

全球碳中和形势盘点与发展指数研究

张士宁^{1,2}, 谭新^{1,2}, 侯方心^{1,2}, 杨方^{1,2*}, 任宏涛³

(1. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031;

2. 全球能源互联网集团有限公司, 北京市 西城区 100031; 3. 华东理工大学商学院, 上海市 徐汇区 200237)

Research on Global Carbon Neutrality Target and Development Index

ZHANG Shining^{1,2}, TAN Xin^{1,2}, HOU Fangxin^{1,2}, YANG Fang^{1,2*}, REN Hongtao³

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

2. Global Energy Interconnection Group Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100031, China;

3. School of Business, East China University of Science and Technology, Xuhui District, Shanghai 200237, China)

Abstract: To address climate change, countries have successively proposed carbon neutral goals, and China has put forward a long-term goal in 2020 to achieve carbon neutrality before 2060. This study first analyzes the global carbon neutrality target, and analyzes the nationally determined contributions (NDCs), implementation, and NDC updates in 2020. Second, the Global Carbon Neutrality Development Index is proposed from the three sub-indexes of “mitigation ambition,” “action performance,” and “pressure-bearing” in addressing climate change, aiming to evaluate the country’s carbon neutrality process and performance. Finally, a comprehensive evaluation was performed for 50 countries that covered more than 85% of global carbon emissions and announced carbon neutrality targets. The results demonstrate that EU countries are at the forefront worldwide in terms of mitigation ambition, action performance, and pressure-bearing, leading to global carbon neutrality progress; China ranks first among developing countries and has set a good example for global carbon neutrality; more than 3/4 of the countries have a serious lag in NDC implementation. To achieve the global carbon neutrality target, it is urgent to strengthen the NDCs with strict implementation.

Keywords: climate change; carbon neutrality; carbon neutrality development index; NDC; comprehensive assessment

摘要: 为应对气候变化, 各国陆续提出碳中和目标, 中国在2020年提出了努力争取2060年前实现碳中和的远期目标。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71961137012); 全球能源互联网集团有限公司科技项目 (101662227)。

National Natural Science Foundation of China(71961137012); Science and Technology Foundation of Global Energy Interconnection Group Co.,Ltd.(101662227).

首先梳理了全球碳中和形势, 并分析了各国自主贡献目标雄心、具体履约情况以及2020年更新的国家自主贡献目标。其次, 从应对气候变化“责任心”、“行动力”、“承压力”3个维度构建了全球碳中和发展指数, 旨在评估各国碳中和进程及绩效。最后, 对覆盖全球85%以上碳排放总量且提出碳中和目标的共50个国家进行了综合评价。结果表明: 欧盟各国在责任心、行动力和承压力方面均走在世界前列, 引领全球碳中和形势; 中国在发展中国家中排在首位, 为努力实现全球碳中和做出了榜样; 超过3/4的国家在近期国家自主贡献目标履约方面存在严重不足。实现碳中和亟需强化自主贡献目标, 并严格落实完成减排承诺。

关键词: 气候变化; 碳中和; 碳中和发展指数; 国家自主贡献目标; 综合评估

0 引言

2020年9月22日, 中国在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布, 将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 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^[1]。2020年12月12日, 中国在气候雄心峰会上宣布, 到2030年, 中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上, 非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右, 森林蓄积量将比2005年增加60亿m³, 风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿kW以上^[2]。

全球加速碳减排, 实现碳中和, 是应对气候变化, 将全球温升控制在2 °C甚至1.5 °C目标的内在要求^[3-4]。为此, 各国亟需提升国家自主贡献 (NDC) 目标, 设定并努力实现各自碳中和目标。在此形势下,

全球各国陆续提出碳中和目标，但这些国家多数为发达国家，或碳排放量较小的国家^[5]。作为发展中的排放大国，中国更新了自主贡献目标，并提出碳中和远期目标，成为世界前五大排放国中第一个提出碳中和目标的国家。实现碳中和，本身也是中国现代化建设的重要内容，对加快促进生态文明建设、保障能源安全高效利用、推动经济转型升级、引领应对气候变化都具有重大意义^[6]。当前各国陆续提出碳中和远期目标，但在碳中和实现时间、温室气体覆盖类别、具备法律效力程度等方面存在很大差异^[5]。各国减排目标履约情况也存在较大差别。根据各国实际发展情况，实现碳中和目标过程中面临的压力各不相同，建立客观、系统、全面的评价体系评估各国碳中和目标情况，对了解当前全球碳中和形势和进展具有重要意义。

指数类评价体系能够系统、全面评价事物发展的进程与趋势，在经济、社会、能源、环境等领域应用广泛^[7-12]。世界能源理事会发布了“能源三难困境指数”（energy trilemma index, ETI）^[11]，用来评估各国如何实现能源安全、能源平等和环境可持续这3个指标的平衡；全球能源互联网发展合作组织发布了全球能源互联网发展指数（global energy interconnection development index, GEIDI）^[12]，多维度全面评估各国绿色低碳发展进程。“碳达成率”概念^[13]的提出，为中国城市达成“绿色60”目标的综合排序提供了量化方法，为制定“碳达峰、碳中和”战略和路径提供了参考。但截至目前，仍无对全球各国碳中和发展进程和绩效程度进行综合量化评价的方法和结果。本文综合考虑各国远期碳中和目标宣示、近期减排行动履约及当前发展基础等影响因素，构建了多维度、全方面的综合评价体系。

