作为复杂适应系统的全球粮食贸易网络：结构、演化与韧性综述

Zebiao Li [a]，Xueying Wu [b]，Chengyi Tu [b, *a] 浙江理工大学启新学院；中国绍兴，312369[b] 浙江理工大学经济与管理学院；中国杭州，310018[*] 通讯作者。电子邮箱：chengyitu1986@gmail.com

摘要

全球粮食系统已从松散的双边贸易集合，演变为高度复杂、相互依存的全球粮食贸易网络（FTN）。本综述综合梳理现有文献，运用严谨的复杂网络科学视角考察FTN，超越传统经济贸易模型，对系统的拓扑结构进行量化分析。我们阐述了该网络的历史转型：从由西方霸权主导、以效率为导向的单极体系，转变为具有高聚类和无标度异质性的多极化区域结构。我们着重探讨连通性的双重属性：它既能缓冲本地生产波动，也会成为全球传染的通道。通过将FTN概念化为一个多层系统——区分小麦稳健的拓扑结构、水稻脆弱的区域主义，以及大豆极化的“哑铃”结构——我们揭示了现代粮食安全固有的不同结构性脆弱性。此外，我们分析了近期重大冲击的影响，特别是COVID-19疫情和俄乌冲突，并阐释了物流效率与系统韧性之间关键的权衡。本综述最后评估了人为气候变化背景下网络的未来走向，预测比较优势将向极地迁移，因此亟须从孤立主义保护主义转向合作性网络冗余。

关键词：全球粮食贸易网络（FTN）；复杂网络分析；粮食安全；系统韧性；多层网络；粮食—能源—水纽带；气候适应

1 引言

全球粮食系统曾被视为由比较优势这只“看不见的手”支配的松散双边贸易集合，如今已演变为一个错综复杂、相互依存的国际贸易网络[1]。这一系统如今促进了卡路里、营养素和虚拟水的大规模重新分配，以满足不断增长的人类人口的需求；在许多地区，这一人口规模早已超过当地农业系统的承载能力[2,3]。随着各国日益依赖进口来弥合国内生产与消费之间不断扩大的缺口，全球粮食贸易网络（FTN）已不仅仅是一种市场机制，更成为决定全球粮食安全的关键因素，并构成一个独特的复杂适应系统[4-6]。

在20世纪的大部分时间里，传统经济分析通过李嘉图比较优势、赫克歇尔—俄林要素禀赋和引力模型等还原论框架来研究国际贸易[7-11]。尽管这些方法在解释贸易量和价格形成的驱动因素方面十分有力，但它们将贸易关系视为相互独立的事件。这些方法以均衡为基本假设，在很大程度上忽视了定义复杂系统的高阶相互作用、反馈回路和涌现结构特性[12-15]。由于将世界视为一组相互孤立的贸易对，这些传统模型未能捕捉到系统性风险和结构性依赖，而正是这些因素使局部冲击——例如庞蒂克草原的干旱或鹿特丹的港口罢工——能够迅速传播至全球各地，并在遥远且看似互不相连的市场中引发级联失效[4,16,17]。

农业经济学中的“网络转向”代表了一种范式转变，即研究重点从贸易量转向贸易结构[18,19]。复杂网络分析（CNA）为这一转变提供了必要且坚实的理论框架。通过将国家抽象为节点、将贸易流抽象为边，CNA使研究人员能够量化全球粮食系统的拓扑结构。它超越了简单的贸易平衡，根据结构位置（中心性）识别关键参与者；通过社群检测揭示隐藏的脆弱性；并通过连通路径描绘冲击传播的具体机制[20-23]。

本综述全面梳理现有文献，并以严谨的复杂网络科学视角审视 FTN。我们详尽分析了该网络的拓扑结构，阐述其历史演变：从由西方霸权主导、以效率为导向的单极体系，转变为具有高度聚类和无标度异质性的多极区域化结构。我们特别强调连通性的双重属性：它既能通过在全球范围内汇集风险，缓冲本地生产波动，也可能成为全球传染的通道。通过详细考察实证研究、方法论进展以及近期的系统性冲击——包括 COVID-19疫情和俄乌冲突——我们阐明了现代食物系统固有的结构性脆弱性，并探讨了应对未来气候诱发扰动所必需的韧性机制[24-27]。

2 网络构建与度量指标方法论基础

网络构建与度量指标的基础

s

将复杂网络科学应用于全球粮食系统，可以揭示其层级架构，该架构在微观、中观和宏观尺度上呈现出各自鲜明的特性。如图1所示，将原始双边贸易数据转化为拓扑形式化表示，能够量化系统稳定性并识别关键脆弱性。

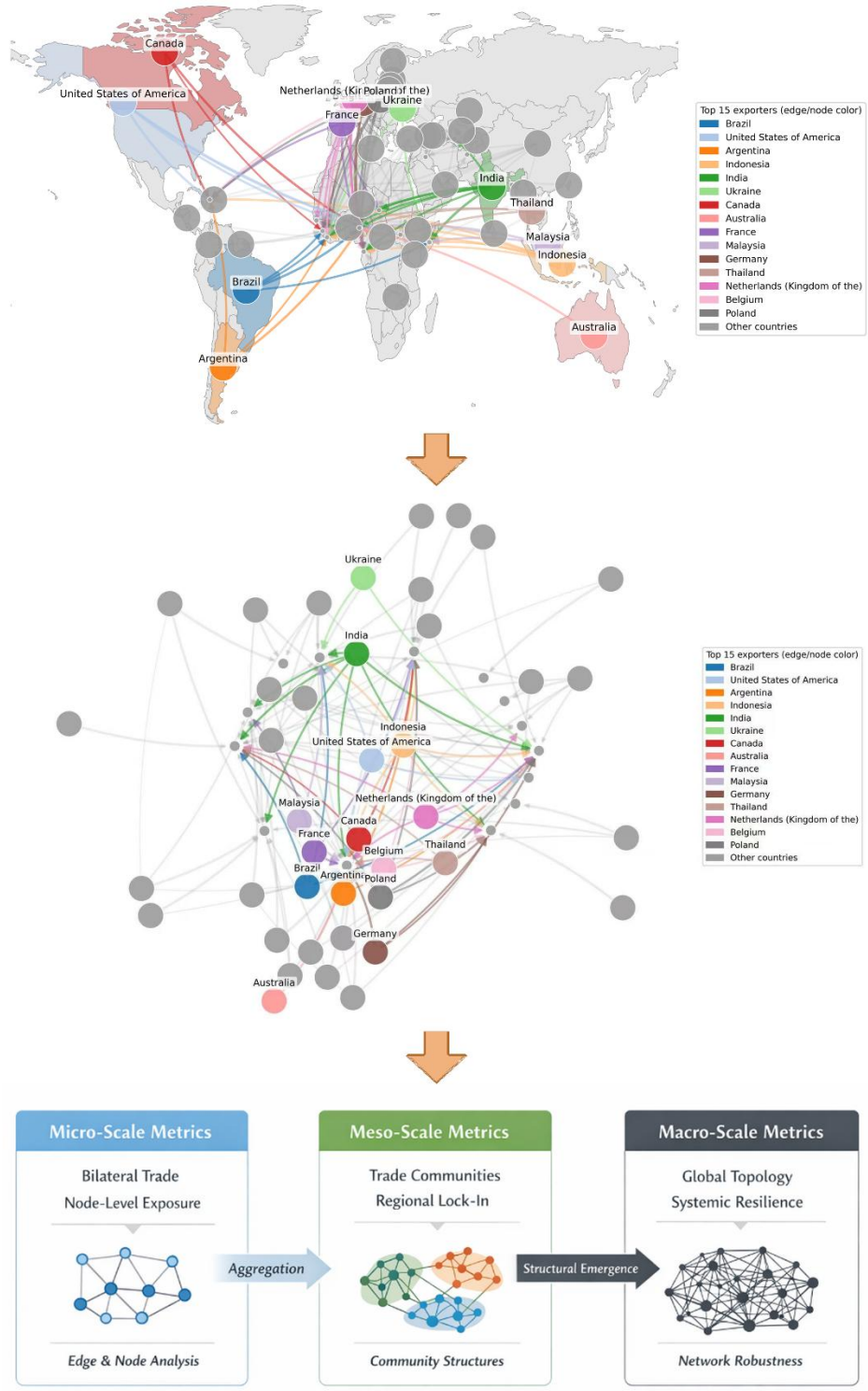

图1。 全球粮食贸易网络（FTN）分析的方法框架。该示意图展示了如何将地理空间贸易数据转化为复杂网络模型，并在此基础上开展多层次分析。全球粮食系统的地理空间表示图描绘了各国（节点）之间的双边贸易流（边），并突显了巴西、美国和俄罗斯等主要出口国的主导地位。FTN 的拓扑抽象将其表示为复杂网络图。该可视化消除了地理限制，展现了结构聚类、辐射式结构以及区域间连接的密度。用于量化网络属性的层级指标框架。

