arXiv:2603.01740v1 [physics.soc-ph] 2 Mar 2026

全球粮食贸易伙伴的多样化加剧了冲击风险暴露方面的不平等

Ariadna Fosch,[1,2,*] Alberto Aleta,[1,2] Roger Cremades,[3] 和Yamir Moreno[1,2]
[1]复杂系统生物计算与物理研究所（*BIFI*），萨拉戈萨大学，西班牙
[2]理论物理系，萨拉戈萨大学，西班牙
[3]可持续性研究所，地球、环境与可持续性学院，利兹大学，英国

近期全球粮食贸易中断已表明，局部冲击如何能够级联成为全球安全威胁。尽管粮食系统吸收溢出效应的能力在很大程度上取决于其底层贸易网络，但很少有研究量化其时间演化如何随时间重塑系统性脆弱性。在此，我们评估了1986年至2022年全球连通性的变化如何重塑对生产冲击的响应。利用联合国粮食及农业组织数据，我们构建了粮食贸易系统的逐年多重网络表示，并通过包含动态出口禁令的随机冲击传播模型量化了稳健性。我们发现，尽管全球化的加深强化了相互依赖关系并放大了级联效应，稳健性趋势仍然具有异质性。谷物贸易已变得更加去中心化，并对定向冲击更有韧性；相反，动植物油脂则在印度尼西亚和马来西亚等主要出口国周围呈现出日益增强的中心化与脆弱性。这些结构转型导致系统性脆弱性出现分化变化，对非洲和南亚等本已脆弱的区域构成了不成比例的威胁。

关键词：粮食贸易、生产冲击、随机传播模型

1. 引言

过去几十年来，粮食安全的可获得性、稳定性和获取这几个维度，屡屡受到粮食贸易系统中若干重大扰动的严峻挑战 [1–3]。例如，2022年，严重干旱、乌克兰战争以及新冠肺炎疫情带来的社会经济影响叠加，导致了一场严重的全球粮食危机 [1, 4]。由此造成的粮食短缺和价格通胀（谷物价格涨幅达70%），使急性粮食不安全问题急剧加剧，面临风险的人数从2021年的1.93亿增至 2022 [3]时的近2.58亿。尽管价格在2023年开始趋于稳定，但这一事件表明，压力能够以多大的规模、以多快的速度在相互连接的全球粮食贸易网络中传播。

粮食系统快速吸收此类扰动的能力 [5, 6]，（即其稳健性）并非一成不变；它在很大程度上取决于贸易网络的结构。在经济发展、全球化和不断变化的地缘政治格局的影响下，全球粮食贸易网络的规模和复杂程度不断增加 [7]。然而，这些变化究竟放大了粮食系统冲击在国家间传播并级联的途径，还是创造了新的传播途径，目前仍不清楚 [8]。阐明粮食贸易网络结构的演变，以及这种演变对生产短缺传播的影响，将有助于深入了解粮食系统抵御未来级联冲击的韧性。

既往研究通常从两个互补视角探讨粮食贸易系统的稳健性。时间演化分析考察网络结构如何随时间变化，刻画连通性 [9–11], 社群形成 [10, 12], 效率 [13], 以及拓扑稳健性 [13–15]方面的转变。冲击传播研究则模拟局部短缺如何在危机期间（如新冠肺炎疫情 [16], 极端气候事件 [17], 或战争 [18–20]）沿贸易网络扩散。然而，对稳健性的完整评估需要将结构维度与冲击传播维度的探索结合起来。

在本研究中，我们结合这两种视角，分析1986年至2022年国际食品贸易网络的演变，并评估随时间发生的结构转型如何影响生产冲击的传播。与以往主要关注小麦 [9, 15, 17] 或大米 [17], 等主粮作物的研究不同，我们探讨了12种具有不同稳健性趋势的食品类别。多重网络框架的创新应用使这一研究成为可能：该框架将食品类别编码为不同层，并由一组代表各个国家的节点共享。

