全球太阳能电池贸易网络韧性研究

李 婷，杜 鹏，阮紫云

（辽宁师范大学地理科学学院，大连 116029）

摘要：通过2013—2023年全球太阳能电池贸易出口数据构建贸易网络，并从结构韧性和动态过程刻画太阳能电池贸易的时空格局和拓扑结构，揭示其网络韧性演化趋势。研究发现：全球太阳能电池贸易规模扩大、密度提升、国家（地区）间联系趋密，贸易重心从分散走向大国集中再辐射；网络节点异质性显著，中国、德国等为核心节点；始终呈现“核心-边缘”结构，亚洲、欧洲国家（地区）核心模块较稳定，东南亚、中东社团显现推动多元化；网络韧性水平呈下降状态，随着中国、美国、德国等核心节点中心化的增强，与之相关的核心连边对网络的连通性和稳健性也具有关键作用。

关键词：太阳能电池；贸易网络；网络韧性；动态评估

中图分类号：K902 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)10－0089－09

全球环境保护和可持续发展共识促使能源转型成为各国政府和国际社会的重要议题，可再生能源成为各国家（地区）保障能源安全、实现可持续发展的核心路径。国际可再生能源署2024年报告显示，2023年末全球可再生能源发电总装机容量已飙升至3 865 GW。其中太阳能成为首要可再生能源发电的来源，占比高达36.7%[1]。中国作为全球可再生能源的生产与消费第一大国，在太阳能电池领域的主导地位尤为突出。国家统计局发布的统计公报显示，2023年太阳能电池产量达到5.4亿kW，较上一年激增54.0%，在35个规模以上工业主要产品产量排名中位列第一[2]。与此同时，海关数据显示，2023年中国太阳能电池出口数量为563.7亿个，相比2022年同比增长38.5%。这一强劲的出口增长不仅支撑了国内外贸易的高质量发展，更深刻影响着全球贸易格局。然而当前国际政治经济形势复杂、贸易保护主义盛行以及技术更新迭代的加速，中国太阳能电池发展面临巨大的风险和挑战。研究国际贸易中太阳能电池资源的流通情况及其结构上的抗冲击能力，不仅有助于中国把握市场动态、制定合理的进出口政策，还能够评估并强化太阳能整个产业链在全球贸易网络中的稳健性和韧性，从而进一步促进能源市场的稳定和可持续发展。

“韧性”特指物体遭受外力冲击后能够迅速恢复到原有形态与功能的特性[3]。自20世纪70年代美国生态学家Holling将韧性概念引入生态学研究后[4]，吸引了国内外众多领域学者的关注。近年来，相关学者纷纷对不同领域的网络韧性也展开了研究，如城市交通网络[5]、生态系统网络[6]、经济网络[7]等。贸易网络作为一个复杂的网络体系，会面临经济、政治、文化等多重因素的冲击影响，因此贸易网络的抗冲击能力与恢复能力的构建至关重要[8]。近年来，学术界从多元视角与方法出发，针对不同类型的贸易网络韧性展开研究。沈曦等[9]通过风险场景仿真方法，评估了关键矿产资源多层贸易网络的节点韧性；于娱等[10]从静态结构和动态演变双维度测度铁矿产贸易网络的韧性，深入剖析该贸易网络的韧性特征；陈伟等[11]构建多维度多指标的韧性评估体系，深度探讨“一带一路”沿线贸易网络的韧性演化规律。综合而言，网络韧性的研究多从静态和动态两个核心维度展开，静态维度多选取层级性、匹配性、传输性、集聚性[12-13]等指标刻画网络固有属性；动态维度多构建仿真模型，对网络进行模拟冲击量化反映整体网络的抗冲击能力。

太阳能电池领域现有研究主要聚焦于贸易格局演化、网络结构特征及影响因素等方面。丁嘉铖等[14]从产业链视角出发，刻画了光伏整个产业的贸易网络格局演变特征，并深入解析了背后的地缘政

收稿日期：2025-11-06

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金(41701123)

作者简介：李婷(2001—)，女，河南林州人，硕士研究生，研究方向为贸易经济地理；通信作者杜鹏(1984—)，男，辽宁锦州人，博士，副教授，硕士研究生导师，研究方向为区域经济与产业规划、海洋经济地理；阮紫云(2001—)，女，江西九江人，硕士研究生，研究方向为产业经济与区域经济。

治驱动机制；程云洁和刘旭[15]通过对全球光伏组件贸易网络结构的研究，发现该贸易网络具有典型的“核心-边缘”结构特征；齐玮等[16]基于2007—2022年全球光伏产业链贸易数据系统探究贸易网络演化特征及影响因素，发现经济规模、制造业能力、距离等对变量产业链各环节贸易水平具有持续性影响。上述研究为厘清全球太阳能电池贸易网络的演化规律与核心特征提供了重要理论支撑。然而对于太阳能电池贸易网络韧性的研究却相对缺乏。本文基于联合国商品贸易数据库2013—2023年全球200多个国家(地区)太阳能电池出口贸易面板数据构建复杂网络，从其结构特征和动态评估两个维度对网络结构韧性进行综合测度。结构特征主要利用相关拓扑指标衡量传输性、聚类性、层级性以及匹配性，动态评估主要通过模拟攻击关键节点和连边分析其性能变化以此来评估贸易网络整体的抵抗能力和恢复能力。本文研究可能存在的边际贡献有：对太阳能电池贸易网络韧性进行研究，进一步丰富了该领域的研究内容；从结构韧性和动态过程两个维度综合分析全球太阳能电池贸易网络韧性特征，更系统的量化体系能够为行业供应链安全和政策制定提供理论支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