2.1 拓扑抽象与网络构建

将复杂网络理论应用于全球粮食系统，前提是进行严谨的数学形式化，将异质贸易数据转化为可计算的拓扑结构。形式上，全球粮食贸易网络（FTN）定义为一个图，其中 表示节点（国家或关税区）的集合， 表示边（贸易流）的集合，而 则体现这些相互作用的权重或强度。N 这一形式体系为量化从局部影响力到全球韧性等系统属性提供了分析基础[28,29]。此外，时间分辨率对网络构建至关重要[30,31]。尽管贸易流是连续的，数据通常按年度汇总。因此，纵向研究往往涵盖较长时期（如1986—2022年），以捕捉演变趋势；与此同时，月度或季度等更高频率的分析也日益受到采用，用于刻画2008年粮食价格危机或COVID-19疫情暴发等快速冲击的传播。

在 FTN 的语境下，节点集合（ ）始终包括向联合国商品贸易统计数据库等国际机构报告贸易数据的190+ 国家和独立关税区

联合国粮食及农业组织（FAOSTAT）[32]。虽然节点的定义相对固定，但边（ ）的定义需要仔细考虑其方向性。

贸易流本质上具有不对称性。从美国（节点 ）向埃及（节点）出口小麦，会形成一个方向上的实物商品流，以及反方向上的金融资本流。因此，大多数严谨研究都将 FTN 建模为有向网络（有向图）[5,20,33]。这种方向性并非无关紧要的细节；它对于分析依赖关系和权力动态至关重要。

构建 FTN 时，或许最关键的方法论决策是选择赋权机制（ ）。分配给一条边的权重决定了遍历的“成本”以及连接的“强度”，从根本上改变网络的拓扑结构，以及对“重要性”或“中心性”的解读。[34,35] 文献基于五种主要赋权方法得出了不同结论（见表1）：

二元（无权）拓扑 学[12]：在二元网络中，如果存在任何贸易，则将连边赋值为 ；如果有任何贸易

存在， 否则赋值为。虽然这种方法看似简单，却有助于分析系统纯粹的连通结构。它揭示了信息、政策规范或生物病原体（如害虫、口蹄疫）的潜在扩散路径，而不受贸易量影响。一千克受污染的肉与一千吨受污染的肉一样，都能有效传播病毒；因此，二元拓扑对于生物安全分析至关重要。

实物量（质量）[23]：权重代表食品贸易的实物吨位（或）。这一度量指标是分析物流、运输、基础设施需求以及对地球运输系统造成的实物负担的标准。然而，以质量为基础的加权在汇总多种商品时可能产生误导。将一吨主食小麦（生存必需品）与一吨高价值香料、葡萄酒或藏红花相比较，会扭曲对粮食安全影响的判断。质量指标侧重大宗商品，例如谷物和油料作物，却忽视了营养密集但交易量较低的商品。

货币价值[18]：权重代表经济价值，通常以美元计。这是经济学家分析价值链、国际收支和经济依赖时首选的度量指标。然而，货币权重极易受到价格波动、通货膨胀和汇率波动的影响。全球价格飙升可能会在食品实物转移毫无增加的情况下，人为抬高网络的“权重”。此外，高价值奢侈品（例如巧克力、烈酒）可能在货币网络中压过低价值主粮，从而掩盖真正能够防止饥荒的流量。

热量和营养含量[29]：越来越多的文献主张依据热量（）或特定营养素（蛋白质、脂肪）为边赋予权重。这种方法能够最全面地呈现粮食安全状况，并将不同商品归一化为单一的人类生存所需度量指标。采用热量权重的研究凸显了主粮谷物

（小麦、水稻、玉米）在维系全球生存方面相较于高价值易腐食品的重要作用。最新研究发现，从货币权重切换为热量权重时，中心性排名会出现显著差异；乌克兰和阿根廷等大量出口低成本热量的国家，其重要性上升；而出口高价值加工食品的国家（如荷兰、德国）在基本生存方面的中心性则可能较低。

虚拟水[36]：先进的环境分析会根据贸易食物生产过程中蕴含的“虚拟水”对边赋予权重。这将贸易网络与全球水文循环联系起来，揭示水资源匮乏的国家（例如中东国家）如何通过从水资源丰富的国家进口谷物，实质上“进口”水资源。这一视角使 FTN 成为全球水资源再分配的机制。

Ta表 1：食品贸易网络中加权方案的比较分析。

加权 制度（W）	Unit	分析重点	局限性
二元	(0,1)	路径存在性；忽略流动强度；边际联系是	

拓扑学		害虫、病原体和信息。	等同于一条大动脉。
物理质量	公吨 (MT)	运输负担；港口容量；实物粮食供应量。	扭曲 价值； 将低价值主粮（小麦） 与高价值/低-货物数量（藏红花）。
货币价值	美元（$）	价值链；国际收支；经济依赖。	对通货膨胀、价格飙升和汇率敏感；掩盖热量安全。
营养含量	$kcal$ ，蛋白质（g	人类 食物； 承载能力；营养韧性。	需要 换算系数； 掩盖经济价值；使非食用农产品贸易变得复杂。
虚拟资源	m^3 水 ，ha land	环境足迹；虚拟水 贸易 （虚拟水贸易）； land 转移。	间接指标；依赖作物特定的水／土地足迹模型。

2.2 微观尺度指标

微观尺度分析关注个体节点在全球总体网络[37]中的位置和影响力。如表2所示，一个国家的影响力具有多维性，可通过其流量（强度）、连通性（度）或作为桥梁所处的战略位置（介数）来刻画[5]。

容量（度、强度）[18,20,38]：节点强度（）量化了流量总量，可识别系统中的“重量级角色”。然而，区分入度和出度对于评估韧性至关重要。较高的 表明进口组合多元，能够抵御合作伙伴特定冲击；而较高的则表明系统性影响力。

k_{in}

k_{out}

控制力（介数、接近中心性）[16,39]：中介中心性（）可识别出能够控制其他国家节点对之间最短路径的“守门人”节点。这些节点未必总是最大的生产者，却拥有不成比例的权力，可以扰乱全球流动，并在发生物流或地缘政治危机时成为潜在瓶颈。

声望（PageRank、特征向量）[40-42]：PageRank（）等算法提供了一种递归影响力度量，其中，节点的重要性取决于其邻居节点的重要性。这对于

识别“富人俱乐部”的核心成员，这些成员主要与其他有影响力的国家进行贸易。

表2：用于量化各个国家的影响力、容量和位置的微观尺度指标。

度量指标	符号	定义	食品贸易网络中的解释
入度	k^{in}	$\sum_j a_{ji}$	一个国家拥有的独特供应商数量。高 k^{in} 意味着能够抵御合作伙伴特定冲击的韧性。

出度	k_i^{out}	$\sum_j a_{ij}$	独特出口目的地的数量。数值高意味着对任何单一买方的依赖程度较低（需求侧韧性）。
Node 强度	s_i	$s_i^{in} = \sum_j w_{ji}$ $s_i^{out} = \sum_j w_{ij}$	流入或 国产成人总流量（质量、卡路里或美元）或流出某个节点的总流量（质量、卡路里或美元）。无论连接数多少，都能区分「主要参与者」与「次要参与者」。
介数 中心性	BC_i	$\sum_{s \neq i \neq t} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}}$	经过节点的最短路径所占比例。识别物流枢纽，瓶颈，and “把关者”（例如荷兰、土耳其）。
接近中心性 中心性	CC_i	$\frac{N-1}{\sum_{j \neq i} d_{ij}}$	一个节点到达（或被到达）所有其他节点的速度。数值高意味着传递价格冲击或病原体的速度较快。
PageRank / 特征向量	P_i / x_i	$Ax = \lambda x$	根据邻居节点的重要性衡量影响力。如果一个国家与其他排名靠前的重量级参与者（例如美国—中国关系），则其排名较高。

2.3 中观尺度指标

超越各个国家的层面，中观尺度指标揭示了 FTN 的模块化架构——节点如何聚集成具有特定功能的贸易集团[22]。如表3所示，这一层面的分析凸显了全球化与区域化之间的张力。

区隔化（模块度、同配性）[4,43,44]：FTN表现出显著的模块度，表明世界被划分为不同的社群。高模块度虽能充当“防火带”，遏制局部传染，但也意味着边缘国家被“锁定”在特定区域霸权国家的势力范围内，危机期间难以更换贸易伙伴。

凝聚性（聚类）[25,45]：高聚类系数（ ）反映了贸易中传递性的普遍存在（三元闭合）。这由地理邻近性和区域贸易协定推动，形成紧密相连的本地团。

分层（富人俱乐部与核心—边缘）[46,47]：尽管该网络总体呈异配特征（大型枢纽向小型节点输送资源），其核心仍呈现“富人俱乐部”现象。顶级经济体形成了一个紧密且排他的团，控制着绝大多数全球储备，从而造成核心—外围的结构性分化，并由此界定全球不平等。

