地緣政治關係影響下半導體產業鏈貿易網絡及演化機制分析

覃海華　歐陽豔豔　關紅玲 *

摘　要：半導體產業作為信息技術與人工智能等戰略性產業的核心基礎，其全球供應鏈呈現技術密集化與地理分佈高度碎片化的特徵。在地緣政治衝突加劇的背景下，半導體供應鏈安全已成為國家間戰略競爭的關鍵領域，探究地緣政治因素對產業鏈的影響具有重大現實意義。基於複雜網絡理論框架，本文構建了地緣政治關係網絡與半導體貿易網絡的雙層分析體系：首先，通過 GDELT 新聞事件數據庫構建地緣政治關係網絡，並運用社會網絡分析法解析其拓撲特徵；其次，基於聯合國商品貿易統計數據，分別建立半導體產業鏈上、中、下游 4 類核心產品的加權國際貿易網絡。在此基礎上，採用靜態指數隨機圖

* 覃海華，中山大學粵港澳發展研究院碩士研究生；歐陽豔豔，中山大學國際金融學院副教授；關紅玲，通訊作者，中山大學粵港澳發展研究院副教授。
本文為廣東省哲學社會科學規劃項目（GD25CLJ02），「國際生產網絡短鏈化對國內就業的影響研究」中期成果。

模型（ERGM）與動態時間指數隨機圖模型（TERGM）相結合的方法，系統揭示了地緣政治因素影響下半導體貿易網絡的結構特徵及其動態演化機制。

關鍵詞：地緣政治關係網絡　半導體產業鏈貿易網絡　指數隨機圖模型　中美芯片戰

一、問題的提出

進入人工智能時代，芯片作為算力的核心載體，其產業鏈發展水平將直接決定一個國家在人工智能領域的技術上限。在當前國際地緣政治緊張的態勢下，先進芯片被視為關鍵戰略物資，成為地緣政治博弈的重要工具。

根據《2024 年美國半導體協會手冊》（SIA 2024 Factbook），2023 年全球半導體銷售額達 5269 億美元，2001—2023 年間年均複合增長率為 6.0%。其中，美國企業佔據全球半導體銷售市場的 50%，而中國企業佔比為 7.2%。美國半導體公司在微處理器等前沿器件領域具有顯著優勢，同時在研發、設計和工藝技術方面保持全球領先地位。中國作為全球最大半導體消費市場，2023 年消費量佔全球總量的 29%，但關鍵核心技術仍存在對外依賴。目前中國正加速追趕，芯片自給率已從 2018 年的 5% 提升至 2022 年的 17%，[①] 但在芯片設計、先進製造等核心環節仍相對薄弱。近年來，美國通過技術禁運、

① 環球網：《歐美擔心中國加速生產傳統芯片！專家：美政府在對華芯片問題上無清晰戰略》，2023 年 8 月 2 日，https://world.huanqiu.com/article/4DxENCQCpOS，2024 年 3 月 14 日。

人才限制、長臂管轄和聯盟封鎖等手段，持續對中國半導體產業實施壓制。

習近平深刻指出：「隨着我國發展壯大，突破『卡脖子』關鍵核心技術刻不容緩。」[①] 解決「卡脖子」問題，最根本的在於堅持自力更生和自主創新，同時與世界上有夥伴關係的各國芯片設計、製造企業積極開展互利雙贏的合作，在全球化的貿易格局中實現技術突圍。

因此，深入分析地緣政治對半導體產業鏈中典型商品的影響，研究半導體產業鏈各環節貿易網絡的結構特徵，識別各環節貿易的核心國家，並探究地緣政治關係與各環節貿易網絡間的關係，對於保障我國及全球半導體供應鏈的安全與可持續發展具有重要的現實意義。

二、理論分析框架

（一）社會網絡、複雜網絡與國際貿易

社會網絡與複雜網絡均以「關係」為研究核心，但其理論淵源、分析重心與方法論存在差異。近年來，這兩種分析範式在國際貿易研究中逐漸融合，形成跨學科的網絡分析框架。社會網絡分析（Social Network Analysis, SNA）起源於社會學與人類學，強調個體、組織、國家等具有社會屬性的主體之間的互動關係，側重探討網絡結構對

① 新華社：《習近平在湖北武漢考察時强調：把科技的命脉牢牢掌握在自己手中，不斷提升我國發展獨立性自主性安全性》，2022 年 6 月 29 日，https://www.gov.cn/xinwen/2022-06/29/content_5698391.html，2024 年 3 月 14 日。

行為模式、資源獲取、制度約束的影響。[①] 相比之下，複雜網絡理論（Complex Network Theory）源自物理學與計算機科學，更關注大規模網絡系統的結構性特徵及其演化機制，如冪律分佈、小世界性、集聚性等。[②] 兩者在研究對象和核心指標（如度分佈、聚類係數、路徑長度、網絡密度等）上存在交集，但分析目標和理論基礎並不完全相同[③]。

隨着全球化的加深和數據可得性的提升，社會網絡與複雜網絡分析方法逐漸應用於國際貿易、投資和全球價值鏈研究，成為刻畫經濟活動複雜交互關係的重要工具。諾貝爾經濟學獎獲得者 Maskin 認為，網絡研究是當代經濟學理論中最有活力和最引人入勝的主題之一。Rauch 將「移民網絡」引入國際貿易理論，提出社會聯繫可以緩解信息不對稱、降低交易成本，從而促進貿易形成。[④] 另一方面，在礦產資源、能源和食品等國際貿易領域，複雜網絡分析方法正得到廣泛應用：有學者藉助跨公司股權關係構建了更大規模的全球經濟網絡，並對其結構進行了深入分析；[⑤] 有研究者構建了一個基於複雜網絡的世界原油

① Mark Granovetter, "Economic Action and Social Structure: The Problem of Embeddedness," *American Journal of Sociology*, vol. 91, no. 3 (November 1985), pp. 481-510. James S. Coleman, "Social Capital in the Creation of Human Capital," *American Journal of Sociology*, vol. 94 (Supplement, 1988), pp. S95-S120. Ronald S. Burt, *Structural Holes: The Social Structure of Competition*, Cambridge: Harvard University Press, 1992, pp. 1-31.

② Albert-László Barabási and Réka Albert, "Emergence of Scaling in Random Networks," *Science*, vol. 286, no. 5439 (October 1999), pp. 509-512.

③ 呂越、尉亞寧：《複雜網絡與社會網絡分析的比較研究》，《系統工程理論與實踐》2020 年第 7 期。

④ James E. Rauch, "Networks versus Markets in International Trade," *Journal of International Economics*, vol. 48, no. 1 (June 1999), pp. 7-35.

⑤ Stefania Vitali, James B. Glattfelder, Stefano Battiston, "The Network of Global Corporate Control," *PLoS ONE*, vol. 6, no. 10 (October 2011), e25995.

交易網絡，並研究了世界原油交易網絡的拓撲性質；[①] 還有從供需角度開發了鎳礦貿易網絡，基於迭代算法模型對鎳礦交易網絡進行了優化，降低了不同範圍的交易成本。[②]

當前關於貿易網絡的實證研究仍主要集中於傳統工業品領域，缺乏對高科技產品的研究。儘管國內學者已開始探索世界高技術產品貿易網絡的結構特徵，並基於網絡指標分析評估了中國在該網絡中的貿易地位，為應對國際貿易摩擦提供了政策建議，但現有研究主要關注貿易網絡的指標，而未對高技術產品的產業鏈進行深入分析。[③]

（二）地緣政治關係影響半導體產業鏈貿易的分析框架

從網絡之間相互影響的角度來講，政治與經濟之間存在緊密聯繫。地緣政治關係對半導體產業鏈中關鍵產品的貿易具有顯著影響：一方面，在政治衝突後政府會選擇一定程度上與衝突方脱鈎，重新選擇共享價值的貿易夥伴，將部分價值鏈「友岸外包」；[④] 另一方面，政治合作可以降低貿易摩擦和不確定性，增強各國之間的互信，通過互惠共贏促進半導體貿易的發展。

---

① Ruijin Du, Ya Wang, Gaogao Dong, Lixin Tian, Yixiao Liu, Minggang Wang, Guochang Fang, "A Complex Network Perspective on Interrelations and Evolution Features of International Oil Trade, 2002-2013," *Applied Energy*, vol. 196（June 2017）, pp. 142-151.

② Xiaojuan Dong, Feng An, Zhiliang Dong, Ze Wang, Meihui Jiang, Ping Yang, Haigang An, "Optimization of the International Nickel Ore Trade Network," *Resources Policy*, vol. 70（March 2021）, 101978.