全球太阳能产业发展经历了四个阶段：2011年之前的启动期、2011—2012年的动荡期、2013—2014年的调整期2015年至今的快速发展期四个阶段[14]。2013年中国《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》出台后，太阳能市场规模化扩张促使太阳能出口产品的种类日益多元化。此外，欧美国家不断加强对太阳能产品的贸易壁垒措施，这一系列举动不仅引发了全球太阳能产业环境的剧烈波动，也深刻地改变了太阳能产品的国际贸易格局，促使全球太阳能市场向更加复杂多变的趋势发展。因此，本文选取2013—2023年全球200多个国家(地区)太阳能电池出口贸易进行深入研究，并选取2013年、2018年以及2023年三个时间节点反映贸易网络韧性在不同市场环境、政策及技术冲击下的特征及表现。

数据来源于联合国贸易商品数据库，选取海关编码为8541420000、8541430000两类产品在2013—2023年200多个国家(地区)的太阳能电池出口贸易流，构建以国家(地区)为节点，出口贸易额为边的贸易网络。

1.2 研究方法

1.2.1 指标设计

基于复杂网络方法，通过传输性、聚类性、层级性以及匹配性4个角度对全球太阳能电池贸易网络结构韧性特征进行测度和分析。

(1)传输性。传输性衡量的是贸易网络中各个要素的流动交换能力。贸易网络结构的传输性测度通过平均路径长度来实现，其计算公式为

$$L=\frac{2}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}^{N}d_{ij} \tag{1}$$

式中：L为平均路径长度；N为贸易网络的节点数量；d_{ij}为贸易网络中节点i到节点j的加权最短路径长度。

(2)聚类性：聚类性反映的是贸易网络节点的紧密程度。基于平均聚类系数对贸易网络结构的聚类性进行测度，其计算公式为

$$C=\frac{\sum_{i=1}^{N}\frac{X_i}{H_i(H_i-1)}}{N} \tag{2}$$

式中：C为贸易网络的平均聚类系数；X_i为节点i与相邻节点之间贸易的边数量；H_i为节点i相邻节点的数量。

(3)层级性：层级性描述的是贸易网络节点的等级。采用度和度分布来表征层级性，其计算公式为

$$W_i=C(W_i^*)^{\alpha} \tag{3}$$

对式(3)进行对数处理后得：

$$\ln W_i=\ln C+\alpha\ln W_i^* \tag{4}$$

式中：W_i为贸易网络中节点i的度；W_i^*为节点i在贸易网络中的位序排名；α为度分布曲线斜率；C为常数。

(4)匹配性：匹配性刻画的是贸易网络中节点的相关程度。匹配性可分为同配性和异配性，同配性是指较大的节点之间往往紧密相连，而较小的节点则更倾向于与较小的节点建立联系；反之，网络为异配性。利用度关联来表明网络的匹配性，其计算公式为

$$\overline{AW}_i=\frac{\sum W_i}{N},\ \overline{AW}_i=C+bW_i \tag{5}$$

式中：$\overline{AW}_i$为节点i与所有相邻节点度的平均值；W_i为贸易网络中节点i的度；N为贸易网络的节点数量；C为常数；b为度关联系数，用于衡量匹配性。

1.2.2 贸易网络的组团结构

贸易组团在贸易网络结构研究中占据着关键

地位,是重要的评价指标之一[17]。在网络研究场景下,网络中的连边分布往往是不均衡的。网络的部分区域会呈现较高的节点密度与连边密度,使得这些区域中节点之间的互动十分频繁,形成相对紧密的联系;此外网络中还存在另外一些区域,这些区域的连边数量比较少,呈现一种比较松散的结构形态。这种不均衡的特性就是所谓的社团结构或者组团结构。不同社区的区分通常使用模块度衡量,模块度越大表明社区分化程度越大,反之越小,其计算公式为。

$$Q=\frac{1}{2n}\sum_{ij}\left(F_{ij}-\frac{a_i a_j}{2n}\right)\partial(D_i,D_j) \tag{6}$$

式中:Q 为模块度;F_{ij} 为邻接矩阵的元素;n 为网络中的边数;a_i 为 i 节点所有边的权重总值;$\partial(D_i,D_j)$为节点 i 和 j 之间边的期望权重;$\partial(D_i,D_j)$ 当节点 i 和节点 j 属于同一社团时取数值 1,否则取数值 0。

