

【区域绿色发展】

全球清洁能源投资的复杂网络特征与竞合演化态势研究*

韩梦瑶 李锦洲 李宏图

摘要:在应对气候变化背景下,清洁能源投资成为国际社会关注的重点。为了系统性地解析清洁能源投资中的复杂网络特征和参与主体的竞合博弈态势,基于2000—2020全球清洁能源投资网络,系统地分析了其空间格局、网络特征及主体竞合关系。结果表明,全球清洁能源投资格局由早期的中美双核主导,逐步转向2010年后的多极化分布。投资网络的节点数、平均度及平均加权重均在2017年达到最大值,2009—2019年呈现出“小世界”特性,中、美、日及欧洲国家加权出度较高,东南亚、南亚、北非及东非国家的加权入度较高,中美投资去向多元,但深度及广度不同,欧洲及中东等地表现出明显的区域偏好,英国和大洋洲的投资则表现出近邻效应。结合全球清洁能源投资的复杂网络特征,力求揭示全球清洁能源投资网络的演化趋势与竞合关系,为各国在全球清洁能源投资中的角色定位提供了量化支撑与启示建议。

关键词:清洁能源;演化特征;投资网络;竞合演化

中图分类号:F061.5 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5766(2026)02-0123-16 **收稿日期:**2025-05-21

***基金项目:**国家自然科学基金项目“碳中和博弈下中国清洁能源开发主体的竞合演化机制及外生风险防控”(42371183);中国科学院青促会会员项目(2023058);中国科学院地理资源所可桢—秉维青年人才计划项目(2023RC002)。

作者简介:韩梦瑶,女,中国科学院地理科学与资源研究所副研究员;剑桥大学环境、能源和自然资源管理中心客座研究员,通信作者(北京 100101)。

李锦洲,男,南京信息工程大学地理科学学院本科生(北京 100049)。

李宏图,男,中国科学院大学资源与环境学院硕士生(北京 100193)。

一、引言

近年来,全球范围内清洁能源应用的持续拓展标志着发电方式的深刻变革。据国际可再生能源署(IRENA)报告显示,自2010年以来,清洁能源的装机容量实现翻倍增长,这一趋势有效反映了清洁能源在技术可行性和市场接受度方面的显著进展(Saqib et al., 2024)。值得注意的是,技术创新(Nezhnikova et al., 2018)、运营效率提升

(Muhammed et al., 2020)及成本竞争力增强(Dorsey-Palmateer et al., 2020)共同推动了太阳能、风能、水能和生物能等清洁能源形式的稳步发展,巩固了其在全球能源结构中的重要地位,并使清洁能源投资在国际舞台上日益具有吸引力(Hassan et al., 2024; 王超等, 2023)。

能源投资作为经济活动中最复杂的领域之一,长期以来被众多研究者所关注(Blyth et al., 2007)。已有研究表明,发达国家的清洁能源投资布局更注重海上风电(Gallaher et al., 2023)、储能技术(史冬

梅等, 2023)等技术领域。以欧洲为例, 北海沿岸国家通过开发大规模的海上风能项目, 形成了具有显著影响力的区域集群效应 (Bilgili et al., 2023; Durakovic et al., 2023)。与此同时, 以中国和印度等国为代表的新兴经济体在政策和市场需求拉动下, 在清洁能源技术的生产和项目开发方面取得了令人瞩目的进展 (曲申等, 2024; Fang, 2023; Sharma et al., 2026)。非洲以其丰富的太阳能和风能资源引发了投资者的兴趣。Bouraiou 等 (2023) 的研究表明, 阿尔及利亚等国家每年的平均日照时间超过 3,000 小时, 展示出巨大的开发潜力。此外, 已有研究围绕清洁能源的影响因素及风险特征进行了系统探讨, 研究表明, 政府的鼓励性政策、碳边境税、技术进步、贸易开放程度以及腐败程度等, 均通过不同的路径及程度来影响清洁能源的投资决策及行为 (Bellakhal et al., 2019; Popp et al., 2011; Zyadin et al., 2014)。受经济政治全球一体化进程的影响, 各国通过经济上相互依存关系形成了深度交融、高度交互的网络结构, 地域空间格局逐渐从静态的地理空间转向生产要素自由流动的网络空间 (Wen et al., 2017)。

从研究方法来看, 当前研究主要通过复杂网络方法来分析能源投资的演变趋势及特征情况, 运用不同的经济模型剖析研究对象之间的竞合关系。綦建红等 (2019) 通过复杂网络模型分析了全球绿色能源投资网络的演化特征, 指出该网络呈现出小世界性和无标度特征, 并揭示了全球绿色能源投资的节点结构随时间逐渐松散, 投资关系的核心逐步扩展到多个国家。杨宇 (2022) 运用了复杂网络视角来探讨中国与全球能源市场的互动, 发现随着能源转型, 中国的能源投资从单纯的油气领域扩展到可再生能源, 并进一步对全球能源治理的整体架构及内部关系进行剖析。何则等 (2019、2020) 则通过构建跨境并购网络, 分析了能源投资的演化过程, 运用模块度等贸易集团检测的方法分析具体的竞争及合作关系。夏四友等 (2020) 从复杂网络视角探析中国与贸易国之间的石油流动情况, 并通过 K-Mean 聚类法来分析他们之间的竞合关系。种照辉等 (2022) 通过社会分析的方法来分析化石能源与可再生能源之间的贸易情况, 并使用 QAP 回归方法定量分析贸易网络之间的依存关系。张强等 (2023) 利用联合国跨国投入产出数据对各国的能

源结构性权力进行测度, 通过 Spearman 相关分析检验国家之间关系的强弱, 并通过定性比较分析方法 (QCA) 来解析背后的影响因素。Lin 等 (2025) 提出一种前景理论演化博弈模型 (PTEGM), 来刻画能源投资双方的风险偏好及损失厌恶特征。

在投资网络的研究尺度上, 目前对国际投资网络宏观结构特征的研究主要包括对网络集中度和度分布互惠性、聚类系数、网络路径、网络度相关性与富人俱乐部现象等特征的分析 (Fagiolo et al., 2009)。部分研究通过对国际投资网络社团结构演化过程的梳理, 从而理清投资全球化的发展脉络 (Kali et al., 2007)。在网络微观层面, 网络节点重要性是网络微观层面研究的重要指标, 刻画了单个节点对国际投资格局的影响力, 以衡量一个国家/地区在投资网络中的影响力及其投资地位。部分研究发现国际投资网络中存在着核心—边缘结构 (Fagiolo et al., 2010; Squartini et al., 2011)。从研究对象来看, 当前研究主要聚焦微观层面的企业投资网络、中观层面的产业投资网络以及宏观层面的国别投资网络 (金永红等, 2021; Briglauer et al., 2023)。现有文献大多以发达国家和地区为案例对象 (Brida et al., 2015; Cró et al., 2020), 倾向于对当前投资现状和问题进行定性分析。相比于其他的投资网络, 清洁能源投资网络更依靠多方参与主体, 演化和发展的速度迅速, 受到政策及技术的驱动作用较强 (柏明国等, 2024)。在清洁能源领域, 现有研究仍停留在碎片化的视角, 更多侧重单一维度的分析, 难以全面解释清洁能源投资网络的全球性特征和复杂性 (Wen et al., 2017)。虽然已有研究对清洁能源在结构特征、演化路径及驱动机制上作了一定研究, 并通过对比的方式突出清洁能源的独特性 (Anbumozhi et al., 2024), 但仍需从全球视角做切入对能源投资的空间格局、演化特征及主体竞合关系作进一步的判断及解析。

在此基础上, 本研究聚焦全球清洁能源投资的复杂网络特征, 力求揭示全球清洁能源投资的网络拓扑结构、动态演变规律及关键特征, 拓展传统核心—边缘结构在绿色能源转型大背景下的适用性。通过对核心国家、次核心国家及边缘国家的识别, 剖析典型国别在清洁能源投资网络中的节点特征, 并进一步刻画投资主体之间合作与竞争的复杂格

局关系。在此基础上,基于当前国际清洁能源投资变化,本研究力求揭示可能存在的机遇及风险挑战,深化全球清洁能源投资网络的演化趋势和竞争态势,为各国在全球清洁能源市场中的角色定位提供了理论依据,为政策制定者提供推动清洁能源投资以及加强多边合作的清洁能源合作路径。

二、方法与数据

清洁能源投资网络属于有向加权网络,以全球各国为节点,以国家之间的清洁能源投资联系作为边,以国家间清洁能源投资所涉及的投资金额作为边的权值,构建全球清洁能源投资的空间关联网(Squartini et al., 2011b; Wang et al., 2025)。其中,清洁能源投资数据来源于国际可再生能源署(IRENA, 2025),并通过公开可查询的统计数据、企业年报等资料进行交叉验证。具体而言,以 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示国家的集合, N 为国家的数量。以 E_{ij} 表示国家 v_i 和国家 v_j 之间的清洁能源投资联系状态, $E = \{E_1, E_2, \dots, E_s\}$ 表示所有国家之间的清洁能源投资联系的集合,若 v_i 和 v_j 之间存在清洁能源投资关系,则 $E_{ij} \neq \emptyset$ 且 $E_{ij} \in E$; 若 v_i 和 v_j 之间尚未建立清洁能源投资联系,则 $E_{ij} = \emptyset$ 。进一步,将 v_i 和 v_j 之间存在的清洁能源投资关系以矩阵形式表达,则为:

$$G_{N \times N} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \cdots & e_{1,N} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{N,1} & \cdots & e_{N,N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$e_{ij} = \begin{cases} 1 & (E_{ij} \neq \emptyset \text{ 且 } E_{ij} \in E) \\ 0 & (E_{ij} = \emptyset) \end{cases} \quad (1 \leq i, j \leq N) \quad (2)$$

