

集成电路贸易网络脆弱性测度及影响因素分析

卢梦薇

江苏大学财经学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2025年4月11日; 录用日期: 2025年4月26日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

作为高技术产业的重要部分, 集成电路是培育战略性新兴产业的重要支撑, 具有基础性和先导性, 研究全球集成电路产业贸易网络脆弱性及其影响因素对保障未来集成电路供需安全具有重要意义。本文选取2000~2022年相应数据, 构建集成电路产业的制造设备、制造材料以及制成器件3个主要环节的贸易子网, 从网络集聚性、传输性、层级性和关联性对网络脆弱性进行测度, 并采用QAP分析法对集成电路全球贸易网络稳定形成的影响因素进行实证分析。结论表明: ① 制造设备贸易网络的结构脆弱性位居榜首, 制造材料脆弱性居中, 制成器件网络结构稳定性最高, 脆弱性最低。② 经济发展规模、对外开放程度和科技创新能力差距对集成电路产品贸易有促进作用; 集成电路产品贸易通常和邻接国签订贸易协定, 有殖民关系以及制度规定和市场规模差距较小的国家联系更加紧密。

关键词

集成电路, 贸易网络, 脆弱性, 影响因素

Vulnerability Measurement and Influencing Factors Analysis of IC Trade Network

Mengwei Lu

School of Finance and Economics, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Apr. 11th, 2025; accepted: Apr. 26th, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

As an important part of high-tech industry, IC is an important support for cultivating strategic emerging industries, which is fundamental and guiding. Studying the vulnerability of global IC industry trade network and its influencing factors is of great significance to ensure the security of IC supply and demand in the future. This paper selects the corresponding data from 2000 to 2022 to construct the trade subnet of the three main links of the IC industry, namely manufacturing

equipment, manufacturing materials and manufactured devices, and measures the network vulnerability from the perspective of network agglomeration, transmission, hierarchy and correlation. In addition, QAP analysis is used to empirically analyze the factors affecting the stable formation of the global IC trade network. The results show that: (1) The structural vulnerability of manufacturing equipment trade network ranks the first, the vulnerability of manufacturing materials is in the middle, the structural stability of manufactured device network is the highest, and the vulnerability is the lowest. (2) The economic development scale, the degree of opening up to the outside world and the gap in scientific and technological innovation ability have a promoting effect on the trade of integrated circuit products; The trade of IC products is usually more closely related to neighboring countries, countries with trade agreements, colonial relations, and institutional regulations and small gaps in market size.

Keywords

Integrated Circuit, Trade Networks, Vulnerability, Influencing Factors

Copyright © 2025 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

1.1. 研究背景

作为高技术产业中重要部分，集成电路被称为“现代工业粮食”，是培育战略性新兴产业的重要支撑，具有基础性和先导性。在经济全球化和区域化的背景下，集成电路产业贸易在全球范围内迅速发展起来，主要特征也由全球垂直一体化分工向全球产业链供应链分工转变，各国间的贸易联系逐渐形成了一个错综复杂的贸易网络。此外，中国目前正处在由制造业大国向制造业强国转变的进程中，集成电路产业无疑是衡量国家科技实力和实力的重要标志，然而中国集成电路产业的发展依然面临着“高端封锁”的桎梏，给中国集成电路产业的发展造成了严重阻碍，中国加快集成电路产业发展迫在眉睫。

为防止在全球贸易网络中被边缘化，中国集成电路产业要掌握主导权独立发展，除了需要在宏观上给予必要的产业扶持政策，同时对全球集成电路产业脆弱性研究是当前中国情境乃至世界环境下产业链风险管理过程中需要关注的热点问题。基于此，本文从基于集成电路产业全球贸易网络的复杂性视角，选取 2010~2022 年集成电路全球贸易数据，借助社会网络分析等方法从不同维度测度贸易网络脆弱性，并运用 QAP 实证分析法进一步探究集成电路产业贸易网络稳定形成的影响机制，从而了解和掌握集成电路产业全球供需形势与潜在风险。

1.2. 研究现状

集成电路作为典型的知识密集型、资金密集型产业，具有供应链超长、产业支撑体系庞大等特征，供应链布局既符合一般供应链布局的规律，也有其自身的特殊性。现有研究对集成电路产业的研究从产业发展[1]、产业创新[2]、技术方面[3] [4]进行了较为详尽的梳理及定量研究，也有学者聚焦链式相关角度进行分析，如黄烨菁等从风险和安全角度，对我国集成电路产业链的安全风险进行了分析，研究表明我国是集成电路跨国供应链的高风险主体，其中进口风险与出口风险之间呈高度不对称[5]；张辉等指出

面对部分国家的技术封锁,我国集成电路产业应力争在全产业链扩张[6];孙琴等则以复合系统协同度模型测算 2009~2020 年集成电路产业链、创新链与资金链“三链”的协同度[7];也有学者从集成电路产业网络视角出发,如李光勤等基于社会网络方法专门分析 ICT 产业的出口贸易网络特征及影响因素[8];贺胜兵等采用指数随机图模型(ERGM)探讨“一带一路”集成电路贸易的网络特征及驱动机制[9];李庭竹借助复杂网络分析方法,刻画 2000~2019 年全球集成电路贸易的网络结构演化特征,并进一步揭示中国与其他国家的相互依赖关系[10]。

