

美国加速能源系统 脱碳政策设计及其启示

Policy design for accelerating decarbonization of the U.S.
energy system and its implications

■文 / 王卓妮¹ 王静懿² 石长慧³



为应对气候危机,世界已开始从化石燃料为主的能源系统转向温室气体净零排放的能源系统。美国国家科学院、工程院和医学院联合特设了共识委员会“美国加速脱碳委员会”,在2021年2月发布的260多页中期报告中,从技术、政策、社会 and 行为的维度,采用系统的、跨部门的方法,评估加速美国经济脱碳所需的技术、政策和社会因素的现状,并提出在近期和中期(5-20年)改进重大政策和加大科研投资,及使美国实现长期净零排放所需路径和方法等方面的政策建议。

一、实现净零排放的目标和关键行动

(一) 技术目标和社会经济目标的协同制定

美国加速脱碳委员会的任务不是确定美国是否应该进行深度脱碳,而是评估脱碳路径和优先采取的行动。美国加速脱碳委员会研究总结了从现在到2050年期间关于各种可能的脱碳路径,发现6条关键特征:(1) 提高交通、工业、建筑、电力等部门的能源和材料效率来降低能源总需求,这将在未来30年所有经济部门中发挥重要作用;(2) 脱碳发电,电力部门应比其他经济部门更快更深入减少排放,因为零碳发电相对容易,而且选择广泛;(3) 建筑(如供暖和热水供应)、交通(如轻型汽车和卡车)和非电力能源需求低的产业,改用电力和低碳燃料;(4) 从固定来源(如火力发电厂,水泥、氨生产)的化石燃料残余中捕获碳;(5) 增加碳封存,减少非二氧化碳(HFCs、CH₄和N₂O等)排放,碳封存对工业过程、电力减排都很重要;(6) 加强土地碳汇和负排放技术,抵消所有残余的直接排放,因为完全消除这些排放是不可能的或成本太高。各

种脱碳路径的6条共性特征是制定美国加速能源系统脱碳目标的重要依据。

美国加速脱碳委员会认为,净零问题应从经济、公正公平、能源技术和能源政策四种视角出发,共同致力于实现稳健的、可持续的能源转型。关键是制定一套反映四种视角的平衡目标组合。该委员会就2021-2030年的美国净零排放政策,同时确立了技术目标和社会经济目标。技术目标包括:(1) 投资于能源效率和生产力;(2) 使交通、建筑和工业中的能源服务电气化;(3) 生产无碳电力;(4) 规划、许可和建设关键基础设施;(5) 扩展创新工具包。社会经济目标是:(1) 加强美国经济;(2) 促进公平和包容;(3) 支持社区、企业和工人;(4) 最大限度地提高成本效益。

(二) 不同脱碳路径下共同的优先关键行动

不同脱碳路径是其所依赖的政策和中心技术的不同组合,各有千秋。最小成本路径通常采用零碳普及技术,可能忽略了许可和选址、监管、融资与其他障碍。有的路径使用优选技术,例如100%可再生能源方案(在电力部门或全经济领域)。还有的路径是,选用不同的政策工具,例如严重依赖技术无关的碳价格或清洁能源标准,构建脱碳路径。同时,脱碳建模发现,以现有技术为限制条件的方案比依赖技术无关政策工具的方案会带来更高的减缓成本。

该委员会综合分析不同脱碳路径利弊的同时,提炼了共同的优先关键行动。无论最终系统是100%可再生,还是保留大量核能,或是非化石燃料,美国都需要在接下来的10年采取以下五项关键行动,确保到2050年实现能源系统净零排放。(1) 交通、建筑和工业部门的能源

服务电气化,例如,到2030年,零排放汽车(电动和燃料电池)将达到汽车销量(所有类别的总和)的50%,25%的住宅将部署热泵;(2)提高交通、建筑和工业部门的效率和能源生产力,其中有许多例子,包括提高电器和建筑的效率,以及加快工业能源生产率(每消耗能源的经济产出),从最近的每年1%的增长速度加快到每年3%;(3)无碳电力,到2030年,将无碳能源产生的电力份额从37%增加到75%左右,其中包括部署600吉瓦的风能和太阳能发电容量;(4)建立过渡到净零所需的关键基础设施,包括大幅扩展高压输电线路以在区域之间传输可再生能源,建设国家二氧化碳运输网,将捕获的二氧化碳转移到地质储层(即使在100%可再生能源系统中,也可用于脱碳工业和生产负碳燃料),以及扩大电动汽车充电站网;(5)扩展创新工具包,包括用于电解生产可再生能源燃料的研究、开发和示范、廉价的DAC,可用于抵消任何被证明难以缓解或具有破坏性的温室气体排放,以及通过创新进一步降低已实现成本效益的技术成本。

