国际农药贸易网络的经济体重要性与结构鲁棒性

Jian-An Li[a], Li Wang[b,c],Wen-Jie Xie[a,c,*],Wei-Xing Zhou[a,c,d,*]

[a]华东理工大学商学院，上海200237，中国[b]华东理工大学物理学院，上海200237，中国[c]华东理工大学经济物理研究中心，上海 200237，中国[d]华东理工大学数学学院，上海 200237，中国

arXiv:2303.00988v1 [physics.soc-ph] 2 Mar 2023

摘要

农药是一种农业投入品，其使用能够大幅减少产量损失、调节植物生长、有效释放农业生产力并提升粮食安全。通过国际贸易进行农药再分配，确保了世界各地经济体的农药供应，而各经济体在这一过程中发挥着不同作用。在本研究中，我们采用九种节点指标，以演化视角衡量并对经济体的重要性进行排名。研究发现，聚类系数与其他八种节点指标呈负相关，而其他八种节点指标彼此呈正相关，并可分为三个群组（中介中心性；入度、PageRank、权威值和入接近中心性；出度、枢纽和出接近中心性）。我们进一步研究了国际农药贸易网络的结构鲁棒性，以巨型连通分量规模作为衡量指标，并考察了三种经济体冲击（按降序移除节点、随机移除节点以及按升序移除节点）。结果表明，除聚类系数外，国际农药贸易网络在按升序及随机施加经济体冲击时相对鲁棒，但在按降序施加经济体冲击时较为脆弱。相比之下，按聚类系数升序和降序移除节点所得到的鲁棒性曲线相似。此外，与巨型连通分量规模相关的结构鲁棒性随时间演化，呈现倒U形模式。

关键词： 经济物理学；国际农药贸易网络；社团结构；区域模式；内禀社团块；时序网络。

1. 引言

农药包括杀虫剂、杀菌剂、除草剂、消毒剂、灭鼠剂及其他类似产品，是一类重要的农业投入品，用于防治害虫、病害和杂草，并调节植物生长。因此，农药不仅能减少产量损失、提高粮食安全水平，还能有效释放农业生产力。在生产和储藏过程中，农药的使用显著减少了食物损失（水果损失约为78%、蔬菜损失约为54%、谷物损失约为32%）。全球各经济体的农药供应通过国际贸易中的农药再分配得以维持，由此形成国际农药贸易网络；其中，节点代表经济体，连边表示进出口贸易关系。

国际农药贸易网络的基本结构与演变已得到研究（Li 等人，2021）。更重要的是理解国际农药贸易网络的结构鲁棒性。许多复杂网络能够抵御随机失效，却容易受到蓄意攻击的影响（Albert 等人，2000；Cohen 等人，2000；Callaway 等人，2000；Cohen 等人，2001）。随机失效和蓄意攻击都可能是网络内部或外部的冲击。本研究的主要目标是量化国际

*通讯作者。电子邮箱： wjxie@ecust.edu.cn（Wen-Jie Xie）、wxzhou@ecust.edu.cn（Wei-Xing Zhou）

不同类型的经济体冲击下农药贸易网络的结构鲁棒性。复杂网络的鲁棒性与脆弱性已在多个领域得到广泛研究，例如国际石油贸易网络（Foti 等人，2013；Fair 等人，2017；Xie 等人，2021；Wei 等人，2022a；Chen 等人，2022；Wei 等人，2022b）和其他基础设施网络（Albert 等人，2004；Latora 和 Marchiori，2005；Pagani 和 Aiello，2013；Wang 等人，2009；Zanin 和 Lillo，2013；Diao 等人，2016）。

为了研究复杂网络的结构鲁棒性，需要确定攻击策略（或冲击类型）以及衡量结构鲁棒性的指标。最常采用的策略是随机移除节点，以及按照节点指标降序蓄意移除节点（Albert 等人，2000）。作为比较，我们还考虑了按照节点指标升序实施节点定向移除，这在文献中很少被考虑。这两种节点定向移除策略均基于节点指标对经济体进行排名后执行。衡量节点重要性的方法有很多（Lu 等人，2016）。我们采用九种节点指标来实施节点移除策略。文献中的大多数研究采用的节点指标较少。此外，衡量结构鲁棒性的网络指标也有很多（Oehlersand Fabian，2021；Schaeffer 等人，2021）。本文考虑巨型连通分量规模（Albert 等人，2000），该指标量化了农药贸易全球化的程度。

本文其余部分的组织结构如下。第2节简要介绍数据。第3节基于九种节点指标，对国际农药贸易网络中经济体的重要性或影响力进行量化和排名，并剖析其交叉相关结构。我们能够将节点指标分为三组：第一组与入向链接相关，第二组与出向链接相关，第三组与链接方向无关。第4 节通过考察巨型连通分量规模来研究结构鲁棒性。除随机攻击（失效）策略和基于节点指标降序的定向攻击策略外，我们还考虑了基于节点指标升序的蓄意攻击策略。第5 节总结研究结果。

2. 数据描述

2007年至2018年国际农药贸易的数据集取自联合国商品贸易统计数据库，其中包含五类农药的进出口经济体及贸易额，分别为杀虫剂（380891）、杀菌剂（380892）、除草剂（380893）、消毒剂（380894），以及灭鼠剂和其他类似产品（380899）。2018年所有农药、杀虫剂、杀菌剂、除草剂、消毒剂，以及灭鼠剂和其他类似产品的国际农药贸易网络$\mathbf{V}(t) = \{v_{ij} : i, j = 1, \cdots, N(t)\}$的六个网络矩阵$V$如图1所示，其中元素$v_{ij}(t)$表示从经济体$i$到经济体$j$的贸易价值。

图 1(a) 展示了由五类农药的网络汇总而成的国际贸易网络的贸易价值矩阵，图 1(b-f) 则展示了五类农药各自的贸易价值矩阵。显然，所有矩阵均为非对称矩阵（$v_{ij} \neq v_{ji}$）。尽管这六个矩阵并不完全相同，但在一定程度上呈现出相似的模式。我们还观察到，贸易额的跨度约为九个数量级，表明国际农药贸易具有高度异质性。

3. 经济体重要性的量化

许多节点指标能够反映节点的局部或全局特征，可用于从不同方面衡量节点的重要性（Chen 等人，2012；Lu 等人，2016）。本研究考虑了九种节点指标，包括聚类系数、中介中心性、PageRank、入度、出度、入接近中心性、出接近中心性、权威值和枢纽值。这些节点指标各有不同特点。聚类系数适用于无向网络，而其他八种指标则从有向网络中提取。就这八种节点指标而言，中介中心性不区分进口经济体和出口经济体；入度、PageRank、权威值和入接近中心性根据出口经济体（因此，所考察的节点为目标节点）计算；出度、出接近中心性和枢纽值则根据进口经济体（因此，所考察的节点为源节点）计算。本节基于这九种节点指标量化经济体在国际农药贸易中的重要性，并进一步探讨这些指标之间的相关性。

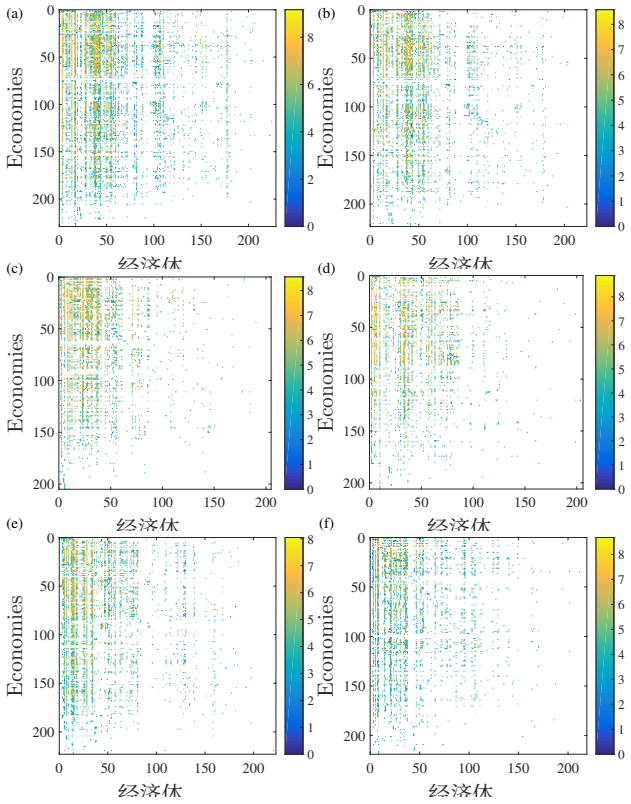

图1：2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e），以及灭鼠剂和其他类似产品（f）的国际农药贸易网络热力图V。颜色条表示以 $\log_{10} v_{ij}$ 量化的贸易价值大小顺序。

3.1. 入度和出度

国际农药贸易网络的邻接矩阵$\mathbf{A} = [a_{ij}]$ 可由其贸易价值矩阵$\mathbf{V}$提取，其中$a_{ij} = 1$当$v_{ij} > 0$且$a_{ij} = 0$在其他情况下。换言之，当经济体i向经济体j出口某类农药时，$a_{ij} = 1$。目标节点j的入度k_j^{in}是经济体j的出口伙伴数量，表示如下：

$$k_j^{\text{in}} = \sum_{i=1}^{N} a_{ij}, \tag{1}$$

其中 N 为贸易网络中的节点数。我们对2007年至2018年每一年所有农药、杀虫剂、杀菌剂、除草剂、消毒剂，以及灭鼠剂和其他类似产品的国际贸易网络中的经济体进行排名。前15大经济体的排名演变见图2。

如图2（a）所示，2018年的聚合网络中，前15大经济体依次为中国、荷兰、美国、法国、英国、德国、比利时、印度、西班牙、意大利、日本、瑞士、土耳其、奥地利和韩国，它们均为发达经济体或最大的发展中经济体。除灭鼠剂贸易网络外，中国均排名第一，且进口伙伴数量最多。2018年，美国进口灭鼠剂的入度最大。

出　度源节点 i，k_i^{out} 的出度，是经济体i的进口合作伙伴数量，表示如下　　s:

$$k_i^{\text{out}} = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}. \tag{2}$$

