

# 复杂网络视角下区域产业集群向产业高地演化机制及协同分析

## ——以青海海南州太阳能生态发电园区为例

霍宇龙, 文艳艳\*

青海民族大学经济与管理学院, 青海 西宁

收稿日期: 2024年9月23日; 录用日期: 2024年10月25日; 发布日期: 2024年11月13日

### 摘要

本文从复杂网络视角出发, 研究了区域产业集群向产业高地演化的机制及协同效应。文章首先梳理了产业集群和产业高地的概念及演化关系, 指出了产业集群向产业高地演化的机制及协同效应的研究尚不充分。接着, 构建了复杂网络模型, 以无标度网络为载体, 运用仿真技术探讨了企业间协同效应及其影响因素。最后, 以青海清洁能源产业为例进行了实证分析, 分别从时间和空间两方面探讨了清洁能源产业合作网络的演化机制, 并通过整合进一步揭示了该产业向产业高地演化机制背后的协同效应。整体而言, 本文从复杂网络角度揭示了产业集群向产业高地演化的内在规律, 为促进区域经济高质量发展提供了理论依据。

### 关键词

清洁能源产业, 复杂网络, 产业集群, 产业高地, 演化机制, 协同效应

# Evolution Mechanism and Synergy Analysis of Regional Industrial Clusters to Industrial Highlands from the Perspective of Complex Networks

## —A Case Study of Solar Energy Ecological Power Generation Park in Hainan Prefecture, Qinghai

Yulong Huo, Yanyan Wen\*

School of Economics and Management, Qinghai Minzu University, Xining Qinghai

\*通讯作者。

文章引用: 霍宇龙, 文艳艳. 复杂网络视角下区域产业集群向产业高地演化机制及协同分析[J]. 可持续发展, 2024, 14(11): 2636-2648. DOI: 10.12677/sd.2024.1411297

## Abstract

This paper studies the mechanism and synergistic effect of evolution from regional industrial clusters to industrial highlands from the perspective of complex networks. It first reviews the concepts and evolutionary relationships of industrial clusters and industrial highlands, highlighting the insufficient research on the mechanism and synergistic effect of evolution. Then, a complex network model is constructed, using scale-free networks as a framework and employing simulation technology to explore the synergistic effect among firms and their influencing factors. Finally, an empirical analysis is conducted using the clean energy industry in Qinghai as a case study, examining the evolutionary mechanisms of the clean energy industry cooperation network from both temporal and spatial dimensions, and further revealing the synergistic effect behind the evolution mechanism of this industry to the industrial highland through integration. Overall, this paper uncovers the intrinsic laws of the evolution from industrial clusters to industrial highlands from a complex network perspective, providing a theoretical basis for promoting the high-quality development of regional economies.

## Keywords

Clean Energy Industry, Complex Network, Industrial Cluster, Industrial Highland, Evolution Mechanism, Synergy Effect

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2021年6月9日,习总书记在青海调研时指出,“青海要坚持绿色低碳发展,结合实际、扬长避短,走出一条具有地方特色的高质量发展之路。要立足高原特有资源禀赋,积极培育新兴产业,打造国家清洁能源产业高地”。打造国家清洁能源产业高地,是总书记亲自为青海省高质量发展擘画的蓝图,也是青海省构建绿色低碳循环发展经济体系的重要路径。基于“双碳”目标的清洁能源产业组织演变过程,其实就是在双碳的背景下,清洁能源产业内企业之间的组织或市场关系的变化过程,实现清洁能源产业组织系统从简单到复杂、从无序到有序、从低级到高级的反复转化的自组织过程。清洁能源产业是我国实现双碳目标的排头兵,也是打造绿色低碳循环发展经济体系的顶梁柱,该产业组织系统中的子系统之间的协同发展程度高低,对于我国经济的发展以及其他产业的发展起着战略基础作用和先进生产力的支撑作用。虽然产业集群和产业高地之间存在着密切的联系,但关于它们之间如何相互转化以及其内在演化机制的研究仍然相对匮乏。本文旨在从复杂网络视角出发,研究区域产业集群向产业高地演化的机制及协同效应。首先,梳理产业集群和产业高地的概念及演化关系,并指出已有研究的不足。接着,构建复杂网络模型,探讨企业间协同效应及其影响因素。最后,以青海清洁能源产业为例进行实证分析,揭示产业演化机制和协同效应。

## 2. 文献综述

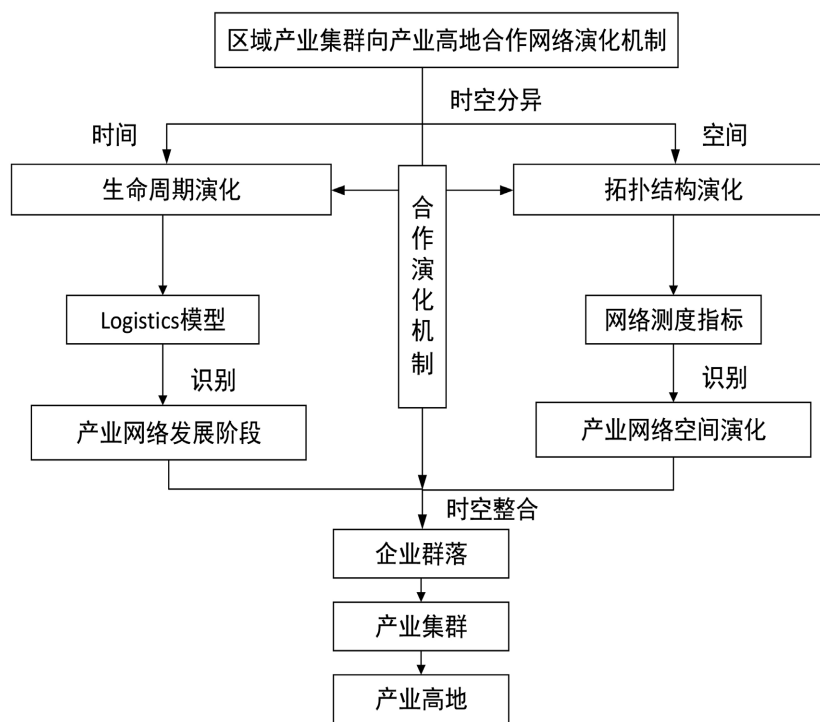
产业集群的概念最早于上世纪80年代由美国战略管理学家波特提出,是指在某一特定领域中,大量产业联系密切的企业以及相关支撑机构在空间中集聚,并形成了强劲、持续的竞争优势的现象[1]。产业

