

“双碳”目标下中国能源转型的战略思考

王戎^{1,2}, 陈祉叶², 曾嘉伟², 王怡静², 曹军骥³, 汤绪^{1,4}, 张人禾^{1,4}

1. 复旦大学多风险互联与治理国际卓越中心, 上海 200438
2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200438
3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029
4. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院 上海 200438

摘要 中国提出“双碳”目标,以减缓人类活动排放的CO₂导致的气候变暖,推动电力系统向可再生能源转型,为绿色发展注入新动力。从近期研究的趋势出发,针对实现“双碳”目标对能源转型的需求,梳理了能源转型过程中潜在的环境问题,提出了可再生能源在生产和运行阶段对环境和生态的潜在影响。为认识实现“双碳”目标的挑战,基于2010—2021年期间清洁能源变化的历史趋势,预测2021—2060年发电量和能源消费量的变化趋势,并结合已有研究报告的中国光伏和风力发电潜力,分析了未来发展光电和风电对土地、输电、储能、投资等方面的需求。结果表明,维持中国过去清洁能源的增长速度可能无法满足实现“双碳”目标对未来清洁能源的需求,因此实现“双碳”目标需要克服能源系统和经济系统的惯性,加速推进中国的能源转型,提高清洁能源在总能源中的占比。最后,针对如何以较低经济成本加速能源转型的问题,提出了政策建议。

关键词 碳达峰;碳中和;能源转型;气候变化;环境影响

工业革命以来,随着人口增长和化石能源的大规模开发利用,全球CO₂排放量骤增,导致大气中CO₂浓度逐年攀升。1980年以来,CO₂浓度逐年快速增长,截至2023年8月,全球月平均大气CO₂浓度已达到751 mg/m³^[1]。全球变暖与大气CO₂浓度

上升导致的温室效应密切相关,研究指出,如果CO₂浓度达到工业化前水平(495 mg/m³)的2倍,预计会导致全球平均地表温度比工业革命前升高1.5~4.5°C^[2],而在2020年全球地表温度已比工业革命前上升超过1.1°C,如果不及时加以控制,会导致

收稿日期:2024-01-03;修回日期:2024-06-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0802504);国家自然科学基金项目(41877506)

作者简介:王戎,教授,研究方向为环境模型、气候变化、碳循环、空气污染、可再生能源、能源经济、地球系统等,电子信箱:rongwang@fudan.edu.cn

引用格式:王戎,陈祉叶,曾嘉伟,等.“双碳”目标下中国能源转型的战略思考[J].科技导报,2024,42(19):10-19;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.00232

严重的气候变化和环境问题,如海平面上升、物种灭绝、海洋酸化和人类生存环境的巨大变迁。

温室效应导致的气候异常是21世纪人类生存所面临的挑战,全球许多国家和地区遭受着气候变化和极端天气的严重影响,中国发生干旱、洪水等极端天气事件的次数也越来越频繁。中国是世界上洪涝灾害严重的国家之一,由于降水增多和海平面上升,洪水的频率和强度增加将加剧气候变化的影响。洪水可引发重大健康损失,包括死亡、事故、心理健康问题、传染病、媒介传播疾病和水传播疾病^[3]。截至2023年9月17日,中国东南沿海地区发生的超强台风“苏拉”和“海葵”已造成广东省20市219.47万人受灾,2790间房屋倒塌损坏,6.43万hm²农作物受灾,直接经济损失达93.78亿元^[4]。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的最新报告,在全球气候变化的背景下,极端天气发生的频率会越来越高。

面对全球气候变暖这一严峻挑战,如果各国政府不能及时采取有效的措施遏制CO₂排放的持续增长,全球变暖的速率会逐渐加快,全球海洋和土壤(特别是冻土)表层的升温加剧,导致海水和土壤对CO₂的吸收能力减弱,将一部分原本可被海水和土壤吸收的CO₂从海水和土壤中释放出来,重新进入大气当中,进而导致大气中的CO₂浓度上升速度加快,呈现出正反馈作用。

在全球变暖的背景下,一些寒带地区的冰川开始融化,冰盖面积缩小,导致海平面上升,影响地球表面反照率,使得暴露出来的陆地和海洋表面吸收更多的太阳能量,进一步加剧全球变暖。CO₂作为主要的温室效应气体,能否及时有效降低人类活动产生的碳排放,已成为关系到社会福祉和可持续发展的关键问题。

1 国内外有关“双碳”目标的举措

2020年9月22日,中国在第75届联合国大会上正式提出“双碳”目标,到2030年达到碳排放峰值,到2060年实现碳中和,即在一定时间范围内,

中国总的CO₂排放速度与大气中移除CO₂的速度达到平衡,即净排放为零^[5]。“双碳”目标的制定旨在更积极地应对气候变化问题,减少环境污染,并全面提升中国的环境质量,从实质上实现中国经济的可持续发展。中国历史上总碳排放量以及人均碳排放量均显著低于欧美等发达国家,但作为当前全球最大的碳排放国^[6],在中国实现碳中和目标具有压力大、难度高的特点,中国CO₂排放的变化备受国际社会的关注。