1.2.3　模拟冲击

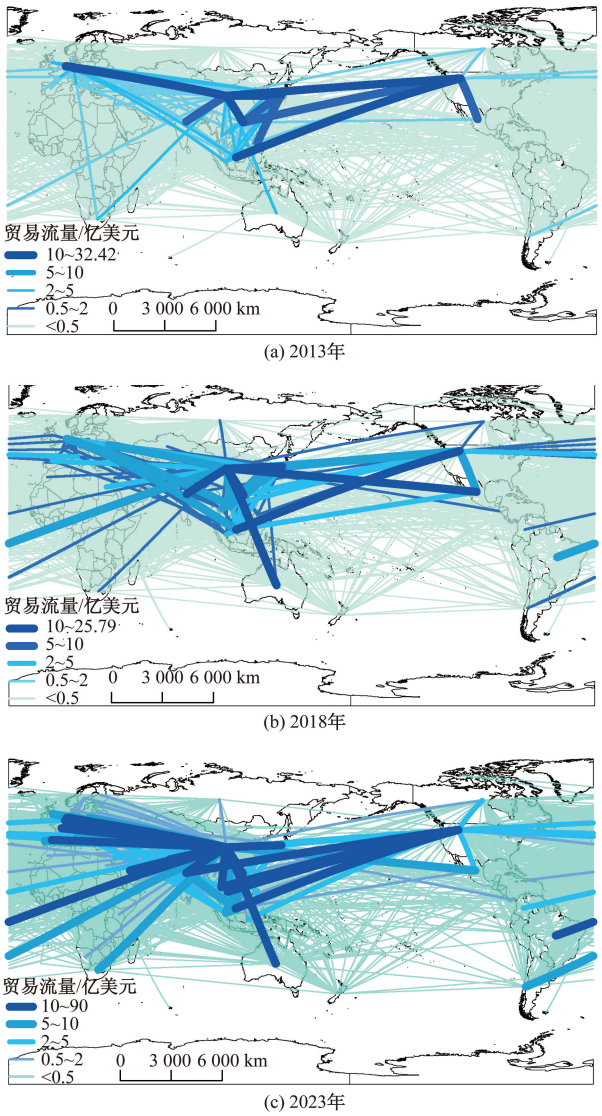
对于一个既定的网络而言,当从该网络中移除的节点或连边数量累积至这个临界值时,网络结构就会发生质变从而导致网络破碎和崩溃,使得整个网络的连通性能显著降低[18]。模拟冲击包括移除节点和移除边两种方式,在此基础上先对节点和边的权重进行排序,通过移除关键节点和边反映节点和边的失效对于整个网络系统的影响程度,从而衡量全球太阳能电池贸易网络的稳定性。

2　结果分析

2.1　全球太阳能电池贸易格局空间演化

基于联合国商品贸易统计数据库构建 2013 年、2018 年及 2023 年的全球太阳能电池贸易网络,并绘制全球各国间的出口贸易流向(图 1),发现太阳能电池的贸易网络格局在 2013—2023 年经历了网络规模不断扩大、密度逐渐增加、联系日益密切的显著演变,贸易重心由早期较为分散,到后期向少数大国集中再向外辐射的趋势。

2013 年,太阳能电池的贸易重心主要集中在亚洲、欧洲和北美洲,亚洲虽已在全球太阳能电池贸易网络中占据一定地位,但主导区域尚不明显。当年全球太阳能电池出口贸易规模排名前十的国家(地区)分别是中国、日本、韩国、德国、马来西亚、美国、新加坡、菲律宾及荷兰。其中主要出口地为中国、日本、德国等,主要进口地为美国及欧洲部分国家。中国作为全球光伏产业的领军者,太阳能电池出口量巨大,贸易总额为 157.6 亿美元,占全球贸易



基于审图号为 GS(2016)1666 号的标准地图制作,底图无修改

图 1　全球太阳能电池贸易网络格局演变

总额的 35%,出口市场主要包括美国、欧洲、亚洲等地区;日本和德国作为新能源转型的典范,太阳能产业发展迅速,推动了太阳能电池出口量的增加,占据全球贸易总额的 19%。

2013—2018 年,随着全球经济的快速发展以及相关国家和地区政策的不断实施,太阳能电池贸易进入快速发展期,各国家(地区)之间的贸易联系也更加密切,更多国家(地区)参与其中,贸易关系更加复杂多元化。但全球贸易保护主义抬头、“双反”措施的增加以及关税的加征导致全球光伏产业迎来发展的寒冬时期。最高贸易流量区间由 10 亿～32.42 亿美元下降到 10 亿～25.79 亿美元。2018 年,全球太阳能电池出口贸易规模排名前十的国家(地区)分别是中国、马来西亚、韩国、日本、德国、美

国、越南、新加坡以及泰国。稳居世界第一的中国，出口贸易额迅速攀升为181.67亿美元，占据全球贸易总额的35%；日本、韩国和马来西亚仍是太阳能电池的主要出口地；美国、德国等欧美国家在全球太阳能电池贸易中的排名则略有下降；东南亚的新加坡、越南和泰国等，在太阳能电池出口贸易中崭露头角，与全球形成了更联系紧密的贸易网络。相比之下，欧美国家(地区)在太阳能电池出口方面的传统优势则相对有所减弱。

2023年贸易形成了由中国为主导、多个国家(地区)参与、亚洲和欧洲为主要贸易区域的贸易格局。当年全球太阳能电池出口贸易规模排名前十的国家(地区)分别是中国、马来西亚、泰国、新加坡、德国、日本、美国、越南以及韩国。其中，出口到荷兰的贸易额成为全球最大的贸易流向，贸易额为90.19亿美元；主要的进口地为巴西、西班牙、巴基斯坦以及澳大利亚等。中国依然稳居全球太阳能电池出口第一大国的位置，随着众多新兴市场如东南亚、拉美、中东等地区的崛起，2023年形成了一个复杂紧密的贸易网络。

