

# 国际粮食贸易网络多核集聚格局的形成机制研究

刘林青<sup>1,2</sup>, 闫小斐<sup>1\*</sup>

(1. 武汉大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430072;  
2. 武汉大学 中国企业家研究中心, 湖北 武汉 430072)



**摘要** 受全球新冠肺炎疫情影响,国际粮食贸易网络格局的动态变化成为当前全球关注的热点。通过构建 1995—2018 年全球 125 个主要经济体的国际粮食贸易网络,探索贸易格局演化特征和形成机制。研究发现:国际粮食贸易网络的网络密度、贸易规模和集聚程度增加,表现出越来越“小”的小世界特性;网络格局以美国独大、离散少核的不均衡格局演化为以俄罗斯、美国、泰国等重要的粮食出口国为多个中心的集聚多核的均衡格局。基于时间指数随机图模型的实证结果得出,自组织机制中的扩张性、三元组闭合性、稳定性和关系嵌入机制中的互补性关系均促进了粮食贸易关系的形成,没有证据显示竞争性关系对粮食贸易关系有抑制作用,在一定程度上肯定了国际粮食贸易的正和博弈本质。

**关键词** 国际粮食贸易网络;多核集聚格局;形成机制;时间指数随机图模型

**中图分类号:**F 742 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-3456(2021)04-0047-13

**DOI 编码:**10.13300/j.cnki.hnwkxb.2021.04.007

粮食是人类生存和发展的基础。当前全球面临“百年未有之大变局”,世界经济的不确定因素增多,如自然灾害频发、贸易保护主义抬头等,扰乱了全球粮食安全系统的稳定,导致国际形势更加严峻。由于粮食生产和消费的空间不均衡性,经济体间通过粮食贸易实现全球范围内的农业资源优化和再分配,促使粮食贸易成为保障粮食安全的有效工具<sup>[1]</sup>。全球化背景下,世界各经济体通过错综复杂的贸易关系形成国际贸易网络,因此从网络层面审视全球粮食贸易系统十分必要<sup>[2-3]</sup>。特别是,当前新冠疫情全球蔓延,俄罗斯、印度、泰国等陆续采取了收缩的粮食出口贸易政策,影响了全球粮食贸易系统的稳定,使一些经济体陷入粮食危机的阴影。基于此,分析关键贸易国家在国际粮食贸易格局演化中的地位及其影响具有重要的现实意义。

国际粮食贸易网络是由全球主要经济体(节点)与经济体间粮食贸易关系(边)构成的复杂网络系统,网络中的粮食贸易关系相互依赖和影响,表现出典型的网络特征。当前学者对国际粮食贸易网络的研究,主要集中在对网络宏观拓扑结构特征的描述性分析。如 Dupas 等<sup>[4]</sup>揭示了 1986—2013 年期间世界粮食网络拓扑结构和度分布的变化,阐述了主干网络、瞬态网络、中间网络三个子网络的特征及其对总贸易的贡献。陈艺文等构建了“一带一路”粮食贸易网络,探索网络密度、贸易重心等动态演化特征,并从定性角度分析了政治、经济、文化和资源等外生因素对粮食贸易网络演化的影响机制<sup>[5]</sup>。韩冬等在此基础上,采用 QAP 回归分析探索外生因素对“一带一路”国家粮食贸易格局演变的影响机制<sup>[3]</sup>。综上发现,针对粮食贸易网络的研究缺乏基于全球层面动态演化的微观机制探讨。

以国际粮食贸易网络为研究对象,将定性分析与定量研究进行整合。本文研究问题分别为:①国际粮食贸易网络的贸易格局经历了怎样的动态变化?哪些关键国家在贸易格局中占据中心地位?②驱动国际粮食贸易网络格局形成和演化的机制有哪些?为了回答以上问题,本文从宏观层面的可

收稿日期:2021-03-08

基金项目:国家社会科学基金重大项目“全球生产网络、知识产权保护与中国外贸竞争力提升研究”(15ZDB155);国家社会科学基金重大项目“新形势下全球创新网络演化及风险治理研究”(20&ZD072)。

\* 为通讯作者。

视化和中观层面的社群分布对比分析了 1995 年与 2018 年的国际粮食贸易网络的格局演化特征;通过对演化机制的理论分析和时间指数随机图模型构建(temporal exponential random graph model, TERGM),探寻和检验影响粮食贸易网络格局演化的自组织机制和关系嵌入机制。

## 一、国际粮食贸易网络的演化特征分析

### 1. 数据来源

粮食贸易双边数据来源于 CEPII 的子数据库“TRADE & INTERNATIONAL INVESTMENTS”。谷物是世界上交易量最大的产品,也是人类饮食的基础,因此在中国对粮食的传统定义及美国农业部的统计口径<sup>[4-5]</sup>的基础上,选取海关进出口商品编码 HS92 中的“谷物”作为粮食产品数据来源,由小麦、玉米、稻米、大麦、高粱、燕麦、黑麦及小米荞麦等 8 类粮食细分产品(4 位海关编码分别为 1001—1008)汇总得出。其他数据则来自世界银行数据库、CEPII 的子数据库“GEOGRAPHY”以及粮食贸易网络数据的计算得出。

### 2. 网络构建

基于双边粮食贸易流数据,构建 1995—2018 年的动态国际粮食贸易初始网络,将其定义为  $Net(Node^{TP}, Link^{TW})$ 。其中,以两年作为时间间隔形成时间序列  $T$ ,是 1995, 1997, …, 2015, 2018 的序列集合; $Node^{TP}$  为  $T$  时期经济体属性为  $P$  的节点集合; $Link^{TW}$  为  $T$  时期粮食贸易关系的集合, $W$  为贸易关系的权重,即粮食贸易流的价值。国际粮食贸易网络经历 24 年的发展,表现出典型的生长态势和复杂网络特性。1995 年粮食贸易网络中包括了 201 个经济体和 2999 条粮食贸易关系;发展到 2018 年,参与粮食贸易的经济体增加到 214 个,粮食贸易关系的数量升至 5341 条,导致网络密度从 0.07 上升到 0.12,网络平均路径距离降低,网络集聚系数增加,粮食贸易规模也出现了大幅增长。总体来说,国际粮食贸易网络作为贸易网络中的子网络,具有显著的生长态势,小世界特性不断加深,集聚化和一体化程度不断加强。

由于国际粮食贸易网络较为稠密,为更精准的展示网络的核心结构和特点,遵循已有文献关于网络主干结构提取的方法<sup>[6-8]</sup>,分别对节点经济体和粮食贸易关系边进行精简。参照 Hausmann 等<sup>[9]</sup>基于国家 GDP、国家人口、贸易总额等的筛选标准,最终提取 125 个经济体作为研究对象,并选择每个经济体粮食进口额排名前两位的贸易关系,得到全球主要经济体构成的国际粮食贸易主干网络。125 个主要经济体的粮食贸易出口额占全球 90% 以上,因此基于此构建的国际粮食贸易网络能够较高等度的代表全球整体的粮食贸易网络。为了证明主干网络的结构稳定性,本文在稳健性分析部分对边提取标准进行调整以检验其敏感性。

