

实现《巴黎协定》目标下的全球能源互联网情景展望分析

侯方心¹, 张士宁¹, 赵子健¹, 陈小彤¹, 谭新¹, 黄瀚¹, 杨方^{1*}, 谭锋²

(1. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031;

2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南省 昆明市 650214)

Global Energy Interconnection Scenario Outlook and Analysis in the Context of Achieving the Paris Agreement Goals

HOU Fangxin¹, ZHANG Shining¹, ZHAO Zijian¹, CHEN Xiaotong¹, TAN Xin¹, HUANG Han¹,
YANG Fang^{1*}, TAN Feng²

(1. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, Yunnan Province, China)

Abstract: The increasingly severe climate change status poses enormous threats and challenges to the sustainable development of mankind. To address this problem, 195 parties have signed the Paris Agreement and agreed on achieving a 2 °C temperature control target by the end of the century. In this study, the outlook and analysis of future global energy demand and supply were conducted in the context of achieving the Paris Agreement's 2 °C goal, and the mitigation pathway and energy scenario for the Global Energy Interconnection (GEI) combating climate change were proposed. Innovations were made in the establishment of the GEI scenario in the following three aspects: firstly, S-curve and machine learning methods were employed to predict the final energy demand of the industry, transportation, and building sectors; secondly, the cross-regional power interconnection module was introduced into the integrated assessment model (IAM) MESSAGEix to model and analyze the global energy and power interconnection, and the intensive development of clean energy; thirdly, the characteristics and values of the GEI scenario were analyzed by comparing this scenario with other scenarios that could also meet the Paris Agreement's 2 °C target.

Keywords: Paris Agreement; Global Energy Interconnection scenario; mitigation pathway; energy transition; final energy demand prediction

摘要: 气候变化形势日益严峻, 给人类可持续发展带来巨大威胁和挑战。为应对气候变化, 全球已有195个缔约方签署了《巴黎协定》, 确定到本世纪末前实现 2 °C 温控目标。基于《巴黎协定》2 °C 温控目标, 对全球未来能源需求和供应进行了展望分析, 提出了全球能源互联网应对气候变化的减排路径和能源情景。在构建全球能源互联网情景研究中进行了3方面的创新。一是利用S曲线及机器学习方法对工业、交通、建筑部门进行了终端用能需求预测; 二是在综合评估模型MESSAGEix中, 引入跨区域电力互联运算模块和模拟技术, 对全球电力互联互通及清洁能源集约化开发利用进行建模分析; 三是将全球能源互联网情景与其他实现《巴黎协定》2 °C 目标的情景进行比较, 分析其特点和价值。

关键词: 《巴黎协定》; 全球能源互联网情景; 减排路径; 能源转型; 终端用能需求预测

0 引言

气候变化面临严峻形势, 尽管全球大部分国家和地区已经签署了《巴黎协定》并提交了国家自主减排贡献方案, 当前国家自主贡献减排量与实现2 °C目标之间仍然存在较大差距。根据联合国环境署统计^[1], 要实现全球2 °C温控目标, 在2030年需要大致将国家自主贡献减排量提高2倍。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 科学评估报告^[2]表明人类排放尤其是化石能源排放是导致温室气体浓度上升和全球变暖的主要原因, 加快推动全球能源系统绿色低碳转型对于应对气候变化具有决定性作用。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFA0602602); 全球能源互联网集团有限公司科技项目 (101662227)。

National Key Research and Development Program of China (2016YFA0602602); Science and Technology Foundation of GEIGC (101662227).

能源系统是一个复杂的非线性系统，受人口变化、经济发展、社会变革、资源约束、技术进步、气候环境目标、能源政策战略等多种因素影响^[3]。众多研究机构建立了不同的能源系统预测模型体系。国际能源署（International Energy Agency, IEA）^[4]的全球能源预测模型体系（World Energy Model, WEM）和美国能源信息署（Energy Information Administration, EIA）^[5]的能源综合预测模型体系（World Energy Projection System, WEPS）考虑能源消费、能源生产、能源供应各环节，研究各种能源技术、技术进步、环境约束下未来能源系统的发展方向，对中长期能源系统进行展望和分析。根据经济社会发展趋势、能源环境约束条件、技术进步演进路线等不同研判条件对能源情景进行情景分析。总的来说，各机构描绘的能源情景可以分为“延续发展”情景^[4-10]、“变革转向”情景^[4,5,9-12]和“目标倒逼”情景^[4,6,10-11,13]3类^[14]。“延续发展”情景描绘的是在延续当前的经济社会发展、能源政策、技术进步趋势假设下未来的能源发展图景，“变革转向”情景通过变革行动推动能源转型，“目标倒逼”情景研究以实现《巴黎协定》2℃目标或联合国可持续发展目标等为约束条件下的能源发展路径。不同情景的预测结果在能源消费总量、清洁化率、电气化率等重要能源系统指标上存在较大差异，体现了不同的能源转型路径。

当前，清洁能源快速发展，电力互联互通趋势日益加强，全球能源互联网理念应运而生。全球能源互联网^[15]倡导构建清洁主导、电为中心、互联互通、共建共享的现代能源体系。通过全球电网互联互通，在能源供应侧实施“清洁替代”，能源消费侧实施“电能替代”，加快清洁能源发展，助力全球实现《巴黎协定》2℃乃至1.5℃温控目标。研究基于全球能源互联网理念，以实现《巴黎协定》温控目标为约束条件的全球能源转型路径，有利于促进各国推进能源转