③ 曲如曉、李婧：《世界高技術產品貿易格局及中國的貿易地位分析》，《經濟地理》2020 年第 3 期。

④ Cui, V., I. Vertinsky, Y. Wang, and D. Zhou, "Decoupling in International Business: The 'New' Vulnerability of Globalization and MNEs' Response Strategies," *Journal of International Business Studies*, vol. 54, no. 8, 2023, pp. 1562-1576.

地緣政治合作主要通過簽署貿易合作協定和推動國際資本投資兩種方式影響半導體貿易的上游[①]。區域貿易協定可能會產生技術溢出效益，包含技術相關條款的區域貿易協定將更有助於增加貿易，[②]這一行動也可以幫助低技術水平的國家獲得高科技貿易產品。此外，國際資本投資還可以對出口國產生積極影響，例如 RCEP（區域綜合經濟夥伴關係）可以增加參與國製造業的雙邊和多邊貿易，[③]幫助穩定上游半導體和紡織品的供應。[④]地緣政治衝突包括戰爭、政治衝突、經濟制裁、技術封鎖等。[⑤]戰爭和政治衝突將中斷產業鏈各個階段的貿易。[⑥]

本文分析思路如圖 1 所示，首先勾勒地緣政治關係網和半導體產業鏈全球網絡，然後從網絡演化的角度揭示地緣政治關係網絡對半導體產業鏈貿易網絡的影響機制。邊以及互惠性（mutual）作為內生網絡結構效應變量，影響自身貿易網絡的形成，同時將地緣政治關係網絡作為外部網絡效應變量納入模型之中。

---

① Sheng, L., & do Nascimento, D. F. *The Belt and Road Initiative in South-South Cooperation*: *The Impact on World Trade and Geopolitics*, 2021, Singapore: Palgrave Macmillan.

② Martínez-Zarzoso, I., and S. Chelala, "Trade Agreements and International Technology Transfer," *Review of World Economics*, vol. 157, 2021, pp. 631-665.

③ Zhu, N., Y. Wang, S. Yang, L. Lyu, K. Gong, X. Huang, and S. Huang, "Structure Characteristics and Formation Mechanism of the RCEP Manufacturing Trade Network: An ERGM Analysis," *Physica A*: *Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 635, 2024, p. 129488.

④ Jiang, H., and M. Yu, "Understanding RCEP and CPTPP: From the Perspective of China's Dual Circulation Economic Strategy," *China Economic Journal*, vol. 14, 2021, pp. 144-161.

⑤ Monge, M., L. A. Gil-Alana, and F. P. de Gracia, "Crude Oil Price Behaviour Before and After Military Conflicts and Geopolitical Events," *Energy*, vol. 120, 2017, pp. 79-91.

⑥ Ngoc, N. M., D. T. Viet, N. H. Tien, P. M. Hiep, N. Anh, L. Anh, N. Truong, N. Anh, L. Trung, and V. Dung, "Russia-Ukraine War and Risks to Global Supply Chains," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 7, 2022, pp. 633-640.

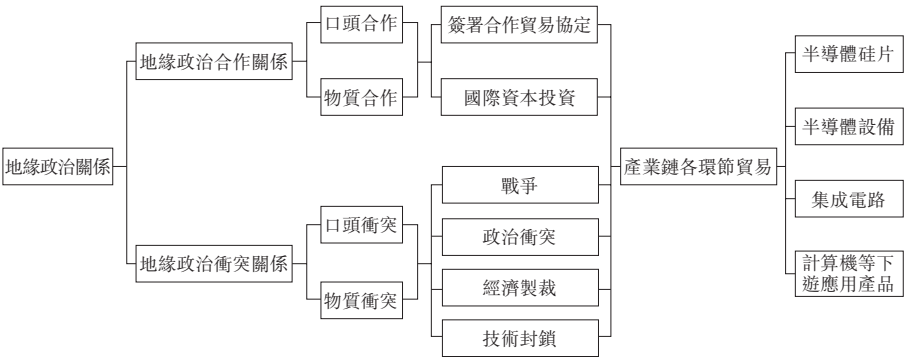


圖 1　分析框架

（三）研究方法

1. 複雜網及其指標體系

（1）複雜網概念

複雜網絡是一種用於描述複雜系統結構的圖論模型。一個網絡由節點（或頂點）的集合 $V=\{v_i\}$ 以及節點之間的連接 $E=\{e_{ij}\}$ 的集合組成，網絡可被記為 $G=（V，E）$。

網絡可以通過一個 $N\times N$ 的鄰接矩陣來表示，其中 N 是網絡中節點的數量。如果網絡中的節點之間存在連接，則對應的矩陣元素 a_{ij} 值為 1，否則 a_{ij} 值為 0。

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

（2）網絡分類

複雜網絡可根據連接方式和權重進一步分類：按方向性可分為無向網絡和有向網絡，其中無向網絡的節點連接是雙向的（滿足 $e_{ij}=e_{ji}$），而有向網絡中，連接的關係是單向的，即 $e_{ij}\neq e_{ji}$。按邊的權重可分為

加權網絡和無權網絡。無權網絡只表示是否有連接，邊無權重；加權網絡中邊具有權重，可表示關係強度、影響力大小等。本文所用到的網絡都是加權有向網絡。

（3）加權鄰接矩陣

若邊 e_{ij} 的權重為 w_{ij}，則鄰接矩陣中 A 的元素 a_{ij} 可以表示成：

$$a_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & e_{ij} \in E \\ 0, & e_{ij} \notin E \end{cases} \quad (1)$$

複雜網結構及節點指標含義及計算公式，見表 1 和表 2。

表 1　複雜網絡的整體結構指標含義與計算公式

指標	指標含義	計算公式	指標評價
節點數	網絡中節點總數	N	節點數越多，網絡規模越大
邊數	網絡中邊總數	L	邊數越多，網絡規模越大
密度	網絡的覆蓋程度	無向網絡：$2L/N\ (N-1)$ 有向網絡：$L/N\ (N-1)$	取值範圍為 0 — 1，值越接近於 1，網絡密度越大
關聯度	網絡中節點之間的關聯程度	$C = 1 - \frac{V}{N(N-1)/2}$ 其中 V 是該網絡中不可達的點對數目	兩個點之間的途徑越多，關聯度越大
聚類係數	網絡中節點的集聚程度	$C = \frac{2e_i}{k_i(k_i-1)}$ k_i 為節點 i 的邊數，e_i 為與節點 i 所有鄰居節點之間實際存在的邊數	聚類係數越高，網絡越緊密
平均最短路徑	指網絡中兩點之間最短路徑長度的平均值	$L = \sum_{i \neq j}^{n} l_{i,j}/(N-1)$ 其中 $l_{i,j}$ 為國家或地區 i 和國家或地區 i 之間的最短路徑長度	平均最短路徑越短，網絡越緊密
互惠性	網絡中節點之間的關係是否具有相互性	$r = \frac{\sum_{i \neq j}^{n}(a_{ij}-\bar{a})(a_{ji}-\bar{a})}{\sum_{i \neq j}^{n}(a_{ij}-\bar{a})^2}$	值越大，網絡雙向連接的程度越高
小世界係數	網絡是否具有小世界特性	$\sigma = \gamma/\lambda$ 其中 $\gamma = C_{real}/C_{rand}$；$\lambda = L_{real}/L_{rand}$ C_{real} 和 C_{rand} 分別是該網絡和隨機網絡的聚類係數，L_{real}/L_{rand} 分別是該網絡和隨機網絡的特徵路徑長度	值大於 1，意味着節點之間具有較短的平均最短路徑長度，同時又存在較高的聚類係數，即網絡具有小世界網絡特性

表 2　複雜網絡的節點重要性指標含義與計算公式

指標	指標含義	計算公式	指標評價
入度中心性	流入方向的數量	$ODC_i = \sum_j a_{ij} /(N-1)$	值越大，表明與其有聯繫的節點數量越多，其在網絡中的地位越重要
出度中心性	流出方向的數量	$IDC_i = \sum_j a_{ij} /(N-1)$	
加權入度中心性	流入規模	$ODC_i = \sum_j w_{ij}a_{ij} /(N-1)$	
加權出度中心性	流出規模	$ODC_i = \sum_j w_{ij}a_{ij} /(N-1)$	
PageRank 中心度	鄰居節點數量與節點值的求和迭代	$x_i = c/\sum_{j=1}^{N} a_{ij}x_j$	值越大節點越重要，考慮了鄰接節點的數量與質量
中介中心度	通過該節點的最短路徑的相對數量	$BC_i = 2B_i/(N-2)(N-1)$	值越大，對關係的控制力越大，其他國家或地區對其依賴程度越高，衡量一個節點作為中介者的能力

2. ERGM 的相關研究

指數隨機圖模型（Exponential Random Graph Model，簡稱 ERGM）是一種用於分析網絡結構和節點關係的統計建模方法。該方法通過引入網絡中的局部結構特徵（如三元閉合、互惠關係、度數分佈等）以及節點或邊的屬性變量（如地理距離、經濟規模、制度差異等），以概率方式建模網絡中邊的形成機制。ERGM 克服了傳統回歸方法在處理網絡數據時由於觀察值間相互依賴性而導致的模型失效問題。[①]

ERGM 的核心思想是在統計建模中顯式引入網絡結構依賴，通

① Cranmer, S. J., T. Heinrich, and B. A. Desmarais, "Reciprocity and the Structural Determinants of the International Sanctions Network," *Social Networks*, vol. 36, 2014, pp. 5-22.