表3：用于量化模块化结构、区域化和混合模式的中观尺度指标。

度量指标	符号	定义	食品贸易网络中的解释
聚类系数	C_i	$\frac{2t_i}{k_i(k_i-1)}$	某个国家的两个贸易伙伴也……的概率 i 彼此之间的贸易。高 C 表明紧密的区域贸易集团（如欧盟、东南亚国家联盟）。
模块度	Q	$\frac{1}{2m}\sum_{ij}(A_{ij}-\frac{k_ik_j}{2m})\delta(c_i,c_j)$	衡量划分为各个模块的强度。高 Q 表明世界由彼此区分的贸易集团；低 Q 表明存在全球整合性。
同配性	r	皮尔逊 相关 of 度	节点倾向于与相似节点连接的特性。FTN 是异配的（），这意味着枢纽（主要出口国）往往向边缘小节点供给。
富人俱乐部系数	$\phi(k)$	$\frac{2E_{>k}}{N_{>k}(N_{>k}-1)}$	高程度节点之间的连接密度 节点。如果存在“富人俱乐部”乐购 $\phi(k)$ 较高，这表明大国形成了一个紧密、排他性的团。
核数 (k-壳层)[48]	k_s	递归 剥离 of 度数为……的节点 $<k$	将网络分解为多个层。高-壳层 k 节点构成全球系统的核心；低 k -壳层节点属于依附型外围。

2.4 宏观尺度指标

宏观尺度指标刻画了 FTN 的全球拓扑结构，全面展现了该系统如何平衡整合性、效率与异质性[5,20]。这些度量指标揭示了支配全球粮食安全的基本结构性约束（见表4）。

饱和度与连通性（密度）[18,20]：衡量系统连贯性最基本的指标是网络密度（），其定义为图中现有贸易联系数与可能连接总数之比。在 FTN 的背景下， 是衡量饱和度的指标。ρ

ρ

整合性与系统性风险（路径长度和直径）[18,20,49]：全球整合性 衡量连接任意两个节点所需的平均步数（中间贸易伙伴数量）。FTN 始终呈现较低的 ，这是“小世界”网络的典型特征。直径 表示网络中的最长最短路径，界定任意两个国家之间的最大拓扑距离。不断缩小的L D

D

随着时间推移，这表明“贸易世界”正在变小，使边缘国家更接近核心。

传输能力（全局效率）[4]：虽然与路径长度有关，全局效率 E_{glob}

提供了一种在数学上更为严谨的指标，用于衡量系统的并行处理能力。该指标定义为最短路径长度倒数的平均值，用于量化网络交换信息和实物商品的效率。

异质性与不平等（幂律指数）[4,12,18]：FTN 的结构层级由度分布的幂律指数（）来刻画。实证分析发现，FTN 的指数范围为，因此可归类为无尺度网络。该度量指标量化了极端异质性，证实该系统由少数“超级枢纽”（如美国、巴西和中国等高连接度节点）主导，而周围则是大量连接稀疏的边缘国家。

表4：用于量化全球架构、效率和稳健性的宏观尺度指标。

度量指标	符号	定义	在食品贸易网络中的解读
网络密度	ρ	$\frac{E}{N(N-1)}$	现有连接与可能连接的比率。表示全球系统整体的“连通性”。
平均路径长度	L	$\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j} d_{ij}$	任意两个国家之间的平均步数。较低的 L（小世界性质）有助于高效分配，但也会加快冲击传播。
全局效率	E_{glob}	$\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}\frac{1}{d_{ij}}$	一种衡量传输能力的指标。与 不同，它对 L 不连通分量具有鲁棒性。衡量网络在全球分配食物的能力。
直径	D	最大值(d_{ij})	网络中的最长最短路径。定义了贸易世界在拓扑步数上的“规模”。
幂律指数	γ	$P(k)\sim k^{-\gamma}$	表征其无标度特性。对于 FTN，。 $2<\gamma<3$ 表明存在极端不平等：少数枢纽，大量外围节点。

3 全球食品贸易网络的结构特性

FTN 的拓扑结构揭示了全球粮食系统稳定性和效率的重要见解。跨越数十年的多项实证分析一致发现了若干特定的非随机结构特征：“小世界”现象、“无标度”度分布，以及明显的核心—边缘结构[5,20]。

3.1 小世界现象与全球整合性

“小世界”特性最初由 Watts 和 Strogatz 正式提出，用于描述同时具有较高局部聚类程度和较短平均路径长度的网络[49]。实证研究一致证实，FTN 是一个

典型的小世界网络[23,25]。

全球粮食贸易网络的聚类系数通常显著高于可比随机图（）。这种高聚类性主要由两个因素驱动：地理邻近性和政治一体化。由于运输成本较低，以及欧盟单一市场、北美自由贸易协定（现为美墨加协定）和东南亚国家联盟等区域贸易协定（RTA），国家往往会在各自区域内形成紧密连接的“团”（例如欧洲、南美洲和东南亚）[9,45]。

尽管存在这种密集的区域聚类，网络仍保持着显著较短的平均最短路径长度（），通常介于1.8至2.5步之间。这意味着，平均而言，世界上任意两个国家之间仅通过少于三条贸易联系即可相互连接。这种网络的“短路”效应得益于全球枢纽——美国、巴西和俄罗斯等主要出口国，它们在不同的区域集群之间保持着连接[4,12,18]。这些枢纽在图中充当“捷径”，将南美洲大豆集群与东亚消费集群连接起来，或将黑海小麦集群与北非进口集群连接起来。

这种架构体现了一种根本性的权衡。它在最大限度提升分配效率的同时，使一个地区的生产缺口能够迅速由遥远地区的盈余弥补；但也因此形成了一个“超连接”的基础结构，使价格飙升、出口禁令或病原体暴发等局部扰动能够以极低的延迟在全球范围内扩散。

3.2 无标度异质性与幂律

FTN 的度分布 ——随机选取的一个国家拥有贸易伙伴的概率——遵循幂律分布（），因此该网络属于“无标度”网络[12,50]。

$$P(k) \sim k^{-\gamma}$$

在双对数尺度上绘制累积度分布的分析显示，尾部呈现明显的线性关系，这是幂律的标志。指数通常介于 2 和 3 之间，表明该系统具有极端的异质性。这种分布意味着，绝大多数节点（“外围”）只有极少的贸易连接，往往依赖一两个贸易伙伴来保障粮食安全。相反，极少数“枢纽”节点（“核心”）拥有数量远超其比例的大量连接，通常多达数百个。

这种“枢纽—辐射”架构决定了网络的稳健性特征。事实证明，无标度网络能够抵御随机故障[16]。如果一个随机节点——很可能是尼泊尔或玻利维亚这类连通性较差的边缘国家——遭遇歉收或停止贸易，网络的全球连通性几乎不会受到影响。然而，网络极易受到定向攻击或枢纽节点故障的影响。移除或隔离一个主要枢纽，例如美国（因贸易战）或俄罗斯（因制裁），可能导致整个网络分裂为多个不连通分量，进而引发全球粮食供应的系统性崩溃。

3.3 同配性与核心—边缘结构

除了基础的小世界和无标度特性外，近期文献还关注高级度量指标，以深入洞察网络的层级结构和混合模式。

同配性（ ）衡量节点倾向于与度相似的其他节点相连的程度。FTN通常呈现异配性（ ），这意味着高度节点（全球枢纽）往往与低连接度节点（边缘进口国）相连[44]。这种负相关证实了主要出口国发挥着“供给者”的作用：少数大型枢纽将食物输送给数百个原本彼此不相连的小型国家。这种结构最大限度地扩大了全球覆盖，但加深了外围对核心的依赖关系。

尽管总体上呈现异配性，FTN在其最顶端的节点之间仍表现出显著的“富人俱乐部”现象。富俱乐部系数 用于量化度大于 的节点之间的连接密度。实证分析显示，全球顶级经济体（如美国、中国、德国、荷兰、巴西）构成了一个紧密相连的团，几乎每个成员都与其他所有成员进行贸易[47]。这个“俱乐部”控制着全球大部分谷物储备和贸易路线，形成了两层体系：高度一体化且富有韧性的核心，以及依赖性强、脆弱的边缘。核心国家拥有冗余的供应链和较强的韧性，而边缘国家则受制于核心，彼此之间几乎没有横向连通性。

先进算法，特别是 k-壳分解，使研究人员能够根据递归连通性将网络划分为密集的“核心”和稀疏的“外围”[48]。这项分析证实，“富人俱乐部”并非高连接度造成的表象，而是一种结构现实。核心由彼此之间以及与外围国家贸易往来密切的国家组成，而外围则由几乎只与核心国家贸易、彼此间很少往来的国家组成。这一结构特征解释了为何南南贸易（发展中国家之间的直接贸易）与南北贸易或北北贸易相比仍不发达，尽管近期趋势表明，随着新兴经济体寻求绕过传统西方枢纽，外围连接正逐渐增多。

4 全球贸易的网络中心性与分层

在全球粮食贸易网络（FTN）的背景下，结构位置直接转化为地缘政治影响力。中心性指标是衡量这种权力的定量代理指标，使研究者能够超越总体贸易量，识别不同的影响力架构[5]。相关文献区分了三种不同的影响力模式：容量（度/强度）、中介性（介数）和声望（特征向量/PageRank）。