2.2 全球太阳能电池贸易网络结构韧性测度分析

2.2.1 太阳能电池贸易网络传输性和聚类性

依据联合国商品贸易统计数据库中200多个国家(地区)之间的太阳能电池出口贸易量，计算出其贸易网络结构韧性参数，具体指标如表1所示。

2013—2021年节点数比较稳定，2022年节点数骤降，下降6.6%，相应连边数量也呈现减少的情况，反映太阳能电池贸易呈现由扩张到聚焦大国的转变。究其原因，一方面俄乌冲突引发欧洲能源危机，欧盟加速光伏部署，但部分国家(地区)因产能不足、成本高而退出出口市场；另一方面，太阳能电池产量受到地域分布不均等因素的限制，贸易关系精简，贸易往来仅发生于核心国家(地区)与高需求国家(地区)之间；网络图密度保持稳定，说明核心国家(地区)之间仍然维持高频贸易，未因节点减少导致网络稀疏，这一现象也符合光伏“集中生产-分散需求”特征[16]；平均加权度在2022年激增，在能源危机的影响下，欧洲对光伏产品的需求增加，2022年中国对德国、荷兰、西班牙的出口额占比从2021年的35%升至52%，形成“中国-欧洲”超级边；2016年平均路径长度突增至2.161，这是由于美国“双反”政策太阳能电池转口贸易的增加，而在2022年平均路径长度为2.000，表明当年太阳能电池贸易网络的路径传输效率整体较好，网络中任意两个国家(地区)之间可以建立一条路径相对较短的贸易流，全球太阳能电池贸易网络效率有所提升；平均聚类系数在2013—2017年持续下降，2018—2022年波动回升，贸易网络呈现“小世界”特性，2022年核心节点的局部连接更紧密，形成更多的局部社群，这有助于提高全球太阳能电池贸易网络整体的稳定性。

表1 太阳能电池贸易网络基本特征及传输性、聚类性结果

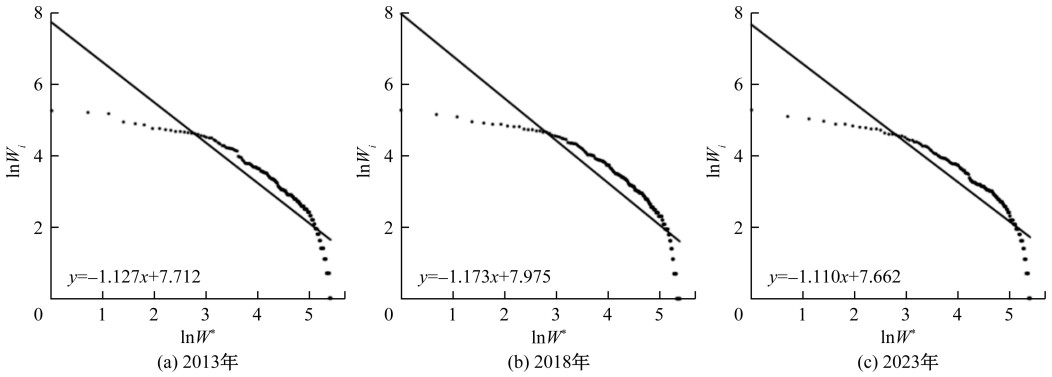
年份	节点	边	图密度	平均加权度	平均路径长度	平均聚类系数
2013	223	4 269	0.086	194 773 668.409	2.133	0.701
2014	226	4 363	0.086	203 429 558.048	2.116	0.700
2015	230	4 493	0.085	221 480 818.780	2.061	0.682
2016	229	4 630	0.089	203 264 838.862	2.161	0.654
2017	227	4 627	0.090	204 779 615.793	2.142	0.651
2018	231	4 704	0.089	206 759 515.756	2.198	0.667
2019	225	4 747	0.094	238 026 857.179	2.142	0.680
2020	225	4 636	0.092	246 354 163.690	2.123	0.663
2021	227	4 756	0.093	307 583 539.261	2.114	0.672
2022	212	4 028	0.090	429 052 405.829	2.000	0.712
2023	215	4 231	0.092	384 423 437.080	2.021	0.695

2.2.2 太阳能电池贸易网络层级性

利用式(4)分别对2013年、2018年及2023年全球太阳能电池贸易网络的层级性进行测度，以便掌握参与太阳能电池贸易的国家(地区)的地位差异情况。

如图2所示，2013年、2018年及2023年全球太阳能电池度分布拟合曲线斜率差异不大，在特定的研究期间内层级性的演化程度较小，这表明在太阳能电池贸易网络中的核心节点国家(地区)在集群中的地位较为稳定。2013年太阳能电池贸易网络中存在的核心国家(地区)节点集群有中国(节点度为248)、德国(246)、美国(242)、荷兰(194)、法国(187)、意大利(179)、英国(167)、西班牙(159)、印度(157)等；2018年贸易网络中存在的核心国家(地区)节点集群有中国(255)、德国(234)、美国(230)、法国(197)、荷兰(196)、意大利(185)、西班牙(179)、比利时(172)、印度(168)等节点集群；2023年贸易网络中存在的核心国家(地区)节点集群有中国(258)、德国(223)、美国(216)、荷兰(198)、法国(184)、意大利(179)、比利时(167)、土耳其(165)、西班牙(165)、英国(159)等。

从图2中可以看出，2013—2018年，太阳能电池贸易网络曲线的斜率$|\alpha|$由-1.127降至-1.173，说明其网络内部层次性随着时间逐渐增



(a) 2013年　(b) 2018年　(c) 2023年

图 2　全球太阳能电池贸易网络度分布

强,少数国家(地区)在贸易中占据更重要的地位。贸易联系集中在这些节点上,网络层级结构更加明显,导致网络的连通性降低,“脆弱性”特征加强;2018—2023 年,太阳能电池贸易网络曲线的斜率 α 由−1.173 升至−1.110,网络的层级性有所减弱,贸易网络逐渐变得更加均衡,各国家(地区)在贸易中的地位差异缩小,不再过度依赖少数高联系节点,贸易关系的分布相对更为分散和平等,网络的连通性增强,网络“脆弱性”特性较弱。

