

全球可再生能源发电减排技术及投资减排成效评估分析

张士宁¹, 马志远¹, 杨方^{1*}, 刘昌义¹, 谭新¹, 侯方心¹, 张骞^{2,3}

(1. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031; 2. 维多利亚大学土木工程系, 加拿大 维多利亚 V8P 5C2;
3. 维多利亚大学综合能源系统所, 加拿大 维多利亚 V8P 5C2)

Assessment of Carbon Emission Reduction and Costs of Global Renewable Energy Investment

ZHANG Shining¹, MA Zhiyuan¹, YANG Fang^{1*}, LIU Changyi¹, TAN Xin¹, HOU Fangxin¹, ZHANG Qian^{2,3}

(1. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;
2. Department of Civil Engineering, University of Victoria, Victoria, BC V8P 5C2, Canada;
3. Institute for Integrated Energy Systems, University of Victoria, Victoria, BC V8P 5C2, Canada)

Abstract: To achieve the goals of the Paris Agreement, the power sector faces enormous pressures and challenges for reducing greenhouse gas. This study first proposes the overall framework of mitigation technologies in the power sector and then the global renewable development in the emission reduction pathway is analyzed. Furthermore, the carbon emission reduction from renewable energy investment is evaluated using the global dataset between 2010 and 2018. Investment gaps in renewables to meet the Paris Agreement 2 degree target are also investigated in Global Energy Interconnection Scenario. The results show that there is a certain fluctuation in the global renewable energy development, and the emissions reduced by investment per unit in hydropower are significantly higher than other renewable sources. Global cumulative investment in renewable energy needs to reach 19.3 trillion US dollars to meet the Paris Agreement and the investment growth rate need to double considering current figures.

Keywords: climate change; power sector; mitigation technology; renewable energy; emission reduction assessment

摘要: 实现《巴黎协定》目标, 电力部门面临巨大的减排压力和挑战。首先梳理提出电力部门减排技术总体框架; 其次, 分析全球及重点国家可再生能源发电减排路径, 并提出可再生能源投资减排成效评估方法, 分析全球及重点区域或国家2010—2018年间可再生能源投资减排成效; 最后量化分析全球能源互联网情景下满足《巴黎协定》2℃温控目标的可再生能源投资需求。研究发现, 全球可再生能源发展速度

出现一定波动; 水电单位投资减排成效显著高于其他可再生能源; 为实现《巴黎协定》2℃温控目标, 全球可再生能源累积投资需要达到19.3万亿美元, 投资增速相比当前至少需要翻一番。

关键词: 气候变化; 电力部门; 减排技术; 可再生能源; 减排成效评估

0 引言

为应对全球气候变暖, 以电能替代与电气化快速发展驱动的能源转型战略已日益成为国际共识^[1-4]。根据主流国际机构能源情景展望结果, 电能占终端能源消费比重预计从当前的20%增长至2050年的50%左右^[5]。其中, 国际可再生能源署(International Renewable Energy Agency, IRENA)能源转型路线图预计2050年电能占终端能源消费比重达到49%^[6], DNV GL能源转型展望结果将达到46%^[7], 而满足《巴黎协定》1.5℃温控目标的低能源需求情景(LED)需要到60%^[8], 以全球互联互通促进清洁能源规模化开发的全球能源互联网能源情景结果预计达到50%^[9]。在2018年能源需求增长驱动下, 全球与能源有关的CO₂排放量增长1.7%, 达到331亿t CO₂, 成为历史新高。电力生产部门(电力部门)碳排放占能源相关排放总量的38%, 电力部门排放量增量占能源相关排放总增量的近三分之二^[10]。文献[11]提出4种用于减少化石能源燃烧排放的主要路径, 包括降低能源需求、能源服务电气化、电力部门脱碳以及终端非电燃料脱

基金项目: 全球能源互联网集团有限公司科技项目(101662227)。

Science and Technology Foundation of GEIGC(101662227).

碳。伴随经济社会发展及应对气候变化迫切要求，电能消费将持续呈现快速增长趋势，因此电力部门减排面临严峻挑战。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）研究报告表明，实现《巴黎协定》2℃及1.5℃温控目标，本世纪中叶需要电力部门率先完全脱碳，实现净零排放^[12]。

2018年全球电力生产达到26.6万亿kWh，其中化石能源发电高达64%以上^[5]。针对电力部门减排，许多研究机构和学者进行了减排技术潜力和成本量化分析。一次能源中煤炭60%以上用于电力生产，因此以清洁能源发电代替高排放煤电是促进电力部门减排的有效手段，根据能源系统投资成本最优得到的全球能源互联网情景下的清洁发电占比可达到80%以上^[9]；随着可再生能源发电成本持续降低，IRENA预计2050年可再生能源将供应86%的电力生产^[6]。化石能源发电碳捕集及封存（CCS）也是一种低碳供应的可行路径，但由于其较低捕集率及较高成本，IPCC研究报告表明1.5℃路径中化石能源CCS使用有限^[12]。考虑到1.5℃路径深度减排需要负排放技术，生物质发电碳捕集及封存（BECCS）将在电力部门实现净零排放中发挥重要作用^[12]。特高压及智能电网应用可促进清洁能源大规模发展，并降低输电损耗、提高输电效率，对电力部门减排具有支撑作用^[1]。减排成本方面，文献[13]对中国低碳电力技术减排潜力及减排成本进行分析，研究发现风电CO₂减排成本在200~300元/t，光伏发电CO₂减排成本在400~550元/t，水电CO₂减排成本最低，介于-53~-6元/t。文献[14]对化石燃料及可再生能源减排成本进行了比较，研究表明水电、核电及风电由于其低成本和低排放量，是应优先发展的重要减排技术，其中水电减排成本最低。文献[15]对比分析了发达国家及发展中国家化石能源发电及可再生能源发电减排成本，研究表明大部分可再生能源发电减排成本高于燃气轮机联合循环（CCGT）减排技术。文献[16]研究了美国增加25%可再生能源的经济成本，可再生能源替代煤电的CO₂减排成本可低至23美元/t。

以往可再生能源减排技术经济性分析均采用与化石能源发电成本进行对比^[14-16]，量化替代煤电或气电的碳减排额外成本，衡量减排技术是否具有经济竞争力。但此方法无法评估可再生能源的投资减排量或减排目标下所需可再生能源投资。同时，以往研究缺少对全球及重点区域或国家可再生能源投资减排的系统评

估。为此，本文首先总结电力部门减排整体框架，在此基础上分析全球及重点国家可再生能源发电减排路径；其次提出可再生能源减排成本评估方法，量化分析全球及重点区域或国家最新可再生能源单位投资减排成效，分析减排成本的地域分布特点；最后计算满足《巴黎协定》2℃温控目标的可再生能源投资需求量。

