

国际光伏发电贸易网络动态演变研究

刘舒一

(青岛科技大学经济与管理学院, 山东 青岛 266000)

摘要: 光伏发电作为推动传统能源系统向低碳化转型的关键手段,对于实现全球气候目标具有重要意义。借助 2012—2021 年全球光伏器件的贸易数据,通过社会网络分析的方法构建全球光伏发电贸易网络并分析其演化特征,识别该网络的基本情况和趋势。研究发现:2012—2021 年,全球光伏发电贸易网络经历了显著的发展与扩张,各国间的贸易联系日益紧密。该贸易网络呈现高聚集性和较短路径长度,具有显著的“小世界”特性。全球光伏发电贸易网络的节点表现出一种稳定的“核心-边缘”结构。同时中国的核心位置愈发显著,其在全球光伏发电贸易网络中的领导作用不断增强,已经成为推动该领域贸易发展的关键力量,贸易活动的重心也正呈现东升西降的趋势。

关键词: 社会网络分析法; 贸易网络; 全球光伏发电网络

中图分类号: F416.61; F742 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)12-0015-08

进入 21 世纪后,全球气候变暖及化石燃料资源的逐渐耗尽,使能源供应不确定性增加,能源安全风险急剧上升。因此,开发和利用可再生能源成为国际社会广泛认可的应对策略。越来越多的国家(地区)加快了光伏产业的发展步伐^[1],显著促进了光伏器件在全球范围内的贸易流通。据国际能源署发布的报告,2012—2022 年,全球新增光伏装机容量持续攀升,其中 2022 年全球累计生产光伏器件的产能增长 40%,达到约 640 GW。光伏发电已经成为全球第四大电力来源,仅次于煤炭、天然气和水力发电。随着全球光伏产业的蓬勃发展,全球光伏发电的贸易规模持续扩张,贸易网络愈发复杂。因此,研究全球光伏发电贸易网络及其动态变化特征,对于把握贸易流向、识别网络结构演变及预测未来发展方向具有重要意义。

国内外学者以社会网络的视角对光伏产业贸易领域进行了探索,并取得了一定成果。Fu 等^[2]研究了 1988—2013 年包括光伏产业在内的全球可再生能源贸易的空间布局和网络结构,发现贸易网络规模持续增长,并逐渐形成了由欧洲、美国及中国引领的三极化结构。在对 2000—2014 年国际光伏产品贸易模式的研究中,Guan 等^[3]发现欧洲国家在该贸易网络中占据了举足轻重的地位。肖建雄^[4]揭示了 2000—2019 年“一带一路”沿线国家光伏产品贸易网络经历了一个从简单架构向“核心-边缘”模

式再到双核心结构的演变过程。Wang 等^[5]通过静态视角对全球光伏产品贸易的特点和竞争态势进行分析,揭示亚洲国家在光伏产品出口领域占据核心地位,光伏产品贸易的竞争焦点则聚焦于欧洲与亚洲。此外,他们从动态视角探讨了基于传染病模型的光伏产品贸易网络中的风险传播级联效应,指出全球光伏贸易网络兼具稳定与脆弱特性,且该网络对于需求减少的抵御能力较供给减少更为强大。

本文采用 2012—2021 年全球光伏器件贸易数据构建网络,运用社会网络分析和 Gephi 可视化工具,系统性地探讨全球光伏器件贸易网络的拓扑结构与动态演化特征,为该领域后续研究提供新思路。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

社会网络分析(SNA)模型是一种借助图论等方法来表示和研究个体间相互关系的工具。在组织或项目环境中,该模型可有效识别关键利益相关者,分析他们之间的联系强度与合作方式,并通过量化手段评估不同节点间的关系,进而揭示网络的结构、节点的特征以及互动模式等相关信息。相关网络测度指标如表 1 所示。

1.2 数据来源与处理

本文集中于 2012—2021 年光伏器件(商品编码为 HS854140)的主要贸易国家^[6],并依据贸易额将其划分,参考 Hausmann 等^[7]的 99% 筛选法将筛选

收稿日期: 2024-12-17

基金项目: 国家社会科学基金(24BGL278); 山东省自然科学基金(ZR2023MG059)

作者简介: 刘舒一(2001—),女,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为物流工程与管理。