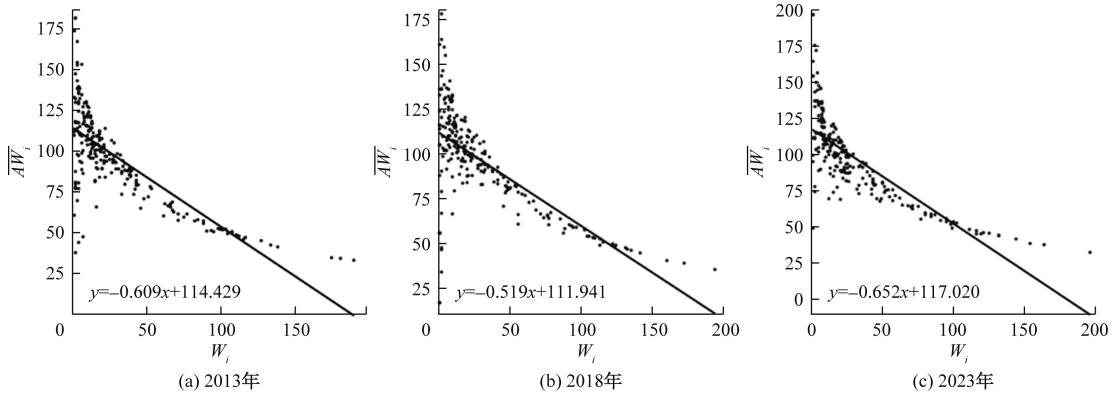
2.2.3　太阳能电池贸易网络匹配性

为深入剖析太阳能电池贸易网络中节点连接的异质性匹配规律随时间的变化程度,进一步借助式(5)构建并绘制了 2013 年、2018 年、2023 年的贸易网络度关联如图 3 所示。

一般而言,关联系数 b 的取值可以分为两种情况,当 $b<0$ 时,网络为负关联,即节点之间表现为异配性,倾向于属性不相近节点间连接较紧密;当 $b>0$ 时,网络为正关联,即节点之间表现为同配性,倾向于属性相近节点间连接较紧密。其中,b 的绝对值大小反映网络异配或同配的强弱程度;属性在此处指的是节点度。从太阳能电池网络关联系数来看,这三年的关联系数 b 皆小于 0,说明其贸易网络存在显著的异配性结构特征。2013—2018 年,全球太阳能电池贸易网络的异质性匹配趋势降低,网络连接更加多元化。随着全球光伏产业的不断发展,更多国家(地区)加入贸易网络,核心节点国家(地区)不仅局限于与边缘伙伴合作,转而向同层级或更高层级的节点联系,从而推动了贸易关系的多元化,削弱了原有的“核心-边缘”的强异配结构。2018—2023 年,负匹配性特征加强,表明贸易网络的层次结构再次固化,核心生产国家(地区)如中国、美国、德国、日本等具备技术及产能优势者为进一步巩固自身在全球贸易网络中的地位,通过规模化生产或贸易政策,加强与资源输入型、市场需求型边缘国家(地区)的联系,从而导致网络中“核心-边缘”匹配模式更加显著。

2.3　贸易网络的组团结构

通过社区发现算法对 2013 年、2018 年及 2023 年全球太阳能电池贸易网络进行组团分析,发现全球太阳能电池贸易网络组团整体上呈现“分散-集中-再分散”的趋势,核心逐步由欧美国家(地区)向中国转移。贸易组团的多样化和分散化对于提升



(a) 2013年　(b) 2018年　(c) 2023年

图 3　全球太阳能电池贸易网络度关联

整个网络的稳定性和韧性具有积极意义，多样化的组团结构能够增强网络的稳健性与抗干扰能力。

如图 4 所示，2013 年全球太阳能电池贸易网络中存在 3 个贸易组团，以德国、意大利等为核心的组团是太阳能电池贸易网络中的最大组团，组团内的国家（地区）数量占比最多为 62.78%；以中国、韩国、日本等为核心的组团内国家（地区）数量占比为 19.73%；以美国、加拿大、墨西哥等为核心的组团内国家（地区）数量占比为 17.49%。2013 年的贸易网络中社团数量相对较多，各国（地区）在网络中分布较为零散且核心社团的辐射范围有限。部分国家（地区）如中国、美国、日本等国家虽处于相对中心位置，但与周边关联国家（地区）形成的社团规模较小，区域化特征不显著。

2018 年全球太阳能电池贸易网络中存在 2 个贸易组团，以美国、马来西亚、新加坡等为核心的组团是贸易网络中最大组团，组团内的国家（地区）数量占比为 55.41%；以中国、日本为核心的组团内国家（地区）数量占比为 44.59%。2013 年社团数量相对于 2013 年减少，部分小规模社团合并，以中国、美国、欧洲主要国家（地区）为核心的社团规模扩大，且社团间的联系更加紧密，贸易合作逐步向核心国家集中。

