

全球能源互联网发展指数研究

张士宁, 杨方, 陆宇航, 陈星, 王利兵, 宁叶, 王昊
(全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031)

Research on Global Energy Interconnection Development Index

ZHANG Shining, YANG Fang, LU Yuhang, CHEN Xing, WANG Libing, NING Ye, WANG Hao
(Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: Mitigating climate change, addressing environmental pollution, and accelerating energy transformation have increasingly become global consensus and global energy interconnection provides solutions to accelerate global energy transformation. In order to describe the progress of global energy transition, this paper proposes a global energy interconnection development index (GEIDI), which reflects the development level of energy and power systems in each country from the three dimensions of Power Interconnection, Green & Low-Carbon and coordinated development of Energy, Economy, Social and Environment. The traditional method for data standardization is improved by the logarithmic range method adopted in this study. Compared with the traditional range method, the improved method has better applicability to the case of massive statistic countries and huge data scattering. Finally, the correlation and regional distribution characteristics of economic development, green & low-carbon development and power interconnection development are analyzed. The proposed GEIDI could provide basic analysis and forward-looking reference for governments, international organizations, enterprises, and institutions to carry out policies making, planning research, and investment consulting.

Keywords: energy transition; global energy interconnection development index; power interconnection index; green & low-carbon index; energy, economy, society and environment coordination index

摘要: 应对气候变化、解决环境污染、加快能源转型已日益成为全球共识, 全球能源互联网为加快全球能源转型提供了解决方案。为系统了解全球能源互联网在各国的发展成效和进程, 提出了全球能源互联网发展指数, 从电力互联、绿色低碳和能源经济社会环境协调发展三个维度系统反映各个国家能源电力系统发展水平。采用了对数极差法对传统数据标准化方法进行了改进, 改进的方法相比传统极差法对统计国家数量多、数据离散程度大的情况具有更好的适用性。最后分析了经济发展、绿色低碳发展及电力互联发展的相关性 & 区域分布特征和规律, 以期为各国政府、国际组织、企业、

研究咨询机构等制定政策、规划研究、投资咨询提供基础性和前瞻性参考。

关键词: 能源转型; 全球能源互联网发展指数; 电力互联指数; 绿色低碳指数; 能源经济社会环境协调发展指数

0 引言

能源是人类经济与社会发展的基础。能源不合理的开发利用导致的气候变化与环境污染等问题日益成为国际社会关切的重大问题。以大力发展可再生能源为技术路径的能源转型正逐渐成为全球共识^[1-3]。全球各国积极制定能源转型政策、加大可再生能源发展投资。截至2017年底, 至少147个国家已实施相关的可再生能源支持政策, 几乎所有国家都设定了可再生能源发展目标^[4]。截至2017年, 全球可再生能源累积投资达到2.9万亿美元。2017年可再生能源发电投资远超过化石能源发电投资, 可再生能源发电占到全球发电量净增加值的70%^[5], 全球有126个国家在电力行业制定了可再生能源目标^[4]。确保人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源已纳入联合国《2030年可持续发展议程》^[6]。总的来看, 加快清洁能源开发, 提升电气化水平, 加强电网互联互通基础设施建设, 创建绿色低碳的现代能源体系是能源转型的重要内容^[7]。

受资源禀赋、经济发展、技术创新、政策支持等多种因素影响, 各国能源转型路径、成效差异较大。欧盟在能源转型方面一直走在世界前列, 并主导了当前全球低碳经济发展的潮流^[8]。除南非、埃及等少数国家清洁能源发展相对成熟外, 非洲绝大部分国家的清洁能源开发尚处于起步阶段^[9]。南美洲水能资源丰富, 清洁能源开发以水电为主, 风能、太

太阳能等新能源开发处于起步阶段。中东地区石油资源丰富,清洁能源开发极为缓慢。量化指数可以定量评估各国能源转型成效,有利于全球各国借鉴发展经验,通过指标分析为各国能源转型提供发展重点和方向。国际能源署(international energy agency, IEA)设计提出能源发展指数(energy development index, EDI)^[10],从商品能源使用和电力可及率维度评价各国现代能源发展情况,希望国际社会关注能源贫困问题;世界经济论坛与麦肯锡联合发布了能源转型指数(energy transition index, ETI),从能源安全及可及性、环境可持续、经济发展及增长三个维度评价能源发展绩效,并通过投资、制度、技术指标等评价各国能源转型意愿,两者综合体现各国能源转型绩效水平^[11]。Insah Iddrisu 和 Subhes C. Bhattacharyya提出了能源可持续发展指数(sustainable energy development index, SEDI)^[12],从技术、经济、社会、环境、政策可持续五个维度对60个国家能源可持续进行评估,指出该指数与联合国开发计划署的人类发展指数(human development index, HDI)有较强的相关性。世界经济论坛与埃森哲联合发布全球能源架构绩效指数(energy architecture performance index, EAPI)^[13],从经济增长与发展、环境可持续、能源获取与安全角度对各国能源架构绩效进行评估。世界能源理事会发布了能源三难困境指数(energy trilemma index, ETI)^[14],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三个指标的平衡。总体来看,已发布的量化指数主要围绕能源安全、经济发展、环境可持续等维度评估各国能源转型绩效,对能源转型中举足轻重的电力领域研究不足。

构建全球能源互联网是加快推动能源转型的重要理念^[7],全球能源互联网倡导通过电力互联互通促进全球绿色低碳发展,为人类能源、经济、社会、环境可持续发展提供保障。全球能源互联网建设对能源转型具有重要的推动作用,本文在充分借鉴已发布指数中能源、经济、环境的量化指标基础上,引入电力互联评估相关指标,分别从电力互联、绿色低碳、能源经济社会协调发展三个维度系统性设计提出了全球能源互联网发展指数。针对评估国家数量众多、原始数据离散大情况下传统极差法^[10, 12, 15, 16]在数据处理方面的不足,本文进行了改进和校验。最后系统分析了全球绿色低碳发展、经济发展及电力互联的客观规律和特点。

1 全球能源互联网发展指数框架设计及内涵

全球能源互联网发展指数(global energy interconnection development index, GEIDI)是以全球能源互联网理论为基础^[7],全面反映国家和区域的电力系统、能源体系及经济社会环境协调发展程度的综合指数,用于刻画和分析世界能源转型的进程和成效。全球能源互联网发展指数由电力互联、绿色低碳和能源经济社会环境协调发展三个专项指数构成,体现了全球能源互联网推动世界能源转型的核心要义和战略价值。

绿色低碳是方向。加快推动全球主体能源从高碳向低碳发展、能源消费从化石能源为主向清洁电能为主转化是符合能源发展规律、符合各国可持续发展目标的共同选择。全球清洁能源资源十分丰富,推动主要流域水能、北极风能和赤道太阳能(“一极一道”)的开发利用,立足各国国情发展集中式和分布式清洁能源,加快形成以清洁能源为主导的能源系统是实现人类可持续发展的根本保证。

电力互联是关键。风能、太阳能、水能等清洁能源主要通过转化为电能实现高效、便捷使用,这就决定了电力系统将在未来以清洁能源为主导的能源系统中发挥关键作用。依靠特高压和智能电网技术,加快电力互联是适应各类集中式、分布式清洁能源灵活接入,满足各类用电设备接入和服务需求的必然要求。针对各国电力系统发展阶段的差异,需要在电力普及、国内电网建设、跨国跨洲电力贸易等方面统筹推进。

