

美国能源可持续利用现状及对中国的启示

胡健¹, Wu Sheng², 邓西里³, 孙海涛⁴, 崔景伟³, 赵路正⁵

1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013

2. Power Environmental Energy Research Institute, 美国加利福尼亚州 91722

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

4. 中国煤炭科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037

5. 中国煤炭科工集团煤炭规划总院, 北京 100120

摘要 世界能源利用进入“清洁、低碳、可再生”的可持续发展新航道。美国在全力确保清洁能源制造和全球领先地位, 保障和实现国家能源安全稳定供给中努力形成能源可持续利用结构。能源结构转型已使美国温室气体排放总量达峰后持续走低, 并下降至 2000 年以前水平, 电力行业和交通行业碳排放震荡下降, 美国可持续能源发电成本较世界其他国家偏低。美国能源可持续利用水平的提升得益于一系列政策法规、财政投资及经济市场等多方面措施的保障。美国政府的碳减排措施及各州政府的节能准则保障能源利用效率的提升; 政府推动能源转型, 促进清洁能源投资, 并进一步推动清洁能源和能源税收减免; 通过加大天然气领域的投资, 促进交通领域电气化转型, 以及修订车辆燃油经济性标准等措施推动可持续能源市场繁荣。美国能源的可持续利用现状显示, “能源利用过程的清洁化、能源利用类型的低碳化、能源获取方式的可再生化”为主导的能源转型方向将成为实现能源利用可持续性的发展趋势, 全球可持续能源技术创新成为关键技术进步和竞争的阵地, 国际能源转型过程中出现的多种困境显示, 全球可持续能源利用的重要领域合作基础众多而广泛。美国与中国能源结构和能源转型中面临的形势与挑战相似, 也有不同。中国能源转型将面临重要多重技术无人区, 应从战略角度充分认识能源转型的长期性、复杂性和艰巨性, 深入加强中国能源绿色低碳转型的基础性、原创性、颠覆性技术的研究, 推动中国能源绿色低碳安全转型。

关键词 能源; 化石能源; 可再生能源; 能源战略

英国石油公司(BP)发布《世界能源统计年鉴 2022》, 提出自 20 世纪 70 年代发生世界能源危机以

来, 世界能源系统面临 50 多年来的最大挑战和不确定性^[1-2]。因世界局部冲突导致的粮食危机、能

收稿日期: 2022-09-12; 修回日期: 2022-12-28

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05045, 2016ZX05045007)

作者简介: 胡健, 副研究员, 研究方向为非常规油气地质学与能源发展战略, 电子信箱: hujwk@pku.edu.cn

引用格式: 胡健, Wu Sheng, 邓西里, 等. 美国能源可持续利用现状及对中国的启示[J]. 科技导报, 2024, 42(4): 6-20; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.04.001

源短缺、通货膨胀等多种复杂矛盾交织,世界发展进入新的动荡变革期^[1]。在世界能源转型和低碳背景下^[3-4],能源系统稳定和能源安全保障俨然极为珍贵同时也极为困难。继美国提出“能源独立”计划以来^[5],历任美国政府都十分重视美国能源安全问题^[6]。2017年美国率先提出国家能源安全战略,将节约能源和最大限度利用发展可再生能源作为国家经济和能源转型的重要战略。2022年,美国能源部发布《美国实现清洁能源转型的供应链保障战略》,确保清洁能源制造和创新的全球领先地位,以保障和实现国家能源安全稳定供应链^[7]。

当前,全球供应链面临瓶颈、美国通胀压力不断上升,世界经济在动荡中乏力复苏,能源行业面临新发展形势。尽管能源行业的发展存在相当大的不确定性,但2021年美国清洁能源发展呈现一定趋势,能源效率保持稳健提升,可再生能源、电池存储技术、可持续交通等领域的投入创历史新高,进入到相关领域的公司、技术和项目投资前所未有的,与之相关的支持性政策不断出台。本文盘点美国能源可持续利用的发展现状,梳理可持续能源发展利用中涌现的技术与市场、政策与法规等重要关节,分析可持续能源利用的发展趋势。

1 美国能源结构概况

1.1 能源总量与能源效率

2021年美国国内生产总值(GDP)增长5.7%(按美元现价计算为10.1%),达22.99万亿美元。一次能源消费较2020年增长4.4%,但比2019年前水平仍低3.19%,能源生产率提高1.3%,单位GDP(国内生产总值)能耗下降4.8%。1990—2021年,美国经济规模增长了2.85倍,而年度一次能源消费仅增长15.2%,表明美国能源生产效率在过去30年间提高70%(图1)。2021年,美国能源消费总量同比增长4.8%,至97.3千万亿英热单位(BTU),约为35亿t标准煤。由于天然气价格高企,煤炭消费量增加了18.8%,约为3.93亿t标准煤,但仍不及2005年峰值8.2亿t标准煤。2021年,美国可再生能源消费总量约为4.4亿t标准煤,占美国一次能源消费总量的12%,可再生能源消费总量超过煤炭消费总量,居美国一次能源消费总量第3位。2021年石油、天然气、煤炭等化石能源仍是美国一次能源消费的主体能源,总量约为27.7亿t标准煤,占美国一次能源消费的比重达79%(图2)。化石能源仍是美国能源消费的主体能源,美国仍然处在石油消费时代。

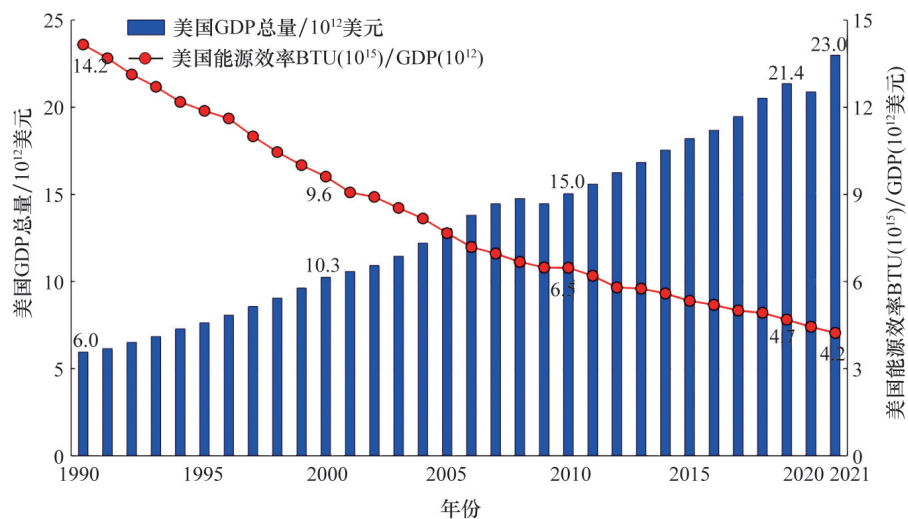


图1 美国GDP和能源效率(1990—2021年)

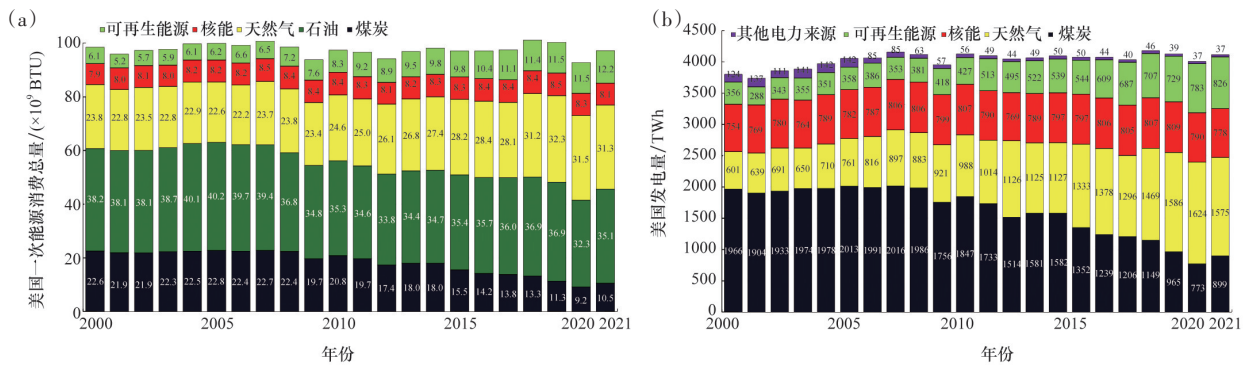


图2 美国一次能源消费总量(a)与电力来源(b),按能源类型划分(2000—2021年)