### 3. 网络可视化

本文通过网络可视化技术展示国际粮食贸易网络的结构特征,旨在分析粮食贸易格局演化并识别起主要作用的重要经济体。基于篇幅有限,文中仅展示 1995 年和 2018 年的国际粮食贸易网络的可视化,如图 1 和图 2 所示。图中节点为经济体,节点颜色深浅用于区分各经济体所属的地理分布,节点大小与节点中心度(即经济体粮食贸易伙伴数量)成正比,节点标签大小与节点经济体出口额大小成正比;边代表了粮食贸易流,边的粗细与粮食贸易流价值大小成正比。

不同时期的国际粮食贸易网络均表现出显著的中心—边缘分布。图 1 为 1995 年国际粮食贸易网络的可视化。显而易见,美国在网络中占据绝对中心位置,尤其突出,以中心度为 70 占据全球首位;第二名为泰国,中心度仅为 28,远小于美国;随后是法国、加拿大和印度,中心度分别为 24、21 和 16。以上节点中心度的大小主要由节点出度中心性(即粮食出口伙伴数量)贡献,意味着这些经济体在粮食网络中是较为受欢迎的粮食出口国。从节点标签大小可以直观看出,美国远超其他经济体。因此,无论是粮食出口伙伴数量还是粮食出口规模,美国均属于全球最重要的经济体。此外,法国的出口额为 53.53 亿美元,约为美国的三分之一;加拿大排第三,为 42.91 亿美元;其次是阿根廷和泰国,

出口额分别为 20.39 亿美元和 19.68 亿美元。显然,此时的国际粮食贸易网络格局受美国主导,表现出不均衡的结构特点。

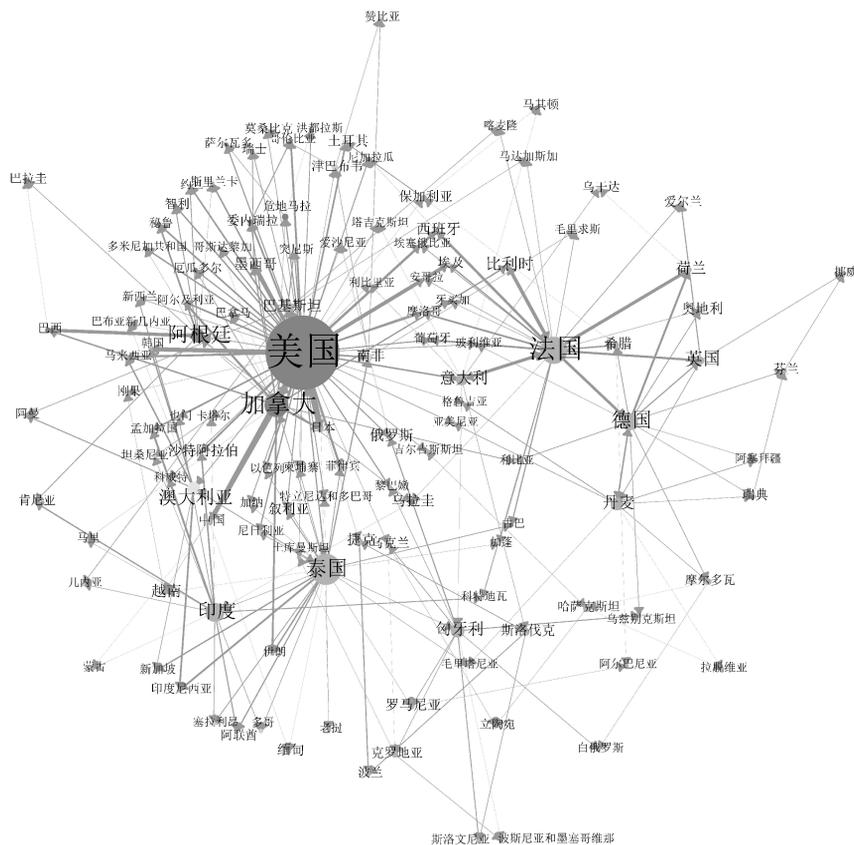


图 1 1995 年国际粮食贸易网络可视化

相比于 1995 年,2018 年的国际粮食贸易网络如图 2 所示,美国、泰国、印度、法国在网络中占据相对中心位置且彼此间差距缩小。值得注意的是,俄罗斯的中心度从 3 升至 37,超越美国成为拥有最多粮食贸易伙伴的国家;美国的中心度则下降到 28,位居第二;泰国排第三,中心度为 21;其次是印度和法国,中心度分别为 19 和 18。显然,随着全球贸易一体化的加强,粮食贸易网络中经济体粮食贸易合作伙伴数量分布的离散程度下降,趋向平衡。另外,网络集聚系数由 0.05 提升至 0.07,网络更加集聚。从节点标签大小看,各经济体的粮食贸易出口规模表现出大幅增长。美国出口额为 214.62 亿美元,增幅为 37.44%,仍是出口额最大的国家;俄罗斯出口额仅次于美国,为 127.48 亿美元,翻了五十多倍;印度、阿根廷、法国、乌克兰和加拿大五个经济体的粮食出口额均在 70 亿美元到 80 亿美元之间,泰国的出口额为 59.10 亿美元,其中乌克兰的出口额翻了一百多倍。

#### 4. 网络社群分析

基于加权的随机游走社群发现方法对以上两时期的国际粮食贸易网络进行社群分布分析,以观察粮食贸易网络的社群分布变化。研究发现,1995 年的国际粮食贸易网络生成了 14 个贸易社群,模块化得分为 0.44,说明该社群划分较为合理。其中最大的社群以美国为中心,包含 43 个经济体,以美洲和亚洲经济体为主,包括了日本、韩国、俄罗斯等经济体,社群成员的粮食出口总额占据 125 个经济体的 52.27%。第二大社群则以法国为中心,覆盖了德国、法国、英国、比利时、意大利、丹麦等重要的欧洲经济体,总体以欧洲和非洲经济体为主。第三大社群以泰国为中心,东南亚和南非经济体为主要成员构成。