能源经济社会环境协调发展是根本。构建全球能源互联网促进能源转型,将推动世界能源进入清洁主导、电为中心、全球配置的新阶段,以清洁和绿色方式满足全球电力需求,从而根本解决环境污染和气候变化问题。能源可持续发展、经济包容性增长、社会平等、环境可持续发展是全球能源互联网发展的根本要求。

全球能源互联网发展指数由3个专项指数和18个量化指标构成,框架设计见图1。

绿色低碳指数是反映国家和区域的能源、电力系统低碳化和清洁化发展程度的专项指标,主要从能源生产和能源消费两个环节评估清洁能源开发和使用程度。生产侧选取非化石能源发电量占比、人均非化石能源发电装机2个指标;消费侧选取非化石能源消费占比、单位能耗碳排放、电动汽车保有量占比3个指标。

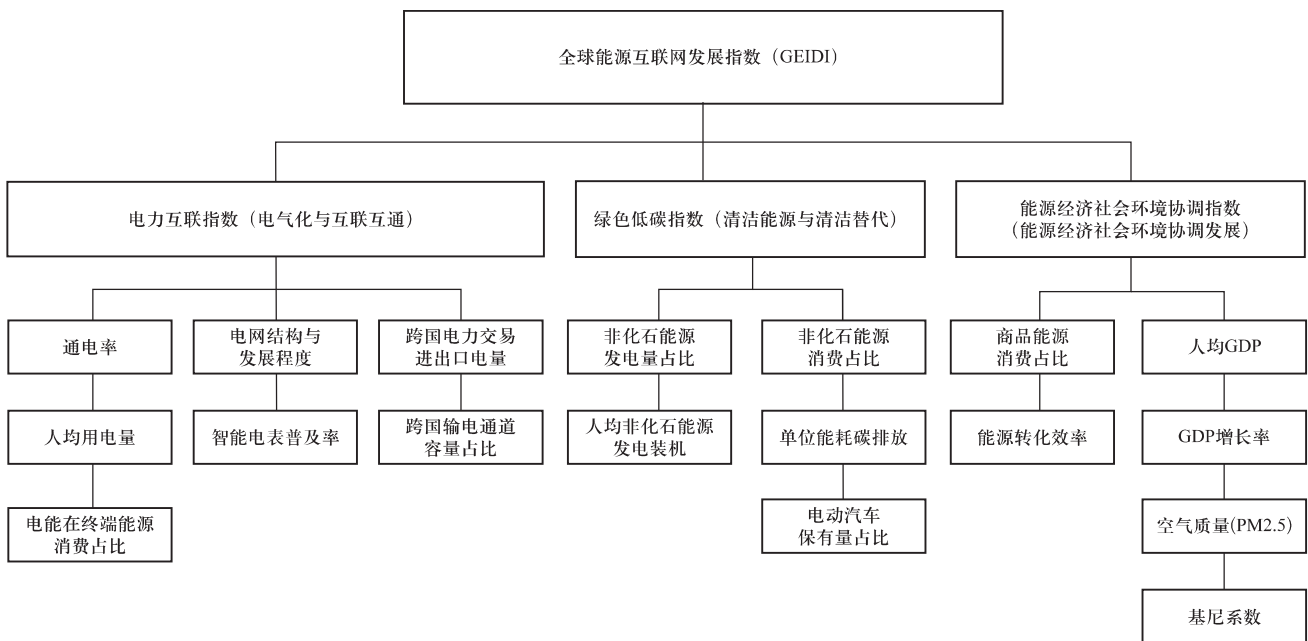


图1 全球能源互联网发展指数框架图

Fig. 1 Framework of global energy interconnection development index

电力互联指数是反映国家和区域的电力普及、内部电网结构与发展程度、电气化水平以及跨国互联互通发展程度的专项指数，按照重点领域划分为电力普及、区内电网发展和跨国互联互通三大方面。电力普及主要选取通电率、电能在终端能源消费占比、人均用电量3个指标；电网发展分别选取电网结构与发展程度、智能电表普及2个指标表征主网架和智能化发展水平；跨国互联互通主要选取跨国输电通道容量占比来评估跨国电力互济能力，选取跨国电力交易进出口电量来反映互联规模和成效。

能源经济社会环境协调指数是反映国家和区域的能源、电力系统对经济社会发展的保障程度及经济社会环境发展水平的专项指数。其中，能源保障水平主要通过能源体系的现代化程度和效率来刻画，选择商品能源消费占比和能源转化效率2个指标；协调发展程度主要借鉴国际经验，并统筹考虑处于不同发展阶段国家的实际情况，选择人均GDP、GDP增长率、空气质量（PM2.5）和基尼系数分别表征经济、环境和社会发展程度。

指标体系从三个不同维度构建，各指标的选择遵循相互独立性原则。所统计的国家三个专项指数相关系数计算结果介于0.24~0.7之间，表明各专项指数间存在一定相关性，但不具备明显强相关性，符合指标体系各指标独立性原则。

2 计算方法

2.1 指标数据标准化方法

本研究采用对数极差法、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。

对于正向指标对数极差法标准化公式设计如下：

$$x_{mi} = 100 \times \frac{\log[C \times I_{mi} + a] - \log[C \times \min(I_i) + a]}{\log[C \times \max(I_i) + a] - \log[C \times \min(I_i) + a]} \quad (1)$$

对于逆向指标对数极差法标准化公式设计如下：

$$x_{mi} = 100 \times \frac{\log[C \times \max(I_i) + a] - \log[C \times I_{mi} + a]}{\log[C \times \max(I_i) + a] - \log[C \times \min(I_i) + a]} \quad (2)$$

式中： 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 个统计国家中原始数据的最小值； $\max(I_i)$ 为 M 个统计国家中原始数据的最大值； C 为指标原始数据值放大系数； a 为平移系数。

区间隶属度法公式如下：

$$x_{mi} = \begin{cases} a; & I_{mi} \geq L_2 \\ b; & L_1 \leq I_{mi} < L_2 \\ c; & I_{mi} < L_1 \end{cases} \quad (3)$$

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。

18个指标标准化处理方式见下表1。

表 1 指标数据标准化处理方式

Table 1 Indicators and normalization methods

指标内容	标准化方法	参数
跨国电力交易进出口电量	对数极差法	C=100; a=1
电能 在终端能源消费占比		
人均用电量		
非化石能源消费占比		
非化石能源发电量占比		
单位能耗碳排放		
商品能源消费占比		
能源转化效率		
通电率		
跨国输电通道容量占比		
人均GDP		
GDP 增长率		
人均非化石能源发电装机		
空气质量 (PM2.5)		
基尼系数		
智能电表普及率	$L_1=4.6\%; L_2=22\%$	
电动汽车保有量占比	区间隶属度法	$L_1=0.03\%; L_2=0.11\%$
电网结构与发展程度		A,B,C,D四个等级

2.2 指标数据标准化方法分析

本节主要从三个方面对数据标准化方法进行分析。一是分析本研究中对数极差法的优势特点。二是分析对数极差法中参数取值差异。三是分析区间隶属度法在本研究特定指标中的应用。