式(2)中 $e_{ij} = 1$ 和 $e_{ij} = 0$ 分别表示 v_i 和 v_j 之间存在或不存在边的连接。

本研究通过边和节点的数量、平均度、平均加权重度、度中心性、聚类系数、平均路径长度和网络密度等指标,对清洁能源投资网络的整体特性和节点特征进行刻画,引入核心—边缘算法,探讨投资网络中不同组团和集群的异质性特征,并结合制度距离与文化距离解析投资网络的区域性偏好成因,具体如下:

平均度是网络中每个节点的度数的平均值。度数由两个部分组成:入度和出度。节点的入度表

示指向该节点的连接数,而出度表示从该节点发出的连接数。因此,节点的度数是其入度和出度的总和,平均度则是所有节点度数的平均值,反映了网络中节点的连接密度。在本研究中,平均度(AD)的计算公式如下所示,其计算公式为:

$$AD = \frac{\sum_i D_i}{N} \quad (3)$$

其中, D_i 表示每个节点的度数, N 为网络中节点的总数。

平均加权重度为各节点加权重度的平均值。节点加权重度指的是在全球清洁能源投资网络中各国所涉及的投资流量金额的平均值,故平均加权重度是对整个投资网络活跃度的衡量。在本研究中,平均加权重度(AW)的数值以百万美元为单位表示,其计算公式为:

$$AW = \sum_i WD_i / N \quad (4)$$

其中, WD_i 表示每个节点 i 的节点加权重度。

平均路径长度可以衡量网络中节点的分离程度,反映清洁能源投资网络中各个节点的连接性,其数值表示任意两个国家之间的投资关系最多通过其他多少个国家进行连接,故平均路径长度越短,网络内各个参与国的可达性越好,其计算公式为:

$$AL = \frac{\sum_{i>j} l_{ij}}{\frac{1}{2}N(N+1)} \quad (5)$$

其中, AL 代表平均路径长度, l_{ij} 是指某个节点 i 与节点 j 之间的最短距离。

网络密度作为衡量网络内部稠密和网络规则程度的指标,是指网络中实际边数与该节点数下最大可能边数的比值。随着网络密度增加,可认为全球清洁能源投资网络趋向于紧密化发展,网络密度 θ 的计算公式为:

$$\theta = \frac{2\chi}{N(N-1)} \quad (6)$$

其中, χ 表示边的个数。

聚类系数能够测度全球清洁能源投资网络中国家的聚集度,度为 n_i 的节点 i 的聚类系数 C_i 表明,在节点 i 的 n_i 个近邻节点之间实际存在的连接边的数目与理论最大可能边数的比值为:

$$C_i = \frac{M_i}{(n_i - 1) \frac{n_i}{2}} \quad (7)$$

其中, M_i 表示 n_i 个近邻节点间实际存在的连接边的数目。在本研究的研究中, 为研究整体清洁能源投资网络中各国的聚集程度, 采取计算平均聚类系数进行分析, 同时通过比较该值与随机网络的聚类系数理论值, 判断清洁能源投资复杂网络是否具有小世界性。

节点中心性的度量指标主要包括度中心性、介数中心性、紧密中心性、特征向量中心性、网络流中心性和子图中心性等, 能够衡量网络中节点的重要程度。本研究选取接近中心性和介数中心性指标分析全球清洁能源投资网络节点的相对可达性和衔接功能。

根据给定节点 i 与网络中其他所有节点的最短距离, 可以通过接近中心性判断节点在网络中的位置, 因此, 该指标越大, 表明节点国家越处于清洁能源投资网络的中心位置。其计算公式为:

$$CC_i = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N l_{ij} \right]^{-1} \quad (8)$$

介数中心性是根据网络中所有节点间最短路径经过节点 i 的数目来衡量节点在网络中的中介衔接性, 故该指数越大, 说明节点国家在全球清洁能源投资网络中的中枢功能就越显著, 其计算公式为:

$$BC_i = \sum_{i \neq \alpha \neq \beta} \frac{n_{\alpha\beta}(i)}{n_{\alpha\beta}} \quad (9)$$

通过比较网络的平均聚类系数与同等规模随机网络的平均聚类系数, 以及网络的平均最短路径长度与同等规模的随机网络的平均最短路径长度, 可以判断网络是否具有“小世界”特性。计算公式如下:

$$\sigma = (C/C_{re}) / (P/P_{re}) \quad (10)$$

其中, σ 为“小世界”指标值, 一般“小世界”系数大于 1, 则认为该网络具备“小世界”网络特征; C 为测算清洁能源投资网络的平均聚类系数; P 为平均路径长度; C_{re} 为与测算网络同等规模随机网络的平均聚类系数; P_{re} 为该随机网络的平均路径长度。

本研究使用世界银行发布的、包含六个子指标的世界治理指数(Worldwide Governance Indicators, WGI)来衡量各国制度发展水平。结合 Kogut 和 Singh(1988)提出的距离计算方法, 制度距离定义为:

$$dis_wgik_{st} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{(I_{i,A,t} - I_{i,B,t})^2}{I_{ii}} \quad (11)$$

其中, i 表示 WGI 中制度发展水平的各子指标 ($i=1, 2, \dots, 6$), $I_{i,A,t} - I_{i,B,t}$ 为 t 年 A 国和 B 国在制度发展水平子指标 i 方面的差异; V_i 为各制度发展水平在子指标 i 方面的方差, 作为除数以解决各维度制度发展水平得分可能不可比的潜在问题。

本研究采用 Hofstede 文化维度理论, 借鉴 Kogut et al.(1988)测算国家之间的文化距离, 具体计算公式为:

$$CD_{jk} = \sum_{i=1}^4 \left[\frac{(I_{ij} - I_{ik})^2}{V_i} \right] / 4 \quad (12)$$

其中, I_{ij} 代表国家 j 在第 i 个维度上的得分, I_{ik} 代表国家 k 在第 i 个维度上的得分, V_i 为第 i 个指标得分的方差。

为了识别网络中的核心—边缘结构, 本研究使用 Rossa et al.(2023)提出的核心—边缘算法, 用以揭示网络结构及单个节点的角色特征。上述算法可以计算网络整体的集中度和各个节点的核心性。将全球所有国家按核心性分为四个层级。核心性值大于 0.3 的国家被归类为核心结构, 核心性在 0.1 到 0.3 之间的国家被归类为亚核心结构, 核心性在 0.01 到 0.1 之间的国家被归类为次外围结构, 核心性小于 0.01 的国家被归类为外围结构。

三、结果分析

在全球清洁能源转型持续推进及清洁能源相关产业的持续发展之下, 清洁能源投资已经逐步成为重塑国际能源投资格局及区域经济联动的关键因素。从空间视角考察全球清洁能源投资网络的演化过程及投资主体之间的竞合博弈关系, 有助于识别清洁能源投资网络的核心国家、投资流动趋势及变化情况, 进而为理解全球清洁能源投资网络的时空分布特征提供基础。

1. 全球清洁能源投资空间格局演变

图 1 刻画了 2000—2020 年全球清洁能源投资空间格局演变。在 2000—2005 年, 美国和中国是全球清洁能源投资的核心节点, 是全球清洁能源投资网络最为密集的区域。美国投资了 30 余个国家, 中国清洁能源投资国家的数量虽然少于美国, 但是对重点合作国家的清洁能源投资额较大, 对阿尔巴尼