我们根据2007年至2018年各年度国际贸易网络中节点的出度，对经济体进行排名

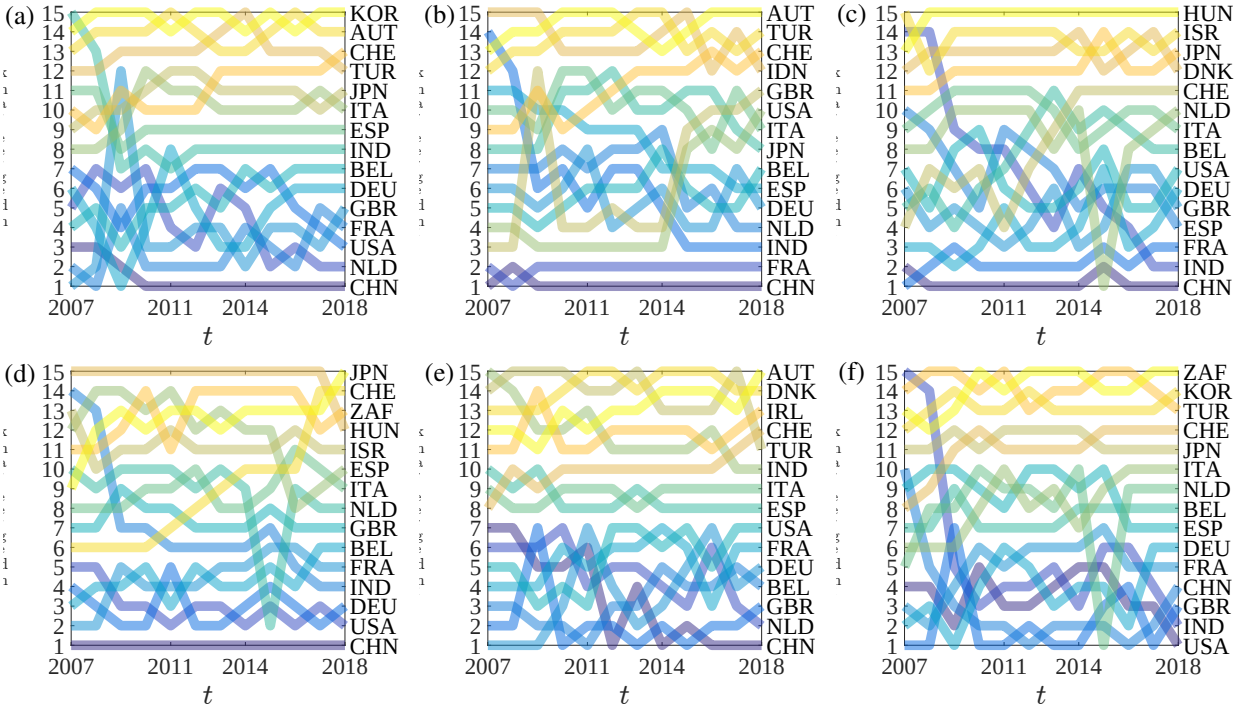

图2：2007年至2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e）以及灭鼠剂和其他类似产品（f）国际贸易网络中前15大经济体的排名演变。排名依据节点的入度。

并在图中展示前15大经济体的排名演变3。

如图3(a)所示，2018年聚合网络中的前15大经济体包括法国、德国、荷兰、奥地利、南非、西班牙、意大利、印度、比利时、中国、瑞士、美国、土耳其、阿联酋和英国，这些经济体也都是发达经济体或大型发展中经济体。法国在杀虫剂、杀菌剂、以及灭鼠剂网络中排名第一，在除草剂和消毒剂网络中排名第二；德国则在除草剂和消毒剂网络中排名第一，在杀菌剂和灭鼠剂网络中排名第二。荷兰在所有网络中的排名也都很靠前。显然，北欧经济体在农药出口中发挥着最重要的作用。

3.2. 入接近中心性与出接近中心性

节点i 的接近中心性用于衡量信息传播长度的倒数，定义为i 与所有其他节点之间平均距离的倒数。由于网络可能并非连通，接近中心性可按如下方式计算

$$C_i = \frac{N-1}{\sum_{j\in \mathbf{n}_i} l_{ij}}, \tag{3}$$

其中，$\mathbf{n}_i$ 是i 能够到达的节点集合，l_{ij} 是i 与j之间最短路径的长度。

对于连通网络，入接近中心性可定义如下，

$$C_i^{\text{in}} = \frac{N-1}{\sum_{j\in \mathbf{n}_i^{\text{in}}} l_{ij}}, \tag{4}$$

其中，$\mathbf{n}_i^{\text{in}}$是至少存在一条有向路径指向i的节点集合。

我们根据2007年至2018年各年的节点入接近中心性，对国际贸易网络中的经济体进行排名，并在图中展示前15大经济体的排名演变。 4。如图所示，2018年的聚合网络4(a)所示，前15大经济体分别为中国、荷兰、美国、法国、英国、德国、比利时、印度、西班牙、意大利、日本、土耳其、瑞士、奥地利和韩国，这些都是大型经济体。

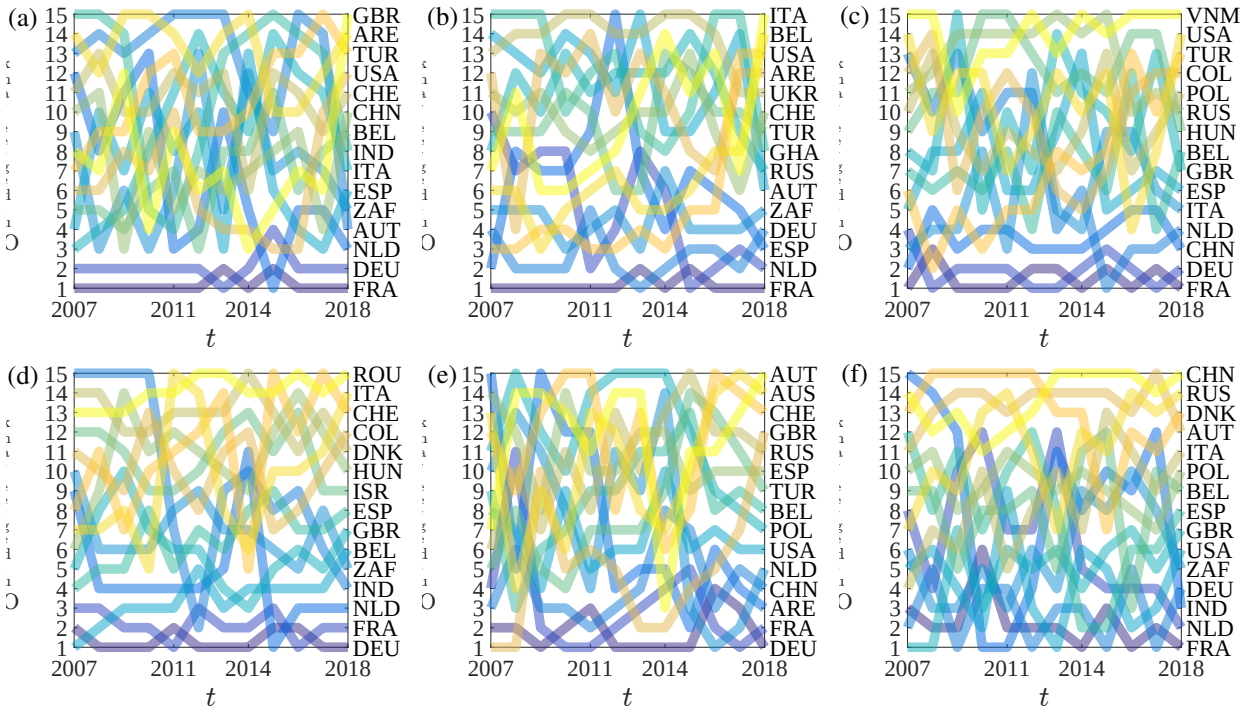

图3：2007年至2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e）以及灭鼠剂和其他类似产品（f）的国际贸易网络中前15大经济体的排名演变。排名依据节点的出度确定。

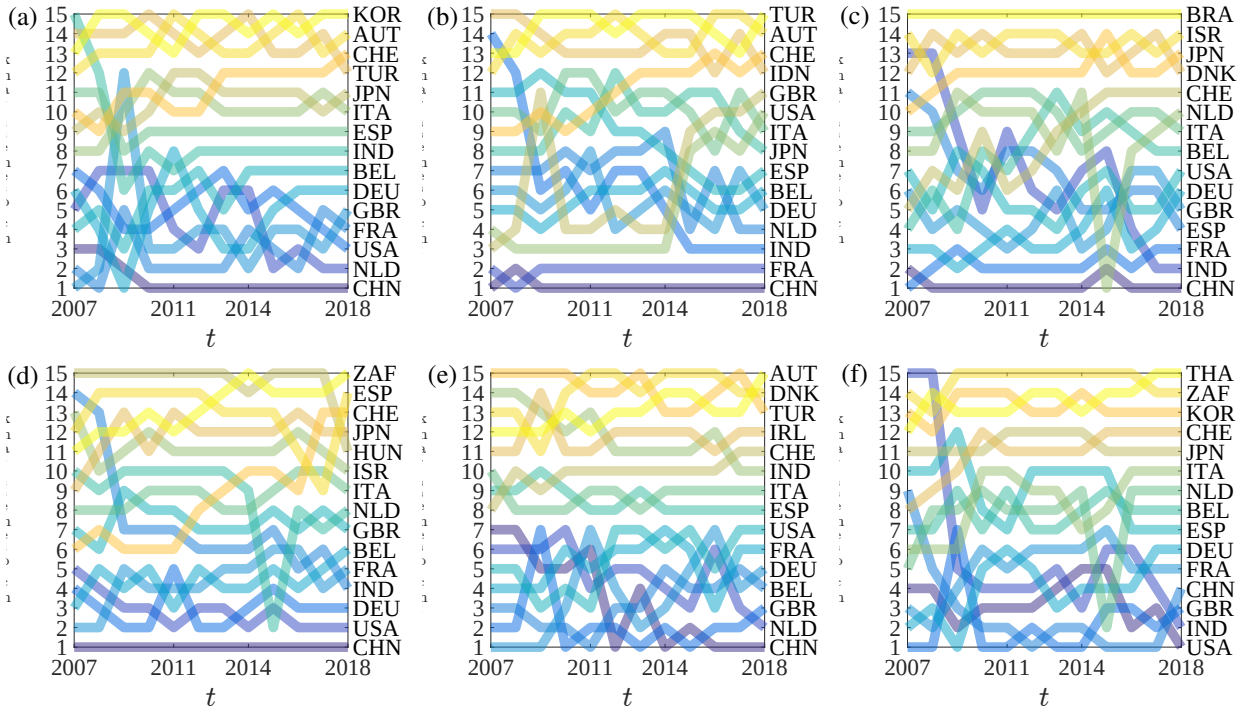

图4：2007年至2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e）以及灭鼠剂和其他类似产品（f）的国际贸易网络中前15大经济体的排名演变。排名依据节点入接近中心性确定。