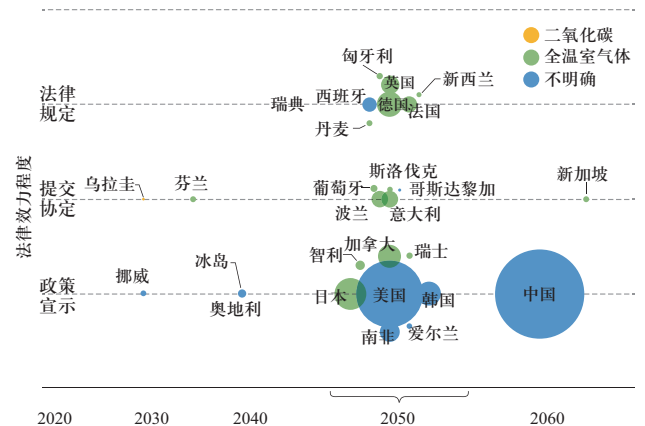
首先，本文评述全球碳中和形势，并对各国自主贡献承诺、具体履约情况以及最近更新情况进行盘点分析。其次，本文系统性地分析影响碳中和目标实现的主要因素及全球现状，构建全球碳中和发展指数体系，刻画各区域和各国应对气候变化、实现碳中和目标的雄心和成效。最后，本文对英国、美国和中国进行详细评述，为全球其他国家在实现碳中和目标进程中提供参考经验。

1 全球碳中和形势盘点

1.1 碳中和目标

碳中和对全球应对气候变化、实现《巴黎协定》

目标具有重要意义。IPCC研究表明，实现《巴黎协定》2℃温控目标需要全球2070年前实现二氧化碳中和，实现1.5℃温控目标需要全球2050年左右实现二氧化碳中和^[4]。当前形势下，各国碳中和战略行动在目标实现时间、温室气体覆盖范围以及是否具备法律效力方面存在差异^[5, 14]，如图1所示。



注：图中圆圈大小代表碳排放占全球比重，不同颜色代表碳中和温室气体覆盖范围。

图1 全球碳中和形势盘点图

Fig. 1 Summary of global carbon neutrality targets

从碳中和目标的时间来看，2019年之前少数国家提出碳中和目标，包括瑞典、挪威等气候行动积极性较强的发达国家。2019年，以法国、德国为代表的欧盟国家紧随其后提出各自目标，自此全球进入碳中和竞赛阶段。在欧盟提出碳中和后，中国提出努力争取2060年前实现碳中和的目标，日本、韩国随后提出2050年实现碳中和。提出碳中和目标的国家正从欧洲逐步扩散至亚洲乃至全球，从发达国家辐射至发展中国家。从图1可以看出，多数国家宣示在2050年实现碳中和，这与全球实现1.5℃温控目标要求相一致。仅有6个国家宣示2050年前实现碳中和目标，总碳排放量占全球比重约0.5%。

从温室气体覆盖范围来看，大多数提出碳中和目标的国家没有严格遵循IPCC的定义，而是分别采用了一种或多种表述，主要分为全温室气体中和、二氧化碳中和以及未明确温室气体类别3类。提出碳中和目标的国家中有1/3数量的国家根据自身发展阶段提出相对保守的表述，并未明确温室气体类别或表述仅针对二氧化碳温室气体；2/3数量的国家提出实现全温室气体中和，几乎全部为欧洲国家。就实现《巴黎协定》温控目标而言，全球需要全部温室气体中和。因此，本文碳中和发展指数评价覆盖全部温室气体。

从法律效力程度来看,以立法的形式提出碳中和目标是法律约束力最强的目标形式,一般发生在具有较完善的气候变化应对机构、气候立法的国家或地区,包括瑞典、德国等欧盟国家及英国、新西兰^[5]。提交协定是指向UNFCCC提交关于碳排放净零的中长期战略,主要涉及受气候影响较大的岛屿国家。政策宣示主要是指以议会提议、领导人在公开场合宣布或写入国家战略规划等方式正式承诺碳中和,代表政府强烈的政策意向,包括中国在内的大部分国家都以这种方式提出碳中和目标。对于多数国家而言,碳中和进入法律效力阶段仍有困难。为确保实现全球碳中和目标,各国亟需效仿施行碳中和立法的国家,积极推动建立或完善气候相关法规,使碳中和目标具备更强约束力,不易受政府换届、决策者更迭等因素影响。

1.2 碳减排履约

各国提交的自主贡献(nationally determined contribution, NDC)目标具备法律效力,NDC目标当前履约情况会影响远期碳中和目标的实现。从目前NDC目标雄心与履约情况来看,全球碳减排形势不容乐观。