1 电力部门减排技术框架

1.1 减排框架

图1为电力部门减排技术总体框架图。电力部门排放核心指标包含发电量及度电排放因子，因此减排策略可分为两个方面：一是在满足同等用电需求情况下，通过降低输电损耗，实现节能减排；二是通过优化电源结构及提升发电效率推动度电排放水平下降。图1中4类技术组合可促进电力部门减排：一是通过大力发展清洁能源、在火电中增加气电比重来优化电源结构，降低度电排放水平；二是通过发展特高压及智能电网技术，推动大范围电力互联互通，推动清洁能源规模化发展，同时高压输电技术可以降低输电损耗，促进节能减排；三是采用高效清洁燃煤发电技术提升发电效率；四是化石能源发电和生物质发电过程中通过碳捕集及封存降低度电排放水平。

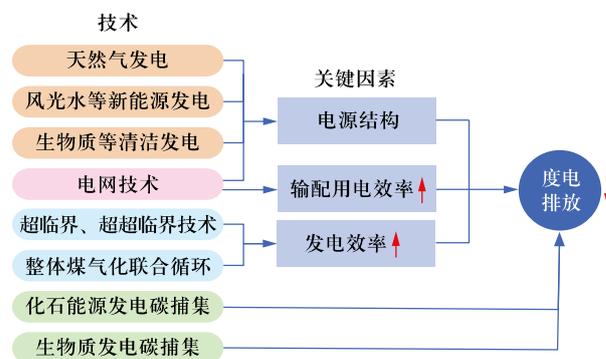


图1 电力部门减排总体框架图

Fig. 1 Framework of emission reduction in power sector

1.2 减排技术

1.2.1 清洁能源发电技术

可再生能源发电技术主要包括水电、风电、太阳能发电、生物质发电、海洋能发电和地热发电等。本文忽略可再生能源发电技术全生命周期内设备原材料、加工生产、运输及发电设备建造等环节的间接排放，因此可再生能源发电作为零碳电源，通过替

代煤电等高排放化石能源发电,降低电力生产过程中的度电排放。2018年全球可再生能源发电量达到6.8万亿kWh,占全球总发电量的25.6%,较2010年提高5.3个百分点^[17]。可再生能源已成为全球新增装机主力电源,2018年新增装机171 GW,占总新增装机中比重达到62%^[18]。可再生能源发电成本大幅下降,已与化石能源发电成本相当。2018年全球陆上风电、光伏平均度电成本分别下降至0.056美元/kWh、0.085美元/kWh,相比2010年成本分别下降34%、77%。水电、陆上风电、生物质发电、地热发电平均度电成本已触及最低化石能源发电成本^[19],伴随技术进步和规模经济效应,可再生能源成本相比化石能源将更具竞争力。

除可再生能源发电外,在火电中提高天然气发电比例同样可以降低度电排放水平。中国、印度等国家火电以煤电为主,煤电在火电结构中占比均超过93%,因此火电度电排放水平较高,CO₂排放分别达到0.87、0.89 kg/kWh,明显高于全球平均水平(0.79 kg/kWh)。相比之下,俄罗斯和中东地区天然气发电占比达到70%,火电度电排放水平较低。全球可再生能源发电和天然气发电持续优化电源结构,2018年电力生产度电CO₂排放水平降至0.476 kg/kWh。

1.2.2 电网技术

互联互通技术是指以特高压和智能电网为支撑,推动清洁能源大范围、大规模优化配置和开发利用的输电技术。特高压交流的输电线路年平均线损率小于2%^[20],背靠背直流系统的年平均电量损耗在1.5%左右^[21],因此特高压输电技术在输电能力显著提升同时,通过降低输电损耗,实现节能减排。研究表明,1000 kV特高压交流输变电工程较500 kV输变电工程每年节约电能2.8亿kWh,年碳减排量为25万t^[22]。截至2019年底,中国特高压建成“十一交十四直”、核准在建“三交三直”工程。智能电网依托数字化、网络化、智能化,可大幅提高清洁能源消纳能力,增强电力系统的灵活性和稳定性,充分挖掘用能侧电动汽车、储能等设备调节潜能,支撑终端冷、热、电、天然气等多能互补综合能源服务,通过信息和通信深度融合,实现源-网-荷-储协同发展,促进能源结构调整和优化,提高能源利用效率和电网运行效率,推动节能减排。

1.2.3 高效清洁燃煤技术

高效清洁燃煤技术主要包括超临界(supercritical, SC)、超超临界(ultra-supercritical, USC)、整体煤

气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)技术等。这些发电技术可以通过锅炉改造或循环利用提高火力发电的能源转换效率,减少发电煤耗,进而减少度电排放。2018年全球燃煤发电量为10.1万亿kWh,占全球总发电量的38%,较2010年下降2个百分点。从装机看,2017年全球煤电装机为2088 GW,其中采用SC、USC技术的煤电装机占比分别为19%和13%,较2010年分别增加3个和8个百分点^[23]。从成本看,2015年SC、USC、IGCC这3项高效清洁燃煤技术的度电成本为0.055~0.060美元/kWh,高于次临界发电技术成本^[24]。从度电排放看,2015年SC、USC、IGCC的度电排放CO₂分别约为0.8 kg/kWh、0.73 kg/kWh和0.64 kg/kWh,低于次临界发电(约为0.88 kg/kWh)^[25]。从投资看,2018年全球燃煤发电厂最终决策投资(final investment decision, FID)为22 GW,同比下降30%,大多数最终决策投资针对高效煤电厂,低效的次临界煤电厂仅占10%。其中,印度是最大的煤电投资市场,SC技术是最主要的高效清洁技术^[26]。

1.2.4 CCS技术

CCS技术指将化石能源发电和生物质发电过程中排放的CO₂收集,并用各种方法储存以避免其排放到大气中的一种技术。通过CCS实现降低电力部门度电排放,其中BECCS技术是目前主流的负排放技术,在电力部门深度减排中将发挥不可或缺的作用^[12]。截至2020年初,全球规模化运行的CCS项目仅有2个,其中加拿大的Boundary Dam碳捕集及封存能力为1 Mt/a,2014年开始运行;美国的Petra Nova碳捕集及封存能力为1.4 Mt/a。目前电力生产CCS技术成本非常高,Boundary Dam的碳捕集成本高达100美元/t, Petra Nova的碳捕集成本为65美元/t^[27]。虽然成本有一定程度下降,但仍远高于可再生能源发电的减排成本,CCS进入大规模应用阶段仍需进一步降低成本。全球CCS研究所乐观估计2024—2028年计划运行的碳捕集成本为43美元/t,中试规模的新技术有望下降至33美元/t^[27]。生物质发电碳捕集需充分考虑燃料问题,能源作物种植需要最大限度降低对粮食生产造成的威胁,同时种植大量能源作物需要大量的水资源和肥料,这些都是生物质发电及碳捕集需要考虑和解决的问题。