1.2 化石能源生产与消费

美国是世界上最大的石油消费国和生产国。2021年,美国石油类产品消费总量达19.8百万桶/d,约为11.6亿t;石油类产品产量18.7百万桶/d,约为11.0亿t。2021年美国原油总产量为11.2百万桶/d,约为6.6亿t(图3)。据国际能源署(IEA)统计,

美国成为全世界最大的原油生产国,超过俄罗斯和沙特阿拉伯,占世界原油总产量的17%。2020年和2021年美国成为石油类产品净出口国,石油消费对外依存度由2000年的6.1亿t(最高2005年7.4亿t)转变为净出口国,改变1949年以来的石油类产品净进口国地位。

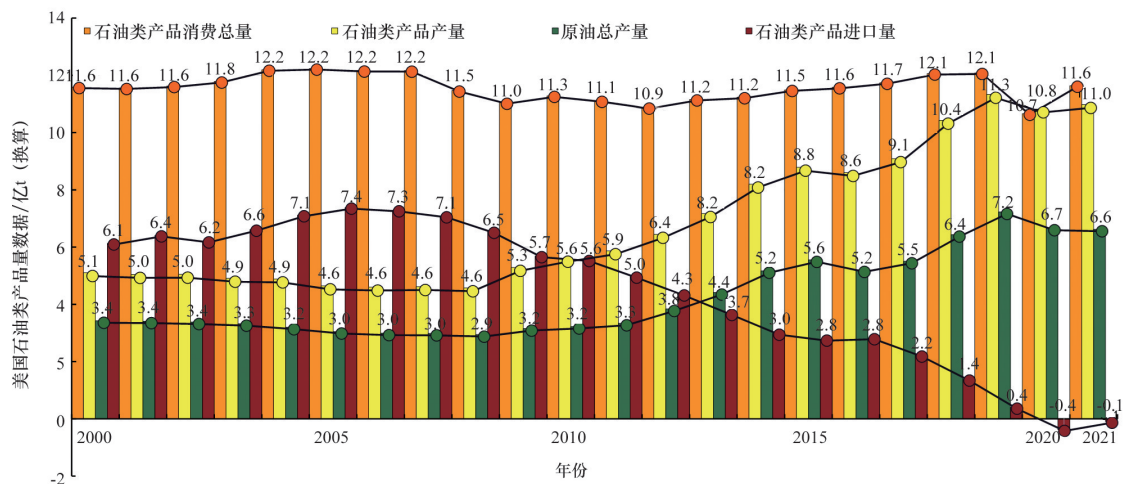


图3 美国石油类产品消费量、产量及进口情况(2000—2021年)

美国是世界上最大的天然气消费国和生产国。2021年,美国天然气消费量达9670亿 m^3 ,创美国天然气消费历史新高,天然气产量8575亿 m^3 较2019年8816亿 m^3 略有下降,但比2000年天然气产量增长30%(图4)。美国页岩气产量自2008年开始持续大幅增长,2021年产量达7589亿 m^3 ,占美国天然气总产量的88.5%,美国自2017年开始成为天然气净出口国。

美国是世界上的煤炭消费和生产大国。2020

年美国煤炭消费总量4.77亿t,2021年美国煤炭消费总量反弹至5.46亿t,占美国能源消费总量的10.8%,2020年和2021年美国煤炭消费量实现自1949年以来最低,美国煤炭消费主要用于发电,占比为91.9%,达5.01亿t。工业领域主要用于炼焦用煤、水泥生产等,用量占比为8%(图5)。

1.3 电力总量与电力组成

2021年,美国总发电量同比增长2.7%,达4.12万亿度(图6^[8])。天然气发电是美国最大的电力能

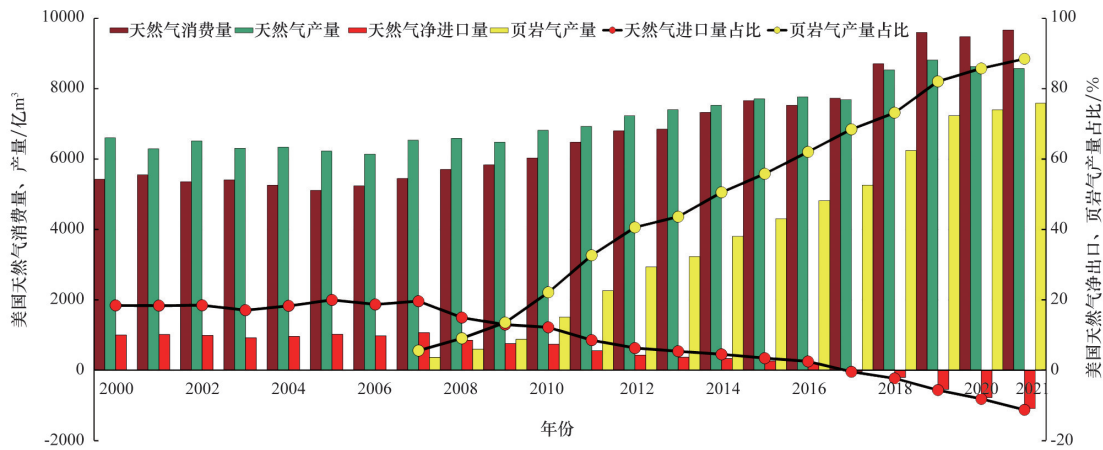


图4 美国天然气消费量、产量及占比情况(含页岩气)(2000—2021年)

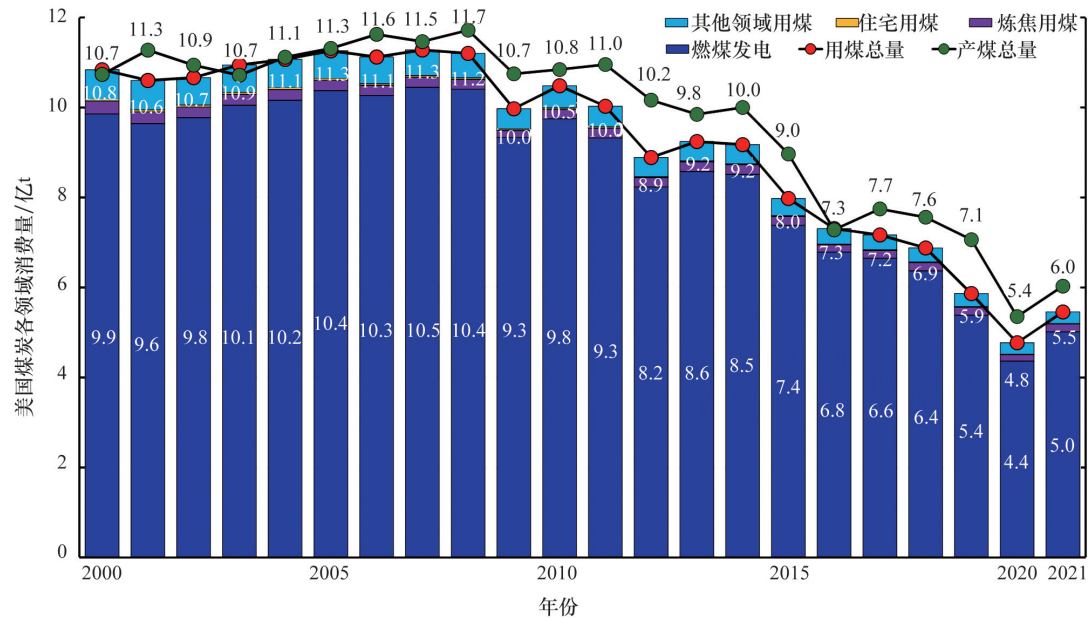


图5 美国煤炭消费量、产量及各领域用煤情况(2000—2021年)