表1 网络测度指标

指标		公式	含义
网络密度		$\rho = \frac{l}{N(N-1)}$	l 为网络中连边数; N 为节点数; ρ 为网络中节点之间连接的紧密程度
平均聚类系数		$C_i = \frac{2n_i}{k_i(k_i-1)}$	k_i 为节点 i 的连边数量; n_i 为节点 i 的相邻节点之间的连边数量; C 为贸易伙伴之间的聚集性和内聚性
平均最短路径长度		$L = \frac{\sum_{i,j} d_{ij}}{N(N-1)}$	d_{ij} 为节点 i 和 j 之间最短路径经过的边数; L 为网络中所有节点对之间最短路径长度的平均值
互惠性		$R = \frac{\sum_{i \neq j} a_{ij} a_{ji}}{l}$	a_{ij} 为无权贸易网络邻接矩阵值; R 为贸易关系的对称性和稳定性
平均度	平均出度	$K^{\text{out}} = \frac{\sum_i k_i^{\text{out}}}{N}$	出度(入度)表示 i 国向其他国家出口(进口)产品的国家数量,用于衡量网络中所有节点之间连接关系的密集程度
	平均入度	$K^{\text{in}} = \frac{\sum_i k_i^{\text{in}}}{N}$	
度中心性	出度中心性	$C_i^{\text{out}} = \frac{k_i^{\text{out}}}{N-1}$	度中心性可精准评估国家作为出口方与进口方在全球贸易体系中的重要性
	入度中心性	$C_i^{\text{in}} = \frac{k_i^{\text{in}}}{N-1}$	
强度	出强度	$CC_i^{\text{out}} = S_i^{\text{out}}$	强度表示一个节点与其他节点之间贸易关系的紧密程度或贸易量的总和,节点的强度越大,相应它的贸易额就越大
	入强度	$CC_i^{\text{in}} = S_i^{\text{in}}$	

出的节点国家作为网络节点,将进出口贸易关系定义为网络连边,以此来揭示并描述新能源贸易网络结构的动态演变过程。并基于徐林明和李美娟^[8]的处理方式将相关产品光伏器件(HS 854140)的贸易额作为光伏发电的代替指标。从联合国贸易数据库(UN Comtrade Database)中收集 2011—2021 年光伏器件的贸易数据,其中贸易额均以美元为计量单位。鉴于数据统计口径的多样性,考虑到进出口之间的时间差^[9],因此选用由各个经济体官方提供的进口贸易额数据,累计收集到的完整数据共超过 60 000 条。

数据处理方法:①为了确保所有数据的可比性和运算可行性,统一所有数据的数值位数与计量单位;②剔除国家间贸易额少于 100 万美元的连边,保证剩余国家或地区的贸易额占比不少于全球总贸易额的 90%^[2,10];③所有数据将依据国家或地区名称进行匹配和汇总,使其能够构建网络并进行分析;④利用光伏器件的贸易数据,将各个国家或地区作为网络的节点,逐年构建 2012—2021 年的有向加权贸易网络,以便在 Ucinet 软件中进行社会网络分析。

2 全球光伏发电贸易网络结构特征分析

2.1 整体拓扑结构演变

为了直观展现 2012 年、2016 年、2021 年光伏发电领域的贸易网络演变情况,利用 Gephi 软件进行可视化分析。将国家作为贸易网络的节点,各国之

间光伏器件的进出口贸易额则作为连边,每条边的箭头方向从出口国指向进口国,分别构建这三年的贸易网络结构拓扑图(图 1)。

由图 1 可知,2012—2021 年光伏发电贸易网络整体呈现越来越密集且日趋复杂的趋势,并呈现显著的“核心-边缘”结构。自 2004 年德国率先推出可再生资源法案后,西班牙、意大利、美国和日本等发达国家相继出台了扶持光伏发电产业发展的政策,刺激了全球光伏器件贸易的发展^[11]。在图 1(a)中,2012 年网络结构相较于其他两个年份更显稀疏,包含 106 个国家节点,连边数量少且分布不均。边缘国家连边少,中心区域的连边稠密。其中核心国家如中国、美国、德国、意大利、日本、韩国、英国、奥地利、荷兰、西班牙和法国 11 国连边较多,其余国家连边稀疏,部分国家无连边。在图 1(b)中,2016 年的网络里拥有连边的节点数量大增,整体网络结构由稀疏变密集。核心国家从 11 国增至包括马来西亚、新加坡、泰国、越南、波兰和菲律宾等多国,其余国家贸易连边数也有所增长,相较于初始阶段,2016 年贸易网络规模与紧密度均显著提升。在图 1(c)中,2021 年网络整体变化特征进一步强化,网络结构更为复杂。网络规模显著扩张,中心国家拓展至比利时、匈牙利和丹麦等国家。这些国家间的连边数量大幅增加,意味着核心国家光伏发电贸易地位得以巩固,彼此间的贸易联系更紧密。总之,全球光伏发电贸易网络持续扩大,经济体间联