欧美等发达国家经济发达,有资金和技术方面的优势,在碳减排方面已经提前开始布局。例如,德国通过《可再生能源法》致力于加快能源转型^[7];法国颁布若干气候法案,包括《能源与气候法》和《气候与韧性法案》,制定了在2050年实现碳中和的目标^[8];英国通过《能源安全战略》,计划于2030年实现一半以上的可再生能源发电来自风力,并在《能源白皮书》中承诺到2050年实现电力系统的净零碳排放;此外,美国通过《美国优先能源计划》确保能源安全,并制定《通胀缩减法案》,计划通过3690亿美元的清洁能源投资重点支持电动汽车、关键矿物、清洁能源及发电设施的生产和投资,并发展清洁能源制造业,实现能源基础设施的升级与改造;澳大利亚制定2030年可再生能源占比50%的目标,欧洲和日本也提出有关可再生能源使用率目标^[9]。

虽然欧美发达国家的碳中和方案对中国有一定的借鉴意义,但中国的能源转型需要从本国国情出发,为达成“双碳”目标,中国已经积极采取多项举措,包括产业结构的调整,能源消费格局的重塑,以及积极发展可再生能源技术等^[10]。同时,中国也致力于发展经济高效的CO₂去除技术^[11],并制定了碳排放交易方案^[12],为低碳经济转型和碳中和目标的实现提供政策基础。然而,中国人口基数大、能源需求总量高,且国土面积广阔,可再生能源在空间上主要分布在中国西部,而人口和经济产业主要分布在中部和东部,因此,需要结合中国国情制定相应的能源转型方案,并通过资源的最优调配和统筹,尽量减小能源转型对中国经济和环境的负面影响,实现碳减排与经济增长的双重目标。

2 “双碳”能源转型的已有研究

近年来,随着中国提出“双碳”目标,关于能源转型的研究日益增多。能源转型是指从传统化石燃料为主导的能源系统向更加可持续、清洁、高效的能源系统的过渡过程。这些研究^[13-19]涵盖了政策制定、技术创新等多个方面,旨在探讨如何实现从传统能源向清洁能源的转变。

在此背景下,一系列文献提供了重要见解。例如,张梦楠等^[13]通过对欧盟、美国和日本等国家和地区的实践经验进行比较分析,深入探讨了中国在实现“双碳”目标过程中所面临的挑战,并提出了相应的政策建议,为中国的低碳发展提供了理论支持和实践指导。江深哲等^[14]着眼于中国能源与产业结构的升级对碳排放的影响,指出产业结构转型推动了能源结构的变化并显著降低了碳排放量,并提出了碳税安排的优化方案。Qiu等^[15]针对可再生能源消纳问题进行了深入探讨,提出了结合储能技术和共享经济的新商业模式——共享储能,为未来电力系统发展提供了有益参考。综上所述,当前中国能源转型面临多重挑战,但学术界通过深入研究政策、技术和商业模式的创新,为实现“双碳”目标提供了可能的路径和解决方案。

3 “双碳”目标对中国能源系统的影响

“双碳”目标不仅影响能源结构,还涉及产业、经济、国际竞争力及生态环境等多个方面。

3.1 能源结构变革

在“双碳”目标的框架下,中国将逐渐减少对化石燃料,特别是对煤炭的依赖,更加注重对可再生能源的开发利用。未来,中国的能源结构将呈现出更为清洁和多元化的趋势,太阳能和风能等可再生能源有望占据主导地位。一次电力及其他能源占一次能源生产总量的比重已经从2000年的7.7%增加到2022年的20.4%,清洁能源发电装机容量的占比也从2000年的25.6%增加到2022年的48.1%^[20]。

中国是全球最大的煤炭进口国,但随着国内煤炭需求减少,中国将逐渐降低对国际煤炭市场的依赖,通过使用更多的太阳能和风能等可再生能源,提高国家能源的自给自足能力,提升能源安全。此外,“双碳”目标有助于优化能源结构,通过市场化手段提高能源效率,降低使用化石燃料导致的空气污染程度^[21]。

3.2 产业结构调整

“双碳”目标下的能源转型将引导未来中国产业结构的大规模调整,包括推动第二产业行业排放的标准化、以及大力发展低碳制造业等。除此之外,能源转型通过促进经济社会发展与绿色低碳转型的深度融合,推动整个产业链向高端、低碳、智能的方向转型,为中国在发展动力、发展效率和发展质量方面赢得竞争优势,实现社会高质量发展^[22]。