贸易脆弱性是供应链在运作过程中受自身和外部环境变化的影响,带来供应链结构、功能受损,使其陷入低效运行的一种固有属性。围绕产业链供应链的安全,学界围绕多方面内容展开了广泛的讨论。如吕越和邓利静通过构建中间品进口多样性指数对汽车产业链安全进行测度和评估[11];郭朝先则通过构建进口市场集中度、出口市场集中度和贸易竞争力指数等指标判断产业链供应链的“健康程度”[12];也有学者从产业链供应链所具备的网络结构特征出发,如 Blackhurst 基于网络的可视化和聚类分析方法对供应链脆弱性进行评价[13];于斌等综合考虑铁矿上下游 5 大类产品,从静态和动态两方面对网络的韧性进行测度[14];何宇(2023)基于复杂网络理论,使用中国多区域投入产出表数据,构建供应链网络节点模拟攻击模型测度供应链韧性[15];任亚文(2023)构建了全球半导体贸易关系矩阵,采用基尼系数与贸易依赖指数,探究了半导体制成品、设备及材料的跨境贸易流、依赖关系演化及贸易组织模式[16];左芝鲤等(2024)基于贸易流向,分析了锂产业链的贸易格局演化,并采用蓄意攻击法模拟了 PageRank 中心度前 10% 节点贸易中断后锂产业链贸易网络的脆弱性动态变化[17];陈伟等(2024)则借鉴模拟攻击分析方法,移除特定节点与连边,以此测度网络连通性的变化,从节点与连边两个层面评估了全球镍贸易网络韧性的演化[18]。

基于网络内部结构特征对贸易网络形成及演进的影响机制的研究一直是全球贸易网络相关研究关注的焦点,基于引力模型是探究贸易网络演进的影响机制的常用方法,如黄庆波等运用扩展贸易引力模型得出中国与北极国家的贸易格局受地理距离、贸易依存度、经济制度相似性以及文化距离因素的共同影响[19];徐邵文等采用拓展引力模型分析 RCEP 区域农产品贸易影响因素,研究表明经济制度质量提升和签订自贸协定有利于改善贸易环境,降低贸易成本,促进农产品贸易[20]。也有部分学者为了降低解释变量之间自相关性的影响,运用社会网络分析中的 QAP 方法,将属性变量转换为关系变量,对于贸易网络演进机制的影响进行实证研究,如周锐波等采用 QAP 回归分析方法,实证研究了经济、技术、文化、地理和制度等因素对高技术产品贸易的影响[21];方慧等构建“一带一路”制造业增加值贸易网络,通过 QAP 重点分析其格局演变的影响因素,结果表明经济、技术、文化、组织与产业结构邻近性是影响贸易格局演变的主要因素[22]。由于贸易引力模型分析法及 QAP 分析这种传统的线性分析方法会忽略变量之间的依赖性,因此有学者开始将指数随机图模型(ERGM)引入到国际贸易网络的研究中,综合考虑内生因素和外生因素刻画其与网络演进的因果关系[23]。

2. 研究方法与数据来源

2.1. 网络脆弱性分析

目前,网络脆弱性的量化尚且处于初步阶段,从现有的研究来看,学者通过集聚性、传输性、层级性和关联性、互动性、连通性等指标来衡量网络脆弱性,这些指标能有效地反映静态或动态情况下网络拓扑指标所决定的属性。

本文以集成电路产品贸易国家为节点,以国家间贸易关系作为边,以具体贸易量作为边的权重,以贸易关系发起流向为箭头方向,以此来构建有向加权贸易网络。将贸易网络结构属性变量——集聚性、传输性、关联性和层级性作为贸易网络脆弱性评价主要指标,具体评价指标如表 1:

Table 1. Trade network vulnerability assessment index system
表 1. 贸易网络脆弱性评价指标体系

一级指标	二级指标	具体意义
集聚性	密度、互惠性、平均聚类系数	网络凝聚程度
传输性	平均路径长度	网络通达程度
层级性	度、度分布、加权重	节点分布特征
关联性	度关联	节点联系程度

网络集聚性即网络结构的紧密程度，集聚程度越高则意味着网络结构更加稠密，资源整合效率将得到高速的流动和提升，然而，一旦网络集聚性到达一定限度时，就容易产生较为严重的网络均质化现象，其资源整合能力将会受到一定程度上的削弱；网络传输性一般表征网络中信息等各类“流”的传输效率，常用网络的路径相关指标来进行考察，高效率的传输性则表明节点之间满足了发生联系的基础条件，能够使资金、技术、信息快速就位并激发出潜在的知识创新活动和网络连接重组等现象的发生，从而当危机发生时，能够充当网络结构得以适应和快速恢复发展活力的屏障；层级性是指供应链网络容纳节点的等级的容量，一个网络的层级性较高，意味着核心节点在作为网络中各类要素流动的集散地存在时地位突出，并且引导着整个供应链网络且与各节点间有着十分紧密的联系。反之，在层级较低的网络中，各节点间的集聚程度均衡、联系路径多元，更有利于“流空间”的扩散，网络的脆弱性也因此较低。然而，低层级性网络中缺乏地位显著及能力强劲的核心节点，难以带动整个网络的发展，其竞争力也会呈现出一个较低的水平；网络关联性是关于网络中节点间关联性描述：若网络中节点倾向于与其相类似的节点间产生联系，则称该网络为同配网络，反之则为异质网络。与相对闭合的同配网络不同，异质性的网络结构能够让边缘节点更快地与核心节点群体产生联系，从而获取更加先进的科学技术、文化知识及管理经验等，并促进网络结构走向异质化与开放化，从而降低网络的脆弱性。

2.2. QAP 分析法

QAP 分析法是一种已经被广泛应用到社会网络的研究方法，用于测量两种“关系数据”的关系或者“属性数据”和“关系数据”之间的相关性和回归关系，同时不要求测量变量之间相互独立，能有效避免出现“共线性”问题。

2.3. 数据来源

本文研究数据取于 UNCOMTRADE 数据库，将 HS 海关税则号下进出口产品与集成电路细分行业产品加以匹配，从中选取三个主要环节产品分析：制造材料、制造关键设备和制成器件，具体如表 2：