在21世纪中叶实现净零排放的所有计划,都需在长期排放设施退役时尽快实现替换,并满足所有非排放资产的扩张需要,未来10年的大规模部署都必须依赖经过验证的成熟技术。而且,任何新的创新都需要数年甚至数十年的时间才能实现规模化,即使有30年的时间跨度,也不能等待新突破。而这五项推荐行动,对于未来技术突破(例如低成本的直接空气捕捉或电解)所带来的不确定性也具有很强的抗性。

二、美国能源系统

深度脱碳技术可行且成本较低

(一) 深度脱碳在技术上可行

国际能源署(IEA)发现,到2050年实现净零能源系统的目标,全球年度减排量的近一半可能来自目前处于示范或原型开发阶段但尚未商业化的技术。所有这些技术虽然刚刚起步,但在技术上是可行的,并且不需要基础的科学“突破”就可以部署;而且,继续加大科学研究投资,随着科学技术新突破,还可能提供更开阔、多样的技术解决方案。该委员会深度脱碳研究发现,实现净零排放和技术上是可行的(且成本相对较低),前提是在未来10年大量投入和积极努力,推动一系列新兴技术的成熟和改进,推动全套低碳解决方案的规模部署和成本下降。

在过去的几十年里,风能、太阳能、页岩气、发光二极管、电动汽车锂电池和并网电力存储五项关键技术成本急剧下降。这些技术的应用帮助实现了迄今为止的大部分减排,并改变了脱碳经济学。在开发和示范方面加大公共投资,通过激励和标准来加快技术的早期应用,激发私营部门创新和竞争市场的创建,这些政策促进了技术成本的急剧下降。具体政策包括针对页岩气的非常规天然气税收抵免、风能和太阳能的生产和投资税收抵免、发光二极管的公用事业退税计划、燃料经济型和零排放汽车标准以及锂电池电动汽车补贴。过去几十年的投资和政策,让这五项技术从昂贵的“替代能源”转变为高性价比的主流能源,正在改变电力、建筑和电器以及交通运输业的碳排放,并将在未来几十年带来高效益和可持续的碳减排。

(二) 净零转型期的能源支出可控且低于历史水平

美国如果建立净零排放经济,消费者和美国经济就可以很好地规避能源价格飙升的风险。历史上,天然气和石油价格的全球和国内飙升,将美国能源支出推高至较高水平,如2008年高达国内生产总值(GDP)的9.6%。1970-2018年的大部分年份里,美国能源支出占GDP的比例在5.5%-14%。在基准情景下,从现在到2050年,美国建筑、商业、工业和其他部门的能源服务年支出可能超过1万亿美元(约占美国2019年GDP的5%)。多项研究估计,在总能源支出占GDP的4%-6%情况下,可以实现净零排放。

到2030年,美国净零能源转型期间的累积增量能源支出为1000亿-3000亿美元,到2050年,能源支出将比常规的22.4万亿美元超出4万亿-6万亿美元。随着清洁能源技术(如风能、太阳能和电动汽车)成本的下降,预测结果表明,净零过渡的能源增量成本呈现持续下降趋势,这表明创新可以进一步降低清洁能源转型成本。美国建立净零经济不仅会降低化石燃料市场激增的风险,减少能源支出占经济总量的比重,而且也消除了美国对气候变化的持续贡献。

而且,研究表明,到2050年预计的脱碳支出(见图1橙色和紫色区域),尽管会因未来电气化水平、技术应用、能源价格和碳捕获而变化,然而,这些预计支出占GDP的比例与美国能源信息署(EIA)估计的历史支出和基准情况(见图1有色线)相似。因此,到2050年实现净零排放不仅是可能的,而且与之前预期的支出相当。清洁能源转型的可观收益,可抵消部

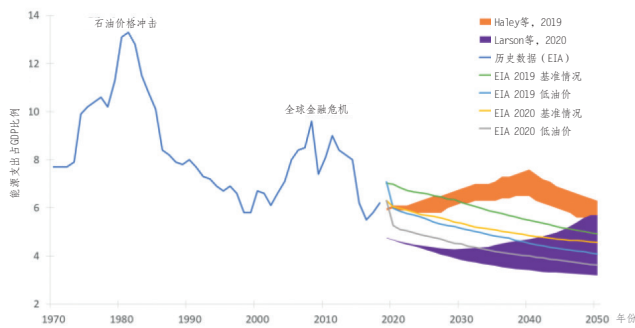


图1 美国能源支出占GDP比例的历史趋势与不同脱碳路径下的预测 (NAP, 2021)
(数据来自:The National Academies Press: <https://doi.org/10.17226/25932>)