3.3 国际竞争力提升

尽管“双碳”目标的实现在一定程度上带来了外部约束,但与此同时也创造了新的发展机遇,“双碳”目标促进了产业绿色转型,推动了新兴行业发展,增加了就业岗位。例如,每100万美元投资于低碳行业将净增约5个新的工作岗位^[23],在过去的10年里,全球可再生能源行业的人数持续增加,2021年达到1270万人^[24],其中中国占42%,这反映了目前中国在全球可再生能源行业处于优势地位。能源转型可以提升中国市场的国际竞争力,新增的就业机会主要来自太阳能光伏、生物能源、水电和风电等领域^[25]。能源转型为绿色金融和绿色投资提供了新的创业机遇,例如,在“双碳”目标驱动下,将吸引更多投资流向可再生能源和环保项目,推动金融体系朝着更加可持续的方向发展。中国正在构建多层次绿色金融系统,为“美丽中国”建设和实现“双碳”目标提供了有力支持^[26],与传统的发展路径相比,碳中和可以吸引更多的投资、提升中国经济的增长潜力^[27]。

3.4 生态环境改善

“双碳”目标的实现将显著减少碳排放,并降低相关污染物的排放,对中国生态环境产生长远影响。例如,中国通过《减污降碳协同增效实施方

案》首次提出了“减污”和“降碳”的一体谋划,提高了环境保护和气候变化应对的综合效能^[28]。实现“双碳”目标可降低各种污染物的排放,有效防治了水、土壤和大气污染,实现生态环境的整体改善,有助于推动能源与环境的绿色和谐发展^[21]。

中国“双碳”目标的实现,不仅在能源结构上会发生显著转变,还会在多个领域产生深远影响。从提高国家的能源安全到推动产业链数字化转型,再到绿色金融和可持续投资,中国的气候治理对中国的发展不仅是一个挑战,也是国家实现高质量可持续发展的一个契机。

4 能源转型对中国生态环境的潜在影响

中国“双碳”目标下的能源转型可以减少化石燃料燃烧导致的CO₂和大气污染物排放,但在开发新能源替代化石燃料的过程中,要考虑可再生能源对生态环境的潜在影响和风险,在可再生能源的生产、运营和使用阶段,需要通过科学预判,建立风险预警机制,减少能源转型对生态环境的负面作用,避免环境破坏(图1)。

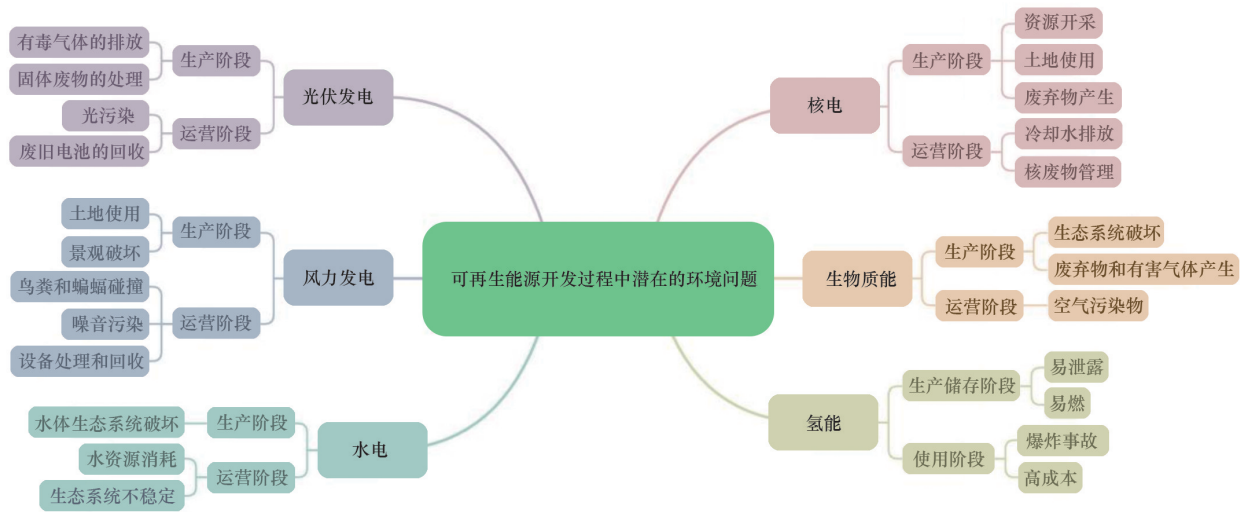


图1 可再生能源开发对生态环境的潜在影响

光伏发电、光伏组件的生产过程涉及有毒气体的排放,如四氯化硅和氟化物^[29],也可能产生难以处理的固体废弃物,会对大气、水体和土壤造成污染。在光伏发电的运行阶段,光伏电池板的光散射或反射可能会产生光污染,导致夜间照明、视力疲劳和睡眠质量下降等问题,对人体健康产生危害。另外,废弃的太阳能电池组件含有有害物质,需要妥善处理,避免对环境造成危害^[30]。

对于风力发电,风电场的建设可能涉及大面积土地使用,会影响农田、草原和湿地等生态环境,风力涡轮机的安装也可能对景观造成破坏。在风力发电的运行阶段,风力发电机会对飞鸟和蝙蝠等造