本文仅对可再生能源减排技术进行讨论,重点分析其减排路径、减排成效及满足《巴黎协定》2℃温控目标的可再生能源投资需求。

2 研究方法

2.1 减排路径分析

电源结构中清洁发电每提高 r 个百分点对应的减排量占电力部门排放量比重 P_r 的计算关系式为

$$P_r(T) = \frac{r(T) \cdot C_T \cdot E(T)}{(1 - R_{C,T}) \cdot C_T \cdot E(T)} = \frac{r(T)}{(1 - R_{C,T})} \quad (1)$$

式中： $E(T)$ 是电力部门 T 年发电量，kWh； C_T 是 T 年的火电碳排放强度，kg/kWh； $R_{C,T}$ 是 T 年电源结构中清洁能源发电量占比； $r(T)$ 指 T 年清洁能源发电提高 r 个百分点。

2.2 减排成效分析

考虑到可再生能源发电建设成本集中在项目前期，而电源建设具有一定施工周期，因此仅用项目前期较高的投资量和前期较小清洁发电减排量计算的碳减排成效会造成过低估计。可再生能源投资潜在的减排成效应考虑电源全生命周期的投资和对应的清洁发电等效碳减排贡献进行计算。综合考虑全生命周期内可再生能源建设成本、运维成本、燃料成本、总发电量、碳排放强度（碳强度）、折现率以及全生命周期内清洁发电替代火电的碳排放量，可再生电源单位投资的潜在减排成效 $P_{E,T}$ 为

$$P_{E,T} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{E_t \cdot C_T}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

式中： I_t 是可再生能源电源系统生命周期内第 t 年建设费用支出，美元； M_t 是第 t 年的运维费用支出，美元； F_t 是第 t 年的燃料费用支出，美元； E_t 是第 t 年的可再生能源发电量，kWh； C_T 是 T 年的火电碳排放强度，kg/kWh； r 是折现率，%； n 是系统生命周期的寿命，a。

本文可再生能源是指风能、太阳能、水能、地热能、波浪能、生物质能，式（2）中除生物质能源需要燃料成本外，其他可再生能源燃料成本均为零。电力生产平准化度电成本（levelized cost of energy, LCOE）的定义为

$$C_{LCOE,T} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

式中： $C_{LCOE,T}$ 为 T 年可再生能源发电的平准化度电成本，美元/kWh。

因此式（2）可再生电源单位投资的减排成效 P_E 可以改写为

$$P_{E,T} = \frac{C_T}{C_{LCOE,T}} \quad (4)$$

某区域或国家 T 年各类可再生能源总投资减排成效 $R(T)$ 可由式（5）计算：

$$R(T) = \sum_{i \in \varphi} (I_{i,T} \times P_{E,i,T}) \quad (5)$$

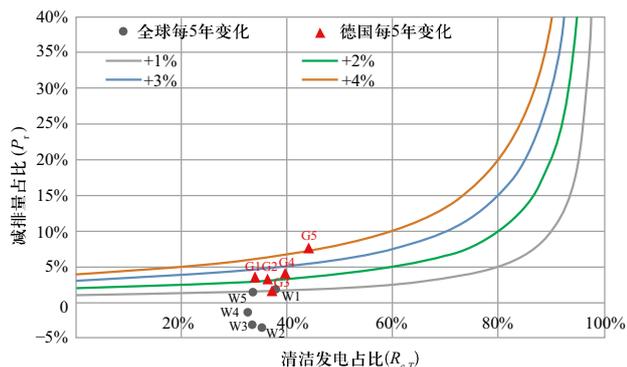
式中： i 为可再生能源类别，如光伏发电、光热发电、风电、水电、生物质发电、地热发电等； φ 是可再生能源集合； $I_{i,T}$ 是 T 年可再生能源 i 的投资； $P_{E,i,T}$ 是 T 年可再生能源 i 的单位投资减排成效，由式（4）计算得出。

3 结果分析

3.1 可再生能源减排路径

图2为电源结构中清洁发电占比每提高1~4个百分点减排量占比关系图。从式（1）及图2可以看出减排量占比 P_r 曲线与清洁发电占比呈单调递增的“凸函数”关系，减排量占比随着电源结构中清洁发电比重提高而逐渐增大。从式（1）可以看出，当清洁发电占比 $R_{C,T}$ 很小时，分母接近于1，分子提升对 P_r 影响较小。当电源结构中清洁发电占比在20%以下时，即使清洁占比提高4个百分点，减排量占比仍在5%以下；当清洁占比达到60%时，每提高4个百分点，减排量达到10%；清洁占比达到80%时，每提高4个百分点，减排量可达到20%，减排效果显著提升。因此，若要充分发挥清洁电源在电力部门中的减排作用，首先应该推动清洁能源规模化发展，否则清洁占比的提高对减排作用有限。根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）统计数据^[5]，全球清洁发电占比从1990年的36.6%降为2017年的35.1%，这主要是由于核电和水电发展速度远低于电力需求增速，而其他清洁电源体量较小。清洁电源发展初期以核能和水能为主，1990年除核电和水电之外的清洁能源发电占比仅为1.3%，2017年达到8.5%，年均增速虽然达到10.3%，但清洁发电在总发电量中占比仍然很小。同时，1990—2017年间水电和核电发电量之和年均增长率为1.8%，低于全球电力需求增速2.9%，总体上全球清洁发电占比出现了一定程度下降。从图2中全球数据可以看出，1990—1995、1995—2000、2000—2005、2005—2010、2010—2015等清洁占比每5年提高比例均低于1个百分点，减排量曲线位于灰色线以

下。相比来看,德国25年间清洁发展成效显著,减排路径也有逐渐“攀爬”的趋势,说明德国电力部门减排力度持续增强,2010—2015年间减排量占比达到7.3%。根据IEA的德国统计数据^[5],2010年清洁发电量占比达到39.8%,2015年清洁发电占比提高4.3个百分点,年均增长0.9个百分点,减排路径基本维持在2%曲线以上。



注:清洁能源包括风能、太阳能(光伏、光热)、水电、核能、地热能、生物质能、波浪能、可再生废弃物;G代表德国,W代表全球,1:1990—1995,2:1995—2000,3:2000—2005,4:2005—2010,5:2010—2015。

图2 清洁能源发电减排路径变化图

Fig. 2 Change of emission reduction pathway with development of renewable power generation