過最大似然估計等方法獲取各結構項的參數估計值，從而推斷影響關係建立的潛在機制。該方法不僅適用於靜態網絡分析，也可拓展為TERGM（Temporal ERGM）等形式，以考察網絡結構隨時間的演化規律。[①]

ERGM 常用於分析社會網絡、政策協同網絡、技術合作網絡、國際貿易與投資網絡等複雜結構系統，特別適合研究節點間存在相互依賴性、結構閉合性較強的關係數據。在國際貿易網絡研究中，ERGM 方法被廣泛應用於識別國家間貿易聯繫形成的內生結構機制及外在影響因素。例如，國內學者基於 ERGM 分析了「一帶一路」沿線國家高端製造業貿易網絡的結構特徵；[②] 另有學者利用動態 ERGM 建模國家間貿易依賴關係的演進趨勢；[③] 學者也發現在政治網絡研究中應用 ERGM 可解釋經濟制裁網絡中的結構相互性與動態演化。[④]

ERGM 方法的優勢在於能系統刻畫網絡形成的結構依賴與屬性效應，在控制變量基礎上精確估計邊的生成概率，因而日益成為網絡分析領域的重要方法工具，特別適用於處理節點之間具有高度相互依賴特徵的貿易與投資網絡數據。

---

① Hanneke, S., W. J. Fu, and E. P. Xing, "Discrete Temporal Models of Social Networks," *Electronic Journal of Statistics*, vol. 4, 2010, pp. 585-605.

② 許和連、孫天陽、成麗紅：《「一帶一路」高端製造業貿易格局及影響因素研究——基於複雜網絡的指數隨機圖分析》，《財貿經濟》2015 年第 12 期。

③ 劉林青、閆小斐、楊理斯等：《國際貿易依賴網絡的演化及內生機制研究》，《中國工業經濟》2021 年第 2 期。

④ Cranmer, S. J., T. Heinrich, and B. A. Desmarais, "Reciprocity and the Structural Determinants of the International Sanctions Network," *Social Networks*, vol. 36, 2014, pp. 5-22.

三、地緣政治關係與半導體產業鏈全球貿易網絡的構建與特徵

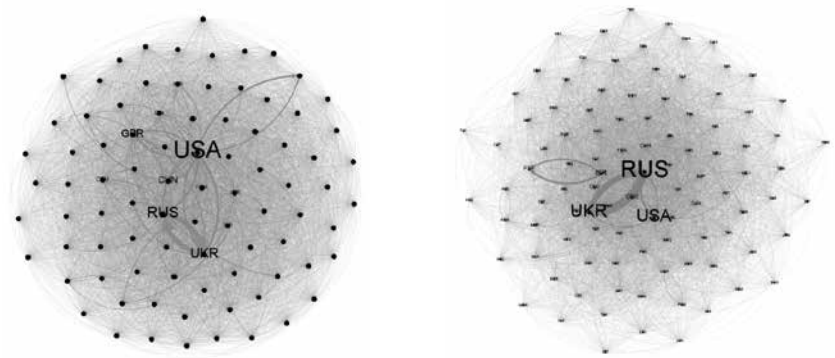
（一）地緣政治關係網絡的構建

GDELT（Global Database of Events, Language, and Tone）數據庫是由谷歌支持、美國學者 Kalev Leetaru 於 2013 年創建的全球性新聞事件數據庫。該數據庫實時收集來自全球的新聞報道（包括電視、電台、網絡等），利用文本分析技術提取事件的時間、地點、參與方、事件類型及情感傾向等信息，每 15 分鐘更新一次，為地緣政治研究提供了高頻率、結構化的大數據資源。本文選取 2011 年至 2022 年的 GDELT 事件數據，重點分析地緣政治合作與衝突事件。事件依據 CAMEO 分類標準進行編碼，分為口頭合作、物質合作、口頭衝突和物質衝突四類。通過統計每對國家（或地區）間一年內的合作和衝突事件數量，分別定義合作強度和衝突強度，用於構建地緣政治關係網絡。

在網絡中，節點代表國家（地區），邊代表國家間的合作或衝突關係，邊的權重由事件頻次決定，分別形成合作網絡與衝突網絡。數據通過 Python 從 GDELT 官網提取並預處理，確保分析涵蓋全球範圍內多樣化且動態變化的政治互動。

1. 網絡拓撲結構分析

圖 2 為 2022 年地緣政治合作與衝突關係網絡拓撲結構示意圖，節點用 ISO 代碼表示國家，字體大小代表加權度，邊寬表示合作 / 衝突強度。美、俄、烏、英、中是地緣政治重要參與者，合作網絡中影響力排序為美、俄、烏、英、中；衝突網絡裏，俄影響力最強，接着是



合作網　　衝突網

圖 2　地緣政治關係網絡（2022 年）

美、烏、英、中、以。在「俄烏衝突」中俄對烏的衝突事件更多。儘管地緣政治衝突不斷，但相對而言合作網絡更密集，合作事件比衝突事件頻繁，顯示合作仍是國際社會發展主題。

2. 網絡緊密度分析

選取 2012 年至 2022 年數據，運用複雜網整體結構公式，分別計算地緣政治合作關係網和地緣政治衝突關係網的點數、平均度、網絡密度、網絡關聯度、平均最短路徑、互惠性、聚類係數和小世界係數。研究發現：第一，兩類網絡小世界係數 $\sigma > 1$（2022 年合作網 σ 為 1.363，衝突網 σ 為 1.747），意味着合作與衝突網絡都具有小世界網絡特性，即具有相對較小的特徵路徑長度和相對較大的聚類係數，顯示出兩個網絡具有局部密集連接和高傳播效率的特徵。第二，合作網絡在平均度和密度方面大於衝突網絡；合作網絡的平均最短路徑短於衝突網絡，說明國家間參與合作互動的事件頻率高於參與國家間參與衝突事件的頻率；在聚類係數和互惠性兩個指標上，合作網絡均高於衝突網絡，這表明目前國際合作的緊密程度依然大於國際衝突。

圖 3、圖 4 基於 GDELT 數據庫，統計中美及中國大陸與中國台灣地緣政治衝突事件數量變化。2011—2022 年中美衝突事件數呈上升趨勢，尤其是在 2018 年和 2020 年出現激增，這與特朗普 2018 年發動對華貿易戰、限制對華高端芯片出口以及 TikTok 與微信禁令實施相呼應。限制華為獲得台積電高端芯片，也影響中國台灣半導體產業，這也必然影響貿易網絡格局變化。2016 年蔡英文不承認「九二共識」以及 2022 年佩洛西竄訪台灣，都導致中國大陸與中國台灣衝突事件數增

