再生能源电源的电网安全中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(20): 46-54.
RAJ Kumar Aggarwal. Artificial intelligence and its application in network security for power networks with penetration of renewable energy-based generation [J]. Power System Technology, 2007, 31(20): 46-54.
- [61] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2745.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [62] WANG P Y, WANG J X, JIN R Y, et al. Integrating biogas in regional energy systems to achieve near-zero carbon emissions [J]. Applied Energy, 2022, 322: 119515.
- [63] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [64] JIANG K, WANG P, WANG J X, et al. Reserve cost allocation mechanism in renewable portfolio standard-constrained spot market [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 56-66.
- [65] ZHU Z Q, HU Z, CHAN K W, et al. Reinforcement learning in deregulated energy market: a comprehensive review [J]. Applied Energy, 2023, 329: 120212.
- [66] HAN B, BOMPARD E, PROFUMO F, et al. Paths toward smart energy: a framework for comparison of the EU and China energy policy [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 423-433.
- [67] ZHANG T C, WANG J X, ZHONG H W, et al. Soft open point planning in renewable-dominated distribution grids with building thermal storage [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 9(1): 244-253.
- [68] CHEN L, WANG J X, WU Z Y, et al. Communication reliability-restricted energy sharing strategy in active distribution networks [J]. Applied Energy, 2021, 282: 116238.

邹洋(1995—), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 新能源电力系统规划运行与韧性提升、深度强化学习与运筹优化算法。E-mail: zouyang15@stu.pku.edu.cn

王剑晓(1992—), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向: 新能源电力系统规划运行、电解制氢与储能技术、电力市场与大数据分析。E-mail: wang-jx@pku.edu.cn

戴璟(1983—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 能源政策、战略规划、综合能源系统与互联网。E-mail: jingdai@tsinghua.edu.cn

(编辑 王梦岩)

Causes, Impacts and Mitigation Measures of European Energy Crisis

ZOU Yang¹, WANG Jianxiao², DAI Jing³, ZHOU Yue⁴, ZHANG Tiance⁵, QIN Peixin³,

XU Qingyu³, SONG Jie^{1,2}, WU Jianzhong⁴

(1. Department of Industrial Engineering and Management, Peking University, Beijing 100871, China;

2. National Engineering Laboratory for Big Data Analysis and Application Technology (Peking University), Beijing 100871, China; 3. Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100089, China;

4. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK;

5. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Energy security is an important component of national security. In the context of volatile world patterns and increasing climate risks, ensuring national energy security is of great significance. In 2021, Europe experienced an energy crisis, bringing huge challenges to the political and economic situations of various countries. The main causes of this energy crisis include the economic recovery after the COVID-19 pandemic, the increasing demand for heating due to extreme weather, the radical energy transition policies of European countries, and the changes in the energy landscape resulting from the conflict between Russia and Ukraine. The European energy crisis provides certain enlightenment for the policy formulation and technological innovation of China in the energy transition process. This paper first analyzes the current situation, causes, and impacts of the European energy crisis in recent years. Then, the energy resilience enhancement measures taken by various European countries are assessed. Finally, the strategies for addressing the energy crisis are summarized and the policy recommendations are proposed for the development of energy security strategy of China.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2022YFB2405600).

Keywords: European energy crisis; energy security strategy; energy system; low-carbon transition; energy supply; extreme weather