4.1 度与强度中心性

度中心性（ ）和节点强度（）量化了一国参与全球系统[20,38]的总体规模。这些度量指标区分了全球卡路里流的主要来源和汇点。

实证分析一致发现，存在一个稳定的出口商寡头垄断格局，主要由美国、巴西、俄罗斯，以及可能还有印度主导输出强度（ ）排名[1,25]。这些国家构成了全球卡路里流的“源”节点。对这些参与者而言，较高的出度（ ）意味着市场多元化；通过向众多合作伙伴出口，它们能够避免受到任何单一买方的需求冲击或政治冲击，从而增强自身的结构韧性[6]。

相反，输入强度（ ）凸显了主要消费国。中国和日本通常是这一度量指标中的核心，反映出其对大豆和饲料谷物的巨大进口需求。不过，必须明确区分终端汇与中间枢纽。中国是终端汇（消费其进口的商品），而荷兰和比利时等国家的 和均表现出较高数值。这表明它们并非初级生产者，而是全球转口贸易中心——依靠物流效率而非农业用地面积进行加工和再出口的中心[51]。

4.2 中介中心性

强度衡量的是交易量，而中介中心性（ ）衡量的是控制力。它的定义是某个节点出现在其他节点对之间最短路径上的频率，能够识别系统中的关键拓扑“把关者”。[39]

中介中心性较高的国家——尤其是美国、荷兰、法国，以及土耳其和埃及等地理位置具有战略意义的参与者——充当连接不同贸易社群的桥梁[35]。例如，土耳其是连接黑海生产圈（俄罗斯/乌克兰）与中东和北非消费集群的重要拓扑桥梁。

中介中心性较高的节点是系统中最关键的故障点。与外围节点发生故障不同，
移除或扰乱一个高中心性节点会迫使贸易流改道，经过更长、效率更低且成本更高的路径[4,16]。“鹿特丹效应”正说明了这一点：荷兰港口发生罢工或遭到封锁，不仅会影响荷兰的贸易，还会切断整个欧洲腹地最高效的入口。同样，2022年黑海航线受阻表明，关键桥梁节点遭到封锁会引发价格波动，其影响远远超出冲突地区的直接贸易伙伴[27,52]。

4.3 PageRank 与特征向量中心性

为衡量连接的质量而非数量，研究人员采用特征向量中心性和谷歌 PageRank 算法等谱测度[40]。这些递归度量指标认为，一个节点是

如果它与其他有影响力的节点相连，那么它就具有影响力。

较高的特征向量中心性意味着属于网络中的精英核心。历史上，美国和中国在这一度量指标上占据主导地位，体现了它们在全球商业「富人俱乐部」中的中心地位。与边缘国家建立联系相比，与美国建立联系对一国中心性得分的贡献更大，这反映出与超级大国建立贸易联系所具有的不对称权重。

近期采用 PageRank（）进行的纵向分析揭示了结构性权力转移[1,47,53]。尽管西方经济体仍占据主导地位，新兴经济体的中心性显著上升，尤其是金砖国家（巴西、印度）。这些国家不仅在增加贸易量（强度），也日益成为其他重要节点的枢纽，从而有效地打破了20世纪粮食体系中历史形成的核心—外围结构。

5 社群结构与地缘政治区域化

宏观尺度指标（度分布）揭示了全球属性，微观尺度指标（中心性）则识别出具有影响力的个体，而全球粮食贸易网络（FTN）的中观结构揭示了支配资源流量的不同贸易集团[22]。通过应用社群检测算法（尤其是模块度最大化方法，例如 Louvain算法），研究人员可以将网络划分为功能模块[22,43,54]。

从数学角度而言，该过程旨在最大化模块度指数，其定义如下：，其中，表示 和之间连边的权重，表示节点的度，表示网络的总权重，而 表示克罗内克 δ 函数：若节点 和 属于同一社群，则取值为 1；否则取值为 0。

5.1 主要贸易模块分类

纵向分析显示，在过去三十年间，全球系统相对稳定地划分为 4 至 7 个持续性社群[1,18]。然而，这些集团的内部拓扑结构和领导力动态经历了显著演变。

从历史上看，这是最稳健的共同体，其核心由美国的霸权地位所支撑。它涵盖美墨加协定集团（加拿大、墨西哥），并深入延伸至中美洲和加勒比地区。

其内部结构呈现出明显的“星形”拓扑[55]。美国作为中心枢纽，管理着与外围伙伴之间的大规模辐射状流量。与外围成员同美国枢纽之间的纵向整合相比，外围成员之间的横向连通性较为稀疏（例如加勒比国家之间的直接贸易）。

以法国、德国和荷兰组成的三角关系为核心，这一社群体现了欧洲单一市场的实际运作情况。与美洲形成鲜明对比的是，欧洲模块类似于一个团或近乎完全图。几乎所有成员之间都存在高连接密度，反映了货物自由流动和共同农业政策（CAP）的作用。该模块经常纳入西非和北非的前殖民地国家，延续了历史上的“路径依赖”，贸易路线沿袭20世纪的殖民边界[56]。

后苏联空间在20世纪90年代瓦解后，一个独特的“黑海社群”逐渐形成，并在2010年后趋于稳固。该集团由俄罗斯主导，成员包括乌克兰（历史上曾参与其中）和哈萨克斯坦。它是一台专业化的“小麦出口机器”，服务于一批依赖其供应的进口国，这些国家主要位于中东和北非（MENA），例如埃及、土耳其和伊朗。该社群在结构上十分脆弱，严重依赖数量有限的海上咽喉要道（如土耳其海峡），并面临高度的地缘政治波动性；2022年俄乌冲突后贸易格局的重组便是明证[52,56,57]。

这个共同体常被称为全球系统的“稻米之乡”，为亚洲、大洋洲以及日益增长的撒哈拉以南非洲地区的庞大人口提供服务。与以美国或俄罗斯为核心的单中心集团不同，这个模块呈多中心（双核心）结构，通常以泰国和印度为核心，越南则逐渐成为第三个中心。其结构灵活多变，往往会根据季风驱动的水稻收成所具有的随机性而每年重新调整。

5.2 区隔化悖论

近期数值稳的攀升，更发现是，模块度指数长期呈这一趋势表明，尽管人们不断强调“全球化”，食物系统却正变得日益区域化和分割化。这一结构性趋势为系统稳定性带来了根本性悖论。

高模块度能够抑制扩散过程[58]。发生生物冲击时（例如木质部难养菌或非洲猪瘟等局部病原体），牢固的共同体边界能够阻止传染扩散至全球范围[59]。该模块充当“隔离区”，牺牲局部稳定性以保护全球整体。

相反，较高的模块度意味着边缘国家在结构上被“锁定”于其区域霸权之下。处于模块度较高的社群中的边缘国家缺乏其他贸易伙伴（桥接中心性较低）[60]。因此，如果区域枢纽因气候冲击或政治崩溃而失效，依赖它的节点将立即面临灾难性的供应短缺，因为它们缺乏获取“应急”流量的连通性

来自其他社群。

6 网络的时空演变

全球粮食贸易网络（FTN）的演变轨迹具有非平稳性。它并非遵循线性累积路径，而是呈现出“间断平衡”的鲜明阶段，反映了全球宏观经济一体化与地缘政治碎片化之间动荡的相互作用[61,62]。对过去三十年的纵向分析使我们能够划分出三个具体的拓扑格局。

6.1 超全球化时代（1992–2008）

后冷战时代，苏联解体以及1995年世界贸易组织（WTO）的批准催生了这一时代，标志着网络拓扑结构进入爆发式扩张期。这一时期的特征是网络快速致密化。网络的平均度 $\langle k \rangle$ 随着各国拆除关税壁垒并融入全球网络而激增。这一时期将比较优势和物流效率置于所有其他度量指标之上。就结构而言，网络呈现出鲜明的“单极”组织形态[23,63]。美国作为无可争议的中心节点——“超级枢纽”——协调着全球粮食流。矛盾的是，尽管全球连通性增强，模块度指数（ Q ）也有所上升。这种现象通常被称为“全球本土化”，表明世界在走向一体化的同时，也逐渐形成了各具特色的区域贸易集团（例如北美自由贸易协定、欧盟），为层级化社区架构奠定了基础[63-65]。

6.2 “大贸易崩溃”与慢球化（2008—2016）

2008年的全球金融危机以及同期全球食品价格飙升，标志着一次关键的相变。贸易量的指数级增长戛然而止，系统进入“慢球化”制度——贸易强度相对于国内生产总值趋于平稳的时期。最显著的结构性转变是单极性的衰退。随着网络围绕新兴农业强国[66,67]重新配置，美国的相对中心性有所减弱。两个主要集群脱颖而出：“南锥体”复合体（由巴西在大豆和动物蛋白领域的主导地位引领）和“黑海”复合体（由俄罗斯、乌克兰和哈萨克斯坦的农业复兴推动）[2]。这使FTN从星形拓扑转变为一个重心相互竞争的多极体系，从而重新分配网络的“负荷”，并改变了全球依赖模式。