3.2 可再生能源投资减排成效

2018年,全球可再生能源发电投资达到2889亿美元,远超过化石能源发电投资。相比2017年可再生能源投资下降11%,主要是由于技术成本下降及中国光伏政策导致的投资下降。可再生能源投资主要集中在光伏和风电,2018年光伏和风电投资分别达到1397亿、1341亿美元,合计占总投资比重达到95%。2018年,中国投资占全球可再生能源总投资约1/3,已连续第7年成为全球可再生能源投资最多的国家,欧洲和美国紧随其后,占比分别为21%和17%^[28]。

3.2.1 全球单位投资减排成效

根据IEA统计数据,2018年电力生产碳强度为0.476 kg/kWh,化石能源发电平均碳强度为0.743 kg/kWh。2010年电力生产碳强度为0.529 kg/kWh,化石能源发电平均碳强度为0.786 kg/kWh。在可再生能源快速发展驱动下,2018年电力生产碳强度相比2010年下降10%;伴随化石能源发电结构中天然气发电比例提高,化石能源发电碳强度也有小幅下降,2018年化石能源发电碳强度相比2010年仅下降5.5%。

根据IRENA统计数据^[19],2018年全球光伏发电平

均度电成本为0.085美元/kWh,相比2010年下降77%;光热发电成本虽然较高,但也有大幅下降,2018年全球光热发电平均度电成本为0.185美元/kWh,相比2010年下降46%;陆上风电成本仍显著低于光伏发电成本,2018年全球陆上风电平均度电成本为0.056美元/kWh,相比2010年下降34%;海上风电虽然降本成效显著,但仍为陆上风电成本2倍之多,2018年全球海上风电平均度电成本为0.127美元/kWh,相比2010年下降20%;水电仍是目前价格最低廉的可再生能源,但随着水能资源较好的流域逐渐被开发利用,新建水电工程地理位置偏远,自然条件恶劣,地质条件复杂,基础设施落后,对外交通条件困难,工程勘察、施工难度加大,水电开发的建设成本、并网成本相对增高。同时随着社会经济发展和人们生活水平提高,耕地占用税等税费标准提升,征地移民投资大幅增加,生态环保投入不断加大,水电开发成本急剧增加。2018年全球水电平均度电成本为0.047美元/kWh,相比2010年增长27%;2018年全球生物质发电平均度电成本为0.062美元/kWh,相比2010年下降17%;2018年全球地热发电平均度电成本为0.072美元/kWh,相比2010年增长50%,目前全球新增地热发电项目较少,发电成本对所在国技术水平、地热资源储量、设备成本比较敏感,规模经济效应仍未显现。各类可再生能源度电成本见表1^[19]。

表1 2010与2018年各类可再生能源度电成本

Table 1 LCOE of renewable power generation in 2010 and 2018
美元/kWh

电源品种	2010年	2018年	增长率/%
光伏发电	0.371	0.085	-77.1
光热发电	0.341	0.185	-45.7
陆上风电	0.085	0.056	-34.1
海上风电	0.159	0.127	-20.1
水电	0.037	0.047	27.0
生物质发电	0.075	0.062	-17.3
地热发电	0.048	0.072	50.0

根据度电成本、电力生产碳强度及式(4),2010—2018年可再生能源单位投资减排成效如图3所示。从图3可以看出,2018年水电单位投资CO₂减排成效达到15.8 kg/美元,明显高于其他可再生能源减排成效。其次为陆上风电,2018年单位投资CO₂减排成效达到13.3 kg/美元,相比2010年提高44.5%;光伏单位

投资减排成效增长最为显著, 2018年达到8.7 kg/美元, 相比2010年提高3倍。生物质可广泛来源于成本低廉的农业副产品和林业废弃物, 同时容量因子较高(全球平均值在80%以上), 导致度电成本较低, 因此生物质发电单位投资减排成效较高, 2018年CO₂减排成效为12.0 kg/美元; 地热发电仍处于开发前期阶段, 高温地热资源使得地热发电具有较好的竞争优势, 2018年单位投资CO₂减排成效为10.3 kg/美元, 相比2010年减少37%。当前海上风电和光热单位投资CO₂减排成效较低, 分别为5.8和4.0 kg/美元, 但均有增长的趋势。

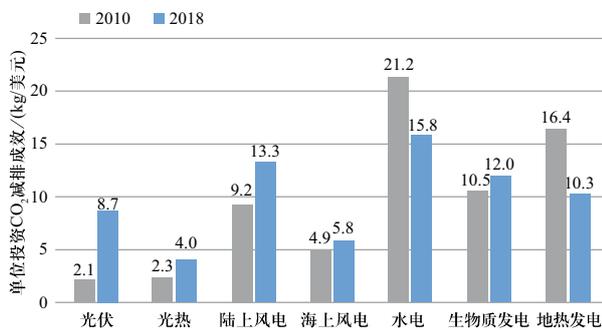


图3 2010与2018年可再生能源单位投资减排成效评估

Fig. 3 Emission reduction assessment of unit renewable investment in 2010 and 2018

3.2.2 区域及重点国家单位投资减排成效

图4为区域及重点国家2010—2018年间陆上风电单位投资减排成效评估结果。总体来看, 全球陆上风电单位投资减排成效均有不同程度的提高, 其中中国、非洲、北美洲单位投资减排成效增长高于全球平均水平。从单位减排成效绝对量来看, 中国陆上风电单位投资CO₂减排成效最大, 2018年达到18.2 kg/美元, 相比全球平均值高出37%。中国的高投资减排成效主要有两方面原因: 一是由于中国对风电发展强有力的政策支持, 以及风电退补贴政策驱动下风机建设成本持续降低, 2018年平均建设成本为1170美元/kW^[19], 处于全球最低水平, 因此中国陆上风电度电成本具有显著竞争力; 二是由于中国火电度电排放高, 化石能源发电结构中95%为煤电^[5], 仅有少量气电, 火电碳强度明显高于其他地区, 较低的度电成本和较高的度电排放使得在中国投资1美元将生产更多风电, 有效避免高排放的煤电生产, 风电投资减排成效高于其他地区。印度单位投资CO₂减排成效为14.7 kg/美元, 与中国情况类似, 印度风电度电成本较低, 而火电碳强度全球最高, 因此也具有较好的单位投资减排成效。

相比之下, 虽然欧洲是风电发展较早的地区, 但由于人工及设备成本较高, 平均度电成本高于全球其他地区; 同时欧洲火电中45%为碳排放较低的气电, 电力生产碳强度较低, 因此欧洲单位投资减排成效相对较低。在统计的区域和国家中俄罗斯及周边陆上风电单位投资减排成效最低, 主要是由于当地天然气资源丰富, 火电结构中70%为气电, 火电碳强度处于全球最低水平, 因此每投资1美元的减排成效较低。