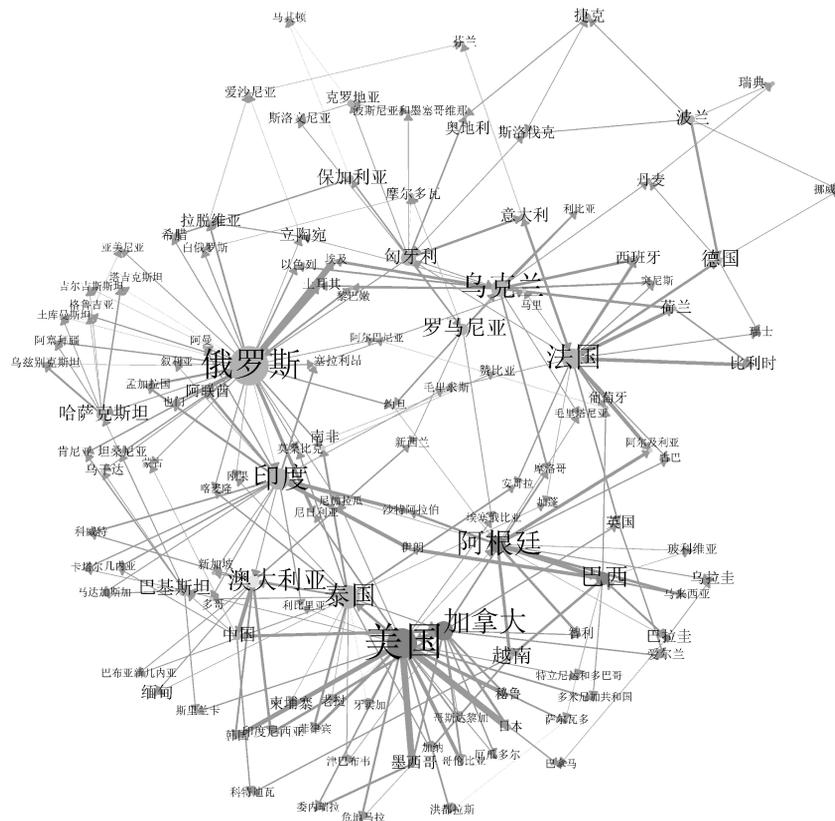


图 2 2018 年国际粮食贸易网络可视化

2018 年的国际粮食贸易网络包含 13 个社群,模块化得分为 0.61,贸易社群规模变小,社群成员分布更加均衡。第一大社群是以泰国为中心的亚洲和非洲经济体为主的社群,共 19 个经济体,主要有澳大利亚、中国、南非等。其次是以美国为中心的美洲经济体占比高达 88.89% 的第二大社群,包含 18 个经济体,日本和韩国也在其中。值得注意的是,第二大社群的经济体数量接近第一大社群,但社群经济体出口总额是第一大社群的两倍之多,由此可见,虽然美国所在社群的规模被其他社群削弱,但仍表现出较重要的地位。第三大社群的社群规模为 15 个经济体,是以法国为中心的欧非经济体子群,主要包含了法国、乌克兰、荷兰、比利时和英国等经济体。此外,前三大社群经济体加总的粮食出口额仅占 125 个经济体的 52.85%,接近于 1995 年的第一大社群粮食出口总额,由此发现国际粮食贸易网络格局表现出更加均衡化、多核化的格局。

整体来说,国际粮食贸易网络表现出典型的中心—边缘的分布特征。经过 24 年的经贸关系发展,全球的粮食贸易规模增幅显著,贸易格局表现出较大的变化。具体来说,俄罗斯和乌克兰在贸易规模上表现出了突出的增长势头,以美国独大的离散少核且不均衡的国际粮食贸易格局逐渐转变为以俄罗斯、美国、泰国、印度、法国等为多个中心的多核集聚的均衡格局。

## 二、理论分析与模型构建

前文描述了国际粮食贸易网络的统计特征和可视化,得出粮食贸易网络表现出中心—边缘的分布结构和多核集聚的均衡格局。但是演化特征分析并不能回答粮食贸易网络格局演化的背后机制是什么?为回答该问题,遵循已有学者研究贸易网络的传统思路,将从网络理论视角探究影响粮食贸易网络格局形成和演化的动力机制。

## 1. 文献回顾

网络分析被用于揭示多种学科的复杂系统模式,在国际贸易领域已经被广泛应用。由于双边贸易关系相互依存的特点,粮食贸易关系的形成受到已有粮食贸易关系的影响,这与社会网络关系的形成机制相一致,即粮食贸易关系的形成既包括外生机制,也包含自组织机制和关系嵌入机制。其中外生机制指的是网络参与者外生性的属性特征对于参与者间关系发生的影响效应<sup>[10]</sup>。外生机制对贸易关系形成影响的研究主要关注经济体宏观属性特征,如经济发展程度、人口规模、经济自由度、汇率、文化、经济、政治、自然环境等对经济体间贸易关系的影响<sup>[3,5,11-14]</sup>。自组织机制指网络关系可以通过自我组织形成一定模式的过程,具体表现为网络中已有关系的存在会影响其他关系的出现<sup>[10]</sup>。自组织机制如互惠性、星形结构、偏好连接、传递性等在整个层面贸易网络形成机制研究中得到了普遍的认可<sup>[11,13-15]</sup>,而基于具体产品层面贸易网络的自组织机制研究相对较少<sup>[16-18]</sup>。关系嵌入机制是指网络经济体嵌入在与其他参与者互动形成关系网络的经济活动对网络关系形成的影响效应<sup>[19]</sup>。对于关系嵌入机制的研究当前关注的焦点主要有地理距离、语言距离、接壤关系、最惠国贸易关系等对贸易关系形成的影响分析<sup>[13-14]</sup>,较少关注贸易互补性和竞争性的嵌入机制影响。当前从自组织机制和关系嵌入机制研究粮食贸易网络演化的探讨尚属空白。

## 2. 理论分析

(1)自组织机制。粮食贸易网络的自组织机制指在国际粮食贸易网络中,一部分经济体间已有的粮食贸易关系会影响其他经济体间粮食贸易关系的产生。互惠性效应已经被国际贸易领域学者普遍认可<sup>[11,13]</sup>,将其作为控制变量纳入讨论。基于国际粮食贸易网络的结构特点,将偏好连接效应以及三元组的传递闭合效应纳入自组织机制探讨<sup>[10,20]</sup>,并进行理论分析及提出假设。

①偏好连接效应。偏好连接也称为偏好依附,社会学领域将其称为马太效应。偏好连接是一个概率化的机制,指网络中链接数较高的节点获取新链接的速度比链接数低的节点更快,从而产生“富者愈富”的结果,最终使得链接数较高的节点随时间发展逐步成长为枢纽节点<sup>[21]</sup>。该机制在国际贸易相关领域得到了验证,如小麦贸易网络<sup>[18]</sup>、贸易协定网络<sup>[19]</sup>、贸易依赖网络<sup>[14]</sup>等。在粮食贸易网络中,少数经济体基于优势的自然资源要素,如大面积的耕地、良好的气候环境等,拥有粮食贸易出口的优势产品,成为受欢迎的粮食出口国,从而在国际粮食贸易网络中获取较多数量的粮食贸易合作伙伴。同时这些受欢迎的高度节点经济体通常也拥有成熟的国内机构来管理大量的粮食贸易出口活动,它反过来为相应经济体提供了进行粮食贸易往来的良好信誉<sup>[15]</sup>,从而成为网络中活跃的枢纽节点。对此本文提出假设:

H<sub>1</sub>:国际粮食贸易网络存在偏好连接效应,少量经济体成为活跃的粮食出口国。

②传递闭合效应。三元组是复杂网络研究的重要主题,它产生的传递闭合效应已得到贸易相关领域的经验证明<sup>[13-15,19]</sup>。传递闭合效应在多重连接的基础上产生,是影响关系形成和集群产生的重要因素。在粮食贸易网络中,传递闭合效应表现为二元组经济体在拥有多重间接连通关系的基础上,增加一条新的粮食贸易关系,从而形成传递闭合的三元组网络结构,即共享同一粮食贸易合作伙伴的两个经济体间产生新的粮食贸易关系。Cranmer等从协同效应出发对国家贸易集群的形成原因进行了解释,认为经济体间通过形成闭合三元组以获取额外的贸易收益<sup>[22]</sup>。另外,粮食安全是关乎国计民生的大事,粮食贸易也受到了各经济体相关部门的重视,经济体通常从粮食贸易合作伙伴获取贸易信息,不会随意建立新的粮食贸易关系,而是倾向于选择和合作伙伴的合作对象产生粮食贸易往来,以便达到降低潜在贸易风险、减少贸易不确定性和交易成本的目的。因此,本文提出假设:

H<sub>2</sub>:粮食贸易网络存在传递闭合效应,该效应正向促进粮食贸易网络的关系形成。

③稳定效应。贸易网络的演化发展具有一定的稳定性<sup>[11,13-14]</sup>。从自然资源禀赋来看,粮食生产及出口依赖于粮食产品所需要的自然资源禀赋,而这些自然要素的不可流转特性也使得粮食贸易具有较强的稳定性<sup>[5]</sup>。另外从贸易成本角度来考虑,经济体间的相互信任、粮食产品的质量和可靠性、进口方偿付能力以及外部安全性等因素,共同影响了粮食贸易成本。因此,经济体间已有的粮食贸易

关系发生的越频繁,改变贸易伙伴的成本就越高<sup>[17]</sup>。基于此,经济体间越倾向于维持已经存在的贸易关系,实现可持续的粮食贸易关系发展。因此,本文提出假设:

H<sub>3</sub>:粮食贸易网络存在稳定效应,即粮食贸易关系具有稳定不变的倾向。

(2)关系嵌入机制。关系嵌入机制指的是经济体间其他经济关系网络对粮食贸易网络关系形成及演化的影响。随着全球贸易一体化的发展,有关贸易竞争与互补关系态势的研究越来越为学界所关注<sup>[12,23]</sup>,二者为贸易战略的有效制定提供了参考依据<sup>[23]</sup>。粮食贸易竞争性关系网络是经济体间的粮食出口结构相似性关系网络,反映各经济体间粮食贸易竞争关系的可能性态势。当两经济体在粮食出口结构上较为相似时,可能会催生国际市场的恶性竞争,进而导致国际贸易环境被破坏<sup>[24]</sup>,由此抑制粮食贸易关系的良性发展。

粮食贸易互补性关系网络则是粮食贸易互补性关系构建的网络,在一定程度上反映了经济体间粮食贸易的结构匹配程度和贸易合作潜力。Hoang 指出,如果经济体间存在粮食贸易的互补性关系,则经济体间的粮食贸易往来会随之增加<sup>[23]</sup>。如印度大米出口占全球首位,中国大米进口位居前列,则二者间存在一定的贸易互补性,有助于形成粮食贸易关系。各经济体在水资源、耕地面积、气候、人口数量、农业科技等方面存在差异,导致经济体间产生粮食贸易互补性,从而吸引它们通过建立贸易区或最惠国待遇等贸易政策,促进彼此之间的粮食贸易往来。同样贸易往来的可持续性发展反过来也会强化经济体间的贸易互补性。因此本文提出如下假设:

H<sub>4a</sub>:贸易竞争性关系网络抑制了粮食贸易网络的关系形成。

H<sub>4b</sub>:贸易互补性关系网络促进了粮食贸易网络的关系形成。

### 3. 研究设计

(1)被解释变量。粮食贸易关系是二值变量,关系存在即为 1,否则为 0。

(2)解释变量。本文主要包含两类解释变量,分别为内生性变量和协网络变量,前者用于检验自组织机制,后者用于检验关系嵌入机制,如表 1 所示。内生性变量中,扩张性 *Activity* 通过粮食贸易网络中节点几何加权出度分布的离散程度来衡量,反映粮食贸易的偏好连接效应。该变量被视为“一种反偏好连接模型术语”,如果系数为正,表明网络的出度分布较均匀;系数为负,则说明网络的出度分布不均匀,存在少量高出度节点,验证了偏好连接效应的存在<sup>[25]</sup>。多重连通性 *Multi-connectivity* 反映了经济体间通过中间经济体实现粮食出口关系间接连通的深度,是确保传递闭合效应能够得到适当解释的基础参数和先决条件<sup>[10]</sup>,通过几何加权二元组伙伴来衡量。三元组闭合性 *Triadic-closure* 则反映在多重连通性的基础上,网络中三元组经济体分层路径闭合的趋势,通过几何加权边共享伙伴来测量,用来检验传递闭合效应。一般来说,负的多重连通性系数和正的三元组闭合性系数共同解释粮食贸易网络中的传递闭合效应<sup>[10]</sup>。稳定效应则通过稳定性 *Stability* 来反映,指的是粮食贸易关系的连接状态在下一个时期的延续性<sup>[26]</sup>。协网络变量用来验证关系嵌入机制,包含了粮食贸易竞争性关系网络和贸易互补性关系网络。其中,粮食贸易竞争性关系网络(*mat\_TSI*)通过测量经济体间粮食产品出口相似性指数构建,经济体 *i* 和 *j* 的粮食产品出口相似性指数 *TSI<sub>ij</sub>* 根据修正的贸易相似度指数计算得出<sup>[27-28]</sup>,具体公式为:

$$TSI_{ij} = \sum_k \left[ \frac{X_i^k/X_i + X_j^k/X_j}{2} \right] \left[ 1 - \left| \frac{(X_i^k/X_i) - (X_j^k/X_j)}{(X_i^k/X_i) + (X_j^k/X_j)} \right| \right] \times 100 \quad (1)$$

式(1)中, $X_i^k/X_i$ 、 $X_j^k/X_j$  分别代表了经济体 *i*、*j* 粮食产品 *k* 的出口额占各经济体粮食产品出口总额的比例。参照詹森华<sup>[28]</sup>,当 *TSI<sub>ij</sub>* 大于等于 50 时,经济体 *i*、*j* 之间存在粮食贸易的竞争关系,相似性指数越高,则出口竞争趋势越激烈。

粮食贸易互补性关系网络(*mat\_TCI*)通过计算经济体间粮食贸易的互补性指数构建。经济体 *i* 和 *j* 间粮食贸易的互补性指数 *TCI<sub>ij</sub>* 基于粮食产品的显性比较优势 *RCA* 得出<sup>[28-29]</sup>,计算公式为:

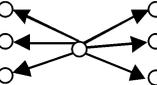
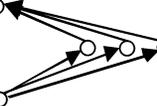
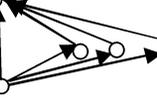
$$TCI_{ij} = \sum_k RCA_{xi}^k \times RCA_{mj}^k \times (X_w^k/X_w) \quad (2)$$

$$RCA_{xi}^k = \frac{X_i^k / X_i}{X_w^k / X_w} \quad (3)$$

$$RCA_{mj}^k = \frac{M_j^k / M_j}{M_w^k / M_w} \quad (4)$$

式(2)中, $RCA_{xi}^k$ 为经济体*i*粮食产品*k*的出口显性比较优势; $RCA_{mj}^k$ 为经济体*j*粮食产品*k*的进口显性比较优势; $X_w^k / X_w$ 为全球粮食产品*k*出口额占全球粮食出口总额的比例。式(3)和式(4)展示了显性比较优势的计算,其中 $X_i^k / X_i$ 为经济体*i*粮食产品*k*的出口额占其粮食出口总额的比例; $M_j^k / M_j$ 为经济体*j*粮食产品*k*的进口额占其粮食进口总额比例; $M_w^k / M_w$ 为全球粮食产品*k*进口额占全球粮食进口总额的比例。 $TCI_{ij}$ 能够相对准确地反映经济体*i*粮食贸易出口与*j*粮食贸易进口需求之间的匹配程度,衡量了二者粮食贸易合作的潜力。 $TCI_{ij}$ 大于等于1时,两经济体间存在粮食贸易互补性关系;反之则不存在。