* 通讯电子邮箱：arifosch@gmail.com

我们首先分析了食品贸易多层网络的时间演化，揭示了1986年至2022年间影响粮食贸易系统的最重要结构转型。随后，我们提出一种新颖的随机模型，用于模拟生产短缺在食品贸易多层网络中的传播。该模型模拟面临产品短缺的国家如何通过动态限制出口作出反应，从而减少依赖国可获得的商品，并引发沿网络扩散的新短缺。哪些国家会受到此类限制的影响，则由一项模拟进口商之间竞争的随机传播规则决定。这些动态反映了在出口限制下的竞争；主要出口国通常会采取税收、配额或禁令等措施，以稳定国内市场 [21]。例如，在2008—2011年粮食危机期间，价格飙升了13%至40%。因此，越南、印度、埃及、中国和柬埔寨等国家实施了大米出口禁令，以保障本国国内消费 [3, 15, 22]。2023年7月，印度也再次采取出口禁令，对所有非巴斯马蒂大米实施全球出口禁令，以防止当地价格上涨 [3, 23]。据估计，这项限制使全球大米消费者损失约3.15亿美元 [24]。

最后，我们应用该模型来估计1986年至2022年间由模拟生产短缺所产生的溢出级联。对于每个年份和食品类别，我们模拟了独立影响每个全球生产国的单一国家冲击所产生的溢出级联。随后，我们比较了所产生的溢出级联规模随时间的变化。我们的方法不仅量化了贸易结构变化如何影响危机的传播，还揭示了各食品类别中最脆弱地理区域的变化。这提供了全球食品贸易网络韧性随时间变化的动态视角，对致力于全球粮食安全的政策制定者可能具有特殊意义。

2. 结果

利用来自联合国粮食及农业组织的双边贸易流矩阵，我们构建了1986年至2022年间食品贸易的逐年多重网络表示（详见第4.2节）。通过多重网络框架，我们可以在单一结构中用独立的层表示连接同一组节点（国家）的多个网络（示意图见图1）。所得网络是有向的：出向连接刻画一个国家的出口，从而隐含地将入向连接定义为接收国相应的进口。该多层网络由12个层组成，每一层反映一个宏观 Food-Ex 类别（例如，谷物产品、肉类产品、动植物油脂）的这些有向贸易关系 [25]。最后，我们构建了该多层网络的两个加权版本：一个按经济价值对连接加权，用于拓扑分析；另一个按贸易量对连接加权，用于冲击模拟。

我们随后利用这一逐年的国际食品贸易网络化表征来研究：（1）多层网络中的拓扑变化（例如贸易量的增减、贸易伙伴的变化以及支配地位的变化）如何随时间演化；（2）这些拓扑变化如何改变了生产短缺在多层网络中的传播；以及（3）这些拓扑变化是否改变了脆弱性的地理分布。

2.1. 贸易扩大，对进口的依赖增强

全球化深刻重塑了全球食品贸易网络，既扩大了参与国家的数量，也增加了交换产品的多样性。这些结构转型通过两项多层网络指标的时间演化得以刻画：加权重叠度的 Z 分数 $Z(o_i)$以及多层网络参与系数 P_i [26]。前者量化国家 i 在所有食品类别中的总贸易量（出口或进口），后者则表明该贸易是集中于少数类别（$P_i = 0$），还是在多个类别之间均匀分布（$P_i = 1$）。这两项指标共同定义了 $Z(o_i)$–P_i 平面（见图 2 左侧面板），我们将其划分为 6 个扇区（A1-A6），以便根据贸易主导地位和产品多样化水平对国家进行分类（分类的更多细节见第 4.3 节）。追踪各扇区中国家数量随时间的变化，使我们能够可视化各国贸易主导地位的拓扑转变（图 2 右侧面板）。

在1986年至2022年期间，我们观察到系统明显转向更加互联和多样化（见图2上方面板）。高度专业化出口国的数量显著下降，因为许多国家拓宽了出口组合，并加强了其在全球网络中的作用。这种多样化在中等出口国（A2-A3部门）中尤为明显，其数量大幅增加是以