集群通常以一个主导产业为核心, 具有共同信息、共同学习、共同观察、共同购买、共同生产等优势, 有利于降低综合成本, 提高运行效率, 形成规模经济和范围经济。许多研究表明, 产业集群本质上是一个动态、竞争、演化、博弈的复杂网络系统[2]-[4]。

“产业高地”这个概念是伴随着经济全球化、产业集聚和区域经济发展等现象逐渐形成的术语。这一概念体现了在特定地区形成的产业集聚效应和竞争优势, 是经济地理学和产业经济学领域的一个重要概念。在实践中, 产业高地的概念最早可能出现在对产业集群和区域经济优势的研究中。随着经济的发展和产业结构的调整, 这一概念逐渐被政府官员、经济学家和产业专家所接受和应用, 用于描述那些在特定产业领域内具有显著竞争优势、高度集成的产业链和强大影响力的地区。关于产业高地的定义, 学者们并没有给出一个明确的解释, 只是从不同角度对产业集群成熟阶段的内涵和特征进行了探讨, 张明之等(2017)认为, 产业集群的成熟阶段具有独特的优势, 是在国际国内同类地区竞争中取胜的关键区域[5]。冯奎(2009)在研究中指出, 产业集群的成熟阶段通常具备良好的产业发展条件、高水平的产业集聚度和强劲的产业态势[6]。顾强(2005)强调了产业集群的成熟阶段应具有技术创新能力和市场竞争力, 同时能够实现产业的可持续发展[7]。蔡绍洪等(2007)将创新网络视为产业集群发展的成熟阶段, 认为它是基于产业集群的自组织过程中逐渐形成的。创新网络的显著特点包括行为主体在空间、行业和社会层面的紧密联系, 以及竞争合作和互动创新的有序性, 代表了地域性集聚经济发展的更高形态[4]。在本文中, 我们将产业集群的成熟阶段统一命名为“产业高地”, 并综合了学者们的研究成果, 对产业高地进行了如下定义: 产业高地是指在特定区域内高度集中的某一行业竞争性企业和与之相关的合作企业。这些企业既竞争又合作, 具有紧密的地理位置集中性, 具有更高的专业化分工水平, 更明显的集群式创新, 以及更加细密、分工明确的产业链。产业高地能够优化组合区域内相关产业, 充分发挥聚集效应, 产生更强的产业竞争优势, 创造更多社会财富, 并且具有更强的吸引战略资源、营造发展环境的能力, 是体制机制更新、具有发展先机的产业集聚地。

通过对产业集群和产业高地的文献梳理不难发现, 产业集群是产业高地的初级阶段, 产业高地是产业集群的终极形态。据此, 本文进一步剖析具体的网络演化机理, 如图1所示。产业集群本身所具备的协同、有序、高效、稳定的特征和对区域经济的强关联、强辐射、强带动功能通过不断的竞争与合作达到更高层次的协同, 从而使整个集群进入一个更加高效有序的自组织状态, 最终实现真正意义上的产业高地。但并非所有的产业集群都能够发展成为产业高地, 如广东江门小冈香虽然形成了一定规模的产业集群, 但由于缺乏企业间的竞争与合作, 导致没有产生更高层次的协同效应, 难以继续发展[8]。因此, 对产业集群向产业高地演化机理的深入探讨和研究具有特别重要的意义。除此之外, 许多学者对产业集群生命周期演化进行了有益的探索, 为本文研究提供了理论基础。蔡绍洪等(2007)指出, 区域产业集群的形成和演进包括企业聚集、企业群落、产业集群、创新网络等阶段[4]。刘国巍等(2020)研究发现, 战略性新兴产业合作网络随着协同关系的增强, 经历了形成、成长和成熟三个阶段, 这些阶段分别表现为分散、局部紧密和高度连接的网络结构[2]。黄由衡等(2013)利用企业数量作为指标, 构建了 Logistic 模型, 将长沙大托钢铁物流产业集群的发展阶段划分为初长期、成长期、成熟期和衰退期, 并对其未来发展趋势进行了预测[9]。然而, 已有文献在研究内容上鲜有考虑产业集群向产业高地演化的机制及协同效应, 研究方法上缺少运用以复杂网络视角对企业间协同效应进行的研究, 使得对于清洁能源产业演变的研究缺乏完整性与系统性。

鉴于此, 本文从复杂网络视角研究区域产业集群向产业高地演化的机制及协同问题, 构建复杂网络模型来描述主体之间的合作演化机制并分析其协同性, 基于网络演化规则, 以无标度网络为研究载体, 运用仿真技术探讨企业间的协同效应及其影响因素, 最后对青海清洁能源产业的演化过程进行实证分析。



**Figure 1.** Evolutionary mechanism of the clean energy industry cooperation network from the perspective of complex networks

**图 1.** 复杂网络视角下清洁能源产业合作网络演化机理

### 3. 研究方法

协同理论(synergetics)亦称“协同学”，是研究复杂系统的子系统间的协同作用，使得复杂系统在宏观上呈有序状态，形成具有一定功能的自组织结构的学科。管理领域常使用“1+1>2”描述不同子系统间的协同效果，寓意多子系统合作、协调会使系统整体收益增大。清洁能源产业是一种复杂网络系统，通过企业间的协同发展推动清洁能源产业由企业群落-产业集群-产业高地这一过程演化。

清洁能源产业各个阶段的合作网络有效表征了每个阶段组织的具体形态，清洁能源产业合作网络的协同随合作网络演化而发生变化，且合作网络的演化具有明显的自组织机制。本文以企业注册时间及网络规模为依据，通过设立相关模型将清洁能源产业合作网络演化划分为三个阶段，并通过网络密度和网络特征来测量各阶段的协同度，以揭示清洁能源产业集群向产业高地演化的态势。