成伤害,产生的噪音也会对附近居民产生负面影响^[31]。废弃的风力涡轮机和叶片需要适当处理和回收,避免重金属进入人居环境的土壤和水体。

对于水力发电,水电工程施工规模庞大,包括占地、采石、取土和排放废水等活动,可能对植被、动物栖息地和水环境造成负面影响,引发生态系统的破坏^[32]。在水力发电的运行阶段需要大量水资源,而水库中的水分蒸发会影响下游其他地区的可用水量,引起水资源紧缺。另外,蓄水会改变水流速度和水质,导致地下水位上升和水温变化,对土壤、水体和生物等产生影响,导致生态系统失稳。

对于核能发电,核能发电站的建设需要使用大

量土地,对当地的生态系统和野生动物造成影响。为了获取核燃料(如铀),需要进行矿产资源的开采,可能引起矿区生态系统的破坏。核能发电站的建设过程中会产生建筑废弃物和其他工程废料,造成环境污染。在核能发电的运行阶段需要冷却水,可能对水体生态系统产生影响。由于核废料具有高放射性和长半衰期,因此核废料的处理和处置成为全球共同面临的重要问题之一,例如日本将核废料排放到海洋,造成了全球环境问题。在中国,寻求更加高效、安全、可持续的核废料处理技术迫在眉睫^[33]。

对于生物质能,由于生物质能的主要来源是木材和草本植物,可能会导致大规模的森林砍伐,破坏生态系统,另外生物质从收获到变成可燃烧的燃料需要复杂的前处理和运输过程,也会产生大量的污染物。在生物质能的使用阶段,燃烧生物质可能排放出颗粒物、氮氧化物、挥发性有机物和多环芳烃类持久性污染物,对空气质量和人类健康造成不利影响^[34]。

对于氢能,氢能的生产、储存和运输需要先进的技术和特殊材料,会增加对稀有金属(如铱)的需求,稀有金属的开采可能对环境产生不利影响。氢气是易泄漏和易燃的气体,需要高压储存和运输,可能存在安全隐患。在氢能的使用过程中,氢气具有极低的密度和较高的可燃性,如果氢气泄漏并与氧气混合,可能引发火灾或爆炸事故。此外,氢气的高压或低温储存和运输可能涉及高成本和资源投入,会对设备和环境造成一定的压力和风险。

可再生能源在生产和运行阶段均可能对环境 and 生态产生影响。因此,在能源转型过程中,需要综合考虑环境、社会和经济的可持续性,采取适当的管理和保护措施,健全风险预估预警机制,来降低风险并推动可再生能源的可持续发展。

5 中国可再生能源发展的趋势预估

能源转型通常涉及到减少对化石燃料的依赖,并增加对可再生能源(如太阳能、风能、水能等)和其他清洁能源的利用。在过去10年中,中国加大

了可再生能源的投资和技术研发。为对可再生能源发展的趋势进行预估,本课题组分析了2010—2021年期间的能源数据,并在不同情景下按照线性外推的方式预测了2021—2060年间中国发电量和能源消费量的变化趋势(图2),讨论在中国“双碳”目标下,如何发展可再生能源满足中国未来的用电需求,以降低化石燃料的使用量,为未来能源政策提供数据支持。

首先,分析2010—2021年的能源消费总量、可再生能源、电力消费总量、可再生能源发电量的增长速率,在保持该增长速度不变的情景下,得到2010—2060年能源消费总量、可再生能源与化石燃料的消耗量、电力消费总量以及可再生能源与化石燃料的发电量(情景A)。在这一情景下,虽然化石燃料消费总量及发电量的增长速率慢于可再生能源消费总量及发电量的增长速率,但化石燃料的使用量和发电量仍然保持在高位,且到2060年无法实现达峰目标。

在情景A的基础上进一步研究可再生能源加速增长对实现“双碳”目标的影响。在保持2010—2021年能源增长速率不变的基准情景外,还考虑了在能源消费总量和电力消费总量增长速率不变的前提下,将可再生能源的发电量和消费量的增长率增加1倍、2倍、3倍和4倍的情景(分别对应情景B、C、D、E)。可以看出,可再生能源增长速率提升后,可以更早地满足总电力需求和能源需求,减少化石燃料的使用量。当可再生能源发电量增长率增加1倍时(情景B),在2030年前可实现碳达峰,当可再生能源发电量增长率增加2倍时(情景C),到2050年前后可再生能源发电量有望满足总发电量的需求,在2060年前电力系统的化石燃料使用量将减少到零,实现电力行业的净零排放,如果可再生能源发电量增长率进一步提升,化石燃料发电量的清零年份也会提前,减小非电力行业的碳减排压力。

在能源总消费量方面,由于其他非电力系统的能源消耗,需要将可再生能源的增长速率增加4倍(情景E),才能在2060年前实现可再生能源消费量满足总体能源消费的需求,与此同时,化石燃料燃

