

引用格式:程云洁,刘旭.全球光伏组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.[Cheng Y J, Liu X. Dynamic evolution and driving mechanism of global photovoltaic modules trade network[J]. Resources Science, 2023, 45(12): 2322-2340.] DOI: 10.18402/resci.2023.12.03

全球光伏组件贸易网络结构动态演变及驱动机制

程云洁¹, 刘旭^{1,2}

(1. 新疆财经大学经济学院, 乌鲁木齐 830000; 2. 昌吉学院, 昌吉 831100)

摘 要:【目的】能源危机背景下越来越多的国家(地区)加快了对光伏可再生能源的布局,光伏组件成为全球光伏产业链贸易流动的重要环节,揭示全球光伏组件贸易网络的驱动机制十分必要。【方法】本文采用2001—2021年全球114个国家(地区)的光伏组件贸易数据,运用复杂网络分析方法和动态指数随机图模型(TERGM)探究全球光伏组件贸易网络结构的动态演变特征及其内生和外生驱动机制。【结果】研究发现:①全球光伏组件贸易网络呈现高聚集性和较短路径长度,国家(地区)间光伏组件贸易差距呈扩大态势,存在贸易中心极化特征,形成区域内贸易为主导的紧密贸易网络。②全球光伏组件贸易网络具有典型的核—边缘结构特征,贸易集团聚类分布现象凸显,以中国为核心的贸易集团影响力最大。③全球光伏组件贸易网络存在互惠效应、结构依赖效应和时间依赖效应。④国家(地区)的经济发达程度、贸易自由度、环境绩效指数和碳排放量对全球光伏组件贸易联系建立的影响显著为正。国家(地区)间的接壤网络、收入水平网络、WTO成员网络是对其有重要影响的外生网络。【结论】全球光伏组件贸易规模不断扩大,贸易网络的重心不断东移,需重视对新兴市场的开发与合作,加强沟通和协调,推动全球光伏产业链的国际合作和融合发展。

关键词:光伏组件;全球贸易网络结构;动态演变;驱动机制;动态指数随机图模型

DOI: 10.18402/resci.2023.12.03

1 引言

21世纪以来,伴随全球气候变暖和化石能源日益枯竭,能源供应的不确定性导致能源安全风险激增,可再生能源的开发和利用已成为国际社会的共识。越来越多的国家(地区)加快了光伏产业的发展步伐^[1],这有力地推动了全球光伏组件的贸易流动。据联合国商品贸易统计数据库,全球光伏组件出口贸易额已经由2000年的72.40亿美元增加至2022年的738.75亿美元,22年间增长超过9倍,全球光伏组件贸易规模不断扩大,贸易网络呈现扩大化与复杂化的趋势。因此,分析全球光伏组件贸易网络及其动态演变特征,探讨全球光伏组件贸易网络的驱动机制,有益于把握全球光伏组件贸易流动

方向,探寻和捕捉其贸易网络格局的演变趋势和动向。

目前,学界关于全球光伏贸易的研究主要围绕地缘政治关系、光伏产业贸易摩擦争端、光伏产业发展路径选择三方面进行分析。①地缘政治关系方面,赵勇强^[2]指出,可再生能源逐步成为重塑能源体系和影响地缘政治关系的重要力量;Andreas等^[3]认为,具有全球清洁能源生产体系的国家(地区)能够通过能源权力影响地缘政治关系;张锐等^[4]提出,清洁能源的开发利用有可能引发国家(地区)间的地缘冲突。②光伏产业贸易摩擦争端方面,田开兰等^[5]基于投入—产出模型进行了实证研究,发现欧盟对中国发起光伏产业反倾销调查为其带来的保护

收稿日期:2023-03-31;修订日期:2023-08-03

基金项目:新疆维吾尔自治区社会科学基金项目(21BJL035);新疆高校人文社会科学重点研究基地重点项目(XJEDU2022J020);2023年新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2023P130);2023年新疆财经大学研究生科研创新项目(XJUFE2023B002)。

作者简介:程云洁,女,山东梁山人,教授,博士生导师,研究方向为世界经济与区域经济。E-mail: 2359726287@qq.com

通讯作者:刘旭,女,吉林松原人,讲师,博士研究生,研究方向为区域经济经贸合作。E-mail: 623748983@qq.com

2023年12月

效应无法弥补其损失,但促进了中国开拓新兴光伏市场、消化过剩产能以及加速调整产业结构的步伐;白雪洁等^[6]提出,中国面对欧美实施的光伏产业贸易壁垒,应采取多元化贸易发展策略;朱向东等^[7]从政策激励和绿色产业特征出发,实证研究发现欧美国家光伏产业的贸易保护措施抑制了中国光伏产业的发展^[8]。③光伏产业发展路径选择方面,杨学坤^[9]提出,跨国经营可使中国海外市场多元化,促进光伏产业的转型和升级,提高物流网络运输效率;帅竞等^[10]基于比较优势方法和恒定市场份额模型分析发现,中国光伏产品出口额绝对量的增长掩盖了国际竞争力下降的实质;曹旭平等^[11]提出中国光伏产业主要集中于加工制造领域,需提升高技术复杂度产品出口比重,由光伏贸易大国逐渐发展成为光伏贸易强国;于佳等^[12]基于新结构经济学理论对光伏产业链各环节进行剖析,提出中国应向“一带一路”沿线国家(地区)实施光伏产业链梯级转移,促使光伏产业转型升级。综上所述,以上文献大多侧重于从单一或区域的视角进行分析,对于全球光伏组件贸易网络结构演进特征讨论较少。随着全球光伏组件贸易联系日益密切,网络结构特征逐渐凸显,有必要从贸易网络角度进行探究。

从研究方法上,复杂网络分析方法是经济地理、区域经济、产业经济和贸易经济等领域的重要研究方法,该方法可以从静态和动态两个维度揭示和探究多个国家(地区)间的贸易网络的演化规律和发展趋势。现有文献主要采用二次指派程序(QAP)来分析贸易网络的驱动因素以及变量之间的相关性,但忽略了网络中内生结构依赖属性对网络关系的影响。事实上,贸易网络的形成与演变驱动机制包括内生和外生机制,网络中的内部结构会影响到任意两个节点间联系的形成与否^[13]。指数随机图模型(ERGM)为考察影响网络结构内部和外部机制提供了一种科学的时间序列网络数据研究方法^[14];Hanneke等^[15]进一步采用动态指数随机图模型(TERGM)将网络内生结构效应纳入模型分析,以探究贸易网络的影响机制,相较ERGM而言,TERGM能够处理时间序列和网络三角形结构,且具有参数设置灵活和模型拟合准确等优点。目前学者采用TERGM探究贸易网络影响机制的研究主

要包括区域贸易和产业/产品贸易研究。①区域贸易研究中,唐晓彬等^[16]分析了“一带一路”沿线国家(地区)货物贸易网络影响机制;刘林青等^[17]探究了国际贸易依赖网络的内生影响机制。②产业/产品贸易研究中,刘林青等^[18]、贺胜兵等^[19]、罗超亮等^[20]、亢梅玲等^[21]和黄孝岩等^[22]运用TERGM分别实证分析了国际粮食贸易网络、“一带一路”纺织品贸易网络、战略性新兴产业国际贸易网络、国际高科技产品贸易网络和RCEP国家农产品贸易网络的内生和外生影响机制。上述学者运用TERGM对贸易网络进行动态分析为本文提供了很好的借鉴。目前对于全球光伏产业贸易网络演变的影响机制研究中,Liu等^[23]运用QAP相关性分析,研究全球光伏产业链上游多晶硅贸易网络发现,多晶硅贸易网络受到全球贸易网络变化的同向影响;Xiao等^[24]采用QAP回归分析发现,国家(地区)间的经济实力差距是全球光伏贸易最大的促进因素,通电率差距是其最大的阻碍因素。目前针对全球光伏组件贸易网络的外生机制相关学者已经作出了深入剖析,但其内生机制仍需深入挖掘,以展现其贸易网络内部之间关系的依赖结构。

以往学者的研究为本文提供了有益的参考。本文选取2001—2021年全球光伏组件贸易数据构建有向加权和有向无权网络,通过复杂网络分析方法、Gephi可视化分析和动态指数随机图模型,将全球光伏组件贸易网络宏观层面的拓扑结构、中观层面的社群分析和微观层面的内外生影响机制进行了系统研究,为进一步探究全球光伏组件贸易领域的研究提供了新的视角。

2 研究方法和数据来源

2.1 贸易网络构建

依据复杂网络分析方法,将各节点国家(地区)作为网络节点,国家(地区)间的光伏组件贸易额作为具有方向和权重的边,以此构建加权的2001—2021年全球光伏组件贸易网络, $G=(V, W)$ 。式中: V 表示网络中的所有节点,即为参与全球光伏组件贸易的国家(地区); W 表示节点之间的所有连边。本文将光伏组件出口国(地区) i 作为起始节点,用向量 $V_i=[v_i](i=1, 2, \dots, n)$ 表示;将光伏组件进口国

(地区) j ($j=1, 2, \dots, n$) 作为终止节点, 用向量 $V_j = [v_j]$ 表示。加权网络中, 边不仅代表贸易的流向, 而且还代表贸易强度, 两者共同描述网络中贸易节点间的关系。

2.2 复杂网络分析指标

(1) 出度中心度与入度中心度

度数中心度是衡量某个节点在贸易网络中与之发生贸易的节点数量, 在有向网络中可以分解为出度中心度和入度中心度。出度中心度代表节点国家(地区)的出口贸易伙伴数量, 入度中心度代表节点国家(地区)进口贸易伙伴数量。参考覃雄合等^[25]的研究, 将它们定义为:

$$M_i = M_i^{\text{out}} + M_i^{\text{in}} \quad (1)$$

$$M_i^{\text{out}} = \sum_{i,j=1, i \neq j}^n a_{ij} \quad (2)$$

$$M_i^{\text{in}} = \sum_{i,j=1, i \neq j}^n a_{ji} \quad (3)$$

式中: M_i 、 M_i^{out} 、 M_i^{in} 分别表示节点 i 的度数中心度、出度中心度和入度中心度; a_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间有无贸易关系, 若存在贸易关系, $a_{ij} = 1$; 若不存在贸易关系, 则 $a_{ij} = 0$; a_{ji} 亦是同理。

(2) 点出强度与点入强度

节点强度是衡量某个节点在贸易网络中所有连边加权值的总和, 在有向网络中可以分解为点出强度和点入强度。点出强度代表节点国家(地区)光伏组件出口贸易额的总和, 点入强度代表节点国家(地区)光伏组件进口贸易额的总和。参考朱学红等^[26]的研究, 将它们定义为:

$$S_i = S_i^{\text{out}} + S_i^{\text{in}} \quad (4)$$

$$S_i^{\text{out}} = \sum_{i,j=1, i \neq j}^n a_{ij} w_{ij} \quad (5)$$

$$S_i^{\text{in}} = \sum_{i,j=1, i \neq j}^n a_{ji} w_{ji} \quad (6)$$

式中: S_i 、 S_i^{out} 、 S_i^{in} 分别表示节点 i 的节点强度、点出强度和点入强度; w_{ij} 表示 a_{ij} 的权重, 即节点 i 出口到节点 j 的光伏组件贸易额; w_{ji} 表示 a_{ji} 的权重, 即节点 i 从节点 j 进口的光伏组件贸易额。