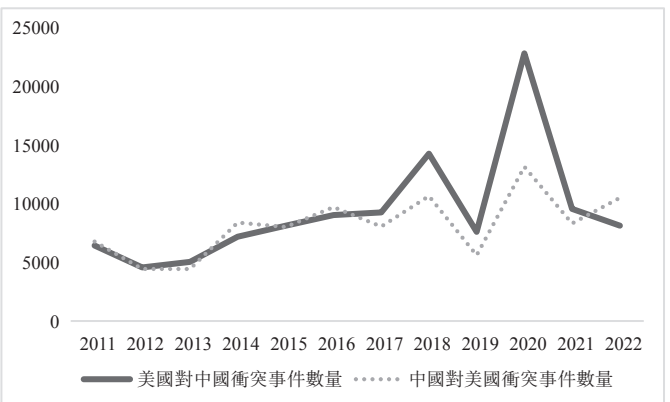


圖 3　2011—2022 年中國與美國之間的地緣政治衝突事件數量

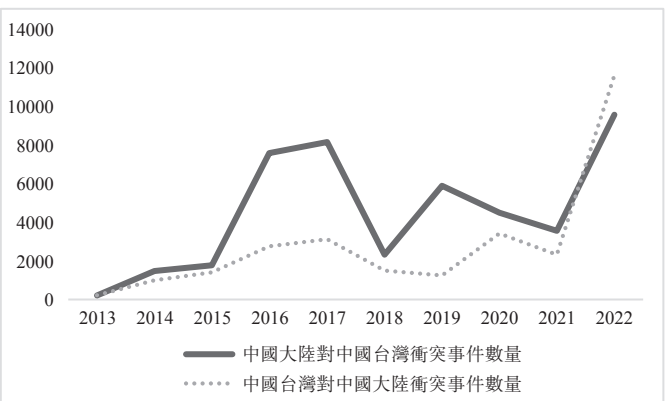


圖 4　2013—2022 年中國大陸與中國台灣之間的地緣政治衝突事件數量

加，並在 2022 年達新高。

3. 網絡控制力分析

表 3 展示了 2012 至 2022 年主要國家在合作網絡中的中介中心度排名變動。總體來看，美國長期居首，顯示其在國際合作中的扮演着主導角色。但在 2022 年美國的主導地位被英國取代，網絡權力出現重新分配的趨勢。法國和中國協調地位保持前列，近年來穩居第 4，反映其在區域合作中的橋樑作用不斷增強。澳大利亞、加拿大等國家交替上榜，說明其在特定區域內具備重要的協調功能。總體趨勢表明，全球合作網絡正由美主導的單極結構逐步向多中心格局演變。

表 3　合作網絡中介中心度排名

中介中心度排名	2012	2014	2016	2018	2020	2022
1	美國	美國	美國	美國	美國	英國
2	法國	加拿大	法國	法國	法國	法國
3	澳大利亞	中國	澳大利亞	德國	中國	美國
4	英國	法國	英國	中國	英國	中國
5	中國	英國	中國	澳大利亞	澳大利亞	日本
6	日本	日本	德國	英國	日本	澳大利亞
7	加拿大	新西蘭	意大利	日本	加拿大	俄羅斯
8	意大利	澳大利亞	日本	加拿大	意大利	德國
9	德國	土耳其	加拿大	俄羅斯	俄羅斯	加拿大
10	俄羅斯	意大利	阿聯酋	新西蘭	德國	沙特阿拉伯

表 4 顯示在 2012 — 2022 年間，美國在衝突網絡中介中心度始終排名第一。這表明美國在全球地緣政治衝突網絡中一直處於極為關鍵的中介位置，能在很大程度上影響其他國家間衝突關係的發展、協調

等，突顯其在國際衝突格局中較強的干預和掌控能力。英國、法國在多數年份裏排名靠前且較穩定：英國除 2020 年排第三外，其餘年份均列第二；法國除 2020 年排第四外，其他年份在第三左右。這説明英法在國際衝突網絡中也扮演着重要中介角色，有一定影響力。中國的排名從 2012 年的第五和 2014 年的第七，到 2020 年和 2022 年躍升至第二，反映出中國在國際衝突網絡中的地位逐漸上升，在國際地緣政治衝突協調等方面的作用日益突顯。

表 4　衝突網絡中介中心度排名

中介中心度排名	2012	2014	2016	2018	2020	2022
1	美國	美國	美國	美國	美國	美國
2	英國	英國	英國	英國	中國	中國
3	法國	法國	法國	法國	英國	法國
4	澳大利亞	日本	日本	中國	法國	俄羅斯
5	中國	澳大利亞	中國	澳大利亞	澳大利亞	澳大利亞
6	以色列	加拿大	澳大利亞	日本	日本	日本
7	加拿大	中國	西班牙	意大利	德國	意大利
8	日本	俄羅斯	加拿大	加拿大	意大利	德國
9	德國	德國	德國	德國	加拿大	西班牙
10	荷蘭	菲律賓	新西蘭	俄羅斯	俄羅斯	加拿大

（二）半導體產業鏈全球貿易網絡的構建與特徵

半導體產業鏈包括半導體硅片的製造、集成電路的生產、封裝與測試，以及最終產品的下游應用領域，如圖 5 所示（虛線框中的產品不在本文的範圍內）。

本文借鑒有關學者的做法，在半導體產業鏈的四個環節分別選擇一種典型商品進行研究，即上游半導體硅片、上游半導體設備、中游集成電路、下游電子計算機和元件。[①] 具體的商品名稱和 HS 代碼見下表 5。本文所引用的貿易數據均來源於聯合國貿易統計數據庫網站，其中有世界各個國家或地區的依據 HS 代碼分類的產品貿易數據（https://comtrade.un.org/data/）。所選數據為 2011—2022 年世界各國的進口貿易數據。

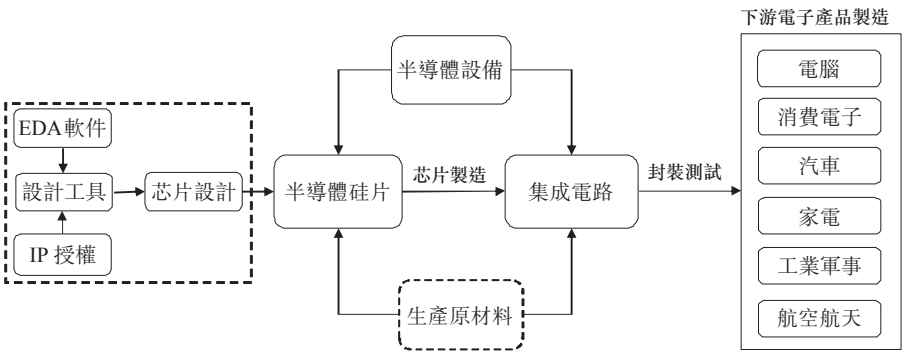


圖 5　半導體產業鏈

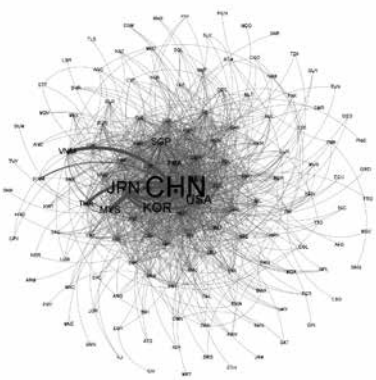
表 5　四種典型商品的 HS 代碼及其產業鏈環節

商品	HS 代碼	產業鏈環節
化學元素；摻雜用於電子產品，以圓盤、晶圓或類似形式存在；用於電子產品的摻雜化合物（即以上所稱半導體硅片）	381800	上游
專門或主要用於製造半導體球或晶圓、半導體器件、電子集成電路或平板顯示器的機器和設備（以下簡稱為半導體設備）	8486	上游
電子集成電路（即以上所稱芯片）	8542	中游
自動數據處理機器及其裝置（以下簡稱為計算機）	8471	下游

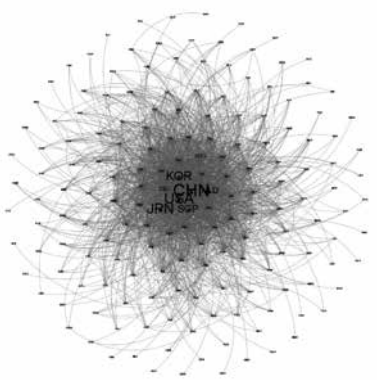
① Zhang, Y. L., and X. D. Zhu, "Analysis of the Global Trade Network of the Chip Industry Chain: Does the U.S.-China Tech War Matter?," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, 2023, p. e17092.