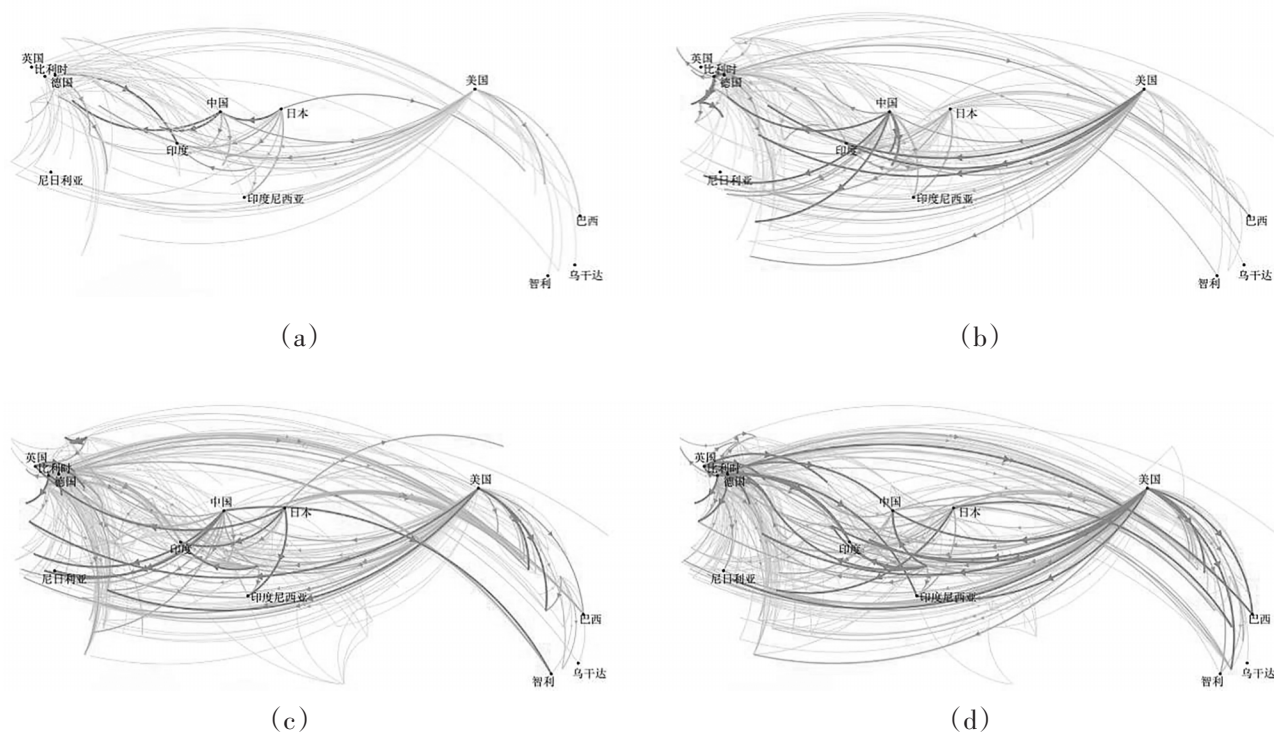


图1 全球清洁能源投资空间格局演变趋势图

资料来源:作者自绘,数据来源为国际可再生能源署(IRENA)。

亚、伊朗和巴基斯坦分别投资了6.71亿美元、5.82亿美元和5.73亿美元,分别占据这一阶段全球清洁能源投资总量的5.32%、4.61%和4.54%。这一阶段欧洲国家的清洁能源投资也逐渐起步,但是非洲和南美洲国家在这一时期的清洁能源投资网络中参与程度相对较低。

2006—2010年,欧洲国家与日本成了全球清洁能源投资的重要核心力量。此阶段,欧洲国家的投资倾向集中于欧洲内部,具体表现为比利时对英国、葡萄牙和西班牙的投资额分别为15.46亿美元、8.23亿美元和7.40亿美元,而英国则向爱沙尼亚投资了12.90亿美元。这些投资均位列该时期清洁能源投资网络中边权值前十位。同时,日本的清洁能源投资范围较为广泛,展现出较为分散的投资地理特征。这一时期中国投资对外清洁能源投资额已超越美国,占全球总投资量的24.76%。

2011年之后,全球清洁能源投资网络呈现了更为复杂的多核化特征,东南亚、南亚和非洲地区逐渐成了清洁能源投资新兴热门地区。2016—2020年,东南亚菲律宾的清洁能源总投资额为46.62亿美元。东南亚的印度尼西亚、南亚的印度等国家接受了大量来自欧美的清洁能源投资,而来自非洲的

尼日利亚、南美洲的智利和乌干达等新兴网络节点国家也成为中国的主要投资对象。其中,中国对尼日利亚的清洁能源投资额在2016—2020年中高达60.56亿美元,占全球总投资量的5.68%。欧洲部分国家的清洁能源投资对象不再仅限于本国及其他欧洲国家,而是向非洲、南美洲等新兴市场加大投资额度。特别是在2016—2020年,比利时的清洁能源总投资额达到218.28亿美元,投资国家数量已经超过同一时期的中国。

总体来看,2000—2020年全球清洁能源投资空间格局经历了从少数核心国家主导向多核心、多区域联动的演变趋势。早期投资网络主要由美国等少数核心国家作为引领,投资流向相对集中,2011年后随着亚洲、南美洲等地区投资国的崛起,全球清洁能源投资逐渐突破了传统的发达经济体之间的合作框架,形成了以中国、日本及欧洲等新兴国家共同参与的多极化投资格局。这一演化表明,全球的清洁能源投资不仅仅是从发达国家流向欠发达国家,而是跨区域、多主体及全方位的复杂体系,新兴市场的发展能力及战略地位也持续抬升。

2. 全球清洁能源投资网络特征

表1展示了2000—2020年全球清洁能源投资

表1 2000—2020年全球清洁能源投资网络特征概述

	2000—2005年	2006—2010年	2011—2015年	2016—2020年
节点数	在80到102之间波动	保持平稳增长,在2017年达到最大值172		
边数	缓慢增长	增速最快,尤其是2009—2010年增长了101条边	从381增长到442,共增长了61条边	在2017年达到最大值551
网络密度	在0.016到0.019之间波动			
平均度	在1.44到1.57之间波动	增速较快,其中2008—2010年增速最大,从1.87增长到2.69	先增后减,在2017年到达最大值3.20	
平均加权度	变化较小	三次先升后降,其中2008—2009年增速最大,从37.52增长到150.30,在2017年达到最大值197.39		
平均路径长度	在1到1.39之间波动			
聚类系数	低于0.01		三次先升后降,三个拐点分别为2011年、2014年和2018年	

资料来源:国际可再生能源署(IRENA)。

网络整体特征指标。在这期间,边数在2008—2010年迎来了阶梯式上升,而节点数的增长较之节点更为平稳,从2006—2013年逐年匀速上涨。从节点自身的演化来看,节点的平均加权度在2008—2009年出现了剧增,从37.52上升至150.30,几乎增长了5倍,相比之下节点的平均度的变化比较平缓。值得注意的是,在2017年,节点数、边数、平均度和平均加权度同时达到了最大值,分别是172、551、3.20和197.39。

在网络的连通性方面,平均路径长度波动区间为1至1.39,表明全球清洁能源投资网络的连通性较高,节点之间的平均距离较短,即全球经济体间可以通过少量的“桥梁”经济体实现有效的清洁能源投资关系。网络密度保持在0.016和0.019之间,说明主要大洲的主要节点已经确定,新的节点并未改变网络的基本连接特征和整体架构,网络的核心节点依然保持较高的连接度,而新增节点则更多发挥辅助作用,加强了局部区域的网络联系。平均聚类系数则反映了节点之间的群体化程度。2000—2008年,聚类系数值始终低于0.01,表明在此阶段全球清洁能源投资网络的节点之间缺乏足够的群体化连接。然而,自2009年起,聚类系数出现了显著提升,并且其与平均最短路径长度的比值在2009—2019年始终保持高于随机网络的理论值($C_{random} = \frac{2E}{N(N-1)} = 2.24 \times 10^{-4}$),因此投资网络在这一阶段呈现出“小世界”特征。2020年投资网络的节点数大幅下降至66个,边数降至75条,平均度和平均加权度也分别从2019年的3.15

和103.43下降至1.14和89.44,显示出节点之间的连接强度和互动频率均有所减弱。最为显著的是,平均聚类系数从0.03下降至0.01,接近随机网络的水平,这表明节点之间的集聚效应显著减弱,网络的群体化程度大幅下降,整体网络趋于分散化。

2000年以来,全球清洁能源网络的集中度从0.9498降低至0.9434,然后升高至0.9450,最后达到0.9485。总体来看,全球清洁能源网络的集中度始终大于0.94,表明全球清洁能源投资网络中长期存在显著的核心—外围结构。部分国家处于网络的核心位置,而大多数国家则处于边缘位置。与此同时,集中度先降后升的趋势表明,鉴于清洁能源的战略和安全需求,一些节点国家关注清洁能源进口的多元化和去中心化,同时追求国际投资的规模效应,并从多元渠道推动清洁能源贸易合作。

3. 全球清洁能源投资节点特征

图2展示了2000—2020年清洁能源投资网络节点特征排序。入度和出度表示了一个国家在清洁能源投资中选择目的地国家多元化及产品多样化的情况。在节点特征测算中,无权出度与加权出度分别代表清洁能源投资的广度与强度。就投资广度而言,美国位居全球首位,表现出显著的全球覆盖特征,日本次之;就投资强度而言,中国排名全球前列,说明尽管中国投资的国家数量相对有限,但投资规模巨大且集聚效应显著,美国在该指标上紧随其后。在无权入度和加权入度方面,排名前列的国家半数以上集中在南亚、东南亚以及非洲地区,主要为发展中国家,因其对能源的需求不断增