型，应对气候变化。本文利用国际主流综合评估模型MESSAGEix构建全球能源互联网2℃情景，分析实现《巴黎协定》温控目标下，全球能源系统格局和演进路径。

与其他能源转型路径理念相比，全球能源互联网理念注重对电气化发展、全球电力系统互联互通和终端电能利用的刻画。为此，本文在构建全球能源互联网情景研究中进行了3方面的创新。一是利用S曲线及机器学习方法对工业、交通、建筑部门进行了终端用能需求预测，详细刻画了未来终端部门用能变化；二是在综合评估模型MESSAGEix中，引入跨区域电力互联运算模块和模拟技术，对全球电力互联互通及清洁能源集约化开发利用进行建模分析；三是作为“目标倒逼”情景，本文将全球能源互联网情景与其他实现《巴黎协定》2℃目标的情景进行了比较，进一步分析全球能源互联网情景的特点和价值。

1 模型方法及边界条件

1.1 综合评估模型框架

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，让化石能源回归工业原材料属性，实现能源系统全面“脱碳”和清洁发展。

本文应用奥地利国际应用系统分析研究所（International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA）开发的国际主流综合评估模型MESSAGEix^[16]对全球能源互联网情景进行了展望分析。能源模块MESSAGEix与经济贸易系统、气候系统、资源环境系统等模块耦合，如图1所示。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

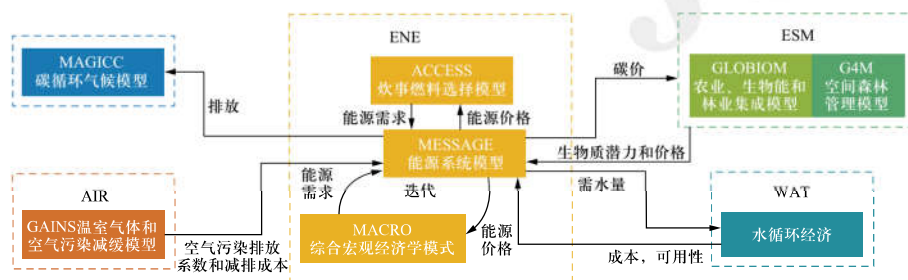


图1 MESSAGEix综合能源评估模型框架图

Fig. 1 MESSAGEix integrated assessment model framework

和模拟技术,区域间电力流在MESSAGEix模型中按参考文献[17]中的数据进行数学建模,通过成本最优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℃温控目标的减排路径。

1.1.1 能源系统模型

基于分部门、分环节、多能源技术扩散等要素,从全球宏观经济发展出发,全球能源互联网情景计算出与经济社会发展方案相适应的能源需求,综合考虑现有能源利用技术和创新技术应用,设计提出能源生产供应与需求预测相适应的规划方案,通过能源供应经济性、能源技术先进性、能源利用高效性综合评估,得到能源与经济发展相互匹配的、经济效益最佳

的能源规划方案,实现运用全球能源互联网理念对全球能源系统的优化设计。

MESSAGEix模型对全球能源系统进行全局优化,以满足供能需求和成本最小为目标,以气候变化、资源潜力、能源供需平衡、生产能力和系统动态变化速度为约束条件,综合考虑资源开采、中间转换、终端用能各个环节,优选工业、交通、建筑部门用能技术效率和成本参数,形成全能源系统技术组合方案,如图2所示。其中,考虑到未来电力贸易的规模和范围加速扩大,在MESSAGEix模型中搭建全球电力贸易模块,刻画跨国、跨洲电力贸易格局,研究全球电网互联互通对能源电力系统和减排路径的影响。

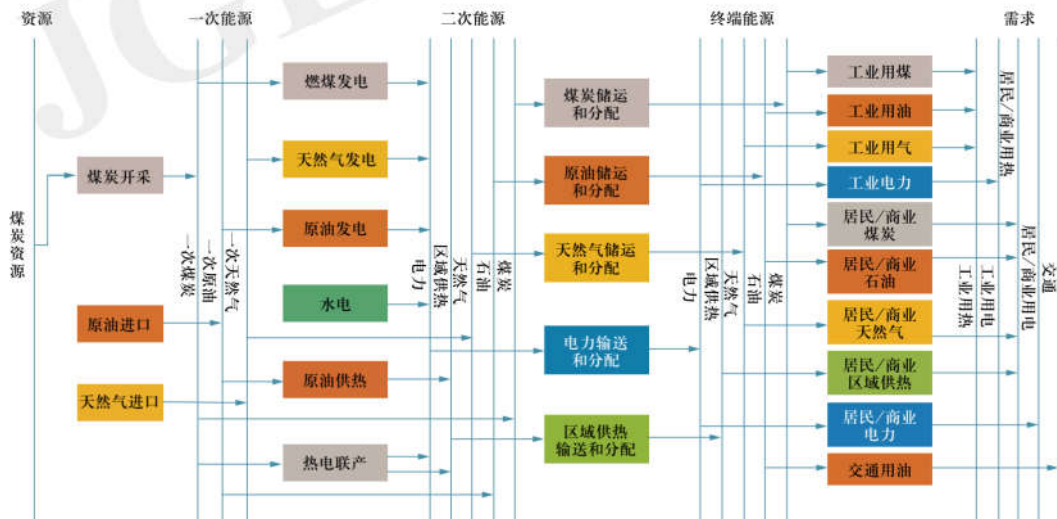


图2 MESSAGEix能源系统框架图

Fig. 2 MESSAGEix energy system framework

1.1.2 电力系统模型

研究基于电力系统规划模型,从经济社会发展、电力行业发展、技术创新发展出发,对中远期与经济社会发展方案相适应的电力需求进行了预测,统筹考虑区域资源禀赋和清洁能源基地,以电力电量平衡、系统运行、碳排放为约束,设计提出电力生产供应与需求预测相适应的规划方案,通过电力供应经济性、输电技术先进性、系统运行可靠性综合评估,得到与经济发展相匹配的、经济效益最佳的全球电力互联方案,实现运用全球能源互联网理念对全球电力系统优化设计的目标。根据全球电力需求展望及电源装机优化规划模型^[17],全球将逐步形成“九横九纵”全球能源互联网骨干网架,广泛连接大型清洁能源基地与负荷中心,实现清洁能源全球配置。到2050年,全球跨