对于分类网络，前15大经济体的名单可能略有变化。我们观察到，2018年，在杀虫剂、杀菌剂、除草剂和消毒剂国际贸易网络中，中国的入接近中心性排名第一，而在灭鼠剂网络中，美国排名第一。

同样，我们可以将出接近中心性定义如下：

$$C_i^{\text{out}} = \frac{N-1}{\sum_{j\in\mathbf{n}_i^{\text{out}}} l_{ij}}, \tag{5}$$

其中$\mathbf{n}_i^{\text{out}}$是至少存在一条从$i$ 指向j的有向路径的节点集合。

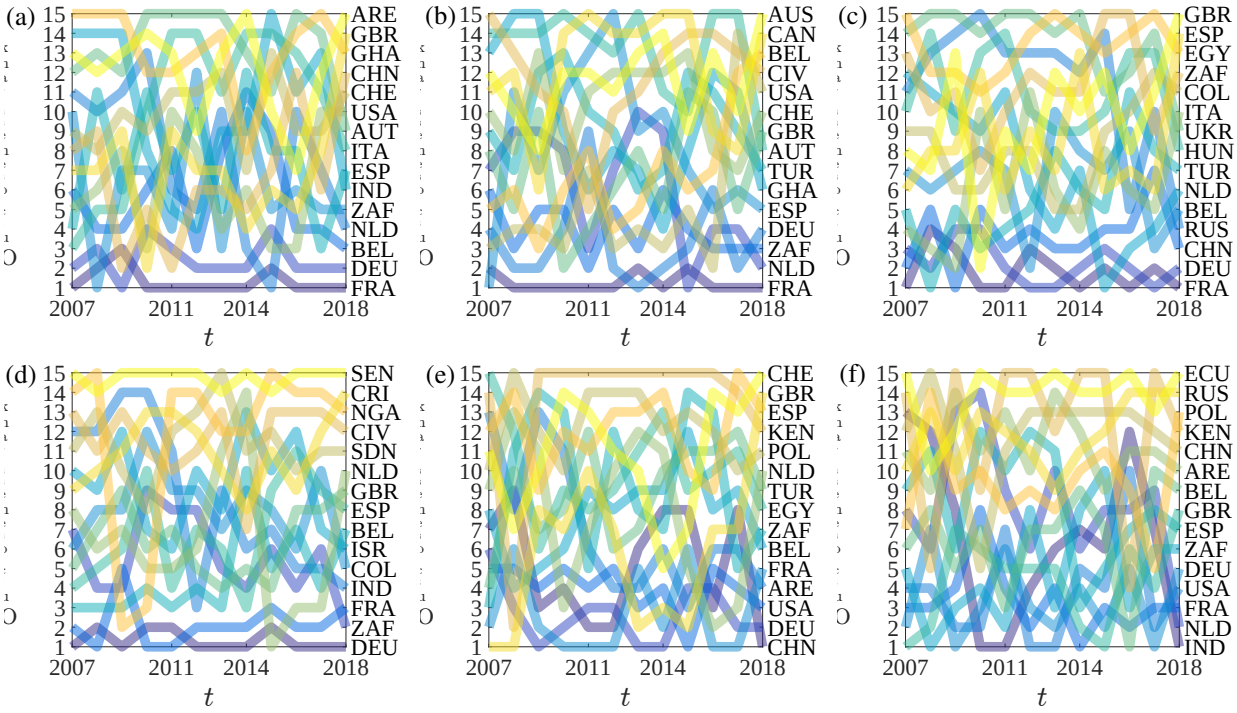

图5：2007年至2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e）以及灭鼠剂和其他类似产品（f）国际贸易网络中前15大经济体的排名演变。排名依据节点外接近中心性确定。

我们还根据2007年至2018年每年国际贸易网络中的节点外接近中心性对经济体进行排名，并在图5中展示前15大经济体的排名演变。对于2018年的聚合网络，如图5(a)所示，前15大经济体为法国、德国、比利时、荷兰、南非、印度、西班牙、意大利、奥地利、美国、瑞士、中国、加纳、英国和阿联酋，这些主要是大型经济体。

2018年，法国在杀虫剂和杀菌剂网络中排名第一，德国在除草剂网络中排名第一，中国在消毒剂网络中排名第一，印度在灭鼠剂网络中排名第一。法国和德国的历史排名比中国和印度更稳定。尽管比利时在分类贸易网络中的排名为第五或更低，但其在2018年的聚合网络中排名第三。

3.3. 权威值和枢纽值

权威节点和枢纽节点是有向网络中的两类关键节点，由 Kleinberg 在其 HITS算法（Kleinberg，1999）中提出。权威节点是入度较大的目标节点，而枢纽节点是出度较大的源节点。每个节点的权威值 a_i 和枢纽值 h_i 可以通过

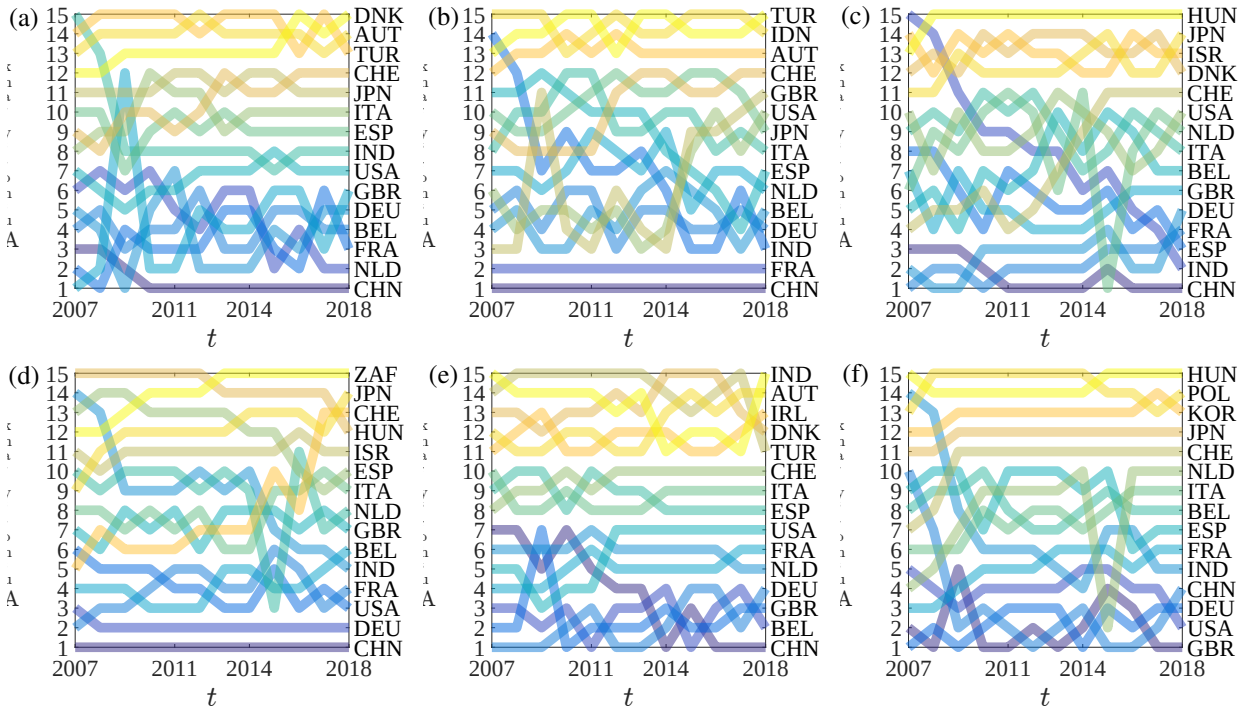

图6：2007年至2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e）以及灭鼠剂和其他类似产品（f）的国际贸易网络中前15大经济体的排名演变。排名依据节点的权威性得分确定。

迭代方式计算，

$$\begin{cases} a_i = \sum_j a_{ji} h_j \\ h_i = \sum_j a_{ij} a_j \end{cases} \tag{6}$$

这些权威性得分在每次迭代中均进行了归一化。

我们确定了每个国际农药贸易网络中节点的权威值和枢纽值，并对2007年至2018年各年份的经济体进行排名。基于权威值的前15大经济体的排名演变如图6所示。对于2018年的聚合网络，如图6(a)所示，前15大经济体为中国、荷兰、法国、比利时、德国、英国、美国、印度、西班牙、意大利、日本、瑞士、土耳其、奥地利和丹麦，均为大型经济体。对于图6(b-f)所示的分类网络，2018年，中国在杀虫剂、杀菌剂、除草剂和消毒剂国际贸易网络中均排名第1，而英国在灭鼠剂网络中排名第1。

基于枢纽值的前15大经济体排名演变如图所示。7。如图7(a)所示，在2018年的聚合网络中，前15大经济体分别为法国、德国、西班牙、荷兰、瑞士、土耳其、中国、比利时、意大利、印度、美国、奥地利、南非、英国和阿拉伯联合酋长国，这些主要是大型经济体。2018年，法国在杀虫剂、杀菌剂和灭鼠剂国际贸易网络中排名第一，而德国在除草剂和消毒剂网络中排名第一。

*3.4. PageRank*中心性

PageRank中心性是特征向量中心性的一种重要变体，其值由指向目标节点的节点所贡献的加权值之和衡量（布林和佩奇，1998年）。PageRank是一种基于入链的度量指标。我们通过100次迭代，计算各国际农药贸易网络中节点的PageRank值，并对2007年至2018年各年的经济体进行排名。基于PageRank的前15大经济体排名演变如图8所示。如图8(a)所示，在2018年的聚合网络中，前15大经济体包括中国、