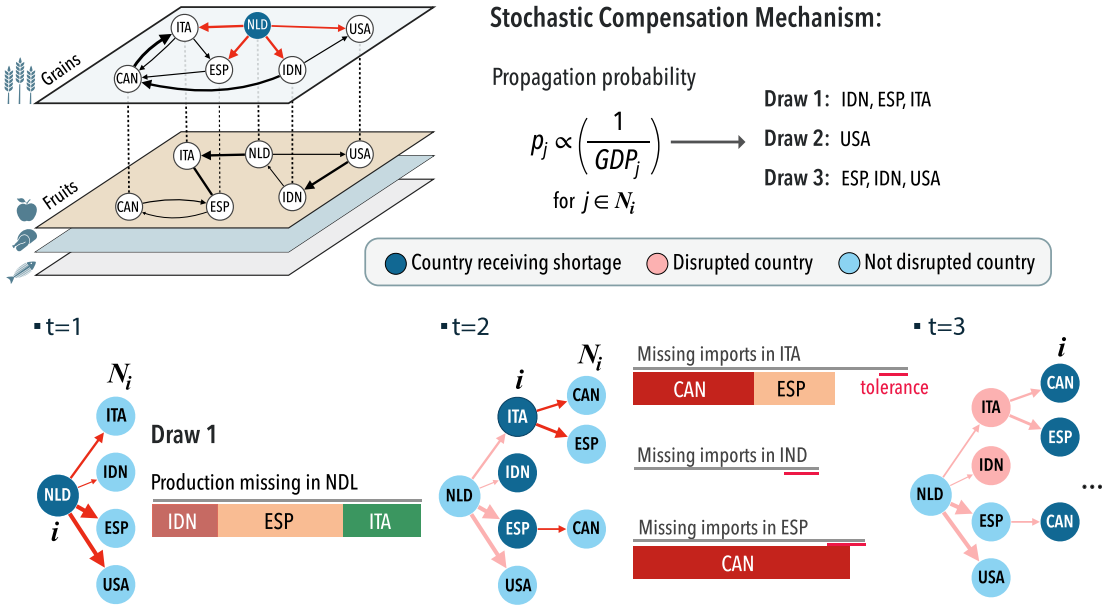

图 1. 粮食贸易多层网络与随机冲击传播模型示意图。每一年，粮食贸易系统都表示为一个包含 12个层的多层网络，每层对应一个食品类别，节点代表国家，有向连线代表贸易流。冲击传播在各层中独立模拟。在一个国家（例如荷兰 NDL）引入产量短缺后，该国会尝试通过减少对部分伙伴的出口来弥补缺口；这些伙伴通过一种以伙伴国国内生产总值为权重的随机机制选出（N_i）。在本例中，减少对印度尼西亚（IDN）、西班牙（ESP）和意大利（ITA）的出口，足以使 NDL 在 $t = 1$ 时完全弥补其缺口，从而让美利坚合众国（USA）维持正常供应。在 $t = 2$ 时，受出口削减影响的国家会出现供应短缺，因此也会采取各自的补偿机制。即使削减所有出口，意大利和印度尼西亚仍无法满足其需求。因此，我们认为它们受到冲击而“中断”。相反，西班牙通过削减自身出口，能够弥补大部分进口缺口，使短缺处于“可容忍”范围内，从而避免该国陷入中断。尽管西班牙不被视为受到冲击而中断，但它不得不实施出口削减，因此溢出效应仍会在 $t = 3$ 传至加拿大（CAN）。冲击会沿网络传播，直至不再有国家受到冲击而中断。

专业化出口国（A1）为代价。尽管大多数主要多产品出口国（A6），如法国、荷兰和美国，仍保持其中心角色（见补充图S1），但巴西和德国等新的关键参与者在20世纪90年代崛起。这种更广泛的参与逐渐削弱了传统枢纽的支配地位，表明全球出口体系正转向更加去中心化且更加互联。

在进口方面，尽管大多数国家在20世纪80年代就已进口多种产品，但为满足国内需求而依赖进口的程度几乎翻了一番，到2022年从23%升至40%（见补充图S2）。如今，大多数国家在网络中处于中间位置（A3），从多个食品类别中进口适量产品，而高度专业化进口国（A1国家）已日益少见。有趣的是，大型进口国（A6）的数量几十年来一直保持稳定，但在新冠肺炎疫情后略有下降（见图2右下方图板和补充图S1）。总之，这些趋势表明，全球化推动粮食贸易系统朝着更加多样化、相互依存的方向发展。

我们进一步通过探究逆参与率（IPR）的时间演化来支持我们的结果 [27],见补充章节1.3。我们观察到，两种类型的贸易中IPR都随时间下降，这印证了出口日益多样化，且相互进行进口贸易的国家越来越多。