(3) 网络密度

网络密度用来测量各节点在网络中的关联和紧密程度。密度越大, 代表网络中的光伏组件贸易联系越频繁。依据朱学红等^[26]的研究, 将网络密度定义为:

$$D = \frac{Q}{n(n-1)} \quad (7)$$

式中: D 表示网络密度; Q 表示网络实际存在的联系数目; n 表示节点个数; $n(n-1)$ 表示理论最大连接数目。

(4) 平均聚类系数

平均聚类系数用于表征网络节点的集聚程度, 值越接近 1, 说明网络集聚程度越高, 节点联系越紧密; 值越接近 0, 则网络集聚程度越低, 节点联系越稀疏。参考朱学红等^[26]的研究, 将平均聚类系数定义为:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{e_i(e_i-1)} \quad (8)$$

式中: C 表示网络的平均聚类系数; m_i 表示节点 i 的所有相邻的节点数; e_i 表示节点 i 所有相邻节点之间存在的连接数。

(5) 平均路径长度

平均路径长度是网络中任意两节点最短路径的平均值, 用来测量贸易网络的传输效率与通达性, 距离越短, 传输效率越高。参考祝孔超等^[27]的研究, 将平均路径长度定义为:

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j=1, i \neq j}^n d_{ij} \quad (9)$$

式中: L 表示网络平均路径长度; d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的最短路径。

2.3 动态指数随机图模型

本文采用动态指数随机图模型(TERGM)来探究全球光伏组件贸易网络的驱动机制。TERGM是在指数随机图模型 ERGM 基础上进行扩展、用于分析时间序列网络数据的统计模型。二者均属于社会网络统计方法, TERGM 的优势是考虑了网络的时间依赖特征, 将网络的演化过程视为一个动态系统, 使用时间序列数据对网络结构和演化进行建模。

为了探究全球光伏组件贸易网络的内生和外在驱动机制, 本文以两年作为时间间隔, 构建了 2001—2021 年的全球光伏组件贸易网络。采用动态指数随机图模型(TERGM)来探究全球光伏组件贸易网络的内部和外部驱动机制。全球光伏组件贸易网络动态指数随机图模型(TERGM)构建如下:

2023年12月

$$P(N^t|\theta, N^{t-1}) = \frac{1}{c} \exp(\theta_0 \text{edges} + \theta_1 \text{mutual} + \theta_2 \text{gwodeg} + \theta_3 \text{gwesp} + \theta_4 \text{gwdsp} + \theta_5 \text{stability} + \theta_6 \text{variability} + \theta_7 \ln PGDP + \theta_8 \ln Urb + \theta_9 \ln Ind + \theta_{10} \ln Trd + \theta_{11} \ln Epi + \theta_{12} \ln CO_2 + \theta_{13} \text{Cotig} + \theta_{14} \text{Com} + \theta_{15} \text{WTO}) \quad (10)$$










式中: N^t 和 N^{t-1} 分别表示 t 和 $t-1$ 时期的全球光伏组件贸易网络; θ 表示待估参数; $P(N^t|\theta, N^{t-1})$ 表示参数 θ 对于多期全球光伏组件贸易网络关系演变的影响概率; $\frac{1}{c}$ 表示归一化常数; *edges* 表示贸易网络中的边变量, 与传统回归模型的截距项类似。内生结构效应解释变量包括: *mutual* (互惠性)、*gwodeg* (扩张性)、*gwesp* (传递闭合性)、*gwdsp* (多连通性)、*stability* (稳定性) 和 *variability* (多变性); 行为者&关系效应解释变量包括: $\ln PGDP$ (国家(地区)经济发达程度)、 $\ln Urb$ (国家(地区)城市化率)、

$\ln Ind$ (国家(地区)工业化率)、 $\ln Trd$ (国家(地区)贸易自由度)、 $\ln Epi$ (国家(地区)环境绩效指数) 和 $\ln CO_2$ (国家(地区)碳排放量); 外生网络效应解释变量包括: *Cotig* (国家(地区)接壤关系)、*Com* (是否属于同一收入水平) 和 *WTO* (是否同为 WTO 成员), 变量描述如表 1。

本文针对 2001—2021 年 114 个国家(地区)的全球光伏组件贸易网络影响机制进行分析。通常来讲, 贸易网络关系受内生机制和外生机制共同作用影响。内生机制为贸易网络中的自组织过程, 主要表现在网络中的个体通过互相适应和作用而形成一种自组织的结构和功能, 概括为互惠效应、结构依赖效应和时间依赖效应。外生机制包括行动者-关系效应和外部网络效应, 因此, 本文基于时间指数随机图模型 (TERGM) 理论基础, 探究全球光

表 1 TERGM 变量描述及解释

Table 1 Description and interpretation of TERGM variables

变量名称	图形构局	解释
边(<i>edges</i>)		最基本的有向网络关系, 模型中的常数项
互惠性(<i>mutual</i>)		节点国家(地区)间建立的双向互惠贸易关系
扩张性(<i>gwodeg</i>)		节点国家(地区)出度中心性的离散趋势
传递闭合性(<i>gwesp</i>)		两国(地区)借由第三国(地区)形成新贸易网络团体的可能性
多连通性(<i>gwdsp</i>)		两国(地区)间贸易往来关系传递路径的多样性
稳定性(<i>stability</i>)		整体网络格局在 t 和 $t+1$ 期连接关系的持久性
多变性(<i>variability</i>)		整体网络格局在 $t+1$ 期是否发生突变或拐点的趋势
国家(地区)经济发达程度($\ln PGDP$)		具有一定经济、产业、贸易和环境优势国家(地区)向其他国家(地区)出口光伏组件的倾向
国家(地区)城市化率($\ln Urb$)		
国家(地区)工业化率($\ln Ind$)		
国家(地区)贸易自由度($\ln Trd$)		
国家(地区)环境绩效指数($\ln Epi$)		
国家(地区)碳排放量($\ln CO_2$)		网络中属性接近的节点国家(地区)是否有发生贸易联系的趋势
国家(地区)接壤关系(<i>Cotig</i>)		
是否属于同一收入水平(<i>Com</i>)		
是否同为 WTO 成员(<i>WTO</i>)		

光伏组件贸易网络的内生机制和外生机制。

2.3.1 被解释变量

本文的被解释变量是全球光伏组件贸易网络中国家(地区)与国家(地区)之间贸易关系存在的概率。关系存在为1,关系不存在为0。

2.3.2 内生结构解释变量

在动态网络结构演变过程中,内生结构变量通过影响网络新链接形成的概率影响网络结构的演变。如果一个内生结构变量被设置为“正”,会增加网络新链接形成的概率;反之被设置为“负”则会减少新链接形成的概率。TERGM中 *edges* 变量代表的是边变量,通常认为与模型非参数估计的截距项类似,一般不作解释。TERGM的其他内生结构变量包含如下:

互惠效应。采用互惠性(*mutual*)衡量全球光伏组件贸易网络中的相互依存程度。互惠性反映了当国家(地区)*i*与国家(地区)*j*之间存在光伏组件出口贸易关系时,国家(地区)*j*向国家(地区)*i*发出贸易合作关系的可能性。

结构依赖效应。采用扩张性(*gwodeg*)、传递闭合性(*gwesp*)和多连通性(*gwdsp*)3个指标来衡量全球光伏组件贸易网络结构的内生结构依赖影响机制。其中,扩张性反映偏好连接效应,通过贸易网络中几何加权出度分布的离散程度来衡量国家(地区)*i*与其他国家(地区)出口光伏组件的分布趋势,具有高出度的节点更倾向于成为贸易核心国家(地区);传递闭合性用于衡量全球光伏组件贸易网络中两国(地区)借由第三国(地区)形成新贸易网络团体的可能性;多连通性主要用于衡量贸易网络中两国(地区)贸易联系的拓扑结构和贸易关系传递路径多样性。

时间依赖效应。采用稳定性(*stability*)和多变性(*variability*)来衡量全球光伏组件贸易网络在不同时间段内国家(地区)间连接关系的持久性和变化程度。其中,稳定性反映了贸易网络中的连接关系相对稳定不变的程度,即在不同时间段内有多少连接关系保持不变,若符号为正,表明网络整体结构相对稳定;多变性指标则用来探究贸易网络的连接在不同时间段内是否存在突变或拐点,若符号为负,表明网络中存在异常突变状况的可能性较低。

2.3.3 行为者&关系效应解释变量

在全球光伏组件贸易网络中,节点的个体属性特征对网络关系的形成和网络结构的演变十分重要。光伏组件作为资本密集型和技术密集型产品,国家(地区)经济发达程度、城市化率、工业化率、贸易自由度、环境绩效指数与碳排放量等特征对全球光伏组件贸易网络的形成与演变会产生一定的影响,这些特征被界定为“行动者属性”,在时间指数随机图模型中表现为“行动者&关系效应”。

①国家(地区)经济发达程度。参考刘林青等^[17]的研究,将取对数后的人均国内生产总值($\ln PGDP$)纳入解释变量,反映经济体的发达程度。数据来源于世界银行经济与增长指标。②参考贺胜兵等^[28]和王群勇^[29]的研究,以国家(地区)城市化率($\ln Urb$)反映国家经济发展速度和城市化进程的推进程度,城市化率的增加意味着城市基础设施和城市能源消费需求的增加。数据来源于世界银行城市发展指标。③国家(地区)工业化率($\ln Ind$)是衡量一国工业化进程和产业结构演进的指标,工业化进程的推进意味着对资源消耗和能源需求的增加。数据来源于世界银行经济与增长指标。④国家(地区)贸易自由度($\ln Trd$)反映一国(地区)贸易开放程度和贸易政策自由度,较高的贸易自由度可以促进一国(地区)光伏组件产品的贸易和流通,降低进口成本,提升市场竞争力,同时具备更宽阔的市场准入机会,从而促进光伏产业的发展。数据来源于世界银行贸易指标。⑤国家(地区)环境绩效指数($\ln Epi$)会影响一国(地区)对能源消费结构的调整,而能源供需关系变化和结构调整易受国际能源贸易网络所影响。数据来源于耶鲁大学《环境绩效指数报告》。⑥参考倪娟等^[30]对环境规制强度测算方法的梳理,选取国家(地区)碳排放量($\ln CO_2$)作为解释变量,来探究各国(地区)环境污染程度对全球光伏组件贸易网络关系的影响。数据来源于世界银行环境指标。