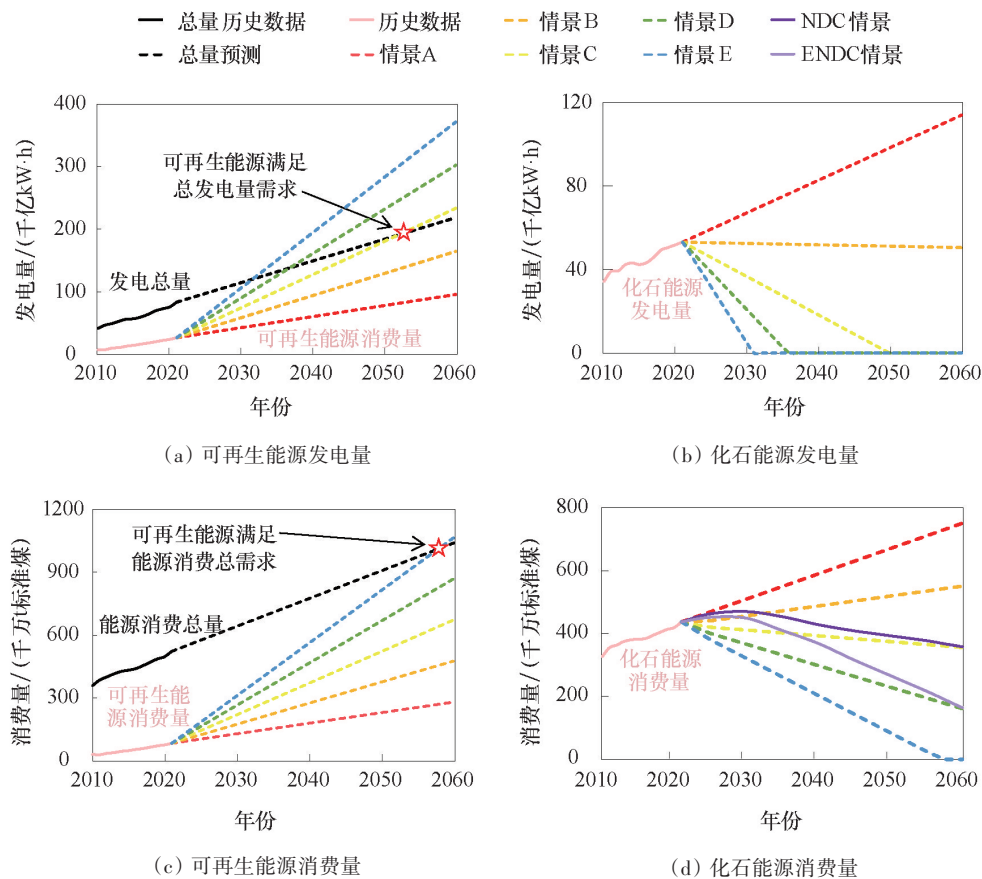


图2 中国发电量和能源消费总量的历史数据和未来预测

烧产生的碳排放量也将清零。需要注意的是,在非电力行业推广可再生能源的难度更高,所以中国未来可能会提高非电力行业的电气化水平,因此,非电力行业的碳减排行动又会进一步推动电力行业的能源转型。

将5种情景预测的能源消费量与文献中预测的数据进行了比较。根据其他研究人员提供的碳排放数据,可以计算出2条化石燃料消费量的变化曲线^[35],这2条曲线分别对应于National Determined Contribution(NDC)情景和Enhanced National Determined Contribution(ENDC)情景。

NDC情景,即落实并延续2015年中国提出的NDC目标、行动计划和相关政策,包括2030年左右达到碳达峰并且可再生能源占一次能源消费比重达到20%,并在2030年后继续保持2030年前的减排强度。而ENDC情景则要求在2030年之前加强节能减排、提高能源效率、优化能源结构,并从

2030年开始进一步提高全行业的能源转型速度和减排力度。

由图2可以看出,NDC情景预测的能源消费碳排放路径与情景C接近,其2060年的化石燃料消费量仍高于2010年水平,可能无法达到碳中和目标,而ENDC情景预测的化石燃料消费量与情景D接近,2060年的化石燃料消费量约为2010年水平的一半,因此,在该情景下可能需要使用能源转型以外的碳汇技术,例如植树造林,以实现国家的2060年碳中和目标。

通过化石燃料消费量的预测,可以了解可再生能源和化石燃料在未来国家能源需求中的相互关系,明确国家的可再生能源发展目标。通过对比和分析不同情景下化石燃料的使用量,可以了解可再生能源在能源转型中的作用,预测对未来碳汇技术的需求,为国家能源政策的制定、技术创新的推动以及实现“双碳”目标提供指导。

6 中国加速发展太阳能、风能发电的潜力

构建中国的低碳电力能源系统,需要促进可再生能源的多元化发展,推动热储能、氢储能、电化学储能等各类储能形式发展,支撑“多能互补”的能源体系建设,缓解能源供需矛盾,合理保护自然资源,促进生态环境良性循环。在多样化的可再生能源体系中,根据不同机构的能源调度模型预估,太阳能和风能是中国未来可再生能源的主要组成部分。太阳能和风能的开发相对其他能源有一定优势,例如,与水力发电相比,太阳能和风能可应用推广的区域范围更广;与生物质能相比,开发太阳能和风能对粮食和生态系统的影响更小;与碳捕获和储存