表 1 TERGM 参数介绍

变量	图形构局	变量解释	假设
<i>Edges</i>		国际粮食贸易网络关系形成的基准,视为常数项	
<i>Activity</i>		经济体出度中心性分布的离散趋势	$H_1$
<i>Multi-connectivity</i>		经济体间通过中间体间接传递粮食贸易关系的倾向	$H_2$
<i>Triadic-closure</i>		经济体形成闭合三角形的趋势,即经济体 <i>i</i> 和 <i>j</i> 通过共同的合作伙伴 <i>b</i> 产生粮食贸易关系的倾向	
<i>Stability</i>		经济体间粮食贸易关系存在状态在下一个时期的延续性	$H_3$
<i>Reciprocity</i>		粮食贸易关系的互惠倾向,即经济体 <i>i</i> 向 <i>j</i> 进出口粮食产品时,经济体 <i>j</i> 也向 <i>i</i> 进出口粮食产品的倾向	
发送者属性 ( $\ln GDP / \ln PerCapGDP$ )		经济体的经济实力、发达程度对粮食出口的影响	
接收者属性 ( $\ln GDP / \ln PerCapGDP$ )		经济体的经济实力、发达程度对粮食进口的影响	
趋同性( <i>Continent</i> )		经济体向位于同一大洲的经济体出口粮食的倾向	
<i>mat_TSI</i>		粮食贸易竞争性关系网络对粮食贸易关系形成的影响	$H_{4a}$
<i>mat_TCI</i>		粮食贸易互补性关系网络对粮食贸易关系形成的影响	$H_{4b}$
<i>mat_Ling</i>		经济体间语言邻近性网络、地理距离网络、接壤关系网络等对粮食贸易网络关系形成的影响	
<i>mat_Dist</i>			
<i>mat_Border</i>			
<i>Time_trend</i>		粮食贸易网络的时间效应	

(3)控制变量。基于已有研究文献,将经济体的外生性属性  $\ln GDP$ 、 $\ln PerCapGDP$ 、*Continent* 作为第一类控制变量。具体来说, $\ln GDP$  为经济体国内生产总值 GDP 的自然对数; $\ln PerCapGDP$  为经济体的发达程度指标人均 GDP 的自然对数;*Continent* 是各经济体隶属的地理位置分布,1 代表大洋洲,2 代表非洲,3 代表美洲,4 代表欧洲,5 代表亚洲,以上数据均通过世界银行数据库整理得出。第二类控制变量为已经得到学者普遍认可的协网络变量,其中语言邻近性网络(*mat\_Ling*)是基于经济体间的语言接近度指标值构建的网络;地理距离网络(*mat\_Dist*)则为经济体首都或重要城市之间距离自然对数构建的网络;接壤关系网络(*mat\_Border*)为经济体间领土接壤关系的网络,以上数据

均通过 CEPII 的子数据库“GEOGRAPHY”整理得出。第三类控制变量为内生性的结构变量,主要有互惠性(*Reciprocity*)和时间趋势(*Time\_trend*)。互惠性衡量了经济体  $i$  和  $j$  之间贸易关系的互惠程度,即当经济体  $i$  向  $j$  进出口粮食产品时, $j$  反过来向  $i$  进出口粮食产品的倾向;时间趋势指的是粮食贸易关系存在的线性时间趋势,通过对数据生成过程的结构性中断进行建模,系数为正说明随时间推移,网络变得更稠密,反之则变得更稀疏<sup>[26]</sup>。

(4)模型构建。时间指数随机图模型(temporal exponential random graph model, TERGM)通过最大伪似然估计和自举置信区间实现,适用于动态网络数据,既突破了传统回归的独立性假设,也克服了截面数据处理的缺陷,同时将影响粮食贸易关系形成的自组织机制、外生机制和关系嵌入机制纳入考虑,从而得到全面和准确的模型参数设定及实证结果<sup>[26]</sup>。TERGM 构建如下:

$$P(N^T | N^{T-1}, \theta) = \frac{\exp(\theta_N^T h(N^T, N^{T-1}) + \theta_X^T h(N^T, N^{T-1} | X^T) + \theta_E^T h(N^T, N^{T-1} | E^T))}{c(\theta, N^{T-1})} \quad (5)$$

式(5)中, $T, T-1$ 代表相应时期, $N^T, N^{T-1}$ 则为对应于  $T, T-1$ 时期的国际粮食贸易网络, $\theta$ 代表了未知参数对应的向量。 $c(\theta, N^{T-1})$ 为归一化常数。 $h(N^T, N^{T-1})$ 为国际粮食贸易网络关系形成的自组织机制,相应的网络统计量包含了 *Edges*、*Activity*、*Multi-connectivity*、*Triadic-closure*、*Stability*、*Reciprocity*、*Time\_trend* 等内生性变量。 $h(N^T, N^{T-1} | X^T)$ 代表了国际粮食贸易网络关系形成的外生机制,对应的统计量包括  $\ln GDP$ 、 $\ln PerCapGDP$  和 *Continent*。 $h(N^T, N^{T-1} | E^T)$ 为国际粮食贸易网络关系形成的关系嵌入机制,相应的统计量有 *mat\_TSI*、*mat\_TCI*、*mat\_Ling*、*mat\_Dist*、*mat\_Border* 等网络变量。 $\theta_N^T$ 、 $\theta_X^T$ 、 $\theta_E^T$  分别为以上三类机制对应的未知参数向量。

### 三、结果与分析

#### 1. 实证结果

本文采用 R 语言 *btergm* 程序包对国际粮食贸易网络的动态网络数据进行 TERGM 分析,得出实证结果如表 2 所示。其中模型 1 为基准模型,边变量(*Edges*)起到截距项作用,一般不做单独解释,其他项为控制变量,模型结果与传统回归模型结果基本一致,模型 2~6 则逐项增加主要的解释变量。

自组织机制在模型 2~6 中均得到了检验。表 2 显示,扩张性系数显著为负,说明节点经济体的出度分布具有较大的离散性,在国际粮食贸易网络中表现为:多数经济体具有较低的中心性,少量经济体具有较高的出度中心性,即拥有更多将其视为最重要贸易合作伙伴的经济体。从而国际粮食贸易网络表现出偏好连接效应, $H_1$  得到验证。偏好连接效应的实践解释是:多数经济体处于粮食贸易的边缘地位,少量经济体如美国、俄罗斯、泰国等因拥有自然资源禀赋,具备粮食产品的出口优势,活跃于国际粮食贸易出口市场中,吸引并接收越来越多的经济体向其进口粮食产品。这种偏好连接效应驱动优势经济体逐渐成长为枢纽节点,位居网络中心位置,促进了国际粮食贸易网络的中心—边缘宏观结构的形成,并使网络从最初的美国独大的不均衡格局发展成以俄罗斯、美国、泰国等为多个中心的多核均衡格局。多重连通性的系数为负且显著,三元组闭合性的系数显著为正,说明三元组经济体倾向于形成传递闭合三元组,即  $H_2$  得到检验。换句话说,传递闭合效应驱动经济体倾向于形成分层闭合的三元组集群结构,促使国际粮食贸易网络由相对离散的网络结构发展成为更加稳定的集聚结构。稳定性系数为 1.9762 且显著,意味着粮食贸易关系随时间的演进表现出较大的稳定性,即稳定性提高了粮食贸易关系形成的概率,因此  $H_3$  得到验证。