2.3.4 外部网络效应解释变量

国家(地区)接壤关系(*Cotig*)。两国(地区)接壤倾向于发展为贸易合作伙伴,参考贺胜兵等^[19]构建接壤二值网络,若接壤赋值为1,否则为0。当两国(地区)接壤时,地理邻近使得光伏组件产品运输

2023年12月

更加高效和贸易往来更加便利,缩短运输时间,降低运输成本,提高光伏组件产品的竞争力和市场份额,契合了自然地理学的“地理衰减理论”。

是否属于同一收入水平(*Com*)。按照世界银行分组标准将各国家(地区)国民收入水平划分为高、中上、中下、低4个等级,参考杨文龙等^[31]的研究,根据国家(地区)收入水平构建二值矩阵,若两国(地区)同属一收入水平计为1,否则为0。数据来源于世界银行。同一收入水平国家(地区)通常具有相似的经济发展水平和能源需求,意味着面临相似的光伏组件国际市场机会,更倾向于通过贸易协定、投资合作、政府合作等建立伙伴关系以加强合作,这种合作可为出口商提供贸易政策和税率支持,创造更加便利的贸易环境,减少遵守不同国家(地区)规定的成本和风险,从而促进光伏组件出口贸易的增长;还可能拥有相似的能源转型政策和技术需求,有助于光伏组件国际技术转移,从而推动技术创新和产业升级^[32]。

是否属于同为WTO成员(*WTO*)。贸易国(地区)是否为WTO成员对全球光伏组件贸易网络结构演变有着重要影响。参考叶玮怡等^[33]的研究,构建WTO二值矩阵,将同为WTO成员的国家(地区)记为1,反之为0。WTO成员需遵守WTO贸易规则和准则,包括最惠国待遇、国民待遇、关税和非关税壁垒等,可为全球光伏组件贸易的开展提供稳定和可预测的环境,以促进贸易的公平竞争和便利化;还可通过WTO贸易争端解决机制来解决贸易争端,降低光伏国际贸易成本,维护光伏贸易公平竞争和权益。

2.4 数据来源

本文选取2001—2021年114个国家(地区)^①光伏组件出口贸易数据(商品编码为HS 854140)^②来分析全球光伏组件贸易网络结构动态演变特征。由于选取节点年份跨度大,各年份参与国(地区)不同,为保持样本数量的充足性和一致性,以最大可能地对全球光伏组件贸易网络结构进行观测和统计,故将贸易额10美元作为阈值标准,最后得到114个国家(地区)(详见2.3小节)作为研究对象,这114个国家(地区)的光伏组件出口贸易额占全球光伏组件总出口贸易额的90%,在表征其贸易网络总体格局上具有代表性。由于国家间贸易数据统计口径不同,本文以各国出口贸易额为准,各国(地区)的出口贸易数据来源于联合国商品贸易数据库(UN Comtrade)。

3 动态演变分析

3.1 整体网络结构演变及特征分析

(1)2001—2021年^③全球光伏组件出口贸易额由67.14亿美元增长至690.90亿美元(图1),20年间增长超过9倍。自2004年德国率先推出可再生能源法案后,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产业发展的政策,刺激了全球光伏组件贸易的发展,全球光伏组件出口贸易额2011年达到历史顶峰741.68亿美元,2001—2011年是全球光伏组件贸易的增长期。2012年全球光伏产业产能过剩导致光伏组件价格快速下降,欧债危机使欧美光伏市场萎缩,光伏组件贸易额持续走低;同时,美国、欧盟、印度等相继对中国光伏企业发起“双反”(反倾销反补贴),全球光伏贸易壁垒加

① 114国家(地区)包括:亚洲(29国):中国(由于数据缺失未包含港澳台地区)、日本、韩国、新加坡、马来西亚、泰国、菲律宾、柬埔寨、土耳其、阿联酋、约旦、印度、阿曼、以色列、缅甸、亚美尼亚、沙特阿拉伯、印度尼西亚、老挝、格鲁吉亚、黎巴嫩、斯里兰卡、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、巴基斯坦、塞浦路斯、阿塞拜疆、蒙古、文莱。欧洲(38国):德国、法国、英国、荷兰、意大利、葡萄牙、瑞士、比利时、西班牙、奥地利、捷克、波兰、希腊、匈牙利、俄罗斯、瑞典、丹麦、斯洛文尼亚、卢森堡、克罗地亚、塞尔维亚、立陶宛、斯洛伐克、爱尔兰、芬兰、保加利亚、罗马尼亚、爱沙尼亚、白俄罗斯、挪威、拉脱维亚、乌克兰、黑山、摩尔多瓦、波黑、北马其顿、马耳他、冰岛。美洲(23国(地区)):美国、加拿大、墨西哥、多米尼加、巴西、智利、乌拉圭、哥伦比亚、哥斯达黎加、危地马拉、秘鲁、巴巴多斯、萨尔瓦多、阿根廷、尼加拉瓜、洪都拉斯、巴拉圭、特立尼达和多巴哥共和国、厄瓜多尔、开曼群岛(英属海外属地)、玻利维亚、圣文森特和格林纳丁斯、伯利兹。非洲(21国):南非、突尼斯、肯尼亚、埃及、摩洛哥、卢旺达、坦桑尼亚、赞比亚、多哥、塞内加尔、布基纳法索、布隆迪、博茨瓦纳、马达加斯加、津巴布韦、贝宁、安哥拉、莫桑比克、斯威士兰、埃塞俄比亚、毛里求斯。大洋洲(3国):澳大利亚、新西兰、斐济。

② 根据中华人民共和国进出口税则(2021)规定,HS 854140包括3类产品:发光二极管、太阳能电池、其他,HS 854140编码的商品通称为光伏组件。

③ 考虑到篇幅,在基本不影响整体趋势的情况下,全球光伏组件贸易个体网络分析取该阶段中的6个年份进行分析,即2001、2005、2009、2013、2017、2021年。

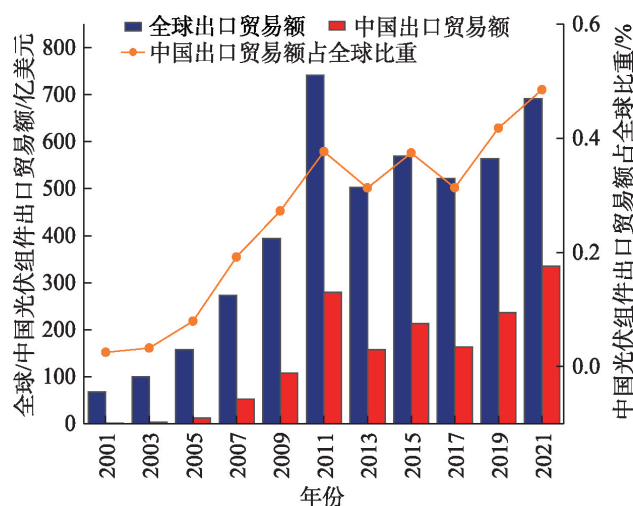


图1 2001—2021年全球光伏组件出口贸易额、中国光伏组件出口贸易额及其占全球光伏组件出口贸易比重

Figure 1 Global photovoltaic (PV) module export trade volume, China's PV module export trade volume and share of global PV export trade, 2001-2021

剧导致光伏组件出口成本大幅上升,2013年全球光伏组件出口贸易额下滑至502.96亿美元,降幅达32.19%,全球光伏组件贸易进入了缓慢发展期。2021年伴随光伏产业技术革新,发电成本下降,新兴光伏市场不断涌现,全球光伏贸易增长迅猛,达到690.90亿美元。随着荷兰、巴西和越南等新兴市场参与者不断涌入,全球光伏市场的发展不再仅依赖于德国、日本和美国等核心国家,而是向多元化市场格局发展,2021年属于全球光伏组件贸易的多元发展期。

(2)2001—2021年全球光伏组件贸易网络节点数由1726增至3425(表2),增长幅度达98.44%。20年间国家(地区)间贸易联系数量逐年增加,表明全球光伏组件贸易网络整体规模不断扩大。复杂网络中通常采用网络密度来反映整体网络的联结程度。整体来看,20年间的网络密度呈逐年上升趋势,

该期间网络密度范围为0.134~0.266,表明贸易网络紧密性增强,国家(地区)间的贸易活动愈加频繁。

平均聚类系数越高,说明贸易网络中国家(地区)间存在越多的贸易联系和合作。全球光伏组件贸易网络平均聚类系数从2001年的0.674增长至2009年的0.722,说明这期间贸易网络中节点间的贸易联系愈加紧密,主要原因是多数国家(地区)加大对本国(地区)光伏产业发展的政策扶持力度,刺激了对光伏组件的生产和市场需求,使全球光伏组件贸易活动日益紧密。之后由2011年的0.715下降至2021年的0.690,主要由于这期间受欧债危机影响,世界经济下行,国家(地区)间光伏组件的贸易联系减少,导致平均聚类系数下降。平均路径长度越短说明网络连通性越好,样本节点年份的平均路径长度为1.903~1.867,连通性提高了0.036,说明2001—2021年间全球光伏组件贸易网络的传输效率得到了提高,2021年较2001年具有更好的网络连通性。总体来看,全球光伏组件贸易网络呈现较短的平均路径长度和较高的平均聚类系数特征,有助于促进全球光伏组件贸易网络的高度互联和集聚,推动光伏产业的全球化和区域化合作。

3.2 个体网络结构特征分析

3.2.1 网络度数中心度分析

通过构建有向无权网络和有向加权网络,借助Ucinet 6软件测算2001—2021年全球光伏组件贸易网络度数中心度排名前8位的国家(表3)。出度中心度排名中,2001—2005年德国位居世界首位。2009—2021年,中国超越德国位居世界首位,代表中国在全球光伏组件贸易网络中拥有的贸易伙伴数量最多。入度中心度排名中,美国和德国长期位居世界前2位,中国亦位居前列。从近20年排名可

表2 2001—2021年全球光伏组件贸易整体网络结构特征

Table 2 The overall network structural characteristics of global photovoltaic (PV) module trade network, 2001-2021

年份	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021
网络节点数	1726	1935	2169	2374	2619	2869	3055	3149	3222	3324	3425
网络密度	0.134	0.150	0.168	0.184	0.203	0.223	0.237	0.244	0.250	0.258	0.266
平均聚类系数	0.674	0.691	0.713	0.707	0.722	0.715	0.701	0.705	0.695	0.687	0.690
平均路径长度	1.903	1.937	1.878	1.904	1.837	1.865	1.818	1.832	1.912	1.864	1.867

2023年12月

表3 2001—2021年全球光伏组件贸易网络度数中心度前8位国家

Table 3 Top eight countries in the global photovoltaic (PV) module trade network in term of degree centrality, 2001–2021