技术相比,太阳能和风能的减排成本更为低廉。因此,在“双碳”目标下,实现太阳能和风能的大规模利用是能源转型成功的保障。

研究表明,中国实现碳中和需要在2020—2060年间将太阳能和风能年发电量从1 PW·h增加到约10~15 PW·h^[36]。为了实现这一目标,可再生能源的增长速率需要提升到过去10年的2~3倍,但太阳能和风能发电会受到地形、风速、风向、光辐射、大气云量、降雨等多种自然要素的影响,本研究组结合最新的能源调度模型^[36],预测了2020—2060年间可建造光伏和风力电厂的发电量,并预估了在图2中提出的5种情景下开发太阳能和风能带来的土地、输电、储能、投资等需求(表1)。

表1 5种情景下太阳能和风能发电的土地、输电、储能和投资需求

情景	年份	预测 光伏 发电量 /(PW·h)	预测 风机 发电量 /(PW·h)	电厂 占地 面积 /万 km ²	特高压 输电线路 长度 /万 km	电力 输送 容量 /TW	储能 容量 /TW	年均 总投资 /千亿元	年均 输电 投资 /千亿元	年均 储存 投资 /千亿元	年均 电厂 投资 /千亿元	年均 维护 成本 /千亿元
情景A	2030	0.44	0.86	4.60	3.60	0.18	0.00	2.50	0.30	0.00	1.59	0.61
	2040	0.73	1.28	10.41	9.20	0.46	0.00	2.97	0.39	0.00	1.89	0.69
	2050	1.03	1.73	17.68	14.01	0.78	0.00	3.08	0.36	0.00	1.99	0.74
	2060	1.33	2.17	24.57	19.15	1.09	0.00	2.89	0.33	0.00	1.86	0.71
情景B	2030	0.73	1.42	11.90	9.82	0.49	0.00	6.43	0.78	0.00	4.08	1.57
	2040	1.39	2.31	26.90	21.60	1.18	0.00	6.56	0.79	0.00	4.21	1.55
	2050	1.94	3.18	41.41	36.28	1.82	0.00	5.80	0.83	0.01	3.52	1.45
	2060	2.43	4.05	56.90	49.69	2.43	0.18	6.37	0.70	0.74	3.47	1.45
情景C	2030	1.03	1.82	18.81	14.43	0.81	0.00	9.95	1.18	0.00	6.39	2.38
	2040	1.92	3.12	40.58	35.87	1.80	0.00	9.26	1.28	0.00	5.71	2.27
	2050	2.76	4.45	65.09	57.27	2.76	0.27	10.27	1.13	1.24	5.62	2.29
	2060	3.60	5.74	94.58	73.09	3.82	0.45	14.32	0.84	0.74	8.99	3.75
情景D	2030	1.33	2.19	24.81	19.15	1.09	0.00	13.32	1.55	0.00	8.61	3.15
	2040	2.43	3.95	55.44	48.58	2.38	0.16	13.13	1.69	0.79	7.56	3.08
	2050	3.51	5.61	86.12	70.83	3.66	0.44	8.71	1.15	1.28	4.57	1.71
	2060	6.45	5.74	112.53	102.00	5.28	0.85	13.12	1.41	1.72	8.37	1.62
情景E	2030	1.56	2.57	31.15	25.65	1.39	0.00	16.74	2.04	0.00	10.72	3.98
	2040	2.90	4.69	69.91	60.58	2.89	0.33	16.82	1.92	1.69	9.41	3.80
	2050	5.58	5.74	106.43	96.42	4.85	0.68	20.54	1.76	1.57	12.98	4.22
	2060	9.33	5.74	132.05	113.94	6.36	1.34	18.68	0.84	2.64	13.14	2.07

随着能源需求的增加,光伏和风力电厂的占地面积、特高压输电线路长度、线路输送容量和储能容量也相应增大,以满足更大规模的能源需求,同

时年均总投资、年均输电投资、年均储存投资、年均电厂投资以及年均维护成本并非线性地随着发电量的增加而增大。如表1所示,以2060年为例,光

伏和风力发电在情景 A、B、C、D、E 下年均总投资将分别达到 2894、6368、14316、13116 以及 18683 亿元。值得注意的是,情景 D 的总投资相对情景 C 反而有所下降,这表明,随着可再生能源使用规模的增加,相关投资和运营成本可能由于技术进步加快而减少。

太阳能和风能的加速发展会促进中国的能源转型,产生的土地、输电、储能、投资需求需要科学规划和综合施策,全面考虑成本、环保和可持续发展等诸多因素,这有助于国家制定更为科学和合理的能源转型政策,以满足不断增长的社会对清洁能源的需求,推动国家电力系统的绿色升级,在保障国家能源安全的前提下实现“双碳”目标。