关系嵌入机制在模型 5、模型 6 中得到了部分检验。其中,粮食贸易竞争性关系网络(*mat\_TSI*) 在模型 5、模型 6 中系数为负但不显著,即  $H_{4a}$  未得到支持,意味着没有证据证明经济体间的粮食贸易竞争关系态势抑制了粮食贸易关系的发生。可能的原因是国际贸易本质是正和博弈,遵从的是合竞共赢的理念,因此出口结构相似的经济体间并非纯粹的恶性竞争,而是合作与竞争并存,形成了有效的国际分工,从而减轻了贸易竞争带来的负面影响。粮食贸易互补性关系网络(*mat\_ICI*) 在模型 6

中估计系数显著为正,说明粮食贸易互补性关系态势正向促进了粮食贸易网络关系的形成,即  $H_{4b}$  得到检验。因此,粮食贸易互补性关系与自组织机制共同促进了国际粮食贸易网络的多核集聚格局的形成与稳定发展。

本文的控制变量实证结果在表2中表现出了与传统的回归模型基本一致的结论。其中互惠性 (*Reciprocity*) 系数为正且显著,验证了在粮食贸易网络中,贸易关系遵循国际贸易的互惠互利原则,经济体  $i$  与  $j$  相互进出口粮食产品,从而形成结构上的对等关系,促进粮食贸易关系的稳定和发展。发送者效应显示,  $\ln GDP$  系数为正,  $\ln PerCapGDP$  为负,均显著,说明经济实力较强的经济体倾向于向强势经济体出口粮食,发达经济体则倾向于向欠发达经济体出口粮食;接收者效应也表现显著,其中  $\ln GDP$  系数为正,  $\ln PerCapGDP$  系数为负,意味着经济实力较强的经济体倾向于从强国进口粮食,欠发达经济体则倾向于从发达经济体进口粮食。趋同性效应中, *Continent*、*mat\_Border*、*mat\_Ling* 系数均为正且显著,说明地理区域、接壤关系、语言邻近性均提高了粮食贸易关系发生的概率; *mat\_Dist* 系数显著且为负,意味着经济体间的地理距离降低了粮食贸易关系发生的概率。

表2 TERGM 实证结果

变量	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6
<i>Edges</i>	-1.7330** (0.5615)	-0.0180*	-0.0672 <sup>˙</sup>	1.7979** (0.5984)	1.8593** (0.5998)	1.7189 <sup>˙</sup> (0.7812)
<i>Activity</i>		-3.4040*** (0.1265)	-3.2693*** (0.1359)	-2.7624*** (0.1297)	-2.7694*** (0.1293)	-2.6202*** (0.1577)
<i>Multi-connectivity</i>			-0.0829*** (0.0030)	-0.0441*** (0.0031)	-0.0438*** (0.0032)	-0.0443*** (0.0028)
<i>Triadic-closure</i>			0.5421*** (0.0300)	0.2726*** (0.0418)	0.2724*** (0.0411)	0.2877*** (0.0390)
<i>Stability</i>				1.9992*** (0.0735)	1.9989*** (0.0734)	1.9762*** (0.0866)
<i>mat_TSI</i>					-0.0867 (0.0638)	-0.0971 (0.0599)
<i>mat_TCI</i>						0.7223*** (0.1009)
<i>Reciprocity</i>	1.0436*** (0.0413)	1.0156*** (0.0550)	1.2365*** (0.0933)	0.7618*** (0.1087)	0.7654*** (0.1079)	0.7465*** (0.0822)
<b>发送者属性</b>						
$\ln GDP$	0.9104*** (0.0249)	0.5745*** (0.0229)	0.5368*** (0.0199)	0.3765*** (0.0320)	0.3775*** (0.0322)	0.3445*** (0.0300)
$\ln PerCapGDP$	-0.3032*** (0.0219)	-0.2039*** (0.0295)	-0.2172*** (0.0252)	-0.2242*** (0.0373)	-0.2260*** (0.0359)	-0.2415*** (0.0485)
<b>接收者属性</b>						
$\ln GDP$	-0.0201*** (0.0033)	-0.0180*** (0.0052)	0.0138* (0.0104)	0.0194* (0.0126)	0.0196* (0.0125)	0.0105* (0.0118)
$\ln PerCapGDP$	-0.1428*** (0.0089)	-0.1661*** (0.0121)	-0.1563*** (0.0135)	-0.1294*** (0.0146)	-0.1276*** (0.0148)	-0.1383*** (0.0114)
<i>Continent</i>	0.1783*** (0.0423)	0.2868*** (0.0493)	0.1850*** (0.0473)	0.0206* (0.0755)	0.0332* (0.0707)	0.0519* (0.0990)
<i>mat_Dist</i>	-0.6432*** (0.0381)	-0.5557*** (0.0386)	-0.5316*** (0.0341)	-0.4689*** (0.0443)	-0.4743*** (0.0433)	-0.4238*** (0.0628)
<i>mat_Ling</i>	0.7890*** (0.0604)	1.1500*** (0.0737)	1.0002*** (0.0654)	0.7732*** (0.1218)	0.7646*** (0.1261)	0.8074*** (0.0957)
<i>mat_Border</i>	1.4146*** (0.0408)	1.5550*** (0.0449)	1.4287*** (0.0479)	1.0766*** (0.0964)	1.0846*** (0.0956)	1.1306*** (0.0958)
<i>Time_trend</i>	-0.0637*** (0.0051)	-0.0216** (0.0073)	-0.0158* (0.0062)	-0.0091* (0.0059)	-0.0089* (0.0060)	-0.0115* (0.0063)
<i>N</i>	186000	186000	186000	170500	170500	170500

注:\*\*\*、\*\*、\*、<sup>˙</sup>表示显著性水平分别为0.001、0.01、0.05、0.1,括号内为标准误,下表同。

综上,国际粮食贸易网络的自组织机制全部得到检验,关系嵌入机制则得到了部分支持。并且,扩张性和稳定性的影响效应较大,在自组织和关系嵌入机制的影响下控制变量对粮食贸易网络关系形成的影响效应被逐渐削弱。

## 2. 拟合优度检验

本文针对模型 6 进行 TERGM 的拟合优度检验,仿真次数为 1000 次,得出国际粮食贸易网络的关键网络特征参数分布的仿真结果,如图 3 所示。图 3 分别呈现了二元组共享伙伴(图 3a)、边共享伙伴(图 3b)、出度中心性(图 3c)和三角形普查(图 3d)等特征参数的频率分布结果。其中黑色粗实线为动态网络观测到的真实分布,灰色线条则为仿真网络的 95% 置信区间结果,图中四个关键参数的真实分布均位于或接近于仿真网络的 95% 的置信区间,因此本文认为该模型仿真结果能够代表真实网络的结构特征。