洲跨区电力流总规模将达到6.2亿kW。

1.2 能源需求预测方法

为了系统刻画未来终端部门用能电气化发展规律,并与MESSAGEix模型的终端用能需求相衔接,本文分别利用S型曲线方法对工业部门和交通部门的人均工业用能和陆路交通用能进行了预测,采用核最小均方法对建筑部门有用能进行预测,对未来终端部门用能变化进行了展望。

1.2.1 工业部门

工业用能与工业化水平、城镇化程度、经济发展程度密切相关。发达国家工业用能演进数据表明,人均工业用能与人均国内生产总值(GDP)呈现“S”型模式^[18],即随着人均GDP的增长,人均工业部门能源

消费呈现“从缓慢增长到加速增长，再到减速增长，最后为零增长或负增长的‘S’形轨迹”，如下式：

$$E - E_i = A \frac{\exp(\alpha_1(G - G_i)) - \exp(-\alpha_3(G - G_i))}{2 \cosh(\alpha_3(G - G_i))} \quad (1)$$

式中： i 为人均工业用能增速转折点； G_i 、 E_i 分别为曲线转折点对应的人均GDP值和人均工业部门终端能源消费； A 为曲线关系振幅值，单位与 G 相同； α_1 、 α_2 、 α_3 为曲线指数常数，单位与 G^{-1} 相同。

本文针对MESSAGEix模型中11个区域^①的工业用能历史数据，通过拟合识别S曲线相关参数，并综合考虑工业化进程、城镇化进程、经济发展趋势、人口发展规模等因素对11个区域人均工业用能进行中远期预测。典型区域人均工业用能变化如图3所示，其中世界人均工业用能是11个区域的加权结果，并非通过S曲线进行直接预测。从图3可以看出各区域人均工业用能达峰时间先后不同，因此人均工业用能曲线相对平滑，总体上符合“从缓慢增长到加速增长，再到减速增长，经历零增长后，最后呈现负增长”的“S”型曲线规律。

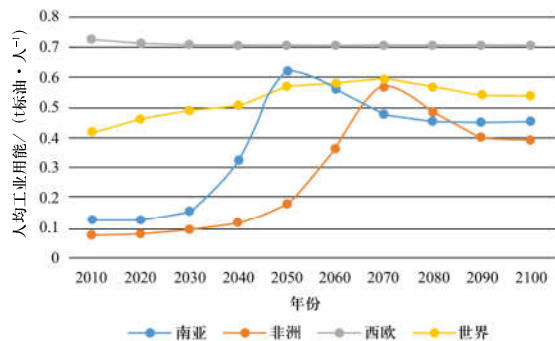


图3 典型区域人均工业用能变化

Fig. 3 Industrial energy consumption per capita estimation of typical regions

1.2.2 交通部门

交通部门能源消费主要集中在陆路交通，占交通部门总能源消费的四分之三左右。本文以共享社会经

济路径（shared socioeconomic pathways, SSPs）的中间路径（SSP2）作为经济社会发展边界条件，利用S曲线考虑不同区域陆路交通电能替代进程，预测中远期陆路交通用能，并利用趋势外推的方法对其他运输方式用能进行预测，计算交通部门总用能。

陆路交通用能主要为用电量和用油量之和，通过下式计算：

$$E_i = \frac{POP \times T_i}{\mu} \times S_i \times EI_i \quad (i=1,2) \quad (2)$$

式中： POP 为人口数量； T 为人均行驶里程； μ 为负载系数，表示平均每辆车所载人数； S 表示电动汽车或燃油汽车里程占比； EI 为单位里程耗能。

总行驶里程采用人口 $\times$ 人均行驶里程/负载系数计算，人均行驶里程为人均GDP的函数^[19]，如下式：

$$T = T^* \times [1 - e^{-(g-g_0)}] \quad (3)$$

式中： g 为人均GDP，万美元； g_0 为人均行驶里程开始显著增长时的人均GDP，视各洲发展情况而异； T^* 为人均最大行驶里程，受各大洲道路基础设施、公共交通和交通政策等影响。根据各大洲实际发展情况，对各参数进行估计，计算得出全球总行驶里程。

假设电池技术、充电桩数目等不影响电动车总行驶里程，则电动车/燃油车保有量占比即为电动车/燃油车总行驶里程占比。根据汽车保有量历史数据、销售量数据及报废量等，得到汽车销售量预测值^[20]。假设电动汽车渗透率随时间推移符合S型曲线分布^[21]，如下式：

$$P(t) = \frac{KP_0 e^{rt}}{K + P_0(e^{rt} - 1)} \quad (4)$$

式中： $P(t)$ 为电动汽车渗透率； K 为渗透率上限； r 表示渗透速度。结合各洲发展情况、电动车政策以及电动车销售量和保有量的历史数据，可计算得到电动车及燃油车保有量预测结果。