源来源,天然气发电占发电总量的38.3%,达到1575 TW·h,比2020年下降2.2%。可再生能源发电的贡献率同比增长4.1%,达到826 TW·h,占总发电量的20.1%。过去10年中,可再生能源和天然气占总发电量的比例从37.3%上升到58.3%。

燃煤发电自2014年以来首次同比增长,占2021年发电总量的21.8%,达899 TW·h,同比增长2.5%,燃煤发电占比仍高于可再生能源发电占比,仅次于天然气发电量占比,是美国第2大电力来

源。2010年以来,美国30%的燃煤电厂关停退役,2013年以来,无新增燃煤电厂投入使用。核能占2021年发电总量的18.9%,达到778 TW·h,核能发电占比低于可再生能源发电,核能发电与可再生能源发电之和占总发电量的39%,达1604 TW·h,超过天然气发电总量。

美国综合电能生产效率为35%,电能生产过程中约65%的系统能耗(图6)。在用能终端的消费侧,2021年美国电力总消费达73.5千万亿BTU,约

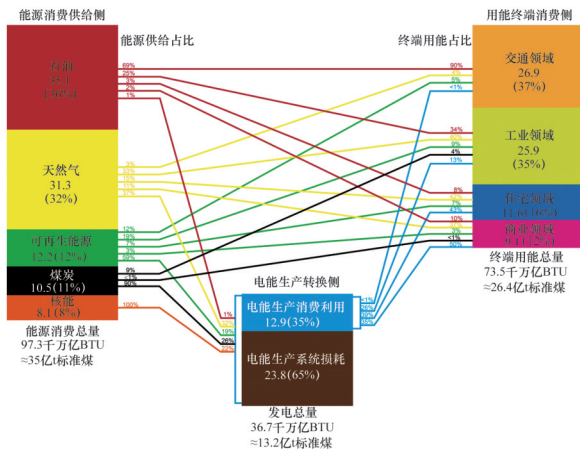


图6 美国能源消费与终端用能结构(2021年)

为26.4亿t标准煤,其中交通领域占比37%,工业领域占比35%,住宅和商业领域分别占比16%和

12%,69%的原油用于交通运输,但占交通运输领域能源消耗量的90%,交通运输中的电能损耗<1%,表明交通领域电气化程度仍十分低。住宅和商业领域的电气化程度占比均超40%。石油、天然气、煤炭在工业领域的用能占比达78%,仍承担主体地位。

1.4 可再生能源总体利用

美国可再生是美国能源的重要组成部分,对减少温室气体排放、促进能源清洁化利用发挥重要作用。美国可再生能源通常包括太阳能、风能、生物质能和地热能等。随着可再生能源发电不断增长,尤其在得克萨斯州和加利福尼亚州等可再生能源丰富的各州和地区,风能和太阳能成为新能源主力(图7)。

2000—2021年,美国可再生能源在美国能源

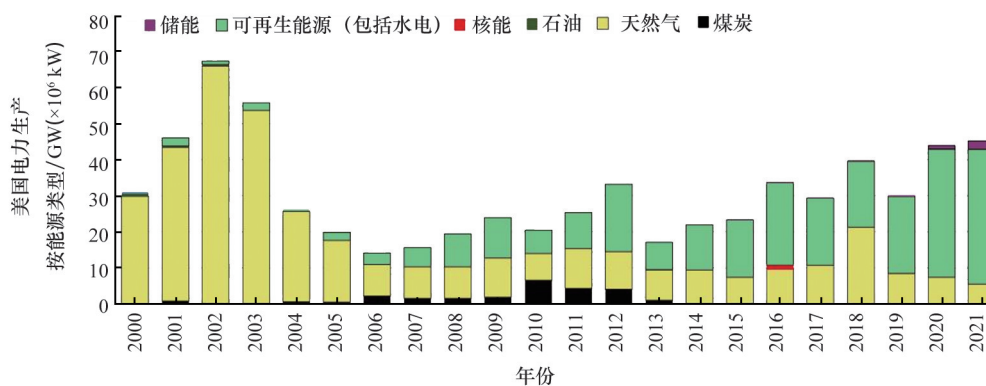


图7 美国可再生能源利用情况(2000—2021年)

消费中的占比不断增加。2021年美国可再生能源在美国能源消费中总占比为12%,约为4.4亿t标准煤(图8)。其中生物质能源占可再生能源中比重最高达40%,其中生物燃料用于交通运输中的比重占64%。风能占比27%,水电占比29%,几乎全部用于发电。

2021年美国可再生能源发电量为826 TW·h,占美国发电总量的20.1%。其中太阳能占比12%,其中67%用于发电,地热能中67%用于发电。终端用能中用于发电的可再生能源占比达59%,其中风电、水电、太阳能发电分别占比为46%、32%、14%,占总发电量的92%。

2021年成为美国近20年来最大的新增发电能力建设之年,新增发电能力达45 GW(图9^[9])。非水力可再生能源占新增能源总量的82.5%,创有史以来的最高比例增长。新增天然气发电装机容量降至5.6 GW,较2020年下降22.5%,大多数位于东北部和东南部靠近天然气主产区的各州。

2021年可再生能源总容量为353 GW,风能发电能力达到138 GW,发电量达380 TW·h,太阳能装机容量仍为119 GW,发电量达115 TW·h。2021年,所有可再生能源发电量增长了5.5%,达到了826 TW·h。