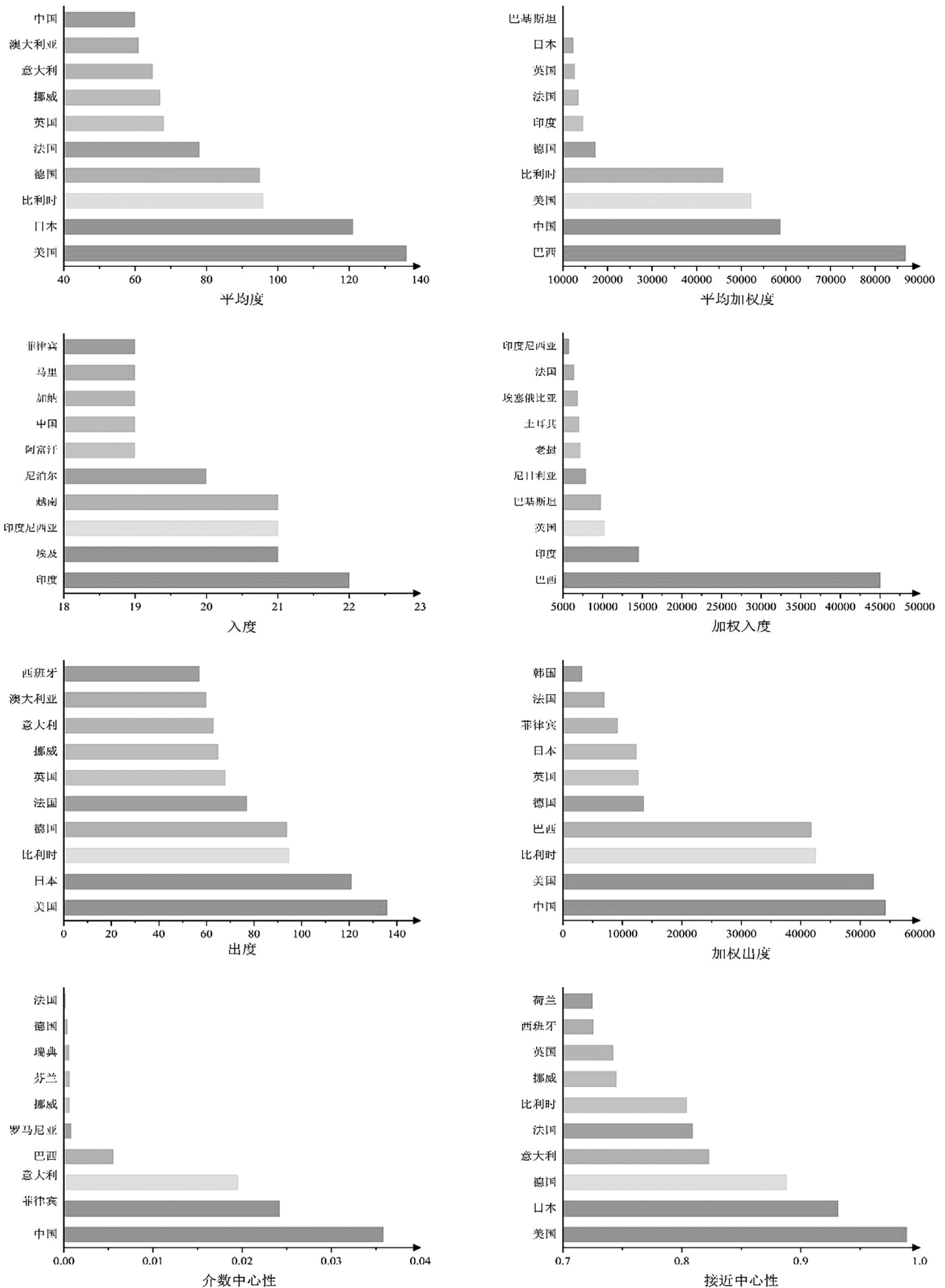


图2 2000—2020年清洁能源投资网络节点特征图

数据来源:作者自绘,数据来源为国际可再生能源署(IRENA)。

长,逐渐成为全球清洁能源投资的重点区域。

接近中心性体现了一个节点在发出和接收关系时不受其他节点控制的程度,而介数中心性则反映了节点国家对于网络中资源的控制能力,二者结合可以大致判断某个国家在清洁能源投资网络中扮演的角色。从2000至2020年的网络节点特征的大小排序分析,接近中心性排在前十位的国家分别为美国、日本、德国、意大利、法国、比利时、挪威、英国、西班牙、荷兰;介数中心性排在前十位的国家分别为中国、菲律宾、意大利、巴西、罗马尼亚、挪威、芬兰、瑞典、德国、法国。对比来看,上述国家有一半出现在入度或出度前10个国家中,这也反映了世界清洁能源投资网络事实上是一种点对点的投资模式,清洁能源投资关系则体现为国家之间的依赖与竞争。

在2000—2010年,中国为核心性最高的国家;而在2011—2015年和2016—2020年,美国为核心性最高的国家。此外,日本和德国也一直处于核心结构中。比利时和法国增长最为迅速,比利时从外围结构增长到核心结构,最终其核心性仅次于美国;而法国从次外围结构增长到核心结构,整体上呈现先上升后稳定的趋势。研究表明,尽管有众多国家加入清洁能源投资,但是由于缺乏前期产业积累导致其在网络演化中难以实现从外围向核心的结构性跨越。

总的来说,2000—2020年全球清洁能源投资网络呈现出显著的核心—边缘结构特征。其中,美国、欧洲主要国家在对外投资的规模、范围和网络控制能力方面始终处于领先的地位,是全球清洁能源投资的主要组织者;南亚、非洲等地的发展中国家处于外围地区,更多表现为投资的承接者。与此同时,核心性的动态演变特征表明,清洁能源投资网络并非静态的单一结构,而是在全球化、国家进步和国际合作中不断进化。尽管部分国家随着时间的发展逐渐进入投资网络的圈层,但其核心特征仍旧不明显,全球清洁能源投资体系仍存在一定的路径依赖性。

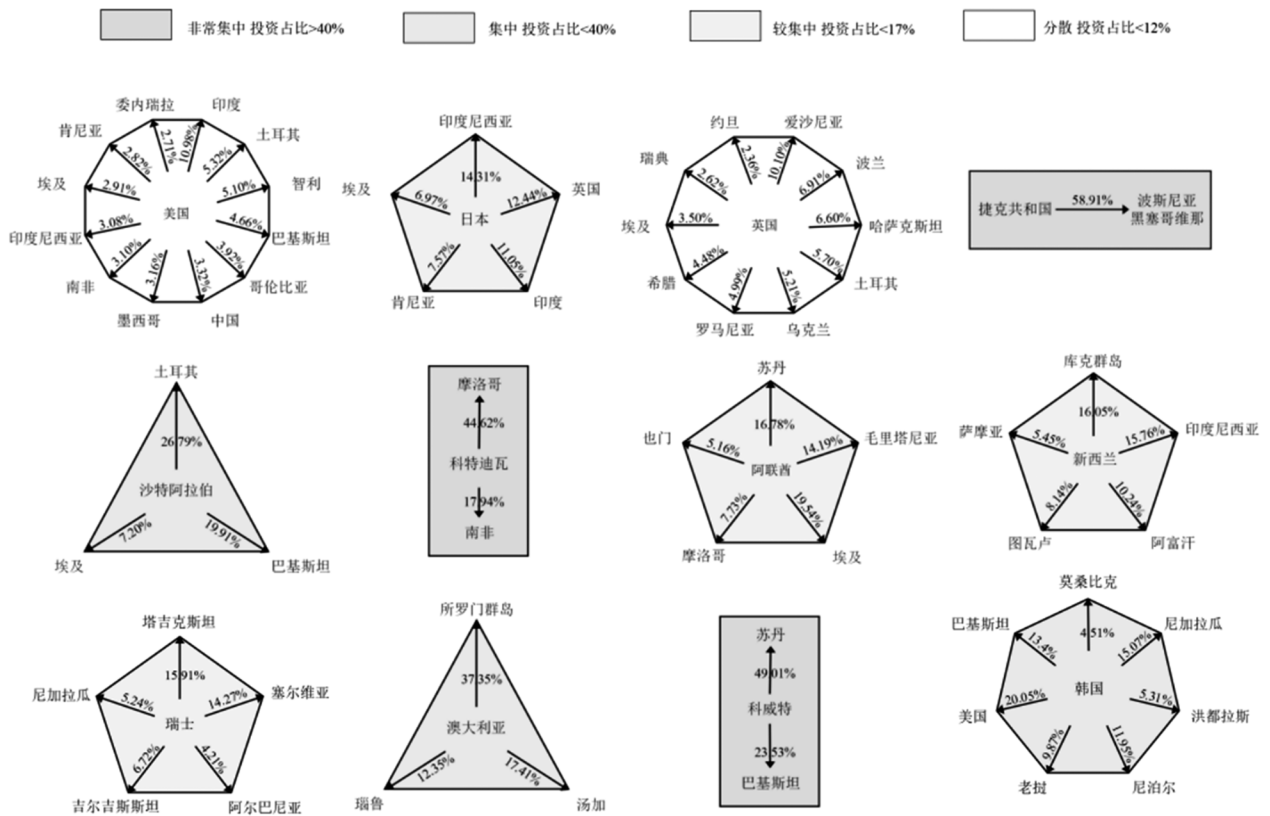
4. 典型区域参与主体竞合关系

图3(a)和图3(b)分别展示了典型清洁能源投资国和清洁能源东道国。投资国中多数是发达国家,这表明发达国家在全球清洁能源投资中占据优势地位。对比来看,美国、日本、英国、韩国、新西兰、澳大利亚和瑞士均为主要的投资国。上述