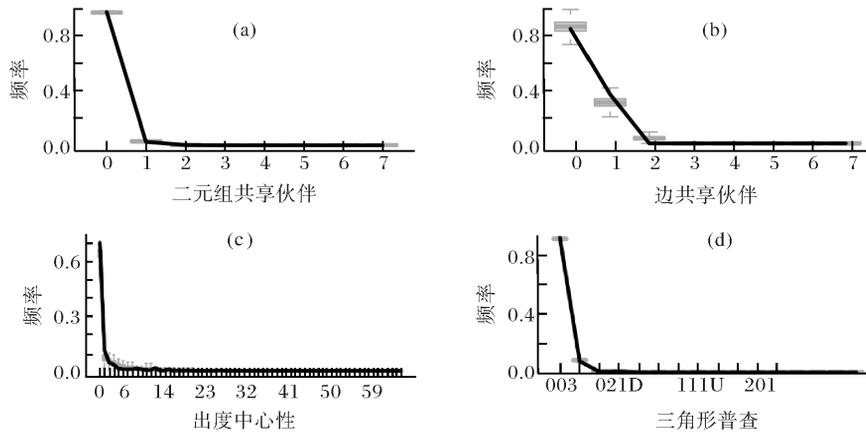


图 3 TERGM 拟合优度检验

## 3. 稳健性分析

(1)调整时间间隔。将粮食贸易动态网络数据的时间间隔调整为 3 年,得到包含 9 个时期的网络数据,TERGM 的实证结果见表 3 的模型 7 所示。 $H_1 \sim H_3$ 、 $H_{4b}$  得到了支持, $H_{4a}$  未得到验证,结论与前文实证分析完全一致。

(2)调整边选取标准。选择各经济体粮食进口额排名前三的贸易关系,仍以两年作为动态网络的时间间隔,TERGM 的实证结果见模型 8, $H_1 \sim H_3$ 、 $H_{4a}$  和  $H_{4b}$  均得到检验。值得注意的是,粮食贸易竞争关系网络(*mat\_TSI*)对粮食贸易关系形成的影响在 0.1 的水平上显著,可能的原因是放宽了边选取标准,得到的粮食贸易关系网络过于稠密,接近于全连通状态,导致无法准确捕捉其关系嵌入机制。

(3)调整 TERGM 估计算法。Leifeld 等<sup>[26]</sup>给出了另外一种估计算法,即通过蒙特卡洛马尔科夫最大似然估计实现,适用于大规模网络。为了验证结果的稳健性,本文采用该算法重新进行 TERGM 估计,结果见表 3 中的模型 9,对自组织机制和部分关系嵌入机制的验证再次被证实是稳健的。

表 3 稳健性分析

变量	模型 7	模型 8	模型 9
<i>Edges</i>	1.5049 ** (0.5056)	1.7189 ** (0.6422)	1.1371 * (0.5983)
<i>Activity</i>	-2.4483 *** (0.1263)	-2.6202 *** (0.1454)	-3.5214 *** (0.2016)
<i>Multi-connectivity</i>	-0.0463 *** (0.0066)	-0.0443 *** (0.0033)	-0.0690 *** (0.0039)
<i>Triadic-closure</i>	0.3858 *** (0.0401)	0.2877 *** (0.0410)	0.3811 *** (0.0446)
<i>Stability</i>	1.8737 *** (0.0766)	1.9762 *** (0.0699)	2.0259 *** (0.0747)
<i>mat_TSI</i>	-0.0788 (0.0648)	-0.0971 * (0.0589)	-0.0648 (0.0566)
<i>mat_TCI</i>	0.8113 *** (0.1265)	0.7223 *** (0.0804)	0.8476 *** (0.0770)
<i>Reciprocity</i>	0.7267 *** (0.1929)	0.7465 *** (0.1149)	0.5505 *** (0.0960)

续表

变量	模型 7	模型 8	模型 9
<b>发送者属性</b>			
lnGDP	0.3409*** (0.0333)	0.3445*** (0.0325)	0.4228*** (0.0319)
lnPerCapGDP	-0.2436*** (0.0314)	-0.2415*** (0.0375)	-0.2760*** (0.0336)
<b>接收者属性</b>			
lnGDP	0.0064* (0.0123)	0.0105* (0.0118)	-0.0110* (0.0142)
lnPerCapGDP	-0.1452*** (0.0150)	-0.1383*** (0.0171)	-0.1378*** (0.0186)
Continent	0.0692** (0.0516)	0.0519* (0.0704)	0.0573* (0.0629)
mat_Dist	-0.3984*** (0.0295)	-0.4238*** (0.0459)	-0.3999*** (0.0414)
mat_Ling	0.7948*** (0.1748)	0.8074*** (0.1350)	0.7427*** (0.1520)
mat_Border	1.1026*** (0.1102)	1.1306*** (0.0905)	1.1222*** (0.0846)
Time_trend	-0.0200** (0.0076)	-0.0115* (0.0075)	-0.0121* (0.0084)
N	124000	170500	170500

#### 四、结论与启示

研究发现:①国际粮食贸易网络表现出贸易网络的典型特征。参与粮食贸易的经济体数量、贸易关系数量及粮食贸易规模逐渐增加,使得国际粮食贸易网络表现出显著的生长态势;不断减小的平均路径距离和不断增加的传递性系数,说明粮食贸易网络具有越来越“小”的小世界特性,一体化和集聚化程度增强。②可视化与社群聚类分析得出,国际粮食贸易网络表现出中心—边缘的宏观结构特征;网络格局经历了动态变动,从以美国独大为主的离散少核的不均衡格局演变为以俄罗斯、美国、泰国、印度、法国等为多个中心的集聚多核的均衡格局。③实证结果显示,自组织机制表现为粮食贸易网络的形成受到偏好连接效应、传递闭合效应和稳定效应的影响;关系嵌入机制中,贸易互补性关系促进了粮食贸易网络关系的形成,但缺少证据证明贸易竞争性关系对粮食贸易网络关系形成的抑制作用。可以说,粮食贸易关系是一种正和博弈的结果,最终实现贸易各方合作共赢的局面。

当前的国际粮食贸易网络格局导致中国处于网络中相对边缘地带,缺乏粮食产品贸易的竞争优势和国际影响力,不利于保障中国粮食安全。尤其是,疫情和灾害等层出不穷的非市场因素的不断加剧,导致国内外粮食市场形势日趋严峻。近年来,中国对粮食自给率较为关注,粮食产量稳步增长,连续多年稳定在6.5亿吨以上水平,谷物自给率超过95%,一定程度上给人民吃了定心丸。但同时这种紧平衡状态也导致了国内外粮食市场的非传统“堵点”,究其原因是中国采取的简单缺口驱动型粮食贸易,在国内外粮食市场的价格倒挂机制影响下,导致了生产、进口与库存“三高”并存及“洋货入市、国货入库”等市场乱象。因此,畅通国内国外双循环是必由之路。中国作为人口大国和粮食生产及消费大国,在国际粮食贸易网络中作为一个节点存在,受网络中枢经济以及其他经济体的直接和间接影响,不利于中国的粮食安全保障。因此中国要在满足粮食自给率要求的同时,建立国内大循环为主、国内国际双循环为辅的高水平粮食安全保障体系。具体应做到以下几点:

第一,增加对国际粮食贸易网络中枢纽节点的关注,降低粮食安全风险。在面对国际环境动态变化时,枢纽经济体可能会通过制定粮食贸易收缩政策来缓解负面影响,从而给全球粮食供应链带来前所未有的挑战,直接影响了国际粮食贸易系统的稳定。基于此,中国应特别关注国际粮食贸易网络中的枢纽节点,如美国、俄罗斯、印度等,一方面要通过加大农业科技投入,提高粮农支持力度,将中国的自然资源优势和现代化的农业生产经营相结合,提升粮食产能和粮食产品质量;另一方面,进一步完善粮食的储备管理和应急保障能力,将中国的饭碗牢牢地把握在自己手中,从而实现中国粮食安全长效机制。