NDC目标雄心方面,各国提交的NDC目标距离实现《巴黎协定》2℃、1.5℃目标相距甚远。根据气候行动追踪项目(Climate Action Tracker, CAT)^[15]按“公平份额”评级及本文数据资料统计^①,本研究选取的50个国家(覆盖全球85%以上碳排放)中,1/3的国家NDC目标雄心属于高度不足,严重不符合按照公平份额分配的减排目标。仅有6个国家NDC目标符合《巴黎协定》2℃目标要求。NDC目标履约方面,有超过一半国家碳减排拐点仍未出现,仅有20%数量的国家减排目标完成一半,NDC目标履约情况严重滞后^[17]。NDC强化目标方面,当前共有75个国家向UNFCCC提交最新减排目标^[15],数量约占《巴黎协定》缔约国总数40%,但即便这些减排计划全部落实,也仅可使2030年全球碳排放较2010年水平下降约1%,减排力度仍然不足^[18]。按照当前NDC目标减排水平,21世纪末全球气温仍有可能上升3.2℃以上。若要实现2℃目标成本最优减排路径,全球需要将NDC目标减排量提高

3倍。若要实现1.5℃目标,全球需要将NDC目标减排量提高4~5倍^[19-20]。

1.3 碳中和压力

实现碳中和目标要求碳强度和能源碳排放强度实现近零,这意味着经济结构需要转向能耗强度低的高端制造业和服务业。从本研究的50个国家的统计结果来看,一半以上的国家单位能源消费碳排放超过2 t(按吨油当量计),碳排放与经济发展仍存在强的耦合关系,这其中不仅包括中国、印度等发展中大国,也包括美国、日本、德国等发达国家^[21-22]。

全球能源强度总体是趋于下降的,1980—2015年间,全球能源强度下降了接近三分之一^[23],这得益于生产效率的提升、产业发展、清洁能源利用等因素^[24]。从统计结果来看,本研究的50个国家中,一半以上数量的国家服务业比重在60%以下,经济结构转型压力较大,其中包括中国、印度等碳排放较大的发展中国家。仅美国、英国、法国、瑞士第三产业比重达到70%以上。

2 全球碳中和发展指数及其计算方法

2.1 全球碳中和发展指数内涵及指标体系

全球碳中和发展指数(Global Carbon Neutrality Development Index, GCNDI)旨在刻画各国碳中和发展进程和绩效程度,综合反映各国应对气候变化的雄心和成效。全球碳中和发展指数由“责任心”、“行动力”和“承压能力”3个专项因子构成,体现各国提出碳中和目标的雄心程度、近中期应对气候变化行动进展以及以当前发展水平实现碳中和目标所承受的压力。各国碳中和发展指数三难维度框架见图2。全球碳中和发展指数框架及指标见图3。全球碳中和发展指数指标评定标准及数据来源见附录A。

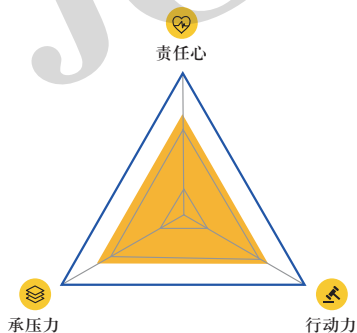


图2 全球碳中和发展指数专项因子

Fig. 2 Sub-indexes of Global Carbon Neutrality Development Index

① 需要指出,本文NDC力度评估来源于欧盟的气候行动追踪项目(CAT),CAT研究考虑的分配方案较为有限,同时CAT主要基于2030年当年这一时间点对NDC排放和公平分配配额比较进行分级^[16],没有体现过程中的努力,在一定程度上有失指标客观性。力度评估将会根据更多研究成果,进一步丰富数据来源。



图3 全球碳中和发展指数框架图

Fig. 3 Framework of Global Carbon Neutrality Development Index

责任心因子旨在刻画各国对于实现碳中和的责任担当。在应对气候变化的全球性挑战中，没有哪一个国家能够独善其身，只有主动担当才有作为，只有行动才有成效。各国应该遵循共同但有区别的责任原则，根据国情和能力，最大程度强化行动，携手应对全球挑战，形成各尽所能的气候治理新体系。责任心因子对各国是否提出碳中和目标、目标实现时间的先后、温室气体覆盖类别和目标具有法律效力程度4个指标进行绩效评估。需要指出，本文选择“目标实现时间先后”作为责任心指标之一在一定程度上未能体现《巴黎协定》“共同但有区别的责任原则”，从碳达峰到碳中和的时间多少更能体现责任担当，但考虑到部分国家未明确碳达峰时间，综合考虑指标数据可获得性及主要考虑未来减排责任担当，本文最终采用目标实现时间先后作为指标之一，未来随着更多国家明确碳达峰时间表，指标体系可以相应更新。

行动力因子旨在刻画各国面向实现碳中和的近期行动绩效。减排雄心和履约情况一定程度上会影响近期碳中和目标的实现。当前各国根据自身情况自下而上提交的NDC目标差异明显，部分国家甚至未明确提出减排目标，部分发展中国家考虑到近中期经济发展仍将带来能源消费及碳排放增长，提出的减排目标仅是相对于基准情景（business as usual, BAU）的减排目标。行动力因子针对各国NDC目标与全球温控目标一致程度、NDC目标实际完成情况、近期是否强化NDC减排目标进行绩效评估，刻画近中期应对气候变化的行动力绩效。