年份	国别(出度中心度)							
	第1位	第2位	第3位	第4位	第5位	第6位	第7位	第8位
2001	德国(95)	美国(82)	法国(73)	瑞士(67)	意大利(66)	奥地利(62)	日本(61)	瑞典(60)
2005	德国(93)	美国(93)	中国(88)	意大利(80)	法国(79)	瑞士(70)	荷兰(65)	奥地利(65)
2009	中国(109)	德国(106)	美国(102)	意大利(85)	加拿大(79)	西班牙(79)	法国(78)	荷兰(77)
2013	中国(111)	德国(108)	美国(103)	荷兰(92)	意大利(89)	法国(87)	韩国(86)	瑞士(86)
2017	中国(113)	德国(107)	美国(100)	法国(93)	荷兰(91)	意大利(91)	瑞士(87)	新加坡(82)
2021	中国(113)	德国(108)	意大利(97)	荷兰(95)	美国(93)	西班牙(87)	法国(86)	比利时(83)

年份	国别(入度中心度)							
	第1位	第2位	第3位	第4位	第5位	第6位	第7位	第8位
2001	美国(51)	德国(49)	英国(41)	法国(38)	西班牙(38)	荷兰(37)	意大利(34)	日本(33)
2005	德国(52)	美国(52)	法国(47)	中国(43)	意大利(46)	中国(44)	西班牙(44)	英国(41)
2009	美国(60)	德国(57)	法国(56)	中国(49)	意大利(49)	西班牙(44)	荷兰(44)	奥地利(42)
2013	德国(63)	美国(60)	中国(55)	意大利(54)	英国(53)	荷兰(53)	法国(53)	西班牙(47)
2017	美国(65)	德国(63)	荷兰(56)	中国(55)	意大利(54)	西班牙(54)	英国(53)	法国(51)
2021	美国(68)	德国(66)	中国(63)	法国(60)	荷兰(56)	英国(54)	意大利(53)	加拿大(52)

看出,全球光伏产业的快速发展刺激了光伏组件贸易的增长,各国对进口来源渠道和贸易伙伴的选择呈现多元化趋势。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,但中国在全球光伏组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了重要的推动力,在世界光伏组件贸易中的竞争力日益增强。

借助 Stata17 软件绘制 2001—2021 年全球光伏组件贸易网络参与国(地区)出度中心度、入度中心度核密度分布图,发现全球光伏组件贸易网络存在

贸易中心极化特征,形成区域内贸易为主导的紧密贸易网络(图2)。通过分析,出度中心度空间密度波形呈右偏态分布、单峰向多峰过渡特征,入度中心度空间密度波形多峰形态明显,曲线向右移动,说明全球各国(地区)光伏组件进口贸易水平不断提升。出度和入度中心度峰值降低和宽度加大表明,全球各国(地区)间光伏组件贸易水平差异程度加大,多极分化现象严重。出度中心度核密度分布图较入度中心度更为陡峭,反映出全球光伏组件出口贸易发展滞后于进口贸易的发展,各国(地区)倾

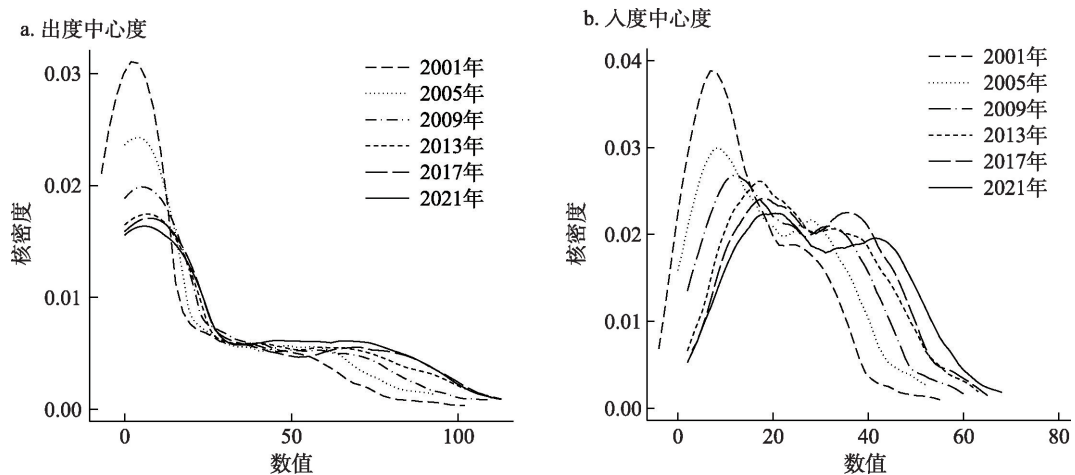


图2 2001—2021年全球光伏组件贸易网络出度中心度、入度中心度核密度分析图

Figure 2 Global photovoltaic (PV) module trade network out-degree centrality and in-degree centrality kernel density analysis results, 2001–2021

向于挖掘和拓展进口来源渠道,增加对贸易伙伴的自主选择权,降低光伏组件渠道供给的外部风险。碳中和目标的提出使得各国(地区)纷纷提速可再生能源的产业布局,但俄乌冲突导致全球能源危机爆发,加剧了各国(地区)对以光伏为代表的新能源的紧迫需求。除光伏传统市场以外,亚太、拉美、中东、中亚等新兴市场受益于光伏发电成本持续下降及光伏发电竞争优势凸显,这些区域的光伏市场迎来了快速发展周期,且市场潜力巨大。

3.2.2 网络点强度分析

2001—2021年,日本、美国、德国和马来西亚的光伏组件出强度一直居于前10位(表4)。2001年和2005年,日本以15.07亿美元和36.47亿美元的光伏组件贸易出口额位居世界首位,主要由于这期间日本制定了一系列扶持光伏产业发展的政策使其光伏产业发展较快。此后,由于中国、德国、韩国和马来西亚光伏产业发展迅速,日本光伏组件出强度排名先后被这些国家超越。2001—2021年,美国光伏组件出口贸易额从10.83亿美元上升至19.00亿美元,但光伏组件出强度排名不断下滑。这期间德国的光伏组件出口贸易额不断上升,光伏组件出强度的排名在第2~5位之间波动。马来西亚的光伏组件出口贸易额从2001的6.49亿美元上升至2021年35.13亿美元,同期光伏组件出强度排名呈现出先下降后上升的趋势。2005年中国在光伏组件出强度首次进入全球前10位,排名第4;2009年之后中国出强度排名一直居于首位,光伏组件出口贸易额也

由2009年的93.46亿美元上升到2021年的293.96亿美元,中国光伏组件出口的快速发展主要得益于中国的光伏产业发展政策、劳动力和资源优势。2001—2021年由于越来越多的国家(地区)重视和发展光伏产业,进入全球光伏组件出强度排名前10位国家变化很大,导致全球光伏组件出口贸易的竞争越来越激烈。

入强度排名中(表5),2001—2021年,美国、德国、中国和韩国一直位于全球光伏组件贸易网络入强度排名前10位国家中,说明这些国家是光伏组件产品的需求大国。美国的入强度排名呈现先下降后上升又下降的状态,但其光伏组件进口贸易额不断上升,由2001年的9.31亿美元增长到2021年的57.51亿美元,说明美国对进口光伏组件的需求不断加大。2001—2021年德国光伏组件的入强度及其排名均呈现先上升后下降趋势。2001—2009年德国光伏组件进口需求不断上升,使得其进口贸易额由2001年的7.90亿美元上升到2009年的90.54亿美元,2009年之后由于德国对光伏产业加大了扶持力度,进口需求不断下降,2017年下降至18.23亿美元,但由于俄乌冲突等原因,2021年德国光伏组件进口激增到32.37亿美元。韩国的光伏组件进口贸易额由2001年2.30亿美元增长至2013年的16.30亿美元,之后进口额下降至2021年的15.07亿美元,由于其光伏组件进口贸易额较少,其入强度在节点年份中一直排名在6~10位。2001—2021年中国光伏组件进口贸易额呈现出先上升后下降的趋势,由

表4 2001—2021年全球光伏组件贸易网络出强度前10位国家(亿美元)

Table 4 Top ten countries in global photovoltaic (PV) module trade network out-strength, 2001–2021 (10⁸ US dollars)

排名	2001年		2005年		2009年		2013年		2017年		2021年	
	国别	出强度	国别	出强度	国别	出强度	国别	出强度	国别	出强度	国别	出强度
1	日本	15.07	日本	36.47	中国	93.46	中国	126.51	中国	126.14	中国	293.96
2	美国	10.83	美国	14.40	德国	52.69	日本	36.93	韩国	38.91	马来西亚	35.13
3	马来西亚	6.49	德国	12.86	日本	37.80	德国	35.50	马来西亚	37.15	日本	29.45
4	德国	5.82	中国	9.29	美国	22.01	韩国	30.80	日本	29.85	德国	28.60
5	新加坡	1.73	马来西亚	7.25	韩国	10.86	马来西亚	27.73	德国	24.97	荷兰	25.49
6	英国	1.57	英国	3.45	西班牙	7.44	美国	16.69	新加坡	18.15	韩国	20.22
7	法国	0.84	荷兰	3.03	荷兰	7.44	新加坡	12.95	美国	16.62	美国	19.00
8	韩国	0.83	西班牙	2.64	马来西亚	7.26	菲律宾	12.25	泰国	10.83	新加坡	15.67
9	西班牙	0.82	新加坡	2.63	英国	7.19	荷兰	9.50	荷兰	10.48	泰国	14.48
10	比利时	0.80	比利时	2.22	捷克	6.67	墨西哥	7.74	菲律宾	4.26	法国	7.63

2023年12月

表5 2001—2021年全球光伏组件贸易网络入强度前10位国家(亿美元)

Table 5 Top ten countries in global photovoltaic (PV) module trade network in-strength, 2001–2021 (10⁸ US dollars)

排名	2001年		2005年		2009年		2013年		2017年		2021年	
	国别	入强度	国别	入强度	国别	入强度	国别	入强度	国别	入强度	国别	入强度
1	美国	9.31	德国	31.21	德国	90.54	日本	61.99	美国	53.74	荷兰	69.23
2	德国	7.90	中国	12.61	意大利	25.23	美国	47.32	中国	40.34	美国	57.51
3	中国	2.97	美国	10.55	荷兰	21.30	中国	43.19	印度	38.50	印度	42.67
4	日本	2.93	日本	6.78	中国	19.85	荷兰	26.07	日本	34.49	中国	33.65
5	马来西亚	2.78	马来西亚	4.97	美国	18.74	德国	22.40	德国	18.23	德国	32.37
6	新加坡	2.52	韩国	4.70	法国	17.47	韩国	16.30	墨西哥	15.99	巴西	31.53
7	菲律宾	2.35	荷兰	3.19	比利时	14.46	英国	10.59	荷兰	14.85	日本	25.53
8	韩国	2.30	英国	3.18	捷克	11.76	泰国	8.65	韩国	14.11	西班牙	19.09
9	英国	2.19	法国	2.99	西班牙	11.57	意大利	8.54	马来西亚	10.05	韩国	15.07
10	法国	1.79	新加坡	2.96	韩国	10.93	印度	7.86	澳大利亚	9.45	澳大利亚	13.62

