

水资源及“双碳”目标约束下 山西能源转型研究

研究单位：山西大学

2020年9月，习近平总书记向全世界做出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的重大政策宣示。2021年10月24日，中共中央、国务院印发了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，随后各项国家级政策陆续发布，双碳“1+N”政策体系加速形成。在此背景下，从中央各部门到省市县各地方，制定科学合理的政策并规范实施至关重要。

山西省作为中国重要的综合能源基地和“能源革命排头兵”，面临实现“双碳”目标时间紧迫、自身能源结构加速转型等多重压力。(1) 碳排放总量大、强度高，减排压力巨大。山西省为碳排放大省，碳排放总量约占全国的5%、在各省区中排名靠前。其中，80%以上的碳排放量来自于与煤炭相关的能源消费。山西省碳排放总量及增速、单位GDP碳排放强度、人均碳排放强度、能源消费碳排放强度等主要碳排放指标均位于全国前列；(2) 能源转型整体进展缓慢，能源生产和消费结构“一煤独大”。山西省原煤产量长期占全国原煤总产量的比重超四分之一，2021年达到11.93亿吨。煤炭消费占能源消费总量的80%以上，远超全国整体水平(56.8%)；(3) 作为国家能源基地，山西省承担着全国煤炭保供的重

任，山西省与多省签订煤炭保供协议，在2020年至2022年期间，煤炭生产量与调出量持续增加。(4) 能源生产和消费过程中一直存在着水资源冲突问题。煤炭开采对地下水资源造成严重破坏，煤炭加工、使用的各个环节也会消耗水资源。以上表明，山西省实现碳中和目标难度较大，如何在兼顾短期能源保供与长期能源转型基础上实现碳中和目标、如何在深度转型过程中平衡水资源和能源合理利用、如何在空间上合理部署可再生资源以支撑碳中和最优路径等问题亟待探究。

本课题从低碳、节水视角出发，利用复杂能源系统优化理论与模型，改善能源转型的评估方法，丰富了煤炭资源富集地区能源转型理论，拓展了能源转型研究视角，有助于从数据测算角度丰富山西省能源转型的统计基础，为山西省深度转型过程中平衡水资源和能源合理利用、实现可持续发展提供方案，探索适用于全国其他资源型区域的减排经验和转型模式。本文主要内容为：(1) 能源转型进展情况和内在机理分析。一方面，系统梳理山西省能源禀赋、能源生产与消费情况、能源转型进展、相关政策文件等，分析其在全国各省份和黄河流域九省(自治区)中的特性，明确当前研究煤-水冲突问题的必要性和紧迫性。另一方面，基于已有国内外文献

探索水资源、碳排放、能源消费量之间影响机制,提出以下3个观点:能源系统与碳排放之间有着强烈的互相影响关系,能源生产、加工与转换、最终消费过程中都会产生碳排放;水资源的缺乏可造成不同部门、不同环节、不同技术之间的用水竞争;由于碳排放目标和水资源约束对能源系统造成的不同影响,在其共同作用时会产生一定的冲突,为模型构建和情景设定提供背景依据和理论基础。(2) **能源转型模型构建**。采用TIMES-Water模型,构建水资源和“双碳”目标约束下的能源转型优化模型,包含水资源模块、能源系统、气候模块,在满足设定碳排放限制的条件下,以系统成本最小化为目标,计算出能源系统中的能源供应、能源转换及能源需求等不同层次的能源平衡,以满足系统终端能源的需求。在考虑环境、技术和情景约束的情况下,最小化贴现能源系统总成本,测算最优能源转型路径。(3) **目标情景设定**。围绕碳排放约束、水资源约束、煤炭清洁高效利用技术设定情景,设定情景一为自然达峰情景(BASE情景),不做目标约束;情景二为规划达峰情景(P30情景),2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和,碳排放量利用BASE情景模拟数据;情景三为快速达峰情景(P25情景),在此基础上将水资源约束和煤炭清洁高效利用技术与三种情景相结合,形成十八种情景组合。(4) **能源转型优化路径探析**。基于所设定的山西省未来不同约束情景,预测山西省能源行业的用水量和碳排放量。对不同情景模式下的山西省能源转型进行模拟分析,以甄选出水资源和“双碳”目标约束下的能源转型最佳路径。(5) **可再生能源规划与政策建议**。对未来可再生能源进行时间与空间规划,探讨拟定的能源转型方案、政策目标等将会产生的影响,并根据模型结果提出相应的政策建议。

本课题数据来源多样化,对宏微观数据、技术平台、政策文件、部门座谈访谈、相关学术论文等涉及到的数据进行整理和处理,主要包括以下5个方面:(1) 能源开采量数据主要来源于《山西统计年鉴2020》《中国能源统计年鉴2020》《山西省2019年国民经济和社会发展统

计公报》;能源单位转换参考GB/T2589-2020《综合能耗计算通则》;(2) 发电机组相关数据来源于中国碳中和技术平台;(3) 水资源相关数据主要参考《2020年山西省水资源公报》《2021年山西省水利系统节约用水工作要点》《山西省计划用水管理办法》。(4) 风能分布来源于中国气象局风能资源数值模拟评估系统。(5) 相关参数来自于山西省部门座谈访谈调研数据、山西省“十四五”规划、中国“十四五”规划、Wind数据库、各煤企公司年报、国盛证券研究所以及Huang (2017), Dubreuil (2013) 等文献资料。