在评价体系数据计算过程中，传统极差法^[10, 12, 15, 16]常被用于数据标准化处理，其计算公式如公式 (4) 所示。图 2 给出了人均用电量指标的传统极差法与对数极差法数据标准化结果对比。从图中可以看出各国人均用电量数据离散较大，最大值远偏离平均值，传统极差法计算结果表明排在第一位的人均用电量（冰岛：55054 kWh/人）标准化数值为100，而排在第二位的人均用电量（挪威：23403 kWh/人）标准化数值仅为42.5，其余多数国家标准化数值均在20分以下，造成数据标准化数值过度集中在较低值附近，无明显区分度，容易造成评估失真。为此，本研究提出采用对数极差法对数据进行处理，从图2计算结果可以看出，相比传统极差法，对数极差法得到的指标标准化

数值分布更加均匀，数据区分度更加明显。

$$x_{mi} = 100 \times \frac{I_{mi} - \min(I_i)}{\max(I_i) - \min(I_i)} \quad (4)$$

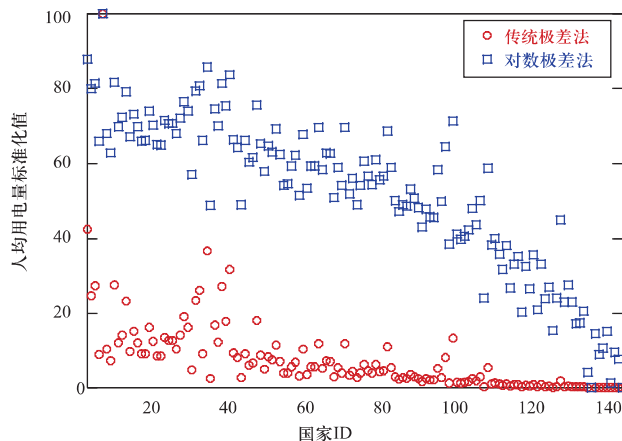


图 2 传统极差法与对数极差法标准化对比

Fig. 2 Comparison between logarithmic range method and traditional range method for data normalization

针对全球各国数据离散程度不大的指标（如电能 在终端能源消费占比），传统极差法（C=1）和对数极差法得到的结果非常相似（见图3）。从图中可以看出，各国标准化数值集中在40分以下，区分度仍然不大，不利于各国比较分析。为提高数据区分度，本研究对原始指标值进行放大处理（C=100）。从图3结果可以看出，考虑放大系数的对数极差法使得标准化数值整体上移，相比无放大系数（C=1）的情况数据分布更加均匀，区分度更加明显。表1中对数极差法处理的其他指标均采用相同的放大系数（C=100）。

多数国家的智能电表和电动汽车应用仍处于发展初期，原始数据为零或者极小，对于此类指标即使采

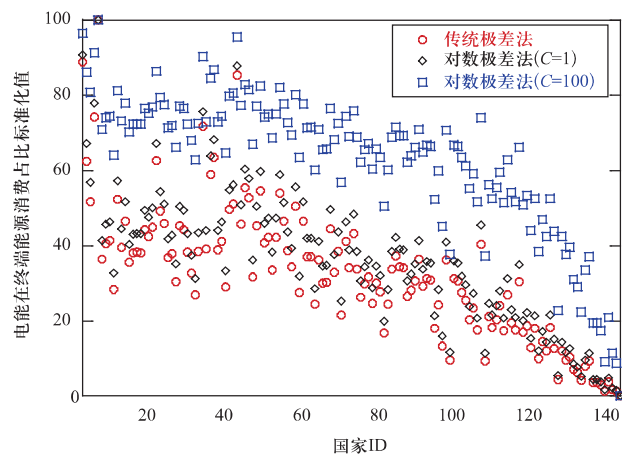


图 3 对数极差法参数取值对比

Fig. 3 Comparison of parameter setting in logarithmic range method

用放大系数处理的对数极差法，大部分国家指标标准化数值仍在20分及以下（见图4）。为体现推广电动汽车发展的国家在绿色低碳发展方面的努力和成效，通过区间隶属度法设置指标区间界限值改变标准化数值的分布，指标的区间界限值见表1，对应的标准化数值分别为20、60、80，将电动汽车发展划分为快、中、低三个阶段，评估结果见图4。电网与发展程度指标综合反映网架坚强程度，不易由单一指标进行量化，本文根据全球能源互联网发展合作组织发布的全球能源互联网骨干网架研究报告^[17]从骨干网架电压等级以及主网覆盖率两个维度将电网与发展程度分为A、B、C、D四个等级，对应的标准化数值分别设置为80、60、40、20。

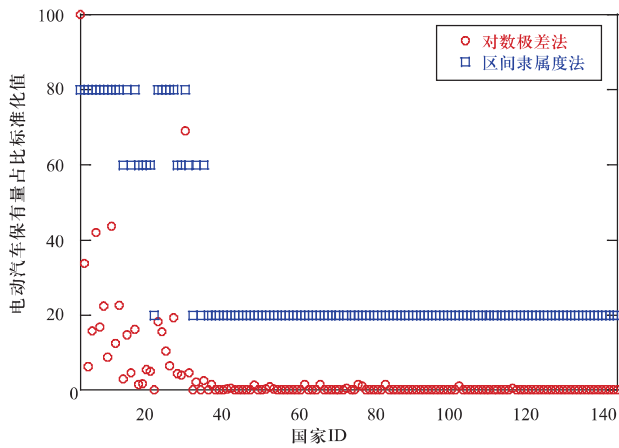


图4 区间隶属度法在电动汽车保有量占比指标中的应用
Fig. 4 Application of interval membership method on indicator of proportion of electric vehicle inventory

2.3 指数评价计算

根据2.1节介绍的数据标准化方法分别对全球统计国家的18个指标（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，根据每个专项指数下评价指标对专项指数影响程度，设置影响权重值，形成专项指标权重矩阵 $[W]_{PN}$ ，分别计算图1中三个专项指数，即电力互联指数、绿色低碳指数、能源经济社会环境协调指数。最后根据每个专项指数对综合指数的影响程度，形成专项指标权重矩阵 $[K]_N$ ，计算全球能源互联网发展指数。专项指数 $[S]_{MN}$ 及全球能源互联网发展指数 $[D]_M$ 计算公式分别如下：

$$[S]_{MN} = [X]_{MP} \times [W]_{PN} \quad (5)$$

$$[D]_M = [S]_{MN} \times [K]_N \quad (6)$$

式中： $[X]_{MP}$ 是标准化的指标矩阵； $[W]_{PN}$ 是评价指标

权重矩阵； $[K]_N$ 是专项指标权重矩阵。

$$[X]_{MP} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} & \dots & x_{1P} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} & \dots & x_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mp} & \dots & x_{mP} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \dots & x_{Mp} & \dots & x_{MP} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： M 为国家数目； P 为指标数目； N 为专项指数数目。