Table 2. Integrated circuit industry HS code
表 2. 集成电路产业 HS 编码

产品大类	中文名称	HS 编码
制成器件	集成电路器件	8541
	集成电路与微电子组件	8542
制造设备	光刻机/刻蚀机	848620
	离子注入机	848620/854311
制造材料	印刷电路板	8534
	硅晶圆	3818

续表

硅原料	280461
硅原料	280469
光刻胶	370710
电子气体	280429
电子特种气体	280430

以 2000~2022 年 149 个国家和地区、3 个环节 11 个商品编码的出口贸易数据作为分析对象, 另外考虑 3 个环节的网络的丰富程度不同, 为了准确描述网络脆弱性及更好地对其进行统一比较, 着重选取 2022 年数据, 构建贸易三类子网, 进一步衡量各集成电路行业全球贸易子网络脆弱性。

3. 集成电路全球贸易网络结构脆弱性测度

3.1. 网络集聚性

基于 2022 年 149 个国家(地区)间的集成电路贸易数据, 计算集成电路 3 类子网参数, 相应指标得分见表 3。

Table 3. The basic characteristic results of the integrated circuit global trade subnet in 2022

表 3. 2022 年集成电路全球贸易子网的基本特征结果

贸易网络	节点	边数	网络密度	网络互惠性	平均度	平均加权重度	平均聚类系数	平均路径长度
制造材料	149	4362	0.198	0.596	29.275	514467349.022	0.707	1.969
制造设备	122	913	0.062	0.499	7.484	454361888.173	0.469	2.315
制成器件	149	6092	0.276	0.522	40.886	6556293665.791	0.716	1.766
复合网络	149	6484	0.294	0.624	43.517	7442780634.486	0.716	1.732

从网络密度与互惠性来看, 制造材料和制成器件的网络密度与互惠性值分别达到了 0.198 和 0.595, 0.276 和 0.521, 仅略低于整体复合网络得分, 说明这两类子网络内部拥有较为密切的贸易来往; 关键设备贸易网络的网络密度与互惠性处于偏弱的水平, 相应的参与国家间不仅在贸易联系较少, 而且网络中各国家之间建立双向联系的水平处于最末, 网络稳定性能不佳。究其原因, 一方面, 关键设备技术掌握在少数国家手中, 形成技术垄断; 另一方面, 各国在关键设备领域竞争激烈, 所以会在一定程度上避免紧密合作, 使得网络密度降低。

从平均度与平均加权重度来看, 制成器件环节的平均度与加权重度要远高于制造材料和设备产品, 且二者成正比关系, 该类国家通过不断拓展自身来源渠道而试图分散贸易风险, 从平均聚类系数来看, 3 类子网的平均聚类系数得分在 0.45~0.72 之间, 相较于同等规模的随机网络平均聚类系数数值较高, 说明网络中大部分节点与相邻节点间存在贸易联系并更易于形成彼此相互信任与长期合作的小团体, 边缘孤立节点所占比重小, 网络的集聚效应明显。

总的来看, 虽然各类贸易子网的空间集聚状态各有所差异, 但从整体上可以看出差异不大, 相较于随机网络该 3 类子网拥有较高且水平相当的集聚程度, 其中以制成器件贸易网络的集聚性最为显著, 网络稳定性较强, 其次为制造材料贸易网络, 而制造设备贸易网络的集聚性最低。

3.2. 网络传输性

从网络传输效率来看, 3 类子网的平均路径长度在 1.77~2.31 之间(表 3), 与相同规模的随机网络平

均路径长度较为接近，表明集成电路全球贸易网络节点间联系需要中转的次数相对较低，大约为 2 个节点左右。其中制成品环节的平均路径长度为 1.766，是 3 类子网中路径最短的网络，说明其具有较强的区域可达性和辐射性；制造材料环节的平均路径长度为 1.969，传输性居中；而制造设备环节产品分别为 2.315，节点之间的传输性相对较弱，不利于网络要素的流动，且扩散的额外成本相对较高。

总的来看，4 类贸易子网的平均路径长度得分普遍较高，网络要素流动的扩散效率高，一定程度上缓解了网络的脆弱性。

3.3. 网络层级性

节点度不仅可反映国家间贸易往来关系活跃度和广泛度，还可直观展现国家间的网络关系，从节点的度值排名(表 4)及所占比例(表 5)来看，核心国家辐射效应强劲。在制造设备网络中，度值高的多集中于欧美国家，另外中国、日本也表现出积极的辐射态势。另一方面，从高于平均度的节点数与孤立节点数占比来看，制造设备网络是 3 类子网中层级性表现最为显著的网络，除核心节点外，网络内部国家参与度不高，孤立节点高达 58 个，占比达 51.7%，网络均衡性差。相较而言，制成器件网络表现出较为理想的网络均衡态势，超过平均度的节点数达到整体网络的 63.7%，且网络中仅有 3 个孤立节点，各国家之间的联系密切。制造材料环节度值最高的梯队包括中国、德国、美国等，占比达 57.7%，孤立节点占比 10.7%，网络现状相对均衡。

Table 4. 2022 integrated circuit global trade subnet node value ranked in the top 10 countries
表 4. 2022 年集成电路全球贸易子网节点度值排名前 10 国家

	制造材料		制造设备		制成器件	
	国家	度值	国家	度值	国家	度值
1	中国	204	美国	110	美国	242
2	德国	191	中国	105	中国	235
3	美国	190	英国	87	德国	228
4	英国	185	德国	76	法国	221
5	法国	181	荷兰	71	荷兰	221
6	荷兰	174	日本	65	英国	212
7	比利时	168	新加坡	62	意大利	208
8	瑞士	165	韩国	58	阿联酋	200
9	西班牙	157	意大利	53	西班牙	199
10	阿联酋	157	瑞士	51	印度	188