在相关研究方法的基础上，本文借鉴了刘国巍、邵云飞的“构型-演化-协同”思路进一步构建研究所需的整合模型，基于复杂网络特征、规模和密度测度结构演化、周期演化和协同态势。

#### 3.1. 清洁能源产业合作网络构型

BA 网络可以描述现实生活中的很多真实网络，其节点增长和优先连接的特性符合产业集群网络演化的规律[10]。因此，本文基于 BA 网络模型构建了清洁能源产业合作网络演化模型，具体的清洁能源产业合作网络结构如图 2 所示，模型的具体算法如下：

1) 设清洁能源产业合作网络  $G=(M,N)$  有  $M$  个节点、 $N$  条边，给一个具有  $m_0$  个节点  $n_0$  条边的初始网络。

2) 在以后的每一个时间间隔中，新增一个度为  $m$  的点( $m \leq m_0$ )，并将这  $m$  条边连接到网络中已经存在的  $m_0$  个不同的节点上。



3) 当在网络中选择节点与新增节点连接时，假定被选择的节点  $v$  与新节点连接的概率  $\prod(k_v)$  和节点  $v$  的度成正比，即  $\prod(k_v) = k_v / \sum k_j$ 。经过  $t$  个时间间隔后，便会形成一个有  $N = m_0 + t$  个节点、 $mt$  条边的网络。该网络最终演化成标度不变状态，即节点具有度  $k$  的概率服从度指数  $\gamma = 3$  的幂律分布。

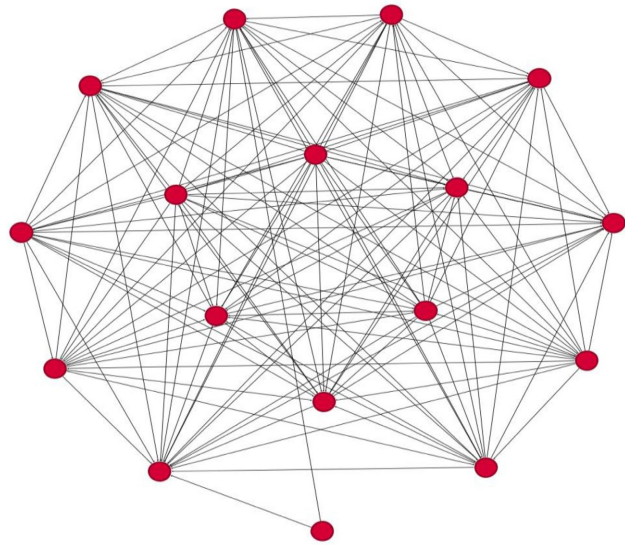


Figure 2. Configuration of the clean energy industry cooperation network  
图 2. 清洁能源产业合作网络构型

3.2. 网络拓扑结构演化模型

网络拓扑结构是产业合作网络骨架，许多学者将网络规模、密度、中心度、平均距离等作为测度网络拓扑结构的计量指标[2] [11]-[13] (刘国巍和邵云飞，2020；孙国强和高广阔，2022；曹霞和张路蓬，2016；吕国庆等，2014)，本文在结合一般产业集群发展阶段划分的判断指标的基础上[14] (池仁勇等，2005)，选取网络规模、聚类系数、网络密度、平均路径长度和度中心性作为网络演化态势分析的计量指标，进一步整理后得到如表 1 所示的网络拓扑结构测度指标体系。

Table 1. Topological structure measurement indicator system of the clean energy industry cooperation network  
表 1. 清洁能源产业合作网络拓扑结构测度指标体系

名称	测度公式
网络规模	节点数 $M = \text{sum}(K)$ 且 $K$ 为 $G$ 的点集 边数 $N = \text{sum}(E)$ 且 $E$ 为 $G$ 的边集
聚类系数	局部聚类系数: $C_i = 2N_i / (M_i(M_i - 1))$ 全局聚类系数: $C = (1/M) \sum_{i=1} C_i$
网络密度	$\sigma = (2N / M(M - 1))$
平均路径长度	$L = 1 / C_n^2 \sum_{1 \leq i < j \leq N} d(M_i, M_j)$ $d(M_i, M_j)$ = 从节点 $M_i$ 到节点 $M_j$ 最短路径长度
度中心性	$C_D(M_i) = d(M_i) / (M - 1)$ $d(M_i)$ 是节点 $M_i$ 的度，即与节点 $M_i$ 直接相连的其他节点的数量

表 1 的网络规模表示网络中节点和边的数量, 也就是网络中个体或者元素的总量和网络中节点之间连接的总数。在复杂网络理论中, 网络规模的大小直接影响网络的性质和功能。聚类系数可以衡量网络中节点的局部聚集程度, 它是通过计算节点邻居之间连接的数量与可能的最大连接数之间的比值来衡量的。网络密度衡量的是网络中实际存在的边数与可能存在的最大边数之间的比值, 它反映了网络的紧密程度。网络密度越大, 表明清洁能源产业的企业关系紧密, 协同程度较高[11]。平均路径长度可以衡量网络中信息或物质传递的效率, 通过计算所有节点对之间的最短路径长度来得到。度中心性衡量的是一个节点在网络中的连接数量, 即节点的度。节点的度中心性越高, 它对网络协同性的贡献可能就越大[13]。

### 3.3. 网络生命周期演化模型

有学者认为, 网络规模是解释网络进化的核心变量, 符合组织生命周期的“曲线”特征[15](刘国巍和曹霞, 2018), 且节点数量越多、边数越稠密, 则网络规模越大, 合作越密集、资源越丰富[16](张路蓬等, 2018), 越有利于产、学、研等创新主体共享知识, 建立互惠机制, 产生协同效应。不同网络规模对网络绩效影响较大, 故本文认为网络规模可以作为清洁能源产业合作网络生命周期演化的刻度指标。