单位里程能耗随时间呈现先快速下降、后缓慢下降逐渐平稳的趋势，符合指数下降型学习曲线的趋势。结合现有报告和研究结果，拟合得出单位里程的能耗变化趋势。

1.2.3 建筑部门

建筑终端需求预测方法^[22]原理如图4所示。建筑部门有用能需求预测采用核最小均方（kernel least mean squares, KLMS）法，公式如下：

$$\hat{U}_n = r \sum_{m=1}^{n-1} e_m k_\sigma(Ind_m, Ind_n) \quad (5)$$

式中： n 和 m 代表样本的分组； U_n 为与第 n 个指标向量

① MESSAGEix模型中11个分区分别为Sub-Saharan Africa (AFR), Centrally planned Asia and China (CPA), Central and Eastern Europe (EEU), Former Soviet Union (FSU), Latin America and the Caribbean (LAC), Middle East and North Africa (MEA), North America (NAM), Pacific OECD (PAO), Other Pacific Asia (PAS), South Asia (SAS), Western Europe (WEU)。各分区包含国家详见<https://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE-model-regions.en.html>。

相对应的建筑部门中有用能需求; Ind_n 和 Ind_m 为第 n 和 m 个指标向量对应的向量集; m 为学习速率; e 为误差; k 为高斯核函数 (Gaussian kernel function)。

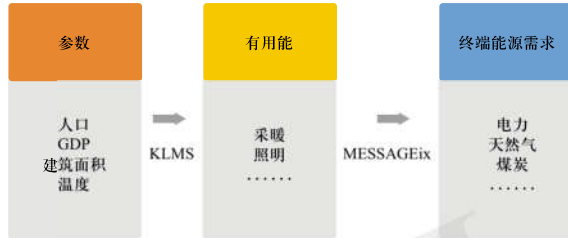


图4 建筑部门终端能源需求预测方法

Fig. 4 Final energy consumption in building sector prediction method

该方法通过建立开发模板并将其用于培训以及“诱导”能源使用的发展,可以反映出未来能源系统的创新,例如电力的飞跃发展。

建筑终端需求通过以下步骤进行预测。①建立培训指标体系,选取GDP、人口密度、占地面积和温度等参数作为培训指标。②建立历史培训数据库,根据选定的指标,在库中收集大量历史数据作为培训样本。③建立发展模板,由于仅凭历史数据很难预测长期结果,在考虑自然和社会相似性的基础上,研究选择了一定数量的高度发达地区作为其他地区的发展模板。国家或地区分为高纬度国家、人口密度低的中纬度国家、人口密度高的中纬度国家和低纬度国家4类,并在每类里根据高度发达、电气化率高和发电相对清洁的要求选取发展模板。④考虑包含上述历史数据和模板数据的数据库,形成发展路径的集群,使用KLMS以正确预测未来的有用能需求。⑤通过将有用能用作MESSAGEix模型的输入并汇总来自各个地区的结果,完成建筑行业的全球最终用能需求预测。

1.3 碳预算及模型边界条件

在满足经济社会发展假设下,以2018年至2100年累积碳预算为边界条件,对能源电力供需情景进行成本最小优化分析。

1.3.1 经济社会情景

本研究选择共享社会经济路径的中间路径作为经济社会发展的边界条件,其经济人口参数如表1所示。在全球努力实现可持续发展的目标下,资源和能源使用强度逐渐下降,人口温和增长并在本世纪下半叶趋于平稳。

1.3.2 碳预算及模型参数

为实现《巴黎协定》2℃目标,以2℃目标的碳

预算为总体约束,基于上述社会经济发展路径假设和能源电力关键技术趋势研判,按照全球能源互联网理念,对能源开发、电力发展、电网互联进行综合优化,构建实现《巴黎协定》2℃目标的全球能源互联网情景,模型计算主要边界条件及假设见表2。

表1 SSP2经济人口参数

指标	水平年	数值
人口/百万人	2010	6844
	2050	9137
GDP/万亿2010年美元	2010	67
	2050	230
人均GDP/2010年美元	2010	9763
	2050	25 142

表2 主要边界条件及假设

项目	描述
2℃目标碳预算	2018年—2100年: 1280 Gt
模型相关	资源潜力 区域资源限制
	优化求解 全球优化
情景相关	经济社会 SSP2
	能源技术 输入技术库

2 结果与讨论

2.1 减排路径特征

全球能源互联网情景下,2018年至2100年能源系统累积CO₂排放量约为1万亿t,累积提供负排放1300亿t,确保能够以67%以上的概率实现2℃温控目标,如图5所示。能源系统CO₂排放量在2025年左右实现排放达峰,2065年左右实现净零排放。

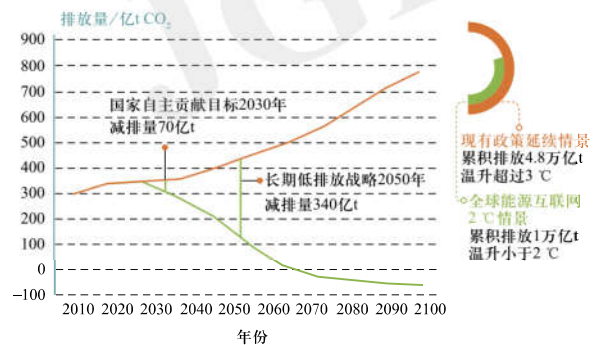


图5 全球能源互联网情景减排路径

Fig. 5 Mitigation pathways of GEI scenarios

按照现有政策延续情景，各国自主贡献目标下2030年仍将排放350亿t，与实现2℃乃至1.5℃温控目标有较大缺口。全球能源互联网情景下，2030年全球能源系统CO₂排放280亿t，能够比当前各国的自主贡献目标多减排70亿t。2050年全球能源系统CO₂排放110亿t，与现有政策延续情景相比能够多减排340亿t。