2.2. 2022年生产短缺引发更大的溢出级联

随着食品贸易多层网络转向联系更加紧密的结构，自然也会观察到由冲击引发的溢出级联规模发生变化。我们通过模拟量化了这些影响

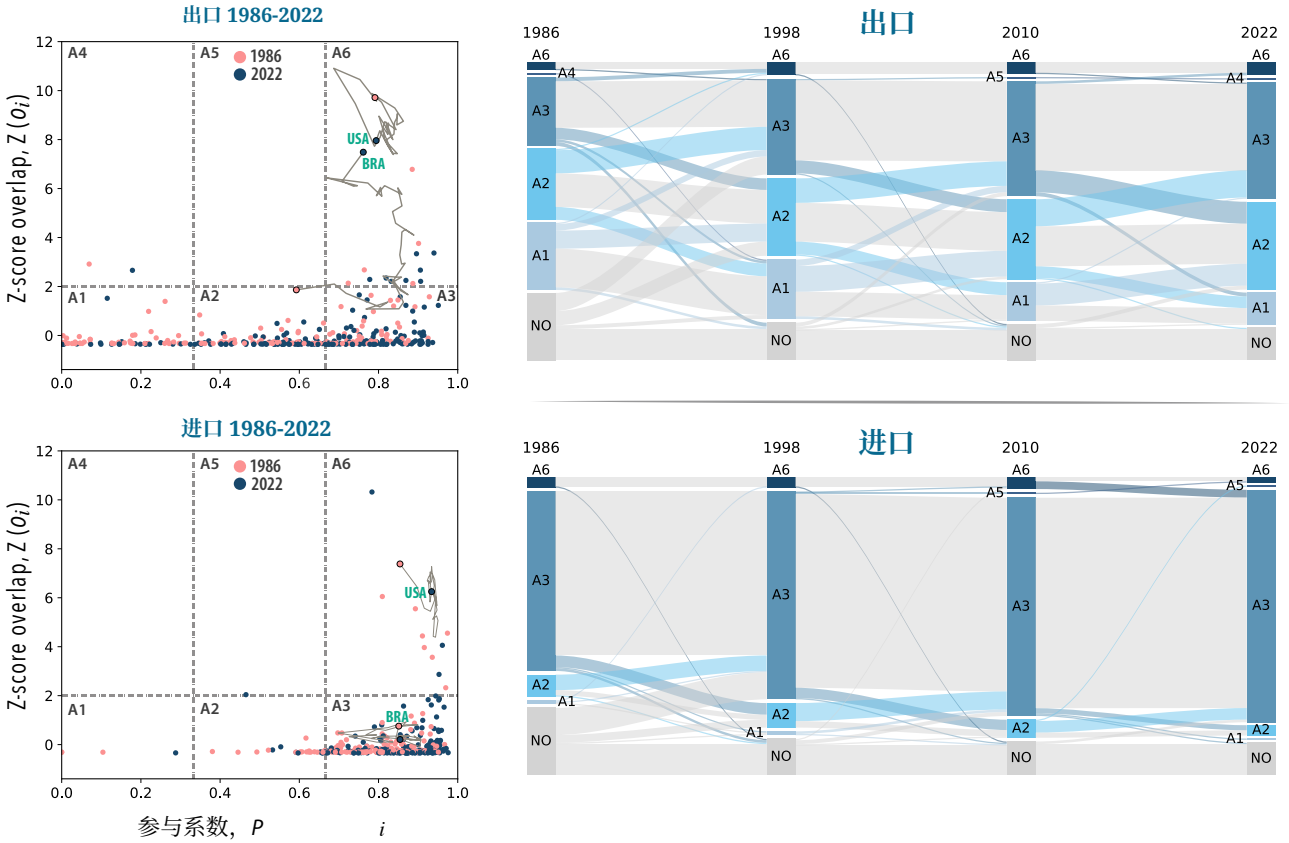

图2. 1986年至2022年食品贸易多层网络的时间演化。左图显示各国在多层网络参与系数（P_i）与加权重叠度（$Z(o_i)$）平面中的位置，上图为出口，下图为进口。这两幅图展示了所有国家在所研究的首末年份1986年和2022年（分别为粉色和蓝色）的位置，以及两个示例国家巴西（BRA）和美利坚合众国（USA）的完整发展轨迹。 $Z(o_i) - P_i$ 平面被划分为六个扇区，标注遵循第4.3节所定义的类别：A1“局部节点”，A2“混合节点”，A3“多产品节点”，A4节点被视为“局部化枢纽”，A5“混合枢纽”，A6“多产品枢纽”，NO“该年份不存在的国家”（即尚未建立的国家/已消失的国家）。同时，右图展示了1986年至2022年间四个不同年份中，各国在 $Z(o_i) - P_i$ 平面六个扇区之间的流动。请注意，本分析所使用的多层网络中，边按交易的货币价值加权（以1000美元计）。