逻辑斯蒂(Logistic)模型是基于种群规模而构建的识别生命周期阶段的模型[9](黄由衡和段丽丽, 2013), 且已有研究证明, Logistic 曲线增长过程通过导数划分为渐增期  $t_1 = 0 \sim (\ln a - 1.317)/b$ 、快增期  $t_2 = (\ln a - 1.317)/b \sim (\ln a + 1.317)/b$ 、缓增期  $t_3 = ((\ln a + 1.317)/b) \sim \infty$  (崔党群, 2005)[17], 符合本文基于网络规模划分生命周期阶段的基本思路, 具有较高的适用性。因此, 本文采用基于网络规模的 Logistic 增长模型划分、识别产业链创新视角下战略性新兴产业合作网络生命周期演化阶段。具体模型如下: 设 Logistic 增长曲线的方程为  $Y = k/(1 + a \times \exp(-b \cdot t))$ , 式中  $Y$  为网络规模,  $t$  为时间,  $a$  和  $b$  为回归参数,  $k$  为常量。为了确定 Logistic 增长方程, 首先基于历史数据拟合确定参数  $k$ 、 $a$ 、 $b$ , 然后通过计算得出各阶段的时间节点, 最后以历史数据的起始时间设为基期划分出网络演化全周期。

## 4. 实证分析: 以青海清洁能源产业为例

青海将资源优势转化为产业优势, 不断培育壮大新能源产业, 新能源产业从无到有, 从小到大, 从电站建设到产业发展, 成为世界大规模并网光伏电站最集中的地区, 进而形成规模优势。目前清洁能源发展处于全国领先地位。青海海南州太阳能生态发电园区位于共和县塔拉滩, 也称“塔拉滩光伏发电园区”, 是中国首个千万千瓦级太阳能生态发电园, 规划面积 609.6 平方公里, 装机容量达 1864 万千瓦, 是目前全球一次性投入最大、单体容量最大、集中发电规模最大的光伏电站群[18]-[20]。由于寻找青海清洁能源产业的企业数据较为困难, 本文以青海海南州太阳能生态发电园区内现存可查的 152 家企业为研究样本, 运用复杂网络方法对青海清洁能源产业集群向产业高地演化的机制及协同效应进行实证分析。

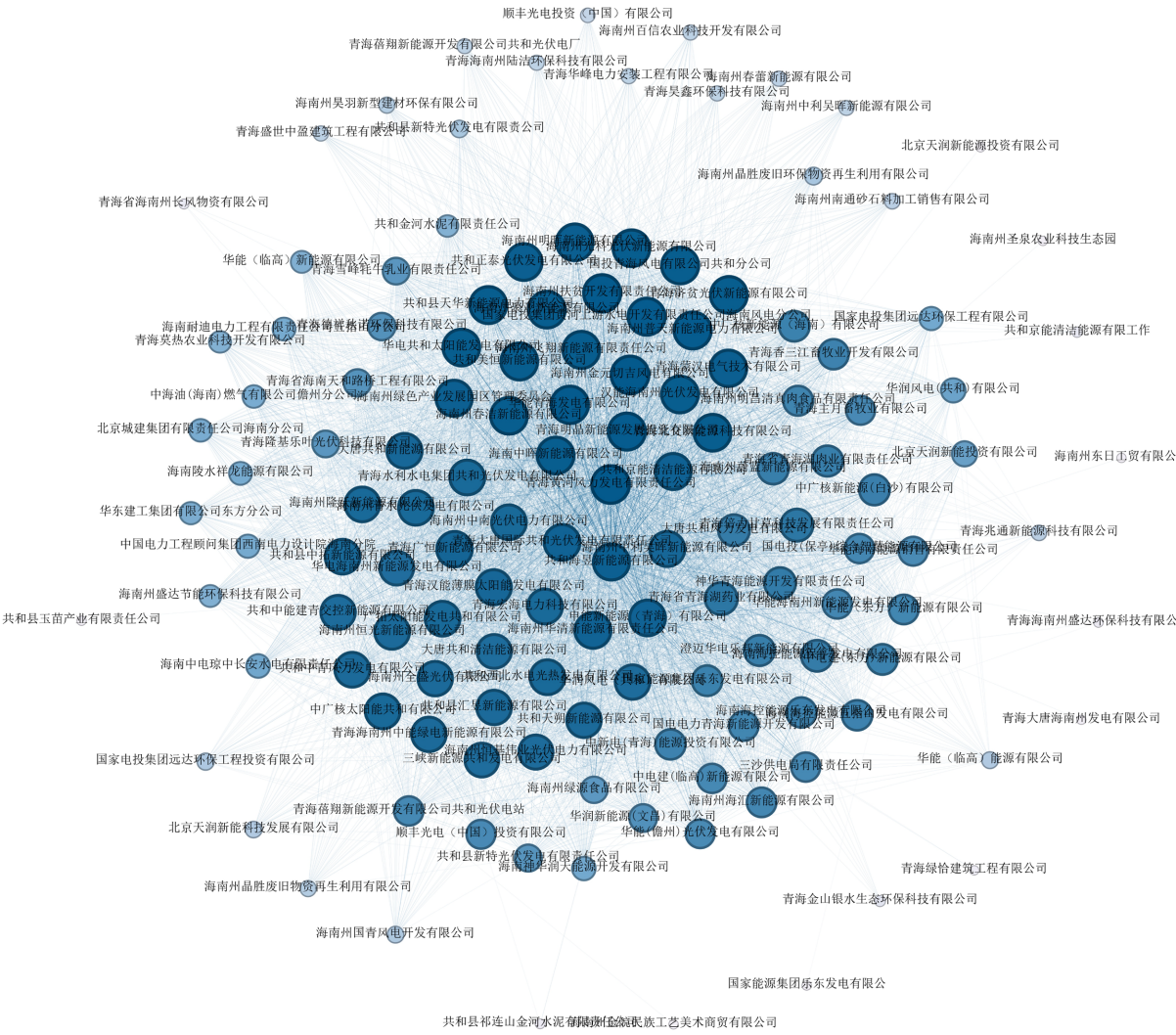
### 4.1. 清洁能源产业合作网络关系分析

基于复杂网络模型, 本研究以青海海南州太阳能生态发电园区内 152 家企业为节点, 并利用企查查、天眼查和同花顺等软件搜集的企业间关系数据作为边, 运用 Gephi 工具绘制了清洁能源产业合作网络关系图。图 3 显示了 2023 年该园区企业的合作情况。