总体来说，全球能源互联网情景碳排放路径呈现“中速下降—高速下降—低速下降”3个阶段特征（如图6所示），主要影响因素是能源供应环节。2040年前，清洁能源发电成本快速下降，推动电源结构日益清洁化，碳减排速率较快；随着终端电气化水平逐渐提高和清洁能源发展规模化、全球化效应凸显，碳减排速率达到峰值，年均减排约11亿t CO₂；2050年后，全球碳排放量得到有效控制，进一步减排难度加大，减排速率趋缓。

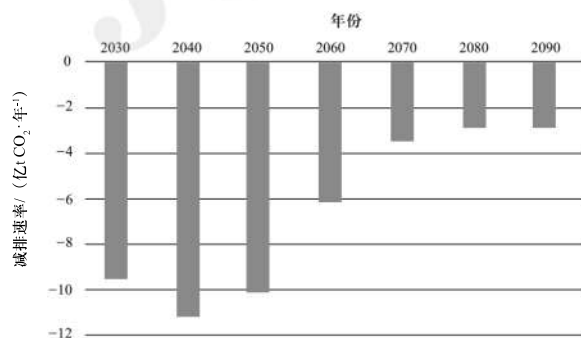


图6 全球能源互联网情景碳减排速率

Fig. 6 Carbon emission reduction rate in GEI scenario

2.2 能源情景特征

2050年全球能源互联网情景如图7所示，具体数据见附录A。本节分别从能源供应能力、能源消费结构、终端用能方式等方面分析全球能源互联网情景特征。

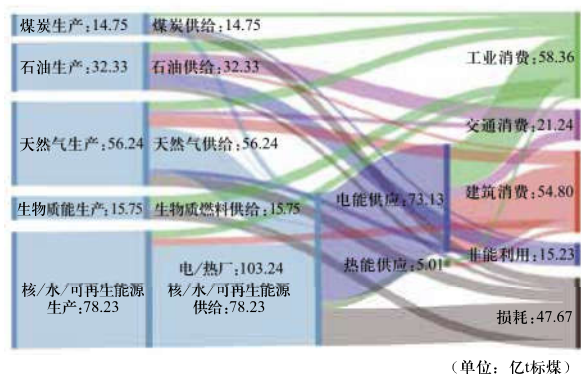


图7 2050年全球能源互联网情景

Fig. 7 GEI scenario in 2050

2.2.1 能源低碳需求

发展中国家，特别是非洲、南亚等地区的经济发展以及中南美洲等地区的经济复苏将带来旺盛的能源需求。MESSAGEix模型优化结果表明，2050年，全球能源互联网情景下，一次能源消费总量达197亿t标煤（热当量法），2010年至2100年人均能源消费稳定在2.2 t标煤以上，电力需求总量为62万亿kWh，2050年人均用电量翻一番，2100年相比2010年人均用电量翻两番。通过大规模发展清洁能源，优化一次能源结构，全球能源互联网情景以清洁的电力供应保证人类能源需求，实现经济发展与碳排放逐渐脱钩（如图8所示），满足全球2℃温控目标。2050年全球碳排放仅为2010年水平的三分之一，碳排放强度下降超过90%。总体来看，全球能源互联网情景在满足《巴黎协定》的同时，为全球经济发展提供充足能源供应。

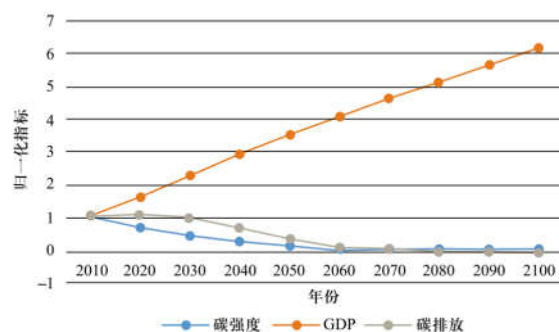


图8 经济发展与碳排放脱钩

Fig. 8 Decoupling economic development from carbon emission

2.2.2 能源消费结构

全球能源互联网情景下，能源生产由化石能源主导转向清洁能源主导转变，通过清洁能源大规模开发、大范围配置和高效率使用，推动世界摆脱化石能源依赖。

全球一次化石能源消费总量在2025年左右达峰，此后逐年下降，其中煤炭消费总量在2025年左右达峰后大幅度下降，天然气消费总量在2040年左右达峰后进入平台期，石油消费总量在2030年左右达峰后大幅度下降。清洁能源开发规模逐年扩大，2050年前清洁能源占一次能源比例全面超过化石能源，以热当量法计算，清洁能源占一次能源比例达到50%，相比2016年增长2倍，如图9所示。

随着清洁能源发电技术快速发展以及电力供应低碳安全要求不断提高，清洁能源发电竞争力日益增强，大规模储能技术日益成熟，水、风、光合理配置，并实施源-网-荷-储协调优化配置，清洁能源具备大规