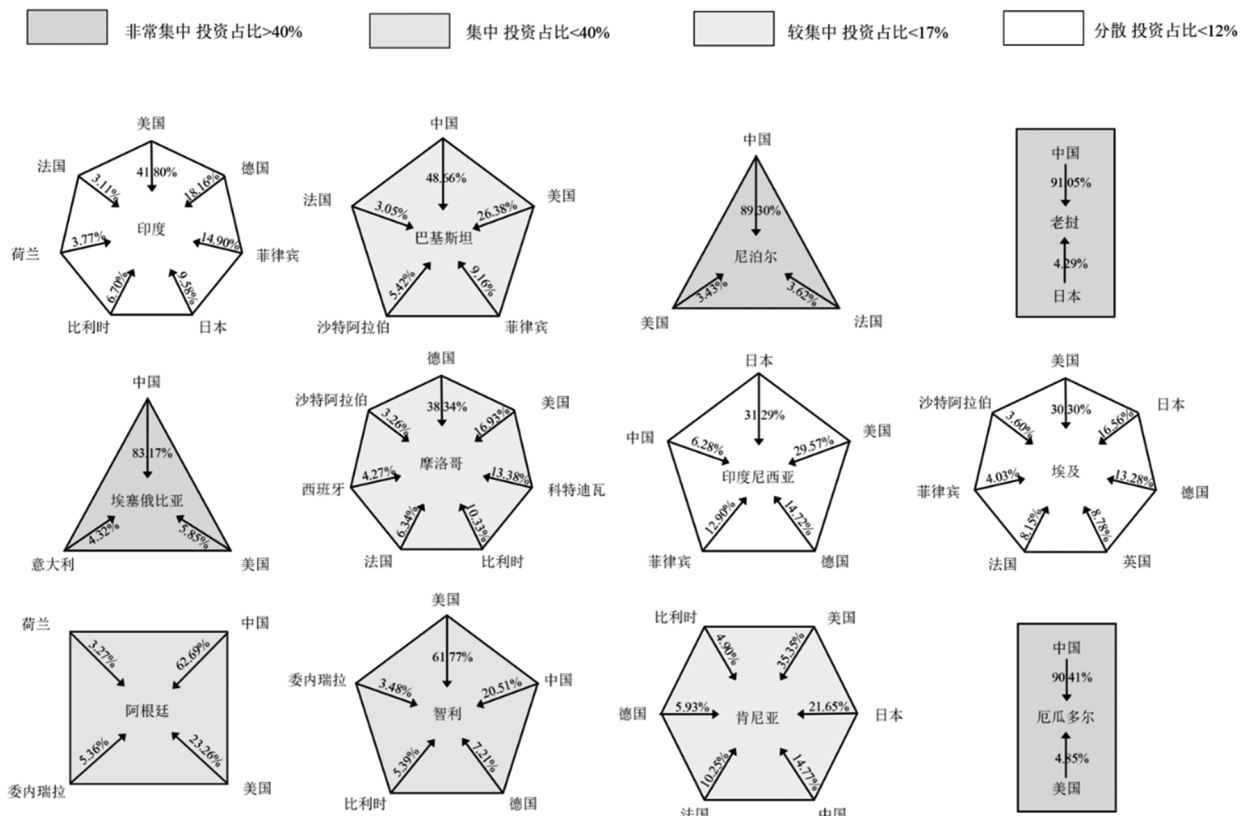
国家在全球清洁能源投资中占据了主导地位,同时其清洁能源投资相对较为分散。美国和英国的清洁能源投资分别集中于印度和爱沙尼亚,分别占总投资的10.98%与10.10%,而对其他东道国的清洁能源投资相对平均。两国的整体投资分布呈现差异化空间格局。其中,美国的清洁能源投资覆盖全球六大洲,重点流向印度、印度尼西亚、埃及、南非、土耳其及智利等国;而英国则表现出显著的地理邻近偏好,欧洲市场的投资比例超过了70%,覆盖了包括爱沙尼亚、罗马尼亚、土耳其等国在内的欧洲国家。

相较之下,清洁能源东道国接收别国的清洁能源投资相对较为集中。中国和美国在其中扮演着重要角色。超过3/4的清洁能源东道国接收了中国的清洁能源投资,其中在2/3的国家中接收的中国的清洁能源投资在所有接收的清洁能源投资的占比超过了50%,而在尼泊尔、老挝、厄瓜多尔和阿根廷这些国家中甚至占据超过60%。中国与上述国家的双边合作关系较为牢靠,且这些国家的清洁能源项目往往以中国为主要清洁能源投资方。美国对图3中大多数东道国均有清洁能源投资,其中对智利和印度的清洁能源投资占据了主导地位。说明中美的清洁能源投资能力较强,而中国对多数第三世界国家的合作深度更高,美国的合作广度更大。实际上,通过对东道国的观察也能够发现中欧、中美和中日之间潜在的竞争关系,这一现象在南巴基斯坦、印度尼西亚和肯尼亚上尤为明显。

清洁能源投资中的“近邻效应”表现为投资国对地理邻近国家的显著偏好。这一现象不仅在英国的投资布局中突出,也主导了大洋洲以澳大利亚和新西兰为核心的投资集团。其中,澳大利亚对所罗门群岛、汤加和瑙鲁的清洁能源投资额分别为37.35%、17.41%和12.35%。而新西兰分别对库克群岛、萨摩亚和图瓦卢这些大洋洲邻近的岛国的清洁能源投资占其总清洁能源投资的16.05%、5.45%和8.14%。摩洛哥位于北非,相较其他非洲国家,因其与欧洲的地理更接近,其与德国和美国的清洁能源投资联系更加紧密,分别占据其接收的清洁能源投资38.34%和16.93%的份额。类似地,中国对位于南亚和东南亚的老挝与尼泊尔的清洁能源投资,也在一定程度上验证了地理邻近性的影响。然而,这一规律在除了英国、澳大利亚和新西兰其余发达国家中表现并不



(a)清洁能源投资国及其投资对象



(b)清洁能源东道国及其投资对象

图3 清洁能源投资国家竞合关系

数据来源:国际可再生能源署(IRENA)。

明显。

欧洲清洁能源投资集团、中东清洁能源投资集团以及亚洲清洁能源投资集团在清洁能源投资决策上展现出明显的区域性偏好。德国和法国倾向于对非洲和南亚地区的国家进行清洁能源投资,主要投资东道国包括印度、摩洛哥、埃及和肯尼亚,分别占上述国家接收总清洁能源投资的21.27%、44.68%、21.43%和16.18%。除此之外,德国对印度尼西亚进行清洁能源投资,法国则进一步扩展至巴基斯坦和尼泊尔。由阿联酋、沙特阿拉伯和科威特组成的中东地区的投资集团倾向于在非洲进行清洁能源投资,尤其是阿联酋,其所有投资对象均位于非洲。具体来说,阿联酋分别在毛里塔尼亚、埃及、苏丹、也门和摩洛哥的清洁能源投资占其总清洁能源投资的14.19%、19.54%、16.78%、5.16%和7.73%。科威特则向苏丹在清洁能源投资了49.01%,沙特阿拉伯则对埃及投资了7.20%。此外,科威特和沙特阿拉伯分别对巴基斯坦进行了23.53%和5.42%的清洁能源投资。韩国的清洁能源投资主要集中在美洲和亚洲,向美国、尼加拉瓜和洪都拉斯分别投资了20.05%、15.07%和5.31%,向巴基斯坦、尼泊尔和老挝分别投资了13.40%、11.95%和9.87%。日本与中国的清洁能源投资对象都比较分散,且投资对象存在一定的相似性,这也意味着会在某些区域存在一定的竞争关系。

四、讨论与政策建议

在全球能源低碳转型的背景下,清洁能源投资已成为重塑国际竞争格局的关键组成。过去20年中,跨国资本流动加速推动清洁能源网络,从以少数大国为核心的格局走向多中心合作模式,但清洁能源投资分布不均、地缘博弈加剧等问题仍旧存在。以下本研究将通过分析清洁能源投资网络的结构演化与特征,和讨论不同国别间的清洁能源投资合作关系,为全球清洁能源投资策略提供启示建议。

1. 全球清洁能源投资网络特征

清洁能源网络并不属于典型的无标度网络,但其存在异质性,投资规模极其不均匀。少数国家清洁能源投资对象较多,与多个国家有投资联系,表现为2000—2020年加权出度前十的国家较为固定,

而加权出度前五的国家主要为美国、巴西、中国、比利时及日本。多数国家的清洁能源投资伙伴较少,投资结构较为单一;与此同时,少数国家清洁能源投资量很大,而多数国家投资量很小。实际上,清洁能源投资网络是核心—边缘结构,具体表现为:一些国家或地区的合作伙伴在局部地区彼此间交往较多,而投资量相对较大的国家起到跨区域沟通桥梁的作用,其合作伙伴分布在全球各个区域,彼此之间联系比较松散,例如美国,其出度数较高。这种核心—边缘结构也进一步印证了清洁能源投资网络在空间分布上的不均衡特征。

2017年全球清洁能源投资网络的节点数、边数、平均度及平均加权度(197.385)均达到最高水平,说明2017年跨国清洁能源投资互动最为活跃,资本流动与技术合作网络趋于稳定。同时,这一网络结构的演变可能与全球气候治理的制度变迁存在一定关联。2015年《巴黎协定》的签署推动了清洁能源投资的政策调整(林茂文,2024;Ishaq and Crawford, 2024),并在2016—2017年形成政策驱动—资本流动—网络演化的传导路径。但在2017年后,各项网络指标呈现系统性回调,节点数与边数分别下降至2020年的66和75,平均加权度回落至89.44。这主要是受全球经济不确定性、地缘政治风险的加剧和2020年全球重大公共卫生事件影响,各国和企业更倾向于采取保守的投资策略,更多国家选择收缩清洁能源投资规模,减少对外资本流动。