承压力因子旨在刻画各国当前面对实现碳中和的压力程度。实现碳中和意味着经济发展与能源消费脱钩，能源消费与碳排放脱钩。碳强度降至接近零的水平，要求能源供应高度清洁化，经济结构转向能耗水平低的高端制造业或服务业。承压力因子对各国当前GDP能源强度水平、能源碳排放强度和服务业比重进行绩效评估，反映各国当前实现碳中和承受的压力。

2.2 计算方法和流程

2.2.1 指标数据标准化方法

本研究采用标准极差法、对数极差法、区间隶属度方法对指标数据进行标准化处理。数据标准化后的指标分值介于0~100之间。

对于正向指标，标准极差法公式为

$$x_{mi} = 100 \times \frac{I_{mi} - \min(I_i)}{\max(I_i) - \min(I_i)} \quad (1)$$

对于逆向指标，标准极差法公式为

$$x_{mi} = 100 \times \frac{\max(I_i) - I_{mi}}{\max(I_i) - \min(I_i)} \quad (2)$$

对于指标统计数据相对集中、区分度很小的情况，标准极差法容易造成数据标准化数值过度集中在某一值附近，无明显区分度，导致评估失真，本文采用对数极差法处理^[12]。对于正向指标，对数极差法公式为

$$x_{mi} = 100 \times \frac{\lg[C \times I_{mi} + s] - \lg[C \times \min(I_i) + s]}{\lg[C \times \max(I_i) + s] - \lg[C \times \min(I_i) + s]} \quad (3)$$

对于逆向指标，对数极差法公式为

$$x_{mi} = 100 \times \frac{\lg[C \times \max(I_i) + s] - \lg[C \times I_{mi} + s]}{\lg[C \times \max(I_i) + s] - \lg[C \times \min(I_i) + s]} \quad (4)$$

式(1)一式(4)中： x_{mi} 为国家 m 指标 i 标准化后的分值； I_{mi} 为国家 m 指标 i 的原始数据值； $\min(I_i)$ 为 m 个统计国家中指标 i 的原始数据最小值； $\max(I_i)$ 为 m 个统计国家中指标 i 的原始数据最大值； C 为指标原始数据值放大系数； s 为平移系数。

区间隶属度法公式为

$$x_{mi} = \begin{cases} a, & I_{mi} \geq L_2 \\ b, & L_1 \leq I_{mi} < L_2 \\ c, & I_{mi} < L_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中： L_1 、 L_2 为指标区间分段界限值； a 、 b 、 c 为指标标准化数值。

图3中10个指标正向/逆向性、取值范围、标准化处理方式见表1。

2.2.2 指数评价计算

根据2.2.1节介绍的数据标准化方法分别对统计国家的10项三级指标（见表1）进行标准化处理，形成指标矩阵 X_{MP} 。通过层次分析法，根据每个专项因子下评价指标对专项因子影响程度，设置影响权重值，各二级指标及三级指标权重见表1。其中，三级指标按等权重考虑，责任心因子中碳中和目标作为主从型乘法因子（0,1）与其他3个三级指标标准化结果的

表1 指标权重及数据标准化处理方式

Table 1 Indicator's weight and its normalization methods

专项因子及权重	三级指标及权重	正向/逆向	取值范围	标准化方法
责任心 (0.4)	提出碳中和目标 (0,1)	正向	2类 (是、否)	区间隶属度
	目标实现时间 (1/3)	逆向	5个区间 (由2030、2050、2060、2070年共4个时间点划分)	区间隶属度
	温室气体类别 (1/3)	正向	3类 (不明确、仅CO ₂ 、全部温室气体)	区间隶属度
	法律效力程度 (1/3)	正向	3类 (政策宣示、提交协定、法律规定)	区间隶属度
行动力 (0.4)	NDC目标雄心 (1/3)	正向	6类 (严重不足、高度不足、不足、兼容2℃、兼容1.5℃、榜样)	区间隶属度
	NDC目标履约 (1/3)	正向	0~1	标准极差法
	NDC强化目标 (1/3)	正向	4类 (未提交更新、提交更新、宣示强化目标、提交强化目标)	标准极差法
承压力 (0.2)	GDP能源强度 (1/3)	逆向	0~∞	标准极差法
	能源碳强度 (1/3)	逆向	0~∞	对数极差法
	服务业比重 (1/3)	正向	0~1	标准极差法

加权平均值相乘作为责任心因子的专项因子分值，即若未提出碳中和远期目标，则责任心因子评定为0分。二级指标权重方面，按照实现碳中和责任心与行动力并重、承压力作为补充考虑，按照国际综合评价常用的德尔菲法，整合10位专家意见确定责任心、行动力、承压力因子三者权重分别为0.4、0.4、0.2，最终形成三级指标权重矩阵 W_{PN} 及专项因子权重矩阵 K_{N1} ，计算全球碳中和发展指数。专项因子 S_{MN} 分值及全球碳中和发展指数 D_{M1} 计算公式分别为

$$S_{MN} = X_{MP} \times W_{PN} \quad (6)$$

$$D_{M1} = S_{MN} \times K_{N1} \quad (7)$$

式中： X_{MP} 是标准化的指标矩阵； W_{PN} 是评价指标权重矩阵； K_{N1} 是专项因子权重矩阵。

$$X_{MP} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} & \dots & x_{1P} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} & \dots & x_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mp} & \dots & x_{mP} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M1} & \dots & x_{Mp} & \dots & x_{MP} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： M 为国家数目； P 为指标数目； N 为专项因子数目。