从个体层面来看, 网络中的节点由清洁能源类(光伏、水电、风电)企业、科技类企业、环保类企业、生物制药类企业、农牧业类企业、建筑类企业等组成, 网络的边则由它们之间的合作关系构成。分析表明, 清洁能源类企业的节点较大, 表明这些企业与更多其他企业建立了合作关系, 其合作程度相对较高。

从网络整体层面来看, 可以发现清洁能源类企业处于网络的中心构成了网络的主体, 显示出显著的社群结构。相比之下, 生物制药和农牧业类企业多数位于网络的边缘地带, 与之相连的边数量较少, 说明这些企业与其他企业建立的合作较少, 合作程度相对较低。

综上所述, 该网络图通过可视化手段有效地展现了清洁能源产业的复杂网络系统, 清晰地揭示了清洁能源产业的网络特征。主要表现在以下几个方面: 1) 清洁能源类企业作为网络的中心节点, 构成了网络的主体, 充分表明它们在整个网络中的重要地位和影响力, 同时也是连接不同行业和领域的枢纽。2) 网络中显著的社群结构充分体现了清洁能源产业内部的紧密合作和专业化分工, 且这些社群都是基于技术、市场或地理因素形成的。3) 清洁能源类企业与科技、环保等其他行业的企业之间建立了广泛合作关系, 从侧面反映出清洁能源产业的跨行业整合能力和协同能力。



**Figure 3.** Enterprise collaboration relationship map of the solar ecological power generation park in Hainan Prefecture, Qinghai Province

**图 3.** 青海海南州太阳能生态发电园区企业合作关系图

4.2. 清洁能源产业网络演化分析

4.2.1. 网络拓扑结构分析

拓扑结构是合作网络的骨架, 分析拓扑结构演化有利于明晰网络发展态势。基于表 1 所示的网络拓扑结构测度公式, 得到如表 2 所示的具体网络拓扑结构数据。



**Table 2.** Network topological structure measurement**表 2.** 网络拓扑结构测度

演化阶段	变量	网络规模		网络密度	网络特征		
		节点数	相连边数		聚类系数	平均路径长度	度中心性
2010~2015		88	1781	0.465	0.821	1.575	67
2016~2019		121	3350	0.461	0.853	1.586	92
2020~2023		152	5278	0.452	0.853	1.604	117

由表 2 可知, 2010~2023 年清洁能源产业合作网络的网络规模、聚类系数和度中心性等网络特征都在不断增长, 表明青海清洁能源产业不断有新企业加入, 建立新的合作关系, 产业规模在不断扩大。此外, 节点间相互连接越来越紧密, 且节点的重要性也越来越高, 表现出明显的社群结构和高协同的特征。而网络密度却呈下降趋势, 这可以从两个主要方面进行解释: 首先, 在网络演化的过程中, 网络外部新增的企业数量并不显著, 这意味着在演化过程中, 许多合作效用较低的弱联结关系的外部企业被淘汰, 直接拉长了平均路径长度。其次, 新增的节点大多属于清洁能源类企业, 而这些企业之间的关系强化主要发生在该类企业内部。正是由于外部企业的淘汰以及内部企业的增长, 导致了网络密度的降低。

综合以上分析结果我们发现: 合作网络演化的可视化结果和网络规模、网络密度和网络特征的测度结果呈现出了高度的一致性, 即清洁能源产业在近 10 年内发生的变化都可以用合作网络的演化来解释。此外, 这种一致性也为我们对清洁能源产业演化阶段的划分提供了有力的验证, 进一步确保了分析的合理性。

#### 4.2.2. 网络周期演化分析

网络规模、时间是逻辑斯蒂(Logistic)模型的因、自变量。为了满足逻辑斯蒂模型的要求, 本文加入了与海南州太阳能生态发电园区内光伏企业密切合作的西宁经济技术开发区内清洁能源部分企业, 将清洁能源整体网络规模(节点)截面数据扩充到 2000~2023 年, 具体数据如表 3 所示。

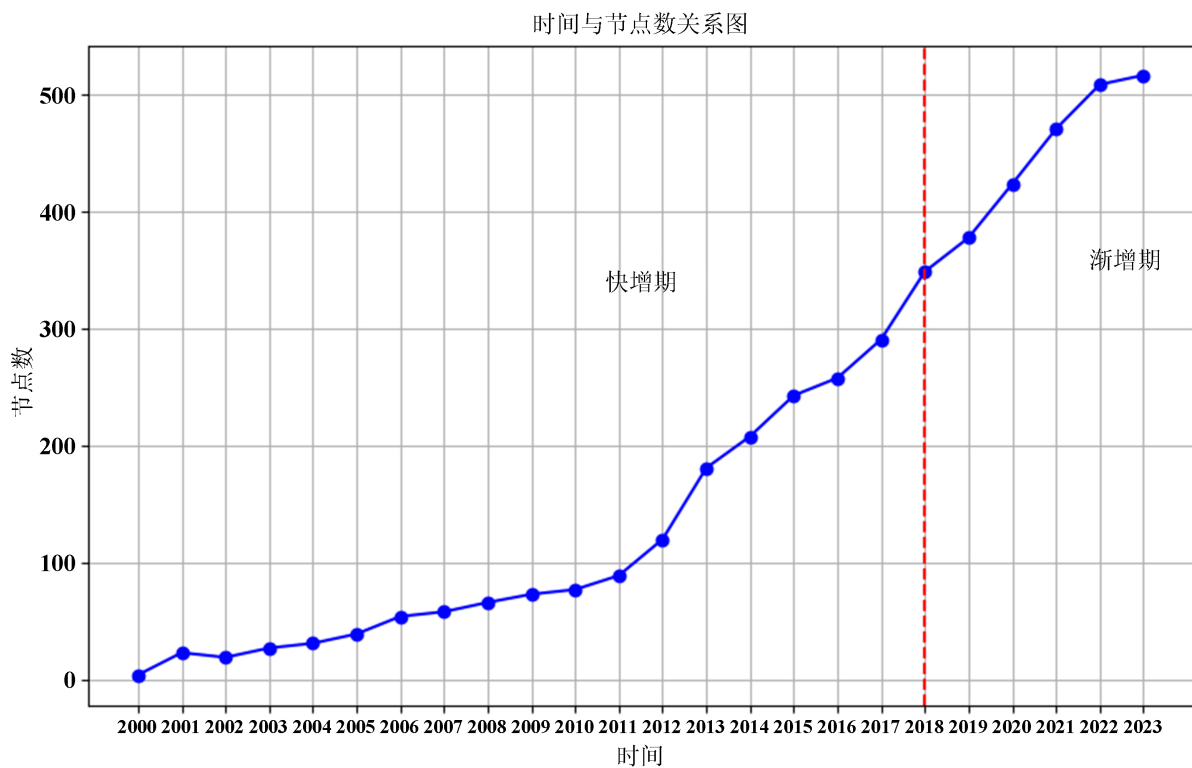
本文设定  $y$  (网络规模) 为因变量,  $t$  为自变量, 运用 SPSS 软件估计得到模型参数常数  $k = 1.396$ ,  $a = 99.197$ ,  $b = 5.616$ , 据此得到网络规模(节点) Logistic 增长曲线, 且统计显示该曲线通过了拟合和显著性检验(R 方为 0.996, Sig < 0.001), 然后分别计算渐增期  $t_1 = 0 \sim (\ln a - 1.317)/b$ 、快增期  $t_2 = (\ln a - 1.317)/b \sim (\ln a + 1.317)/b$ 、缓增期  $t_3 = ((\ln a + 1.317)/b) \sim \infty$ , 得到渐增期  $t_1$  为 2000~2018 年、快增期  $t_2$  为 2018~2019 年, 缓增期  $t_3$  为 2019 年及以后。由于快增期的时间跨度较短, 划分快增期和缓增期缺乏说服力。故本文认为 2018 年以后为快增期, 缓增期有待未来进一步识别。具体演化趋势如图 4 所示。