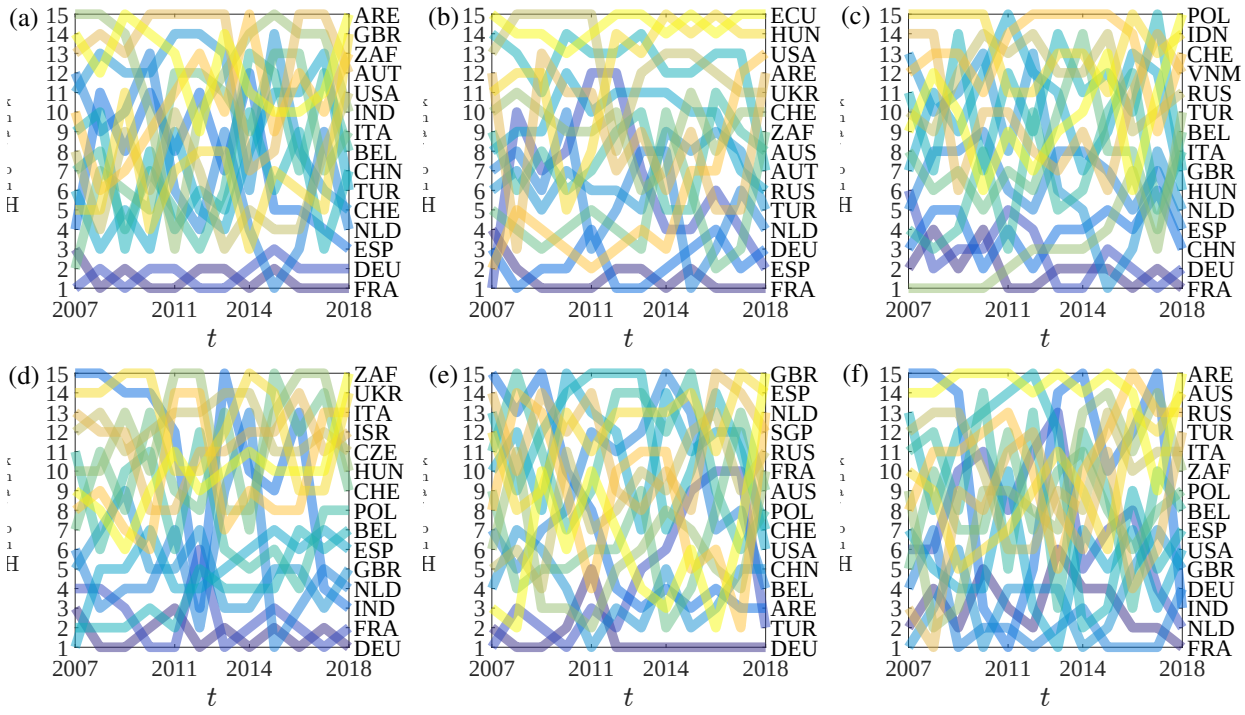

图7：2007年至2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e），以及灭鼠剂和其他类似产品（f）的国际贸易网络中前15大经济体的排名演变。排名依据节点的枢纽值。

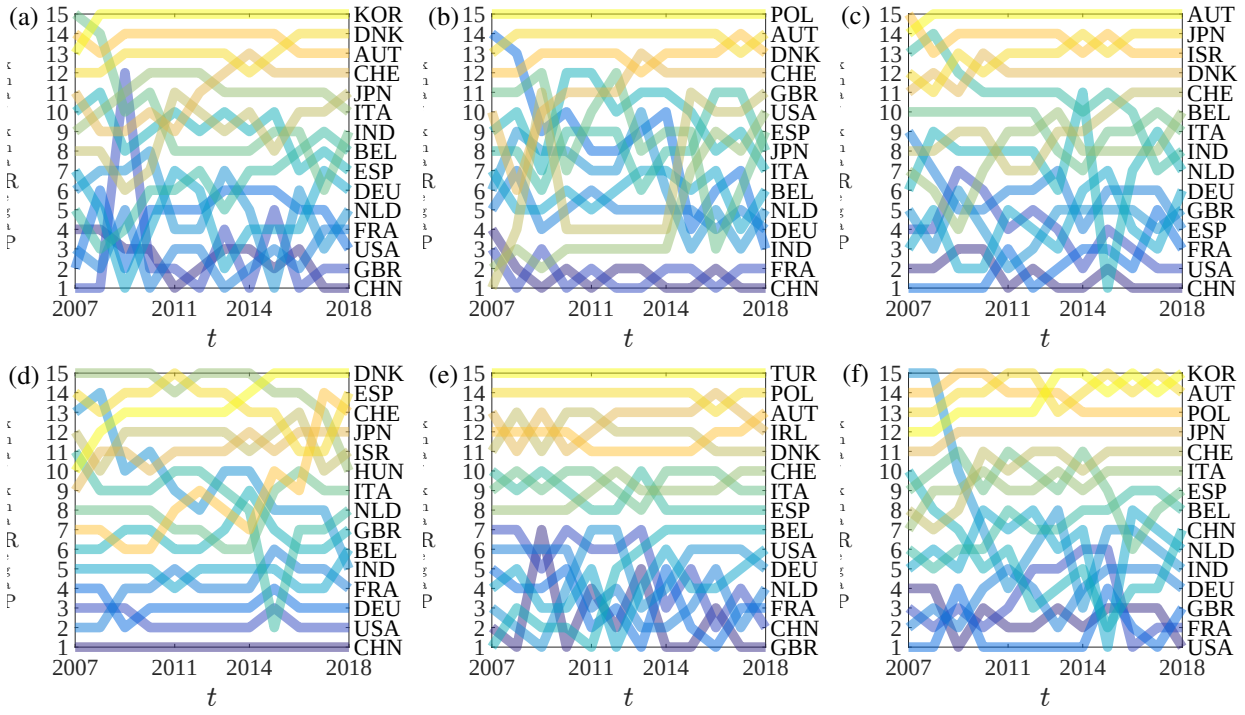

图8：2007年至2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e），以及灭鼠剂和其他类似产品（f）的国际贸易网络中前15大经济体的排名演变。排名依据节点的PageRank值。

英国、美国、法国、荷兰、德国、西班牙、比利时、印度、意大利、日本、瑞士、奥地利、丹麦和韩国，这些经济体均为发达经济体或大型发展中经济体。

关于图中所示的分类网络8(b-f)，2018年，中国在杀虫剂、杀菌剂和除草剂国际贸易网络中排名第一；英国在消毒剂网络中排名第一；美国在灭鼠剂网络中排名第一。

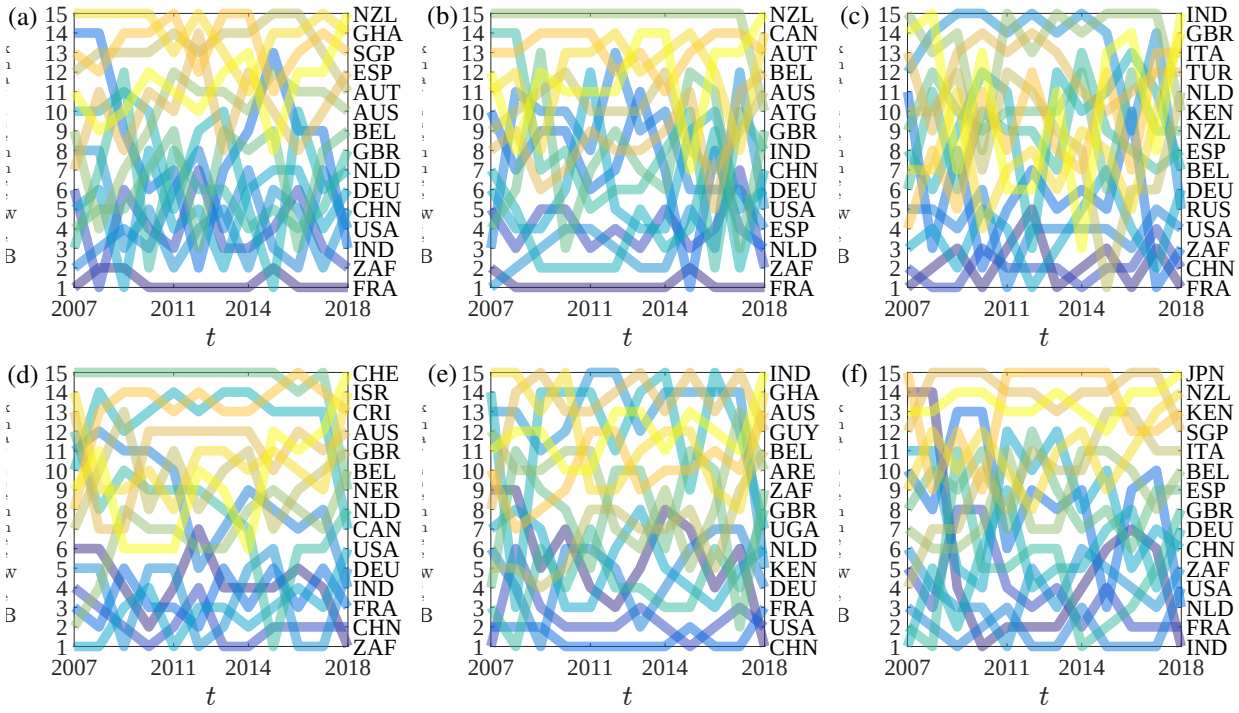

图9：2007年至2018年农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e）以及灭鼠剂和其他类似产品（f）国际贸易网络中前15大经济体的排名演变。排名依据节点介数。

3.5. 中介中心性

中介中心性是一种基于最短路径的节点度量，定义为经过被考察节点的最短路径数量与网络中所有节点对之间最短路径数量之比（Freeman，1977年）：

$$B_c(i) = \sum_{st} \frac{n_{st}^i}{g_{st}}, \tag{7}$$

其中，n_{st}^i 是经过节点s 和节点t 的、经过节点i 的g_{st} 是节点s 和t之间最短路径的总数。尽管最短路径是有向的，中介中心性却不能分解为“入”和“出”两部分，这与第3.1节中的入度和出度、第3.2节中的入接近中心性和出接近中心性，或第3.3节中的权威值和枢纽值不同。