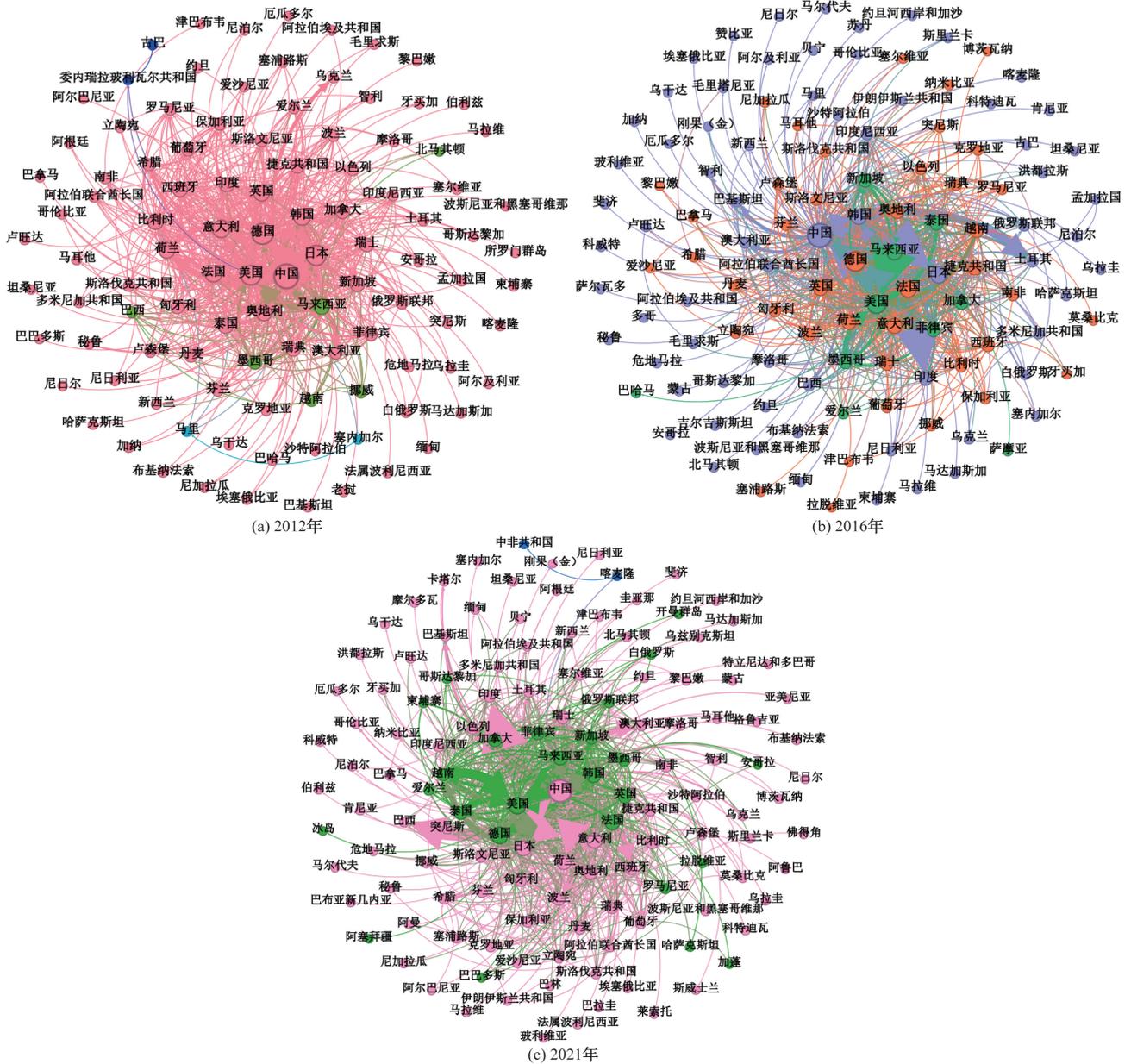


图 1 光伏发电贸易网络拓扑图

系愈发紧密,逐步形成结构稳定、多极化分布的贸易格局。

对比图 1(a)~图 1(c),亚太地区在出口领域持续占据主导地位,中国则稳居光伏发电贸易首要供应国之位。面对欧美不断强化的贸易保护举措,中国灵活调整出口策略,将市场重心从传统欧美地区向全球拓展,该转变推动了中国贸易结构朝多元化、均衡化发展。同时,为应对高关税和贸易限制,中国光伏企业转向东南亚投资建设生产基地。这一战略调整不仅带动了东南亚光伏发电贸易的兴起,还使该区域成为以美国为主要出口对象的新热点。在此期间,美国虽积极发展国内光伏发电产

业,但因其制造业发展不完全,无法满足光伏发电产业链需求,因此美国成为全球最大的光伏产品进口国;同时美国忌惮中国光伏产业的不断发展壮大,美国实施“印太战略”,大幅削减从中国进口光伏器件,转而将马来西亚、泰国、越南等东南亚国家作为光伏器件的重要供应来源。由此可见,贸易摩擦对中国和欧美产生了双输影响,但同时也促进了全球光伏发电产业生产和贸易的多元化,为中国光伏发电产业拓展新的发展空间和伙伴提供了机遇^[12]。

综上,中国作为世界贸易大国,加快融入国际贸易大循环既是提升中国对外贸易竞争力的必然要求,也能够缓解外部不确定性冲击对中国的影响^[13]。

2.2 整体网络结构变化特征

2.2.1 网络密度