本课题创新之处主要有以下两个方面:(1) 现有能源转型理论在融合多重政策目标约束、应对资源型地区中长期转型方面仍需扩展,本课题在揭示水约束及“双碳”目标约束内在机理的基础上,探究资源型区域能源转型一般性与特殊性,拓展多目标约束下的能源转型思路。(2) 资源型地区的能源转型系统模型构建仍较为缺乏,本课题结合山西省独特的地理位置和禀赋条件,在考虑环境、技术和情景约束的情况下,设定体现山西特色的参数,加入水资源模块和气候模块,构建山西自底向上的能源系统优化模型。

本课题主要结论为:第一,在节水视角下的碳中和路径具体特征包括:①非化石能源将在一次能源消费中的占比呈指数增长趋势,15-20年左右成为主体能源。2060年前实现碳中和时,非化石能源占一次能源需求一般在50%以上。②电力系统需要通过高比例非化石能源和CCS技术的应用,并缓解其他终端部门的减排压力。③电力部门和交通部门电气化需要在2050-2055年期间达成。④工业部门需要大规模利用CCS技术,在2060年前达到90%左右。⑤煤化工转换效率、煤炭火力发电效率需要提高15%左右。⑥为避免用水红线,CCS技术可在2050年-2060年期间适度降低。第二,由于煤炭保供需求,山西省煤炭产量在2020-2030年期间,先增加至15亿吨左右后下降至现有水平,在2030-2060年



期间保供的煤炭数量不变。由此开采耗水最高可达3.46亿吨,洗煤用水最高可达2.54亿吨。使得能源系统用水增加3亿吨左右,约为现有工业用水的1/3。第三,综合各情景对碳排放量的影响可知,随着碳排放目标约束的加强,达峰时间、峰值减半目标时间均有一定的提前,且达峰量不断降低。达峰时间、峰值减半目标提前大约五年左右,达峰量下降约5%左右。煤炭清洁高效利用情景对于碳排放量的影响主要集中于2020-2030年期间,水资源约束情景对碳排放量几乎不产生影响。第四,在分部门排放中,碳排放量高的部门逐渐由能源供给部门转向能源需求部门,意味着未来减排重点也应由供给端转向需求端。CCS技术随着碳排放目标约束的提升应用规模和范围逐步扩大。煤炭高效清洁利用情景主要影响的时间段为2020-2035年期间,且主要影响电力部门。在存在碳排放目标约束时,煤炭清洁高效利用可以使得电力部门碳排放量减少的同时缓解其他部门的减排压力,同时一定程度上缓解了CCS技术利用的规模和时间。第五,用水需求随着碳排放约束的增强而下降。其中煤炭、天然气等化石能源开采用水持续下降。煤化工产品以及拥有CCUS的火力发电机组耗水有小幅的增加。水资源约束促进节水冷却方式的应用,水资源约束情景相较于自然达峰情景,在火力发电中空冷机组占比提升。在水资源约束情景下,用水总量有一定的下降。水资源开采总量由于用水成本的上升有一定的减少,煤化工等产品用水量同步减少。第六,更强的目标约束意味着更高的代价,这反映在固定运营、维护以及投资成本的上升。规划达峰情景(P30)总成本是自然达峰情景总成本的1.79左右,而快速达峰情景(P25)付出的成本进一步提高,是自然达峰情景的1.86倍左右。这是由于利用可再生能源及CCUS技术的成本高于化石能源,且可再生能源发电厂一般寿命较短。煤炭清洁高效利用总体上使得投资成本和固定运营维护成本下降,水资源目标约束使得总成本上升,且随着目标约束的增强,总成本增加的幅度增大。第七,山西在节能减排能源转型发展下就业风险问题突出,结合人口增长放缓因素,绝大部分部门、

省市将可能出现就业人数缩减,劳动力大量转移风险。如煤炭相关行业存在产值缩水53%、就业岗位缩减88%的可能性。以山西为代表的资源型地区转型发展就业风险突出,需提前研制风险预案。

根据结论本课题提出以下政策建议:(1)煤炭、煤电等传统能源转型发展方面,保证能源安全的前提下,科学规划、合理控制煤电规模;新建煤电机组建议采用水冷冷却方式;深挖潜能,提高标准,发挥煤炭清洁高效利用与能源转型的叠加减碳效应,释放煤炭清洁高效利用在能源转型中的成本缓冲器和能源安全稳定器作用;在本世纪的第三个十年大力开展煤炭开采和洗选业节水行动,持续开展煤化工节水行动;维持水价相对稳定,审慎利用水价工具调节工业产能。(2)煤层气等清洁能源转型发展方面,加大煤层气抽采力度,提升煤层气直排标准,加快低浓瓦斯利用技术开发与研究;开发低浓瓦斯利用CCER产品,引导企业有序参与低浓瓦斯利用项目。(3)风能、太阳能等绿色能源转型发展方面,探索采煤沉陷区治理与光伏发电协同发展模式;集中式光、风发电要加快配套布局成本低、稳定性高的大功率储能设施;抽水储能电站探索多元来水,降低蒸发,缓解水资源矛盾;分布利用,探索以城市分布式光伏发电-应用端绿氢制造模式;变废为宝,探索以弃风弃光资源打造绿色交通城市模式;培育发展新能源机组维护的专业生产性服务业,降低新能源运行、维护成本。(4)失业工人的就业再安置问题需要提前做好政策安排部署,在努力实现碳达峰的基础上实现社会公正转型,对受转型冲击行业就业情况进行全方位梳理,构建常态化援企稳岗帮扶机制。