**Table 3.** Number of nodes for Qinghai clean energy enterprises in each period**表 3.** 青海清洁能源企业各时期节点数

时间	节点数
2000	4
2001	23
2002	19
2003	27
2004	31
2005	39

续表

2006	54
2007	58
2008	66
2009	73
2010	77
2011	89
2012	120
2013	181
2014	208
2015	243
2016	258
2017	291
2018	349
2019	378
2020	424
2021	471
2022	509
2023	517



**Figure 4.** Evolutionary stages of the Qinghai clean energy industry cooperation network cycle  
**图 4.** 青海清洁能源产业合作网络周期演化阶段



由图 4 可知, 从 1999~2023 年清洁能源产业企业总体上持续增长, 但期间增长幅度存在显著差异。1999~2018 年为清洁能源产业的渐增期, 这一时期清洁能源产业的企业增长率持上升状态, 期间虽有短暂波动, 但由产品生命周期算法可知, 增长率达到目标却不稳定的状态处于形成初期, 故可划分为渐增期。结果显示, 2018~2019 年是清洁能源产业的快增期, 造成这一时期只有一年的原因可能受到时间滞后性的影响, 即时间跨度太短和企业样本不完整, 但是这从侧面反映出清洁能源产业目前仍可能处于快增期的阶段, 具体表现为自 2018 年以后清洁能源产业企业始终保持着高增长率。据此, 本文统一将 2018 年之后的阶段划分为快增期。至于何时步入清洁能源产业的缓增期, 由于时间滞后性和后续样本的缺失, 需要在未来的研究中继续扩大数据截面来探讨分析。

总体而言, 清洁能源产业合作网络结构演化与周期演化保持着高度一致性, 这一发现不仅验证了清洁能源产业合作网络的演化态势, 同时也有效支持了清洁能源产业演化阶段的划分。

#### 4.2.3. 清洁能源产业合作网络演化路径

为了能更清楚地揭示清洁能源产业集群向产业高地演化的机制, 本文基于清洁能源产业网络结构演化和网络周期演化的分析, 并结合青海清洁能源产业实际情况进一步归纳出清洁能源产业合作网络演化路径。图 5 展示了这三个阶段的网络演化示意图。

##### 1) 合作网络渐增期——企业群落阶段

企业群落是指具有分工性质的企业为了完成某种产品的生产在特定的区域中集聚而形成的群体, 是同类或相关企业在地理空间上的集聚现象。企业群落的形成起源于自然资源或区位优势, 是企业为追求规模经济和范围经济在特定区域的大量集聚[4]。青海地区凭借其得天独厚的清洁能源资源和独特的地理位置优势, 在产业生态位上占据了稳固的地位。这种优越的产业生态条件吸引了众多清洁能源企业入驻青海, 而多数新增企业都为青海本土企业, 而图 4 渐增期内合作网络规模的扩大充分反映了这一增长趋势。表 2 和图 4 的数据分析也进一步证实了渐增期即为清洁能源产业合作网络的企业群落阶段。在这个阶段, 尽管网络规模已初步形成, 但企业之间的联系并不紧密(网络密度), 合作效率相对较低(平均路径长度), 未能显著形成产业集群的协同效应(度中心性)。此外, 初生的企业群落中, 各子系统之间存在着竞争关系, 导致其运行状态表现出较大的随机性, 这一特点与图 4 中渐增期曲线的波动趋势相符, 从而进一步验证了渐增期即为企业群落阶段的假设。

##### 2) 合作网络快增期——产业集群阶段

在企业群落内部, 子系统之间的竞争关系同时也催生了合作的可能性。在竞争与合作相互作用的过程中, 企业群落有望通过产生协同逐步实现自组织, 并进入更为高效有序的发展阶段, 即进入产业集群阶段[4]。产业集群与企业群落相比最明显的特征就是系统化和有序化, 主要表现为集群内部存在竞争协同、合作创新, 具有较强的创新优势和区域竞争优势。通过对图 5 和表 2 的数据分析, 我们可以观察到在清洁能源产业合作网络的快增期内, 网络规模较渐增期有显著扩张。这一时期, 以清洁能源企业为中心的社群结构逐渐成型, 产业内部的合作日益紧密, 专业化分工日益明确, 清洁能源产业正不断趋于系统化和有序化, 这是产业集群形成与发展的重要标志。同时, 快增期中清洁能源产业合作网络中的外部节点与其相连边也明显增加, 表明清洁能源企业与科技、环保等行业建立了广泛的合作关系, 形成了明显的上下游产业链结构, 反映了清洁能源产业在跨行业整合和协同方面的强大能力。据此, 我们可以推断清洁能源产业的快增期即为产业集群阶段。