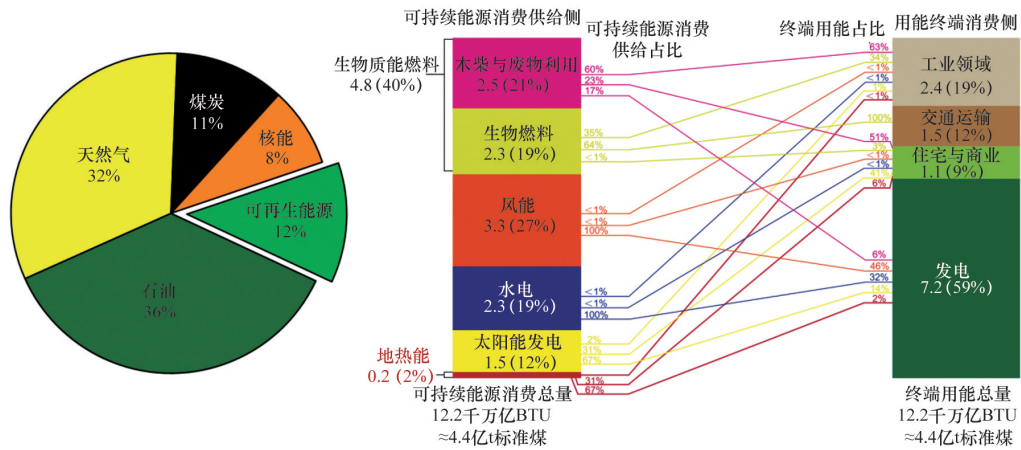


图8 美国可再生能源占比及能源供给和利用情况

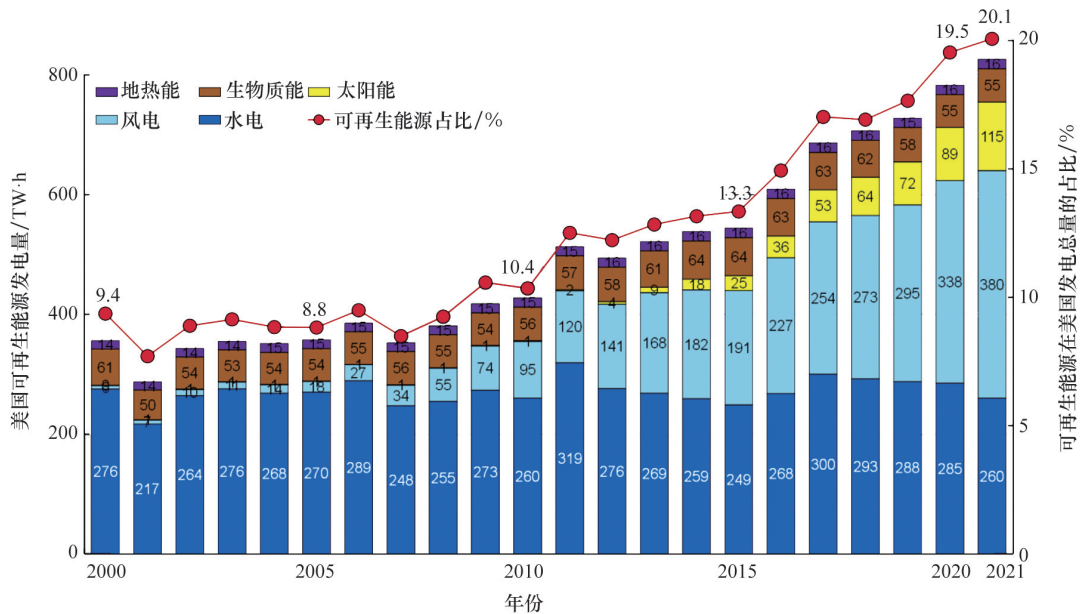


图9 美国新增发电能力(2000—2021年)

美国能源署《2022年度能源展望》中预计,美国的可再生能源消费将持续增长到2050年。在当前政府能源领域的政策和法规要求下,可再生能源将实现不断增长。

1.5 温室气体排放

20世纪80年代,美国CO₂排放量占世界CO₂排放总量的24%。1990—2000年美国CO₂排放量增长16%,2000年美国CO₂排放量是中国CO₂排放量的1.6倍。美国温室气体排放总量在2007年达到

峰值并出现拐点,实现温室气体排放总量达峰^[10-14]。美国奥巴马政府时期承诺到2020年实现碳减排比2005年减少17%,并提出清洁电力计划,承诺2030年实现碳减排比2005年减少30%^[15]。特朗普政府时期,美国以“对美国不公平”为由,单方面退出《巴黎气候协定》,并以实现经济增长为目的,提出不应限制能源使用。拜登政府重返《巴黎气候协定》并承诺到2025年在2005年的基础上减排25%,到2030年将美国的排放量减少50%^[16]。

2020年美国温室气体排放下降9.6%,2021年反弹 5.8%,但仍比2019年的水平低4.4%(图10)。

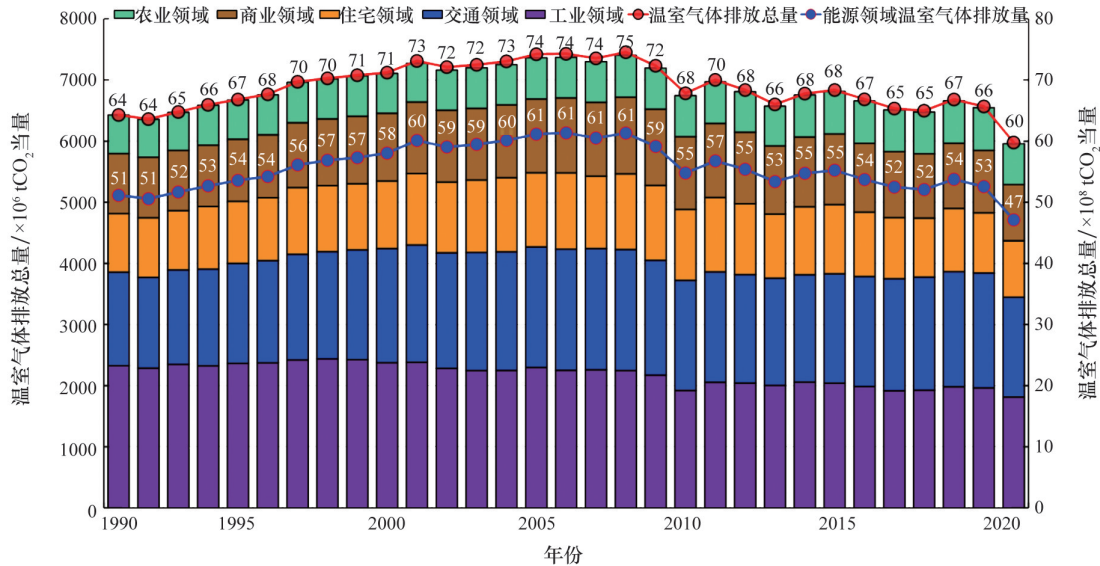


图10 美国温室气体排放量及各行业排放量(1990—2021年)

2021年,电力行业排放增长8.6%,较2020年的10.4%大幅回落。这是由于天然气价格高企导致煤炭使用量增加产生的短期效应,电力部门的排放量仍比2019年低2.7%。随着可再生能源以创纪录的速度入网,电力部门的排放量将恢复持续下降轨迹。美国拜登政府宣称电力部门在2035年实现无碳化,当前美国39%的电力来自无碳能源。2005年以来,美国电力部门已减少35%的排放量。这主要得益于美国非常规页岩气大规模开发,使得天然气大幅供给,取代了煤炭发电^[17]。为实现减排目标,电力部门将需实现对化石燃料进一步脱碳。

2 美国能源可持续利用发展现状

全球范围内,可再生能源的成本正在不断降低。陆上风力发电或大规模的光伏发电是最便宜的新型大规模发电方式。印度拥有全世界成本最低的太阳能,光伏发电的价格为0.163元/kW·h。日本高额的资本支出和运营维护费用致使风能和太阳能发电成本很高。英国和德国的碳定价和资源相对匮乏推高天然气和煤炭发电的成本。美国

因天然气资源便宜丰富,其天然气发电发电成本最低^[17]。

2021年,由于原材料、货运和燃料成本上升,美国大多数发电技术的成本上升。大型光伏发电成本同比增长了4%,约0.20~0.41元/kW·h,而陆上风力发电成本增长13%,约0.21~0.33元/kW·h。天然气发电成本约0.25~0.53元/kW·h。在格拉斯哥举行的COP26(第26届联合国气候变化大会)上,全球电力市场的不断增长推动了碳市场的发展。随着政府制定越来越雄心勃勃的清洁能源目标,可再生能源信用市场得到了支持。2021年,长期处于休眠状态的得克萨斯州可再生能源信用证价格从接近于零上升到约0.04元/kW·h。对于企业买家来说,可再生能源信用证变得越来越有价值^[9]。

2.1 海上风电与抽水蓄能

在美国联邦政府的大力支持下,海上风电行业蓬勃发展^[18-20]。2021年,拜登政府宣布到2030年海上风力发电能力提高至30GW。2021年,纽约州、新泽西州、马萨诸塞州和马里兰州均启动海上风电项目,4个州的中标项目总装机容量接近8.5GW。俄勒冈州和加利福尼亚州通过了支持海上风能开

发的法案。美国海上风电开发从东海岸开始,美国海洋能源管理局(BOEM)已经批准 806 MW 的 Vineyard 风力项目和 132 MW 的 South Fork 风力项目,并计划最早于 2022 年在加利福尼亚州和墨西哥湾举办海底租赁拍卖。