2001年的2.97亿美元增长到2013年的43.19亿美元,又下降到2021年的33.65亿美元,光伏组件入强度排名在全球第2~4位之间,说明中国是全球光伏组件贸易的主要进口国之一。另外,2021年荷兰光伏组件入强度排名及进口贸易额首次位居世界首位,说明荷兰对光伏组件的需求增长较快。日本、英国、马来西亚和印度等国家也多次进入全球光伏组件入强度前10位国家,这些国家对光伏组件需求也很大。

3.2.3 核心—边缘结构分析

借助Ucinet 6软件对2001—2021年全球光伏组件贸易网络的核心—边缘结构进行分析(表6)。核心国家(地区)数量及占比逐年增加,核心密度先由0.846增加至0.913,后下降至0.882;边缘国家(地区)数量及占比逐年下降,边缘密度先由0.017增加至0.038,后下降至0.037;核心—边缘结构拟合值均在0.830以上,拟合显著。

借助Gephi软件Fruchterman-Reingol算法对

2001年和2021年全球光伏组件贸易网络核心—边缘结构进行可视化分析(图3),2001年全球光伏组件贸易网络核心国家(地区)主要以德国、美国、法国、英国、意大利和日本等国为主。经过20年的发展和演变,2021年全球光伏组件贸易网络的核心—边缘结构发生了深刻变化,核心国家(地区)和边缘国家(地区)数量明显增加,中国成为全球光伏组件贸易网络核心圈层的最重要国家;德国、意大利、荷兰、美国、西班牙和法国等位于核心圈层;2001年,日本、英国和瑞典位于全球光伏组件贸易网络的核心圈层,但2021年已位于次核心圈层;荷兰从2001年的边缘圈层进入到2021年的核心圈层。20年间全球光伏组件贸易网络中的国家(地区)位置发生了变化,网络的圈层结构愈加明显,核心圈层与边缘圈层国家(地区)的贸易差距不断扩大。

3.3 全球光伏组件贸易网络集团划分

借助Gephi可视化分析方法识别2001和2021年全球光伏组件贸易网络集团划分的特征(图4)。

表6 2001—2021年全球光伏组件贸易网络的核心—边缘结构分析

Table 6 Core-periphery structure of the global photovoltaic (PV) module trade network, 2001–2021

年份	核心结构的国家(地区)			边缘结构的国家(地区)			样本数量	拟合值
	国家数量	数量占比/%	核心密度	国家数量	数量占比/%	边缘密度		
2001	31	27.19	0.846	83	72.81	0.017	114	0.830
2005	32	28.07	0.889	82	71.93	0.021	114	0.858
2009	35	30.70	0.895	79	69.30	0.027	114	0.857
2013	37	32.46	0.906	77	67.54	0.031	114	0.861
2017	38	33.33	0.913	76	66.67	0.038	114	0.854
2021	43	37.72	0.882	71	62.28	0.037	114	0.848

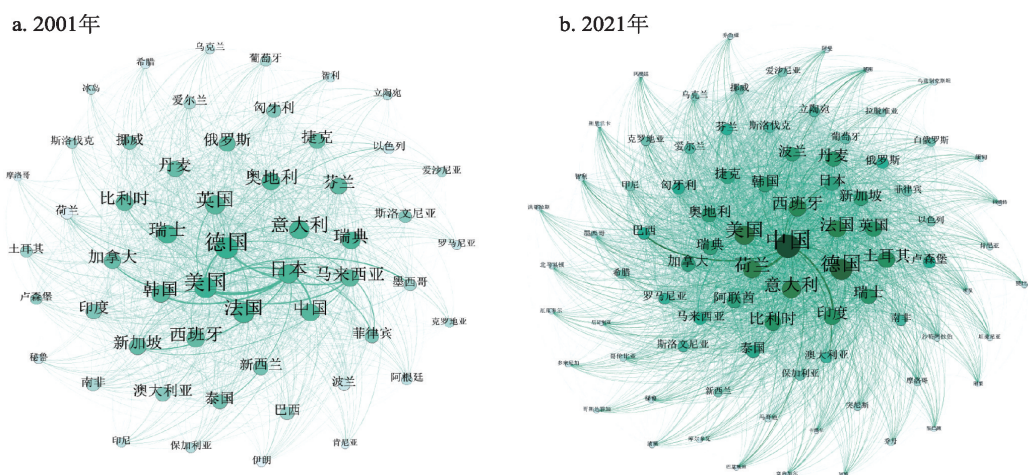
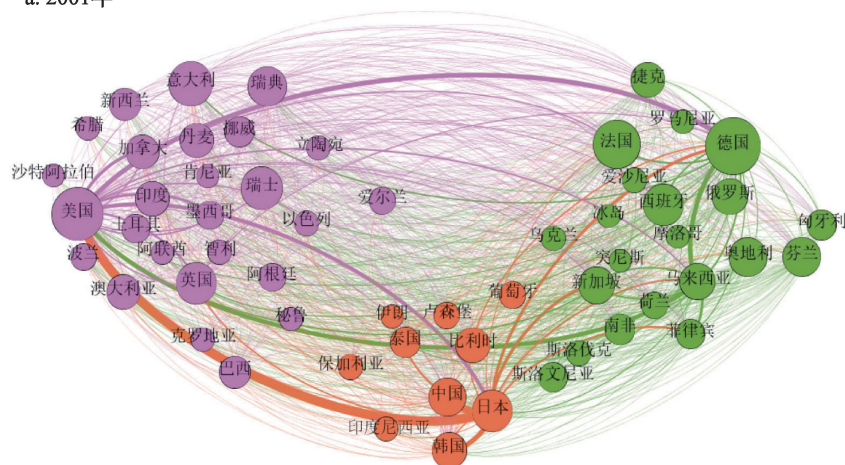


图3 2001年和2021年全球光伏组件贸易网络核心—边缘结构可视化分析图

Figure 3 Global photovoltaic (PV) module trade network core-periphery structure visual analysis, 2001 and 2021

a. 2001年



b. 2021年

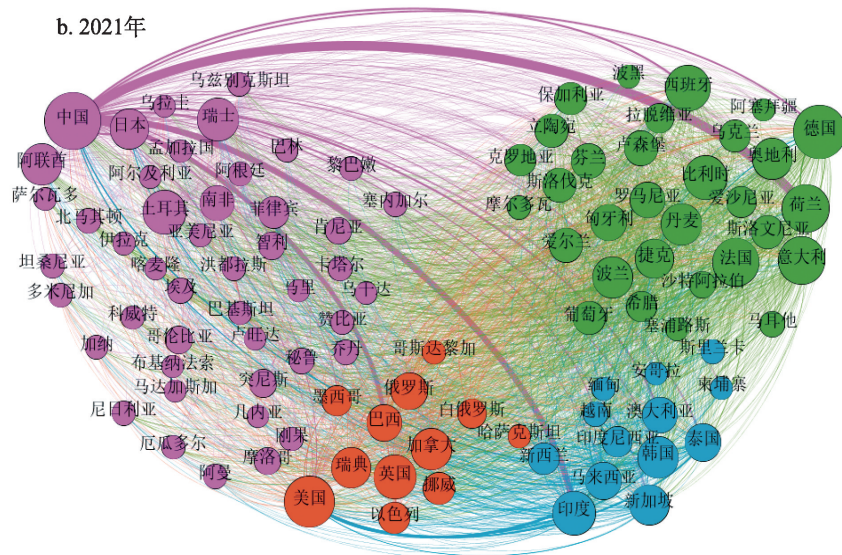


图4 2001年和2021年全球光伏组件贸易网络集团

Figure 4 Global photovoltaic (PV) module trade network association structure, 2001 and 2021

2023年12月

同一种颜色代表同一贸易集团,线的粗细代表光伏组件贸易额的大小。2001年表现为分别以美国、德国和日本为中心的三大贸易集团,经过20年的发展和演变,2021年形成了以中国、德国、美国和马来西亚为中心的四大贸易集团。

以中国为中心的贸易集团呈规模扩大的趋势。2001年中国在贸易集团中处于发展阶段。分属三大贸易集团的美国、德国、日本相互贸易联系紧密。2021年集团规模不断扩大,中国取代日本成为集团中最主要核心国。伴随中国改革开放日益深化、对外贸易不断扩大和“一带一路”倡议的提出,国家(地区)间的技术合作与交流促进了光伏产业技术创新,贸易便利化水平日益提升,降低了贸易成本,中国开拓了与中亚、中东、非洲国家(地区)的光伏组件贸易,国际市场日益多元,提升了资源的合理配置和利用,中国参与全球价值链程度日益加深,成为全球贸易增长和区域经济一体化的主要驱动力之一。2021年以中国为中心的贸易集团成为全球光伏组件贸易网络规模最大的集团。

以德国为中心的贸易集团扩大趋势较为明显。2001年该集团主要以德国、法国和西班牙等国家为核心;2021年贸易集团呈现“多点开花”特征,多数欧洲国家增大了对光伏产业的扶持力度,加之疫情冲击、极端天气和能源危机等因素导致对光伏组件产品的需求增加,市场规模不断扩大,中国成为其光伏组件的主要供应国家之一。特别是2021年,荷兰市场需求增长明显,与中国光伏组件贸易联系最为突出,对贸易集团的发展具有带动作用。

以美国为中心的贸易集团规模呈缩小态势。2001年贸易集团核心国家主要有美国、英国、意大利和瑞士等。伴随2020年《美墨加协定》的签订,成员国间的贸易便利度和自由度逐渐发展成熟,加拿大在贸易集团中的核心比重上升;墨西哥成为2021年贸易集团的主要国家之一;俄罗斯2021年从美国进口光伏组件4319万美元,故划分在这一集团;原2001年贸易集团中的丹麦和意大利受“虹吸作用”进入了以德国为核心的贸易集团,瑞士进入了以中国为核心的贸易集团。以美国为核心的贸易集团规模逐渐缩小。

以马来西亚为中心的贸易集团增长潜力较

大。2021年形成了以马来西亚为核心的新的贸易集团。东南亚地区光照资源丰富,具备开发太阳能光伏项目的自然优势条件;东盟自由贸易区协定的签订使其具备贸易优势条件;劳动力和电价等成本优势使之光伏组件生产规模不断扩大,成为全球光伏市场海外投资的最佳选择之一,可以预见其未来的光伏产业市场潜力巨大。

4 驱动机制分析

4.1 实证结果分析

采用TERGM模型对全球光伏组件贸易关系网络进行参数估计,结果如表7所示。模型1为基准模型,边变量相当于截距项,其他为控制变量。在模型1基础上依次引入互惠效应变量(模型2)、结构依赖效应变量(模型3)、时间依赖效应变量(模型4)对全球光伏组件贸易关系网络进行分析。对比模型1-4回归结果,通过逐步控制内生机制变量的影响,外生机制变量回归估计结果大部分保持稳健,本文主要以模型4回归结果对全球光伏组件贸易网络关系的驱动机制进行分析。