聚类系数的先增后降的趋势结果表明,清洁能源投资格局在局部地区呈现集聚性特征,在整体上呈现“小世界”的趋势。在特定区域或国家间,清洁能源的投资网络逐渐增多,并向“局部集群”模式发展。随着清洁能源产业逐步从初期的技术引领转向市场应用的广泛拓展,网络的局部群体逐步增强,而整体网络结构则表现出“小世界”趋势。而20年内网络平均聚类系数整体较小,表明清洁能源投资的地理空间联系仍然较为松散,其区域间的合作网络仍存在较大的发展空间。随着技术的不断进步和政策支持的增强,清洁能源市场尚未达到高度集中的状态,这也为未来的进一步融合和合作提供了可能。

全球清洁能源投资网络中的各国接近中心性和介数中心性的差异,反映了各国在能源投资流动

中的不同角色和影响力。中国在介数中心性中排名第一,却未出现在清洁能源投资网络的接近中心性前十位,原因在于中国的投资集中于几个主要的合作伙伴,因此它在全球清洁能源网络中与其他国家的平均距离较长,联系密度较低,影响了其接近中心性。尽管美国是清洁能源投资领域的重要参与者,但主要扮演的是清洁能源技术和资本的输出国,源自其他国家的投资相对有限,在网络中作为中介的角色相对较弱。巴西是在加权入度中排名第一,加权出度中前五的国家,表明巴西不仅在全球能源投资中扮演着重要的输出角色,同时也是能源投资的重要接收国,这也可以解释其在介数中心性中排名第四的原因。

网络中的新兴节点同样值得引起重视。以尼日利亚为例,自2013年以来,尼日利亚在清洁能源投资网络中的加权入度排名位居前列,显示出其对清洁能源投资的巨大吸引力,其中中国投资了89.3%。实际上,尼日利亚的清洁能源潜力巨大,但其清洁能源资源仍未开发,太阳能和风能技术对发电量的贡献不到1%(Oduro et al., 2024)。尼日利亚当局出台了一些政策和法规,例如《多年电价令》(MYTO)、尼日利亚清洁能源和能源效率政策(NREEP)以及微型电网监管框架等政策(Akpojedje et al., 2025),为清洁能源的部署创造一个有利的融资环境。这些政策不仅为国内外投资者提供了投资保障,也为尼日利亚未来清洁能源领域的发展奠定了基础(Nitte et al., 2023)。

尼日利亚和巴西分别是非洲和南美洲最大的经济体和人口最多的国家,且都拥有大量的可再生能源资源,在吸引清洁能源的投资方面都排名前列。具体来看,巴西在2007年通过引入拍卖机制提高了电力市场透明度,降低了成本,促进了开发者与政府间的合作,同时通过技术特定政策和分布式发电计划激励了清洁能源需求,创造了良好的融资环境(Herrera et al., 2024)。相比之下,尼日利亚对投资者缺乏足够的政治承诺,导致政策机制的执行有限,尤其是在2016年签署的1.125吉瓦太阳能电力采购协议(PPA)由于准入电价和担保政策的反复变动而停滞(Isah et al., 2023),这增加了主权风险并造成了大规模清洁能源项目的不确定性。因此,需要强大的政治意愿和政策一致性,尼日利亚政府才能为外资企业创造良好的清洁能源

投资环境。

2. 不同国别间的投资合作关系

当前,全球清洁能源投资网络呈现出中心化向多元化、局部性向全球性的演化趋势,主要清洁能源大国和新兴经济体之间的投资合作关系日趋复杂。尽管清洁能源投资呈现出强劲增长的势头,但全球范围内的投资分布不均、政治和经济的不确定性依然对清洁能源项目的推进形成了挑战。为了应对这些挑战,确保全球清洁能源投资网络的稳定性与可持续性,国际社会亟须采取有效的政策措施,推动跨国合作与资本流动,以促进全球清洁能源产业链的整合和发展。

美国的清洁能源投资最为分散,2000—2020年累积投了136个国家,累积清洁能源投资额超过了551.52亿美元,凸显其作为核心投资国的网络渗透能力。这一投资能力的形成可归因于美国多元化的融资机制,如政府通过投资税收抵免(ITC)、生产税收抵免(PTC)等税收抵免及贷款担保等政策工具降低项目风险(Rao, 2024);私营部门则依托绿色债券、可再生能源信托基金等资本市场创新拓宽融资渠道,有效缓解清洁能源技术高初始成本的约束(Chai et al., 2025)。在此机制驱动下,美国企业通过技术输出与股权投资深度介入东道国项目开发,形成以市场导向为主的跨境投资模式。然而,美国清洁能源投资的持续扩张面临结构性制约。国内政策周期性与地缘政治目标间的张力,导致监管框架稳定性不足。

在欧盟内部,各个国家扮演着不同的角色,比利时自2018年开始占据全球清洁能源投资量最大的国家,而法国、英国、德国则因其长期以来的技术积累和政策支持在清洁能源投资中也占据重要地位,对外清洁能源投资总额和投资国数量均很大。相比之下,西班牙、罗马尼亚、爱沙尼亚波兰更多扮演了清洁能源投资的东道国角色,他们更多地倾向于去接收欧盟其他国家的投资。欧盟在绿色转型领域构建了高度协同的政策框架,为成员国之间清洁能源投资的相互促进创造了有利条件。一方面,欧盟通过《欧洲绿色新政》设定了统一的2050年气候中和目标。另一方面,绿色转型得到了来自欧盟预算的大量财政支持。欧洲结构与投资基金(ESIFs)被认为是促进实现包括绿色转型在内的《欧洲绿色新政》目标的重要资源。在2021—2027

年,欧洲区域发展基金(ERDF)预算的30%和凝聚力基金预算的37%应用于实现气候目标。这种大规模的公共资金引导不仅直接拉动了项目投资,更重要的是,向整个市场发出了强烈的政策信号,可能增强了私人资本对清洁能源领域长期营利性和稳定性的信心,从而激励了更多跨境与跨区域的资本流动与合作。

中国2013年提出了“一带一路”倡议,吸引了越来越多的投资和贷款来开发世界各地,尤其是发展中国家的清洁能源项目。中国与巴基斯坦合作推进中巴经济走廊建设,与老挝合作水电开发(Mirza et al., 2024),与阿根廷和巴西实现清洁能源结构多样化和可持续发展的目标相结合(Ugarteche et al., 2023)。此外,中国在许多非洲国家的能源领域参与了相对较大的项目,对非洲大陆获得清洁和可持续能源的获取产生了重大影响(Lema et al., 2021)。加纳的Buai大坝和赞比亚的Kafue Gorge水电站提供清洁的水电、肯尼亚Garissa光伏项目和中非共和国的Sakai光伏项目利用太阳能发电以及埃塞俄比亚的Aysha风电场项目。总体来说,中国在海外的清洁能源投资正为“一带一路”共建国家的绿色低碳转型提供强大助力,中国清洁能源的海外发展也正在从单纯的电站建设转向更加全面的产能合作(孙磊等,2025)。

与此同时,非洲一些国家也积极参与到全球清洁能源投资网络中,成为关键的投资接受方。尼日利亚和埃塞俄比亚与中国的合作关系尤为密切,分别接受了中国70.35亿美元和57.31亿美元的清洁能源投资。相比之下,摩洛哥和埃及则更倾向于与欧美国家展开合作,摩洛哥和埃及分别从德国和美国获得了清洁能源投资,摩洛哥接受了22.22亿美元和9.82亿美元,而埃及则分别获得了7.08亿美元和16.17亿美元的投资。该地区清洁能源市场面临诸多挑战,包括基础设施薄弱、资金匮乏、技术转移困难以及腐败等因素(Tawiah et al., 2022),但其巨大的清洁能源潜力正在吸引越来越多的全球投资者。

本研究引入变量制度距离和文化距离,以解释英国和法国的区域性偏好现象。通过计算1996—2023年英国和爱沙尼亚的制度距离,可以发现英国和爱沙尼亚的制度距离呈现减少的趋势。正是因为制度距离的减少,导致了英国向爱沙尼亚的清洁

能源投资增多。2000—2020年英国在爱沙尼亚的清洁能源投资占其总投资的10.10%。此外,通过计算法国与其他国家的四维度文化距离,结果在0至5.87之间,四分位数为1.19,其中摩洛哥与法国的四维度文化距离为0.64,埃及为1.03。这可能由于摩洛哥和埃及都曾经为法国的殖民国有关。法国在2000—2020年向摩洛哥的清洁能源投资占据摩洛哥接收的清洁能源投资的6.34%,埃及为8.15%。