抽水蓄能项目约占美国已装机储能容量的 81%,总计装机容量为 2.1 GW 的新抽水蓄能项目已获建设许可。自 2011 年以来,以锂离子电池为主的储能技术主导了新能源存储的建设,州一级提请的储能目标和政府公共建设的申请中通常不包括抽水蓄能。2021 年,美国政府公共建设的大规模非水电蓄能容量估计为 4.1 GW,总容量达到了 6.6 GW^[21]。

2.2 太阳能发电与储能建设

太阳能发电与储能建设及其形成的产业在整个可再生能源市场中占据较大比重。随着电气化时代对电能需求的持续增长,美国政府、各州及地方政府将在决策层面提出太阳能和储能联合体项目的建设需求^[22]。2021 年,太阳能和储能联合体项目持续增长。美国西南部、加利福尼亚州和夏威夷州最为活跃,得克萨斯州、中西部部分地区、威斯康辛州以及印第安纳州均在太阳能储能联合体项目中名列前 10^[9]。联合体项目的驱动因素保持不变,太阳能资源丰富地区可实现能量的迅速转化和利用,太阳能资源欠丰富地区,联合体项目可降低能源利用成本,调节高峰时段用能需求。

美国《重建更好未来》法案(《Build Back Better Act》)中独立储能项目将首次享有投资税收减免(investment tax credit),从而消除了与太阳能发电配套使用的资本支出补贴。当前情形下的能源转换仍是太阳能与储能系统联合的供给体系,新形势下的太阳能企业与储能企业将作为单独的法律实体,并可充分享用信贷。

2.3 电池储能

在替代化石能源建设规划中,电池储能成为能源转化的重要方式,将可再生能源与电池储能项目相结合成为最普遍和最具成本效益的选择。美国各州政府公共事业投资将在长期资源规划中引入储能技术,并将其作为解决电力系统灵活性问题的

方案。

加利福尼亚州依然保持政府公共事业的锂离子电池投资规模,其丰富的太阳能资源成为满足晚高峰用能需要的主要来源。得克萨斯州丰富的风能资源和扩建的太阳能资源成为电池储能的巨大市场。

2021 年底,美国锂离子电池生产能力达到了 59 GWh,预计到 2022 年底,美国电池制造业将达到近 98 GWh。特斯拉、SK、GM、LG 等企业和合作伙伴用于电动汽车行业的电池需求将主导锂离子电池产能的增长。

2.4 氢能建设

氢能是一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源,正逐步成为全球能源转型发展的重要载体之一。按照制取过程中的碳排放强度,氢能被分为灰氢、蓝氢和绿氢。氢能可以通过氢燃料电池或燃气轮机转化为电能和热能^[23-24]。

美国已经宣布其氢兼容涡轮机装机总量超过 8 GW,州一级的清洁能源目标是主要的推动力,10 个计划项目中有 9 个将在已颁布清洁能源法令的州进行实施,其中,2/3 的项目确定了氢-天然气混合使用的目标,1/2 的地区希望在 2045 年之前 100% 使用氢气。2021 年,美国氢气产量为 1500 万~1600 万 t,其中 65% 产自专门的氢工厂。绝大多数是产自天然气的“灰氢”。已经看到有越来越多清洁能源的氢源供应,Air Products 在路易斯安那州建立最大的“蓝氢”设施,并将 CO₂ 进行捕捉和封存。据美国能源部估计,截止到 2021 年 6 月,已装机超过 120 MW 的电解槽,计划在 2022 年安装 262~336 GW 的“绿氢”生产电解槽。到 2030 年,西方制造的碱性电解槽系统的价格将与中国制造的碱性电解槽价格趋同,比 2021 年下降 90%。聚合物电解质膜电解(PEM)系统的成本也将缓慢下降。

2.5 地热利用

地热资源的利用主要包括直接利用地热供暖和利用地热发电站进行发电。通常 150℃ 以下的地热资源直接利用,150℃ 以上的地热资源进行地热发电。世界上可以直接利用装机容量的国家为中国、美国、瑞士、德国、土耳其、日本。2020 年,全球

地热可直接利用装机容量(折合)为 108 GW, 比 2015 年增长 52%。北半球以北欧、北美和亚洲北部为主要利用地区, 地热供暖占地热直接利用量的 58.8%。国际能源署预测, 全球地热直接利用装机总量将在 2035 年和 2040 年分别达到 500 GW 和 650 GW。2020 年全球地热发电装机容量达到 14 GW, 比 2010 年增加 40.8%, 2019 年全球 27 个国家地热发电量为 880 亿 kW·h, 其中印度尼西亚是仅次于美国的世界第 2 大地热发电国, 地热发电量为 140 亿 kW·h, 占印度尼西亚全国发电总量的 5%, 肯尼亚地热发电量位居世界第 8 位, 发电量可以达到 50 亿 kW·h, 但其地热发电量占全国发电总量的 46%, 地热发电份额占比居世界第 1^[25-26]。

2021 年, 美国在 7 个州中建设地热发电站, 共计发电量为 160 亿 kW·h, 占美国总发电量的 0.4%, 其中加利福尼亚州地热发电占美国地热发电总量的 70.5%, 占本州发电总量的 5.8%(表 1)。美国加利福尼亚州盖瑟尔斯地热发电综合站是世界上最大的地热发电联合体, 2021 年, 其装机容量达 900 MW, 包含 22 个电站, 蜿蜒几千米, 覆盖面积可以达到 100 km²。

表 1 美国地热发电站分布及发电情况

州名	地热发电占美国地热发电量的比重/%	地热发电占本州发电总量的比重/%
加利福尼亚州	70.5	5.8
内华达州	24.2	9.4
犹他州	2.2	0.8
俄勒冈州	1.3	2.2
夏威夷州	1.0	0.3
爱达荷州	0.5	0.5
新墨西哥州	0.3	0.1

3 美国能源可持续发展保障措施

3.1 政策与法规

1) 美国政府碳减排的政策约束。美国拜登政府重返《巴黎气候协定》并承诺到 2025 年, 在 2005 年的基础上减排 25%, 到 2030 年将美国的排放量减少 50%~52%^[27]。政府宣称电力部门在 2035 年实现无碳化, 当前美国 39% 的电力来自无碳能源。

2005 年以来, 美国电力部门已减少 35% 的排放量。这主要得益于天然气取代了煤炭发电。为实现减排目标, 电力部门将需实现对化石燃料进一步脱碳。目前, 电力部门是美国拜登政府唯一制定了明确减排目标的行业。然而, 所有其他部门的目标可以通过从整个经济的排放中减去电力部门的排放来得出。按照这种计算, 到 2030 年, 美国必须在目前的水平上削减 32%~35% 的温室气体排放。然而, 自 2005 年以来, 非电力排放仅下降了 5%, 这需要采取更有力的措施来实现工业和交通等部门的脱碳。

2) 美国各州的能源准则约束。新建筑和翻新建筑最低能效标准遵循《建筑物能源效益守则》(《Building Energy Codes》)^[28], 新建筑协会(New Buildings Institute)引入零能耗性能指数(zero energy performance index, zEPI)^[29]。27 个州实施能效资源标准(energy efficiency resource standards, EERS)^[30]。住宅和商业建筑遵循《标准国际节能守则》(《International Energy Conservation Code》, IECC)^[31], IECC 规定的商业建筑替代标准遵循《美国采暖、制冷和空调工程师协会标准 90.1》(《ASHRAE Standard 90.1》)^[32]。

《建筑物能源效益守则》在州一级强制执行, 一些州、地方政府制定更严格的要求, 如亚利桑那州的 2 个最大的城市, 凤凰城和图森已经采用了 2018 年的 IECC。美国能源部分析结果显示, 2021 年 IECC 比 2018 年版的能效提高 9.4%。2019 年 10 月发布的最新版 90.1 比 2016 版节能 5%, 比 2013 版节能 12%。