内生结构变量方面,TERGM互惠性(*mutual*)变量系数为0.4560,且在1%的水平上显著为正,这意味着当全球光伏组件贸易网络中的节点*i*对节点*j*发出光伏组件贸易依赖关系倾向时,节点*j*有向节点*i*发出贸易合作或者依赖关系的倾向,即节点国家(地区)间贸易互惠性对全球光伏组件贸易网络的形成产生积极的推动作用。扩张性(*gwodeg*)、传递闭合性(*gwesp*)和多连通性(*gwdsp*)是用于描述复杂网络组织动态特征的高阶网络结构依赖变量。实证结果表明:扩张性系数在1%的水平上显著为负,说明节点出度中心度分布具有明显的离散性。在全球光伏组件贸易网络中,多数国家(地区)具有水平较低的出度中心度,少数核心国家(地区)凭借技术和资源优势不断开拓贸易联系而具有较高的出度中心度,从而全球光伏组件贸易网络表现出偏好连接效应,这种偏好连接效应使少数国家(地区)逐渐成为贸易网络的中心枢纽,驱动了全球光伏组件贸易网络核心—边缘结构特征的形成;传递闭合性系数在10%水平上显著为正,而多连通性系数在1%水平上显著为负,表明全球光伏组件贸易网络中的国家(地区)*i*和国家(地区)*j*依托第三方

表7 全球光伏组件贸易网络的TERGM实证结果

Table 7 Empirical results of TERGM for the global photovoltaic (PV) module trade network

分类	名称	变量	模型1	模型2	模型3	模型4
边属性	边	<i>edges</i>	-22.3742*** (-1.2955)	-21.0250*** (-1.1910)	-17.0276*** (-0.9337)	-11.4423*** (-0.8922)
互惠效应	互惠性	<i>mutual</i>		0.4194*** (-0.0430)	0.6713*** (-0.0480)	0.4560*** (-0.0344)
结构依赖效应	扩张性	<i>gwodeg</i>			-2.6309*** (-0.2219)	-1.8855*** (-0.2324)
	传递闭合性	<i>gwesp</i>			0.1579 (-0.0904)	0.1697* (-0.0717)
	多连通性	<i>gwdsp</i>			-0.0692*** (-0.0036)	-0.0404*** (-0.0029)
时间依赖效应	稳定性	<i>stability</i>				1.4133*** (-0.0203)
	多变性	<i>variability</i>				-0.0052 (-0.0146)
行为者&关系效应	国家(地区)经济发达程度	<i>lnPGDP</i>	0.6326*** (-0.0154)	0.5904*** (-0.0126)	0.5229*** (-0.0166)	0.3532*** (-0.0193)
	国家(地区)城市化率	<i>lnUrb</i>	-1.1048*** (-0.0446)	-1.0301*** (-0.0447)	-1.0875*** (-0.0680)	-0.7867*** (-0.0445)
	国家(地区)工业化率	<i>lnInd</i>	-0.7677*** (-0.0853)	-0.7182*** (-0.0818)	-0.7256*** (-0.1059)	-0.5415*** (-0.0575)
	国家(地区)贸易自由度	<i>lnTrd</i>	0.6380*** (-0.0646)	0.5914*** (-0.0607)	0.4904*** (-0.0784)	0.3841*** (-0.0608)
	国家(地区)环境绩效指数	<i>lnEpi</i>	0.3853* (-0.1940)	0.3562* (-0.1611)	0.2952** (-0.1043)	0.1880* (-0.1033)
	国家(地区)碳排放量	<i>lnCO₂</i>	0.6677*** (-0.0104)	0.6232*** (-0.0127)	0.5896*** (-0.0195)	0.4177*** (-0.0090)
外部网络效应	国家(地区)接壤关系	<i>Cotig</i>	2.7298*** (-0.0920)	2.5470*** (-0.0857)	2.7329*** (-0.1007)	1.9564*** (-0.0552)
	是否属于同一收入水平	<i>Com</i>	0.1281*** (-0.0228)	0.1146*** (-0.0200)	0.0692*** (-0.0188)	0.0729** (-0.0227)
	是否同为WTO成员	<i>WTO</i>	0.5548*** (-0.0516)	0.5214*** (-0.0483)	0.5230*** (-0.0304)	0.3394*** (-0.0498)

注:***、**、*分别表示显著性水平为1%、5%和10%,括号中为回归系数的标准误;下同。

国家(地区)进行光伏组件贸易往来的倾向较为有限,贸易网络中存在依托第三方国家(地区)产生光伏组件贸易联系的可能性较小。时间依赖效应中稳定性(*stability*)变量系数为1.4133,且在1%的水平上显著,意味着全球光伏组件贸易网络随着时间的推移具有一定的稳定性;多变性(*variability*)变量系数为负但不显著,表明全球光伏组件贸易网络的形成和演化与时间的推移之间可能具有抑制性的相互影响,意味着贸易网络在下一个时期产生突变

或消失的可能性较小。值得注意的是,稳定性变量显著而多变性变量不显著,进一步说明全球光伏组件贸易网络的演化路径更倾向于渐进性发展而非跨越式发展。

行为者&关系效应变量中,从实证结果来看,国家(地区)经济发达程度(*lnPGDP*) 在1%的水平上显著为正,说明经济实力越强的国家(地区)会越倾向于开展光伏组件贸易。国家(地区)城市化率(*lnUrb*)和工业化率(*lnInd*) 在1%水平上显著为

2023年12月

负,可能是由于光伏产业对一国(地区)硅资源禀赋和市场规模要求较高,若一国(地区)硅资源比较匮乏、市场规模较小,虽然城市化率和工业化率比较高,但不具备光伏组件的生产优势,根据比较优势理论,建立光伏组件出口贸易联系的可能较小,故回归系数显著为负。贸易自由度($\ln Trd$)变量回归系数在1%水平上显著为正,意味着较高贸易自由度水平对全球光伏组件贸易起到正向促进作用。国家(地区)环境绩效指数($\ln Epi$)在10%的水平上显著为正,反映了一国(地区)在环境保护方面的表现愈加积极,愈将促使国家(地区)采取措施推动光伏清洁能源的发展。碳排放量($\ln CO_2$)在1%的水平上显著为正,表明一国(地区)碳排放量越多,碳中和目标实现的压力越大,推动光伏可再生能源发展的决心越坚定。

外部网络效应方面,国家(地区)接壤网络($Cotig$)变量回归系数在1%的水平上显著为正,表明贸易网络中若两国(地区)接壤,则更容易开展光伏组件贸易联系;国家(地区)是否属于同一收入水平(Com)变量回归系数在5%的水平上显著为正,说明同一收入水平国家(地区)具有相似的经济发

水平和能源需求,对光伏组件贸易联系的建立有着积极影响。两国(地区)是否同为WTO成员(WTO)在1%的水平上显著为正,有利于加强沟通与协调,减少信息不对称性,对全球光伏组件贸易联系的建立有着促进作用。

随着边属性、互惠效应、结构依赖效应和时间依赖效应等内生机制变量纳入模型后,总体来看,除 Com 变量外,模型中的外生变量对全球光伏组件贸易网络关系的影响均发生了变化,说明仅通过外生因素的维度来考虑全球光伏组件贸易网络关系的驱动机制存在一定偏误,因此,全球光伏组件贸易网络关系的形成和演化是内生机制和外生机制共同作用的结果。

4.2 拟合优度检验

目前学界通常采用模拟的方法来检验虚拟网络与观测网络的拟合效果,利用仿真网络特征估计值绘制箱式图,点越靠近实际观测网络特征指标值,代表模型拟合效果越好^[34]。本文使用GOF方法对模型估计结果进行拟合优度检验(图5),选取了共享伙伴数(Edge-wise Shared Partners)、最短路径距离(Geodesic Distances)、二元共享伙伴数(Dyad-

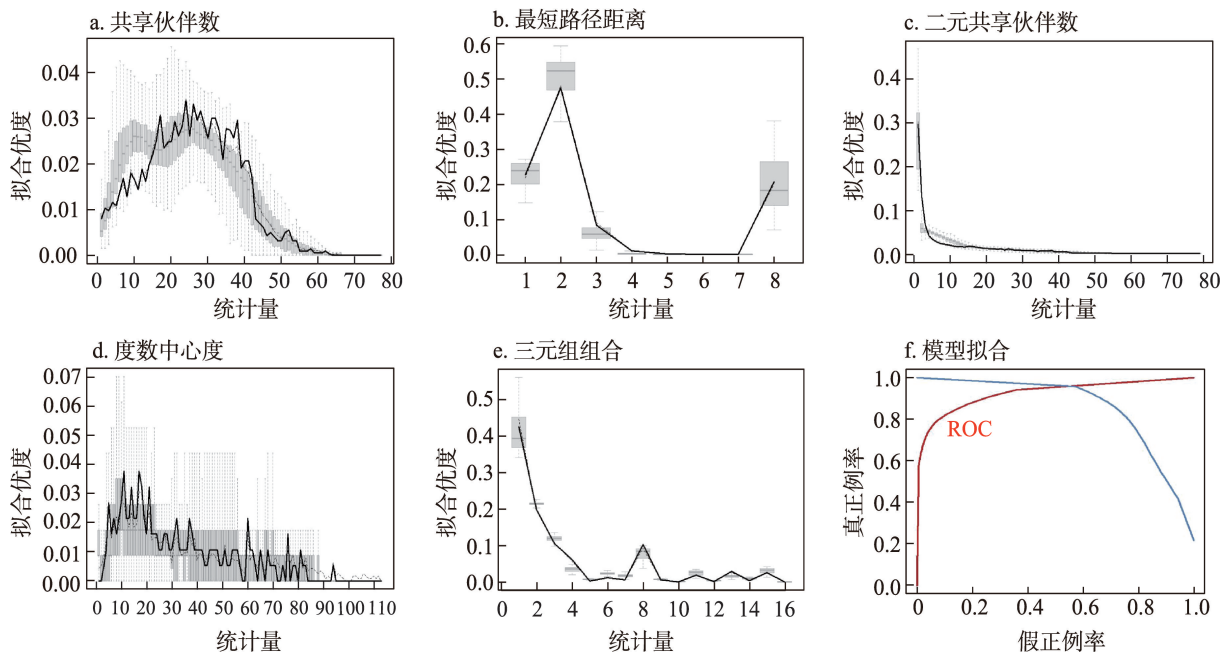


图5 TERGM的拟合效果

Figure 5 Fitting effect of TERGM

注:图5a-5e中黑色实线为实际网络的特征值。图5f中ROC曲线的纵轴表示模型中预测到的连接存在于实际观测数据中的比例,即为真正例率;横轴表示模型中预测到的连接不存在于实际观测数据中的比例,即假正例率。

wise shared Partners)、度数中心度(Degree)、三元组组合(Triad Census)共5个统计量来比较仿真模拟网络 and 实际观测网络的拟合程度。根据表7回归结果中TERGM模型估计参数,每年仿真100个随机网络,共构建了1100个仿真随机网络,图5展示了两种网络拟合效果的统计结果。图5a-5e为网络特征指标模拟值与实际值的比较,图5f为模型拟合图,左侧为ROC(Receiver Operating Characteristic)曲线,ROC曲线下的面积用来度量模型的性能,即ROC曲线越靠近上方,则模型的拟合效果越好。总体来看,TERGM的拟合效果很好。