评价体系构建、指标数据处理、权重矩阵和指数排名计算流程如图4所示。



图4 全球碳中和发展指数计算流程图

Fig. 4 Flowchart of Global Carbon Neutrality Development Index calculation

3 结果分析

3.1 全球综合排名及分析

按照覆盖全球85%碳排放总量及宣示碳中和目标国家，最终确定对全球50个国家进行碳中和发展指数评估。根据第2章所述指数评价方法，综合评估50个国家在实现碳中和目标过程中的责任心、行动力和承压力绩效水平。各国碳中和发展指数排名如图5所示。

综合排名前10的国家是瑞典、英国、丹麦、斯洛伐克、匈牙利、德国、法国、芬兰、意大利、波兰，全部为欧洲国家。前20名中，除日本、新西兰、中国、智利、新加坡外，其余也全部为欧洲国家。欧盟委员会于2018年11月首次提出2050年实现碳中和的欧洲愿景，在《欧洲气候法》的框架下，欧盟委员会提出的全温室气体净零排放具有法律约束力，并且目标与全球1.5℃温控目标一致，成为全球气候治理的引领者。部分欧洲国家甚至提出早于2050年实现碳中和，如瑞典2045年、奥地利和冰岛2040年、匈牙利2035年、挪威2030年。需要指出，欧盟27国碳排放占全球比重仅为8.4%，全部欧洲国家碳排放占比也仅为15.3%，因此仅靠欧洲实现碳中和对全球应对气候变化作用有限。欧洲提出碳中和雄心目标更重要的意义体现在促进全球主要经济体和碳排放大国陆续提出碳中和目标，如中国（28.4%）、美国（14.7%）、日本

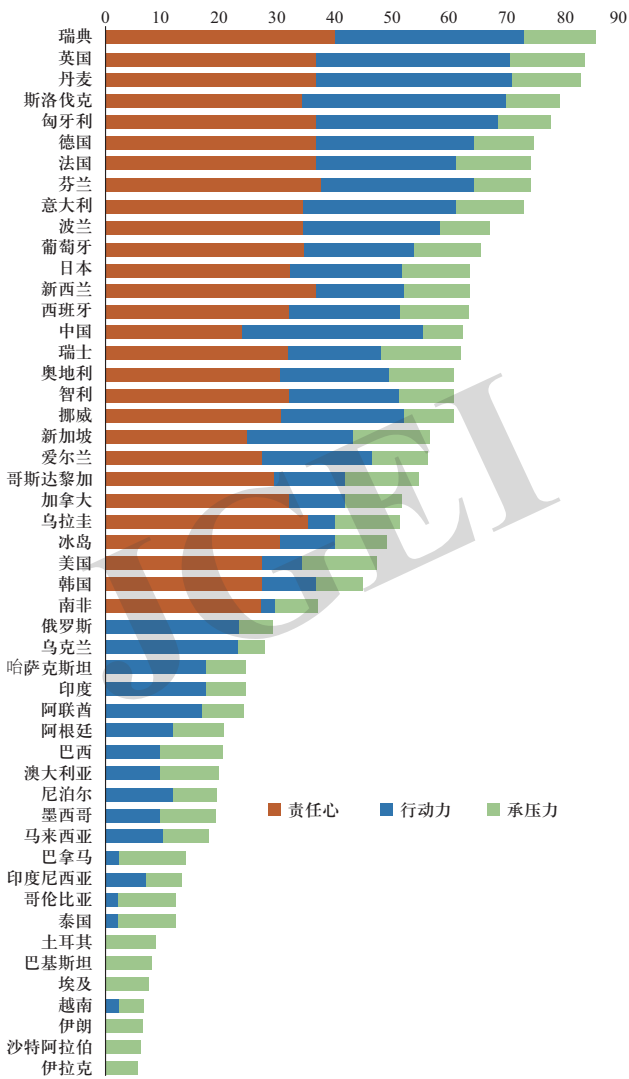


图5 全球碳中和发展指数排名

Fig. 5 Global Carbon Neutrality Development Index ranking

(3.2%)、韩国(1.8%)等,促进全球应对气候变化协同治理、加快碳中和进程。

埃及、伊朗、沙特阿拉伯、伊拉克等西亚北非国家碳中和发展指数综合排名在50个国家的后5位,主要原因是作为碳排放比较大的国家却并未提出碳中和远期目标;同时以上四国的NDC目标也并未明确提出绝对量减排目标,因此在减排行动力方面相比其他明确减排目标的国家欠缺;西亚北非各国能源结构以油气为主,因此能源碳强度高,面临能源转型压力较大。上述四国碳排放在全球占比约4.3%,约为欧盟国家碳排放总量的一半,对全球实现碳中和有着不可忽视的影响。当前西亚北非各国实现碳中和责任心欠缺、行动力不足、承压能力较大。