3.2 财政与投资

1) 清洁能源投资与税收减免。美国拜登政府推动能源转型议程获得通过, 签署《基础设施投资与就业》法案, 为新能源技术投资 800 亿美元, 其中 370 亿美元用于支持建设和发展电网基础设施和核能, 近 200 亿美元用于开发碳捕获利用与封存(CCUS)和氢气等深度脱碳技术^[33]。与此同时, 作为《重建更好未来》法案一部分的清洁能源和能源税收方案, 将支持一整套经济上可行的清洁能源技术^[34](图 11)。

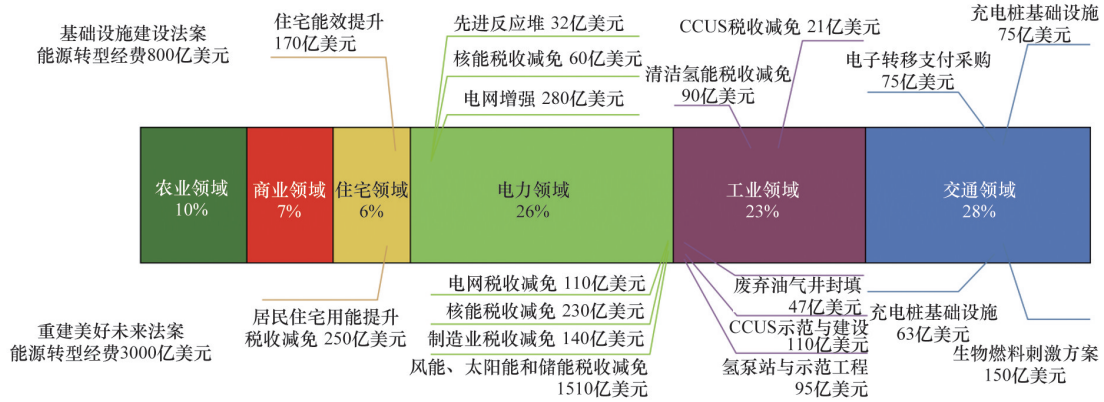


图 11 美国能源领域投资及新能源减税计划表

投资税减免(ITC)和生产税减免(PTC)政策对可再生能源项目进行税收减免,这将激励部分地区向可再生能源经济倾斜。对太阳能投资税减免在不同地区之间是相对均衡,而对风能地区间影响较大。投资税减免和生产税减免将在未来几年逐步减少,美国国会目前正在讨论继续延长税收减免政策^[33]。

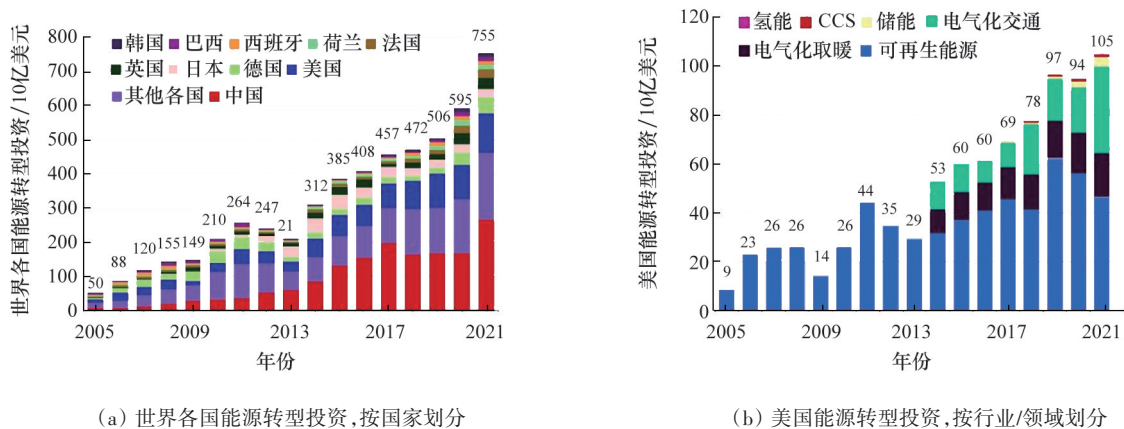
2) 美国能源投资转型。2021年,全球能源转型过程中,与脱碳技术发展趋势相关的投资增至7550亿美元,取得有史以来最大年度增幅,比2020年增长27%,世界各国对能源转型更加乐观^[35-38]。

美国约占投资总额的1/7,为1050亿美元,比2020年增长11%,5年间增幅达70%(图12^[9])。可再生能源在能源转型投资中占比最大,约占45%;

电气化交通领域投资紧随其后,为350亿美元,约占34%,交通方面的资本支出几乎翻一番,主要是由于电动汽车销售额达到330亿美元。美国目前每年在氢燃料领域的投资约为2亿美元,是2020年1亿美元的2倍,其中绝大多数与燃料电池汽车的有关。

3.3 经济与市场

1) 天然气产业及市场。2021年,美国天然气总需求增长9.4%,较2020年有所反弹。由于天然气价格同比上涨,导致更多燃煤电厂上线,天然气发电需求下降3.3%。受欧洲天然气减产和亚洲天然气发电需求激增的推动,液化天然气(LNG)出口大幅增长64%。天然气在工业、住宅和商业供暖的需求均出现增长,其中住宅用气增长实现2006年



(a) 世界各国能源转型投资,按国家划分

(b) 美国能源转型投资,按行业/领域划分

图 12 世界各国能源转型投资及美国能源转型投资(2005—2021年)

以来最大,达4.7%。可再生天然气将用于政府公共事业投资以减少碳排放,预计到2040年,可再生天然气在现有天然气使用量中占比达20%左右,投资总额达30亿美元。

2) 交通领域及市场。2021年,美国石油需求逐渐回升,汽车用油恢复速度远快于航空燃油等其他产品,目前仍比2019年前的水平低10%~20%。汽油批发价格平均比2020年上涨75%,比2019年上涨21%。原油价格的上涨,对汽油需求的增加,以及汽油库存的减少,都推动了汽油价格的上涨。

10多年来,电力来源广、成本低,一直是美国最具竞争力的运输燃料,价格一直远低于汽油。2021年,美国的汽油价格一度飙升至0.73美元/升。电力和汽油成本不断扩大。越来越低的电力成本使得拥有纯电动汽车的总成本不断降低而变得更有吸引力。2021年底,美国众议院投票表决通过拜登政府的1.75万亿美元经济计划《重建更好未来》法案(《Build Back Better Bill》),通过清洁能源税收抵免用于应对气候变化,将形成有史以来最大的联邦清洁能源投资。2021年,美国电动汽车销量65.7万辆,占美国汽车总销量7%,特斯拉电动汽车占总美国总电动汽车销量的63%。电动汽车中以动力电池汽车占比近81%,插电式混合动力汽车占比为19%,燃料电池汽车占比不足1%。

3) 车辆燃油经济性标准。运输行业是美国温室气体排放的最大来源。美国要实现2030年全国自主减排目标,电动汽车必须至少占到上路车辆的30%。相比之下,2021年电动汽车仅占美国乘用车总销量的4.4%。2021年,美国人购买了65.7万辆电动汽车,比2020的32.5万辆销量翻一番,特斯拉以50%的占比继续占据电动汽车销量的最大份额。电动汽车整体市场增长34%,非特斯拉生产的电动汽车市场增长83%。美国联邦机构已经起草了燃油经济性标准的修订草案,正在进行最后定稿。运输部修订公司平均燃油经济性(CAFE)标准,对汽车制造商进一步施压,要求其提高汽车燃油效率。这将迫使许多汽车公司更多转向增加电动汽车销量。

4 可持续能源利用的发展趋势

在应对全球气候变化、控制温室气体排放的共同努力下,美国能源可持续利用现状为世界各国进行能源战略转型提供重要借鉴,同时也显示能源可持续利用的主导方向、技术前景和合作领域。