4.3 稳健性检验

为了检验TERGM实证分析拟合效果的稳健性,本文通过调整全球光伏组件贸易网络数据的时间间隔和调整全球光伏组件贸易额的阈值对TERGM重新进行实证估计(表8)。具体方法为:①将全球光伏组件贸易网络时间间隔设置为4年和8年,采用表7中的模型4重新加以估计,得出模型5、模型6分析结果。除回归系数略有不同外,回归系数符号和显著性水平基本保持一致。②贸易网络情境下的被解释变量多为带权重的边,目前发展形成的动态指数随机图模型TERGM暂不能有效处理带权重边的问题,现有社会网络文献主要借助设定阈值来克服以上不足^[35],同时可以提升矩阵运算的灵活性与稳健性。设置阈值能够有效剔除微小贸易流量,从而对贸易网络中较为重要的贸易关系及其构成的网络结构特征更加聚焦。将光伏组件贸易额阈值设置为10万美元,重新构建加权矩阵和无权矩阵进行稳健性检验,以探究更高层次的光伏组件贸易关系网络的驱动机制,分析结果如模型7。具体对比来看,互惠性系数由模型4中的0.4560上升至0.6052,说明全球各国(地区)间的光伏组件贸易互惠关系在更高层次的网络中更加突显。传递闭合性系数由0.1697上升至0.2926且在1%的水平上显著,表明在全球光伏组件较高层次贸易网络中,剔除贸易额较小的边缘贸易关系以后,两国(地区)借由第三国(地区)形成贸易关系的可能性大大增加,贸易网络中等级效应愈加明显,贸易流向更加集中。时间依赖变量中稳定性系数增大,表明在全球光伏组件贸易较高层次的网络中,两国(地区)

表8 全球光伏组件贸易网络的TERGM的稳健性分析

Table 8 Robustness analysis of TERGM for the global photovoltaic (PV) module trade network

变量	模型5	模型6	模型7
<i>edges</i>	-12.3940*** (-0.9273)	-14.1573*** (-1.2577)	-11.0148*** (-0.7578)
<i>mutual</i>	0.4616*** (-0.0341)	0.4932*** (-0.0415)	0.6052*** (-0.0426)
<i>gwodeg</i>	-1.8778*** (-0.4112)	-1.6974*** (-0.8382)	-2.4689*** (-0.1714)
<i>gwesp</i>	0.2336 (-0.1172)	0.2475 (-0.1028)	0.2926*** (-0.0540)
<i>gwdsp</i>	-0.0488*** (-0.0038)	-0.0554*** (-0.0025)	-0.0167*** (-0.0032)
<i>stability</i>	1.2824*** (-0.0349)	1.2133*** (-0.0808)	1.6255*** (-0.0227)
<i>variability</i>	-0.0190 (-0.0500)	-0.1051 (-0.0433)	-0.0080 (-0.0112)
<i>lnPGDP</i>	0.3567*** (-0.0293)	0.3559*** (-0.0644)	0.3218*** (-0.0332)
<i>lnUrb</i>	-0.8793*** (-0.0583)	-0.8934*** (-0.1035)	-0.9393*** (-0.0747)
<i>lnInd</i>	-0.6077*** (-0.0618)	-0.5875*** (-0.0650)	-0.5877*** (-0.0381)
<i>lnTrd</i>	0.4374*** (-0.0712)	0.5090*** (-0.1078)	0.4521*** (-0.0356)
<i>lnEpi</i>	0.3072** (-0.1274)	0.4368** (-0.1785)	0.0455 (-0.0779)
<i>lnCO₂</i>	0.4510*** (-0.0163)	0.4727*** (-0.0292)	0.4661*** (-0.0194)
<i>Cotig</i>	2.1452*** (-0.0593)	2.3100*** (-0.0898)	1.4728*** (-0.0787)
<i>Com</i>	0.0906* (-0.0373)	0.1141*** (-0.0099)	0.2888*** (-0.0378)
<i>WTO</i>	0.3356*** (-0.0667)	0.3177*** (-0.0237)	0.3679*** (-0.0848)

间的光伏贸易关系更加稳固。多变性系数为负,数值减小且不显著,表明全球光伏组件贸易较高层次网络与时间形成的抑制交互作用逐渐减弱。除lnEpi和Com显著性水平略有改变,其他变量的系数符号和显著性水平均未发生变化。综上,表明TERGM的回归结果是稳健的。

5 结论与政策建议

5.1 结论

本文在构建2001—2021年全球光伏组件贸易

2023年12月

网络的基础上,采用复杂网络分析方法和Gephi可视化分析刻画了光伏组件贸易网络的动态演变特征,进一步使用动态指数随机图模型深度解析了全球光伏组件贸易网络动态演变的内生和外生驱动机制。得出结论如下:

(1)全球光伏组件贸易网络整体规模不断扩大,网络密度呈上升趋势,国家(地区)间的贸易联系日益密切;圈层结构凸出,国家(地区)间的贸易差距呈扩大态势;区域集团化处于动态演化中,新兴市场不断涌现,由以美国、德国和日本为主导的三大贸易集团向以中国、德国、美国和马来西亚为主导的四大贸易集团演变,为全球光伏组件贸易的发展提供了新的机遇与挑战;中国在全球光伏组件贸易网络中的地位日益强化,引领功能凸显。

(2)全球光伏组件贸易网络关系受内生结构效应、行为者&关系效应和外部网络效应共同驱动。内生影响机制中,互惠关系是驱动全球光伏组件贸易关系的主要原因;扩张性的负向影响表明网络存在偏好连接效应,驱动了全球光伏组件贸易网络“核心—边缘”结构的形成;传递闭合性作用较弱,贸易网络中依托第三方国家(地区)产生光伏组件贸易联系的可能性小;稳定性对全球光伏组件贸易网络关系的影响相较多变性更大,网络演化路径属于渐进式而非跨越式。

(3)全球光伏组件贸易网络关系的外生影响机制中,国家(地区)经济发达程度的上升、贸易自由度的增加、环境绩效指数的改善和碳排放量的增加有利于全球光伏组件贸易网络关系的形成;两国(地区)接壤可有效降低光伏组件贸易的运输成本;收入水平趋同可优化全球光伏组件供应链体系,国家(地区)根据各自优势分工合作,以降低贸易成本;同为WTO成员可促进技术合作和知识共享,便于加强沟通与协调。

5.2 政策建议

根据以上研究结果,本文提出以下政策建议:

(1)基于全球光伏组件贸易网络动态演变的趋势,未来中国应加强技术创新和产品升级,提升国内光伏产业链供应链韧性。从21世纪初“受制于人”到如今“全球领先”,中国凭借光伏产业链完备优势和光伏组件成本优势成为全球光伏产业的领

跑者,但受产业政策、市场需求、地缘政治和贸易摩擦等多重因素交织影响,全球光伏组件贸易依然具有多变性,对中国光伏产业的贸易发展产生了一定影响。中国政府应及时引导、完善和鼓励光伏产业链垂直一体化和横向业务布局,切实防范光伏产业链上游产品价格剧烈波动和原材料短缺风险,增强产业链供应链韧性,引导光伏产业健康发展;同时,加强技术创新和产品升级,提高生产要素使用效率,降低光伏组件生产成本,以使光伏组件国际竞争力始终保持领先地位。

(2)提升中国在全球光伏组件贸易网络中“枢纽”地位,发挥偏好连接效应和互惠效应。一方面,中国作为全球光伏组件贸易网络的关键枢纽节点,充分发挥偏好连接的积极作用。中国于2013年提出“一带一路”倡议以后,积极带动了与沿线国家(地区)的经贸往来。伴随全球能源转型加速演进,东南亚、中亚五国和中南美等新兴光伏市场需求快速增长,中国光伏企业应积极把握“一带一路”倡议带来的发展机遇和条件,充分考虑和合理利用影响全球光伏组件贸易联系的多维因素,扩大中国与“一带一路”沿线国家(地区)光伏组件贸易。另一方面,中国需强化互惠效应对贸易网络关系的积极作用,对亚太、拉美、中亚、中东和北非等新兴市场进行光伏产业布局,加强光伏组件贸易伙伴多元化,实现互惠互利、合作共赢,促进全球光伏产业链的创新升级和高质量发展。

(3)积极参与制定光伏组件的相关国际贸易规则,防范化解贸易风险。随着中国光伏产业的快速发展,中国已成为全球遭受光伏产品“双反”调查的最多的国家,光伏产业的贸易壁垒不断增加。中国政府要“内外兼修”,一方面,完善国内相关国际贸易体系和法律体系,积极参与国际贸易规则谈判与制定;另一方面,及时跟踪和掌握美国、德国和印度等国光伏产业贸易保护的最新措施,作好风险评估和应对预案,以保护本土光伏企业健康发展和提升中国光伏产业的国际竞争力。

参考文献(References):