中南美洲各国碳中和发展指数差异化明显,提出碳中和目标的国家碳排放量占比低。智利、哥斯达黎加、乌拉圭等国均提出了不同程度的碳中和目标,综合排名在前25位。而碳排放量相对较大的巴西、阿根廷、哥伦比亚等国仍未明确提出碳中和目标,综合排名在35名以后。中南美洲碳排放总量不大,约占全球的3.7%,但易受气候变化影响。巴西和阿根廷两国碳排放占中南美洲碳排放总量的一半以上,头部效应显著。因此未来中南美洲碳中和形势取决于大国的责任担当与表率作用。

3.2 重点国家分析

本节主要选取英国、美国和中国3个国家进行国别分析,排名情况见图6。

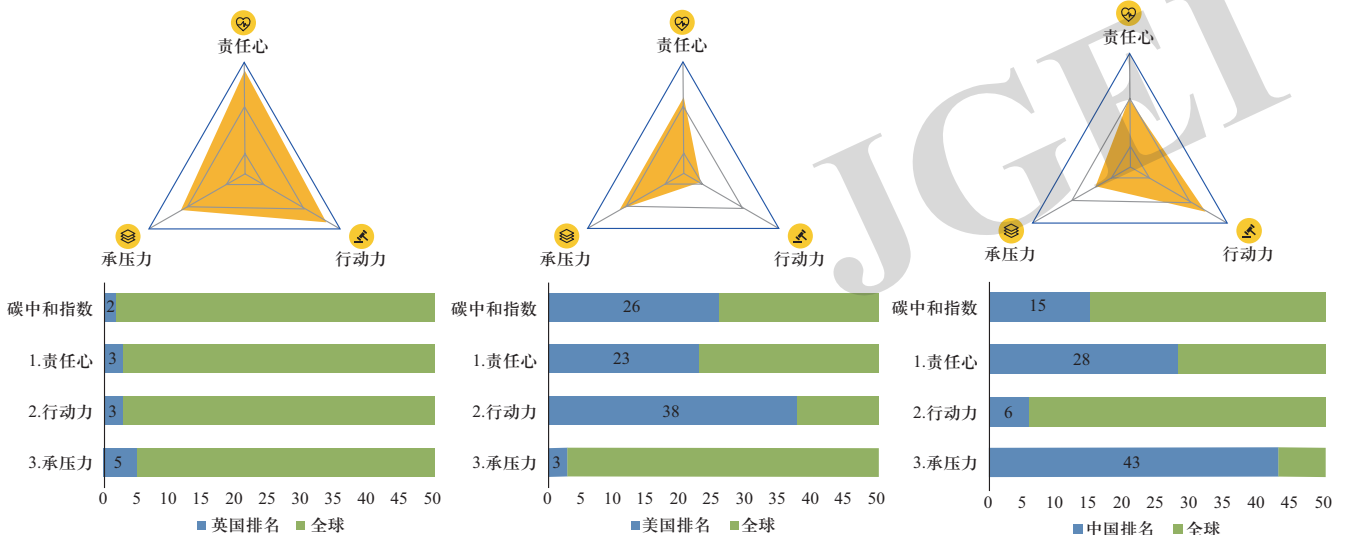


图6 英国、美国和中国碳中和发展指数专项因子分布及排名

Fig. 6 Sub-indexes score and ranking of UK, USA, and China

3.2.1 英国

英国碳中和发展指数综合排名全球第2, 责任心、行动力、承压力因子在全球分别排名第3、第3、第5, 因此英国属于在碳中和三难维度方面全面发展的国家(见图6)。虽然英国于2020年1月31日起正式脱欧, 但实现碳中和目标的雄心和行动力仍高于大部分欧盟国家, 处于全球前列。

责任心方面, 英国2019年6月新修订的《气候变化法案》生效, 提出2050年实现全温室气体中和目标。行动力方面, 根据CAT按“公平份额”评估^[15], 英国NDC目标雄心不足, 但NDC目标履约完成度处于世界前列。英国在早期NDC目标中明确2030年碳排放相比1990年减少40%, 目前已经下降35.6%, 完成度达到89%, 2030年NDC目标完成在即。为确保碳中和目标实现, 英国近期提交了更新的NDC目标, 即与1990年水平相比, 到2030年底英国将至少减少68%的温室气体排放。承压力方面, 英国是最早进行和完成工业革命的国家, 目前已经进入后工业化阶段, 服务业占比达到71%, 碳强度仅为全球平均水平的一半, 因此具备良好的碳中和发展基础。

3.2.2 美国

美国碳中和发展指数综合排名全球第26, 责任心、行动力、承压力因子在全球分别排名第23、第38、第3(见图6)。美国当前碳中和发展基础较好, 但在应对气候变化责任心和行动力方面存在不足。