在不同年份发生的同类型冲击，并评估级联规模的变化。具体而言，对于每一年和每种食品类别，我们使用随机传播模型，模拟每个全球生产国发生 100% 产量损失所导致的溢出级联；每次模拟重复 20 次，以考虑随机变异。随后，我们将级联规模衡量为：在模拟的任意时间点，未能通过出口禁令完全弥补短缺，且剩余缺口超过预设容忍阈值 b 的国家所占百分比。该阈值设为年需求的 1%（$b = 0.01$），反映了各国缓冲供给冲击的能力（例如通过库存或适应性措施）。例如，50% 的溢出级联表示，在冲击被完全吸收之前，有一半国家经历了超过其需求 1% 的短缺。冲击传播模型和级联规模计算的详细说明见第 4.4–4.7 节。

20世纪90年代进口依赖的增加和贸易的扩张，使冲击引发的溢出级联规模普遍增大。对于谷物产品，考察系统中规模最大的级联（分布的前5%），可以看到最小级联规模随着时间推移稳步增长：其影响范围从20世纪80年代仅占网络的4%，扩大到2022年的20%（图3左上图）。动植物油脂层中规模最大的级联也呈现出类似趋势（图3左下图）。在这一层中，最小级联规模

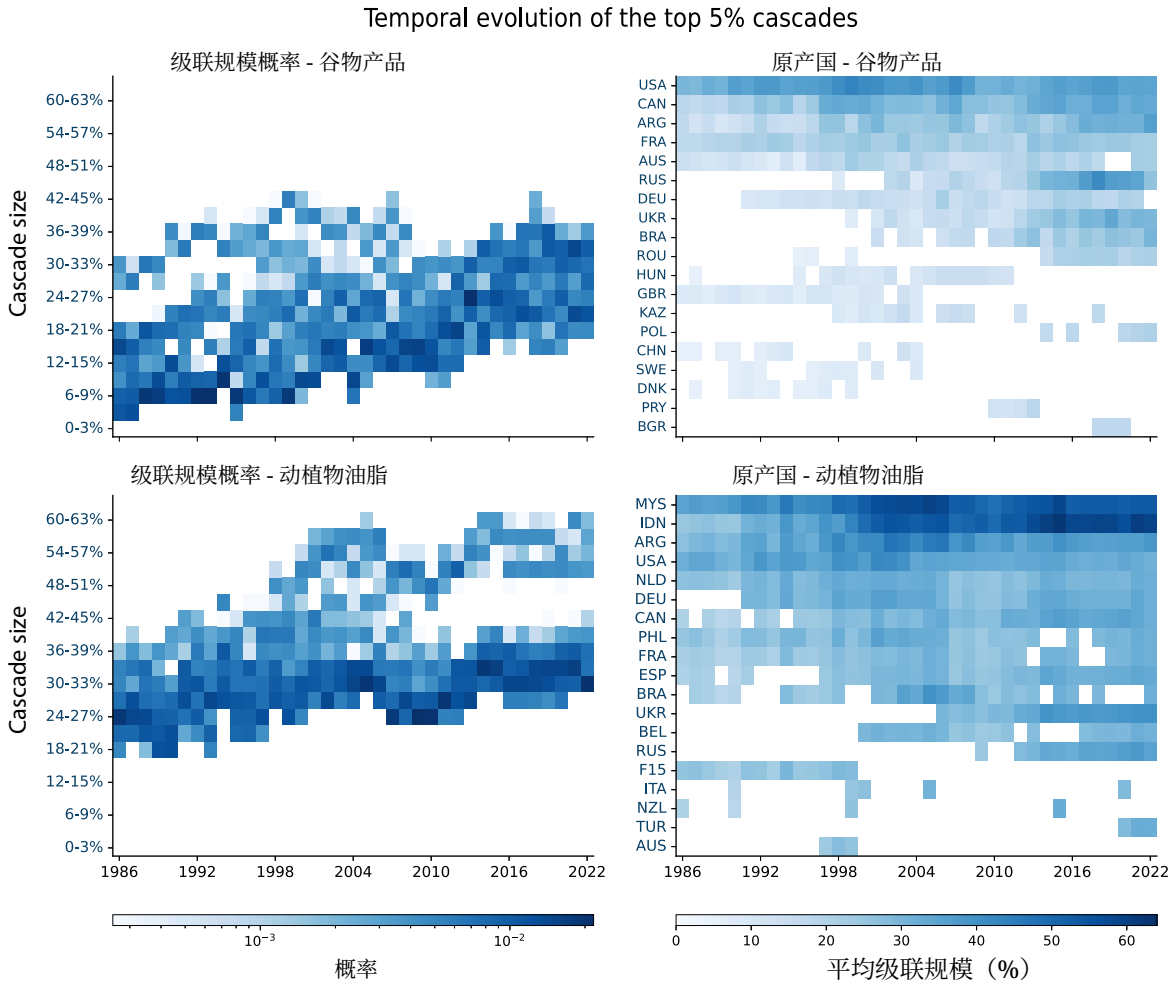

图3. 1986年至2022年间，谷物产品层和动物油脂和植物油脂层（分别见上、下图）每年规模最大的级联效应（前5%）的时间演化。结果基于随机模拟：每年针对每个食品类别，在每个生产国发起单国冲击，共进行20次。左图展示级联规模的时间演化。颜色表示出现特定规模级联效应的概率。右图则展示每年触发前5%级联效应的国家。在此情况下，颜色表示由该国发起的最大级联效应的平均规模。为便于可视化，右图仅显示排名前19的国家（完整图见补充图S5）。

在20世纪90年代几乎翻了一番，从18%升至27%，此后趋于稳定。尽管这两类食品的级联规模总体上都在增长，但由于其贸易网络结构经历了不同的适应性转变，两者的规模分布形态朝着相反的方向演变。