4.1 能源转型的主导方向

人类进入工业化以来地球面临的重大环境挑战已经成为全球共识,人类利用能源的方式将发生重大转变,全球能源转型进程将明显加快^[39-42]。能源利用的可持续性将成为世界各国能源战略中的共同选择。以“能源利用过程的清洁化、能源利用类型的低碳化、能源获取方式的再生化”为主导的能源转型方向将成为实现能源利用可持续性的发展趋势。水电、风电、光伏发电等可再生能源的供给性、经济性和规模性将持续提高。过去5年间,全世界新增发电装机容量中可再生能源约占70%,全球新增发电量中可再生能源发电约占60%,预计到2050年,可再生能源发电量将占全球总发电消费量的80%,世界各国将履行应对气候变化的自主贡献力度,推动可持续能源成为全球能源转型的主导方向^[43-44]。

4.2 能源技术创新的竞争阵地

全球能源转型与其说是能源利用方式的转型,不如更进一步表述为能源利用技术的转型,其中由能源利用技术所推动的能源结构和能源管理等能源体系中的主体要素发生一系列技术升级和换代,将推动全球可持续能源技术创新成为关键技术进步和竞争的阵地。能源消费的电气化是能源消费结构发展的趋势^[42-43]。以大型风电、太阳能发电和储能技术为能源科技创新前沿的关键核心技术研发、大型装备制造和推广应用建设成为当前和今后相当长时间内的科技创新阵地,以此为目标形成的系统化管控、智能化支撑以及稳定性保障为依托的配套系统将体现能源利用技术转型的关键核心能力。数字化技术、智能化技术与新能源技术有效融合,建设数字化、智能化的能源系统,创新能源生产和消费的新模式,以清洁、无碳、智能、高效为核心

的可持续能源是世界能源转型的发展方向^[42]。

4.3 能源合作的重要领域

2020年,联合国可持续发展高级别论坛发布政策建议报告,呼吁各国将推动清洁能源发展和电力互联互通纳入经济复苏计划,在联合国层面建立全球能源互联网工作机制,以清洁和绿色方式满足全球电力需求^[45]。虽然国际能源转型的趋势共识基本达成,但是国际能源转型的进程并不顺畅,需要世界各国积极参与国际组织及国家间的可持续能源合作。世界各国自然地理条件、技术创新水平、资金支持能力、政策措施法规等均存在巨大差异。欧盟以发展清洁能源、可再生能源为主,已经处于后化石能源发展阶段,大型核电设施、大容量漂浮式海上风机、新能源汽车等成为其主要发展领域;非洲地区的电力普及率仅为52%,超过50%非洲国家电力普及率不及50%,超过6亿人日常生活仍用不上电^[45],充分利用非洲各种自然资源,推动区域内和区域外能源开发合作,克服自身建设能力不足、技术水平落后、资金投入欠缺等困难,实现其经济社会发展是主要合作方向。当前可再生能源的发展在一些国家的推动不顺利,可持续能源利用的国际交往和合作平台不完善,可持续能源利用的技术体系和互认标准不健全,全球可持续能源利用的重要领域合作基础众多而广泛。

5 对中国能源转型发展的启示

5.1 能源结构的共性与差异

应该清醒地看到,美国当前的能源结构与中国当前的能源结构有相似性,但同时存在明显不同。以石油、天然气、煤炭为主的化石能源仍是美国能源结构的主体,美国资源禀赋大大优于中国,依靠天然气(尤其是页岩气)和致密油为代表的非常规油气革命推使美国能源结构摆脱进口,并实现能源独立,当前的能源结构支撑美国能源效率不断提升。中国是世界上最大的煤炭生产国,最大的原油和天然气进口国,2020年中国原煤产量39亿t,煤炭消费占比为56.8%,原油对外依存度为73.5%,天然气对外依存度为43.5%。中国相对富煤、贫油、

少气的资源禀赋,以及相对较低的成本优势,以煤炭为主体的化石能源将在相当长时期内仍将保障国家能源供给,支撑国家能源高质量发展和可持续转型。中美两国处在相似的能源结构中,并在能源转型中将共同面对相似且不同的挑战。

5.2 能源转型的科技支撑

研究显示,美国已经将重要科技力量用于支撑可持续能源的发展,其科技支撑体现在海上风电、抽水蓄能、太阳能发电、电池储能及氢能等领域。美国政府同时加快制定相关领域的科技攻关、税收减免等措施。中国的能源转型也包括在可持续能源领域的大规模投资,中国在化石能源领域的科技支撑将进入关键攻坚阶段,并将面临煤炭清洁高效利用等领域的重大科技攻关无人区,而美国等发达国家并不会在这些领域进行大量投入,中国将在这些科技领域面临无人可学、独立攻关,大量放弃煤炭等化石能源的使用不能适应当前中国能源发展的基本国情。

5.3 能源转型的战略构思

应从战略角度深入考量能源转型的长期性、艰巨性和反复性,在纷繁复杂的能源领域要保持持续的战略定力,确保能源供给和能源安全,在深入推进和保障国家碳中和、碳达峰目标实现的过程中正视能源转型过程中面临的困难。更多聚焦国家能源转型的战略导向,充分认识中国以煤为主的资源特点,深入加强中国能源绿色低碳化转型的基础性、原创性、颠覆性技术的研究,推动中国能源绿色低碳安全转型。

6 结论

1) 美国能源总量逐渐恢复,能源效率不断提升。石油、天然气、煤炭仍是美国一次能源消费的主体能源;可再生能源与核能发电量总和已经超过天然气发电量;海上风电、抽水蓄能、太阳能发电、电池储能、氢能及地热能成为美国可持续能源利用的主要组成;美国能源结构已使美国温室气体排放总量达峰后持续走低,并下降至2000年以前水平;美国能源可持续利用水平的提升得益于一系列政

策法规、财政投资,以及经济市场等多方面措施的保障。

2) “能源利用过程的清洁化、能源利用类型的低碳化、能源获取方式的可再生化”为主导的能源转型方向将成为实现能源利用可持续发展趋势。全球可持续能源技术创新成为关键技术进步和竞争的阵地,国际能源转型过程中出现的多种困境显示,全球可持续能源利用的重要领域合作基础众多而广泛。

3) 美国与中国能源结构和能源转型中面临的形势与挑战相似,也有不同。中国能源转型将面临重要的技术无人区,应从战略角度充分认识能源转型的长期性、复杂性和艰巨性,深入加强中国能源绿色低碳化转型的基础性、原创性、颠覆性技术的研究,推动中国能源绿色低碳安全转型。

参考文献(References)