对于能源经济社会环境协调指数专项指标，采用主从型乘法算子方法，商品能源消费占比、能源转化效率不单独设置权重，而是以乘法算子形式与该专项指数的其他指标权重相乘体现能源在经济社会环境协调发展中的保障作用。乘法算子计算公式如下：

$$T_m = \frac{\sqrt{x_{m,13} \cdot x_{m,14}}}{100} \quad (8)$$

式中： $x_{m,13}$ ， $x_{m,14}$ 分别指商品能源消费占比、能源转化效率。

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下图5所示。

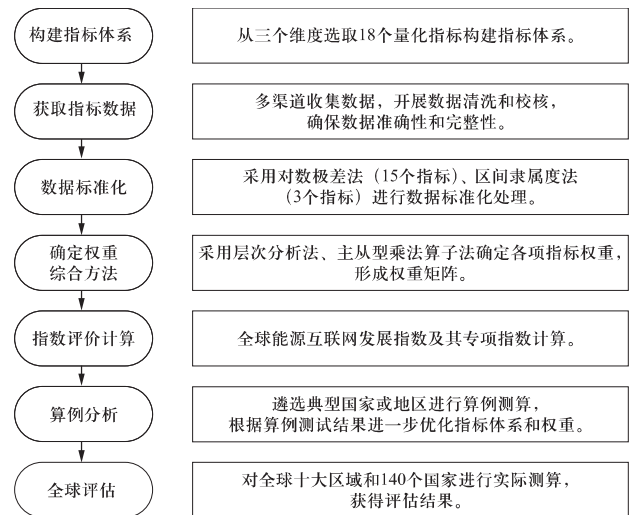


图5 全球能源互联网发展指数计算流程图

Fig. 5 Flowchart of GEIDI calculation

3 计算结果

3.1 全球各国排名及分析

考虑到数据的可获取性以及滚动更新研究需要，本文研究范围选取IEA能源统计的140个国家进行分析。根据第2节介绍的数据标准化方法和指标计算方

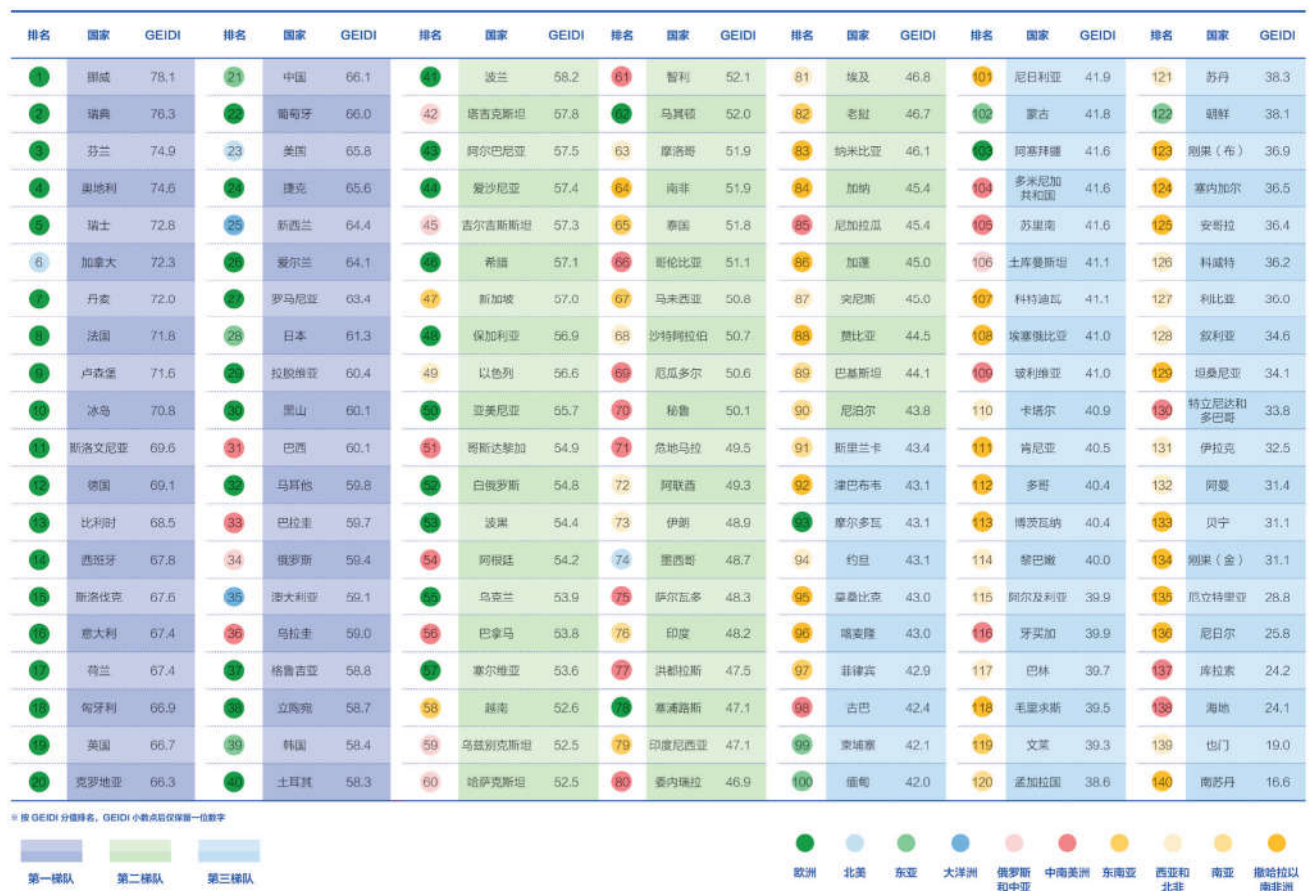
法，得到的140个国家的GEIDI分值及排名见下图6。其中排在前10名的国家分别是挪威、瑞典、芬兰、奥地利、瑞士、加拿大、丹麦、法国、卢森堡、冰岛，除加拿大外全部为欧洲国家。西亚和撒哈拉以南非洲国家排名相对靠后，主要是由于西亚各国化石能源资源丰富，消费占比较高，绿色低碳发展滞后；撒哈拉以南非洲国家电力基础设施落后，电力普及程度低，互联发展落后。全球统计的140个国家的GEIDI全球分布图见图7。

图8分别给出了挪威和中国专项指数分布和排名情况。挪威GEIDI综合得分为78.1，电力互联指数、绿色低碳指数、能源经济社会环境协调指数分布相对均匀，无明显短板，三个专项指数全球排名分别为第2、3、11。中国GEIDI综合得分为66.1，相比电力互联指数，绿色低碳指数和能源经济社会环境协调指数相对落后，三个专项指数全球排名分别为3、62、69。

电力互联方面，挪威与周边国家电力贸易活跃，2015年电力进出口总量达到29.4 TWh，占本国总用电量的26.5%；人均用电量达到23403 kWh/人^[18]，电气

化程度高，处于全球领先水平。绿色低碳发展方面，挪威非化石能源发电占比达到97.6%，清洁电力主要来自水电（95.9%）及风电（1.7%）^[18]；电动汽车发展方面处于全球领先位置，根据IEA统计数据，2017年挪威电动汽车销量市场占有率达到39%^[19]，在全球名列第一，挪威政府计划在2025年全面禁售化石燃料汽车。能源经济社会环境协调发展方面，挪威作为高度发达的工业国家，人均GDP长期处于全球前三名位置；根据世界卫生组织发布的《环境空气污染报告》^[20]，挪威PM2.5中位数仅为9 μg/m³，处于全球第10名位置；挪威社会福利体系完善，贫富差距也非常小，基尼系数仅为0.27^[21]。