6.3 冲击与韧性（2017—2024）

当前时代的特征是高频、高影响力的外生冲击：中美贸易战（2018年）、新冠肺炎疫情引发的物流危机（2020年），以及俄乌冲突（2022年）。网络

分析揭示了一种根本性的战略转变：从“效率寻求”（成本最小化）转向“稳定性寻求”（风险缓解）。面对准时制供应链的波动，进口国积极寻求提高拓扑冗余，有意建立一些经济效益可能不甚理想、但能带来多样化收益的贸易联系[14,26,27]。尽管这些冲击十分严重，FTN仍展现出非凡的可塑性——能够在节点或边移除后动态重连。俄罗斯与欧盟之间直接流量的中断并未造成全球性空缺，反而触发了流量的迅速重组。俄罗斯出口转向亚洲和非洲市场，而欧洲则通过美洲替代供应。尽管这种自适应重连避免了系统性崩溃，却增加了摩擦。新的网络配置表现为某些商品的平均路径长度更长、交易成本更高，实际上相当于为全球粮食安全支付的“保险溢价”。

7 种植作物的特定拓扑学：商品多层网络

将全球粮食贸易网络（FTN）视为一个整体，是一种方法论上的还原主义。实际上，FTN 以多重（或多层）网络的形式运行，正式表示为 ，其中每一层都对应一种独特的商品（例如小麦、水稻、大豆），并具有其独特的拓扑结构 。将这些层汇总为单一无权图，会掩盖关键的结构异质性；粮食安全的架构会因所讨论的具体热量载体而大相径庭[67-69]。

7.1 小麦：去中心化骨干

小麦层（ ）代表了系统[67,70,71]中全球化程度最高、拓扑稳健性最强的组成部分。由于这种作物在不同纬度具有广泛的农艺适应性，生产分布于众多活跃出口国（美国、加拿大、俄罗斯、法国、澳大利亚、阿根廷）。这种地理

这种分散性形成了一个具有高度来源冗余的网络。其拓扑学通常表现为高度聚类，以及社群之间存在多条独立路径。因此，小麦网络对局部供应冲击表现出显著的稳健性：一个粮仓歉收，在很大程度上可以由另一个粮仓的盈余弥补，从而避免整个系统崩溃；不过，该网络仍容易受到黑海这一关键轴线传来的价格传导影响。

7.2 水稻：区域脆弱性与“单点故障”

相比之下，水稻层（ ）以极端的区域化和结构脆弱性为特征。该网络高度集中于亚洲季风带。出口市场呈寡头垄断格局，由印度、泰国和越南组成的“三巨头供应商主导。印度作为高度主导性枢纽的崛起（排名

（出度和输出强度均居首）引入了系统性的“单点故障”风险。该拓扑缺乏小麦贸易网络所具有的冗余；因此，印度2023年出口禁令等政策引发的冲击，并非只是重新分配流量，而是实际上切断了撒哈拉以南非洲和东南亚依赖进口国的供应线[72]。稻米贸易网络在结构上十分“脆弱”——在正常情况下效率极高，但在压力下容易发生灾难性的碎片化[73,74]。

7.3 大豆：极化的“哑铃型”拓扑学

大豆层（ ）呈现出最为鲜明且可能最不稳定的结构，其特征是二部集中程度极高。在供应端，网络由美洲（巴西和美国）控制，形成僵化的双寡头格局。在需求端，网络则近乎形成以中国为中心的买方垄断[36,67,70]。由此形成的拓扑结构仿佛一个巨大的“哑铃”，或一种极化结构，粗壮且流量庞大的通道连接着西半球与东亚。尽管这种结构在物流方面效率极高，却几乎毫无冗余。巴西发生气候灾害，或美国与中国之间出现地缘政治冲突，都会使该系统失去可供替代的重构路径。这一层是将贸易战冲击传导至全球粮食系统的主要载体[75]。

7.4 玉米：饲料—粮食纽带

玉米贸易网络（）处于中间的拓扑位置，发挥着关键桥梁作用，连接食物系统与全球畜牧业/乙醇产业。玉米贸易层与大豆贸易网络一样，共享以美国为中心的枢纽，但其历史上依赖一个独特的“欧洲连接枢纽”：乌克兰。乌克兰作为高介数桥接节点，连接东欧生产与欧盟和中国消费，是该网络的显著特征。该节点受到扰乱后，网络被迫重新连线，增加了对剩余美国枢纽的负载，并加剧了能源市场（生物燃料）与粮食安全之间的耦合[2,76]。

7.5 牛肉：引力模型的转移

牛肉层的动态揭示了“核心转移”，反映了全球饮食转型。供应核心仍扎根于美洲和大洋洲（巴西、澳大利亚），而需求核心则已迅速从俄罗斯联邦和西欧转移至东亚（中国、越南）。这一层目前正经历网络加密阶段（平均度不断提高 ），这源于全球南方收入增长推动的蛋白质转型[77-80]。网络的连接日益紧密，但也呈现出明显的聚类特征，这意味着全球饮食的“肉食化”正在形成新的、具有鲜明区域特色的贸易依赖关系，与传统的粮食贸易走廊有所不同。

8 Multiplex 前沿 ：食物、能源与虚拟水 er

当代网络科学日益摒弃将食物系统视为孤立拓扑层的还原论观点。相反，食物系统被视为多重网络或“网络之网络”（NON）中的一个组成层，并与全球能源通量和水文资源紧密交织。[2,68,69] 这一框架称为食物-能源-水纽带，认为一个节点（国家）会同时在多个相互连接的层中运作：食物贸易层（）、能源贸易层（ ）以及虚拟水贸易层（ ）。要理解系统性风险，必须分析这些系统之间的耦合强度和层间依赖关系。

l

$G^{食物}$ $G^{能源}$

$G^{水}$

8.1 虚拟水流

“虚拟水”这一概念指商品生产链中所蕴含的淡水体积，它使 FTN 成为全球水资源人为再分配的一种机制。

网络分析表明，VWTN 是一台效率引擎。通过促进水生产率高的国家（如北美洲和北欧等温带雨养区）向水生产率低的国家（如干旱、依赖灌溉的地区）输送耗水型农作物（如谷物），该网络实现了净“全球节水”。[36]

VWTN 的拓扑学虽然在结构上与 FTN 同构，却凸显出不同的脆弱性[81]。这表明，中东和北非地区（中东和北非）的粮食安全本质上是一个水文补贴问题。这些国家进口的不只是小麦，还进口了种植小麦所需的水。因此，黑海粮食供应中断不仅会造成热量冲击；对于缺乏绿色水资源储备、无法以国内生产替代进口的干旱地区进口国而言，这实际上是一场急性水危机[71,81]。

8.2 能源—粮食耦合

能源层与食品层之间的相互依存，代表着系统中最为动荡的前沿

风险。这种关联主要通过投入成本传导：能源价格影响化肥生产原料的成本（具体而言，哈柏—博施法所需的天然气），以及物流运输成本[2]。

能源层中的冲击（ ）会传播至食品层（ ），其影响虽有时间滞后，却会以更强烈的程度显现[67]。碳氢化合物价格高企会恶化农业生产者的贸易条件，迫使他们降低产量或提高出口价格。

$G^{能源}$ $G^{食物}$

俄乌冲突是多重级联失效[82-85]的典型案例。这并非单一危机，而是三个相互耦合的层同步遭受扰动：在能源层，制裁和天然气供应削减推高了生产成本。在化肥层，白俄罗斯和俄罗斯掌控着全球钾肥和氮肥市场的主要份额，其“隐性中心性”成为传染

机制。对这些节点的限制抑制了全球肥料供应。在食品层，这一供应冲击将通货膨胀传导至巴西等远端节点（巴西是主要的肥料进口国）；面对不断上涨的投入成本，巴西又通过大豆和玉米出口将价格冲击传回全球市场。

9 韧性、脆弱性与冲击影响

在复杂系统科学的术语中，韧性被正式定义为全球粮食贸易网络（FTN）吸收随机扰动——无论是极端气候事件、地缘政治断裂还是经济波动——并维持其关键功能，即保障热量安全的能力[86-88]。相反，脆弱性指系统在压力下易发生状态退化或拓扑碎片化的程度。近期实证文献揭示了支配这些属性的一种根本性结构张力：经济优化与系统稳健性之间的辩证关系[89-91]。

9.1 效率—韧性权衡

网络架构受两种相互竞争的优化函数支配：

效率最大化的拓扑会将生产集中在具有最高比较优势的地区（例如，大豆生产高度集中于巴西塞拉多），并将流量汇聚到高运量干线上，以利用规模经济。从结构上看，这会形成一个稀疏、中心化的网络，其特点是冗余度低，并采用“准时制”物流[92,93]。

以最大化韧性为目标的拓扑学优先考虑冗余[94]。即使这些连接在稳态条件下在经济上并非最优，它仍会保持供应节点和替代路径的多样性。从结构上看，这会形成一个密集的分布式网络，能够实现“以防万一”的响应。

从历史上看（1990–2015年），FTN的演变由效率这一 imperative 所驱动[23,63]。然而，2017年后的地缘政治格局催化了一次相变[95,96]。网络参与者正日益将“韧性溢价”计入价格，通过有意分散贸易伙伴来缓冲波动。这标志着网络结构正从过去高度高效但脆弱的架构，转向更加稳健但成本更高的配置。