3. 政策启示与建议

国际能源署(IEA)发布的《2024年世界能源投资报告》表明,全球能源投资总额预计将首次超过3万亿美元,其中有2万亿美元用于清洁能源、电动汽车和核能等清洁技术。在全球能源进行能源转型的背景下,清洁能源的供需在全球出现局部不均衡现象,全球清洁能源网络结构的演化正在由双核主导向多核联动转变,网络结构趋于松散。在这个关键时期,通过优化清洁能源政策获取国际清洁能源市场的话语权与决策权就显得至关重要。基于本研究对全球清洁能源投资网络的分析,部分政策启示与建议如下:

世界清洁能源投资网络呈现出的“点对点”结构,这种双边依赖关系深刻影响着全球能源安全的稳定性。能源供需双方的互依性和脆弱性使得国际能源投资关系更加复杂,易受地缘政治、经济波动以及全球突发事件的干扰。在确保能源供应来源的多元化的基础上,与重点清洁能源供给国建立紧密且稳定的合作关系,将有效降低国家能源安全面临的风险。特别是对于一些对外能源依赖较高的国家,通过签订长期合同、建立战略储备机制等方式,确保与关键清洁能源供应国的平稳投资关系,不仅有助于应对全球能源市场的不确定性,还能有效提升国家能源安全和战略灵活性。

在缺乏稳定的国际合作框架国际形势下,不同国别及区域间获取清洁能源技术价值的不平等,阻碍全球清洁能源一体化的协调与发展的协调与发展。为实现区域内的平衡发展,这一目标应通过优化国际资源配置,增强技术创新和资金流动,特别是鼓励新兴经济体参与全球清洁能源体系的建设,提升其技术自主性和市场竞争力。双边和多边倡议在内的国际伙伴关系和合作也可以促进技术转让、能力建设和知识共享,为清洁能源投资创建政

策条件。

在对外投资过程中,针对从事小型光伏、风能及生物质能等领域的中资企业,开发相应支持工具,有助于推进企业积极开拓分布式清洁能源市场;随着各投资地区融资模式日趋多元化,在项目前期根据不同地区和国别特点制定因地制宜的融资方案,提升投融资效率;面对气候灾害频发、政局动荡、债务率高企等现实状况,各投资机构在项目落地前应综合研判东道国的气候风险、政治风险与债务风险,开展全面风险排查,健全风险评估体系。

在全球能源转型的背景下,发展中地区清洁能源投资的合作伙伴关系亟待加强,特别是在非洲、南亚和东南亚等新兴市场。以非洲为例,尽管非洲清洁能源投资潜力巨大,拥有丰富的可再生能源资源,但由于资金不足和技术水平相对较低,许多项目仍未得到有效开发。因此,发达国家和国际金融机构应当加大对非洲清洁能源领域的投资力度,提供必要的资金支持和技术援助。通过加深合作,发达国家不仅能帮助非洲加速能源转型,还能够实现共同的气候目标,并在非洲市场中获得可持续的经济利益。特别是非洲的太阳能和风能资源为全球能源安全和碳减排提供了重要的机会,国际社会应通过更加积极的投资和合作,为非洲创造更大的清洁能源发展空间。

贸易保护主义的兴起,区域化趋势在一定程度上与国际市场分工相冲突,这反映了经济地理学中区域经济自给与全球价值链动态调整之间的张力。为了缓解这种张力并促进全球清洁能源的均衡发展,国际社会需要加强合作,推动贸易自由化和投资便利化。同时,通过发展众筹、影响力投资和绿色债券等创新融资机制,可以为清洁能源项目筹集更多的投资资本,降低融资成本,吸引更多的私人 and 公共资本投入,从而提高清洁能源投资效率和可持续性。

当前,国际局势深刻演变,影响广泛深远,世界发展正步入新的动荡变革期,全球能源安全面临严峻挑战。在全球追求可持续绿色能源的愿景下,各主要经济体加大政策引导,吸引更多投资加入到清洁能源的开发和应用之中。总体来看,清洁能源投资是实现能源转型和应对气候变化的必要途径,有

助于减少对进口能源的依赖,保障能源的稳定供应,带动相关产业的发展和 innovation,推动经济和社会的可持续发展。在能源转型的背景下,构建全球清洁能源复杂投资网络,探究典型国别清洁能源投资机制,有助于探寻有利于清洁能源投资的政策导向、社会环境及发展方向,为跨境清洁能源投资提供政策建议与理论支持。

五、总结

世界正处百年未有之大变局,全球经济地理的整体格局正在或即将出现系统性重构。清洁能源投资作为整合和重塑世界经济地理的重要变量,对其空间格局的审视有助于理解世界经济格局的演变动向。本研究基于复杂网络理论,从全球视角分析了2000—2020年清洁能源投资网络的空间格局演变、网络整体特征、节点特征以及典型区域参与主体竞合关系。研究发现:第一,本研究推进了了对清洁能源全球化资本流动机制的理解。研究发现全球投资模式已经发生了变化,从原来的双核主导变成了现在的多极化特征。随着各国之间投资联系的加强,跨国资本流动的规模不断增大,资本在全球范围内资源配置的效率也呈现出上升的趋势。清洁能源全球化资本流动表现出明显的区域特征。其中,欧洲和中东地区形成了投资集群,而大洋洲的投资则主要集中在邻近国家,可能受到制度距离、文化距离和绿色金融政策协同性等因素的影响。第二,本研究修正了核心—边缘模型在绿色转型背景下的适用性。本研究通过核心—边缘算法计算出网络的集中度和网络中各个节点的核心性,发现全球清洁能源投资网络中长期存在显著的核心—外围结构,中国、美国、日本和德国在本研究研究年份中一直处于核心结构。第三,本研究阐明了政策冲击对网络结构的深度重塑作用。以2015年《巴黎协定》的签署为转折点,全球清洁能源投资网络的节点数、边数、平均度及平均加权度都在增长,在2017年均达到历史最高水平,说明宏观政策能够强化节点间的关联强度与资源配置效率,驱动清洁能源投资网络从碎片化的投资行为向高度协同的拓扑结构转型。综上所述,本研究通过揭示全球清洁能源投资网络的演变规律,为理解绿色资本在全球范围内的动态配置提供了多

维视角。在应对全球气候变化与推动能源转型的关键时刻,识别网络关键枢纽、优化多边投资路径以及强化绿色金融政策协同,不仅是各国提升自身在能源格局中竞争力的核心诉求,更是构建更具韧性、高效且普惠的全球清洁能源治理体系的必由之路。

(本研究的撰写工作得到了期刊编辑部及匿名审稿人的悉心帮助,在文章撰写过程中顾天玥、朱瑞鑫、张雨萌等同学参与数据收集、整理与校验工作,在此一并致谢。)

参考文献:

- [1] SAQIB N, DINÇÄ G. Exploring the asymmetric impact of economic complexity, FDI, and green technology on carbon emissions: Policy stringency for clean-energy investing countries[J]. *Geoscience frontiers*, 2024, 15(4).
- [2] NEZHNIKOVA E V, OKHREMENKO I V, PAPELNIUK O V. Investigation of the features of investment in the development of renewable energy sources: main consumers, legal regulation, equipment, rates and delivery [J]. *International journal of energy economics and policy*, 2018, 8(4): 178-186.
- [3] MUHAMMED G, TEKBIYIK-ERSOY N. Development of renewable energy in China, USA, and Brazil: A comparative study on renewable energy policies [J]. *Sustainability*, 2020, 12(21).
- [4] DORSEY-PALMATEER R, NIU B. The effect of carbon taxation on cross-border competition and energy efficiency investments[J]. *Energy economics*, 2020, 85: 104602.
- [5] HASSAN Q, ALGBURI S, SAMEEN A Z, et al. A comprehensive review of international renewable energy growth[J]. *Energy and built environment*, 2024.
- [6] 王超, 孙福全, 许晔, 等. 乌克兰危机下的全球能源格局变化及能源科技发展新特点[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(6).
- [7] BLYTH W, et al. Investment risks under uncertain climate change policy [J]. *Energy policy*, 2007, 35(11): 5766-5773.
- [8] GALLAHER A, et al. Breaking wind: A comparison between US and European approaches in offshore wind energy leadership in the North Atlantic region [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2023, 187: 113766.
- [9] 史冬梅, 王晶. 中国、日本、韩国电池技术和产业发展战略态势分析[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(2).
- [10] DURAKOVIC G, CRESPO DEL GRANADO P, TOMASGARD A. Powering Europe with North Sea offshore wind: The impact of hydrogen investments on grid infrastructure and power prices [J]. *Energy*, 2023, 263: 125654.
- [11] BILGILI M, ALPHAN H, ILHAN A. Potential visibility, growth, and technological innovation in offshore wind turbines installed in Europe [J]. *Environmental science and pollution research*, 2023, 30(10): 27208-27226.
- [12] FANG Z. Assessing the impact of renewable energy investment, green technology innovation, and industrialization on sustainable development: A case study of China [J]. *Renewable energy*, 2023, 205: 772-782.
- [13] SHARMA P, MEENA S. Comparative assessment of solar power capacity and policy framework in India and China [J]. *International journal of fundamental and multidisciplinary research*, 2026, 6(2): 1-12.
- [14] 曲申, 宋怡藩, 张薇, 等. 中国省际能源高质量协同发展测度[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2024, 26(2).
- [15] BOURAIOU A, et al. Solar Energy in Algeria: Geographical Advantages, Photovoltaic Potential, and Policy-Driven Initiatives in the Saharan Region [C]. 2023 14th International Renewable Energy Congress (IREC). IEEE, 2023.
- [16] ZYADIN A, et al. Challenges to renewable energy: A bulletin of perceptions from international academic arena [J]. *Renewable energy*, 2014, 69: 82-88.
- [17] POPP D, HASCIC I, MEDHI N. Technology and the diffusion of renewable energy [J]. *Energy economics*, 2011, 33(4): 648-662.
- [18] BELLAKHAL R, BEN KHEDER S, HAFFOUDHI H. Governance and renewable energy investment in MENA countries: How does trade matter? [J]. *Energy economics*, 2019, 84.
- [19] YANG W, DU D, YOU X, et al. Network structure evolution and spatial complexity of global transnational investment [J]. *Scientia geographica sinica*, 2017, 37(9): 1300-1309.
- [20] 綦建红, 马雯嘉, 赵雨婷, 等. 全球绿色能源投资网络的演化特征与节点分析[J]. *金融发展研究*, 2019(4).
- [21] 杨宇, 任亚文. “组织-贸易”视角下全球能源治理网络的基本结构及其边界重构[J]. *地理研究*, 2023, 42(1).
- [22] HE Z, CHONG Z, YANG Y, et al. Evolutionary investment network and the emerging energy power in Central Asia: From the perspective of cross-border