电力互联方面，中国骨干网架电压等级较高，拥有全球技术领先的1100 kV特高压交流和±800 kV特高压直流技术和工程，与周边国家有多条互联通道，2015年电力进出口总量达到24.8 TWh^[8]。绿色低碳发展方面，中国大力支持电动汽车发展，2017年电动汽车销量达到58万辆，同比增长72%^[19]，中国已成为世界上最大的电动汽车市场，但中国化石能源消费占比约90%，单位能耗



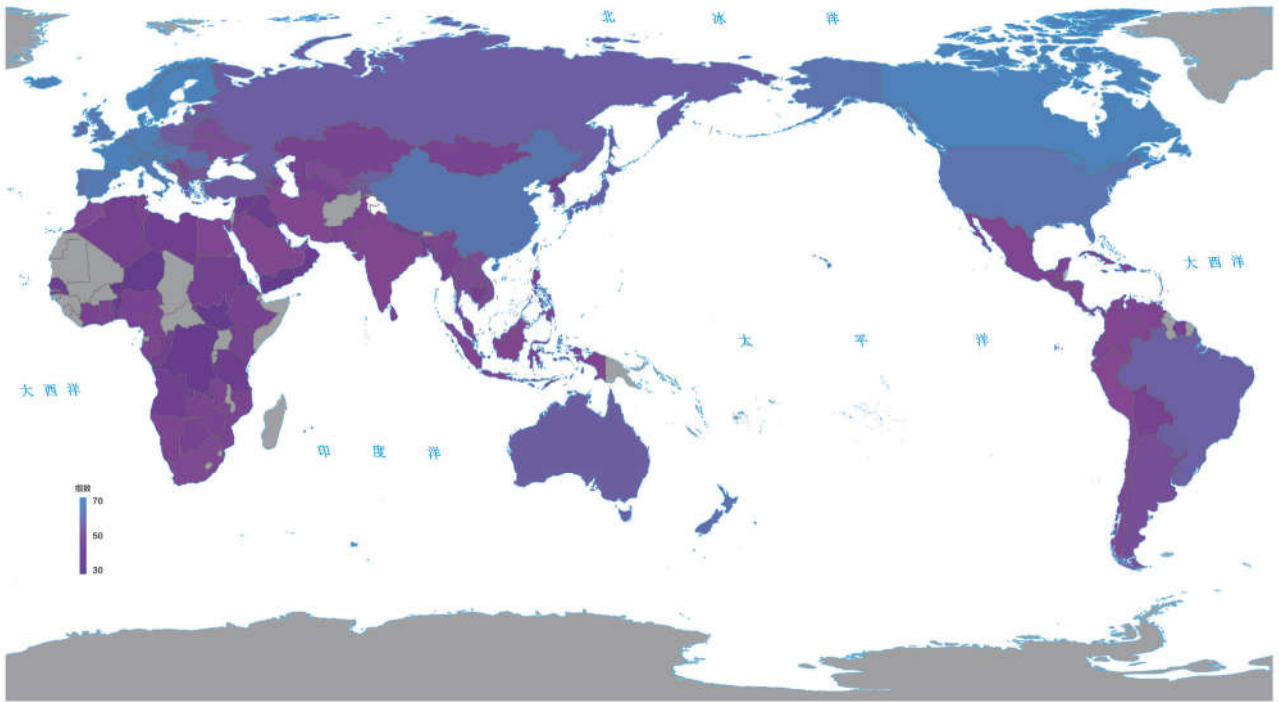


图 7 全球能源互联网发展指数分布图

Fig. 7 Global distribution of GEIDI

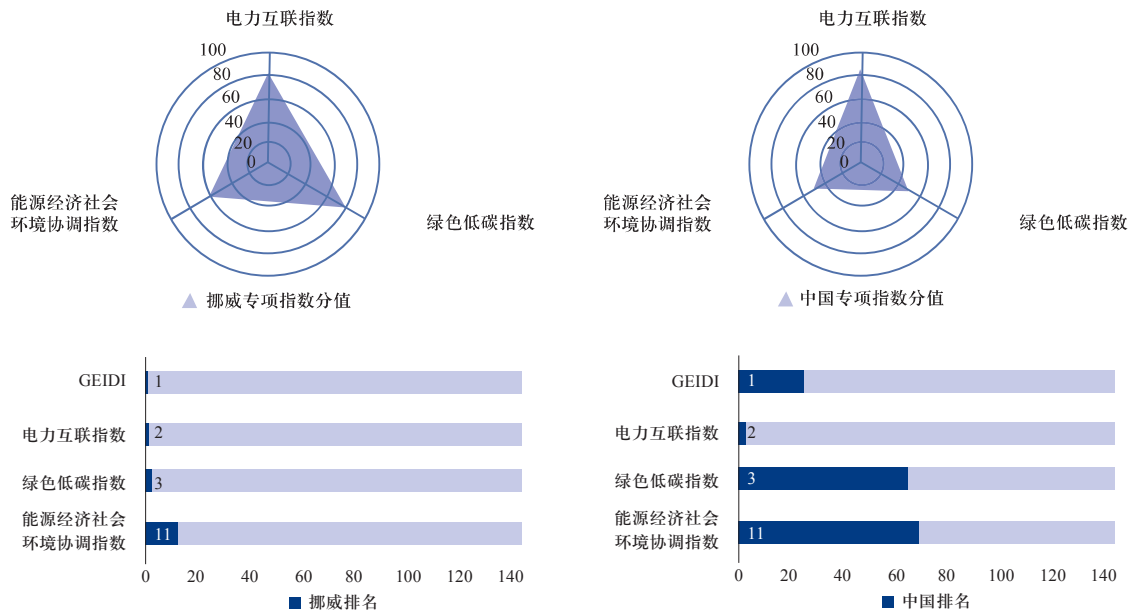


图 8 挪威和中国专项指数分布及排名

Fig. 8 Sub-indexes score and ranking of Norway and China

碳排放为 $3.04 \text{ t CO}_2/\text{toe}^{[18]}$ ，高于全球平均水平。整体来看，绿色低碳发展相对落后。能源经济社会环境协调发展方面，中国空气污染较严重，根据世界卫生组织发布的《环境空气污染报告》^[20]，中国PM2.5中位数为 $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，处于全球后10位；基尼系数为 $0.47^{[21]}$ ，相对较高，导致该指数处于全球第69位，相对落后。

3.2 全球各国专项指数排名及分析

图9为电力互联专项指数前40位国家排名。欧洲国家数量占比达77%，该区域通电率高、电网发展较为成熟，跨国电力交易规模大。西亚和北非部分国家电网基础较好，东亚在特高压技术和骨干网架发展方面处于世界领先水平，排名相对靠前。