7 政策建议

为实现“双碳”目标,中国需尽快实现从高污染化石燃料向低污染清洁能源转型,提高可再生能源在中国能源结构中的占比。通过整理分析,提出以下政策建议。

1) 综合考虑环境、社会和经济的可持续性。在能源转型过程中,需要综合考虑环境、社会和经济 3 个方面的可持续性,采取适当的管理和保护措施,建立清洁能源的数字地球智能信息复杂系统,健全风险预警机制,降低可再生能源在生产和使用过程中对环境产生的负面影响,推动可再生能源的可持续发展。政策制定者应制定包括排放控制、废弃物处理、社会影响评估等方面的政策措施,以实现环境、社会和经济之间的平衡,确保能源转型的可持续发展。

2) 采取适当的管理和保护措施:针对可再生能源生产和运行过程中可能出现的环境污染和生态破坏问题,应采取有效的管理和保护措施。政府和企业应加强监管力度,建立健全的环境管理体系,确保生产过程符合环境保护标准,并制定废弃物处理方案,最大限度地减少对环境的不良影响。

3) 加速发展太阳能和风能:鉴于太阳能和风能在可再生能源中的重要地位,政府应采取积极的政策措施,促进太阳能和风能技术的研发和应用。

这包括增加对科研机构 and 企业的资金支持,提高补贴政策的力度,简化审批程序,以加速太阳能和风能的发展,实现能源结构的优化和可持续发展。在 2030 年之前,可以通过提前布局,减少传统化石燃料的投资,增加对太阳能和风能等可再生能源和储能输电等设施的投资,通过优惠的政策激励和资金支持,鼓励企业和研究机构加大对可再生能源技术的研发,大力发展清洁能源产业链,提高经济效益、降低使用成本,加快清洁能源的增长速率。

4) 科学规划和综合施策:在推动太阳能和风能发展的过程中,需要进行科学规划和综合施策,以解决相关的土地利用、输电建设、储能技术等问题。政府应制定长期的能源发展规划,明确发展目标和路径,并采取针对性的政策和措施,确保能源转型工作有序推进,取得可持续发展的成果。

参考文献 (References)

- [1] Global Monitoring Laboratory. Trends in atmospheric carbon dioxide[EB/OL]. (2023-11-05) [2023-11-25]. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>.
- [2] Lindsey R. How much will earth warm if carbon dioxide doubles pre-industrial levels[EB/OL]. (2014-01-24) [2023-11-25]. <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/how-much-will-earth-warm-if-carbon-dioxide-doubles-pre-industrial-levels>.
- [3] Ali R, Kuriqi A, Kisi O. Human-environment natural disasters interconnection in China: A review[J]. *Climate*, 2020, 8(4): 48.
- [4] 王晓东, 王旭, 郑键鹏, 等. 广东省全力应对台风“苏拉”“海葵”接连登陆[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(10): 86-88.
- [5] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程[N]. *人民日报*, 2020-12-13(2).
- [6] Jiang W, Sun Y F. Which is the more important factor of carbon emission, coal consumption or industrial structure [J]. *Energy Policy*, 2023, 176: 113508.
- [7] 张开来. 德国《可再生能源法》的新发展及对中国的启示 [J]. *法学*, 2023, 11(3): 1584-1593.
- [8] 钱通. 法国立法推动气候治理[N]. *经济日报*, 2022-03-28(4).