2023 年全球太阳能电池贸易网络中存在 5 个贸易组团，以中国、瑞典、南非等为核心的组团是贸易网络中最大组团，组团内的国家（地区）数量占比为 56.74%；以德国、荷兰、法国等国家（地区）为核心的组团内国家（地区）数量占比为 26.51%；以美国、泰国、加拿大为核心的组团内国家（地区）数量占比为 11.16%。2023 年的社团结构更加复杂化，社团呈现更清晰的“核心-边缘”结构。中国所在的社团进一步扩张，成为覆盖亚洲、欧洲、非洲等部分国家（地区）的超大规模组团；同时，美国、欧洲国家的社团也保持稳定且与其他社团互动频繁；新兴区域如东南亚、中东国家组成的社团开始显现，贸易网络的多元化增强。

2.4　模拟冲击

通过模拟冲击方法分别对 2013 年、2018 年和 2023 年的全球太阳能电池网络进行节点和连边的移除，以此测度网络稳定性的变化。研究发现，网络中少数节点和连边对于网络的稳定性起到关键性作用，中国、德国、美国、法国、意大利、印度等国家（地区）节点的移除对于网络的破坏率长期在 20%以上，同样涉及这些核心国家（地区）连边的移除也通过级联效应破坏全局连通性，致使整个贸易网络的鲁棒性下降（图 5）。