9.2 级联失效与冲击传播

FTN的高度互联特性意味着，局部扰动很少会局限于原地；相反，它们会通过级联失效[21]在网络格状结构中传播。这种传播机制具有非线性特征，并且常常受到行为反馈回路[62]的放大。

典型的级联过程遵循一条可预测的轨迹：1. 随机事件（例如庞蒂克草原发生热浪）会降低某个核心节点（例如俄罗斯）的产量[97]。2. 为了稳定国内通货膨胀，受影响的核心节点会实施出口限制或配额。这一政策应对实际上会使该节点退出网络，切断连接[98]。

3. 直接贸易伙伴（例如埃及、土耳其）被迫进入全球现货市场，以确保获得替代供应量[67,71]。这种突发且缺乏弹性的需求激增会引发全球价格飙升。4. 价格信号将冲击传递至远端、依赖进口的节点（例如印度尼西亚、尼日利亚），这些节点在拓扑结构上与最初的事件并不相连[99]。这些国家面临财政不稳定，可能会采取恐慌性抢购或扩大补贴等措施，进一步加剧波动[100]。

对2008年粮食价格危机和COVID-19疫情初期的实证建模表明，贸易政策是决定冲击幅度的主要因素[101,102]。合作性贸易政策发挥缓冲作用，将短缺分散到整个网络中。相比之下，保护主义应对措施（出口禁令/囤积）则会起到放大作用，将原本可控的局部短缺演变为波及全球的系统性危机。因此，网络不仅对生产失败的实际影响高度敏感，也对其主要枢纽的博弈论行为高度敏感[96]。

10 近期外部冲击的影响

全球粮食贸易网络（FTN）的理论脆弱性，近来已从计算机模拟领域走入现实。该系统连续遭受了两起影响巨大的“黑天鹅”事件——COVID-19疫情和俄乌冲突，成为现实世界中的大规模压力测试[103,104]。这些事件为研究网络动态提供了不同的案例：前者表现为同步发生、影响各条边的物流阻滞，后者则表现为针对关键枢纽的定向节点抑制。

10.1 俄乌冲突

2022年冲突对“黑海粮仓”构成了严重冲击。该区域集群在全球小麦、玉米和葵花籽油出口中占据相当大的份额。从网络视角来看，这一事件的特征是：连接这些核心生产节点与全球巨型连通分量的边，在实体和金融层面均被切断。

冲突通过制裁将“俄罗斯社群”——在模块度分析中识别出的群体——与西方市场有效隔离开来，并通过对黑海港口的实体封锁将其与全球南方隔离开来。这一 disruption 成为了对网络模块化韧性的考验[105]。

尽管此前曾预测会发生系统性崩溃，FTN仍展现出显著的拓扑可塑性。该网络经历了快速且大规模的重构[62,96]。受到七国集团制裁的俄罗斯出口将流向重新导向亚洲和非洲的“友好”或中立节点（例如中国、印度、埃及）。相反，欧盟因乌克兰饲料玉米和葵花籽油突然出现短缺，采取了替代策略，重新连接供应链，转而从美洲（巴西、美国）采购[106,107]。

尽管网络的结构得以维持——这意味着全球巨型连通分量并未断裂——但其功能受到了损害。这种被迫重构所付出的代价，表现为联合国粮农组织食品

价格指数[108]创下历史最高波动水平。这场危机凸显出，尽管该网络能够抵御彻底失效，但其适应性是以巨大的金融摩擦为代价的。

至关重要的是，这场冲突揭示了化肥层[109]的“隐性中心性”。乌克兰在小麦层中的中心性有所下降（从前五大小麦出口国之列跌落），而俄罗斯-白俄罗斯化肥节点受到的冲击，则在网络中几乎所有其他农业节点的生产成本函数中引发了连锁震荡，展现出食物层与能源层之间危险的耦合关系。

10.2 新冠肺炎疫情

与战争造成的局部生产冲击相比，COVID-19疫情（2020–2022年）是一场系统性的物流冲击，同时对图中的每一条边都施加了压力。

封锁措施、隔离规程以及港口设施的劳动力短缺，作用于网络的连接（边），而非节点[110,111]。这导致整个拓扑结构中的“阻力”或摩擦普遍增加，减缓了贸易流的速度。

与贸易崩溃的悲观预测相反，实证数据显示，疫情期间全球粮食贸易总量实际上有所增加[112,113]。这种反直觉的韧性，得益于此前十年间积累的冗余。FTN的“小世界”架构使供应商能够绕过拥堵节点，找到替代物流路径[49,96]。此外，这场冲击还引发了行为反应——战略性囤积和恐慌性抢购——尽管存在物流限制，却反而刺激了贸易量。

大流行病长期留下的拓扑遗产，是网络收缩进程的加速。扩展型准时制供应链的脆弱性，促使各国优先选择“近岸外包”和“友岸外包”。[114]我们目前正目睹一种结构性转变：各国寻求缩短供应链，使食品贸易的平均路径长度不断缩短，以效率换取区域邻近带来的安全性[115]。

11 未来方向：气候变化与网络适应

地缘政治冲击虽是暂时的，但人为气候变化的长期趋势是一种永久性的非平稳驱动机制，持续作用于全球粮食贸易网络（FTN）。前瞻性网络建模表明，气温升高不仅会改变产量，还将从根本上重塑全球卡路里流的拓扑结构[67,97]。

11.1 比较优势向极地迁移

农业气候建模预测，生产潜力将显著向两极迁移。随着等温线移动，热胁迫和水文波动[116]预计将削弱热带和亚热带纬度地区传统粮仓（如巴西、印度、撒哈拉以南非洲）的比较优势。相反，高

高纬度国家（主要是俄罗斯、加拿大和北欧）可能会迎来耕地边疆的“北方扩张”[117]。这将促使全球邻接矩阵发生根本性的重构。预计 FTN 将从多极结构（生产中心分布于北半球和南半球）转变为以北半球为中心的日益单极或两极结构。这种重组意味着，全球南方在热量供给方面将日益依赖全球北方，从而加剧网络中现存的不对称性[96]。

11.2 超集中化悖论

近期模拟研究的一项关键发现是系统性整合的风险。随着气候压力使边际生产者失去生存能力，供应全球缓冲库存的重担将集中到气候韧性区内日益缩减的一小部分“超级出口商”身上[96]。有效源节点数量的减少（ ）构成了一种拓扑悖论。尽管剩余枢纽的个体容量可能增加，但系统韧性却会下降[62,118]。网络将趋向于极端中心化的“星状”拓扑。如果全球粮食系统依赖三个粮仓而非五个，那么单一枢纽的失效——例如由同时发生的多个粮仓失效这类“黑天鹅”事件所致——就会演变为灾难性的系统事件。当前“小世界”网络所具有的冗余将被削除，只剩下一个僵化、脆弱的骨架，缺乏吸收冲击所需的可塑性[49,94]。

11.3 跨境适应与孤立主义陷阱

未来的韧性取决于“无国界适应”这一理念，即认识到气候风险具有遥相关性。美国中西部的干旱并非局部灾害；通过 FTN，它会成为埃及和 aapan[118] 面临的跨境风险。网络理论警示，面对短缺时看似直观的政策应对——孤立主义和出口限制——构成了一种“纳什均衡”，会给整个系统带来灾难性后果[98,101]。在高度耦合且承受气候压力的系统中，保护主义级联（节点 A 囤积，迫使节点 B 陷入恐慌）会放大波动性[113,119]。未来十年的数学必然要求设计合作贸易协议，以防止这些级联失效。韧性无法通过个体节点各自优化本地安全来实现；它需要一种治理架构，即便节点压力很大，也能维持开放的边。

12 结论

复杂网络理论在全球粮食贸易领域的应用，从根本上改变了我们对粮食安全的理解。FTN 并非仅仅是一系列双边商业协议，而是一个具有鲜明拓扑性质、不断演变的动态复杂系统。它是一个能高效连接远距离生产者与消费者的“小世界”网络，同时也是一个具有显著

枢纽与边缘层级的“无标度”系统。

该网络的历史轨迹——从20世纪90年代单极、过度追求效率的时代，发展到21世纪20年代多极、碎片化且注重韧性的时代——反映了其为适应动荡世界而采取的防御性调整。区域贸易集团的兴起以及系统模块度的不断提高，发挥着遏制系统性风险的作用。然而，正如俄乌冲突和COVID-19疫情所表明的，该系统仍易发生级联失效，尤其是在关键的“桥接”节点或“枢纽”出口国受到干扰时。

未来的政策与研究必须超越“贸易还是自给自足”的二元对立，转而倡导“网络韧性”理念。这需要采取相应策略，提升多样性、增强冗余，并促进国际合作，以保持网络边的畅通。在气候不稳定的时代，全球粮食贸易网络的韧性不仅关乎经济，更是现代文明得以存续的先决条件。

致谢

本文获得浙江省哲学社会科学规划项目（项目编号：24NDaC175YB）资助。C.T.感谢国家自然科学基金委员会（项目编号：72571247）和浙江省统计局科研项目（项目编号：25TaZZ18）的资助。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