Table 5. Proportion of integrated circuit global trade subnet node degree value in 2022
表 5. 2022 年集成电路全球贸易子网节点度值所占比例

	高于平均度的节点数	比例	高于 100 的节点数	比例	孤立节点数	比例
制造材料	86	57.7%	36	24.2%	16	10.7%
制造设备	50	40.9%	2	1.64%	58	51.7%
制成器件	95	63.7%	51	34.2%	3	2.4%

运用度分布，根据加权节点度中心性值进行位序 - 规模排序分别对 3 类集成电路三个环节贸易网络的层级性进行测度，具体如图 1。在双对数坐标系下绘制位序 - 规模分布图，通过线性拟合发现，散点分布特征近似一条斜率为负的直线，R 均大于 0.8，符合幂律分布特征，具有无标度网络特征。

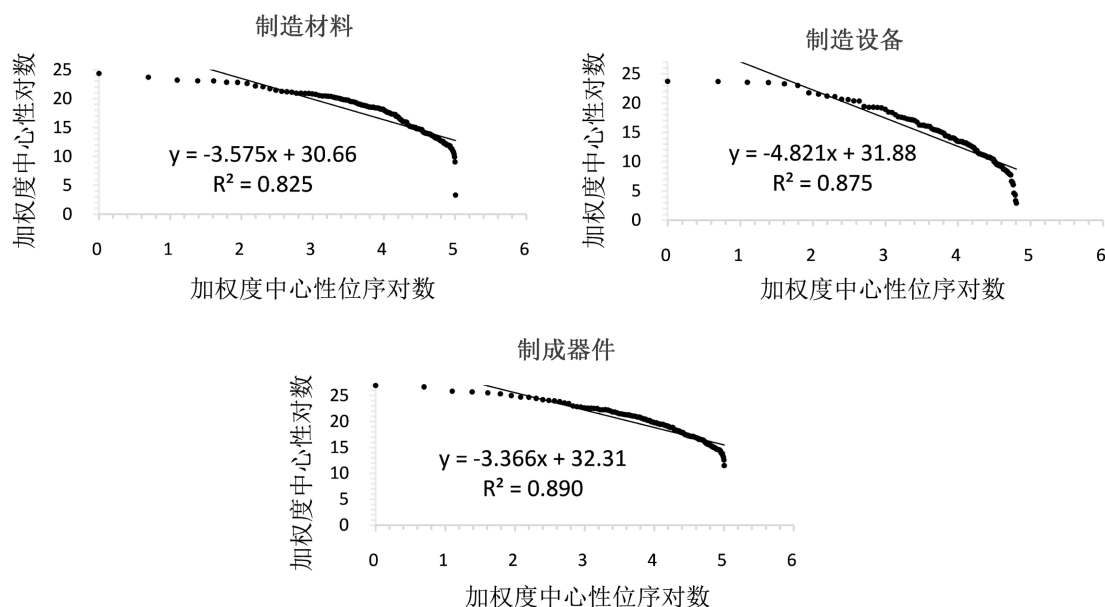


Figure 1. The subnetwork distribution of global trade in integrated circuits in 2022

图 1. 2022 年集成电路全球贸易子网度分布

总体看, 拟合曲线斜率差异较大, α 的绝对值在 3.366~4.821, 度分布具有明显的层次, 且最大度值与最小度值之间的较大差异使网络结构层次呈现相对立体的分布。其中, 制造设备网络的曲线斜率为 4.821, 表明该环节产品拥有更高的层级性, 即网络的马太效应较强, 资源在核心国家中的掌控和流动更强、更频繁。制成品网络的斜率为 3.3667, 是 3 类网络中最低的, 这表明制成品网络中国家之间的地位层级性不是很强, 相对扁平, 削弱了马太效应; 制造材料网络的层级性处于中间。