模灵活调节能力,成为主力电源,确保高比例清洁能源电力系统的安全稳定运行。全球能源互联网情景下,预计2050年全球清洁能源发电量占总发电量比例超过80%,其中太阳能发电、风电、水电和核电占比分别约为32%、23%、15%和6%,如图10所示。各区域间大电网互联对清洁能源资源供应起到一定保障作用。

终端清洁能源利用总量稳定增长,2050年终端清洁能源利用总量达到18亿t标煤,主要由于太阳能和现代生物质在终端部门中应用的大幅增长。2050年终端太阳能及其他非生物质清洁能源消费总量约为10亿t标

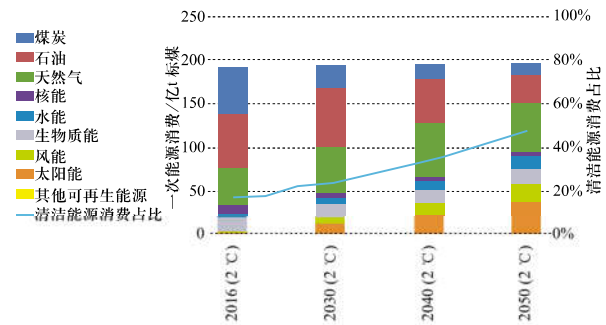


图9 一次能源消费总量及结构

Fig. 9 Total primary energy consumption and its composition

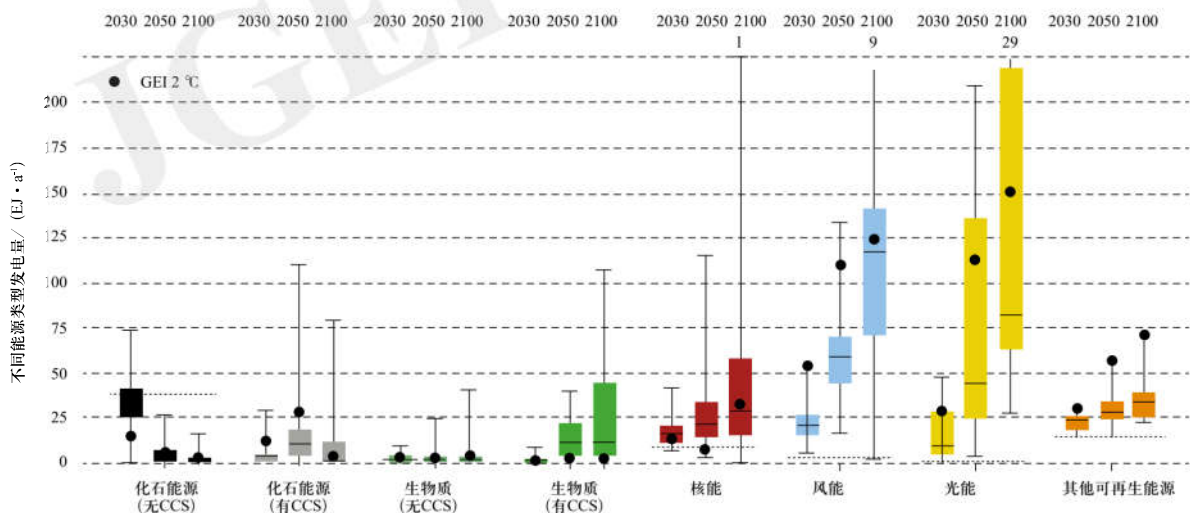


图10 全球主流2℃情景与全球能源互联网情景的发电结构比较

Fig. 10 Comparison of power generation composition between global 2℃ scenarios and the GEI scenario

煤,相比2016年增长15倍。太阳能直接利用主要以制热、集热形式为终端提供热需求,集中应用在工业低温制热和建筑部门热水、取暖等需求。2050年终端现代生物质消费总量达8亿t标煤,广泛应用于工业、交通、建筑部门消费,预计2050年80%生物质能用于工业制热需求,其余用于交通运输和建筑部门分散式制热需求。2050年终端清洁能源利用中工业、建筑和交通部门占比分别为65%、30%和5%。

2.2.3 终端用能方式

全球能源互联网情景下,电力是终端能源消费的核心载体,能源消费由煤、油、气等向电为中心转变。全球电能消费总量逐年上升,2050年全球用电量增至62万亿kWh,电能占终端能源消费比例增至50%左右。相比其他主流2℃情景,全球能源互联网情景的终端电气化率处于较高水平(见图11)。

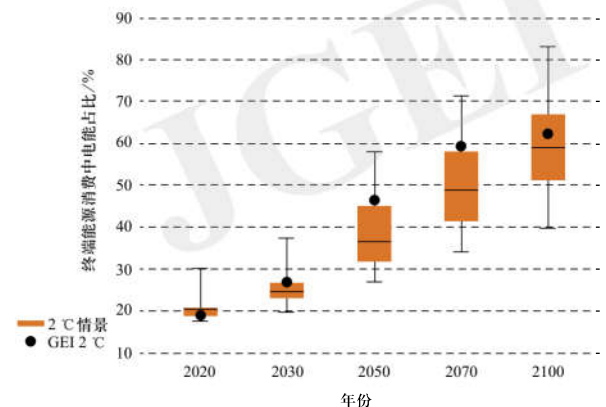


图11 全球能源互联网情景与全球主流2℃情景的电能占比比较

Fig. 11 Comparison of electricity proportion between GEI scenario and global mainstream 2℃ scenarios