如图2所示,全球光伏发电贸易网络密度波动增长,然而网络结构集中性低,贸易往来主要聚焦于几个大国之间。2012—2014年,基于前期的发展光伏发电产业的密度持续上升,促使世界各国加大对该产业的投资,国际市场上也涌现一批规模大、技术先进的大型光伏发电企业。2015年起,全球日益重视新能源产业发展,各国在《巴黎协定》框架下达成共识,全球光伏发电产业迎来新的快速发展契机。同时光伏技术突破使光伏发电成本大幅降低,催生了众多新兴的光伏市场,使其较传统发电方式展现强大竞争力。随着荷兰、巴西、越南等新兴市场经济体的加入,全球光伏市场的发展不再局限于德国、日本、美国等传统核心国家,而是朝着多元化市场格局迈进。2019年以后,尤其是2020年,受新冠肺炎疫情的冲击,各国为应对国内疫情减少国际往来,全球经济受重创,光伏发电贸易网络密度下滑。



图2 2012—2021年全球光伏发电贸易网络密度变动趋势

2.2.2 网络互惠性

通过对2012—2021年全球光伏发电贸易网络结构进行分析,利用UCINET 6软件计算网络互惠性值。该时期内网络互惠性值呈波动下降,数值在0.276~0.307,整体保持相对稳定(图3)。2012—2014年,全球对可再生能源的重视促使多国政府出台光伏产业支持政策,推动了国际技术交流与合作,使互惠性保持在一个较高水平。但因部分国家初期政策执行不力或市场机制不成熟,致2014年后互惠性下降。尽管2015—2016年互惠性继续小幅下降,但技术进步为其后续恢复奠定了基础。2017年起,贸易战、经济危机等影响国际贸易关系的因素冲击光伏器件进出口,却也促使企业寻求新伙伴,优化贸易网络结构,推动互惠性回升。近年来,随着环保意识增强与能源转型需求迫切,推动了全球清洁能源市场持续增长,刺激了光伏器件出口,各国光伏领域合作加强,提升了贸易网络的互惠水平。