在谷物产品这一类别中，系统经历了去中心化现象。1986年，全球谷物贸易严重依赖少数占据支配地位的供应国，尤以美国为甚（图3，右上图）。因此，美国发起的冲击引发的级联效应波及 $30-33\%$的国家，而其他主要生产国发生的中断影响较小，波及不到21%的国家。随着贸易扩张以及规模较小的供应国取得支配地位，这些差异逐渐缩小，原先的双峰级联规模分布也转变为单峰分布（图3，左上图）。这一转变反映出谷物贸易市场日益走向去中心化：没有任何一个国家能够独自触发灾难性的级联效应。

相反，动植物油脂层经历了中心化现象。20世纪90年代，级联规模普遍增大，但2004年后，级联规模分布出现分化：起源于印度尼西亚和马来西亚的冲击引发了规模极大的级联效应，影响了 $50-63\%$的国家；而其他主要生产国发生的冲击

造成的影响则较为温和，为 33 – 45%（图3，下方各图）。这种分化反映了棕榈油产业的崛起。该产业逐渐主导全球植物油市场，但在地理上仍集中于少数几个热带国家，主要是印度尼西亚和马来西亚 [28]。这种空间集中加剧了系统性脆弱性（例如，面对新型害虫或地缘政治风险时），当关键国家受到影响，油脂贸易便容易遭受严重扰乱（见补充图S6）。

这两个例子展示了在所考察的 12 种食品类别中观察到的贸易网络最常见的适应性转变（中心化和去中心化；所有类别见补充图 S7）。大多数类别的发展轨迹与谷物相似，逐渐转向更加去中心化的贸易系统，在这一系统中，导致最大溢出级联的所有国家产生的影响相近。与此同时，糖和糖果的贸易日益中心化，巴西逐渐成为一个占主导地位的枢纽，能够引发灾难性的级联效应，而其他国家造成的扰动则较为有限。最后，鸡蛋等本地生产和消费的商品基本不受全球变化的影响，因为它们没有出现会改变冲击传播的显著拓扑变化。