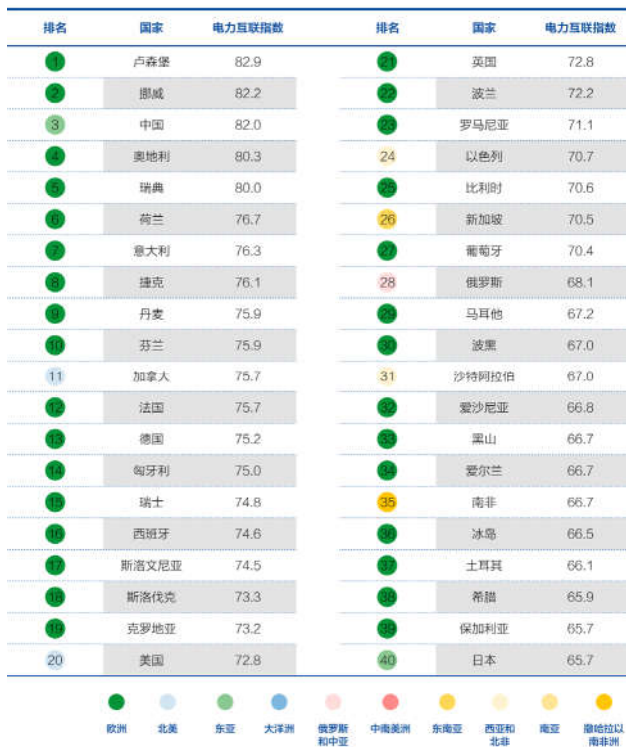


图 9 电力互联专项指数前40位国家排名

Fig. 9 Top 40 countries for the power interconnection index

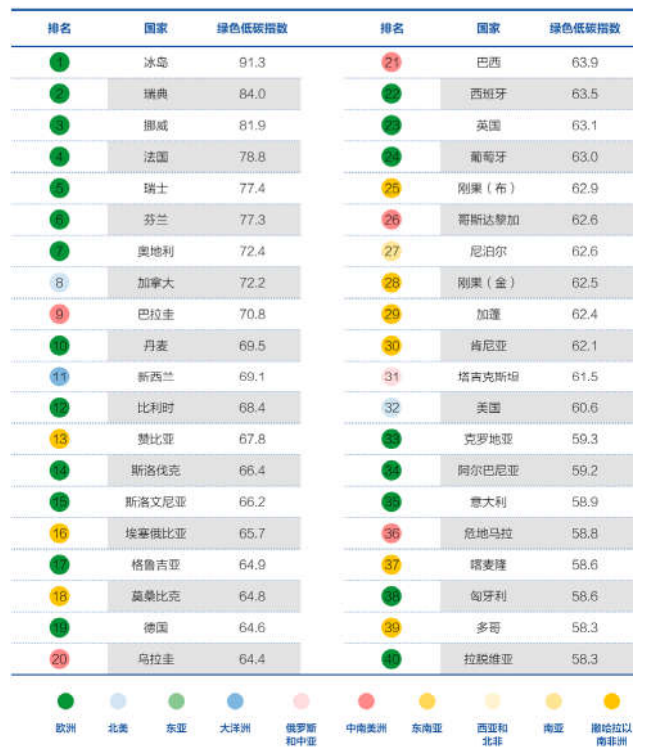


图 10 绿色低碳专项指数前40位国家排名

Fig. 10 Top 40 countries for the green & low-carbon index

图10为绿色低碳专项指数前40位国家排名。排名靠前的北美、北欧、大洋洲国家能源结构清洁化程度相对较高，并积极推动能源清洁低碳转型；中南美洲、俄罗斯和中亚、撒哈拉以南非洲部分国家清洁能源丰富，水电占比较高，单位能耗碳排放较低，排名相对靠前。

图11为能源经济社会环境协调专项指数前40位国家排名。发展较好的国家为欧洲、大洋洲、北美等发达国家，前40位中这三大区域国家数量占比达87%，这些区域已经建立较为健全的能源保障体系，能源利用效率高，经济、社会、环境发展水平普遍均高于全球平均水平。

3.3 专项指数区域特征分析

本节主要分析经济发展、绿色低碳专项指数及电力互联专项指数的区域特征，为区域加快能源转型提供发展思路。

图12为全球统计140个国家的能源绿色低碳转型与经济发展指标的散点分布图。从图中可以看出，全球绿色低碳指数与经济发展指标呈现“W”型分布。“W”型左支对应国家（如埃塞俄比亚）属于低水平的清洁低碳发展国家，其能源现代化和保障能力低。“W”型底部对应国家（如中国）属于转型阶段国家，



图 11 能源经济社会环境协调专项指数前40位国家排名

Fig. 11 Top 40 countries for the energy, economy, society and environment coordination index

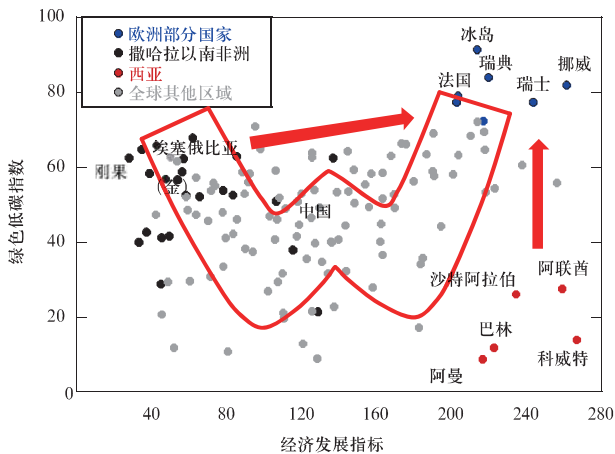


图 12 绿色低碳指数与经济发展阶段关系

Fig. 12 Relationship between green & low-carbon index and economy development

注：经济发展指标为人均GDP的算术平方根

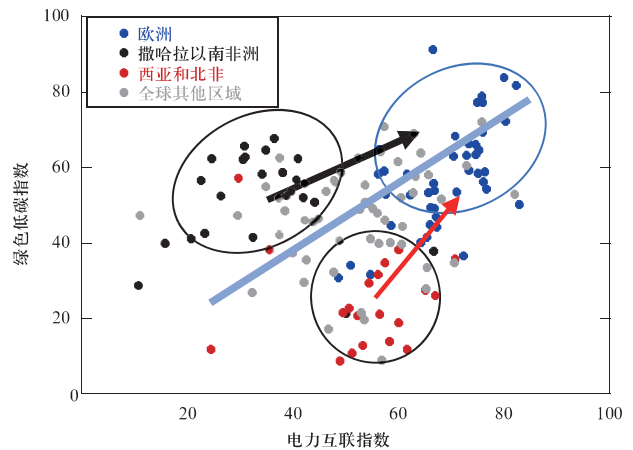


图 13 电力互联与绿色低碳关系图

Fig. 13 Relationship between power interconnection index and green & low-carbon index

已形成了化石能源依赖型经济体系，处于能源绿色低碳转型阵痛期和机遇期。“W”型右支对应国家（如北欧国家）属于领先阶段国家，能源结构清洁化程度高，形成清洁主导的现代化能源体系。

撒哈拉以南非洲国家当前经济发展相对落后，人均能源消费水平远低于世界平均水平，为满足未来经济快速发展的能源需求，撒哈拉以南非洲应重点开发本地清洁能源，实现对能源消费的跨越式发展，即从“W”左支直接向右支过渡发展。西亚国家化石能源丰富，经济发展过渡依赖化石能源，导致绿色低碳发展程度很低，远期受气候变化政策、环境污染等因素制约，西亚能源开发应大力实施“清洁替代”，以太阳能、风能、水能等清洁能源替代化石能源；在能源消费侧实施“电能替代”，以电能替代煤炭、石油、天然气，实现能源绿色低碳永续供应下的经济增长。