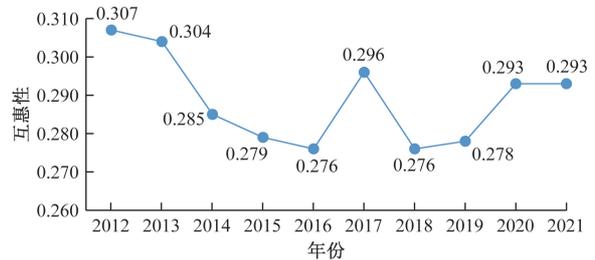


图3 2012—2021年全球光伏发电贸易网络互惠性变动趋势

2.2.3 网络平均度

2012—2021年全球光伏发电贸易平均度变动趋势如图4所示。在2012—2021年,平均度自2012年的8.209逐年降至2015年的6.659,此后虽有波动,但整体趋势相对稳定。从整体来看,2012—2015年,平均度持续下降。此期全球光伏市场快速扩张,各国加大投资建设新的光伏项目,一些新兴市场国家开始积极参与国际贸易,但因经验与技术积累不足,导致其参与度相对较低;同时,部分发达国家为保护本国产业,设技术标准与市场准入门槛,限制发展中国家产品进入,从而拉低了整个网络的平均度。2016—2017年,全球经济逐渐从金融危机后的低迷状态中复苏,市场需求回暖,尤其亚洲地区经济强劲增长,带动了光伏器件需求增长;同时,各国政府持续出台利好政策,鼓励光伏产业发展,在这些因素共同作用下,增强了贸易网络节点间联系,平均度随之回升。2018年后,全球光伏产品贸易摩擦频发,如美国对中国光伏产品加征高额关税等,尽管成功限制了中国光伏器件的产销增长,美国相关贸易亦受抑制;随着欧盟参与对华制裁,导致欧洲光伏组件供应缩减及成本攀升,光伏装机增速放缓,与其激增的可再生能源需求相悖,严重阻碍了欧洲碳中和目标的推进。贸易摩擦对中美欧各方均造成不利影响,削弱了国家间的贸易连通性。此外,部分国家基于自身利益调整光伏产业支持政策,进一步加剧市场的不确定性,使平均度维持在较低水平。



图4 2012—2021年全球光伏发电贸易网络平均度变动趋势

2.2.4 小世界性质

如图5所示,2012—2021年,全球光伏发电贸易网络平均聚类系数总体呈波动微降态势,虽有下降,但整体仍处较高水平,意味着光伏贸易网络节点仍倾向形成紧密的团体。2012—2015年全球经济复苏缓慢,多国采取更谨慎的贸易政策,减弱国家间贸易联系;同时,欧美针对中国光伏电池及组件采取的贸易保护举措,显著波及全球光伏产业链中游贸易网络,致使贸易关系锐减。2015年,《巴黎协定》的签署标志着国际社会对可再生能源发展的高度重视,各国政府随即出台支持政策,促进光伏市场的复苏和发展。2017年后,全球贸易保护主义抬头,尤其是中美贸易摩擦,对国际光伏贸易产生负面影响,导致平均聚类系数进一步下降。2020年初爆发的新冠肺炎疫情对全球经济造成巨大冲击,供应链中断和需求萎缩使国家间的贸易联系进一步减弱。然而,随着疫情防控推进和经济逐步复苏,2021年平均聚类系数缓慢回升。

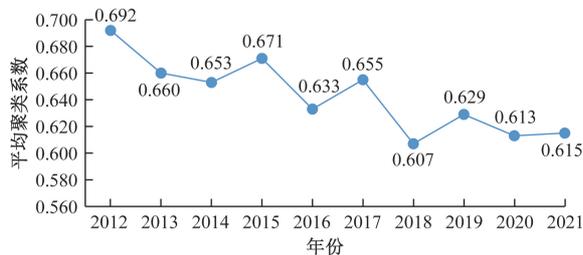


图5 2012—2021年全球光伏发电贸易网络平均聚类系数变动趋势

如图6所示,2012—2021年,全球光伏发电贸易网络平均最短路径长度虽略有上升,但整体波动不大,且始终处于较低水平。这表明,光伏贸易网络各节点间仍保持着较高连通性与效率。具体来看,2012—2015年平均最短路径长度呈现上升趋势。究其原因,2012年起欧美对华光伏电池及组件开展“双反”调查,致使中国光伏产品出口受阻,迫使中国和其他国家寻找新的贸易伙伴,增加了贸易网络的复杂性。2016—2021年平均最短路径长度进一步增长。主要是因为2017年美国实施“201条款”,对进口太阳能电池和组件征收高额关税,扰乱了全球光伏贸易网络;此外,2020年初新冠肺炎疫情暴发,严重冲击全球供应链,许多国家的生产和物流活动受到影响,致贸易网络连接效率降低,平均最短路径长度显著增加;同时,近年来地缘政治紧张局势加剧,也冲击了全球光伏贸易的稳定与