1) 工业部门

当前全球工业部门平均电气化水平为28%, 全球先进水平可达到38%, 电能替代仍具有一定发展潜力。电锅炉替代燃煤锅炉以及电加热炉替代燃煤、燃油加热炉是传统能源密集型行业电能替代的主要方向。此外, 随着清洁能源发电成本的降低与技术进步, 电解水制氢、电解燃料等将逐步具有经济性优势, 在工业中将得到广泛应用。全球能源互联网情景下, 2050年工业部门电能消费约24万亿kWh, 电气化率达48%, 如图12所示。

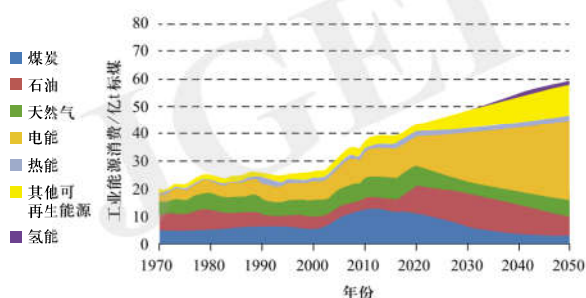


图 12 工业部门能源消费

Fig. 12 Energy consumption in industrial sector

2) 交通部门

全球电动汽车尚处于起步阶段, 当前交通部门电气化水平仅为0.3%, 电动汽车、氢燃料电池汽车、电气化铁路发展均具有显著提升空间。与传统燃油汽车相比, 电动汽车在轻型陆上交通中具有明显优势, 将加速替代燃油汽车成为主导车型。氢燃料电池车是交通部门实现电能替代的重要补充, 在大型客车、高载重货车领域和寒冷地区发展空间大。电气化铁路与港口岸电发展是交通部门减排的有益补充。随着陆路、铁路、港口等交通电气化水平的提升, 全球能源互联网情景下, 预计2050年交通部门电气化率将达到32%, 如图13所示。

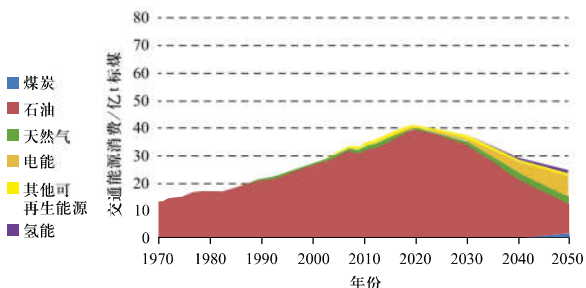


图 13 交通部门能源消费

Fig. 13 Energy consumption in transport sector

3) 建筑部门

电炊事、电制热、电采暖、热泵应用是建筑部门电能替代的主要方向。电炊事技术具有热效率高、安全性高、便捷等优点, 是居民生活电能替代的重要技术应用, 廉价清洁电力将推动电炊事技术更具经济竞争力。热泵技术因其高能效比、低运行成本、零碳排放等优势, 是供热领域电能替代的关键技术, 具有一定的经济性, 适用于满足新增供热需求和替代分散式的供热。全球能源互联网情景下, 2016年至2050年, 建筑部门电能消费由12万亿kWh增长至30万亿kWh, 预计2050年建筑部门电气化率为67%, 如图14所示。

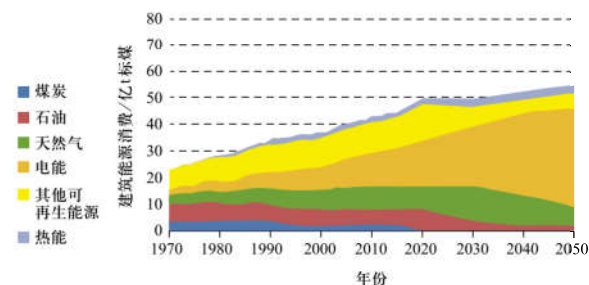


图 14 建筑部门能源消费

Fig. 14 Energy consumption in building sector

3 结论

本文以实现《巴黎协定》2℃温控目标为边界条件, 对全球能源需求进行预测, 利用综合评估模型MESSAGEix, 并新增区域电网互联技术对全球能源电力供应进行优化分析, 设计提出全球能源互联网减排路径和能源情景。主要结论如下。

1) 通过综合评估模型MESSAGEix最优化求解构建得到的全球能源互联网情景, 2018年至2100年能源系统累积CO₂排放量约为1万亿t, 确保能够以67%以上的概率实现《巴黎协定》2℃温控目标。

2) 全球能源互联网情景减排路径呈现“中速下降—高速下降—低速下降”3个阶段特征。2040年前, 清洁能源发电成本快速下降, 推动电源结构日益清洁化, 碳减排速率较快; 随着终端电气化水平逐渐提高和清洁能源发展规模化、全球化效应凸显, 碳减排速率达到峰值, 年均减排约11亿t CO₂; 2050年后, 全球碳排放量得到有效控制, 进一步减排难度加大, 减排速率趋缓。3阶段减排路径符合清洁能源发展规律, 有效促进全球实现2℃温控目标。

3) 全球能源互联网情景呈现能源需求总量高、清洁程度高、电气化水平高的特点。各国特别是发展中国家的经济和社会发展的能源电力需求持续增长,支撑全球经济发展的同时实现经济发展与碳排放逐渐脱钩。预计2050年全球清洁能源发电量占总发电量比例超过80%。电力逐渐成为终端能源消费的核心载体,2050年全球用电量增至62万亿kWh,电能占终端能源消费比例增至50%左右。