图13为全球统计140个国家的绿色低碳指数与电力互联互通指数的散点分布图，从图中可以看出，两者呈现正相关性。欧洲等先进国家的发展经验表明，高水平的绿色低碳发展需要以高水平的电力互联互通为基础和保障。对撒哈拉以南非洲国家实现高水平绿色低碳发展，关键要提高电力普及和电网互联程度，实现清洁能源大规模开发利用。西亚和北非等转型阶段国家实现能源和经济体系的可持续发展，必须促进能源结构调整与电力互联互通的协调发展。加快实现电力普及，推动本国、跨国、跨洲电网互联互通是实现能源绿色低碳转型的必由之路。

3.4 区域GEIDI分析

综合考虑区域内国家能源消费体量、经济发展程度、国际影响力等因素确定区域内各个国家影响权重，通过层次分析法计算各区域GEIDI分值。计算结果如下表2所示。从全球能源互联网发展指数区域分布看，欧洲、北美、东亚、大洋洲处于领先水平，各方面发展没有明显短板；俄罗斯和中亚、中南美洲处于中游水平，俄罗斯和中亚的电力互联基础较好，中南美洲的能源电力绿色低碳水平较高；东南亚、西亚和北非、南亚、撒哈拉以南非洲相对落后，对化石能源依赖度较高，能源转型的挑战与机遇并存。考虑到篇幅原因，本文仅对欧洲、东亚、撒哈拉以南非洲的GEIDI及专项指数发展进行详细评述。

图14为欧洲各国GEIDI分布。该地区经济一体化

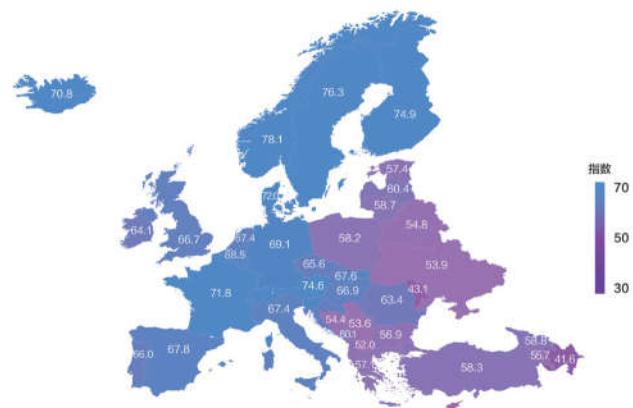


图 14 欧洲各国GEIDI分布图

Fig. 14 GEIDI distribution in European countries

程度高,能源电力基础设施良好,基本形成电网互联互通格局,清洁能源占比较高,近年来大力施行能源转型、绿色低碳、一体化市场、节能增效等政策和措施,全球能源互联网发展指数区域排名第一。

表2 全球10大区域GEIDI及专项指数分值
Table 2 GEIDI and its sub-indexes of 10 regions

区域	GEIDI	电力互联指数	绿色低碳指数	能源经济社会环境协调指数
欧洲	69.7	74.3	67.7	61.1
北美	67.2	73.0	63.6	58.0
东亚	62.0	73.6	52.2	47.7
大洋洲	61.8	62.8	61.3	60.1
俄罗斯和中亚	55.1	61.5	47.2	50.9
中南美洲	52.3	55.0	53.8	43.5
东南亚	46.8	51.0	41.6	44.0
西亚和北非	44.6	59.0	24.1	39.4
南亚	43.5	47.4	40.9	37.7
撒哈拉以南非洲	38.5	33.7	51.9	30.3
全球平均	54.1	59.1	50.4	47.2

注:区域划分参考《全球能源互联网发展与展望2017》^[22]。

该区域电网结构与发展程度较好,电力互联指数区域排名第一,明显高于全球平均水平。电能在终端能源消费占比高且趋于稳定,人均用电量超过5400 kWh/人^[18]。除冰岛和塞浦路斯,欧洲国家间形成欧洲大陆、北欧、波罗的海、英国及爱尔兰5个同步电网(the European network of transmission system operators, ENTSO-E),经直流线路互联,协调运营良好。电力市场机制完善,区域电力交易进出口和跨国输电通道容量占比均较高。

该区域可再生能源占比较高,绿色低碳指数区域排名第一,明显高于全球平均水平。可再生能源消费占一次能源消费总量的14.7%,高于世界平均水平4.7个百分点;可再生能源装机占比约为42%^[18]。欧洲各国注重低碳发展,应对气候变化和节能减排工作起步早、成效明显,根据欧盟发布的《2050能源路线图》^[23],欧盟规划2050年实现碳减排80%~95%的目标,清洁能源比重超过80%。

该区域积极建立能源保障体系,能源经济社会环境协调指数区域排名第一,高于全球平均水平。商品能源消费占比高,能效技术先进,空气质量好,

人均GDP高,能源电力对经济社会环境的保障作用得到充分体现。欧洲能源消费需求量大,但是清洁能源资源有限,开发成本较高。未来需进一步发挥电力互联平台作用,推动周边区域清洁能源开发,注重洲内开发和跨洲配置。

表3为东亚各国GEIDI分值统计。东亚地区经济充满活力,基础设施较为完善,能源电力消费增长迅速,清洁能源发电装机占比不断提高,全球能源互联网发展指数区域排名第三。

表3 东亚各国GEIDI分值
Table 3 GEIDI score of East Asia countries

国家	GEIDI
中国	66.1
日本	61.3
韩国	58.4
蒙古	41.8
朝鲜	38.1

该区域电网结构较为成熟,电力互联指数区域排名第二,高于全球平均水平。中国、日本和韩国已实现电力全覆盖,各国电能在终端能源消费占比和人均用电量较高,日本的电能在终端能源消费占比达到28%,韩国人均用电量超过10000 kWh/人^[18];坚强智能电网建设较好,尤其是中国正在加快建设全球领先的特高压骨干网架,实现能源电力大范围优化配置。跨国电网互联水平较低,电力交易规模较小,除中国外均无跨国互联电网。

该区域非化石能源发展迅速,绿色低碳指数区域排名第五,略高于全球平均水平。中国风电、太阳能发电装机和发电量位居世界前列;韩国非化石能源消费占比和非化石发电量占比分别超过18%和32%^[18];日本人均非化石能源装机超过0.8 kW/人^[24]。由于能源消费量大、电力需求旺盛,绿色低碳发展道路任重道远。

该区域能源发展差异较大,能源经济社会环境协调指数区域排名第五,略高于全球平均水平。各国经济发展阶段不同,能源对经济社会环境发展的保障能力差异较大。日本和韩国经济起步较早,能源电力基础设施完善,保障了经济社会环境的协调发展,人均GDP较高,环境质量良好;中国等发展中国家经济起步稍晚,但增速很快,能源电力发展水平快速提升,促进了经济和社会的发展,但能源与环境协调发展仍

面临较大的挑战。

图15为撒哈拉以南非洲各国GEIDI分布图。该区域覆盖国家数量众多，多数属于全球最不发达国家，能源生产消费总量较少，很多地区尚未通电，但经济发展向好，预期未来能源电力需求较大，全球能源互联网发展指数区域排名第十。

该区域能源电力基础设施薄弱，电力互联指数区域排名第十，明显低于全球平均水平。区域内电能终端能源消费占比不高，全球一半以上无电人口分布于此，区域年人均用电量为530 kWh/人^[18]，仅有南非的人均用电量高于全球平均水平；电网互联水平较低，各区域间电力交易较少。