[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. [Yu J H, Xiao R L, Ma R F, et al. Research hotspots and trends of carbon neutrality in international trade[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1303–1320.]
- [2] 赵勇强. 国际可再生能源发展与全球能源治理变革[J]. 宏观经济研究, 2017, (4): 43–54. [Zhao Y Q. International renewable energy development and global energy governance reform[J]. Macro Economics, 2017, (4): 43–54.]
- [3] Andreas G, Llewelyn H. Protect global supply chains for low-carbon technologies[J]. Nature, 2020, 585(7823): 28–30.
- [4] 张锐, 洪涛. 清洁能源供应链与拜登政府的重塑战略: 基于地缘政治视角[J]. 和平与发展, 2022, (1): 16–37. [Zhang R, Hong T. Clean energy supply chain and the Biden administration's reshaping strategy: From a geopolitical perspective[J]. Peace and Development, 2022, (1): 16–37.]
- [5] 田开兰, 杨翠红. 中欧光伏贸易争端对双方经济损益的影响分析[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(7): 1652–1660. [Tian K L, Yang C H. Gain and loss: The dispute of photovoltaic trade between EU and China[J]. System Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(7): 1652–1660.]
- [6] 白雪洁, 闫文凯. 中国新兴产业产能过剩的形成机理及疏解策略: 基于光伏行业的案例分析[J]. 南开学报(哲学社会科学版), 2017, (1): 133–142. [Bai X J, Yan W K. The mechanism of overcapacity in China's emerging industries and solutions: An analysis of photovoltaic industry[J]. Nankai Journal (Philosophy, Literature and Social Science Edition), 2017, (1): 133–142.]
- [7] 朱向东, 贺灿飞, 毛熙彦, 等. 贸易保护背景下中国光伏产业空间格局及其影响因素[J]. 经济地理, 2018, 38(3): 98–105. [Zhu X D, He C F, Mao X Y, et al. The spatial pattern of China PV industry under the background of trade protectionism[J]. Economic Geography, 2018, 38(3): 98–105.]
- [8] 侯伟丽, 李思敏, 刘星. 产业支持政策、进口国市场需求对欧盟可再生能源产品出口的影响分析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2020, 20(4): 103–114. [Hou W L, Li S M, Liu X. Analysis on the impact of industrial support policies and market demand of importing countries on EU renewable energy products export[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2020, 20(4): 103–114.]
- [9] 杨学坤. 一带一路战略下中国光伏产品出口策略[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(1): 435–437. [Yang X K. Export tactics of Chinese photovoltaic products under the strategy of One Belt and One Road[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(1): 435–437.]
- [10] 帅竞, 成金华, 冷志惠, 等. “一带一路”背景下中国可再生能源产品国际竞争力研究[J]. 中国软科学, 2018, (7): 21–38. [Shuai J, Cheng J H, Leng Z Y, et al. Research on the international competitiveness of China's renewable energy products in the context of the Belt and Road Initiative[J]. China Soft Science, 2018, (7): 21–38.]
- [11] 曹旭平, 朱福兴, 王任. 新能源产业出口技术结构的动态变迁[J]. 中国科技论坛, 2019, (7): 76–83. [Cao X P, Zhu F X, Wang R. Research on the dynamic evolution of technical structure of new energy industry export[J]. Forum on Science and Technology in China, 2019, (7): 76–83.]
- [12] 于佳, 王勇. 中国光伏产业发展与“一带一路”新机遇: 基于新结构经济学视角的解析[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2020, 40(5): 87–98. [Yu J, Wang Y. Development of the photovoltaic industry in China and new opportunities from the Belt and Road Initiatives: Analysis from the perspective of new structural economics[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2020, 40(5): 87–98.]
- [13] Lusher D, Koskinen J, Robins G. Exponential Random Graph Models for Social Networks: Theory, Methods and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 2012.
- [14] Robins G, Pattison P, Kalish Y, et al. An introduction to exponential random graph (p^*) models for social networks[J]. Social Networks, 2007, 29(2): 173–191.
- [15] Hanneke S, Fu W J, Xing E P. Discrete temporal models of social networks[J]. Electronic Journal of Statistics, 2010, 4: 585–605.
- [16] 唐晓彬, 崔茂生. “一带一路”货物贸易网络结构动态变化及其影响机制[J]. 财经研究, 2020, 46(7): 138–153. [Tang X B, Cui M S. Research on the dynamic change of goods trade network structure and its impact mechanism of countries along the Belt and Road [J]. Journal of Finance and Economics, 2020, 46(7): 138–153.]
- [17] 刘林青, 闫小斐, 杨理斯, 等. 国际贸易依赖网络的演化及内生机制研究[J]. 中国工业经济, 2021, (2): 98–116. [Liu L Q, Yan X F, Yang L S, et al. Research on the evolution and endogenous mechanism of international trade dependence network[J]. China Industrial Economics, 2021, (2): 98–116.]
- [18] 刘林青, 闫小斐. 国际粮食贸易网络多核集聚格局的形成机制研究[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2021, (4): 47–59. [Liu L Q, Yan X F. Research on the formation mechanism of clustered structure with multi-hubs of the international cereal trade network[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2021, (4): 47–59.]
- [19] 贺胜兵, 赵东昇, 陈光达. “一带一路”纺织品贸易网络的演化特征及驱动机制: 基于TERGM模型的分析[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2022, 25(2): 122–135. [He S B, Zhao D S, Chen G D. On evolution characteristics and driving mechanisms of Belt and Road regional textile trade network: An analysis based on TERGM[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Social Science Edition), 2022, 25(2): 122–135.]
- [20] 罗超亮, 符正平, 刘冰, 等. 战略性新兴产业国际贸易网络的演化及动力机制研究[J]. 国际贸易问题, 2022, (3): 121–139. [Luo

2023年12月

- C L, Fu Z P, Liu B, et al. Research on the evolution of strategic emerging industries' international trade network and its dynamic mechanism[J]. *Journal of International Trade*, 2022, (3): 121-139.]
- [21] 亢梅玲, 张翔, 马新宇. 国际高科技产品贸易依赖拓扑关系演化机制研究[J]. *中国科技论坛*, 2023, (1): 151-160. [Kang M L, Zhang X, Ma X Y. Study on the evolutionary mechanism of international high-tech product trade dependence topological relationship [J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2023, (1): 151-160.]
- [22] 黄孝岩, 李国祥. RCEP 国家农产品贸易网络格局演变及其影响机制研究: 基于复杂网络视角[J]. *国际经贸探索*, 2023, 39 (10): 22-41. [Huang X Y, Li G X. Research on the evolution of agricultural product trade network pattern and its influencing mechanism in RCEP countries: Based on the perspective of complex network[J]. *International Economics and Trade Research*, 2023, 39 (10): 22-41.]
- [23] Liu D, Jin L, Huang H. et al. Analysis of the international polysilicon trade network[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 142: 122-130.
- [24] Xiao J X, Xiong C, Deng W, et al. Evolution features and robustness of global photovoltaic trade network[J]. *Sustainability*, 2022, DOI: 10.3390/su142114220.
- [25] 覃雄合, 李梁荣, 黄晓东. 基于指数随机图模型的全球跨境并购网络结构特征与形成机制[J]. *资源科学*, 2023, 45(9): 1693-1709. [Qin X H, Li L R, Huang X D. Structural characteristics and formation mechanism of global cross-border M&A networks: Based on the exponential random graph model[J]. *Resources Science*, 2023, 45(9): 1693-1709.]
- [26] 朱学红, 彭婷, 谌金宇. 战略性关键金属贸易网络特征及其对产业结构升级的影响[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1489-1503. [Zhu X H, Peng T, Chen J Y. Impact of strategic and critical metals trade network characteristics on the upgrading of industrial structures[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1489-1503.]
- [27] 祝孔超, 赵媛, 姚亚兵, 等. 全球稀土进口竞争格局分析及潜在贸易联系预测[J]. *资源科学*, 2022, 44(1): 70-84. [Zhu K C, Zhao Y, Yao Y B, et al. Global rare earth import competition pattern and prediction for potential trade links[J]. *Resources Science*, 2022, 44(1): 70-84.]
- [28] 贺胜兵, 许宸昊, 周华蓉. “一带一路”工业机器人贸易网络特征及演化机制[J]. *中国软科学*, 2023, (6): 43-55. [He S B, Xu C H, Zhou H R. Research on characteristics and evolution mechanism of industrial robots trade network among the Belt and Road countries[J]. *China Soft Science*, 2023, (6): 43-55.]
- [29] 王群勇, 王俊楠, 汪青青. 中国省际贸易网络演化机制研究[J]. *财经科学*, 2023, (5): 124-137. [Wang Q Y, Wang J N, Wang Q Q. Research on the evolutionary mechanism of China's interprovincial trade network[J]. *Finance & Economics*, 2023, (5): 124-137.]
- [30] 倪娟, 赵晓梦, 唐国平. 环境规制强度测算方法研究新进展及展望[J]. *国外社会科学*, 2020, (2): 64-75. [Ni J, Zhao X M, Tang G P. Measuring the stringency of environmental regulations: Latest developments and prospects[J]. *Social Sciences International*, 2020, (2): 64-75.]
- [31] 杨文龙, 杜德斌, 马亚华, 等. “一带一路”沿线国家贸易网络空间结构与邻近性[J]. *地理研究*, 2018, 37(11): 2218-2235. [Yang W L, Du D B, Ma Y H, et al. Network structure and proximity of the trade network in the Belt and Road region[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(11): 2218-2235.]
- [32] 史丹, 叶云岭, 于海潮. 双循环视角下技术转移对产业升级的影响研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2023, 40(6): 5-26. [Shi D, Ye Y L, Yu H C. Impact of technology transfer on industrial upgrading from the perspective of dual circulation[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2023, 40(6): 5-26.]
- [33] 叶玮怡, 马恩朴, 廖柳文, 等. 远程耦合视角下国际大豆贸易网络的时空演化及影响因素[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(6): 1632-1650. [Ye W Y, Ma E P, Liao L W, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of international soybean trade network from a telecoupling perspective[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(6): 1632-1650.]
- [34] Leifeld P, Cranmer S J, Desmarais B A. Temporal exponential random graph models with btergm: Estimation and bootstrap confidence intervals[J]. *Journal of Statistical Software*. 2018, 83(6): 1-36.
- [35] 刘林青, 陈紫若, 田毕飞. 结构依赖如何影响贸易网络形成及演化? 以“一带一路”为例[J]. *世界经济研究*, 2020, (6): 106-120. [Liu L Q, Chen Z R, Tian B F. How does structural dependence affect the formation and evolution of trade network? An empirical analysis based on “the Belt and Road”[J]. *World Economy Studies*, 2020, (6): 106-120.]

Dynamic evolution and driving mechanism of global photovoltaic module trade network

CHENG Yunjie¹, LIU Xu^{1,2}

(1. School of Economics, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830000, China; 2. Changji University, Changji 831100, China)

Abstract: [Objective] Under the background of energy crisis, countries (regions) around the world have accelerated the distribution of photovoltaic (PV) renewable energy, so it is important to explore the dynamic evolution characteristics and driving mechanism of the global PV module trade network structure. [Methods] The complex network analysis method and temporal exponential random graph model (TERGM) were used to explore the structural evolution characteristics and driving mechanism of the global PV module trade network. [Results] (1) The global photovoltaic module trade network is highly clustered and has a short path length, and the trade gap between countries (regions) is widening, forming a close trade network dominated by intraregional trade. (2) The global PV module trade network has a typical core-periphery structure, and China is at the center of the core circle. (3) The worldwide PV module trade network exhibits reciprocal effects, structure-dependent effects, and time-dependent effects. (4) The impacts of national economic development, trade freedom, environmental performance index, and carbon emissions on the establishment of global photovoltaic module trade network are significantly positive, while the national urbanization and industrialization rates are negative. The exogenous networks that have a significant impact on them are the national border network, the income grade network, and the WTO member network. [Conclusion] China should take its central position at the global PV trade network as an opportunity to strengthen technological innovation, strengthen the resilience of the PV supply chain, speed up the convergence of the PV industry, and achieve differentiated development of products. The country should give full play to its geographical proximity to global and regional markets, promote trade diversification, actively promote international cooperation and integrated development of the PV industrial chain, and push forward the energy revolution to achieve the dual carbon goals.

Key words: photovoltaic modules; global trade network structure; dynamic evolution; driving mechanism; temporal exponential random graph model