分、全部或更多能源转型成本。净零过渡的好处还包括因化石燃料造成的空气污染减少而导致的早亡人数的下降。据研究预测,在2020-2050年,空气污染导致的早亡数减少85000例。

(三) 净零经济需能源系统根本转型并立即行动以避免技术锁定

向净零排放过渡的社会经济必须与技术变革协同。任何能源转型路径的成功都需要公众大力的接受与配合,并受限于社会条件的约束和社会期望。任何脱碳路径都要求美国为家庭和经济让能源方式发生根本转变。这种转变受限于能源服务产品的可靠性和社会预期成本,能源获取和公平问题,技术开发和部署速度的不确定性,以及新技术的监管和市场壁垒。新型能源系统具有相当大的惯性与风险厌恶的特征,以及有利于现任者的市场、金融和监管结构。社会偏好和政策、监管和投资环境会制约并促进能源转型。经验表明,实惠的价格、清晰的沟通和消费者激励有助于新技术的广泛应用。例如,美国“能源之星”计划的成功很大程度上归功于其高辨识度且易于理解的标签和购买激励措施,以及消费者对提高能效的渴望。

净零经济呼唤立即行动,以避免锁定次优资源。如果政策只产生渐进式减排,而不促进根本转型,就可能导致技术锁定,到本世纪中叶无法实现深度脱碳。实现净零排放的挑战要大得多,需要一套不同的低碳资源,而不是低幅减排的能源系统。例如,可以通过部署天然气发电厂来实现电力部门的适度减排(如二氧化碳减排50%-70%)。然而,向净零排放的电力转型,绝大多数化石燃料发电厂需被替换或配备碳捕获技术。将传统生物燃料与以石油为基础的运输燃料混合使用,可以实现运输部门的适度减排。但是,文献共同的建

议是,运输脱碳需逐步淘汰内燃机车,而改用电动车,包括纯电动汽车和燃料电池汽车。不以促进转型为目标的逐步减排政策,可能导致技术锁定和排放僵局,那么,本世纪中叶就无法实现深度脱碳。

三、加速美国能源系统脱碳政策设计对中国的启示

鉴于美国能源系统加速脱碳的政策设计和技术可行分析,中国在加速能源系统脱碳时须关注以下三方面建议。

(一) 能源系统加速转型应着眼民生用能的公平公正

确保碳中和经济转型利国利民,减少并避免其造成危害,为经济脱碳行动获取公众大力支持,利用转型机会推进国家优先事项,这是美国能源转型需应对的三大挑战,也是中国的挑战。中国能源系统加速转型应坚持以人民为中心,把保障和改善民生用能、脱贫人口用能作为能源发展的优先目标。

加强能源民生基础设施和公共服务能力建设,提高能源普遍服务水平和避免能源设施对长期碳减排的锁定效应。能源基础设施和设备使用寿命长、周转慢,建筑、工业设施和其他长寿命资产的周转率低。要建立低碳能源系统,需立即开始处理这些资产,替换或改建复用现有基础设施。发电厂、建筑和许多工业设施设备寿命较长的基础设施在21世纪中叶前只有一次自然更替周期,这些资产被更替时,应遵循净零排放原则,以最低总成本实现净零转型。近10年将是实现净零转型的基础设施建设的关键期,从而结束对运输化石燃料的基础设施(如管道)的大多数新投资。需要发展的基础设施包括电动汽车充电和长途高压输电线,还有氢的运输和储存的基础设施以及二氧化碳基础设施的规划,包括管道和存储。

加强区域发展协同,把推动能源发展和脱贫攻坚有机结合,发挥能源基础设施和能源供应服务在扶贫中的基础性作用。加快在西部、北部地区建设一批大型清洁能源基地,通过特高压电网外送至东部地区,将资源优势转化为经济优势,缩小东西部发展差距,促进全国加快碳减排。改建复用现有化石燃料基础设施,可降低能源转型总成本的同时减少资产闲置和工人下岗,可以在实现清洁能源方面发挥关键作用。例如,对天然气管道进行升级或改造,以输送氢气/天然气混合物或100%氢气,有助于在低碳能源系统中保持这些管道的

使用,避免建造成本更高、选址难度更大的新设施,同时防止管道资产搁置,并保留天然气输送和分配公用事业的工作岗位。利用剩余油气盆地进行二氧化碳的永久地下储存,帮助石油公司向碳管理公用事业转型。最大限度地利用现有的基础设施,将有助于为碳密集型行业的企业和员工创造更多效益。