图6 2012—2021年全球光伏发电贸易网络平均最短路径长度变动趋势

效率。

网络平均路径长度在2.217~2.369,意味着在全球光伏发电贸易网络中任何一个国家只需要通过2或3个国家即可与他国建立贸易关系;同时,网络平均聚类系数稳定在0.607~0.692,总体而言,全球光伏器件贸易网络展现出较短的平均路径长度和较高的平均聚类系数,表明该网络局部群簇性高,具有典型的“小世界”网络特征^[14],促进网络的高度互联和集聚,深化了光伏产业的全球化与区域化合作。

2.3 个体网络结构特征

2.3.1 全球光伏发电贸易网络的度中心性演化

借助Ucinet6软件计算2012年、2017年、2021年全球光伏器件贸易网络度中心性排名前10位的国家(表2)。在这三年的出度中心性排名中,位列前10的国家相对稳定,主要集中在亚洲和欧洲地区,它们普遍光伏产业成熟、技术先进且太阳能资源丰富。其中,中国在这三年均位列世界第一,说明中国拥有最多的贸易伙伴。这得益于中国《可再生能源法》的颁布及一系列鼓励可再生能源发展政策措施的制定,促进了光能资源大规模开发^[15]。虽然国际地缘政治冲突和疫情影响持续波及全球经济和贸易,但中国在全球光伏器件贸易网络中的受欢迎程度逐年上升,为全球能源转型进程提供重要的推动力,在世界光伏器件贸易中的竞争力日益增强^[9]。在这三年的入度中心性排名中,德国、法国、荷兰、美国、意大利、英国始终处于前10位。对比分析发现,入度中心性值较出度中心性值差距小,但出度中心性国家间差距更小,这揭示全球光伏发电贸易网络结构的不对称性:进口主要依赖于少数几个主要供应国,出口则面向更广泛的国际市场。这主要归因于光伏器件制造中的硅料提纯与加工技术壁垒高,因此主要集中于少数大国之间,其他国家(地区)在生产环节的参与度较低,更多依赖于直接进口光伏器件。所以在全球光伏器件贸易的供应端,

呈现明显的大国“俱乐部效应”。

2.3.2 基于点强度全球光伏发电贸易网络主要贸易国地位演变

如表3所示,2012、2017、2021年光伏发电贸易网络出强度排名中,中国、韩国、巴西、德国、马来西亚、美国、日本、新加坡一直排在前10位。其中,中国在这三年中光伏器件的贸易出口额以193.04、170.43、305.95亿美元均居世界首位。原因在于中国光伏器件生产规模庞大,且政府出台多项政策支持产业发展,如《中国光伏产业发展路线图》等文件为行业提供明确指导和规划。其间,泰国与越南光伏发电产业发展迅猛,菲律宾的光伏器件出口贸易额排名逐渐被这些国家赶超,从2012年的第5位下滑至2017年的第9位,在2021年甚至跌出了前10名,下滑显著。在这三年的入强度排

名中,德国、荷兰、韩国、美国、日本和中国稳居前10位。具体来看,美国与中国在2017年、2021年均列进口贸易额前2位,且贸易额持续增长,分别由2012年的67.71亿美元与45.91亿美元增长到了2021年的92.50亿美元与54.98亿美元,这说明两国对光伏器件的需求不断攀升。在2012—2021年的观测期内,德国的光伏器件入强度及全球排名先降后升。在2012—2017年,随着德国政府加大对本国光伏产业的扶持力度,国内生产能力提升,对外依赖降低,其进口贸易额也相应地从68.90亿美元减至24.05亿美元;在2017—2021年,德国的进口贸易额呈上升趋势,特别是在2021年,因全球光伏市场强劲增长、国内清洁能源需求增加及俄乌冲突等因素,德国光伏器件的进口额激增至37.96亿美元。