参考资料

Hu, W. 等。《从比较视角看食品贸易网络的演变：考察中国、美国、俄罗斯、欧盟和非洲国家》。《食品》13，doi:10.3390/foods13182897（2024）。D'Odorico, P. 等。《全球粮食—能源—水纽带》。《地球物理学评论》56，456-531，doi:https://doi.org/10.1029/2017RG000591（2018）。Allan, a. A.《虚拟水：一种战略资源》。《地下水》36，545-547（1998）。Suweis, S., Carr, a. A., Maritan, A., Rinaldo, A. & D'Odorico, P.《全球粮食安全的韧性与反应性》。《美国国家科学院院刊》112，6902-6907（2015）。Barabási, A.-L.《网络科学》。《英国皇家学会哲学汇刊 A 辑：数学、物理与工程科学》371，doi:10.1098/rsta.2012.0375（2013）。Porkka, M., Kummu, M., Siebert, S. & Varis, O.《从粮食不足走向贸易依赖：全球粮食供应的历史分析》。《公共科学图书馆·综合》8，doi:10.1371/journal.pone.0082714（2013）。Heckscher, E.《对外贸易对收入分配的影响》。《经济学期刊》，497-512（1919）。Leibenstein, H.《塑造世界经济：国际经济政策建议》。《经济学杂志》76，92-95，doi:10.2307/2229041（1966）。Anderson, a. E. & Van Wincoop, E.《引力模型的合理化：边界之谜的解决方案》。《美国经济评论》93，170-192（2003）。Ohlin, B. G.《区域间与国际贸易》。第 v. 39 卷（哈佛大学出版社，1933）。Ricardo, D.，载于《劳动分工经济学读本：古典传统》，127-130（世界科学出版社，2005）。Barabási, A.-L. & Albert, R.《随机网络中标度律的涌现》。《科学》286，509-512（1999）。Arthur, W. B.，载于《复杂性研究手册》（爱德华·埃尔加出版社，2009）。Helbing, D.《全球网络化风险及其应对方式》。《自然》497，51-59（2013）。Farmer, a. D. & Foley, D.《经济学需要基于主体的建模》。《自然》460，685-686（2009）。Gephart, a. A., Rovenskaya, E., Dieckmann, U., Pace, M. L. & Brännström, Å.《全球海产品贸易网络面临冲击的脆弱性》。《环境研究快报》11，035008（2016）。Davis, K. F., Downs, S. & Gephart, a. A.《迈向能够抵御环境冲击的粮食供应链韧性》。《自然·食品》2，54-65（2021）。Fagiolo, G., Reyes, a. & Schiavo, S.《世界贸易网络的演变：加权网络分析》。《演化经济学杂志》20，479-514（2010）。De Benedictis, L. & Tajoli, L.《世界贸易网络》。《世界经济》34，1417-1454（2011）。Newman, M. E.《复杂网络的结构与功能》。《SIAM评论》45，167-256（2003）。Buldyrev, S. V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H. E. & Havlin, S.《相互依赖网络中的灾难性级联失效》。《自然》464，1025-1028（2010）。Fortunato, S.《图中的社群检测》。《物理学报告》486，75-174（2010）。Serrano, M. A. & Boguná, M.《世界贸易网络的拓扑学》。《物理评论 E》68，015101（2003）。Xu, H., Niu, N., Li, D. & Wang, C.《全球粮食贸易网络脆弱性的动态演化分析》。《可持续发展》16，3998（2024）。Wang, a. & Dai, C.《基于复杂网络分析的全球粮食贸易格局演变及其对粮食安全的影响》。《食品》10，2657（2021）。Zhao, Z., Xu, L., Ma, H., Zhang, X. & Tang, L.《全球粮食贸易体系的演变及其应对新冠肺炎的韧性：各国表现》。《农业》15，1761（2025）。Zhang, Y.-T., Li, M.-Y. & Zhou, W.-X.《俄乌冲突对国际主粮农产品贸易网络的影响》。《食品》13，2134（2024）。Wei, S.-Y. & Zhou, W.-X.《量化国际主粮贸易网络的动态结构韧性：一种基于熵的方法》。"arXiv"预印本 arXiv:2503.18004（2025）。Wang, X. 等。《量化全球粮食贸易：一种基于净热量含量的食品贸易网络方法

分析。《农业系统》**230**，104475（2025 年）。
Holme , P. & Saramäki , a. Tem poral networks。《Ph ysics re ports **519** , 97-125 (2012).
Rasmussen, C., Dupont, Y. L., Mosbacher, a. B., Trøjelsgaard, K. & Olesen, a. M. 时间分辨率对生态网络结构的强烈影响。《公共科学图书馆·综合》8，e81694（2013）。Organization. S. D. o. t. F. a. A. 联合国粮食及农业组织统计司，<https://www.fao.org/faostat/zh/#home>（2025）。Diestel, R.《图论》。（施普林格·柏林·海德堡，2017）。Opsahl, T.《加权网络的结构与演化》，伦敦大学，英国伦敦，（2009）。Wang, H., Hernandez, a. M. & Van Mieghem, P. 加权网络中的中介中心性。《物理评论 E——统计、非线性与软物质物理》77，046105（2008）。Dalin, C., Konar, M., Hanasaki, N., Rinaldo, A. & Rodriguez-Iturbe, I. 全球虚拟水贸易网络的演化。《美国国家科学院院刊》109，5989-5994（2012）。Borgatti, S. P. 中心性与网络流。《社会网络》27，55-71（2005）。Barrat, A., Barthelemy, M., Pastor-Satorras, R. & Vespignani, A. 复杂加权网络的架构。《美国国家科学院院刊》101，3747-3752（2004）。Freeman, L. C. 一组基于介数的中心性测度。《社会计量学》，35-41（1977）。Page, L., Brin, S., Motwani, R. & Winograd, T. PageRank引文排名：为网络带来秩序。（斯坦福信息实验室，1999）。Colizza, V., Flammini, A., Serrano, M. A. & Vespignani, A. 检测复杂网络中的富人俱乐部排序。《自然·物理》2，110-115（2006）。Bonacich, P. 特征向量中心性的若干独特性质。《社会网络》29，555-564（2007）。Newman, M. E. & Girvan, M. 发现并评估网络中的社群结构。《物理评论 E》69，026113（2004）。Newman, M. E. 网络中的混合模式。《物理评论 E》67，026126（2003）。Kali, R. & Reyes, a. 全球化的架构：一种国际经济一体化的网络方法。《国际商务研究杂志》38，595-620（2007）。Clemente, G. P., Cornaro, A. & Della Corte, F. 揭示农食贸易网络中社群组成的关键驱动因素。《科学报告》13，doi:10.1038/s41598-023-41038-z（2023）。Pedreschi, N., Battaglia, D. & Barrat, A. 时间富人俱乐部现象。《自然·物理》

18, -,
931 + 10 1038 41567 022 01634 8 2022
doi: . /s - - - ( )。Dorogovtsev, S. N., Goltsev, A. V. & Mendes, a. F. F. 复杂网络的k核组织。《物理评论快报》96，040601-040601，doi:10.1103/PhysRevLett.96.040601（2006）。Watts, D. a. & Strogatz, S. H. “小世界”网络的集体动力学。《自然》393，440-442（1998）。Albert, R. & Barabási, A.-L. 复杂网络的统计力学。《现代物理评论》74，47 2002( )。Li, a. a., Xiao, Q., Wu, H. X. & Li, a. P. 解读全球大米贸易网络：中心性、结构洞与粮食不安全的关联。《食品》13，doi:10.3390/foods13040604（2024）。Sarwar, D. & Rye, S. 俄乌战争对全球供应链的影响：系统性文献综述。《可持续食品系统前沿》9，doi:10.3389/fsufs.2025.1648918（2025）。Zhang, Y. T. & Zhou, W. X. 量化各经济体在国际作物贸易网络中的地位：对各类节点排名指标的相关结构分析。《混沌、孤子与分形》172，doi:10.1016/j.chaos.2023.113567（2023）。Blondel, V. D., Guillaume, a. L., Lambiotte, R. & Lefebvre, E. 大型网络中社群的快速展开。《统计力学理论与实验杂志》，doi:10.1088/1742- 5468/2008/10/P10008（2008）。Shutters, S. T. & Muneepeerakul, R. 农业贸易网络与经济发展模式。《公共科学图书馆·综合》7，doi:10.1371/journal.pone.0039756（2012）。Head, K., Mayer, T. & Ries, a. 独立后殖民贸易联系的瓦解。《国际经济学杂志》81，1-14（2010）。Glauben, T. 等. 乌克兰战争暴露了全球农产品市场的供应紧张局势：需要开放全球贸易以应对危机。（IAMO政策简报，2022）。Salathé, M. & aones, a. H. 具有社群结构的网络中疾病的动力学与控制。《公共科学图书馆