(二) 能源系统深度脱碳具备技术可行性,但仍须加快技术研发和部署

碳中和将引领构建全新的零碳产业体系。零碳技术创新的领先者必将引领新一轮产业革命。2021年5月,英国皇家学会组织协调了20多个国家的120多位不同学科专家共同参与探讨,明确到2050年实现净零排放的研发部署的优先事项,提出了加快实现温室气体净零排放、提高应对气候变化能力的12个科学技术问题,与能源系统关系密切的包括:新一代高分辨率气候建模、未来电池储能解决方案、低碳供热制冷、氢氨燃料脱碳、碳捕集与封存等。

就低碳能源新技术,生物质气化制氢、直接空气压缩、低碳或固碳材料、低碳合成燃料、先进核能和其他低碳能源技术,需持续投资研发与示范,通过激励措施和标准创造市场,加快技术的创新、成熟和改进。在研发和部署大规模技术时,需要回答实现深度脱碳的技术挑战和机遇是什么,包括航空旅行和重加工等具有挑战性的活动;哪些研究、开发和示范工作可以加速这些技术;融资和资本如何有效支持脱碳;跟踪技术部署和扩大规模的关键指标以及跟踪排放的关键测量指标是什么等。

目前公共领域尚无模型能对净零系统的所有主要元素进行建模和分析。美国加速脱碳委员会认为,需要开发全新的开源能源系统优化模型。该模型开发的主要技术障碍是有限的计算能力,因为该模型必须在高时间分辨率(以捕捉灵活性需求和可再生能源发电的可变影响)下,同时优化所有部门的决策,并提供足够的地理空间细节,以捕捉需求、选址限制和地方政策的复杂变化,并为现实决策提供可操作的建议和消息。为了克服这些困难,需要新工具和思考能源系统模型的方法,美国将投资开发一个开放获取的建模工具和开源数据的生态系统,以精确的参数化模型,更好地展示净零过渡的可能范围,帮助规划实现净零目标。中国在技术可行条件下,跟进开发能源系统优化模型,该系统有助于及时发现与应对“拉闸限电”“运动式减碳”等

现实问题,还可解决监测当地和高压电网的电力流向和扩张、调度中心站和分布式资源、指挥气体和液体燃料生产、运输、储存和消费等技术问题。

(三) 对净零转型期间或将出现的社会经济问题做好预判研究与政策支持准备

美国加速脱碳委员会发现,各种可行的脱碳路径在第一个10年的行动非常相似,只有在10年后才有差异。2021-2030年短期优先脱碳行动,在许多情况下都是强而有力的,但是,面对最终脱碳路径的不确定性,还应保留替代方案。不确定性不仅来自科学技术,还来自社会经济层面,如中国能源系统脱碳的经济可行性和实现路径等。

2021年12月中国中央经济工作会议,明确了新增可再生能源和原料用能不再纳入能源消费总量控制,创造条件尽早实现能耗“双控”向碳排放总量和强度“双控”转变,加快形成减污降碳的激励约束机制,防止简单层层分解。能源系统净零转型牵动着社会经济各行各业和生产生活方方面面。在能源系统脱碳变革过程中,社会或将不断出现新问题和新的挑战。

净零过渡期,至少三个维度的问题需要尽早厘清。一是部门的相互关系和影响。一个部门(例如,交通部门)的变化如何影响其他部门(例如,电力部门),以及通过这些互动会产生哪些正面和负面的系统性影响;对部门相互作用的理解,如何影响技术和政策组合的选择?二是社会、制度和行为。深度脱碳的社会、制度、行为和公平驱动因素是什么?深度脱碳的影响在各省(区、市)、地区和城市与农村地区之间有何不同,如何确定公平问题并解决影响分布不均的问题;私营部门在实现减排方面的作用是什么,包括公司对其外部供应链的影响;与深度脱碳相关的经济机遇有哪些?劳动力和人力资本需求是什么?三是地方、省级和国家层面的政策协调和排序。地方、省级和国家层面的近期政策发展正在推动脱碳,如何对政策进行排序以最好地实现近期、中期和长期目标,减缓、适应和经济发展之间存在哪些协同作用。

本研究得到国家自然科学基金项目(批准号:42142009)和国家社会科学基金重点项目(批准号:21AZD123)的资助。

作者单位:1.中国气象局气象干部培训学院;2.奥雅纳工程咨询(上海)有限公司北京分公司;3.中国科学技术发展战略研究院