1. 網絡拓撲結構分析

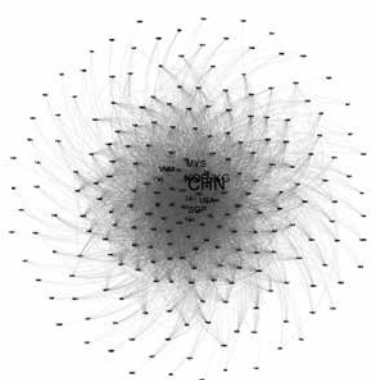
圖 6 是 2022 年半導體產業鏈上、中、下游典型產品貿易網絡圖，字體大小表示加權程度，邊寬代表貿易額。上游硅片貿易網絡結構最簡單，下游最複雜，網絡連邊稀疏程度為硅片 > 半導體設備 > 集成電路 > 計算機。上游是技術密集型，資金研發投入大，集中在少數技術領先發達國家，且硅片價值量小於中、下游。中國「世界工廠」的角色在半導體產業鏈上游、中游、下游貿易中發揮着非常重要的作用，



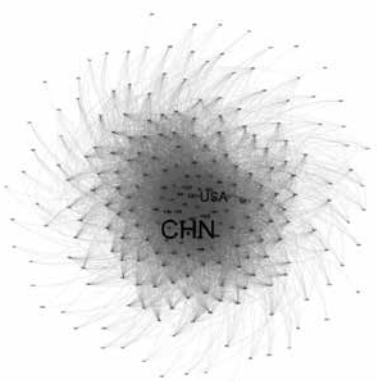
上游半導體硅片貿易網絡



上游半導體設備貿易網絡



中游芯片貿易網絡



下游計算機貿易網絡

圖 6 半導體產業鏈貿易網絡（2022 年）

美日韓是上游產業的重要成員，中國香港、新加坡、韓國等是芯片主要貿易參與者。在半導體產業鏈下游計算機上，中美穩居前二的貿易地位。

2. 網絡緊密度及演化分析

為剖析半導體產業鏈四類產品貿易網絡結構的緊密程度及演變趨勢，本文選取網絡關聯度、密度、聚類係數與平均最短路徑四個指標，對 2011—2022 年期間的貿易狀況展開研究，具體見圖 7 和圖 8。

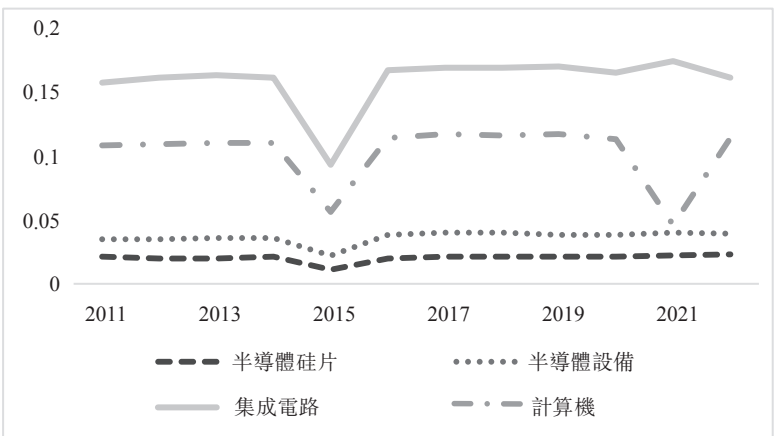


圖 7　半導體產業鏈貿易網絡密度的演化

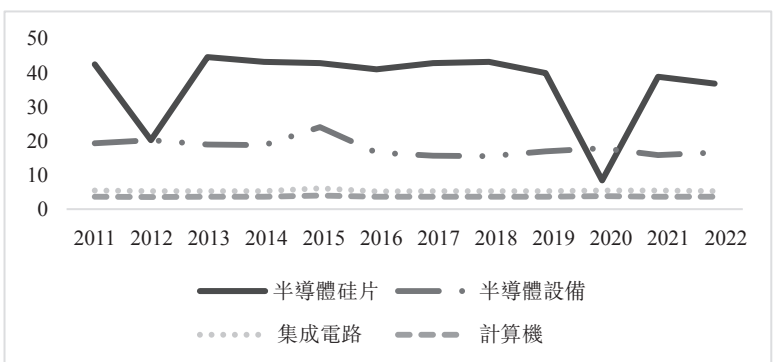


圖 8　半導體產業鏈小世界係數的演化

首先，平均度和網絡密度顯示出「上游 < 中游 < 下游」的格局。上游硅片與設備的貿易聯繫最稀疏，說明合作範圍有限，仍有擴展空間；中下游的芯片與電子計算機聯繫更密切，貿易更活躍。其次，聚類係數和小世界係數進一步說明，上游網絡緊密性低，但小世界性強，尤其硅片環節國家雖少、聯繫稀疏，卻能通過少數關鍵節點快速連接全球。

從時間看，2015 年和 2021 年是兩個波動點。2015 年下游「供大於求」導致網絡整體收縮；2021 年疫情引發芯片短缺，芯片網絡顯著萎縮，反映產業鏈對全球事件高度敏感。

總體來看，半導體產業鏈呈現出從上游到下游聯繫增強的趨勢，結構性差異與周期性波動並存，為理解全球半導體合作與風險暴露提供了重要參考。

3. 網絡影響力分析

結合表 6 和表 7 可知，在出口方面，美國主導的「芯片四方聯盟」（美、韓、日、中國台灣地區企業）主導全球半導體產業鏈中半導體硅片、半導體設備和芯片，是相關產品重要出口源；而中國、墨西哥等是下游計算機電子產品最大出口國；中國還是半導體硅片的最大出口國。在進口方面，中國對在半導體硅片、半導體設備、芯片等三種商品需求高，進口額排第一；而在下游計算機類電子產品中，美國和中國等是重要進口方。

本文採用社會網絡分析方法，從加權度、PageRank 中心度與中介中心度三個維度評估各國在半導體產業鏈貿易網絡中的地位，具體結果見表 8 和表 9。三種指標各有側重：加權度反映國家總體進出口貿易量和貿易關係廣度；PageRank 中心度衡量一個國家被「重要國家」連

接的程度，體現其結構嵌入性與被依賴程度；中介中心度則側重其在全球貿易路徑中充當「橋樑」的能力，即路徑控制力。

表 6　2022 年半導體產業鏈出口貿易額排名前十國家（地區）

出口貿易額排名	半導體硅片	半導體設備	芯片	計算機
1	中國	日本	中國台灣	中國
2	日本	美國	中國	墨西哥
3	中國台灣	荷蘭	韓國	中國台灣
4	美國	新加坡	馬來西亞	泰國
5	韓國	韓國	新加坡	荷蘭
6	新加坡	德國	日本	美國
7	德國	中國台灣	美國	德國
8	法國	馬來西亞	菲律賓	馬來西亞
9	馬來西亞	中國	越南	越南
10	越南	奧地利	泰國	捷克

表 7　2022 年半導體產業鏈進口貿易額排名前十國家（地區）

進口貿易額排名	半導體硅片	半導體設備	芯片	計算機
1	中國	中國	中國	美國
2	韓國	韓國	中國香港	中國
3	馬來西亞	美國	新加坡	德國
4	美國	新加坡	韓國	中國香港
5	新加坡	荷蘭	越南	荷蘭
6	越南	日本	馬來西亞	日本
7	日本	愛爾蘭	美國	英國
8	泰國	馬來西亞	日本	印度
9	德國	德國	德國	法國
10	法國	法國	泰國	捷克

表 8　2022 年上游半導體硅片與半導體設備貿易網絡不同中心度指標排名

排名	半導體硅片			半導體設備		
	加權度	PageRank 中心度	中介中心度	加權度	PageRank 中心度	中介中心度
1	中國	日本	美國	中國	美國	美國
2	日本	中國	中國	美國	日本	中國
3	韓國	美國	荷蘭	日本	中國	新加坡
4	美國	韓國	德國	韓國	新加坡	韓國
5	馬來西亞	德國	法國	新加坡	德國	德國
6	新加坡	新加坡	韓國	荷蘭	荷蘭	法國
7	越南	法國	英國	德國	韓國	荷蘭
8	德國	意大利	瑞典	馬來西亞	馬來西亞	尼日爾
9	泰國	英國	意大利	愛爾蘭	英國	英國
10	法國	馬來西亞	愛爾蘭	奧地利	奧地利	尼日利亞

表 9　2022 年半導體與計算機貿易網絡不同中心度指標排名

排名	芯片			計算機		
	加權度	PageRank 中心度	中介中心度	加權度	PageRank 中心度	中介中心度
1	中國	中國香港	德國	中國	中國	法國
2	韓國	中國	美國	美國	泰國	美國
3	中國香港	印度	中國	墨西哥	韓國	英國
4	馬來西亞	新加坡	英國	德國	馬來西亞	荷蘭
5	新加坡	馬來西亞	法國	荷蘭	美國	德國
6	美國	韓國	新加坡	泰國	越南	新加坡
7	越南	德國	荷蘭	中國香港	新加坡	丹麥
8	日本	美國	韓國	英國	墨西哥	愛爾蘭
9	菲律賓	越南	泰國	日本	菲律賓	波蘭
10	泰國	荷蘭	西班牙	捷克	荷蘭	瑞士