表2 全球光伏发电贸易网络度中心性排名前10位国家

排名	2012年				2017年				2021年			
	国家	出度中心性	国家	入度中心性	国家	出度中心性	国家	入度中心性	国家	出度中心性	国家	入度中心性
1	中国	0.89	德国	0.36	中国	0.89	德国	0.29	中国	0.89	美国	0.24
2	日本	0.50	美国	0.32	德国	0.50	美国	0.29	德国	0.39	意大利	0.23
3	德国	0.46	意大利	0.28	美国	0.39	法国	0.22	美国	0.34	德国	0.22
4	美国	0.44	法国	0.26	马来西亚	0.35	中国	0.20	日本	0.32	荷兰	0.20
5	韩国	0.36	日本	0.24	日本	0.35	荷兰	0.20	马来西亚	0.28	法国	0.19
6	意大利	0.30	荷兰	0.21	韩国	0.34	土耳其	0.20	韩国	0.27	英国	0.19
7	马来西亚	0.30	英国	0.21	法国	0.28	意大利	0.18	法国	0.26	中国	0.16
8	意大利	0.26	比利时	0.20	泰国	0.26	英国	0.18	意大利	0.24	加拿大	0.16
9	英国	0.25	保加利亚	0.19	越南	0.24	加拿大	0.15	泰国	0.24	瑞士	0.15
10	法国	0.25	瑞士	0.19	荷兰	0.22	日本	0.15	荷兰	0.23	波兰	0.14

表3 全球光伏发电贸易网络度强度排名前10位国家

排名	强度/亿美元											
	2012年				2017年				2021年			
	国家	出强度	国家	入强度	国家	出强度	国家	入强度	国家	出强度	国家	入强度
1	中国	193.04	德国	68.90	中国	170.43	美国	76.25	中国	305.95	美国	92.50
2	日本	60.29	美国	67.71	马来西亚	69.40	中国	51.21	马来西亚	72.21	中国	54.98
3	马来西亚	47.68	中国	45.91	日本	53.33	印度	44.41	日本	70.70	印度	41.50
4	德国	37.14	意大利	28.49	韩国	34.65	日本	36.13	越南	30.86	荷兰	38.26
5	韩国	25.32	日本	26.95	越南	23.29	韩国	25.93	德国	29.92	德国	37.96
6	菲律宾	15.16	韩国	25.99	泰国	21.87	德国	24.05	泰国	28.74	韩国	30.90
7	荷兰	14.56	荷兰	19.29	德国	21.55	土耳其	22.91	韩国	23.26	越南	29.86
8	美国	14.05	墨西哥	11.37	美国	10.96	墨西哥	14.39	荷兰	14.24	日本	28.45
9	墨西哥	6.49	希腊	11.07	菲律宾	9.48	荷兰	11.26	美国	11.43	巴西	27.18
10	新加坡	5.75	法国	10.14	新加坡	8.83	澳大利亚	9.71	新加坡	10.39	西班牙	17.76

3 结论

本文基于国际光伏发电贸易的视角,借助联合国商品贸易数据库 2012—2021 年相关数据,构建了全球光伏器件贸易网络。通过运用社会网络分析方法及 Gephi 可视化工具,详细刻画与分析了该时期光伏发电贸易规模、空间分布及贸易网络的动态演变特征。研究发现:

(1)从整体性时空演化视角分析,2012—2021 年全球光伏发电贸易网络连通性显著提升,小世界属性显著。同时,网络节点数量、网络密度、网络强度等均全面提升,这一趋势揭示了全球光伏发电贸易规模持续扩大,各国(地区)间的联系日益紧密。全球光伏发电贸易网络展现了优良的可达性和连通性,具备小世界网络的典型属性。网络无标度特征显著,说明全球光伏发电贸易主要由少数国家主导,这些国家在该领域拥有先进的产业基础和技术优势。

(2)从空间结构演化角度看,全球光伏发电贸易网络层级结构清晰,“核心-边缘”结构日益显著。在区域集团化的动态演进中,新兴市场不断涌现,呈现多元化的变迁格局。曾经以中国、美国、德国和日本主导的传统贸易集团结构,正逐步转变为中国、德国、美国与东南亚地区共同引领的新四大贸易集团格局,带来前所未有的市场机遇,也伴随着复杂的竞争挑战。