参考文献

- [1] United Nations Environmental Programme. Emissions gap report 2018[R]. Nairobi: UNEP, 2018.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. New York: IPCC, 2013.
- [3] 高新宇. 北京市可再生能源综合规划模型与政策研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [4] International Energy Agency. World energy outlook 2018[R]. Paris: IEA, 2018.
- [5] Environmental Impact Assessment. International energy outlook 2019[R]. Washington, DC: EIA, 2019.
- [6] Equinor. Energy perspectives 2019: Long-term macro and market outlook[R]. Stavanger: Equinor, 2019.
- [7] Exxon Mobil. Outlook for energy: A perspective to 2040[R]. Irving: Exxon Mobil, 2018.
- [8] BP. BP energy outlook: 2019 edition[R]. London: BP, 2019.
- [9] Institute of Energy Economics, Japan. IEEJ outlook 2019: Energy transition and a thorny path for 3E challenges[R]. Tokyo: IEEJ, 2018.
- [10] World Energy Council. World energy scenarios 2019: Exploring innovation pathways to 2040[R]. London: WEC, 2019.
- [11] Shell. Shell scenarios sky: Meeting the goals of the Paris Agreement[R]. Houston: Shell, 2018.
- [12] DNV-GL. Energy Transition Outlook 2019: A global and regional forecast to 2050[R]. Høvik: DNV-GL, 2019.
- [13] International Renewable Energy Agency. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition)[R]. Abu Dhabi: IRENA, 2019.
- [14] 李江涛, 张春成, 翁玉艳, 等. 基于情景的世界能源展望归纳研究(2019)[J]. 能源, 2019(8): 65-69.
- [15] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [16] 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.
- [17] 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).
- [18] 刘固望. 部门终端能源消费模型及其应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [19] HUO H, ZHANG Q, HE K B, et al. Vehicle-use intensity in China: Current status and future trend[J]. Energy Policy, 2012, 43: 6-16.
- [20] 王中阳, 王威, 戴建卓, 等. 基于弹性系数法和千人保有量法的陕西省电动汽车保有量的预测[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 142-147.
WANG Zhongyang, WANG Wei, DAI Jianzhuo, et al. Forecasting of electric vehicle quantity based on the elastic coefficient and Shaanxi vehicles ownership per thousand people method[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 142-147(in Chinese).
- [21] 刘晓欣, 普碧才, 刘镇, 等. 电动汽车保有量预测研究现状[J]. 云南电力技术, 2017, 45(2): 30-33.
LIU Xiaoxin, PU Bica, LIU Zhen, et al. Present research situation of electric vehicle number forecast[J]. Yunnan Electric Power, 2017, 45(2): 30-33(in Chinese).
- [22] TAN X, ZHAO Z J, LIU C Y, et al. Energy demand prediction of the building sector based on induced kernel method and MESSAGE model[J]. Chinese Journal of Urban and Environmental Studies, Accepted, 2019.

附录A 全球能源互联网情景的能源需求

表A1 全球能源互联网情景

Table A1 GEI scenario

续表

能源类型	能源需求/亿t标煤		
	2016	2030	2050
一次能源需求	188	196	197
煤炭	53	27	15
石油	62	69	32
天然气	43	53	56
核能	3	5	6
水能	5	7	14
生物质能	19	16	16
风能	1	7	21
地热能	0	0	0
太阳能	0	12	37
其他可再生能源	0	0	0
发电/制热部门	67	78	107
煤炭	33	17	4
石油	4	2	0
天然气	18	28	28
核能	3	5	6
水能	5	7	14
生物质能	3	3	2
风能	1	7	21
地热能	0	0	0
太阳能	0	9	31
光热	0	0	0
其他可再生能源	0	0	0
终端能源需求	136	150	154
煤炭	15	8	5
石油	55	61	29
天然气	21	19	20
电能	26	40	73
热能	4	5	5
生物质能	15	8	8
其他可再生能源	1	7	10
氢能	0	0	3
工业部门	40	49	60
煤炭	12	6	3
石油	5	12	7
天然气	8	4	6
电能	11	17	29
热能	2	2	2
生物质能	3	4	7
其他可再生能源	0	2	5
氢能	0	0	2

能源类型	能源需求/亿t标煤		
	2016	2030	2050
交通部门	39	38	23
石油	36	34	11
电能	0	1	7
生物质能	1	1	1
天然气	1	1	3
氢能	0	0	1
建筑部门	43	50	55
煤炭	2	0	0
石油	4	4	2
天然气	9	13	7
电能	14	22	37
热能	2	3	3
生物质能	11	3	0
其他可再生能源	1	5	5
其他	14	13	15
排放量/亿t CO₂	323	284	110

收稿日期：2019-10-30；修回日期：2019-12-02。



侯方心

作者简介：

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。

张士宁（1987），男，博士，研究方向为全球能源发展战略规划、综合评价、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。

赵子健（1992），女，博士，研究方向为大气环境、气候变化、能源规划，E-mail: zijian-zhao@geidco.org。

陈小彤（1993），女，博士，研究方向为大气环境、气候变化、环境系统分析等，E-mail: xiaotong-chen@geidco.org。

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

黄瀚（1974），男，美国注册电气工程师，研究方向为电力系统规划、运行与控制、智能电网技术、新能源发电与并网技术等，E-mail: han-huang@geidco.org。

杨方（1981），女，高级工程师，研究方向为气候变化、电力系统、能源与环境等。通信作者，E-mail: fang-yang1@geidco.org。

谭锋（1986），男，硕士，研究方向为水电工程建设造价、环境系统分析等，E-mail: 543295970@qq.com。

（责任编辑 张宇）