3.4. 网络关联性

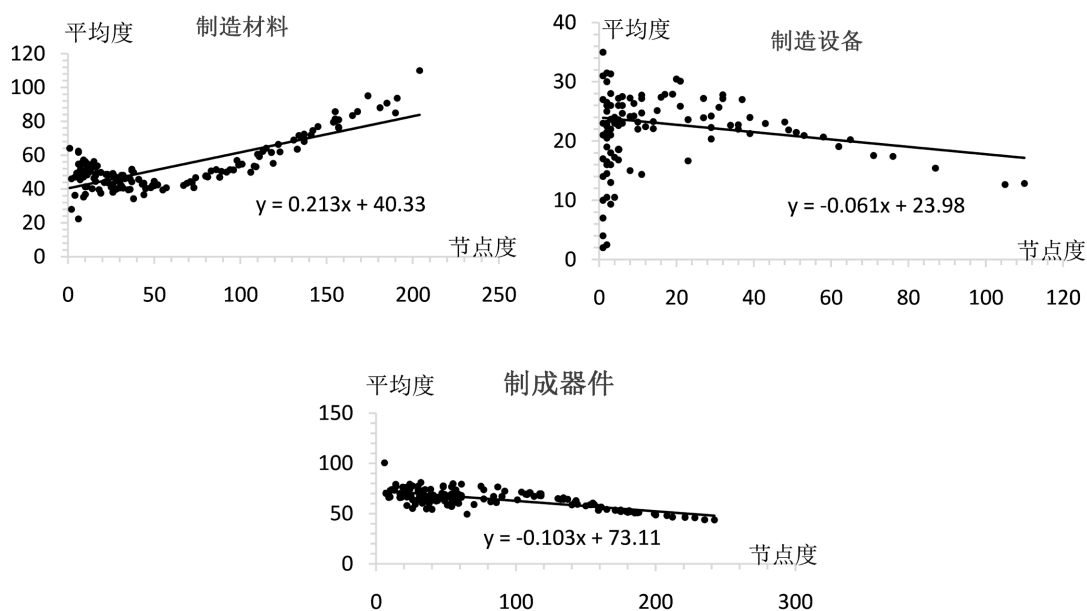


Figure 2. 2022 integrated circuit global trade subnet correlation

图 2. 2022 年集成电路全球贸易子网度关联

为了分析网络节点之间的匹配性，即节点间的联系程度。绘制网络度关联图，见图 2。从图中的度关联系数可以看出，3 个环节贸易网络在匹配性上存在差异。其中，制造设备和制成器件为异配性，且异配性强弱表现为制成器件 > 制造设备，此类网络在建立联系路径方面更趋向于异质化与多元性。结合上文分析得到制造设备网络层级性虽显著，但其微弱异质性能在一定程度上削减高层级性带来的区域锁定与路径依赖等限制性因素，降低网络脆弱性。制造材料网络为同配性，对于单个节点国家而言，与其相邻的节点更多呈现正关联性，联系路径倾向于同质化，网络未突破核心、半核心、半边缘和边缘国家集团化发展的局限。结合层级性测度结果，制造材料环节层级性也偏高，使得各节点间的差距日益拉大，更易加剧整体网络的封闭性，不利于网络对于外界干扰的抵御能力和恢复能力，网络脆弱性弱。

总的来看，制造设备和制成器件网络虽然也表现出异质性，但其曲线斜率平坦，异质性相对微弱，因此同制造材料网络一样，与其相邻的绝大多数节点相互间的联系路径更倾向于同质化，对干扰的抵御能力和恢复能力较弱，网络脆弱性较大。

4. 集成电路全球贸易网络构建影响因素的实证检验

4.1. 变量选取

结合数据可得性，选取经济、地理、文化、制度、组织距离因素作为一般性影响因素，科技、基建、市场和开放距离作为特异性影响因素，对 2000、2010、2022 年集成电路全球贸易网络构建影响因素进行实证分析，采用集成电路产品的出口贸易总额构建集成电路全球贸易加权无向差值矩阵作为回归的被解释变量。此外，为防止数据单位对回归结果造成干扰，对除二值矩阵外的所有数据矩阵进行对数处理，其中各变量的含义、矩阵处理和数据来源具体如表 6 所示：

Table 6. QAP analysis variables, matrix processing, and data sources
表 6. QAP 分析变量、矩阵处理和数据来源

变量		含义	矩阵处理	预期符号	数据来源
有偏变量	IC	集成电路全球贸易链网络	两国经济体之间集成电路产品出口贸易额		UNComtrade
	lnpgdp	经济发展距离	经济体之间人均 GDP 差值的绝对值取对数	+	WDI
	lnpat	科技创新距离	经济体之间的专利申请数差值的绝对值取对数	+	WDI
	lninst	制度差异距离	基于 WGI 六个维度的治理指标指数测算而得并取对数	-	WGI
	Indist	地理邻接距离	经济体首都之间的球面距离取对数	-	CEPII
	Contig		二值矩阵，领土相邻的国家为 1，反之为 0	+	CEPII
	Colony	文化差异距离	二值矩阵，经济体之间存在殖民历史则为 1，否则为 0	+	CEPII
	Lang		二值矩阵，经济体之间用相同语言取 1，不相同语言取 0	+	CEPII
	lnfdi	开放程度距离	经济体之间外商直接投资净流入差值的绝对值取对数	+	WDI
	FTA	组织邻近距离	二值矩阵，经济体之间签署自由贸易协定取值为 1，否则为 0	+	WTO
无偏变量	lnurb	市场规模距离	两个经济体城市化率差距的绝对值取对数	-	WDI
	lninf	基础设施距离	经济体之间移动蜂窝订阅量差值的绝对值取对数	+	WDI

4.2. 模型构建

基于前文理论分析，构建 2000、2010、2022 三年集成电路全球无向加权贸易网络 QAP 回归模型如下：

$$IC_{ij(t)} = \beta_0 + \beta_1 \ln pgdp_{ij(t)} + \beta_2 \ln dist_{ij(t)} + \beta_3 \ln pat_{ij(t)} + \beta_4 \ln urb_{ij(t)} + \beta_5 \ln inf_{ij(t)} + \beta_6 FTA_{ij(t)} + \beta_7 \ln fdi_{ij(t)} + \beta_8 \ln inst_{ij(t)} + \beta_9 Contig_{ij(t)} + \beta_{10} Colony_{ij(t)} + \beta_{11} Lang_{ij(t)} + \mu \tag{1}$$

其中， t 表示年份， i 和 j 都表示国家， IC 表示集成电路产品加权无向网络， $\ln pgdp$ 表示经济发展距离差值矩阵， $Contig$ 表示陆地是否邻接的二值矩阵， $\ln dist$ 表示首都地理距离差值矩阵， $\ln pat$ 表示科技创新距离差值矩阵， $\ln inst$ 表示制度距离差值矩阵， $\ln urb$ 表示市场规模距离差值矩阵， $\ln inf$ 表示基础设施距离差值矩阵， FTA 表示是否签署自由贸易协定的二值矩阵， $\ln fdi$ 表示开放程度距离差值矩阵， $Colony$ 表示是否曾经存在或现存殖民关系的二值矩阵， $Lang$ 代表两国语言是否相同的二值矩阵， μ 表示误差项。