##### 3) 合作网络缓增期——产业高地阶段

由于样本和时间的局限性, 本文划分出的清洁能源产业合作网络周期演化阶段必然与实际情况存在误差, 但总的来说, 对于识别产业高地阶段仍具有参考价值。由前文对产业高地的阐述可知, 产业高地并不像产业集群阶段那样持续经历快速增长, 其最根本的区别在于它展现出高度的协同性和可持续性。

这主要体现为更高的专业化分工水平、更明显的集群式创新，以及更加细密、分工明确的产业链。此外，产业高地还具有更强的吸引战略资源、营造发展环境的能力，是体制机制更新、具有发展先机的产业集聚地。根据前文的数据分析，我们知道在清洁能源产业合作网络的缓增期，尽管网络规模仍在持续扩大，但其增长速度相较于快增期有所减缓，这与产业高地阶段“缓”增长的特征相吻合。同时，社群结构相较于产业集群阶段并未出现显著变化，平均路径长度和度中心性仍继续增长，体现了清洁能源产业这一时期更高水平的专业化分工和产业链延长后更细密、分工明确的特征。结合现实情况来看，青海省政府和国家能源局于 2021 年联合发表了《青海打造国家清洁能源产业高地行动方案(2021~2030 年)》，其中特别强调了清洁能源产业要立足青海、面向西北、放眼全国，发挥青海清洁能源资源优势，提升清洁能源产品辐射力，增强清洁能源产业带动力，扩大清洁能源人才影响力[20]。此外，在北京举行的青海绿色算力产业推介会上，强调了青海的建设绿色算力基地的独特优势就是有充足的清洁能源。从壮丽的昆仑山脉到龙羊峡水电站，从广阔的光伏发电场到绵延数千公里的风力发电设施，青海的能源资源丰富多样，作为国家清洁能源示范省，青海正集中力量打造国家清洁能源产业的高地。

以上这些现实都充分体现了产业高地的特性，即它吸引战略资源、营造发展环境的能力，以及作为体制机制创新的前沿和具有发展先机的产业集聚地的地位。基于上述分析，我们有理由认为清洁能源产业合作网络的缓增期实际上标志着产业高地阶段的到来。

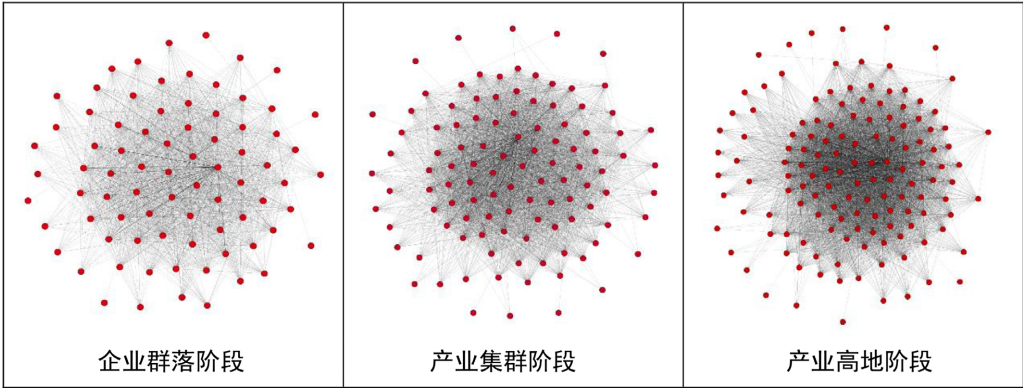


Figure 5. Evolutionary path diagram of the clean energy industry network  
图 5. 清洁能源产业网络演化路径图

## 5. 结论与启示

### 5.1. 研究结论

本文从复杂网络视角分析了产业集群向产业高地演化的机制及协同性，并构建了网络模型，探讨了企业间的协同效应及其影响因素。为了量化清洁能源产业合作网络的拓扑结构演化，本文引入了网络规模、聚类系数和网络特征作为衡量指标。利用 Logistic 模型，本文识别并分析了清洁能源产业合作网络的周期性演化阶段，并在此基础上进一步揭示了产业从“企业群落”向“产业集群”再到“产业高地”的演化路径。基于青海清洁能源产业的实证分析，本文得到以下结论：青海清洁能源产业合作网络呈现出以清洁能源企业为核心的社群结构，且与其他行业的合作愈发增多，整体上形成了系统化和有序化的产业集群；青海清洁能源产业合作网络以 2018 年为渐增期和快增期分割点，这两个阶段各自展现出独特的特征，并且与网络拓扑结构的演化特征相对应。综合上述分析，本文揭示了清洁能源产业合作网络演化随协同显著性经历企业群落、产业集群、产业高地三个阶段，这一发现既为理论提供了支持，也为实际清洁能源产业的发展提供了实证依据。

## 5.2. 理论贡献

本文的理论贡献主要体现在拓展了产业集群演化研究视角, 将复杂网络模型应用于产业集群演化研究, 揭示了集群内部企业间的协同作用和互动演化机制, 并从网络拓扑结构、网络生命周期和网络协同性等多个维度分析了产业集群演化过程, 丰富了产业集群演化理论研究维度。这一研究成果深化了对产业协同创新和发展的理解, 为产业集群演化理论研究提供了新的思路和方法, 并为推动产业集群协同创新和高质量发展提供了理论支撑。

## 5.3. 管理启示

基于对青海清洁能源产业合作网络演化机制及协同效应的研究, 本文提出以下管理启示, 旨在为推动清洁能源产业高质量发展提供参考:

1) 基于网络演化阶段, 制定差异化发展策略。在企业群落阶段, 应重点发展清洁能源产业的基础设施, 吸引清洁能源企业入驻, 促进企业之间的合作与交流, 形成清洁能源产业发展的基础。例如, 完善园区交通、电力、通讯等基础设施, 建设清洁能源产业展示中心、数据中心等公共服务平台, 营造良好的产业发展环境。在产业集群阶段, 应优化园区产业布局, 促进产业集群化发展。根据清洁能源产业链特点, 有针对性地引进产业链上下游企业, 形成完整的产业链条, 促进产业集群化发展。例如, 重点引进光伏组件制造、风电设备制造、储能设备制造等产业链上游企业, 以及电力传输、电力交易等产业链下游企业。同时, 打造特色清洁能源产业集群, 如光伏产业集群、风电产业集群等, 提升产业竞争力。例如, 依托青海丰富的太阳能资源, 重点发展光伏产业集群, 打造世界级光伏产业基地。在产业高地阶段, 应加强区域合作, 打造区域清洁能源产业高地。推动区域清洁能源资源整合, 实现优势互补, 提升区域清洁能源产业发展水平。例如, 与西藏、新疆等周边省份合作, 共同开发太阳能、风能等清洁能源资源。同时, 建立区域清洁能源产业合作机制, 促进区域间清洁能源产业的合作与交流, 打造区域清洁能源产业高地。例如, 建立区域清洁能源产业发展联盟, 共同制定产业发展规划、技术标准等。

2) 强化集聚协同, 加速集群向高地跃升。产业集聚效应和协同创新能力是产业集群向产业高地演化的关键因素。为此, 需要加强产业链协同创新, 推动产业链上下游企业协同创新, 形成具有竞争力的产业集群。例如, 建立清洁能源产业技术研发中心, 推动光伏、风电、储能等关键技术的研发, 打造清洁能源产业技术创新集群。在促进产业集群向产业高地转变的过程中, 融合技术创新与市场导向也至关重要。企业需精准定位市场, 研发适应当地特殊环境的清洁能源解决方案, 如针对高原特性优化的光伏和风力发电系统, 以提升产品竞争力。同时, 构建产业服务平台, 推动信息流通与资源整合, 深化企业间的协同合作, 为产业集群的升级发展提供有力支撑。此外, 还需要完善产业配套服务, 建设完善的基础设施和公共服务平台, 为清洁能源企业提供良好的发展环境。例如, 建设清洁能源产业园区污水处理厂、固废处理中心等环保设施, 保障园区环境安全。

## 5.4. 局限与展望

本文的研究局限主要有: 第一, 本文研究仅基于青海海南州太阳能生态发电园区内 152 家企业的数据, 样本范围有限, 可能无法全面反映整个清洁能源产业的发展情况。第二, 本文仅对清洁能源产业园区内的企业进行了网络分析, 并未结合园区内已经形成的绿色产业链作进一步的分析, 下一步的研究可以针对绿色产业链的演化及协同机制进行探讨。第三, 仅以青海清洁能源产业为例进行分析, 其他地区和行业的研究仍需深入探讨。未来的研究可以进一步深入探讨不同类型的产业集群在向产业高地演化的过程中所表现出的差异性及其背后的内在机制, 这将为进一步的理论研究和实践发展提供更为丰富的视角和理论支撑。此外, 本研究仅涉及单一学科领域, 未来研究可考虑加强跨学科的交流与合作, 以促进

理论创新的发展。

## 参考文献

- [1] Porter, M.E. (1998) Clusters and the New Economics of Competition. *Harvard Business Review*, 76, 77-90.
- [2] 刘国巍, 邵云飞. 产业链创新视角下战略性新兴产业合作网络演化及协同测度——以新能源汽车产业为例[J]. 科学与科学技术管理, 2020, 41(8): 43-62.
- [3] 谢欣雨, 王健. 基于复杂网络模块分析的区域物流协同效应研究[J]. 工业技术经济, 2022, 41(2): 87-92.
- [4] 蔡绍洪, 汪劲松, 徐和平, 等. 区域企业群落向产业集群演化的自组织协同机制[J]. 经济问题探索, 2007(3): 69-73.
- [5] 张明之, 谢浩. 跨区梯度转移抑或域内产业深化——基于 2003~2013 年全国和长三角分区数据的产业转移分析[J]. 财经论丛, 2017(2): 10-17.
- [6] 冯奎. 中国发展低碳产业集群的战略思考[J]. 对外经贸实务, 2009(10): 9-12.
- [7] 顾强. 从企业和政府角度看产业集群的发展[J]. 中关村, 2005(6): 71.
- [8] 向佐春, 祝兰芳. 新业态下乡村传统产业集群解锁路径研究——基于广东新会小冈香产业集群的调查[J]. 河北农业大学学报(社会科学版), 2021, 23(5): 62-68.
- [9] 黄由衡, 段丽丽. 基于生命周期和 Logistic 模型的产业集群发展阶段识别——一个物流产业集群案例研究[J]. 物流技术, 2013, 32(17): 136-139, 150.
- [10] 李增扬, 韩秀萍, 陆君安, 等. 内部演化的 BA 无标度网络模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2(2): 1-6.
- [11] 孙国强, 高广阔. 基于复杂网络的长三角产业生态化协同性研究[J]. 上海经济, 2022(3): 33-50.
- [12] 曹霞, 张路蓬. 基于利益分配的创新网络合作密度演化研究[J]. 系统工程学报, 2016, 31(1): 1-12.
- [13] 吕国庆, 曾刚, 郭金龙. 长三角装备制造业产学研创新网络体系的演化分析[J]. 地理科学, 2014, 34(9): 1051-1059.
- [14] 池仁勇, 郭元源, 段姗, 等. 产业集群发展阶段理论研究[J]. 软科学, 2005, 19(5): 5-7, 15.
- [15] 刘国巍, 曹霞. 产学研 BA-CAS 合作机制下创新网络动态演化研究——基于系统生存论的关系嵌入视角[J]. 技术经济与管理研究, 2018(4): 32-37.
- [16] 张路蓬, 薛澜, 周源, 等. 战略性新兴产业创新网络的演化机理分析——基于中国 2000-2015 年新能源汽车产业的实证[J]. 科学学研究, 2018, 36(6): 1027-1035.
- [17] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理, 2005, 24(1): 112-115.
- [18] 王国栋. 打造国家清洁能源产业高地[N]. 国家电网报, 2022-03-29(005).
- [19] 小言, 芳旭, 啸宇. 瞄准全球! 向国家清洁能源产业高地进发[N]. 西宁晚报, 2021-11-27(A04).
- [20] 解丽娜. 高质量打造国家清洁能源产业高地[N]. 青海日报, 2021-07-15(004).