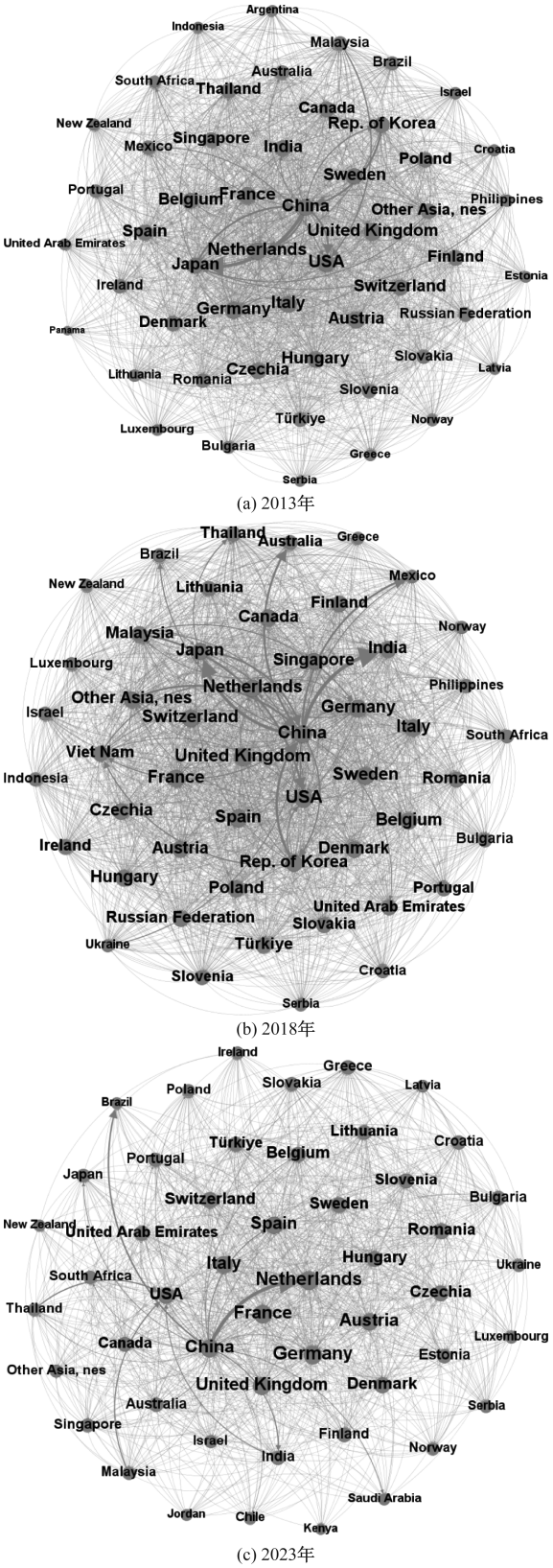


图 4　全球太阳能电池贸易网络社区组团

通过移除节点来看，全球太阳能电池贸易网络

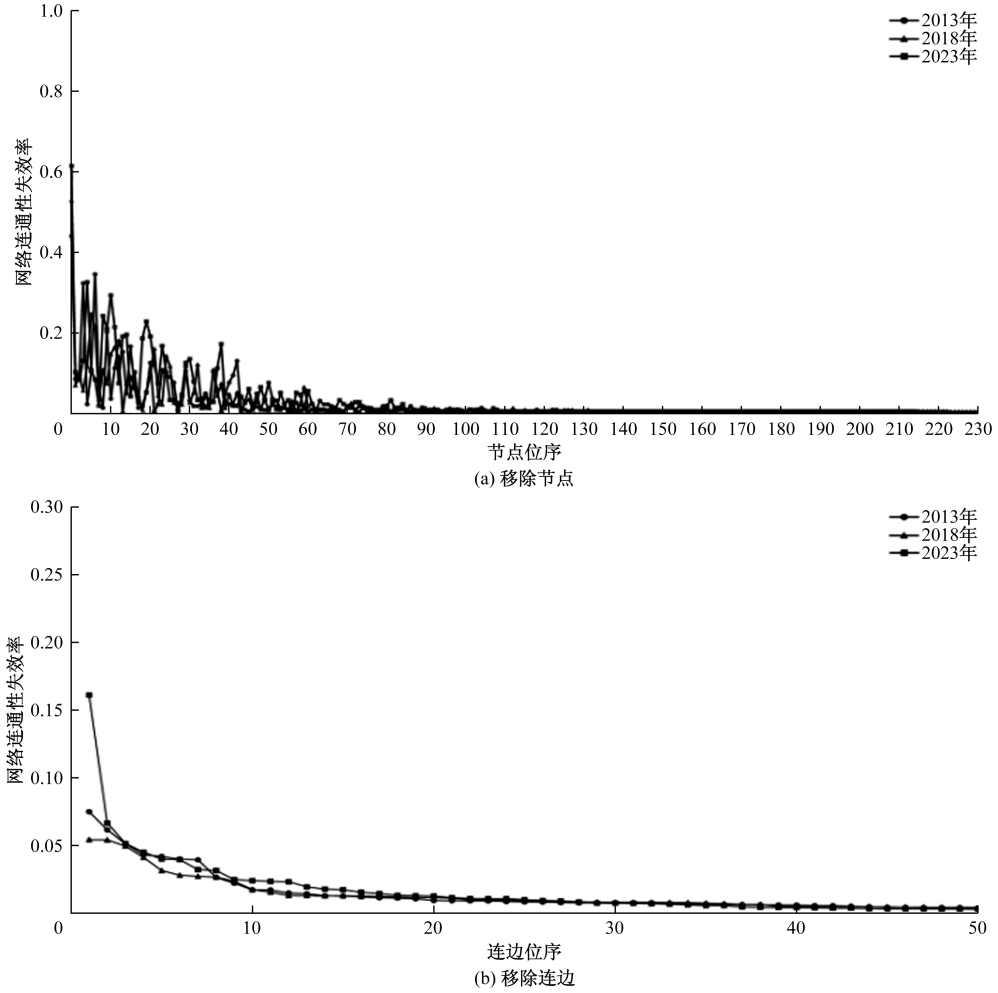


图 5　全球太阳能电池贸易网络动态评估

呈现明显的“核心-边缘”结构,根据节点加权出度排序,移除前十位对网络的损坏程度达到 100%。中国始终位居榜首且影响从 2013 年的 0.717 5 升至 2023 年的 0.804 7,表明中国在全球贸易网络中的核心地位持续加强;马来西亚、新加坡、泰国等东南亚国家(地区)在各年排名中均表现突出,如马来西亚在 2013 年和 2023 年对网络连通性的影响程度稳居前五,显示其作为区域贸易枢纽的重要性;美国的影响力从 2013 年的 0.470 9 降至 2023 年的 0.376 7,反映其全球贸易影响力的相对下降;德国、法国等欧洲国家(地区)波动较小,但仍保持了区域经济中心的地位。

通过移除连边来看,全球太阳能电池贸易网络呈现明显的极化特征,移除前 50 的连边后网络的连通性趋近于 0,头部连边的国家(地区)对网络连通性影响逐步增加,说明网络连通性对少数关键边的依赖度增加,单一连边失效可能引发更大范围的网络失稳。2013 年,主要以中国、日本、美国、德国等为核心,对排名第一的连边中国-日本进行移除后网络连通损失率达到 0.074 6,当年中国与东亚以及日本、韩国等贸易往来较为频繁。2018 年后,中美贸易战的爆发进一步推动了中国与东南亚以及拉美国家(地区)的贸易往来,当年中国-墨西哥、中国-巴西连边的移除对网络连通性的影响较大。2023 年中国-荷兰连边的突出地位,反映了欧洲在全球贸易中的核心地位及中国对欧洲市场的依赖。同时来西亚-美国、泰国-美国等贸易连边在 2023 年对整个贸易网络的影响程度上升,体现全球供应链的多元化趋势。

3　结论与建议

3.1　结论

本文以全球太阳能电池贸易为研究对象,构建 2013—2023 年长序列贸易网络,从多维度多指标刻画太阳能电池贸易的时空格局和拓扑结构,揭示其网络韧性演化趋势。研究结论如下。

(1)全球太阳能电池贸易格局在 2013—2023 年

经历了网络规模不断扩大、密度逐渐增加、联系日益密切的显著演变，贸易重心由早期较为分散，到后期向少数国家（地区）集中、再向外辐射的趋势。

（2）全球太阳能电池贸易网络中国家（地区）节点的异质性特点突出，呈现清晰的层级结构，中国、德国、美国、法国、日本、意大利等国家（地区）在贸易网络中具有强中心性，加剧了边缘节点对核心节点的依赖。同时由于核心节点枢纽作用的强化以及区域经济一体化的深化，使得区域间的要素流动更加通畅，打破了原有的路径僵化。

（3）全球太阳能电池贸易网络始终呈现“核心-边缘”结构，以亚洲、欧洲国家（地区）为核心的模块相对比较稳定。近年来随着东南亚、中东等国家（地区）组成的社团不断显现，国际贸易多元化增强。

（4）全球太阳能电池贸易网络的韧性水平呈下降状态，随着中国、美国、德国等核心节点中心化的不断增强，与之相关的核心连边对网络的连通性和稳健性也具有关键作用。主要原因，一是美欧借反倾销、碳关税等贸易壁垒推动产业链本土化，割裂全球分工；二是边缘国技术薄弱，难以替代核心节点供给，依赖核心连边导致网络替代路径匮乏。这种路径依赖放大了核心连边的影响，削弱了网络抗冲击冗余，加剧韧性下降。