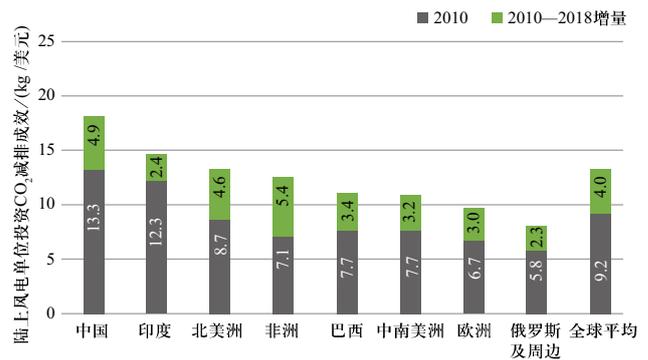


图4 2010—2018年区域及重点国家陆上风电单位投资减排成效

Fig. 4 Emission reduction assessment of unit onshore wind investment in 2010-2018

图5为重点国家2010—2018年间光伏发电单位投资减排成效评估结果。总体来看, 全球光伏发电单位投资减排成效均有较大幅度提高, 2010—2018年印度和中国单位投资CO₂减排成效增量超过10 kg/美元, 增量及绝对量均高于全球平均水平。印度光伏发电单位投资CO₂减排成效最大, 2018年达到14.5 kg/美元, 比全球平均水平高出66%。中国和印度光伏发电在规模经济推动下, 建设成本持续下降, 处于全球较低水平。2018年全球新增光伏装机94 GW, 占可再生能源新增装机的55%, 其中, 中国新增光伏装机44 GW, 印度为9 GW。全球光伏组件成本较2017年下降26%~32%, 印度和中国光伏发电建设成本分别降至793和879美元/kW, 使得两国度电成本降至0.06美元/kWh, 比全球平均度电成本低30%。意大利光伏建设成本仅有870美元/kW, 略低于中国, 但意大利火电中气电占比超过75%, 因此其火电碳强度远低于全球平均水平, 仅有0.53 kg/kWh, 这使得意大利光伏发电单位投资CO₂减排成效较低, 2018年仅为7 kg/美元, 不足印度投资减排成效的一半。英国光伏发电度电成本较高, 约为全球平均水平的2倍, 同时其火电碳强度较低, 因此其单位投资CO₂减排成效仅为3.4 kg/美元。

总体来看,全球光伏组件成本呈现全球趋同化,欧洲与其他地区建设成本差异日益缩小,但由于欧洲光照资源相对较差,导致光伏发电容量因子较低,度电成本相对较高,因此欧洲各国光伏发电单位投资减排成效较低,如法国、德国、意大利、英国等。亚洲地区光伏发电单位投资减排成效相对较高,如中国、印度等。

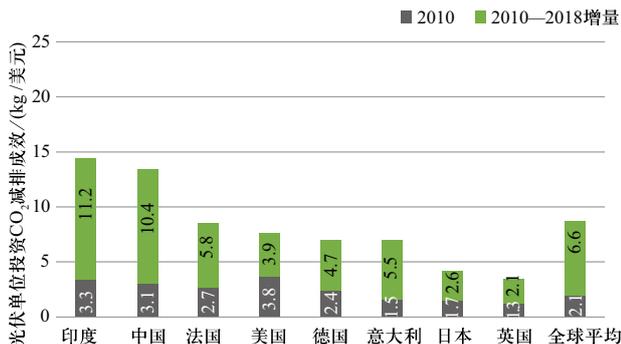


图5 2010—2018年重点区域及国家光伏发电单位投资减排成效

Fig. 5 Emission reduction assessment of unit solar PV investment in 2010-2018

图6为区域及重点国家2010—2018年间大型水电项目单位投资减排成效评估结果。全球水电单位投资减排成效出现不同程度下降,如印度、巴西、北美洲。巴西单位投资CO₂减排成效下降最为明显,由2010年的16.5 kg/美元降至2018年的13 kg/美元,降幅超过20%,这主要是由于巴西水电容量因子波动较为明显^[19],由65%降至57%,使得水电度电成本增至0.051美元/kWh,高于中国水电度电成本。水电资源丰富的中国、印度、巴西单位投资减排成效相对较高,虽然部分地区减排成效略有下降,但由于其显著的经济性优势,单位投资减排成效仍明显高于风电、

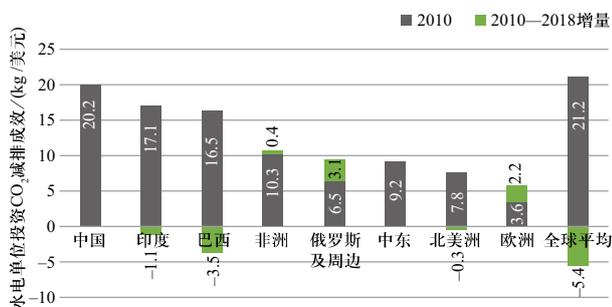


图6 2010—2018年重点区域及国家大型水电单位投资减排成效

Fig. 6 Emission reduction assessment of large scale hydropower investment in 2010-2018

光伏等其他可再生能源。中东和欧洲水电单位投资减排成效较低,一方面是由于其火电中气电比例较高,中东达到74%,欧洲达到60%,导致火电碳强度较低;另一方面由于水资源较好流域已被开发利用,剩余水电资源开发建设成本、输电成本较高,导致度电成本高于其他地区。欧洲平均度电成本是全球平均水平的2.5倍,因此欧洲水电单位投资CO₂减排成效仅为5.8 kg/美元,低于当地风电和光伏单位投资减排成效。

图7为2018年区域及重点国家生物质发电单位投资减排成效评估结果。生物质与其他可再生能源不同,燃料成本及其对应的容量因子对度电成本影响较大,这也直接影响了单位投资减排成效。印度和中国生物质发电单位投资减排成效较高,其中印度利用农作物肥料谷壳发电,容量因子可达到90%;中国利用甘蔗渣及废物沼气发电,燃料成本低,这使得印度和中国生物质发电单位投资减排成效高于全球平均水平,2018年达到15 kg/美元左右。北美和欧洲单位投资CO₂减排成效较低,低于9 kg/美元,这主要是由于北美和欧洲生物质发电燃料成本较高(如采用木材肥料),而北美和欧洲火电碳强度较低,因此生物质发电单位投资减排成效低于全球平均水平。