我们计算了各国际农药贸易网络中节点的中介中心性，并对2007年至2018年每年的经济体进行排名。基于中介中心性的前15大经济体排名演变如图9所示。对于2018年的聚合网络，如图9(a)所示，排名前15的经济体包括法国、南非、印度、美国、中国、德国、荷兰、英国、比利时、奥地利、西班牙、新加坡、加纳和新西兰，它们主要是发达经济体或大型发展中经济体。

关于图中展示的分类网络 9(b-f)，2018年，法国在杀虫剂和杀菌剂国际贸易网络中排名第一，南非在除草剂网络中排名第一，中国在消毒剂网络中排名第一，印度在灭鼠剂网络中排名第一。该图展示了金砖国家经济体的崛起，尤其是中国、印度和南非。

3.6. 聚类系数

一个经济体的聚类系数刻画了其贸易伙伴的连接度，可按如下方式计算（Watts 和 Strogatz，1998年）：

$$C_{\mathrm{c}}(i)=\frac{|\{a_{jk}:i,j\in\mathbf{N}_i,a_{ij}\in A\}|}{k_i(k_i-1)}. \tag{8}$$

其中，$\mathbf{N}_i$ 是i的邻居集合。

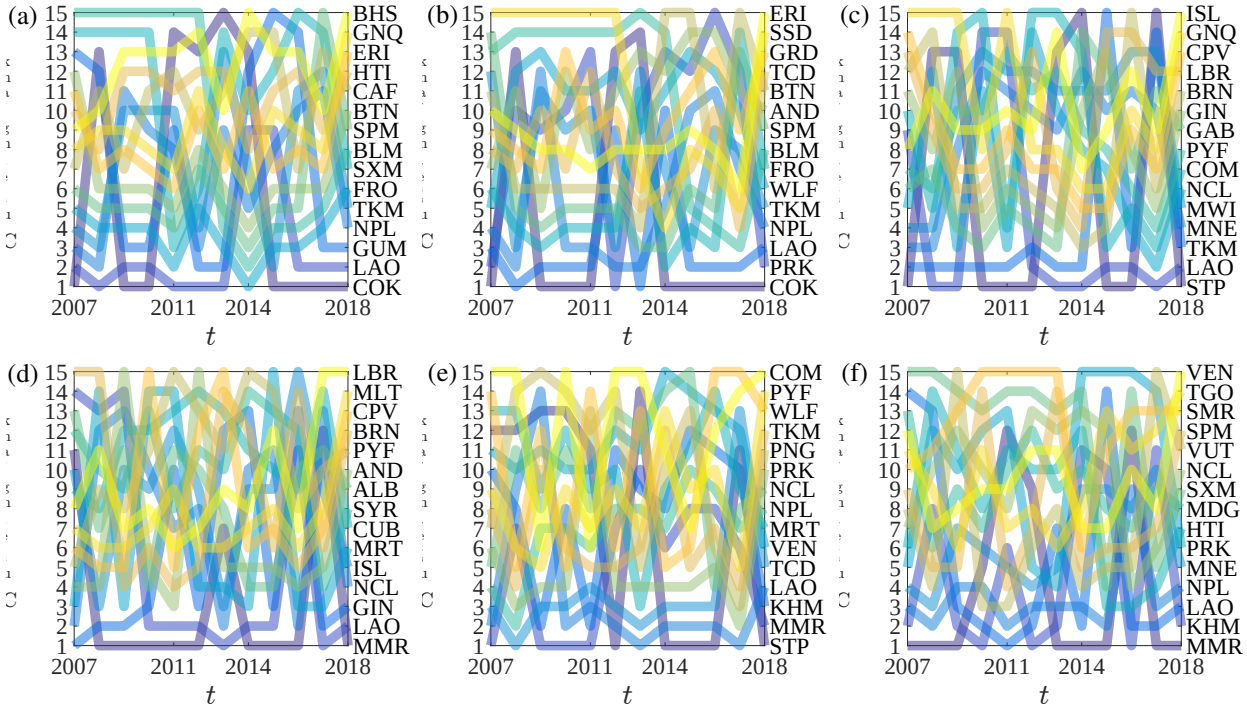

图10：2007年至2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e）以及灭鼠剂和其他类似产品（f）国际贸易网络中前15大经济体的排名演变。排名依据节点的聚类系数确定。

我们计算了各国际农药贸易网络中节点的聚类系数，并对2007年至2018年各年度的经济体进行排名。基于中介中心性的前15大经济体排名演变如图所示。 10。如图 10(a)所示，2018年的聚合网络中，排名前15的经济体为库克群岛、老挝人民民主共和国、关岛、尼泊尔、土库曼斯坦、法罗群岛、圣马丁、圣巴泰勒米、圣皮埃尔和密克隆、中非共和国、海地、厄立特里亚、赤道几内亚和巴哈马，这些主要是小型发展中经济体。这个名单与前几小节中的名单大不相同。分类网络的情况也类似。

3.7. 节点指标之间的交叉相关

如前面几个小节所示，除聚类系数外，不同节点指标下排名靠前的经济体在一定程度上相似。我们采用斯皮尔曼秩相关计算聚合网络和五种分类网络的九个节点指标之间的交叉相关系数，该方法衡量的是节点指标排名之间的相关性。我们发现，对于同一类型的网络（聚合网络、杀虫剂、杀菌剂、除草剂、消毒剂和灭鼠剂），其交叉相关矩阵在2007年至2018年的不同年份中非常相似。因此，图11 仅展示2018年六种网络的交叉相关矩阵。值得注意的是，不同网络对应的六个矩阵也非常相似。

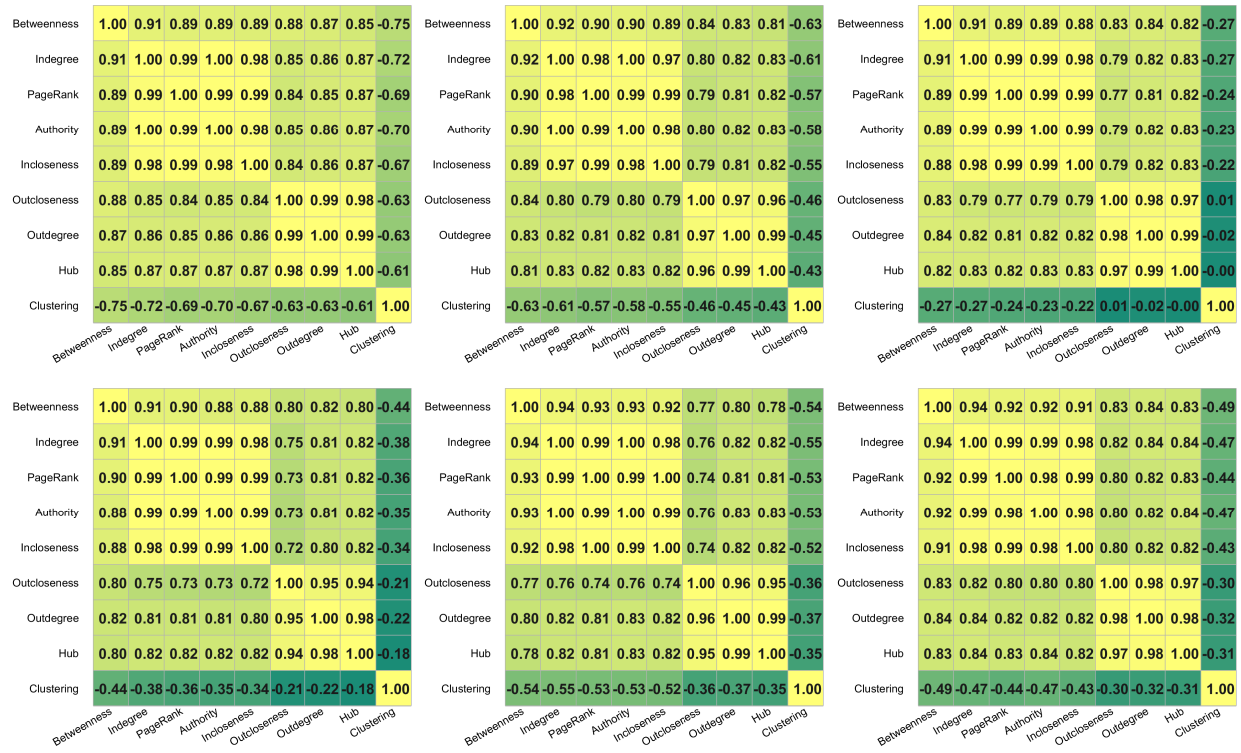

图11：2018年聚合网络和五个分类网络的九种节点指标交叉相关矩阵。共分为四个区块：区块I（中介中心性）、区块II（入度、PageRank、权威值和入接近中心性）、区块III（出接近中心性、出度和枢纽）以及区块IV（聚类系数）。

为使较大的相关性更靠近对角线，我们重新排列坐标轴上的节点指标（Meng等人，2014）。我们观察到四个明显的区块：区块I（中介中心性）、区块II（入度、PageRank、权威值和入接近中心性）、区块III（出接近中心性、出度和枢纽值）以及区块IV（聚类系数）。这种分类可以用以下事实解释：（1）区块II中的节点指标由指向这些节点的节点决定（因此与“入”相关），反映了这些节点作为目标节点（或汇点）的特征；（2）区块III中的节点指标由这些节点所指向的节点决定（因此与“出”相关），反映了这些节点作为源点的特征；（3）区块I中的中介中心性反映了全局方向性特征的一个方面，不区分目标节点或源点；（4）聚类系数是无向网络中节点的局部特征。

结果发现，聚类系数与其他八种节点指标均呈负相关。除聚类系数所在的区块IV外，其余相关系数均显著为正。同一区块内的节点指标高度相关，相关系数接近1。不同区块之间的节点指标也高度相关，相关系数较大，但未接近1。

不同节点指标之间交叉相关的这些有趣结果，在采用不同节点指标设计攻击策略时，将影响网络的结构稳健性和脆弱性。未来研究还面临一些值得探讨的开放性问题，例如外部驱动因素对经济体排名的影响。具体而言，经济形势变化（例如2008年全球金融危机和2012年债务危机导致欧盟国内生产总值下降）、公共卫生危机（例如埃博拉疫情和新冠肺炎疫情）、极端天气（例如干旱、洪水或厄尔尼诺/拉尼娜现象），以及战争、冲突和社会动荡，都会影响受影响经济体的节点指标，尤其是农业密集型经济体。