责任心方面, 美国于2019年11月4日宣布启动退出《巴黎协定》程序, 于2020年11月4日正式退出, 美国退出《巴黎协定》及削减气候预算一定程度上影响了发展中国家履约能力。2021年1月20日, 拜登在就任总统首日签署行政令, 宣布美国将重新加入《巴黎协定》, 因此美国在应对气候变化态度方面存在一定不确定性。美国宣布2050年实现碳中和目标, 但并未对温室气体类别进行说明, 当前碳中和目标也不具备法律效力。行动力方面, 根据CAT按“公平份额”评估^[15], 美国NDC目标雄心等级属于严重不足, 当前NDC减排目标完成度不足一半, 截至本文发表前美国仍未向UNFCCC提交更新的国家NDC目标, 因此美国应对气候变化行动力存在严重不足。承压力方面, 美国目前已经进入后工业化阶段, 服务业占比达到77%; 依托丰富天然气资源并积极开发可再生能源, 美国碳强度和能源碳强度略低于全球平均水平, 作为全球最大经济体, 实现碳中和具备较好的发展基础。

3.2.3 中国

中国碳中和发展指数综合排名全球第15, 责任心、行动力、承压力因子在全球分别排名第28、第6、第43(见图6)。作为全球碳排放最大的国家, 中国在研究的50个国家中碳中和发展指数处于中等偏上水平, 在发展中国家中处于领先地位。其中, 承压力是中国碳中和进程中较为薄弱的一面, 而责任心和行动力均处于全球较为领先的位置。

责任心方面, 中国是前五大碳排放国中最先提出碳中和目标的国家, 起到了积极的表率作用, 随后日本、韩国相继提出碳中和目标。中国提出的2060年之前实现碳中和的目标, 远远超出了《巴黎协定》2℃温控目标下全球2065—2070年左右实现二氧化碳中和的要求, 这将可能使全球实现碳中和的时间提前5~10年^[25], 对全球气候治理起到关键性的推动作用。

行动力方面, 截至2019年底, 中国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年降低了48.1%, 相比NDC目标中提到的60%~65%, 完成度达到80%。为实现碳中和远期目标, 中国也提出了更具雄心的NDC目标, 碳达峰目标实现时间由2030年左右提至2030年前, 碳强度下降目标提至65%以上, 这意味着中国碳减排目标由相对量减排目标逐渐过渡至绝对量减排目标。应对全球气候变化行动力绩效在全球处于领先地位。

承压力方面, 中国是世界上最大的发展中国家, 经济高速和高质量发展离不开能源可靠持续供应, 而当前中国能源结构呈现“一煤独大”的特点, 碳排放总量全球最大。单位国内生产总值碳排放量达到了0.4 kg(国内生产总值按购买力平价2015年美元计), 是全球平均水平的1.5倍。单位能源消费碳排放量约3 t(按吨油当量计), 是全球平均水平的1.3倍。而现阶段中国经济服务业比重仅约为53%, 中国实现碳中和基础与大部分发达国家存在明显差距, 因此, 要实现碳中和目标, 中国在转变经济发展方式、调整能源结构、节能增效方面承受了更多压力, 需要全面发力、积极追赶, 确保碳达峰、碳中和目标如期实现。

4 结论与建议

本文对提出碳中和目标的国家进行了盘点和分析, 梳理了影响碳中和目标实现的主要因素, 并构建了全球碳中和发展指数体系, 对覆盖全球85%碳排放总量及提出碳中和目标的共50个国家进行综合评估, 分析全球各国应对气候变化、实现碳中和的责任心、

行动力和承压力绩效，主要结论如下。

1) 碳中和发展指数综合排名前10的国家全部为欧洲国家，欧洲发挥了引领全球气候治理的作用。西亚北非国家碳中和发展指数综合排名处于末位。中南美洲各国碳中和发展指数差异化明显，碳中和排名靠前的国家碳排放占比很低，而巴西、阿根廷等碳排放大国当前仍未提出碳中和目标，中南美洲实现碳中和困难较大。

2) 在实现碳中和责任心、行动力和承压力方面英国属于全面发展的国家，碳中和发展指数位列全球第2；美国应对气候变化决心存在不确定性、行动力不足，碳中和发展指数位于中游水平；中国是全球前五大排放国中第一个提出碳中和目标的国家，应对气候变化行动力处于全球领先地位，碳中和发展指数综合排名位列中上游。

3) 未来中国需要在经济发展方式、能源结构、节能增效方面积极追赶，确保近期碳达峰、远期碳中和目标实现。一是尽快制定和完善应对气候变化法律法规，建立能源气候协同治理机制，提升“责任心”。二是加快清洁能源发展速度和规模，尽早实现煤电退出及化石能源转型，确保完成国家自主贡献目标，提升“行动力”。三是加快清洁能源、特高压输电、智能电网、储能等优势技术的规模化应用，改变当前经济结构与高碳发展方式，提升碳中和进程中的“承压力”。

本文碳中和发展指数主要从远期碳中和目标宣示、近期减排行动履约、当前发展基础等三大主要因素构建了评价体系。作为全球碳中和发展综合评估的探索性工作，本文提出的碳中和发展指数结果一定程度上受指标选择和权重设置影响，未来仍有很多需要完善之处，如碳中和目标实现需要考虑各国资源禀赋差异、全球产业链、国际贸易等因素。同时，部分指标数据需要综合考虑多方来源，避免由于政治立场影响结果的可靠性，如CAT对自主贡献目标雄心评级在未来需要综合考虑分配原则及过程努力进行优化。

参考文献

[1] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(1).
 [2] 习近平在气候雄心峰会上发表重要讲话[N]. 人民日报, 2020-12-13(1).
 [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. The sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Montreal: IPCC, 2018.