(3)在光伏风电贸易网络中,各国的度中心性与强度基本保持着递增的趋势。中国居光伏发电贸易网络的中心位置,贸易中心性与强度排名均跃居各国之首,对他国光伏器件贸易活动的影响力和控制力持续增强,全球贸易活动的重心也正呈现东升西降的趋势。与此同时,美国因惧怕中国新能源贸易产业的崛起,在亚太地区大力推行“印太战略”,试图构建一个环绕中国的“弧形”布局,抑制中国与亚太地区的贸易往来,以削弱中国光伏产业的地位。美国与中国的贸易竞争实则是地缘政治的竞争。

总体而言,全球光伏发电产业正处于发展的快速上升阶段,其贸易网络的稳定性很大程度上受到政治和经济因素的影响,在贸易网络规模和深度方面仍有显著的增长潜力。

参考文献

- [1] 余建辉,肖若兰,马仁锋,等. 国际贸易“碳中和”研究热点领域及其动向[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1303-1320.
- [2] FU X, YANG Y, DONG W, et al. Spatial structure, inequality and trading community of renewable energy networks: a comparative study of solar and hydro energy product trades[J]. Energy Policy, 2017, 106: 22-31.
- [3] GUAN Q, AN H, HAO X, et al. The impact of countries' roles on the international photovoltaic trade pattern: the complex networks analysis[J]. Sustainability, 2016, 8(4): 313.
- [4] 肖建雄. 复杂网络视角下“一带一路”国家光伏商品贸易研究[D]. 贵阳: 贵州财经大学, 2022.
- [5] WANG C, HUANG X, HUX, et al. Trade characteristics, competition patterns and COVID-19 related shock propagation in the global solar photovoltaic cell trade[J]. Applied Energy, 2021, 290: 116744.
- [6] 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): 3214-3228.
- [7] HAUSMANN R, HIDALGO CA, BUSTOS S, et al. The atlas of economic complexity: mapping paths to prosperity[J]. Choice Reviews Online, 2014, 51(11): 51-59.
- [8] 徐林明,李美娟. 动态综合评价中的数据预处理方法研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(1): 162-169.
- [9] AWASTHI K A, LI J. Management of electrical and electronic waste: a comparative evaluation of China and India[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 434-447.
- [10] ZHANG H, JI Q, FAN Y. Competition, transmission and pattern evolution: a network analysis of global oil trade[J]. Energy Policy, 2014, 73: 312-322.
- [11] 程云洁,刘旭. 全球光伏器件贸易网络结构动态演变及驱动机制[J]. 资源科学, 2023, 45(12): 2322-2340.
- [12] 丁嘉铨,孔德明,肖宸瑄,等. 产业链视角下全球光伏产业贸易格局演变特征研究[J]. 世界地理研究, 2024, 33(7): 1-17.
- [13] 石建勋,陈亚楠. 增加值视角下全球制造业贸易网络特征与价值链分工水平提升[J]. 世界经济研究, 2024(8): 44-59.
- [14] 白子明,李翠霞. 中国与东盟国家蔬菜贸易格局演变及驱动因素研究[J]. 北方园艺, 2024(18): 129-136.
- [15] 齐玮,董文静,高歌. 双碳目标下全球风电设备贸易网络格局演变分析[J]. 工业技术经济, 2022, 41(8): 109-115.

Research on the Dynamic Evolution of International Photovoltaic Power Generation Trade Network

LIU Shuyi

(School of Economics and Management, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, Shandong, China)

Abstract: The utilization of photovoltaic power generation represents a pivotal strategy for the transition of traditional energy systems towards decarbonization, and is of paramount importance in achieving global climate goals. A social network analysis was employed to examine the evolutionary characteristics of the global PV power generation trade network, based on the trade data of global photovoltaic devices from 2012 to 2021. The analysis aims to elucidate the basic situation and development trend of this network. It was found that during the period from 2012 to 2021, the global PV power generation trade network underwent substantial development and expansion, with trade links between countries becoming increasingly close. The trade network is distinguished by high aggregation and short path lengths, exhibiting pronounced “small-world” characteristics. The nodes of the global PV power generation trade network exhibit a stable “core-edge” structure. Concurrently, China’s central position is becoming increasingly evident, and its pivotal role in the global PV power generation trade network is intensifying. This has positioned China as a pivotal force in the advancement of trade in this field, with the center of gravity of trade activities demonstrating a tendency towards an eastward ascendance and a westward decline.

Keywords: social network analysis; trade networks; global photovoltaic power generation networks