2.3. 拓扑变化后的脆弱性转变

我们的结果表明，食品贸易多层网络的演变放大了生产冲击引发的溢出级联的潜在规模和传播范围。进口依赖上升扩大了整体级联规模，而结构变化则影响了这些冲击的传播方式：中心化使系统极易受到少数主要出口国遭受扰动的影响，而去中心化则使更多国家能够引发级联效应。这引出了一个问题：网络结构的这些变化是否也改变了哪些国家最容易受到溢出级联的影响。

在本研究中，我们将脆弱性定义为一个国家缓冲供应中断的能力有限。例如，印度根据《国家粮食安全法》储存了 4000 万至 5000 万吨大米和小麦 [29]。这些库存应有助于减轻溢出级联的影响，增强印度应对供应短缺的稳健性。基于这一点，我们用一项指标来量化脆弱性：一个国家需要增加多少储备，才能应对原本会造成其供应中断的 $X\%$ 冲击；我们将这项指标称为 β_X。直观而言，$\beta_X \approx 0.01$ 的国家脆弱性较低，因为它们只需将假定的容忍度 b 略微提高，就能将未获补偿的短缺减少 $X\%$。与此同时，$\beta_X \approx 1$ 的国家脆弱性较高，因为它们需要囤积难以实现的数量的产品，才能将自身面临冲击的程度降低 $X\%$。本研究将 β_{20} 作为国家准备能力的现实基准，并在补充材料第 2.4 节中提供了关于 β_{50} 的类似结果。

为了更好地刻画脆弱性的时间演化，我们估算了所有国家、年份和食品类别的 β_{20} ，并探究了其时间序列。我们采用4年滚动窗口对序列进行平滑处理，以滤除局部波动，随后将各国的估算结果汇总至地理次区域 [30]。总体而言，除东亚外，几乎所有区域的脆弱性在1986年至2022年间均有所上升（图4左上图）。然而，这种增长并不均衡。密克罗尼西亚、南亚和非洲大部分地区的脆弱性显著上升，而欧洲大部分地区以及中美洲和南美洲的脆弱性仅略有增加。这种不平等尤为值得关注，因为它们对全球粮食安全至关重要的区域造成了不成比例的影响。进一步按食品类别细分这些结果，可以更细致地了解脆弱性的这些变化，并揭示可能对政策制定者有所参考价值的特定产品趋势（见图4上方中间和右侧，以及补充图S8）。

通过对脆弱性排名进行时间分析，我们还能够揭示这些脆弱性变化发生的时间，以及它们与多层结构中拓扑变化的关系（图 4，下方各图）。例如，波利尼西亚、密克罗尼西亚或美拉尼西亚在大多数脆弱性排名中位居前列，并不令人意外。孤立且土地资源稀缺的区域，由于生产能力有限且进口依赖度高，自然更容易受到短缺的影响 [31] （关于进口依赖与脆弱性之间关系的更多详情，见补充材料第 2.6 节）。

然而，其他区域的脆弱性变化永久改变了它们在脆弱性排名中的位置。我们将这些长期变化与网络结构的转变联系起来，这些转变从系统层面影响了生产短缺的传播。例如，在20世纪90年代及21世纪初粮食贸易网络去中心化期间，中亚在脆弱性排名中显著上升。在动植物油脂案例中，我们也观察到类似的长期脆弱性变化：北欧的脆弱性持续上升，而中美洲则稳步下降。这些变化分别反映了欧洲国家进口油脂的增加 [32], 以及中美洲生产的增长 [33]。