第二,推动粮食贸易多元化发展,提升中国在国际粮食贸易网络中的中心地位。国际粮食贸易网络中存在偏好连接效应,枢纽经济体的产生得益于与之发生粮食贸易往来的合作伙伴。中国距离绝对中心地位还有很远的距离,因此应打造竞争力导向的粮食生产和供应体系,弱化高自给率的关注,将提升粮食产品国际竞争力、降低粮食生产成本作为粮食安全保障和农业供给侧改革的目标;以适度粮食进口来驱动粮食出口,实现粮食贸易国家结构的多元化发展,建立全球伙伴关系,增加中国在国际粮食贸易网络中的节点中心度,使中国处于网络中的中心地位,从而增加中国在国际粮食贸易中的影响力。

第三,加强粮食贸易的一体化发展,有效应对国际环境的变化。粮食贸易网络由不同的三元组集聚而成,表现出传递闭合效应。从网络理论来看,闭合的三元组微观构局有利于粮食贸易网络形成稳定的平衡结构。因此,中国应协同各经济体继续秉承互惠共赢的贸易理念,通过区域贸易协定和最惠国待遇等贸易政策,使贸易社群内经济体可以更便利的进行粮食贸易关系的传递和集聚,从而促进粮食贸易网络的稳定发展,以应对当前动荡多变的国际环境。

第四,树立命运共同体的全球理念,积极参与粮食安全的全球治理和制度改革。各经济体处于国际粮食贸易的复杂网络系统之中,相互影响,形成了命运共同体。国际粮食贸易网络具有时间依赖效应,因此,在面临错综复杂的国内外粮食市场时,中国与各经济体应该合理利用国际市场保障国家粮食安全,加强与各国或各国际机构的合作,深化粮食贸易与投资的“引进来”与“走出去”;积极参与粮食安全的全球治理,共建全球协调一致的粮食安全政策,促进形成粮食贸易稳定发展的新秩序和新制度。

#### 参 考 文 献

- [1] 孙致陆,贾小玲,李先德.中国与“一带一路”沿线国家粮食贸易演变趋势及其虚拟耕地资源流量估算[J].华中农业大学学报(社会科学版),2019(1):24-32,163.
- [2] 马述忠,任婉婉,吴国杰.一国农产品贸易网络特征及其对全球价值链分工的影响——基于社会网络分析视角[J].管理世界,2016(3):60-72.
- [3] 韩冬,李光泗.中国与“一带一路”沿线国家粮食贸易格局演变与影响机制——基于社会网络学视角[J].农业经济问题,2020(8):24-40.
- [4] DUPAS M C, HALLOY J, CHATZIMPIROS P. Time dynamics and invariant subnetwork structures in the world cereals trade network[J]. Plos one, 2019, 14(5): 1-21.
- [5] 陈艺文,李二玲.“一带一路”国家粮食贸易网络空间格局及其演化机制[J].地理科学进展,2019(10):1643-1654.
- [6] HIDALGO C A, KLINGER B, BARABASI A L, et al. The product space conditions the development of nations[J]. Science, 2007, 317(5837): 482-487.
- [7] BENEDICTIS L, NENCI S, SANTONI G, et al. Network analysis of world trade using the BACI-CEPII dataset[J]. Global economic journal, 2014, 14(3-4): 287-343.
- [8] ZHOU M, WU G, XU H L. Structure and formation of top networks in international trade, 2001—2010[J]. Social networks, 2016(44): 9-21.
- [9] HAUSMANN R, HIDALGO C A, BUSTOS S, et al. The atlas of economic complexity: mapping paths to prosperity[M]. Cambridge: MIT Press, 2014.
- [10] LUSHER D, KOSKINEN J, ROBINS G. Exponential random graph models for social networks: theory, methods and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [11] 唐晓彬,崔茂生.“一带一路”货物贸易网络结构动态变化及其影响机制[J].财经研究,2020(7):138-153.
- [12] 陈继勇,杨旭丹.贸易竞争性、互补性及贸易潜力——基于“一带一路”沿线国家与美加墨统计数据的分析[J].武汉大学学报(哲学社会科学版),2019(6):99-115.
- [13] 刘林青,陈紫若,田毕飞.结构依赖如何影响贸易网络形成及演化:以“一带一路”为例[J].世界经济研究,2020(6):106-120,137.
- [14] 刘林青,闫小斐,杨理斯,等.国际贸易依赖网络的演化及内生机制研究[J].中国工业经济,2021(2):98-116.
- [15] PAN Z Q. Varieties of intergovernmental organization memberships and structural effects in the world trade network[J]. Ad-

- vances in complex systems, 2018, 21(2): 1-30.
- [16] SMITH M, GORGONI S, CRONIN B. International production and trade in a high-tech industry: a multilevel network analysis [J]. *Social networks*, 2019(59): 50-60.
- [17] THURNER P W, SCHMID C S, CRANMER S J, et al. Network interdependencies and the evolution of the international arms trade [J]. *Journal of conflict resolution*, 2019, 63(7): 1736-1764.
- [18] GUTIERREZ-MOYA E, LOZANO S, ADENSO-DIAZ B. Analysing the structure of the global wheat trade network: an ERGM approach [J]. *Agronomy*, 2020, 10(12): 1-19.
- [19] WU G, FENG L Y, PERES M, et al. Do self-organization and relational embeddedness influence free trade agreements network formation? Evidence from an exponential random graph model [J]. *Journal of international trade & economic development*, 2020, 29(8): 995-1017.
- [20] CRANMER S J, LEIFELD P, MCCLURG S D, et al. Navigating the range of statistical tools for inferential network analysis [J]. *American journal of political science*, 2017, 61(1): 237-251.
- [21] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks [J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [22] CRANMER S J, DESMARAIS B A, MENNINGA E J. Complex dependencies in the alliance network [J]. *Conflict management and peace science*, 2012, 29(3): 279-313.
- [23] HOANG V. Assessing the agricultural trade complementarity of the Association of Southeast Asian Nations countries [J]. *Agricultural economics*, 2018, 64(10): 464-475.
- [24] 张亚斌, 车鸣, 易先忠. 发展中国家贸易结构相似对贸易绩效影响的实证研究 [J]. *经济经纬*, 2011(2): 30-34.
- [25] HUNTER D R. Curved exponential family models for social networks [J]. *Social networks*, 2007, 29(2): 216-230.
- [26] LEIFELD P, CRANMER S J, DESMARAIS B A. Temporal exponential random graph models with btergm: estimation and bootstrap confidence intervals [J]. *Journal of statistical software*, 2018, 83(6): 1-36.
- [27] GLICK R, ROSE A K. Contagion and trade: why are currency crises regional? [J]. *Journal of international money and finance*, 1999, 18(4): 603-617.
- [28] 詹森华. “一带一路”沿线国家农产品贸易的竞争性互补性——基于社会网络分析方法 [J]. *农业经济问题*, 2018(2): 103-114.
- [29] 成蓉, 程惠芳. 中印贸易关系: 竞争或互补——基于商品贸易与服务贸易的全视角分析 [J]. *国际贸易问题*, 2011(6): 85-94.

(责任编辑: 金会平)