在上游環節（半導體硅片與設備）中，中國雖然加權度排名第一，說明其貿易規模最大、覆蓋面最廣，但在 PageRank 和中介中心度上的表現不及美國與日本。這反映出中國雖為重要市場，但其在高端設備與材料方面仍依賴於技術領先國家，尚未成為結構性主導者和關鍵中轉樞紐。相較之下，美國、日本不僅自身重要，還深度嵌入多個核心國家的貿易網絡，在結構影響力與路徑控制方面佔據優勢。

在下游環節（芯片與電子計算機）中，中國及中國香港的 PageRank 與中介中心度顯著上升。中國憑藉其強大的製造能力和市場規模，在整機與芯片產品中佔據核心地位。同時，中國香港在半導體貿易中展現出極高的 PageRank 與中介中心度，其本地雖無製造能力，但作為轉口中心與調撥樞紐，廣泛連接全球主要貿易國，成為「出口到香港、香港再出口到內地」的關鍵中介。

綜上，中國雖在貿易規模上最強，但其結構嵌入性與路徑控制力在上游仍有差距，而下游則通過香港轉口、整機製造等方式，形成較強的網絡中心性；香港在半導體貿易中表現出「全球調撥樞紐」功能，體現出「出口到香港、香港再出口到內地」的轉口模式在網絡中的結構性重要性。

根據聯合國貿易統計處數據，2022 年中國香港半導體出口佔全球貿易總額 19%，貿易規模居全球首位。因香港本地無半導體製造業，且據香港統計局數據，其 80% 的半導體轉口至內地，故中國香港是全球半導體產品集散中心，形成「出口至香港，再由香港轉口至內地」的芯片貿易格局。

四、地緣政治關係影響下半導體產業鏈貿易網絡的機制及演化分析

（一）ERGM 變量選取

本文研究的因變量代表了貿易網絡中貿易關係的存在與否（關係存在即為 1，否則為 0）的概率。ERGM 模型通常假設網絡關係主要受內生網絡結構變量、內生節點屬性變量和外生網絡變量的影響，常見的主要統計數據如下表 10 所示。本文的研究對象為 244 個國家（地區），時間跨度為 2011—2022 年。本章的 ERGM 和 TERGM 使用 R 軟件進行擬合。

表 10　ERGM 中相關的變量

分類	變量	變量含義	數據來源	假設檢驗
內生網絡結構效應變量	edges	網絡邊的數量	作用類似於計量模型中的常數項	一般不作解釋
	mutual	節點之間的互惠關係	局部網絡結構	國家（地區）間是否更傾向於存在雙向的貿易關係
節點屬性變量	GDP	國內生產總值	世界銀行	國民生產總值是否影響節點之間貿易關係的建立
	FDI	外國直接投資	世界銀行	外國直接投資是否影響節點之間貿易關係的建立
	POP	人口數量	世界銀行	人口是否影響節點之間貿易關係的建立
	COOD	各國家（地區）參與合作網絡的度	由合作網絡計算得出	一國與他國的地緣政治合作是否影響其貿易關係的建立
	COND	各國家（地區）參與衝突網絡的度	由衝突網絡計算得出	一國與他國的地緣政治衝突是否影響其貿易關係的建立

續表

分類	變量	變量含義	數據來源	假設檢驗
外生網絡變量	COO	各國間的地緣政治合作	由合作網絡計算得出	合作網絡的關係是否影響貿易網絡關係的建立
	CON	各國間的地緣政治衝突	由衝突網絡計算得出	衝突網絡的關係是否影響貿易網絡關係的建立
	CGB	兩國土地接壤，網絡的邊為 1，否則為 0	CEPII 數據庫	接壤網絡的關係是否影響貿易網絡關係的建立
	DIST	各國間的地理距離	CEPII 數據庫	合作網絡的關係是否影響貿易網絡關係的建立
	LANG	兩國官方語言相同，網絡的邊為 1，否則為 0	CEPII 數據庫	語言網絡的關係是否影響貿易網絡關係的建立

（二）半導體產業鏈貿易網絡的 ERGM 結果分析

1. ERGM 實證結果

運用指數隨機圖模型（ERGM），針對地緣政治關係網絡對上游硅片、半導體設備，以及中游芯片和下游計算機這四類產品國際生產網絡的影響展開實證分析。模型中引入了三類變量，即內生網絡結構變量（如邊數 edges、互惠性 mutual）、節點屬性變量（如 GDP、FDI、人口等）以及外生網絡變量（如地緣政治合作 / 衝突、語言、距離等），具體變量定義見表 10。實證結果見綜合模型估計表 11。

在內生網絡結構變量方面，實證結果表明，在所有四類產品中 edges 係數均顯著為負（$p<0.01$），顯示網絡結構具有稀疏性，即在控制了其他因素後，邊的增加不太可能自然發生（大規模貿易聯繫不易生成）。而 mutual 係數均顯著為正，表明國家之間更傾向於建立雙向的互惠貿易關係。這一結果反映出國際生產網絡並非隨機形成，而具有較強的結構傾向性。

表 11　綜合模型下 ERGM 的實證結果

	上游 - 硅片	上游 - 半導體設備	中游 - 芯片	下游 - 計算機
內生網絡結構				
edges	−4.0388***	−4.4965***	−2.9742***	−2.5505***
	(0.0409)	(0.0529)	(0.0251)	(0.0225)
mutual	3.5844***	3.8380***	2.8520***	2.6679***
	(0.0803)	(0.1109)	(0.0464)	(0.0397)
節點屬性變量				
GDP	−0.0125***	−0.0125***	−0.0117***	−0.0094***
	(0.0011)	(0.0014)	(0.0009)	(0.0008)
FDI	0.0012***	0.0012***	0.0009***	0.0007***
	(0.0001)	(0.0001)	(0.0000)	(0.0000)
POP	0.0956***	0.0882***	0.0931***	0.0704***
	(0.0075)	(0.0096)	(0.0057)	(0.0057)
COND	−0.0382***	−0.0509***	−0.0125***	−0.0056**
	(0.0042)	(0.0052)	(0.0029)	(0.0027)
COOD	0.0032*	0.0059**	0.0099***	0.0124***
	(0.0018)	(0.0023)	(0.0012)	(0.0012)
外生網絡變量				
CON	−1.1600***	−1.4134***	−1.8447***	−1.3313***
	(0.2816)	(0.3203)	(0.3739)	(0.4003)
COO	0.8646***	1.0603***	1.2730***	1.2349***
	(0.1852)	(0.2074)	(0.2515)	(0.2412)
CGB	1.0414***	1.0996***	0.9471***	0.9302***
	(0.1009)	(0.1135)	(0.0849)	(0.0754)
DIST	−0.0000***	−0.0001***	−0.0000***	−0.0000***

續表

	上游 - 硅片	上游 - 半導體設備	中游 - 芯片	下游 - 計算機
	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)
LANG	−0.3227***	−0.3395***	−0.3094***	−0.0807***
	(0.0614)	(0.0825)	(0.0377)	(0.0279)
AIC	14421.8621	9229.1195	33565.4966	43109.0107
BIC	14529.7448	9337.0022	33673.3793	43216.8934
Log Likelihood	−7198.9310	−4602.5597	−16770.7483	−21542.5053

註：*、**、*** 分別表示 10%、5%、1% 的顯著性水平，括號內為標準誤。下同。

在節點屬性方面，GDP 的係數在所有模型中均為負且顯著（$p<0.01$），表明經濟規模較大的國家不一定更可能在雙邊生產網絡中建立關係，反而更傾向於在單向的生產鏈中扮演主導或集成者的角色。FDI 與人口數（POP）的係數均顯著為正，顯示外國直接投資和人口規模對國家間生產聯繫的建立具有顯著促進作用。此外，國家在合作網絡中的「衝突介入度」（COND）顯著為負，而「合作參與度」（COOD）顯著為正，說明國家參與合作越深，其更可能成為生產網絡中的活躍節點。

在外生網絡變量方面，地緣政治衝突（CON）顯著削弱國家間的生產聯繫（係數為負且顯著），而地緣政治合作（COO）則起到顯著促進作用（係數為正）。此外，共享邊界（CGB）和較短地理距離（DIST）也顯著提升國家間合作概率，符合重力模型理論預期。語言相同（LANG）反而顯著為負，可能說明語言障礙並非主要影響因素。地緣政治衝突（CON）/ 合作（COO）影響係數最大，且對產業鏈上下游影響也不同，其中對中游芯片（−1.8447 和 1.2730）影響最大，而對

上游半導體硅片影響係數（−1.1600 和 0.8646）絕對值最小。芯片作為電子高科技和新產業基石，是各國搶佔技術高地的戰略物資，且與民用、軍事產品關聯密切，影響國家安全，[①] 故其貿易與地緣政治友好度聯繫緊密。