[4] Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC special report-Global warming of 1.5 °C[R]. Incheon: IPCC, 2018.
 [5] 邓旭, 谢俊, 滕飞, 何谓“碳中和”? [J]. 气候变化研究进展. 2021, 17(1): 107-113.
 [6] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2060年前碳中和研究报告[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021.
 [7] International Energy Agency. World energy outlook[R]. Paris: IEA, 2011.
 [8] World Economic Forum. Fostering effective energy transition[R]. Geneva: WEF, 2018.
 [9] IDDRISU I, BHATTACHARYYA S C. Sustainable energy development index: a multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 513-530.
 [10] World Economic Forum. Energy architecture performance index[R]. Geneva: WEF, 2014.
 [11] World Energy Council. World energy trilemma index 2017[R]. London: WEC, 2017.
 [12] 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).
 [13] “碳中和”中国城市进展报告2021[R]. 北京: 中国人民大学, 2021.
 [14] Climate Home News. Which countries have a net zero carbon goal?[EB/OL]. (2019-06-14)[2021-02-19]. <https://www.climatechangenews.com/2019/06/14/countries-net-zero-climate-goal/>.
 [15] Climate Action Tracker[DB/OL]. [2021-02-19]. <https://climateactiontracker.org>.
 [16] 潘勋章, 王海林. 巴黎协定下主要国家自主减排力度评估和比较[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(9): 8-15.
 [17] MICHEL D E, KURAMOCHI T, HÖHNE N, et al. Are the G20 economies making enough progress to meet their NDC targets?[J]. Energy Policy, 2019, 126: 238-250.
 [18] UNFCCC. Nationally determined contributions under the Paris Agreement. Synthesis report by the secretariat[R]. Glasgow Climate Change Conference, 2021.
 [19] United Nations Environmental Programme. Emissions gap report 2018[R]. Nairobi: UNEP, 2018.
 [20] 全球能源互联网发展合作组织. 破解危机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
 [21] International Energy Agency. CO₂ emissions from fuel combustion 2019[R]. Paris: IEA, 2020.
 [22] The World Bank. Databases[DB/OL]. [2021-02-19]. <https://databank.worldbank.org/databases>.
 [23] International Energy Agency. Data[DB/OL]. [2021-02-19]. <https://www.iea.org/data-and-statistics>.
 [24] HONG Bowen, LI Qionghui, CHEN Wanqing, et al. Supply

modes for renewable-based distributed energy systems and their applications: case studies in China[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 259-271.

[25] 解振华. 中国提出努力争取2060年前实现碳中和意味着什么[EB/OL]. (2020-09-23)[2021-02-19]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_9308251.

附录A 评定标准及数据来源

表 A1 全球碳中和发展指数指标评定标准及数据来源

Table A1 Evaluation standards and data source of indicators in Global Carbon Neutrality Development Index

专项因子	指标内容	评价标准	数据来源
责任心	提出碳中和目标	根据是否提出碳中和目标, 是取1, 否取0	[5], [14]
	目标实现时间	根据碳中和目标实现先后时间进行评定, 时间越早分值越高	[5], [14]
	温室气体类别	根据碳中和目标覆盖的温室气体类别多少评定, 覆盖的温室气体越多分值越高	[5], [14]
	法律效力程度	根据碳中和目标具有的法律效力程度评定, 进入立法阶段分值高	[5], [14]
行动力	NDC目标雄心	根据CAT按“公平份额”评定各国自主贡献目标与《巴黎协定》温控目标一致程度评定, 一致程度越强分值越高	[15],[17]
	NDC目标履约	根据NDC中提到的减排目标完成进度评定, 若碳排放仍在增长、无明确减排目标, 则评定为0分; 若减排目标正在改善, 则按照相比2030年目标的完成进度(不同水平年的按年归一化处理)进行评定, 完成进度越大, 分值越高	[15],[17]
	NDC强化目标	根据是否提交更新NDC目标及NDC目标在CAT中的强化程度进行评定, 未提交更新NDC评定为0分, 提交更新的NDC目标越强分值越高	[15],[18]
承压力	GDP能源强度	一次能源消费总量(TPES)与GDP之比, 根据GDP能源强度大小进行评定, 能源强度越小分值越高	[21]
	能源碳强度	二氧化碳排放量与一次能源消费总量(TPES)之比, 反映能源结构清洁化程度, 能源碳强度越小分值越高	[21]
	服务业比重	根据经济结构低碳化进行评定, 服务业比重越高分值越高	[22]

收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-04-07。



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、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。

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: fangxinhou@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。

任宏涛(1977), 男, 博士, 研究方向为能源技术系统建模、能源系统多标准分析, E-mail: ren@ecust.edu.cn。

(责任编辑 李锡)