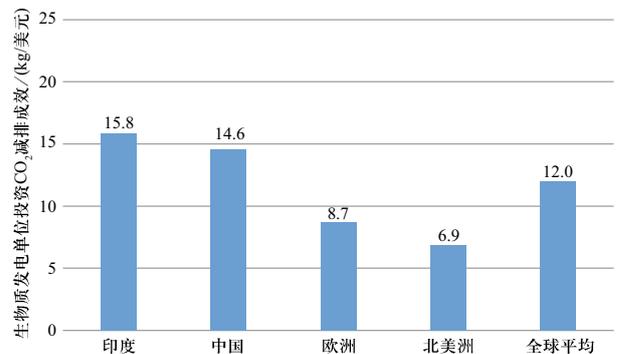


图7 2018年重点区域及国家生物质发电单位投资减排成效

Fig. 7 Emission reduction assessment of bioenergy power generation unit investment in 2018

3.2.3 全球可再生能源投资减排成效评估

据统计^[28-29],2018年全球太阳能发电、陆上风电、海上风电、水电、生物质发电、地热发电投资分别为1397亿、1098亿、246亿、9亿、88亿、22亿美元,根据式(5)计算得到的减排成效分别为12.2亿、14.6亿、1.4亿、0.14亿、1.05亿、0.23亿t CO₂,2018年全球可再生能源投资的总减排成效约为30亿t CO₂,光伏和风

电投资减排成效占比超过90%。图8为2018年全球可再生能源投资总减排成效前15位国家，可以看出全球可再生能源投资减排成效主要集中在中国、美国和欧洲各国，其中中国2018年可再生能源投资的总减排成效为13.2亿t CO₂，占全球总减排成效的45%；其次为美国，投资减排成效为4.5亿t CO₂，占全球比重15%；印度和日本可再生能源投资减排成效占全球比重均为5.3%，其余各国投资减排成效占比不足3%。虽然水电、生物质发电、地热发电单位投资减排成效较大（见图3），但相比全球广泛分布的太阳能和风能，水电、地热资源具有明显的地域分布限制，生物质发电也依赖当地原材料储量及价格，限制了生物质发电机组容量，而太阳能和风能发电单位投资减排成效近几年有明显增长，因此全球可再生能源投资主要集中在资源更为丰富的太阳能及风能领域。全球各国光伏和风电投资减排成效评估在地域分布上有明显的相似性，都是主要集中在亚洲的中国、日本、印度，北美洲的美国，欧洲的德国、法国、瑞士、瑞典等国。

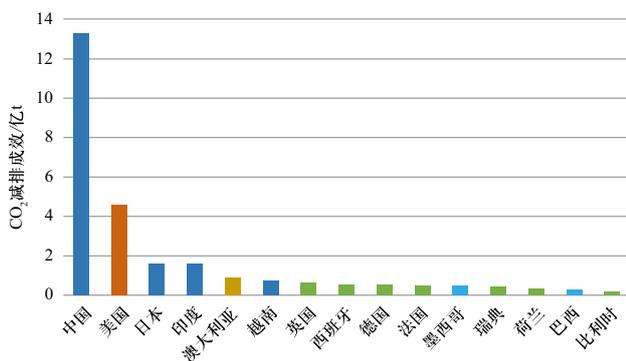


图8 2018年可再生能源投资减排成效评估

Fig. 8 Emission reduction assessment of renewable investment in 2018

3.2.4 全球能源互联网情景下能源投资

全球能源互联网是应用智能电网、特高压输电、清洁能源、储能等先进技术，推动全球清洁能源大规模开发、配置和使用的重要平台，将加快能源生产清洁替代和能源消费电能替代，大幅提高全社会电气化水平，实现能源系统全面“脱碳”和清洁发展^[1]。本文应用奥地利国际应用系统分析研究所（IIASA）开发的国际主流综合评估模型MESSAGEix^[30]对全球能源互联网情景进行了系统分析。为了刻画电力互通，在MESSAGEix能源模型中新增跨区域电力互联运算模块和模拟技术，区域间电力流在MESSAGEix模型中按文献[31]中数据进行数学建模，通过成本最优化

求解出全球能源互联网情景，量化评估全球能源互联网情景实现《巴黎协定》2℃温升控制目标的能源投资。2016—2050期间年均能源投资与D. McCollum等统计的六大综合评估模型^[32]结果对比见图9。总体来看，各类模型结果显示清洁能源年均投资需求大于化石能源投资，全球能源互联网情景下，2016—2050年清洁能源投资年均投资达到6440亿美元，其中非生物质可再生清洁电力达到5280亿美元，高于全社会化石能源投资的5000亿美元（包括化石能源开采、转化及电力生产）。全球电力互联互通，将推动清洁能源大规模开发利用，全球共享高质量风能和太阳能等可再生能源，持续降低发电成本。预计2050年陆上和海上风电成本有望分别降至0.025和0.055美元/kWh左右，预计光伏和光热发电成本有望分别降至0.02和0.05美元/kWh左右，其中撒哈拉以南非洲区域太阳能发电成本最低，基地式太阳能规模化开发利用相对于分散式开发成本低50%以上^[33]。随着全球清洁电力贸易扩大及成本进一步下降，全球及区域优化结果显示2050年全球可实现80%清洁电力供应（见图10）。虽然全球电力互联互通将增加电力输配基础设施投资，但低成本的清洁能源供应及化石能源投资大幅缩减使得全球能源互联网情景的能源总投资相比其他模型年均投资平均值低20%以上。

需要指出，虽然2008—2018年可再生能源投资增速稳定在5%以上，但当前可再生能源投资发展速度仍不满足《巴黎协定》2℃及1.5℃温控目标要求。全球能源互联网实现2℃温控目标下，2050年可再生能源投资需要达到9180亿美元，是2018年投资的3.2倍；2018—2050年可再生能源累积投资需要达到19.3万亿美元，这与IRENA^[6]评估的累积投资21.9万亿美元^①以及D. McCollum等^[32]根据六大综合评估模型计算的可再生能源累积投资19.5万亿美元^②（2℃情景）相当。电力部门实现净零排放不但对实现《巴黎协定》目标意义重大，同时对全球实现可持续发展有着巨大贡献，2018—2050年的可再生能源投资年均增速需要达到11.4%，相比当前投资增速翻一番。

① IRENA研究表明，为满足《巴黎协定》目标，2016—2050年电力部门可再生能源累积投资需求为22.5万亿美元，其中2017—2018年全球可再生能源累积投资为0.615万亿美元，因此2018—2050年可再生能源累积投资需求为21.9万亿美元。