- [1] 习近平在博鳌亚洲论坛2022年年会开幕式上的主旨演讲[EB/OL]. [2022-07-08]. http://m.news.cn/2022-05/10/c_1128638033.htm.
- [2] BP Global. Statistical review of world energy 2022[EB/OL]. [2022-07-08]. <https://www.bp.com>.
- [3] 清华大学气候变化与可持续发展研究院. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究[EB/OL]. [2020-10-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/-pCdHrObCBwTrSlzCJsxgQ>.
- [4] 魏一鸣, 韩融, 余碧莹, 等. 全球能源系统转型趋势与低碳转型路径—来自于IPCC第六次评估报告的证据[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 163-188.
- [5] Richard Nixon. Address to the nation about national energy policy[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://www.presidency.ucsb.edu/documents/address-the-nation-about-national-energy-policy>.
- [6] 黄维和, 韩景宽, 王玉生, 等. 中国能源安全战略与对策探讨[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 112-117.
- [7] U.S. Department of Energy (DOE). America's strategy to secure the supply chain for a robust clean energy transition[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://www.energy.gov/policy/articles/americas-strategy-secure-supply-chain-robust-clean-energy-transition>.
- [8] U.S. Energy Information Administration (EIA). U.S. energy consumption by source and sector, 2021[EB/OL]. [2022-05-26]. [https://www.eia.gov/energyexplained/us-en-](https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/images/consumption-by-source-and-sector)
- [9] Bloomberg NEF. 2022 Sustainable energy in America factbook[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://bce.org/factbook>.
- [10] Saboori B, Maimunah S, Maizan B. Economic growth, energy consumption and CO₂ emissions in OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)'s transport sector: A fully modified bi-directional relationship approach[J]. Energy, 2014, 66: 150-161.
- [11] Peng Z M, Wu Q Q. Evaluation of the relationship between energy consumption, economic growth, and CO₂ emissions in China's transport sector: The FMOLS and VECM approaches[J]. Environment, Development and Sustainability, 2019, 22: 6537-6561.
- [12] 马彩虹, 任志远, 赵先贵. 发达国家与发展中国家碳排放比较及对中国的启示[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 1-5.
- [13] 张进鹏. 中美经济增长与碳排放演化规律及驱动因素比较分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [14] 刘骊光. 美国电力行业碳排放强度与总量目标的确定及启示[J]. 中外能源, 2017, 22(5): 1-7.
- [15] The White House. President Obama to announce historic carbon pollution standards for power plants[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/08/03/fact-sheet-president-obama-announce-historic-carbon-pollution-standards>.
- [16] The White House. Biden administration advances the future of sustainable fuels in American aviation[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/09/09/fact-sheet-biden-administration-advances-the-future-of-sustainable-fuels-in-american-aviation>.
- [17] U.S. Energy Information Administration (EIA). Annual energy outlook(AEO)[R/OL]. [2022-05-26]. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo>.
- [18] The White House. Biden administration launches new federal-state offshore wind partnership to grow American-made clean energy[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/06/23/fact-sheet-biden-administration-launches-new-federal-state-offshore-wind-partnership-to-grow-american-made-clean-energy>.
- [19] U.S. Department of Energy (DOE). Offshore wind research and development[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://www.energy.gov/eere/wind/offshore-wind-research-and-development>.
- [20] U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy

- Management. Renewable energy on the outer continental shelf[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://www.boem.gov/renewable-energy/renewable-energy-program-overview>.
- [21] U.S. Department of Energy (DOE). 2021 edition of the hydropower market report[R/OL]. [2022-05-26]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/us-hydro-power-market-report-full-2021>.
- [22] Solar Energy Industries Association. May 2021 report from Lawrence Berkeley National Lab[R/OL]. [2022-05-26]. https://www.seia.org/sites/default/files/2022-01/SEIA_Solar%2B_Decade_Roadmap_2021_Compressed.
- [23] 张智, 赵苑瑾, 蔡楠. 中国氢能产业技术发展现状及未来展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 156-165.
- [24] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状及未来展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(6): 1-12.
- [25] John W L, Aniko N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review[J]. Geothermics, 2020, doi: 101915.
- [26] 任永飞, 潘翠, 王海波, 等. 中美地热资源开发利用现状对比[C]//2011 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 北京: 中国环境科学出版, 2011: 638-642.
- [27] Presidential Documents Executive Order. Tackling the climate crisis at home and abroad[R/OL]. [2022-05-26]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021/02/f83/eo-14008-tackling-climate-crisis-home-abroad>.
- [28] U.S. Department of Energy(DOE). Building energy codes program[R/OL]. [2022-05-26]. https://www.enerycodes.gov/sites/default/files/2021-07/BenefitsReport_Final_March20142.
- [29] New Buildings Institute. Zero Energy Performance Index (zEPI) [EB/OL]. [2022-05-26]. <https://newbuildings.org/resource/zero-energy-performance-index-zepi>.
- [30] The American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE). Energy efficiency resource standards[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://www.aceee.org/topic/eers>.
- [31] Energy-Efficient Codes Coalition. International energy conservation code[EB/OL]. [2022-05-26]. <https://energyefficientcodes.org/iecc>.
- [32] American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE). ANSI/ASHRAE/IES standard 90.1-2019-nergy standard for buildings except low-rise residential buildings[R/OL]. [2022-05-26]. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1>.
- [33] BloombergNEF. energy transition investment trends 2022 [R/OL]. [2022-03-26]. <https://about.bnef.com/energy-transition-investment/>.
- [34] The White House. The build back better framework[EB/OL]. [2022-03-26]. <https://www.whitehouse.gov/build-back-better>.
- [35] U.S. Energy Information Administration (EIA). Construction cost data for electric generators installed in 2019[R/OL]. [2022-03-26]. <https://www.eia.gov/electricity/generatorcosts>.
- [36] International Energy Agency (IEA). 2021 World Energy Outlook (WEO) [R/OL]. [2022-03-26]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- [37] International Energy Agency(IEA). Renewables 2021[R/OL]. [2022-03-26]. <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>.
- [38] International Energy Agency(IEA). Global energy review 2021[R/OL]. [2022-03-26]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>.
- [39] 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88-97.
- [40] IPCC sixth assessment report climate change 2022: Mitigation of climate change[R/OL]. [2022-03-26]. https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.
- [41] International Energy Agency(IEA). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector[R/OL]. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/c8328405-en>.
- [42] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.
- [43] 国家发展改革委. 关于印发“十四五”可再生能源发展规划的通知[R/OL]. [2022-03-26]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html?code=&state=123.
- [44] 高慧, 杨艳, 焦姣, 等. 世界可再生能源发展态势[J]. 石油科技论坛, 2018, 37(4): 62-67.
- [45] 中国积极推动可再生能源国际合作[EB/OL]. [2022-03-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-07/25/content_5529937.htm.

Development status and trend of sustainable energy utilization in the United States and the enlightenment to China

HU Jian¹, WU Sheng², DENG Xili³, SUN Haitao⁴, CUI Jingwei³, ZHAO Luzheng⁵

1. Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China
2. Power Environmental Energy Research Institute, California 91722, the United States
3. Petrochina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China
4. Chongqing Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corporation, Chongqing 400037, China
5. China Coal Technology & Engineering Group Corporation Coal Industry Planning Institute, Beijing 100120, China

Abstract The world's energy utilization has entered a new sustainable pathway which is "clean, low-carbon and renewable". The United States tries to take the lead in developing a sustainable energy structure in order to ensure its global leadership in clean energy manufacturing and technological innovation, and ensure and achieve its national energy security and stable supply. Researches show that the total energy consumption in the US is gradually returning to pre-pandemic level and the energy efficiency is improving gradually. The transformation of the energy structure has caused the US greenhouse gas emissions to peak and continue to decline to pre-2000 levels. The carbon emissions of the power industry and the transportation industry have dropped dramatically, even with some up-going. The cost of sustainable energy generation in the United States is lower than that of other countries in the world. The improvement of the sustainable energy utilization level in the United States is guaranteed by a series of policies, regulations, financial investments and economic market measures. The U.S. government's carbon reduction initiatives and state energy efficiency guidelines guarantee the improvements in energy efficiency. The government promotes the energy transition, the investment in clean energy, and the clean energy and energy tax credits. The sustainable energy market will flourish through increased investment in natural gas, the electrification of the transportation sector and the revision of vehicle fuel economy standards. Sustainable utilization status of the United States energy shows the energy transformation direction led by "the cleanness of the energy utilization process, the low-carbon property of the utilized energy types, and the renewability of energy access way" will become the energy sustainable development trend, and the global sustainable energy technology innovation will become the position of key technology development and competition. Various difficulties in the process of international energy transition show that the bases for global cooperation in the areas of sustainable energy are numerous and extensive. The United States and China face similar situations and challenges in the energy structure and energy transition, but there are also differences. China's energy transformation will face an important technological no-man's land. We should fully understand the long-term nature, complexity and arduousness of the energy transformation from a strategic perspective, deeply strengthen the research on the basic, original and disruptive technologies of China's energy green and low carbon transformation, and promote China's energy green and low carbon safe transformation.

Keywords energy; fossil energy; renewable energy; energy strategy ●



(责任编辑 祝叶华)