4.3. QAP 相关分析

由 Ucient6 软件对相关数据进行 5000 次随机置换，得到各无偏变量矩阵与加权贸易网络的相关分析结果，其相关系数与显著性水平如表 7 所示。

Table 7. QAP correlation analysis results of global trade-weighted IC networks in 2000, 2010 and 2022
表 7. 2000、2010、2022 年集成电路全球贸易加权网络影响因素 QAP 相关性分析结果

变量	2000 年	2010 年	2022 年
$\ln pgdp$	0.145*** (0.000)	0.138*** (0.000)	0.136*** (0.000)
$\ln pat$	0.463*** (0.000)	0.492*** (0.000)	0.523*** (0.000)
$\ln inst$	0.065** (0.014)	0.063*** (0.008)	0.020 (0.261)
$\ln dist$	-0.263*** (0.000)	-0.284*** (0.000)	-0.287*** (0.000)
$Contig$	0.174*** (0.000)	0.178*** (0.000)	0.172*** (0.000)
$Colony$	0.196*** (0.000)	0.164*** (0.000)	0.138*** (0.000)
$Lang$	0.042 (0.115)	0.030 (0.189)	0.009 (0.394)
$\ln fdi$	0.478*** (0.000)	0.490*** (0.000)	0.475*** (0.000)
FTA	0.274*** (0.000)	0.215*** (0.000)	0.362*** (0.000)
$\ln urb$	-0.124*** (0.000)	-0.116*** (0.000)	-0.139*** (0.000)
$\ln inf$	0.250*** (0.000)	-0.133*** (0.000)	-0.121*** (0.001)

注：*、**、***分别代表在 0.1、0.05 和 0.01 的统计水平上显著；系数为标准化后的系数，括号内的数据为显著性水平。

观察分析发现，贸易网络关联关系矩阵与经济发展距离差值矩阵、国家首都地理距离差值矩阵、陆地邻接 0~1 二值矩阵、科技创新距离差值矩阵、市场规模距离差值矩阵、基础设施距离差值矩阵、开放

程度距离差值矩阵、殖民关系 0~1 二值矩阵、贸易协定 0~1 二值矩阵间在 2000、2010、2022 年均存在显著关联关系；制度距离差值矩阵仅在 2022 年未通过显著性检验，说明制度差异在 2000 年和 2010 年与集成电路贸易网络演进的相关性较强，而之后相关性不明显；是否有共同语言 0~1 二值矩阵与集成电路全球贸易矩阵的相关系数三年均未通过统计学的显著性水平检验，说明是否有共同语言与集成电路贸易网络演进的相关性不明显。

4.4. QAP 回归分析

通过 UCINET6 软件，设置随机置换次数 5000 次，对 2000、2010、2022 年共 3 年的样本量进行 QAP 回归分析，其分析结果如表 8 所示：

Table 8. QAP regression analysis results of global trade-weighted network of integrated circuits in 2000, 2010 and 2022
表 8. 2000、2010、2022 年集成电路全球贸易加权网络影响因素 QAP 回归分析结果

变量	2000 年	2010 年	2022 年
lnpgdp	0.062*** (0.004)	0.067*** (0.002)	0.041*** (0.010)
lnpat	0.215*** (0.000)	0.309*** (0.000)	0.407*** (0.000)
lninst	-0.055* (0.071)	0.021* (0.079)	0.012 (0.250)
lndist	-0.167*** (0.000)	-0.243*** (0.000)	-0.246*** (0.000)
Contig	0.074*** (0.000)	0.054*** (0.000)	0.038*** (0.000)
Colony	0.097*** (0.000)	0.074*** (0.000)	0.062*** (0.000)
lnfdi	0.207*** (0.000)	0.117*** (0.000)	0.135*** (0.000)
FTA	0.159*** (0.000)	0.078*** (0.000)	0.206*** (0.000)
lnurb	-0.109*** (0.000)	-0.106*** (0.000)	-0.081*** (0.000)
lninf	0.081*** (0.000)	-0.062*** (0.000)	-0.043*** (0.009)
R ²	0.406	0.438	0.466
调整后 R ²	0.405	0.438	0.466

注：*、**、***分别代表在 0.1、0.05 和 0.01 的统计水平上显著；系数为标准化后的系数，括号内的数据为显著性水平。

从回归的总体结果来看，R² 总体维持在 0.405~0.466 之间，表示选取的 10 个影响因素矩阵数据可以解释集成电路全球贸易网络的 40.5%~46.6% 的方差，拟合效果不错。

从经济发展距离回归结果来看，三年均通过 1% 的显著水平且回归系数符号为正，说明经济规模和发展水平差距对集成电路产品贸易有促进作用，反映了一国经济规模 and 市场需求是集成电路贸易的基础。此外，回归系数整体呈下降趋势，这可能跟网络中的关键节点有关，贸易水平相近的“中间”国家会相互建立联系，从而使得经济距离对集成电路贸易联系呈现减弱趋势。从地理邻接距离回归结果来看，三年陆地邻接和地理距离都通过 1% 的显著性检验，说明地理邻接因素是影响集成电路产品贸易联系的影响