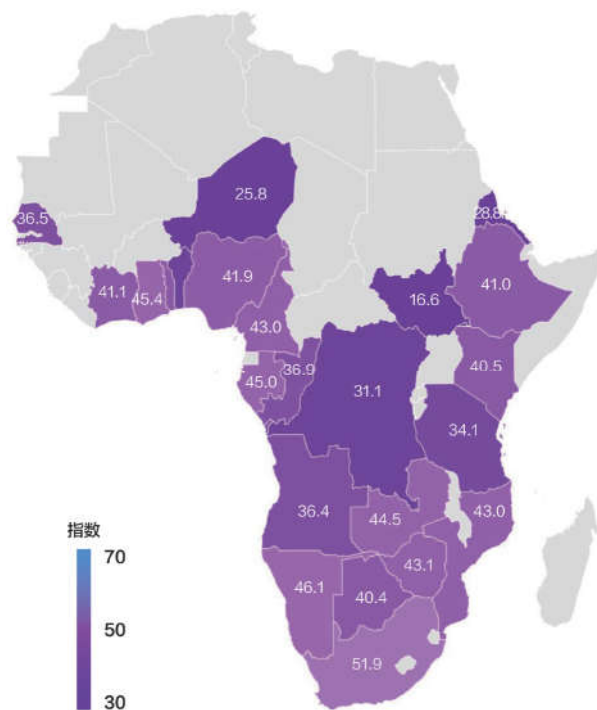


图 15 撒哈拉以南非洲各国GEIDI分布图

Fig. 15 GEIDI distribution in Sub-Saharan countries

该区域大量低水平使用生物质能源，绿色低碳指数区域排名第六，略高于全球平均水平。区域内太阳能、水能等清洁能源资源丰富，但缺少资金技术，清洁能源开发利用程度较低，非化石能源发电装机很少，未来清洁能源大规模开发利用潜力巨大。

该区域能源保障能力差，能源经济社会环境协调指数区域排名第十，明显低于全球平均水平。区域内商品能源消费占比低，尚未建立起能源保障体系，人均GDP较低，多数不足2000美元^[18]，且贫富差距较大，能源和经济社会环境协调性较差。

4 结论

能源转型日益成为全球共识，全球能源互联网旨在以清洁和绿色方式满足全球电力需求，通过电力互联互通可促进清洁能源大规模开发及高效消纳，实现人类能源、经济、社会、环境可持续发展。本文为刻画和分析世界能源转型的进程和成效设计提出了一套完整的综合评估体系。主要研究结论如下：

1) 全球能源互联网发展指数考虑了电力互联在能源转型中的促进作用，对全球统计的140个国家电力互联、绿色低碳及能源经济社会协调发展进行了综合评估，并对10大区域进行了分析，研究表明欧洲在电力互联、绿色低碳及能源经济社会协调发展方面均走在世界前列，对其他区域能源转型具有借鉴意义。

2) 设计采用对数极差法对指标进行标准化处理，相比传统极差法，对数极差法在评估国家数量众多、原始数据离散程度大的情况下适应性更强，评估结果更可靠。

3) 分析了经济发展、绿色低碳、电力互联的区域分布特征。全球绿色低碳与经济发展呈“W”型分布，摆脱对化石能源的依赖、实现能源绿色低碳永续供应下的经济增长是全球可持续发展的必然趋势。绿色低碳专项指数与电力互联互通专项指数呈正相关性，加快实现电力普及，推动本国、跨国、跨洲电网互联互通是实现能源绿色低碳转型的必由之路。

参考文献

- [1] 舒印彪, 薛禹胜, 蔡斌, 等. 关于能源转型分析的评述 (一) 转型要素及研究范式[J]. 电力系统自动化, 2018, (9): 1-15.
Shu Yinbiao, Xue Yusheng, Cai Bin, et al. A review of energy transition analysis part one elements and paradigms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, (9): 1-15(in Chinese).
- [2] 许剑. 国际能源转型的技术路径与中国的角色[J]. 云南大学学报(社会科学版), 2018, (3): 136-144.
Xu Jian. Technological roadmaps of international energy transition and the role of China[J]. Journal of Yunnan University (Social Sciences Edition), 2018, (3): 136-144(in Chinese).
- [3] 韩立群. 当前国际能源转型探析[J]. 国际研究参考, 2018, (6): 1-7.
Han Liqun. Analysis of current international energy transition[J]. International Study Reference, 2018, (6): 1-7(in Chinese).

- [4] International Renewable Energy Agency, International Energy Agency, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewable energy policies in a time of transition[R]. IRENA, IEA and REN21, 2018.
- [5] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2018 global status report[R]. Paris: REN21, 2018.
- [6] United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development[R]. New York: UN, 2018.
- [7] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [8] 刘坚, 任东明. 欧盟能源转型的路径及对我国的启示[J]. 中国能源, 2013, (12): 8-11.
Liu Jian, Ren Dongming. The path of EU energy transformation and its enlightenment to China[J]. Energy of China, 2013, (12): 8-11(in Chinese).
- [9] 孙贤胜, 许慧文. 国际能源转型的趋势与挑战[J]. 国际石油经济, 2018, (1): 7-10.
Sun Xiansheng, Xu Huiwen. Trends and challenges in international energy transformation[J]. International Petroleum Economics, 2018, (1): 7-10(in Chinese).
- [10] International Energy Agency. World energy outlook[R]. Paris: IEA, 2011.
- [11] World Economic Forum. Fostering effective energy transition[R]. Geneva: WEF, 2018.
- [12] Iddrisu, I., S.C. Bhattacharyya. Sustainable energy development index: a multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015: 513-530.
- [13] World Economic Forum. Energy architecture performance index[R]. Geneva: WEF, 2014.
- [14] World Energy Council. World energy trilemma index 2017[R]. London: WEC, 2017.
- [15] World Economic Forum. The global competitiveness report 2017-2018[R]. Geneva: WEF, 2017.
- [16] 苗韧, 王凌霏, 吴頔, 等. 中国能源可持续发展评价指标体系构建与初步评价[J]. 中国能源, 2012, (3): 22-27.
Miao Ren, Wang Lingfei, Wu Di, et al. Construction and preliminary evaluation of China's energy sustainable development evaluation index system[J]. Energy of China, 2012, (3): 22-27(in Chinese).
- [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] International Energy Agency. World energy balances 2017[R]. Paris: IEA, 2017.
- [19] World Health Organization. Ambient air pollution[R]. Geneva: WHO, 2016.
- [20] Central Intelligence Agency, The world factbook[R]. Virginia: CIA, 2017.
- [21] International Energy Agency, Global EV outlook 2018[R]. Paris: IEA, 2018.
- [22] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网发展与展望2017[R]. 北京: GEIDCO, 2017.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Global energy interconnection development and outlook 2017[R]. Beijing: GEIDCO, 2017 (in Chinese).
- [23] European Union. Energy roadmap 2050[R]. Brussels: EU, 2012.
- [24] International Renewable Energy Agency. Renewable energy statistics 2017[R]. Masdar City: IRENA, 2017.

收稿日期: 2018-08-24; 修回日期: 2018-10-11。



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。

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, E-mail: fang-yang1@geidco.org。

(责任编辑 张宇)