4. 经济体冲击对巨型连通分量规模的影响

4.1. 不同冲击下的鲁棒性曲线

为模拟对经济体的冲击，我们采用三种策略$\mathcal{S}=\{\mathcal{R},\mathcal{D},\mathcal{A}\}$：随机节点移除策略（$\mathcal{S}=\mathcal{R}$）、按照节点指标降序排列的定向节点移除策略（$\mathcal{S}=\mathcal{D}$），以及按照节点指标升序排列的定向节点移除策略（$\mathcal{S}=\mathcal{A}$）。冲击造成的后果严重程度以被移除节点的比例$p$（即停止进出口的经济体）量化。我们考察了第3节中研究的九项节点指标，并比较了基于不同节点指标得出的结果。

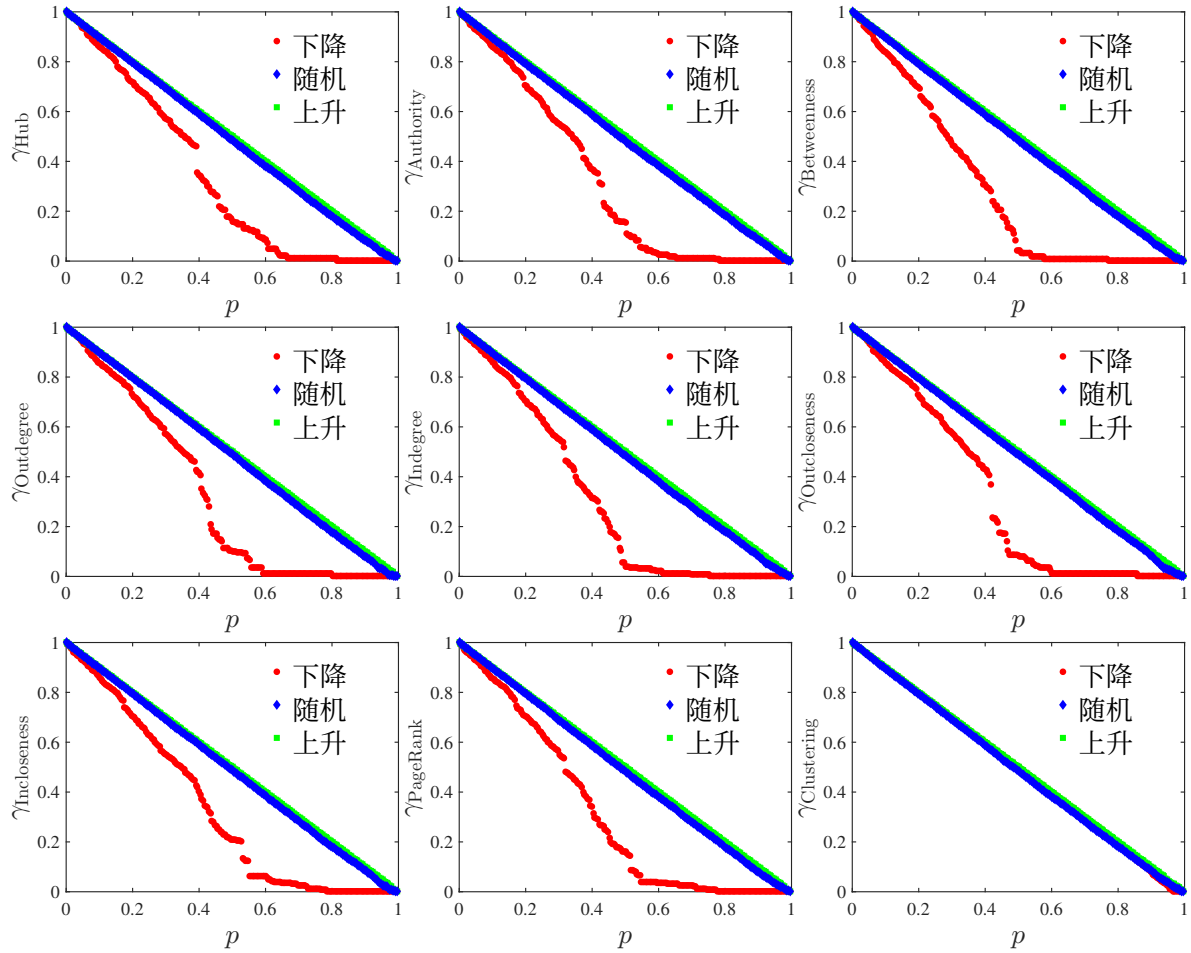

图12：鲁棒性曲线 $\gamma_I(p,\mathcal{S})$ 展示了2018年五种农药的聚合网络中，经济体冲击对巨型连通分量规模的影响。比率 γ_I 表示根据节点度量 I 删除网络中的节点后，由剩余网络节点构成的巨型连通分量中的节点数占比。图中，“下降”“上升”和“随机”分别对应优先删除节点度量 I 最大、最小和随机节点的情形。随机移除策略的鲁棒性曲线 $\mathcal{S}=\mathcal{R}$ 是通过对20轮模拟结果取平均得到的。

我们考察的结构特征是巨型连通分量的大小（Albert 等人，2000）。令$N(p,\ \mathcal{S})$ 表示根据给定节点度量p 和策略 I 移除一定比例的节点后，巨型连通分量中剩余的节点数 $\mathcal{S}$，则巨型连通分量的大小定义为$N_I(p,\ \mathcal{S})$ 与原始网络中的节点总数$N\ =N_I(0,\ \mathcal{S})$之比，

$$\gamma_I(p,\mathcal{S})=\frac{N_I(p,\mathcal{S})}{N}, \tag{9}$$

这可以视为节点遭受特定冲击时网络的稳健性曲线。 γ_I 的值可视为国际农药贸易全球化程度的衡量指标。

在图12中，我们汇总了2018年五种农药的聚合网络中，经济体冲击对巨型连通分量规模影响的结果。由此可以得到一些有趣的观察结果。我们注意到，其他年份以及五个分类网络的结果也保持不变。

首先，聚合国际农药贸易网络在按升序进行蓄意节点移除时表现出极强的鲁棒性 $\mathcal{S} = \mathcal{A}$。我们发现，无论节点度量$I$为何，稳健性曲线都可以表示为：

$$\gamma_I(p, \mathcal{A}) = 1 - p, \tag{10}$$

它与I无关。结合式（9）和式（10），可得

$$N_I(p, \mathcal{A}) = N - Np. \tag{11}$$

换言之，从原始网络中移除Np 个重要性最低的节点（I 值较小）后，所得网络不会分裂，仍保持为一个整体，这表明冲击仅限于被移除的节点，不会影响其他节点。

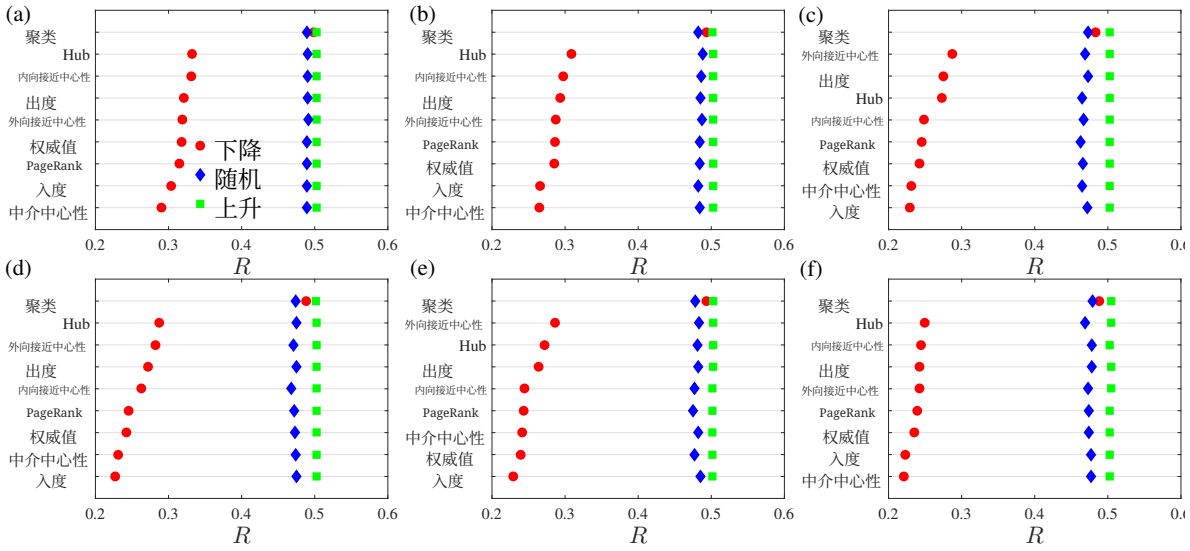

图13：比较不同节点指标I 对2018年所有农药（a）、杀虫剂（b）、杀菌剂（c）、除草剂（d）、消毒剂（e），以及灭鼠剂和其他类似产品（f）国际贸易网络鲁棒性$R_I(S)$的影响。

其次，聚合网络对随机施加于经济体的冲击具有很强的鲁棒性。无论节点指标I为何，稳健性曲线均可表示如下

$$\gamma_I(p, \mathcal{R}) \approx 1 - p - \delta, \tag{12}$$

其中，δ 是一个非常小正数。因此，随机移除节点对剩余网络的连接度络。

第三，除聚类系数外，聚合网络在按八种节点指标降序蓄意攻击节点时十分脆弱，因为稳健性曲线明显偏离基线 $\gamma_I(p) = 1 - p$。这八条稳健性曲线 $\gamma_I(p, \mathcal{D})$的下降速度远快于 $\gamma_I(p, \mathcal{R})$和 $\gamma_I(p, \mathcal{A})$，尤其是在p接近0.5时。我们观察到，每条 $\gamma_I(p, \mathcal{D})$曲线均存在一个临界点p_c ，其值因节点指标而异，且大于0.6。当$p \geq p_c$时，网络完全断开。

第四，当节点度量为聚类系数时，鲁棒性曲线主要位于 $\mathcal{S} = \mathcal{R}$ 和 $\mathcal{S} = \mathcal{A}$对应的另外两条鲁棒性曲线之间。这表明，按聚类系数等局部节点指标进行排序，几乎