3.2 建议

基于全球太阳能电池贸易网络韧性长时序动态特征的实证研究结果，提出以下建议。

（1）构建多元化的全球供应链体系。前文研究显示，全球太阳能电池贸易网络中，中国、日本、美国、德国等国家（地区）为主要核心。面对日益复杂的国际关系，国家（地区）间的冲突或贸易摩擦可能会导致全球太阳能电池贸易网络的供应链产生冲击。基于此，各国家（地区）积极推动供应链区域化与全球化布局相结合，形成多层次、多节点的供应链结构，避免单一地区的政治、经济风险。

（2）强化技术创新以维持在全球光伏产业链的核心地位。如前所示，即使是具有产业优势的欧美国家（地区），也会在技术更迭中被逐步超越。中国如果继续保持全球领先地位，进一步巩固上游优势，就必须加大对太阳能电池核心技术的研发投入，增强产品竞争力与技术壁垒，以加强太阳能电池产业链有效应对突然的外部环境变化与技术变革的挑战。

（3）加强区域化合作以提高抗风险能力。贸易保护主义政策、中美贸易摩擦等国际事件会对全球太阳能电池贸易网络造成冲击。因此，为避免此类事件致使中国太阳能电池贸易受损，应积极依托“一带一路”、金砖国家、亚太经济合作组织（APEC）等平台拓宽贸易渠道以确保贸易网络在面临冲击时能够快速恢复和调整，从而为全球绿色能源转型提供韧性支撑。

3.3 研究局限与未来方向

本文基于截面贸易数据与静态模拟方法，虽在一定程度上揭示了全球太阳能电池贸易网络的韧性演变特征，但仍存在以下不足：由于贸易数据的可得性，未能纳入贸易质量指标以丰富研究内容，对网络韧性的分析仅停留在数量层面比较片面；研究聚焦于单类产品的单层贸易网络，未考虑全产业链角度的多层贸易网络研究。未来可进一步挖掘数据，构建全方位的评估体系，并拓展至全产业链角度的多层网络研究，纳入更多有关联的附加类产品，以期更全面、系统地揭示全球太阳能电池贸易网络的韧性特征。

参考文献

[1] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable energy statistics 2024[EB/OL].[2025-11-01]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2023.pdf.

[2] 中国国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].[2025-11-01]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.

[3] 李连刚，张平宇，谭俊涛，等. 韧性概念演变与区域经济韧性研究进展[J]. 人文地理，2019，34(2)：1-7.

[4] HOLLING C. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics，1973(1)：1-23.

[5] 陈津怡，李铁柱，郭竞文，等. 相继故障下城市轨道交通系统韧性评估方法[J]. 中国安全科学学报，2024，34(9)：202-208.

[6] 刘春芳，倪博文，连虎刚，等. 干旱内陆河流域生态网络韧性演化及其提升策略——以石羊河流域为例[J]. 自然资源学报，2024，39(9)：2087-2101.

[7] 李博，曹盖. 基于涉海A股上市公司的中国沿海地区海洋经济网络结构韧性演化研究[J]. 地理科学进展，2022，41(6)：945-955.

[8] 焦兵. 能源安全视角下国际能源贸易网络韧性测度研究[J]. 工业技术经济，2024，43(5)：131-140.

[9] 沈曦，郭海湘，成金华. 突发风险下关键矿产供应链网络节点韧性评估：以镍矿产品为例[J]. 资源科学，2022，44(1)：85-96.

[10] 于娱，马代鹏，王贤梅. 国际铁矿资源全产业链产品的

贸易网络韧性[J]. 资源科学，2022，44(10)：2006-2021.
[11] 陈伟，王芯芮，龙燕，等. “一带一路”沿线地区贸易网络韧性研究[J]. 经济地理，2024，44(1)：22-31.
[12] 魏石梅，潘竟虎. 中国地级及以上城市网络结构韧性测度[J]. 地理学报，2021，76(6)：1394-1407.
[13] 左芝鲤，成金华，郭海湘，等. 锂产业链贸易网络结构韧性的演化与评估[J]. 中国人口·资源与环境，2024，34(2)：155-166.
[14] 丁嘉铖，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.
[15] 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.
[16] 齐玮，黎俊宏，李启昊. 全球光伏产业链贸易网络演化特征及影响因素[J]. 工业技术经济，2025，44(2)：150-160.
[17] 陈雨然，陈敏鹏. 全球磷产品贸易格局演变及中国磷安全[J]. 资源科学，2024，46(1)：85-99.
[18] 颜文涛，卢江林，李子豪，等. 城市街道网络的韧性测度与空间解析——五大全球城市比较研究[J]. 国际城市规划，2021，36(5)：1-12.

Research on the Network Resilience of Global Solar Cell Trade

LI Ting，DU Peng，RUAN Ziyun
(School of Geographical Sciences，Liaoning Normal University，Dalian 116029，China)

Abstract：By constructing a trade network using global photovoltaic cell export data from 2013 to 2023，the spatiotemporal patterns and topological structure of photovoltaic cell trade were characterized through structural resilience and dynamic processes，revealing its network resilience evolution trends. The findings indicate the global photovoltaic cell trade has expanded in scale and density，with increasingly interconnected national (regional) links，and the trade center has shifted from dispersion to concentration in major countries before radiating outward. Network node heterogeneity is pronounced，with China，Germany and others serving as core nodes. The network consistently exhibits a “core-periphery” structure，where Asian and European countries maintain relatively stable core modules，while Southeast Asian and Middle Eastern clusters emerge to drive diversification. The network resilience level shows a declining trend，where the centralization of core nodes such as China，the U. S. ，and Germany plays a pivotal role in maintaining network connectivity and robustness.

Keywords：solar cells；trade networks；network resilience；dynamic assessment