2. 穩健性檢驗

本文僅選擇物質合作（衝突）事件重新衡量地緣政治關係，以檢驗上面 ERGM 實證結果的穩健性。表 12 結果顯示，芯片（中游）受地緣政治影響最為顯著，物質衝突對其貿易的抑制作用最強（係數−0.0401），而物質合作則顯著促進貿易（係數 1.5022）；相比之下，計算機（下游）貿易對物質衝突不敏感（係數−0.0031 不顯著），可能因其市場化程度較高。硅片（上游）的貿易雖受衝突顯著抑制，但合作影響較弱；合作和衝突對半導體設備（上游）貿易影響同時顯著。微觀層面總體而言，一國與多國的物質合作（COO）能顯著促進貿易，而物質衝突（CON）則抑制貿易，但宏觀上相較於衝突，地緣政治合作的對產業鏈正面影響範圍有限。內生網絡結構變量（如 GDP、FDI）的影響方向與原模型一致，且模型擬合指標（AIC/BIC）良好，進一步證實了地緣政治因素對半導體產業鏈貿易網絡的穩健影響，尤其是中游環節的敏感性最為突出。

地緣政治關係仍顯著影響貿易形成。上述結果與前文基本一致，驗證了研究結論的穩健性。

① Layton, R., "The Art of Balancing Economic and National Security: Policy Review of Semiconductor Manufacturing," 2020, p. 10.

表 12　綜合模型下 ERGM 的穩健性檢驗

	上游 - 硅片	上游 - 半導體設備	中游 - 芯片	下游 - 計算機
內生網絡結構				
edges	−4.0642***	−4.5038***	−3.0374***	−2.6107***
	(0.0414)	(0.0519)	(0.0266)	(0.0220)
mutual	3.5582***	3.8769***	2.8264***	2.6454***
	(0.0817)	(0.1067)	(0.0472)	(0.0402)
節點屬性變量				
GDP	−0.0139***	−0.0142***	−0.0135***	−0.0107***
	(0.0011)	(0.0014)	(0.0009)	(0.0008)
FDI	0.0010***	0.0009***	0.0008***	0.0006***
	(0.0001)	(0.0001)	(0.0000)	(0.0000)
POP	0.1176***	0.1230***	0.1082***	0.0816***
	(0.0067)	(0.0081)	(0.0056)	(0.0060)
COND	−0.0580***	−0.0291***	−0.0103***	−0.0002
	(0.0090)	(0.0089)	(0.0032)	(0.0027)
COOD	0.2016***	0.1884***	0.1970***	0.1980***
	(0.0120)	(0.0152)	(0.0081)	(0.0076)
外生網絡變量				
CON	−0.0377***	−0.0243*	−0.0401***	−0.0031
	(0.0141)	(0.0139)	(0.0191)	(0.0121)
COO	0.3146	1.3862**	1.5022**	0.4343
	(0.6427)	(0.6796)	(0.7557)	(0.6231)
CGB	1.1871***	1.2792***	1.0397***	1.0115***
	(0.0994)	(0.1075)	(0.0795)	(0.0761)
DIST	−0.0000***	−0.0001***	−0.0000***	−0.0000***

續表

	上游 - 硅片	上游 - 半導體設備	中游 - 芯片	下游 - 計算機
	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)
LANG	−0.4171***	−0.4410***	−0.3759***	−0.1289***
	0.0377***	0.0243*	−0.0101	−0.0031
AIC	14358.8731	9294.9489	33372.1551	42880.1655
BIC	14466.7558	9402.8316	33480.0378	42988.0483
Log Likelihood	−7167.4365	−4635.4744	−16674.0775	−21428.0828

3. 機制分析

為識別地緣政治變量是否通過網絡結構機制影響貿易關係的形成，本文採用指數隨機圖模型（ERGM），參考已有研究所提出的「模型比較法」，構建機制效應分析框架。[①] 具體而言，分別估計兩組模型，其中在一個模型中加入內生網絡結構變量（mutual），另一個則不加。總效應即是在包含所有變量的模型中，對核心變量（CON、COO）平均邊際效應進行估計的結果；直接效應則是在不包含內生網絡結構變量互惠性（mutual）的模型下，對核心變量平均邊際效應進行估計的結果；間接效應是指總效應減去直接效應，用以描述核心變量通過內生網絡結構間接產生的邊際效應變化。

互惠性（mutual）在國際貿易網絡中代表雙向貿易關係，體現國家間的長期合作意願與制度信任。當地緣衝突破壞互惠結構時，貿易網絡的形成就不僅受直接衝擊，還通過結構機制被進一步削弱；反之，

① Long, J. S., and S. A. Mustillo, "Using Predictions and Marginal Effects to Compare Groups in Regression Models for Binary Outcomes," *Sociological Methods & Research*, vol. 50, no. 3, 2021, pp. 1284-1320.

政治合作通過增強互惠結構，能夠提升貿易網絡的黏性和穩定性。

從實證結果看，地緣政治衝突變量（CON）在所有子行業中均顯著抑制貿易網絡的形成，且其間接效應比重在 36.8% 至 40.8% 之間，機制路徑廣泛成立。這表明衝突不僅直接削弱雙邊貿易聯繫，更通過破壞原有互惠性結構，系統性地降低國家間的合作意願。其中，上游半導體設備的機制效應最為顯著（40.80%），說明該行業對互惠結構的依賴程度更高，衝突所造成的結構性損害也更為深遠。

表 13　以內生網絡結構變量為調節變量的機制分析

貿易網絡	核心變量	總效應	直接效應	間接效應	間接效應比重
上游 - 硅片	CON	−0.0471***	−0.0286***	−0.0185	39.34%
		(0.0113)	(0.0075)	(0.0132)	
	COO	0.0387***	0.0213***	0.0173**	44.85%
		(0.0076)	(0.0049)	(0.0090)	
上游 - 半導體設備	CON	−0.0359***	−0.0212***	−0.0146**	40.80%
		(0.0072)	(0.0048)	(0.0084)	
	COO	0.0296***	0.0159***	0.0136**	46.08%
		(0.0048)	(0.0031)	(0.0057)	
中游 - 芯片	CON	−0.2026***	−0.128***	−0.0746**	36.83%
		(0.0352)	(0.0261)	(0.0422)	
	COO	0.1503***	0.0888***	0.0615**	40.93%
		(0.0253)	(0.0179)	(0.0305)	
下游 - 計算機	CON	−0.1903***	−0.1292***	−0.0611	32.10%
		(0.0540)	(0.0395)	(0.0638)	
	COO	0.2023***	0.1145***	0.0878**	43.40%
		(0.0359)	(0.0247)	(0.0428)	

與之相對，地緣政治合作網絡（COO）在四個行業中均對投資網絡形成產生顯著正向作用，且其通過互惠性結構的間接效應比重在 40.93% 至 46.08% 之間，機制效應更為強烈。這意味着政治合作主要是通過增強互惠性結構、夯實合作信任基礎，從而帶動網絡的連接形成。同樣地，在上游半導體設備行業中，機制效應比重最高（46.08%），顯示合作對該行業的推動效果主要依賴於互惠機制的強化。

綜上所述，無論是地緣衝突的消極影響，還是政治合作的積極激勵，其對貿易網絡的作用均大量通過互惠性結構機制傳導。

（三）半導體產業鏈貿易網絡的 TERGM 結果分析

為了進一步檢驗網絡動態效應，本文基於 2011—2022 年地緣政治關係網絡及半導體產業鏈貿易網絡數據，運用時間擴展隨機圖模型（TERGM）分析了上游硅片、上游半導體、中游芯片和下游計算機四大關鍵產業鏈的貿易網絡演化特徵。與 ERGM 相比，TERGM 考慮了網絡數據的時間動態性，引入了穩定性（stability）和變異性（variability）兩個時間依賴變量，分別用於驗證貿易關係的持續性以及模擬數據生成過程中的結構性中斷。

表 14 實證結果顯示，四個產業中 stability 係數均顯著為正，表明國家間一旦形成貿易關係，後續維持該關係的概率較高，具有明顯的路徑依賴性和穩定延續性。這説明產業鏈合作建立在長期信任與制度安排基礎上，短期內變動可能性較低。variability 變量僅在上游硅片產業中顯著為正，表明儘管該網絡結構整體穩定，仍存在一定程度的調

整空間，可能因新興市場進入或技術更迭帶來新的貿易路徑。互惠性（mutual）係數均正，雙向貿易模式顯著促進網絡形成；而 edges 係數顯著為負，說明在不考慮其他因素影響時，國家間自發建立貿易聯繫的基礎概率較低，網絡整體結構較為稀疏。