从未对网络的结构鲁棒性产生全球性影响。

4.2. 网络鲁棒性的测量

为了简洁地描述复杂网络的结构鲁棒性，可以计算鲁棒性曲线与两条坐标轴所围成的面积，

$$R_I(\mathcal{S}) = \frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N}\gamma_I\left(n/N, \mathcal{S}\right), \tag{13}$$

其定义为　　稳健性度量（Schneider 等人，2011）。根据定义，R_I（$\mathcal{S}$）i
s 只有在移　除任意比例的节点后，剩余网络仍保持连通时才达到；因此，我们有

$$R_I(\mathcal{S}) \leq 0.5, \tag{14}$$

值$R_I(\mathcal{S})$越大，网络的鲁棒性就越强。

汇总网络在2018年采用不同节点指标 $R_I(\mathcal{S})$ 和节点移除策略 $\mathcal{S}$ 时的稳健性度量值，根据图12 中的结果计算得出，并绘制于图13(a)。我们还计算了杀虫剂、杀菌剂、除草剂、消毒剂和灭鼠剂网络的 $R_I(\mathcal{S})$ 值，见图13(b-f)。可以观察到，节点指标聚类系数是一个异常值，而且我们发现

$$R_{\text{Clustering}}(\mathcal{R}) < R_{\text{Clustering}}(\mathcal{D}) < R_{\text{Clustering}}(\mathcal{A}), \tag{15}$$

这表明，聚类系数并不是衡量节点对网络鲁棒性的贡献、并据此对节点进行排序的有效指标。相比之下，对于其他八种节点指标，我们发现

$$R_I(\mathcal{D}) < R_I(\mathcal{R}) < R_I(\mathcal{A}) = 0.5, \tag{16}$$

这表明，这些节点指标能够对节点对网络结构鲁棒性的贡献进行排序。

入度较高的经济体对杀菌剂、除草剂和消毒剂国际贸易网络的结构鲁棒性贡献最大，而中介中心性较高的经济体对杀虫剂和灭鼠剂国际贸易网络的结构鲁棒性贡献最大。除中介中心性外，基于入向链接（入度、权威值、PageRank 和入接近中心性）计算得出节点指标较高的经济体，相较于基于出向链接（出度、枢纽和出接近中心性）计算得出节点指标较高的经济体，在维持国际农药贸易网络的结构鲁棒性方面更为重要。换言之，这表明进口经济体（或需求）比出口经济体（或供给）在维持国际农药贸易网络的结构鲁棒性方面更为重要，这说明国际农药贸易网络由农药需求驱动。此外，各指标的重要性差异与图11的结果一致。

4.3. 网络稳健性的演变

现在，我们着手研究所有农药、杀虫剂、杀菌剂、除草剂、消毒剂、灭鼠剂及其他类似产品的年度国际贸易网络在结构鲁棒性方面的演化行为。由于随机节点移除策略（$\mathcal{S} = \mathcal{R}$）和升序节点移除策略（$\mathcal{S} = \mathcal{A}$）容易理解，我们仅考虑降序节点移除策略（$\mathcal{S} = \mathcal{D}$）。图 14展示了2007年至2018年间，九种节点指标 I对应的网络鲁棒性演变。

同样，聚类系数对应的曲线与其他节点指标对应的曲线不同。$R^{\text{Clustering}}(\mathcal{D})$ 的值都接近 0.5，表明所有网络在按聚类系数降序进行定向节点攻击时都相当稳健。聚合网络最为稳健，而杀菌剂网络的稳健性最低。此外，网络的鲁棒性没有呈现明显趋势。

对于其他八项节点指标，我们观察到相似的模式，鲁棒性水平相近，介于0.2至0.4之间。聚合网络的鲁棒性最高，杀虫剂网络次之，消毒剂网络第三，而其他三个网络——杀菌剂、

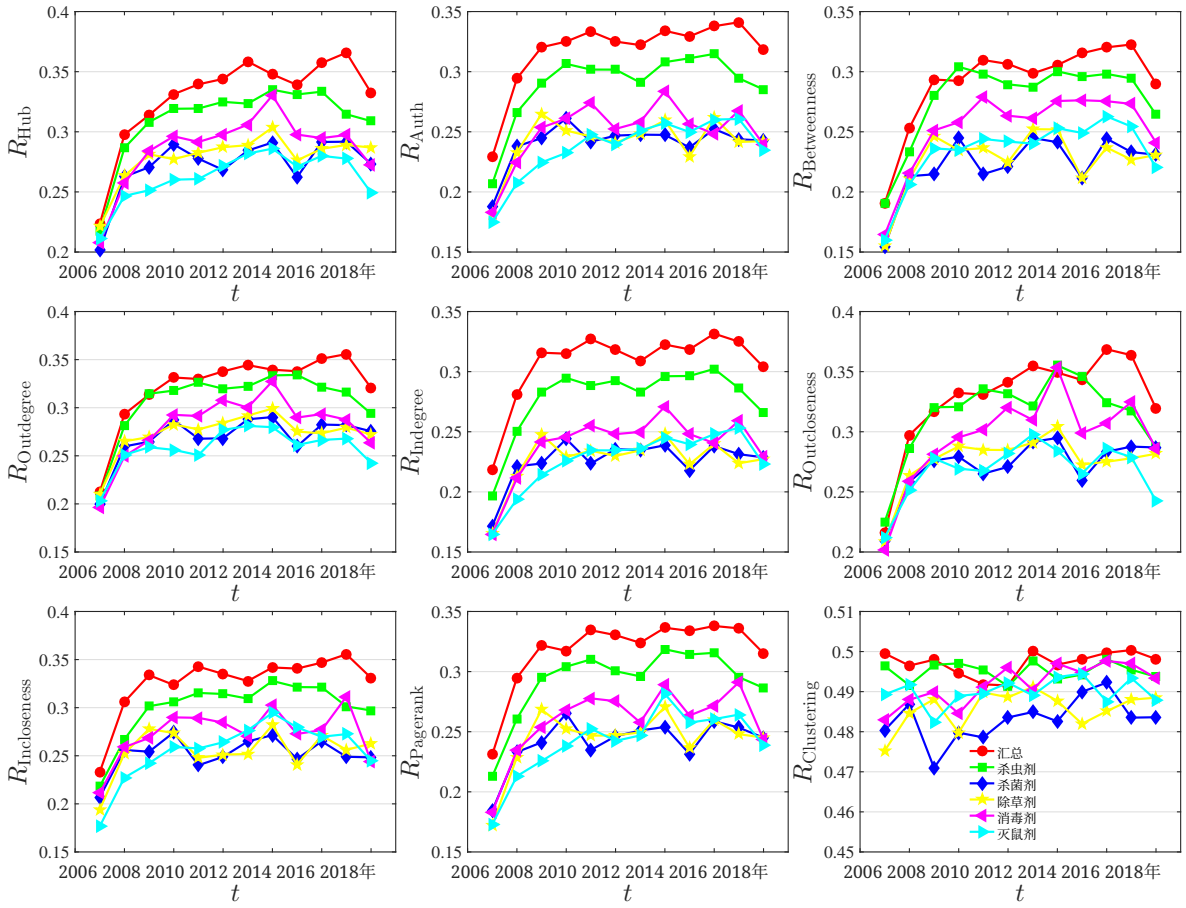

图14：演变以及灭鼠剂的所有农药、杀虫剂、杀菌剂、除草剂和消毒剂国际贸易网络的网络鲁棒性其他类似产品对按九项节点指标降序移除节点策略（$\mathcal{S} = \mathcal{D}$）的响应$I$。

除草剂和灭鼠剂网络则更为脆弱。我们还发现，网络鲁棒性自2007年起有所提高，2017年后则有所下降，呈现倒U形模式。2017年后网络鲁棒性的下降可能是由特朗普政府推行的逆全球化政策所致。我们还观察到，几乎所有网络的鲁棒性在2015年均有所下降，这与2015年全球农药贸易下降8.5%相对应（Liet al., 2021）。相比之下，2008年至2010年的全球金融危机和全球经济衰退并未对国际农药贸易网络的结构鲁棒性产生明显影响。

5. 总结

总之，我们采用九项节点指标（入度、出度、入接近中心性、出接近中心性、权威值、枢纽值、PageRank、中介中心性和聚类系数），衡量了五类农药国际贸易网络中各经济体的重要性。我们研究了九项节点指标排名之间的相互相关性。结果发现，聚类系数与其他八项节点指标呈负相关，而其余八项指标彼此呈正相关。因此，这些节点指标可分为四个群组：入度、PageRank、权威值和入接近中心性；出度、枢纽值和出接近中心性；中介中心性；以及聚类系数。研究发现，发达经济体或大型发展中经济体在国际农药贸易的进口和出口中都更为重要。

随后，我们根据巨型连通分量规模，考察了国际农药贸易网络在三种经济体冲击下的结构鲁棒性（按节点重要性降序移除节点、随机移除节点，以及按升序移除节点，

）。我们发现，除聚类系数外，国际农药贸易网络在按升序移除节点和随机移除节点的经济体冲击下相对鲁棒，但在按节点重要性降序移除节点的经济体冲击下较为脆弱。对于聚类系数而言，网络在三种节点移除策略下均具有鲁棒性。我们发现，进口特征相关节点指标较大的经济体，对维持国际农药贸易网络的结构鲁棒性更为重要。

农药网络数据可能存在遗漏，但我们的研究结果具有外部效度。节点指标的排名稳定性与多种因素有关（Blumm 等，2012年），本文不对此进行详细分析。例如，PageRank 给出的排名对随机网络网络拓扑中的扰动十分敏感。不过，在无标度网络中，有些超稳定节点的排名对扰动具有非凡的稳定性（Ghoshal 和 Barabasi，2011）。研究表明，节点排名前列的节点始终保持稳定（我˜niguez 等，2022）。

我们发现了两种会降低国际农药贸易网络结构鲁棒性的情况。第一种发生在2015年，当时全球农药贸易中的国际农药贸易额下降了8.5%。第二种出现在2017年之后，这很可能是由特朗普政府实施的逆全球化政策所引发的。对于经济体而言，建立更多元化的进出口关系至关重要，这有助于增强其抵御外部冲击的能力，也能提升国际农药贸易网络整体的结构鲁棒性。