- [9] Jiang B H, Raza M Y. Research on China's renewable energy policies under the dual carbon goals: A political discourse analysis[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2023, 48: 101118.
- [10] He J J, Yang Y, Liao Z J, et al. Linking SDG 7 to assess the renewable energy footprint of nations by 2030 [J]. *Applied Energy*, 2022, 317: 119167.
- [11] Bistline J E T, Blanford G J. Impact of carbon dioxide removal technologies on deep decarbonization of the electric power sector[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3732.
- [12] Chen X, Lin B Q. Towards carbon neutrality by implementing carbon emissions trading scheme: Policy evaluation in China[J]. *Energy Policy*, 2021, 157: 112510.
- [13] 张梦楠, 曹楠楠, 朱雪莲. 典型国家“双碳”目标实现路径解析及中国借鉴[J]. *河北地质大学学报*, 2024, 47(1): 119-126.
- [14] 江深哲, 杜浩锋, 徐铭钰. “双碳”目标下能源与产业双重结构转型[J]. *数量经济技术经济研究*, 2024, 41(2): 109-130.
- [15] Qiu W Q, Zhou S, Yang Y, et al. Application prospect, development status and key technologies of shared energy storage toward renewable energy accommodation scenario in the context of China[J]. *Energies*, 2023, 16(2): 731.
- [16] Yang N, Shi W X, Zhou Z H. Research on application and international policy of renewable energy in buildings [J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5118.
- [17] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 171-191.
- [18] 张万洪, 宋毅仁. 中国式现代化背景下能源正义与公正能源转型的新思考[J]. *江汉论坛*, 2024(3): 36-43.
- [19] 戴家权, 王利宁, 向征艰. 关于中国长期能源战略制定的几点思考[J]. *国际石油经济*, 2019, 27(12): 10-14.
- [20] 中华人民共和国统计局. *中国统计年鉴 2023*[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 275-293.
- [21] 国家发改委、能源局联合印发《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》[J]. *电力与能源*, 2017, 38(3): 288.
- [22] 张晓娣. 正确认识把握我国碳达峰碳中和的系统谋划和总体部署: 新发展阶段党中央双碳相关精神及思路的阐释[J]. *上海经济研究*, 2022, 34(2): 14-33.
- [23] Garrett-Peltier H. Green versus brown: Comparing the employment impacts of energy efficiency, renewable energy, and fossil fuels using an input-output model[J]. *Economic Modelling*, 2017, 61: 439-447.
- [24] IRENA. *Renewable energy and jobs annual review 2022* [EB/OL]. (2022-12-01)[2023-11-25]. <https://www.irena.org/Publications/2022/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2022>.
- [25] 中国可再生能源发展报告 2022[R]. 北京: 水电水利规划设计总院, 2023.
- [26] 陈骁, 郝博韬. 构筑双碳战略的金融基石——2022年度绿色金融发展报告[R]. 北京: 平安证券, 2022.
- [27] 马骏. 碳中和愿景下绿色金融路线图研究[R]. 北京: 中国金融学会绿色金融专业委员会课题组, 2021.
- [28] “双碳”目标意义重大, “减碳”需要人人参与[EB/OL]. (2022-12-12)[2023-11-25]. <http://www.tanjiaoyi.com/article-43269-1.html>.
- [29] 孙利利, 赵雪锋, 付宏祥. 光伏太阳能电池生产中的污染问题分析[J]. *节能*, 2015, 34(11): 64-66.
- [30] 肖佳, 梅琦, 黄晓琪, 等. “双碳”目标下我国光伏发电技术现状与发展趋势[J]. *天然气技术与经济*, 2022, 16(5): 64-69.
- [31] Turunen A W, Tiittanen P, Yli-Tuomi T, et al. Self-reported health in the vicinity of five wind power production areas in Finland[J]. *Environment International*, 2021, 151: 106419.
- [32] 吴雨谦. 水利水电工程建设对生态环境的影响分析[J]. *科技风*, 2018(3): 155.
- [33] 杨建国, 黄孟超. 核电厂放射性废物处理技术的应用[J]. *科技创新与应用*, 2016(20): 165.
- [34] 阿尔杰恩·Y·胡克斯特拉. 水电和生物质燃料真的“清洁”吗? [EB/OL]. (2017-03-09)[2023-11-25]. <https://chinadialogue.net/zh/4/43529/>.
- [35] He J K, Li Z, Zhang X L, et al. Towards carbon neutrality: A study on China's long-term low-carbon transition pathways and strategies[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2022, 9: 100134.
- [36] Wang Y J, Wang R, Tanaka K, et al. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China [J]. *Nature*, 2023, 619(7971): 761-767.

Strategic consideration of China's energy transition under the "dual-carbon" goal

WANG Rong^{1,2}, CHEN Zhiye², ZENG Jiawei², WANG Yijing², CAO Junji³, TANG Xu^{1,4}, ZHANG Renhe^{1,4}

1. IRDR International Center of Excellence on Risk Interconnectivity and Governance on Weather, Fudan University, Shanghai 200438, China
2. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, China
3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
4. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China

Abstract China has promised to achieve the "dual-carbon" goal in order to reduce climate warming caused by human-induced CO₂ emissions, accelerate the transition of the electricity system toward renewable energy, and provide impetus to green development. Starting from summarizing the trend of recent studies, this paper encompasses the demand for energy transitions to meet the "dual-carbon" goal, analyzes the environmental problems in the processes of energy transition, and identifies the potential impacts of the production and operation of renewable energy on the environment and ecology. To cope with the challenge of achieving the "dual-carbon" goal, the trends of growth in power generation and energy consumption from 2021 to 2060 are predicted by analyzing the historical growth of renewable energy from 2010 to 2021. In addition, this paper analyzes the demand for land, power transmission, energy storage, and investment for the development of photovoltaic and wind power in China by taking into account the state-of-the-art estimate of photovoltaic and wind power generation. Based on the analysis, it is extrapolated that the renewable growth rate of clean energy in China is insufficient to satisfy the pledges aligning with the "dual-carbon" goal, therefore it is required to overcome the inertia in the energy and economic systems to strengthen the process of energy transition and increase the share of renewable energy in total energy supply. Lastly, a number of suggestions for policy are provided for accelerating the energy transitions to achieve the goal at a low economic cost.

Keywords carbon peaking; carbon neutrality; energy transitions; climate change; environmental impacts ●



(责任编辑 徐丽娇)