表 14　綜合模型下 TERGM 的實證結果

	上游 - 硅片	上游 - 半導體設備	中游 - 芯片	下游 - 計算機
內生網絡結構				
edges	−3.1458*	−2.5258*	−1.9811*	−1.5619*
	[−3.9947; −2.6536]	[−3.0743; −2.2595]	[−2.8149; −1.1585]	[−2.1436; −1.1631]
mutual	2.7425*	2.2627*	2.0061*	1.6337*
	[2.0127; 3.4822]	[1.9578; 2.5163]	[1.5098; 2.3167]	[1.4311; 1.8036]
節點屬性變量				
GDP	−0.0057	−0.0036	0.0117	0.0006
	[−0.2352; 0.0026]	[−0.2062; 0.0036]	[−0.1855; 0.0174]	[−0.1967; 0.0100]
FDI	−0.0002	−0.0001	−0.0002	−0.0001
	[−0.0004; 0.0005]	[−0.0003; 0.0005]	[−0.0003; 0.0004]	[−0.0003; 0.0004]
POP	0.0308*	−0.0029	0.0188*	−0.0196
	[0.0033; 0.0977]	[−0.0328; 0.0604]	[0.0016; 0.0808]	[−0.0397; 0.0288]
COND	−0.0548*	−0.0520*	−0.0320*	−0.0268*
	[−0.1446; −0.0208]	[−0.1400; −0.0211]	[−0.0813; −0.0124]	[−0.0676; −0.0093]
COOD	0.0193*	0.0160*	0.0078*	0.0097*
	[0.0105; 0.0361]	[0.0065; 0.0316]	[0.0012; 0.0205]	[0.0028; 0.0231]
外生網絡變量				
CON[[i]]	−0.5643*	−0.5681*	−0.3597*	−0.1706

續表

	上游 - 硅片	上游 - 半導體設備	中游 - 芯片	下游 - 計算機
	[−1.3813; −0.2161]	[−1.0579; −0.2220]	[−1.0238; −0.1207]	[−0.6119; 0.0374]
COO[[i]]	0.3202*	0.2416*	0.0189*	0.0062*
	[−0.2472; 1.2503]	[−0.0428; 0.7190]	[−0.2772; 0.5835]	[−0.1258; 0.2685]
CGB[[i]]	0.8799*	0.7987*	0.6493*	0.6019*
	[0.6677; 1.0091]	[0.6317; 0.9269]	[0.4873; 0.8164]	[0.4100; 0.7825]
DIST[[i]]	−0.4089*	−0.2385*	−0.1245*	−0.1836*
	[−0.4875; −0.2365]	[−0.2864; −0.2754]	[−0.1343; −0.0735]	[−0.1956; −0.1521]
LANG[[i]]	−0.1435*	−0.0872*	−0.1133*	0.0246
	[−0.2162; −0.0932]	[−0.1248; −0.0530]	[−0.1597; −0.0750]	[−0.0253; 0.0563]
時間依賴變量				
stability	2.0704*	2.2678*	1.8112*	1.8364*
	[1.6782; 2.4675]	[2.1323; 2.3734]	[1.5600; 2.0868]	[1.6811; 1.9786]
variability	0.0427*	0.0117	0.0082	0.0046
	[0.0027; 0.1170]	[−0.0153; 0.0708]	[−0.1316; 0.1161]	[−0.0350; 0.0664]
樣本數量	652,212	652,212	652,212	652,212

註：* 表示零假設值在 5% 置信區間外，即拒絕零假設，方括號內為置信區間。

控制變量中，地緣政治合作網絡在多個產業中呈現顯著正向作用，表明地緣政治合作程度越高，國家間越可能建立或維持貿易聯繫。相反，若國家處於地緣衝突對立狀態，則不利於貿易關係的生成或延續。這與 ERGM 實證結果一致。另外該影響在上游硅片和上游半導體設備產業中更為顯著，這與 2022 年靜態分析指出中游芯片受影響最大有別，這可能反映在中美貿易摩擦後，芯片的重要性愈來愈受到

各國的關注。另外，資源稟賦中僅人口（POP）對硅片、芯片貿易顯著正相關；地理接壤（CGB）顯著促進貿易，距離（DIST）負向影響但程度有限。

五、研究結論

在我國芯片進口依賴度高、本土自給率亟待提升以及外部地緣政治環境複雜化的多重壓力下，地緣政治格局演變、去全球化趨勢與國際貿易態勢已成為影響產業發展的核心變量。本研究基於 GDELT 數據庫量化分析地緣政治合作與衝突關係，構建複雜網絡模型，結合 ERGM 及 TERGM 方法，系統探究半導體產業鏈貿易網絡的演化機制，主要研究發現如下：

第一，2022 年地緣政治合作網絡與衝突網絡均呈現顯著的小世界特性。其中，合作網絡表現出更高的網絡密度（0.538）、聚類係數（0.699）及互惠性，且平均路徑更短。美國在兩類網絡中的中介中心度均居於首位，其地緣政治主導地位顯著影響其他國家的貿易關係網絡構建。

第二，2022 年半導體產業鏈四類商品貿易網絡差異顯著：上游半導體硅片與設備貿易網絡密度低，貿易活動集中於美、日、韓等技術強國；中游芯片網絡次之；下游計算機網絡最複雜。四類產業貿易網絡均具有小世界特徵，表現為貿易網絡聯繫緊密且高效連接。中國雖然在貿易規模上最強，但在上游產業的結構嵌入性與路徑控制力方面與美國、日本等國仍存在差距；在下游產業中，中國通過香港轉口貿

易和整機製造等方式形成了較強的網絡中心性。香港在芯片貿易中表現出「全球調撥樞紐」功能，美國與日本則憑藉高 PageRank 中心度主導技術密集型環節。

第三，ERGM 模型顯示，國家之間建立生產聯繫具有明顯的結構偏好。各國更傾向於形成互惠的雙向貿易關係而非單向依賴，但網絡核心緊密邊緣較為稀疏，不會隨意擴張。地緣政治合作顯著促進了生產網絡的建立，而衝突則起到抑制作用，説明政治關係在塑造國際生產網絡中具有重要約束力。不同產業受地緣政治影響程度不一：中游芯片因技術複雜且關係國家安全，受到政治關係的影響最為顯著；相比之下，上游硅片產業受影響較小，表明其對政治環境的敏感度較低。機制分析進一步發現，地緣政治合作或衝突對貿易網絡的作用均主要通過互惠性結構機制傳導，其中在上游半導體設備行業中，地緣政治合作網通過互惠性結構帶動網絡連接的機制效應最突出，即增強互惠性結構可以促進貿易網絡連接。

第四，TERGM 實證結果表明，即便考慮貿易時間變化，半導體產業鏈貿易網絡演化仍顯著受地緣政治影響，地緣政治因素在貿易網絡形成與發展中至關重要。四個產業的穩定性係數（stability）均顯著為正，表明國家間貿易關係一旦建立即呈現一定的持續性和路徑依賴特徵。變異性係數（variability）僅在上游硅片產業中顯著，説明該網絡在保持總體穩定的同時仍存在調整空間，可能因技術創新或新市場加入而形成新的貿易聯繫。這一發現突顯了在分析貿易網絡演化機制時納入時間維度的重要性。

Analysis of the Semiconductor Industry Chain Trade Network and Its Evolution Mechanism under the Influence of Geopolitical Relations

Qin Haihua, Ouyang Yanyan, Guan Hongling

Abstract: As a core foundation of critical sectors such as information technology and artificial intelligence, the semiconductor industry has developed a highly globalized and technologically intensive division of labor. With rising geopolitical tensions, supply chain security has become central to major-power rivalry, making it essential to examine the geopolitical impact on this industry. This study applies complex network analysis to explore the formation and evolution of the semiconductor trade network under geopolitical relations. First, a geopolitical relations network is constructed using social network analysis and the GDELT news event database, with key network characteristics analyzed. Then, based on the UN Comtrade database, weighted international trade networks for four representative products across the upstream, midstream, and downstream segments of the semiconductor chain are built to examine their structural features. Finally, drawing on both networks, the study employs the Exponential Random Graph Model（ERGM）and the Temporal Exponential Random Graph Model（TERGM）to investigate the trade network's formation and evolution mechanisms.

Keywords: Geopolitical Relations Network; Semiconductor Industry Chain Trade Network; Exponential Random Graph Model; US-China Chip War

（責任編輯：龍海涵）