我们的研究考察了经济体层面的农药供应网络。类似的分析也可以在行业或企业层面开展。我们正面临的芯片短缺给欧洲的一些行业带来了风险，而新冠疫情和贸易战影响导致的供应链中断也影响了中国等大国。已有许多研究基于仿真数据（Hearnshaw 和 Wilson，2013；Zhao 等人，2011；Li 和 Zobel，2020；Zhao 等人，2021）或真实数据（Zhao 等人，2019；Li 等人，2020）探讨供应链网络的鲁棒性或韧性。然而，这些研究只考虑了很少的节点指标。采用更多节点指标，可以从更多维度加深我们对供应链网络鲁棒性或韧性的理解，而这些维度或许能够模拟经济体面临的不同类型冲击。

未来研究还有其他有趣的方向。例如，可以考虑采用 Melitz型结构模型（Melitz，2003；Helpman 等人，2004），并将冲击（随机失效和蓄意攻击（Albert 等人，2000））下的网络鲁棒性研究框架纳入其中。也可以考虑采用引力模型（Isard，1954）、适应度模型（Garlaschelli 和 Loffredo，2004）和辐射模型（Simini 等人，2012；Ren 等人，2014；Yan 等人，2017），以预测贸易流。这类研究将进一步加深我们对国际农药贸易网络动态演化的理解。

致谢

本研究得到国家自然科学基金委员会（72171083）、上海市优秀学术带头人计划以及中央高校基本科研业务费的资助。

参考文献

Albert, R., Albert, I., Nakarado, G., 2004. 北美电力网的结构脆弱性。Phys. Rev. E 69, 025103. doi:10.1103/PhysRevE.69.025103. Albert,R.,Jeong,H.,Barab´asi, A.L., 2000. 复杂网络的错误与攻击容忍性。Nature 406, 378–381. doi:10.1038/35019019. Blumm, N., Ghoshal, G., Forr´o, Z., Schich, M., Bianconi, G., Bouchaud, J.P., Barab´asi, A.L., 2012. 复杂系统中排名过程的动态演化。Phys. Rev. Lett. 109, 128701. doi:10.1103/PhysRevLett.109.128701. Brin, S., Page, L., 1998. 大规模超文本网络搜索引擎的构造。Comput. Netw. ISDN Syst. 30, 107–117. doi:10.1016/ S0169-7552(98)00110-X.Callaway, D., Newman, M., Strogatz, S., Watts, D., 200085, 5468547101103855468. 网络鲁棒性与脆弱性：随机图上的渗流。Phys. Rev. Lett. – . doi:./PhysRevLett... Chen, D., Lu, L., Shang, M.S., Zhang, Y.C., Zhou, T., 2012. 识别复杂网络中的有影响力节点。Physica A 391, 1777–1787. doi:10.1016/j.physa.2011.09.017. Chen, S., Ding, Y., Zhang, Y., Zhang, M., Nie, R., 2022. 中国石油进口网络鲁棒性研究。Energy 239, 122139. doi:10. 1016/j.energy.2021.122139. Cohen, R., Erez, K., ben Avraham, D., Havlin, S., 2000. 互联网对随机故障的韧性。Phys. Rev. Lett. 85, 4626–4628. doi:10.1103/PhysRevLett.85.4626.

Cohen, R., Erez, K., ben Avraham, D., Havlin, S., 2001. 蓄意攻击下互联网的崩溃。Phys. Rev. Lett. 86, 3682–3685. doi:10.1103/PhysRevLett.86.3682. Diao, K., Sweetapple, C., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Butler, D., 2016 106, 383 393 10 1016 2016 10 011 . 供水系统的全球韧性分析。Water Res. – . doi: . /j.watres. . . . Fair, K.R., Bauch, C.T., Anand, M., 2017. 全球小麦贸易网络的动态演化及其对冲击的韧性。Sci. Rep. 7, 7177. doi:10.1038/ s41598-017-07202-y. Foti, N.J., Pauls, S., Rockmore, D.N., 2013 37, 1889 1910 10 1016 2013 04 009. 世界贸易网络随时间的稳定性——灭绝分析。J. Econ. Dyn. Control – . doi: . /j.jedc. . . . Freeman, L.C., 1977. 基于中介中心性的中心性测量方法。Sociometry 40, 35–41. doi:10.2307/3033543. Garlaschelli, D., Loffredo, M., 2004. 有向网络中的连边互惠模式。Phys. Rev. Lett. 93, 268701. doi:10.1103/ PhysRevLett.93.268701. Ghoshal, G., Barabasi, A.L., 2011. 复杂网络中的排名稳定性与超稳定节点。Nat. Commun. 2, 394. doi:10.1038/ ncomms1396. Hearnshaw, E.J.S., Wilson, M.M.J., 2013. 供应链网络理论的复杂网络方法。Int. J. Oper. Prod. Manage. 33, 442–469. doi:10.1108/01443571311307343. Helpman, E., Melitz, M., Yeaple, S., 2004. 异质性企业的出口与外国直接投资。Am. Econ. Rev. 94, 300–316. doi:10.1257/ 000282804322970814. I˜niguez, G., Pineda, C., Gershenson, C., Barab´asi, A.L., 2022. 排名动态。Nat. Commun. 13, 1646. doi:10.1038/ s41467-022-29256-x. Isard, W., 1954. 区位理论与贸易理论：短期分析。Quart. J. Econ. 68, 305–320. doi:10.2307/1884452. Kleinberg, J., 1999. 超链接环境中的权威源。J. ACM 46, 604–632. doi:10.1145/324133.324140. Latora, V., Marchiori, M., 2005. 基础设施网络的脆弱性与保护。Phys. Rev. E 71, 015103. doi:10.1103/PhysRevE. 71.015103. Li, J.A., Xie, W.J., Zhou, W.X., 2021. 国际农药贸易网络的结构与演化。Front. in Phys. 9, 681788. doi:10. 3389/fphy.2021.681788. Li, Y., Zobel, C.W., 2020. 涟漪效应下的供应链网络韧性研究。Int. J. Prod. Econ. 228, 107693. doi:10.1016/j.ijpe.2020.107693. Li, Y., Zobel, C.W., Seref, O., Chatfield, D., 2020. 风险传播条件下的网络特征与供应链韧性。Int. J. Prod. Econ. 223, 107529. doi:10.1016/j.ijpe.2019.107529. Lu, L., Chen, D., Ren, X.L., Zhang, Q.M., Zhang, Y.C., Zhou, T., 2016. 复杂网络中关键节点的识别。Phys. Rep. 650, 1–63. doi:10.1016/j.physrep.2016.06.007. Melitz, M., 2003. 贸易对行业内再配置和行业总生产率的影响。Econometrica 71, 1695–1725. doi:10. 1111/1468-0262.00467. Meng, H., Xie, W.J., Jiang, Z.Q., Podobnik, B., Zhou, W.X., Stanley, H.E., 2014. 美国住房市场的系统性风险与时空动态演化。Sci. Rep. 4, 3655. doi:10.1038/srep03655. Oehlers, M., Fabian, B., 2021. 网络鲁棒性的图指标综述。Mathematics 9, 895. doi:10.3390/math9080895. Pagani, G.A., Aiello, M., 2013. 作为复杂网络的电网：综述。Physica A 392, 2688–2700. doi:10.1016/j.physa.2013. 01.023. Ren, Y., Ercsey-Ravasz, M., Wang, P., Gonzalez, M.C., Toroczkai, Z., 2014. 利用基于时间范围的辐射模型预测空间网络中的通勤流。Nat. Commun. 5, 5347. doi:10.1038/ncomms6347. Schaeffer, S.E., Valdes, V., Figols, J., Bachmann, I., Morales, F., Bustos-Jimenez, J., 2021. 图的鲁棒性与韧性表征：简要综述。J. Complex Netw. 9, cnab018. doi:10.1093/comnet/cnab018. Schneider, C.M., Moreira, A.A., Andrade, J.S., Havlin, S., Herrmann, H.J., 2011. 缓解针对网络的恶意攻击。Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 108, 3838–3841. doi:10.1073/pnas.1009440108. Simini, F., Gonz´alez, M.C., Maritan, A., Barab´asi, A.L., 2012. 流动性与迁移模式的普适模型。Nature 484, 96–100. doi:10.1038/nature10856. Wang, X., Guan, S., Lai, C.H., 2009. 保护基础设施网络免受基于成本的攻击。Ne w J. Phys. 11, 033006. doi:10.1088/ 1367-2630/11/3/033006. Watts, D.J., Strogatz, S.H., 1998. “小世界”网络的集体动态演化。Nature 393, 440–442. doi:10.1038/30918. Wei, N., Xie, W.J., Zhou, W.X., 2022a. 提升国际石油贸易网络效率的合作策略表现。J. Complex Netw. 10, cnab053. doi:10.1093/comnet/cnab053. Wei, N., Xie, W.J., Zhou, W.X., 2022b. 经济体遭受定向攻击时国际石油贸易网络的鲁棒性。Energy 251, 123939. doi:10.1016/j.energy.2022.123939. Xie, W.J., Wei, N., Zhou, W.X., 2021. 全球石油贸易网络的演化效率与鲁棒性。J. Stat. Mech. 10, 103401. doi:10.1088/ 1742-5468/ac21da. Yan, X.Y., Wang, W.X., Gao, Z.Y., Lai, Y.C., 2017. 不同空间尺度上个体与人口流动性的普适模型。Nat. Commun. 8, 1639. doi:10.1038/s41467-017-01892-8. Zanin, M., Lillo, F., 2013. 以复杂网络对航空运输进行建模：简要综述。Eur. Phys. J.-Spec. Top. 215, 5–21. doi:10.1140/ epjst/e2013-01711-9. Zhao, K., Kumar, A., Yen, J., 2011 58, 347 362 10 1109 2010 2095503. 通过重连提升供应分配网络的鲁棒性。IEEE Trans. Eng. Manage. – . doi: . /TEM. . . Zhao, K., Scheibe, K., Blackhurst, J., Kumar, A., 2019. 供应链网络应对中断的鲁棒性：拓扑分析、测量与优化。IEEE Trans. Eng. Manage. 66, 127–139. doi:10.1109/TEM.2018.2808331. Zhao, P., Yin, S., Han, X., Li, Z., 2021. 基于节点移除的精益供应链网络模型研究。Physica A 567, 125556. doi:10.1016/j.physa.2020.125556.