② D. McCollum等研究表明，2℃情景下非生物质可再生能源发电年均投资6090亿美元。

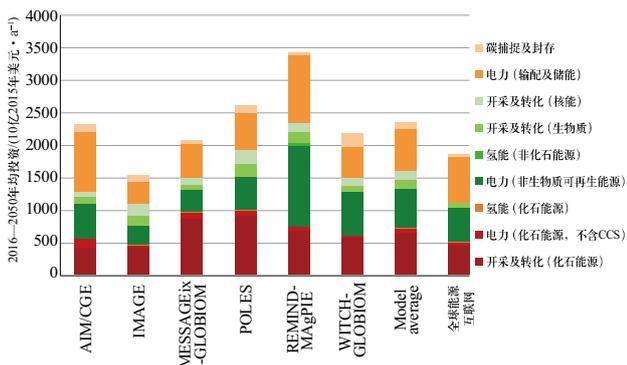


图9 全球能源互联网满足2℃温控目标的全球年均能源投资与其他模型结果对比

Fig. 9 Projected global-average annual energy investments needed to achieve 2℃ target by category from 2016 to 2050 according to different models and Global Energy Interconnection Scenario

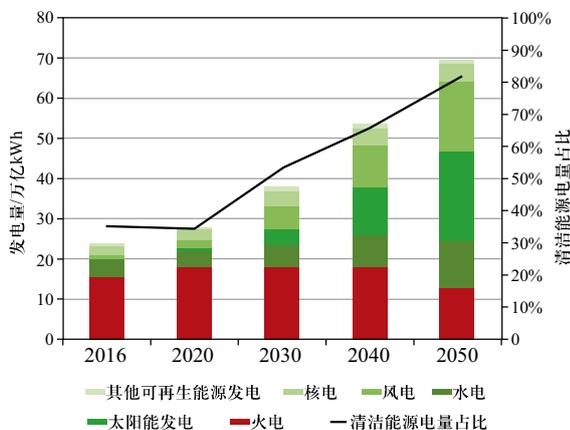


图10 2016—2050年全球能源互联网情景下电源结构及清洁能源发电量占比

Fig. 10 Power generation mix and share of clean energy power generation in Global Energy Interconnection Scenario in 2016-2050

4 结论

本文系统总结了电力部门减排整体框架和主要减排技术路线，分析了可再生能源减排路径，提出了可再生能源投资减排成效分析方法，并量化分析了各类可再生能源单位投资减排成效，最后对全球可再生能源投资减排成效和投资需求进行了评估，主要结论如下。

1) 可再生能源减排路径研究表明，减排量占比曲线与清洁发电占比呈单调递增的“凸函数”关系。若要充分发挥清洁能源在电力部门中的减排作用，首先应该推动清洁能源规模化发展，否则清洁占比的提高对减排作用有限。1990—2015年全球每5年清洁占比提高比例均低于1个百分点，德国清洁发展成效显著，减排量占比变化也有逐渐“攀爬”的趋势，2010—2015年间清洁发电占比增长带来碳减排贡献占电力部

门总排放的比重达到7.3%，远高于全球平均水平。

2) 提出可再生能源单位投资减排成效评估方法。在不考虑电源建设过程中材料投入所产生的碳排放、可再生能源均按零碳电源计算情况下，2018年水电单位投资CO₂减排成效达到15.8 kg/美元，显著高于其他可再生能源。其次为陆上风电13.3 kg/美元，相比2010年提高44.5%；光伏发电单位投资减排成效增长最为显著，2018年单位投资减排成效达到8.7 kg/美元，相比2010年提高3倍。中国和印度光伏、陆上风电、水电、生物质发电单位投资减排成效居全球前列，主要是由于可再生能源发电建设成本较低及当地高排放的煤电占比较高。本研究未考虑潜在的其他环境成本，未来研究将纳入全生命周期碳排放进行可再生能源单位投资减排成效评估。

3) 分析全球可再生能源减排成效及可再生能源投资需求。2018年全球可再生能源投资的总减排成效约为30亿t CO₂，光伏和风电投资减排成效占比超过90%。全球电力互联互通可推动全球清洁能源优化配置，共享高质量风能和太阳能，大幅降低发电成本，全球及区域优化结果显示2050年全球可实现80%清洁电力供应。低成本的清洁能源供应及化石能源投资大幅缩减使得全球能源互联网情景的能源总投资相比其他模型年均投资平均值低20%以上。全球能源互联网实现2℃温控目标下，2050年可再生能源投资需求为9180亿美元，是2018年的3.2倍；2018—2050年可再生能源累积投资需要达到19.3万亿美元，可再生能源投资年均增速需达到11.4%，相比当前投资增速翻一番。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 张士宁, 杨方, 陆宇航, 等. 全球能源互联网发展指数研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(5): 537-548.
ZHANG Shining, YANG Fang, LU Yuhang, et al. Research on global energy interconnection development index[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 537-548(in Chinese).
- [3] ZHOU Yuanbing, CHEN Xing, TAN Xin, et al. Mechanism of CO₂ emission reduction by global energy interconnection[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 409-419.
- [4] ZHANG S N, YANG F, LIU C Y, et al. Study on global industrialization and industry emission to achieve the 2℃ goal based on MESSAGE model and LMDI approach[J]. Energies, 2020, 13(4): 825.
- [5] IEA. Data and statistics[EB/OL]. (2020)[2020-03]. <https://www.iea.org/data-and-statistics>.