计算生物学 **6**，e1000736（2010）。Paini, J. 科学院院刊》11:3，7875-7879（2016）。Holes, S. 竞争的社会结构。*of* 国家科学院院刊》物种争论《美国国家科学院院刊》。剑桥：哈佛大学出版社，1992）。Kauffman, S. A. 载于《自旋玻璃与生物学》61-100页（世界科学出版社，1992）。Gao, a., Barzel, B. & Barabási, A.-L. 复杂网络中的普适韧性模式。《自然》530，307-312（2016）。Garlaschelli, D. & Loffredo, M. I. 世界贸易网络的结构与演化。《物理学A：统计力学及其应用》355，138-144，doi:https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.02.075（2005）。Newman, M. E. a. 网络中的模块度与社群结构。《美国国家科学院院刊》103，8577-8582，doi:10.1073/pnas.0601602103（2006）。Robertson, R.《全球化：社会理论与全球文化》。（SAGE出版社有限公司，2000）。Headey, D. & Fan, S. 危机剖析：粮食价格飙升的原因与后果。《农业经济学》39，375-391（2008）。Puma, M. a., Bose, S., Chon, S. Y. & Cook, B. I. 评估全球粮食系统不断演变的脆弱性。《环境研究快报》10，024007，doi:10.1088/1748-9326/10/2/024007（2015）。Boccaletti, S. 等. 多层网络的结构与动力学。《物理学报告》544，1-122（2014）。Kivelä, M. 等. 多层网络。《复杂网络杂志》2，203-271（2014）。D'Odorico, P. 等. 全球虚拟水贸易与水文循环：模式、驱动因素及社会环境影响。《环境研究快报》14，053001（2019）。Tamea, S. 等. 虚拟水贸易的地方与全球视角。《水文与地球系统科学》17，1205-1215（2013）。Fathelrahman, E., Osman, R., Hoag, D. L. K., Sixt, G. N. & Strzepek, K. 使用全球局部均衡模拟模型（GSIM）评估印度禁止出口非巴斯马蒂香米的双边贸易福利影响。《食品》13，3124（2024）。Dawe, D. 稻米危机：市场、政策与粮食安全。（劳特利奇出版社，2012）。Fukase, E. & Martin, W. 谁将在21世纪养活中国。《中国的收入增长与食品需求和供给》（2016）。Yu, M., Fan, a., Wang, H. & Wang, a. 美国贸易政策不确定性对中国农产品进出口的影响：总量与产品层面的分析。《国际经济与金融评论》84，70-83（2023）。Searchinger, T. 等. 将美国耕地用于生物燃料生产，会因土地利用变化产生的排放而增加温室气体。《科学》319，1238-1240（2008）。Henchion, M., Hayes, M., Mullen, A. M., Fenelon, M. & Tiwari, B. 未来蛋白质供需：实现可持续均衡的策略与影响因素。《食品》6，53（2017）。Nga, N. T. D., Ninh, H. N. & Van Hung, P. 越南小农户生猪价值链发展：现状分析与趋势。（2014）。Nguyen, V. D. 等. 越南山羊生产、供应链、挑战与发展机遇：综述。《动物》13，2546（2023）。Tilman, D. & Clark, M. 全球饮食将环境可持续性与人类健康联系起来。《自然》515，518-522（2014）。Kummu, M. 等. 贸易与粮食系统韧性的相互作用：供应多样性随时间增加，但贸易独立性有所牺牲。《全球粮食安全》24，100360（2020）。Chepeliev, M., Maliszewska, M. & Pereira, M. F. S. e. 剖析乌克兰战争对全球食品市场的影响渠道：综合情景方法：Maksym C. 等.《粮食安全》，1-29（2025）。Zhang, Z., Abdullah, M. a., Xu, G., Matsubae, K. & Zeng, X. 从贸易依赖视角看各国对俄乌战争所致粮食供应中断的脆弱性。《科学报告》13，16591 2023( )。Ben Hassen, T. & El Bilali, H. 乌克兰冲突及其令人不安的连锁反应：对北非粮食系统与发展的影响。《农业与粮食安全》13，16（2024）。

85 Quitzow, R.、Balmaceda, M. 和 Goldthau, A. 地缘政治、脱碳与粮食安全的交汇 g由此产生了独特的挑战 g，涉及化肥供应 pply 链。*One Earth* **8** (2025).
86 Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R. & Kinzig, A. 社会—生态系统中的韧性、适应性与可转型性。Ecology and Society 9（2004）。87 Holling, C. S.（国际应用系统分析研究所，拉克森堡，1973）。88 Folke, C. 韧性：社会—生态系统分析视角的兴起。Global Environmental Change 16, 253-267（2006）。89 Hosseini Shekarabi, S. A., Kiani Mavi, R. & Romero Macau, F. 供应链韧性：对风险缓解、鲁棒优化和技术解决方案的批判性综述及未来研究方向。Global Journal of Flexible Systems Management 26, 681-735（2025）。90 Berendes, K., Arabmaldar, A., Hammerschmidt, M., Loske, D. & Klumpp, M. 衡量韧性—效率权衡：零售物流的实证应用。Logistics Research（2025）。91 Kettele, M., Lechner, G., Baumgartner, R. a. & Füllsack, M. 评估食品供应链的运营韧性：基于综合决策框架的离散事件仿真方法。Journal of Simulation 19, 381-410（2025）。92 Boerema, A. 等。大豆贸易：平衡洲际市场的环境与社会经济影响。《公共科学图书馆·综合》11, e0155222（2016）。93 Gibbs, H. K. 等。巴西大豆禁令。《科学》347, 377-378（2015）。94 Albert, R., aeong, H. & Barabási, A.-L. 复杂网络的错误与攻击容忍性。《自然》406, 378-382（2000）。95 Miroudot, S. 全球价值链中的韧性与稳健性：一些政策启示。《新冠肺炎与贸易政策：为何内向转型行不通》2020, 117-130（2020）。96 Puma, M. a. 全球粮食系统的韧性。《自然·可持续发展》2, 260-261（2019）。97 Lobell, D. B., Schlenker, W. & Costa-Roberts, a. 1980年以来的气候趋势与全球作物生产。《科学》333, 616-620，doi:doi:10.1126/science.1204531（2011）。98 Giordani, P. E., Rocha, N. & Ruta, M. 粮食价格与贸易政策的乘数效应。《国际经济学杂志》101, 102-122（2016）。99 Arezki, M. R. & Bruckner, M. 粮食价格与政治不稳定。（国际货币基金组织，2011）。100 Clapp, a. 粮食自给自足：理解其含义及其适用情形。《食品政策》66, 88-96（2017）。101 Martin, W. & Anderson, K. 大宗商品价格繁荣时期的出口限制与价格隔离。《美国农业经济学杂志》94, 422-427（2012）。102 Laborde, D., Martin, W., Swinnen, a. & Vos, R. COVID-19对全球粮食安全构成的风险。《科学》369, 500-502（2020）。103 FAO, M. T. C. 新冠肺炎与粮食供应链风险：如何应对？联合国粮食及农业组织（FAO）。–2020.–3月29日。（2020）。104 Mustafa, S. E. 乌克兰和俄罗斯联邦对全球农产品市场的重要性及当前冲突相关风险。（2022）。105 Torreggiani, S., Mangioni, G., Puma, M. a. & Fagiolo, G. 识别食品贸易国际多层网络的社群结构。《环境研究快报》13, 054026（2018）。106 Ben Hassen, T. & El Bilali, H. 俄乌战争对全球粮食安全的影响：迈向更可持续、更具韧性的粮食系统？《食品》11, 2301（2022）。107 Hussein, H. & Knol, M. 乌克兰战争、食品贸易与全球危机网络。《国际观察家》58, 74-95，doi:10.1080/03932729.2023.2211894（2023）。108 Index, F. F. P. 联合国粮农组织食品价格指数创历史新高，2022）。109 Hebebrand, C. & Laborde Debucquet, D. 肥料价格高企加剧了全球粮食安全担忧。（2023）。110 Alicke, K., Azcue, X. & Barriball, E. 冠状病毒时期的供应链恢复——规划当下与未来。麦肯锡公司.–2020。（2020）。111 Notteboom, T., Pallis, T. & Rodrigue, a.-P. 全球集装箱运输与港口的中断和韧性：COVID-19疫情与2008—2009年金融危机的比较。Maritime Economics & Logistics 23, 179（2021）。112 联合国粮食及农业组织。世界粮食和农业统计年鉴。联合国粮食及农业组织。

联合国，意大利罗马（2022）。113 Espitia, A., Rocha, N. & Ruta, M. 新冠肺炎与粮食保护主义：疫情和出口限制对全球粮食市场的影响。世界银行政策研究工作论文（2020）。114 Evenett, S. a. 新冠肺炎与贸易政策：为何内向转型行不通。网址：https://voxeu.org/content/covid-19-and-trade-policywhy-turning-inward-won-t-work（2020）。115 Sheffi, Y. 新（反）常态：重塑新冠肺炎疫情后的企业与供应链战略。（Mit Ctl Media，2020）。116 Zhao, C. 等。气温升高使四项独立估算中的主要农作物全球产量下降。《美国国家科学院院刊》114, 9326-9331（2017）。117 King, M. 等。21世纪全球气候变化背景下农业气候带北移。《科学报告》8, 7904（2018）。118 Hedlund, a. 等。气候变化对全球粮食贸易网络的影响。《环境研究快报》17, 124040（2022）。119 Barrett, C. B. 通过科学与团结应对全球粮食安全挑战。《美国农业经济学杂志》103, 422-447（2021）。