因素。其中,陆地邻接相关系数为正且呈下降趋势,说明集成电路产品贸易通常和邻接国贸易联系更加紧密,但随着交通运输和通信技术的进步,有利于克服地理空间障碍。首都地理距离相关系数为负且逐渐变大,说明距离越近的国家之间,越会将价值链生产环节分配到就近的国家,系数逐渐变大是因为运输成本逐渐成为集成电路产品贸易中越来越重要的考量因素。从科技创新距离来看,三年均通过 1% 的显著水平,回归系数符号与相关性分析符号一致为正并呈上升趋势,说明集成电路产品技术复杂、生产链条较长,而核心技术更容易被少数国家掌握,贸易联系更倾向于科技创新能力差距更大的国家,即当两个的科技创新能力差距较大的国家之间更容易形成技术溢出、学习现象。从市场规模差距来看,三年均通过 1% 的显著水平且系数符号为负,说明集成电路产品贸易合作往往建立在市场规模差距较小的国家,市场规模差异较大的国家之间开展贸易增加了劳动力成本且不利于发挥产业集聚效应。从基础设施建设程度来看,三年均通过 1% 的显著水平,但回归系数符号与由 2010 年的正转为负,说明早期基础设施建设差距越大越能促进集成电路之间的贸易往来,而随着各国家基础设施的建设,差距不断缩小,差距越小的国家间越有利于开展集成电路产品贸易,这源于基础设施建设能够重构产业链中不同生产环节之间的分工合作,并通过数字技术应用降低贸易成本。从开放程度来看,三年均通过 1% 的显著水平且系数符号为正,整体变化趋势呈先下降后上升的趋势,说明经济体之间对外开放程度差距越大其集成电路产品贸易联系越紧密。开放程度越高的国家,其集成电路产品的国际竞争力越高,相对于对外开放程度越低的国家更具竞争力,从而更容易发生贸易往来。从殖民关系来看,三年均通过 1% 的显著水平且系数符号为正,说明殖民关系和集成电路贸易网络是相互促进的,这一要素虽然不能直接反映对双边贸易活动的影响,但间接上会反映出两国之间是否存在文化上的相近之处。从组织邻近距离因素来看,三年均通过 1% 的显著水平且系数符号为正,整体变化趋势呈上升的趋势,这说明国家间政府的贸易协定对于集成电路贸易的发展有着显著并且为正向的影响。从制度距离因素来看,2000 和 2010 年均通过 10% 的显著水平,在 2022 年则影响不显著,说明较小的制度差异可以在一定程度上降低贸易风险。而随着互联网的普及使获取他国制度、政策信息的成本降低,制度距离对于国家间贸易联系建立的解释性变弱。

5. 结论与建议

5.1. 主要结论

本文利用 2000~2022 年世界 149 国家间的集成电路贸易额数据作为样本量,基于社会网络分析方法,构建了加权贸易网络模型,从脆弱性评价及影响机理等方面对集成电路全球贸易网络进行了探究,主要研究结论如下:

(1) 贸易网络结构脆弱性评价。① 制造材料网络层级性高,联系路径倾向于同质化,较高的平均聚类系数与低传输性阻碍了该网络结构的开放化,引发区域锁定与路径依赖造成困境,造成贸易网络一定的脆弱性。② 制造设备网络集聚性、传输性最低,层级性最高,网络脆弱性最大,但具有微弱的异质性一定程度上削减了高层级性带来的区域锁定与路径依赖等限制性因素。③ 制成器件产品网络层级性最低,相对扁平异质化且密集的网络结构能够快速调整与发育,联系集聚程度均衡,其次具有较高的传输性,较强的辐射性使得网络结构脆弱性最低。④ 综上,制造设备贸易网络的结构脆弱性位居榜首,制造材料贸易网络脆弱性居中,制成器件贸易网络结构稳定性最高,脆弱性最低。

(2) 贸易网络影响机理。① 经济发展和对外开放程度水平差距对集成电路产品贸易有促进作用;集成电路产品贸易通常和邻接国贸易联系更加紧密。② 贸易联系更倾向于科技创新能力差距更大、市场规模差距较小的国家。③ 早期基础设施建设差距越大越能促进集成电路之间的贸易往来,而随着各国家基础设施的建设,差距越小的国家间越有利于开展集成电路产品贸易。④ 殖民关系和集成电路贸易网络是相互促进的;贸易协定对于集成电路贸易的发展有着显著并且为正向的影响;两国间的制度规定较为接

近,对两国建立集成电路产品贸易联系有积极影响。

5.2. 对策与建议

(1) 发挥网络枢纽地位,摆脱核心技术依赖

中国在集成电路产品贸易中居于最重要的“中间枢纽”位置,但仍处于价值链的中低端环节,中心度排名较低,因此中国应进一步发挥该地位优势,加强对资源的控制利用,逐步建立以中国为核心的国际生产、贸易网络体系。进一步创新体制机制,改善营商环境,聚集海内外创新要素,培育一批集成电路重点企业,优化产业生态,加快集成电路产业发展。围绕已经占有一定市场、具有一定领先地位的核心企业开展跨国合作,逐步建立以中国为核心向外辐射的集成电路生产和贸易网络体系。此外,在新的贸易环境下,也要不断推进创新驱动发展战略,着眼新一轮科技革命和产业变革的演化趋势,深化科研、教育体制改革,调整并优化高等教育的专业结构和层次结构,扩大高技术人才储备,努力实现高水平科技自立自强,把高附加值环节技术掌握在自己手中,才能从根本上确保我国在全球贸易网络中的核心地位。

(2) 推动网络均衡发展,深化双边和多边合作

由于全球集成电路产业发展的不均衡特征,中国需要及时调整贸易合作政策,过于集中的进出口结构给中国集成电路产品贸易带来一定的贸易风险,一旦遭受来自主要贸易伙伴国的贸易管制,将严重打击中国高技术产品贸易。根据 QAP 分析结果显示,贸易开放度和贸易协定对于集成电路产业贸易网络的演进整体上具有正向影响,因此中国要不断深化双边与多边合作,一方面要增进与美国、德国、英国等居于网络核心的国家的贸易合作,另一方面要加强与日本、韩国等国的区域贸易联系,逐步提升中国在集成电路产业贸易网络中的影响力。此外,应以“一带一路”倡议为抓手,强化与沿线国家的贸易联系,并且在全球范围内增强与第三世界国家的集成电路贸易,减少对少数发达国家的市场依赖,从而提高中国在高技术产品贸易网络中的网络异质性,降低贸易风险。