- [6] IRENA. Global energy transformation: a roadmap to 2050 (2019 edition)[R/OL]. (2019-04)[2020-03]. <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>.
- [7] DNV GL. Energy transition outlook 2018: a global and regional forecast of the energy transition to 2050[R]. Høvik, Bærum, Akershus, Norway, 2019.
- [8] GRUBLER A, WILSON C, BENTO N, et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies[J]. *Nature Energy*, 2018, 3(6): 515-527.
- [9] 侯方心, 张士宁, 赵子健, 等. 实现《巴黎协定》目标下的全球能源互联网情景展望分析[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(1): 34-43.
HOU Fangxin, ZHANG Shining, ZHAO Zijian, et al. Global Energy Interconnection Scenario outlook and analysis in the context of achieving the Paris Agreement goals[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(1): 34-43(in Chinese).
- [10] IEA. Global energy & CO₂ status report 2018[R/OL]. (2019-03) [2019-12]. <https://webstore.iea.org/global-energy-co2-status-report-2018>.
- [11] KRIEGLER E, LUDERER G, BAUER N, et al. Pathways limiting warming to 1.5 °C: a tale of turning around in no time?[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2018, 376(2119): 20160457.
- [12] ROGELJ J, SHINDELL D, JIANG K, et al. Mitigation pathways compatible with 1.5 °C in the context of sustainable development[M/OL]// Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. (2018). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf.
- [13] 王宇, 计彤. 中国低碳电力技术减排潜力及减排成本分析[J]. *生态经济*, 2014, 30(11): 14-17.
- [14] 马蓉, 甄金泉, 刘信信. 电力生产中化石燃料、核能和可再生能源间关于降低二氧化碳排放的成本比较[J]. *产业与科技论坛*, 2014, 13(19): 69-71.
- [15] SIMS R E H, ROGNER H H, GREGORY K. Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation[J]. *Energy Policy*, 2003, 31(13): 1315-1326.
- [16] CRANE K, CURTRIGHT A E, ORTIZ D S, et al. The economic costs of reducing greenhouse gas emissions under a US national renewable electricity mandate[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(5): 2730-2739.
- [17] IEA. World energy outlook 2019[R/OL]. (2019-11)[2020-03]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.
- [18] IRENA. 10 years: process to action[R/OL]. (2020-01)[2020-03]. <https://www.irena.org/publications/2020/Jan/10-Years-Progress-to-Action>.
- [19] IRENA. Renewable power generation cost in 2018[R/OL]. (2019-05)[2020-03]. <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>.
- [20] 梁涵卿, 邬雄, 梁旭明. 特高压交流和高压直流输电系统运行损耗及经济性分析[J]. *高电压技术*, 2013, 39(3): 630-635.
LIANG Hanqing, WU Xiong, LIANG Xuming. Operation losses and economic evaluation of UHVAC and HVDC transmission systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(3): 630-635(in Chinese).
- [21] 梁旭明, 汪钺, 姜升, 等. 国家电网公司直流输电系统电量消/损耗情况分析[J]. *电网技术*, 2009, 33(19): 79-82.
LIANG Xuming, WANG Yue, JIANG Sheng, et al. Analysis on power consumption and losses of HVDC power transmission systems of state grid corporation of China[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(19): 79-82(in Chinese).
- [22] 贾善杰, 田鑫, 王志, 等. 特高压交、直流输变电工程温室气体减排量计算[C]//2017智能电网新技术发展与应用研讨会论文集. 2017: 125-131.
- [23] IEA. Coal capacity by type in the Sustainable Development Scenario 2010-2030[EB/OL]. (2019-11)[2020-03]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/coal-capacity-by-type-in-the-sustainable-development-scenario-2010-2030>.
- [24] World Coal Association. The power of high efficiency coal: reducing emissions while delivering economic development and reliable energy[R/OL]. (2016)[2019-12]. https://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=The%20Power%20of%20high%20efficiency%20coal%20-%20WCA%20-%20200316.pdf.
- [25] IEA. Energy technology perspectives[R/OL]. (2017-06) [2019-12]. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>.
- [26] IEA. World energy investment 2019[R/OL]. (2019-05) [2019-12]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2019>.
- [27] Global CCS Institute. Global status of CCS 2019[R/OL]. (2019) [2019-12]. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report>.
- [28] REN21. Renewables 2019 global status report[R/OL]. (2019) [2019-12]. <https://www.ren21.net/gsr-2019>.
- [29] BloombergNEF. Investment & Valuation 2020[DB/OL]. <https://www.bnef.com/core/data-hubs/3/15?tab=Global%20Investment>.
- [30] HUPPMANN D, GIDDEN M, FRICKO O, et al. The MESSAGEix integrated assessment model and the ix modeling platform (ixmp) : an open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 112: 143-156.

[31] 李隽, 宋福龙, 余潇潇. 全球能源互联网骨干网架规划研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(5): 527-536.

LI Jun, SONG Fulong, YU Xiaoxiao. Research on global energy interconnection backbone grid planning[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 527-536(in Chinese).

[32] MCCOLLUM D L, ZHOU W J, BERTRAM C, et al. Energy

investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals[J]. Nature Energy, 2018, 3(7): 589-599.

[33] 全球能源互联网发展合作组织, 国际应用系统分析研究所, 世界气象组织. 全球能源互联网应对气候变化研究报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

附录A 数据说明

表 A1 本文各图所用数据来源
Table A1 Data sources used in this study

图序	数据来源	数据说明
图2	IEA ^[5]	全球及德国历史数据来源于IEA能源数据统计, 曲线数据来源于公式(1), 具体数据见表1。
图3	IEA ^[17] , IRENA ^[19]	根据公式(4), 全球平均火电碳排放强度(0.476 kg/kWh)来源于IEA, 各类电源度电成本来源于IRENA统计报告, 具体数据见表1。
图4	IEA ^[17] , IRENA ^[19]	根据公式(4), 各国平均火电碳排放强度来源于IEA, 重点区域及国家陆上风电度电成本来源于IRENA统计报告。
图5	IEA ^[17] , IRENA ^[19]	根据公式(4), 各国平均火电碳排放强度来源于IEA, 重点区域及国家光伏度电成本来源于IRENA统计报告。
图6	IEA ^[17] , IRENA ^[19]	根据公式(4), 各国平均火电碳排放强度来源于IEA, 重点区域及国家大型水电度电成本来源于IRENA统计报告。
图7	IEA ^[17] , IRENA ^[19]	根据公式(4), 各国平均火电碳排放强度来源于IEA, 重点区域及国家生物质发电度电成本来源于IRENA统计报告。
图8	IEA ^[17] , REN21 ^[28] , 彭博新能源财经 ^[29]	根据公式(5), 各国平均火电碳排放强度来源于IEA, 全球及各国新能源投资来源于REN21及彭博新能源财经。
图9	D. McCollum等 ^[32] , 本文MESSAGEix模型结果	六大综合评估模型结果来源于D. McCollum等论文, 全球能源互联网情景(GEI)数据来源于自主研究分析。
图10	全球能源互联网发展合作组织等 ^[33] 及本文MESSAGEix模型结果	

收稿日期: 2020-03-25; 修回日期: 2020-05-15。



张士宁

作者简介:

张士宁(1987), 男, 博士, 研究方向为全球能源发展战略规划、能源经济与能源供需、可再生能源发电技术等, E-mail: shining-zhang@geidco.org。

马志远(1991), 女, 博士, 研究方向为低碳电力系统规划、环境能源耦合系统分析等, E-mail: zhiyuan-ma@geidco.org。

杨方(1981), 女, 博士, 研究方向为全球能源发展战略规划、气候变化、环境承载力评价等。通信作者, E-mail: fang-yang1@geidco.org。

刘昌义(1985), 男, 高级工程师, 研究方向为气候变化、可持续发展经济学等, E-mail: changyi-liu@geidco.org。

谭新(1988), 男, 博士, 研究方向为能源与气候变化、智能电网通信、物联网技术等, E-mail: xin-tan@geidco.org。

侯方心(1990), 女, 博士, 研究方向为能源规划、能源供需、可再生能源发电技术等, E-mail: fangxin-hou@geidco.org。

张骞(1986), 男, 博士, 研究方向为能源发展战略规划、能源经济与脱碳减排、能源与环境系统工程等, E-mail: zhangqian@uvic.ca。

(责任编辑 李锡)