- mergers and acquisitions [J]. *Journal of geographical sciences*, 2020, 30(11): 1849–1870.
- [23] 何则, 杨宇, 刘毅, 等. 世界能源贸易网络的演化特征与能源竞合关系[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(10).
- [24] 夏四友, 郝丽莎, 唐文敏, 等. 复杂网络视角下世界石油流动的竞合态势演变及对中国石油合作的启示[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(11).
- [25] 种照辉, 姜信洁, 何则. 国际能源贸易依赖网络特征及替代关系研究: 化石能源与可再生能源[J]. *地理研究*, 2022, 41(12).
- [26] 张强, 杜德斌, 郭卫东, 等. 全球能源结构性权力时空格局演变及其关键驱动因素[J]. *地理学报*, 2023, 78(9).
- [27] LIN M, LIU S Q, LUO K, et al. A prospect–theory evolutionary game model to analyse cooperation of long-term energy contracts[J]. *Energy*, 2025, 330: 136855.
- [28] FAGIOLO G, REYES J, SCHIAVO S. World–trade web: Topological properties, dynamics, and evolution [J]. *Physical review E*, 2009, 79(3): 036115.
- [29] KALI R, REYES J. The architecture of globalization: A network approach to international economic integration [J]. *Journal of international business studies*, 2007, 38(4): 595–620.
- [30] FAGIOLO G, REYES J, SCHIAVO S. The evolution of the world trade web: A weighted–network analysis [J]. *Journal of evolutionary economics*, 2010, 20(4): 479–514.
- [31] SQUARTINI T, FAGIOLO G, GARLASCELLI D. Randomizing world trade. I. A binary network analysis[J]. *Physical review E*, 2011, 84(4): 046117.
- [32] 金永红, 汪巍, 奚玉芹. 中国风险投资网络结构特性及其演化[J]. *系统管理学报*, 2021, 30(1).
- [33] BRIGLAUER W, CAMBINI C, GUGLER K, et al. Net neutrality and high–speed broadband networks: Evidence from OECD countries [J]. *European journal of law and economics*, 2023, 55(3): 533–571.
- [34] BRIDA J G, DRIHA O M, Ramón–Rodríguez A B, et al. Dynamics of internationalisation of the hotel industry: The case of Spain [J]. *International journal of contemporary hospitality management*, 2015, 27(5): 1024–1040.
- [35] CRÓ S, MARTINS A M. Foreign direct investment in the tourism sector: The case of France [J]. *Tourism management perspectives*, 2020, 33.
- [36] ANBUMOZHI V, BHUPENDRA K S. Cross–border integration of renewable energy systems: Experiences, impacts, and drivers[M]. Oxford: Taylor & Francis, 2024.
- [37] 柏明国, 郑柯, 姚毓婷. 长三角城市绿色创新空间关联及影响因素研究[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 41(5).
- [38] WANG K, DING R, XIAO W, et al. A multi–layer network perspective on green finance and clean energy industry synergistic development and mutual reinforcement: Mechanism analysis, correlation effect and enhancement path[J]. *Renewable energy*, 2025, 240.
- [39] KOGUT B, SINGH H. The effect of national culture on the choice of entry mode [J]. *Journal of international business studies*, 1988, 19(3): 411–432.
- [40] ROSSA F D, DERCOLE F, PICCARDI C. Profiling core–periphery network structure by random walkers [J]. *Scientific reports*, 2013, 3(1): 1467.
- [41] 林茂文. 油气产业和新能源的多元协同发展趋势[J]. *石油季刊*, 2024, 60(4).
- [42] ISHAQ H, CRAWFORD C. Review of ammonia production and utilization: Enabling clean energy transition and net-zero climate targets [J]. *Energy conversion and management*, 2024, 300.
- [43] ODURO P, SIMPA P, EKECHUKWU D E. Exploring financing models for clean energy adoption: Lessons from the United States and Nigeria [J]. *Global journal of engineering and technology advances*, 2024, 19(2): 154–168.
- [44] AKPOJEDJE F O, MOHAMMED A, ORUKELE A S. Influence of demand side management and multi year tariff order pricing model on energy management and its sustainability in Nigeria power systems [J]. *NIPES–Journal of science and technology research*, 2025, 7(1): 145–157.
- [45] NITTE I S, SALAHUDEEN T M. Energy transitions in Nigeria: The role of policies for the adoption of low-carbon technologies and system integration [J]. *EPRA international journal of research and development*, 2023, 8(3).
- [46] HERRERA M M, URIONA MALDONADO M, MÉNDEZ–MORALES A. Auction–based policy of Brazil’s wind power industry: Challenges for legitimacy creation [J]. *Energies*, 2024, 17(24): 6450.
- [47] ISAH A, DIOHA M O, DEBNATH R, et al. Financing renewable energy: Policy insights from Brazil and Nigeria [J]. *Energy, sustainability and society*, 2023, 13(1): 2.
- [48] RAO S. Quantifying how United States clean energy expansion policies interact with European Union investment: An event study using green bond spreads[D]. Boston College Morrissey School of Arts and Sciences, 2024.
- [49] CHAI S, CHU W, ZHANG Z, et al. Dynamic nonlinear connectedness between the green bonds, clean energy,

- and stock price: The impact of the COVID-19 pandemic [J]. *Annals of operations research*, 2025, 345(2): 1137-1164.
- [50] SUHRAB M, ULLAH A, PINGLU C, et al. Boosting green energy: Impact of financial development, foreign direct investment, and inflation on sustainable energy productivity in China-Pakistan economic corridor (CPEC) countries[J]. *Environment, development and Sustainability*, 2025, 27(2): 4659-4682.
- [51] MIRZA Z T, et al. A thematic analysis of the factors that influence the development of a renewable energy policy [J]. *Renewable energy focus*, 2024, 49: 100562.
- [52] UGARTECHE O, DE LEÓN C, GARCÍA J. China and the energy matrix in Latin America: Governance and geopolitical perspective [J]. *Energy policy*, 2023, 177: 113435.
- [53] LEMA R, et al. China's investments in renewable energy in Africa: Creating co-benefits or just cashing-in? [J]. *World development*, 2021, 141: 105365.
- [54] 孙磊, 廖原, 杨林, 等. 亚洲可再生能源投资展望[J]. *国际工程与劳务*, 2025(4).
- [55] TAWIAH V, KEBEDE J, KYIU A. Corruption, Chinese investment, and trade: Evidence from Africa [J]. *Journal of Emerging Market Finance*, 2022, 21(2): 123-151.

Complex Network Characteristics and Competitive Evolution Trends of Global Clean Energy Investment

Han Mengyao Li Jinzhou Li Hongtu

Abstract: In the context of addressing climate change, investment in clean energy has become a key focus of the international community. To systematically analyze the complex network characteristics of clean energy investment and the competitive and cooperative dynamics among the participating entities, this study, based on the global clean energy investment network from 2000 to 2020, systematically examined its spatial pattern, network characteristics, and the competitive and cooperative relationships among the countries. The results showed that global landscape of clean energy investment, which was initially dominated by the United States and China, gradually shifted toward a multipolar distribution after 2010. The number of network nodes, average degree, and average weighted degree reached their maximum values in 2017. From 2009 to 2019, it exhibited a small world characteristic. The weighted out-degree of China, the United States, Japan, and European countries was relatively high, while the weighted in-degree of Southeast Asian, South Asian, North African, and East African countries was relatively high. The investment destinations of China and the United States were diverse in terms of depth and breadth, while Europe and the Middle East showed obvious regional preferences. The investment of the United Kingdom and Oceania demonstrated a neighbor effect. By combining the complex network characteristics of global clean energy investment, this study aims to reveal the evolution trend and competitive and cooperative relationships of the global clean energy investment network, providing quantitative support and suggestive recommendations for the role positioning of countries in global clean energy investment.

Key Words: Clean Energy; Evolutionary Characteristics; Investment Network; Cooperative-competitive Evolution

(责任编辑:江 夏)