(3) 打破关键环节垄断,实现高水平科技创新

注重对该产业核心关键环节的突破,在设备制造领域打破既有的垄断秩序,进而提升中国集成电路贸易中的竞争地位,通过创新链与产业链双链融合及多主体联合创新等方式实现对芯片、光刻机、刻蚀机、离子注入机等“卡脖子”环节的突破。此外, QAP 回归结果表明,技术是显著影响集成电路贸易网络的重要因素,加强与发达国家之间的知识、技术交流合作,制定积极的政策引导资源流入集成电路产品的研发和生产等环节,提升 IC 企业的再创新能力,这就需要中国政府打造区域集群网络,例如美国的硅谷、印度班加罗尔、中国台湾新竹,通过建立学习型网络体系,进行科技创新活动。

(4) 提供制度保障建设,加强动态风险监控

实证分析结果表明,政府效能、法治、管制质量等方面的制度差异对于开展集成电路产业贸易具有显著的负向影响。因此中国一方面应该积极建立政策信息共享平台,为集成电路相关企业提供贸易对象国的政治和法律法规信息,降低在制度方面的信息不对称所带来的风险和成本,促进贸易广度扩大与网络地位进一步提高;另一方面,应提升政府工作效率,建立和完善集成电路产业链安全风险预警与应急保障机制,加强对产业链韧性和风险点的监测与评估,精确识别与预测产业链中的脆弱环节和可能中断的节点,做好不同风险和产业链中断情形下的应急保障预案,为集成电路产业贸易网络地位提升提供制度保障。

参考文献

- [1] 赵建吉,曾刚.技术社区视角下新竹 IC 产业的发展及对张江的启示[J].经济地理,2010,30(3):438-442+430.

- [2] 刘晓燕, 李金鹏, 单晓红, 等. 动态视角下集成电路产业创新网络演化特征分析[J]. 中国科技论坛, 2019(11): 48-55.
- [3] 陈玲, 薛澜. 中国高技术产业在国际分工中的地位及产业升级: 以集成电路产业为例[J]. 中国软科学, 2010(6): 36-46.
- [4] 雷瑾亮, 张剑, 马晓辉. 集成电路产业形态的演变和发展机遇[J]. 中国科技论坛, 2013(7): 34-39.
- [5] 黄烨菁, 孙美露, 窦钱斌. 中国集成电路产业跨国供应链风险、成因及发展趋势[J]. 亚太经济, 2022(3): 119-128.
- [6] 张辉, 张明哲. 数字经济全球化下我国集成电路产业安全与可持续发展[J]. 人民论坛学术前沿, 2022(6): 97-100.
- [7] 孙琴, 刘戒骄. 集成电路产业“三链”融合协同发展——机理分析与实证研究[J]. 中国科技论坛, 2023(7): 63-73.
- [8] 李光勤, 金玉萍, 郭细根. 中国 ICT 对外贸易的时空格局及其演变特征[J]. 世界地理研究, 2022, 31(1): 29-40.
- [9] 贺胜兵, 陈光达, 周华蓉. 如何加快推进“一带一路”集成电路贸易合作——基于社会网络分析的视角[J]. 财经科学, 2022(1): 101-115.
- [10] 李庭竹, 杜德斌. 全球集成电路贸易网络结构演化及中国对外依赖分析[J]. 中国科技论坛, 2023(3): 93-103.
- [11] 吕越, 邓利静. 着力提升产业链供应链韧性与安全水平——以中国汽车产业链为例的测度及分析[J]. 国际贸易问题, 2023(2): 1-19.
- [12] 郭朝先, 许婷婷. 我国医药产业链供应链韧性和安全水平研究[J]. 经济与管理, 2023, 37(3): 82-93.
- [13] Blackhurst, J., Rungtusanatham, M.J., Scheibe, K. and Ambulkar, S. (2018) Supply Chain Vulnerability Assessment: A Network Based Visualization and Clustering Analysis Approach. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 24, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2017.10.004>
- [14] 于娉, 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.
- [15] 何宇, 田杰鑫, 覃朝晖, 等. 基于生产网络视角的中国产业链韧性测度研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2024, 21(4): 21-27, 114.
- [16] 任亚文, 杨宇, 王云, 等. 全球半导体贸易结构演化及其依赖关系[J]. 地理学报, 2023, 78(2): 371-385.
- [17] 左芝鲤, 成金华, 詹成, 等. 全球锂产业链贸易格局演化及脆弱性分析[J]. 资源科学, 2024, 46(1): 114-129.
- [18] 陈伟, 蒋益飞, 刘志高. 全球镍资源贸易网络演化及其韧性研究[J]. 世界地理研究, 2025, 34(1): 1-15.
- [19] 黄庆波, 黄芳, 李焱, 等. 中国与北极国家贸易格局时空演变及其影响因素分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2023, 57(1): 105-116.
- [20] 徐邵文, 张蕙杰, 钱静斐. RCEP 区域农产品贸易的网络特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2024, 39(9): 2206-2223.
- [21] 周锐波, 陈依楠, 覃远红. 全球高技术产品贸易网络演化及影响因素[J]. 世界地理研究, 2023, 32(6): 1-13.
- [22] 方慧, 张潇叶, 周晓宇, 等. “一带一路”制造业增加值贸易格局演变及其影响因素分析[J]. 统计与决策, 2023, 39(14): 152-156.
- [23] 吴红梅, 王蕊, 殷沐阳. 基于 ERGM 模型的全球林产品出口贸易网络格局及影响因素分析[J]. 农林经济管理学报, 2022, 21(2): 188-197.