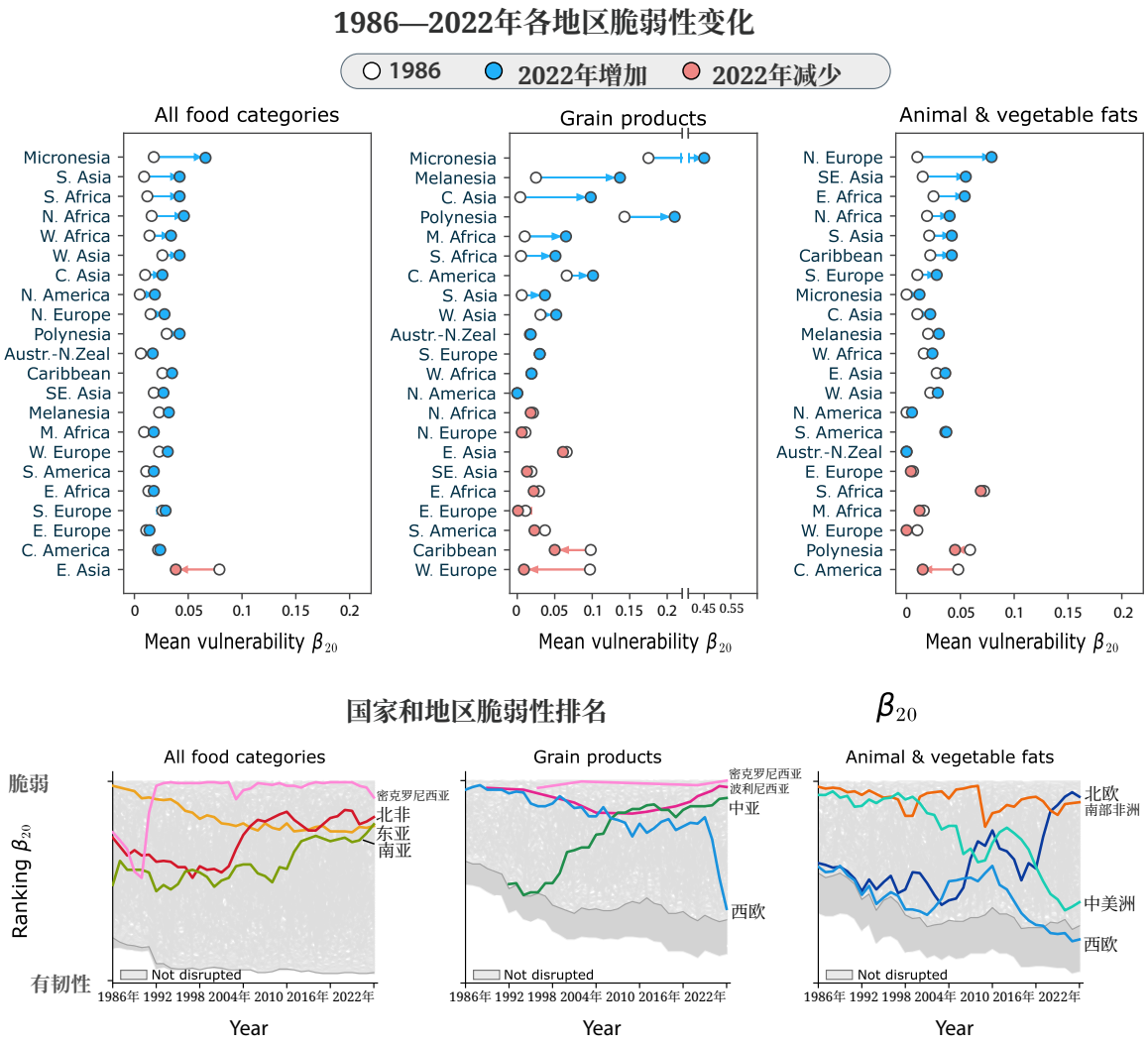

图4。所有联合国地理次区域脆弱性（β_{20}）时间演化分析。上方各图显示每个联合国次区域首个（白色）与最后一个（彩色）可用数据年份之间平均 β_{20} 的变化。大多数情况下，这两个年份分别为1986年和2022年。若缺少贸易数据，则采用首个有数据的年份：谷物类别中，中亚为1992年、密克罗尼西亚为1996年、波利尼西亚为1989年；脂肪类别中，中亚为1993年、密克罗尼西亚为1989年；所有食品类别中，中亚为1992年。箭头根据脆弱性变化方向着色，蓝色表示增加，粉色表示减少。下方各图显示1986年至2022年脆弱性排名的时间演化。灰线表示各国家的个体趋势，部分感兴趣的次区域则以彩色线条表示平均变化。深灰色区域表示未受到任何溢出级联影响的国家，因此其具有 $\beta_{20} = 0$。在两项分析中，地理次区域均采用联合国（UN）的定义，详情见补充材料第3.2节。

除了长期脆弱性变化，我们还观察到脆弱性排名中的短暂扰动。这些是脆弱性排名的快速变化，之后会回到此前的水平。我们认为，短暂变化反映了系统对特定事件的响应；这些事件扰动了贸易关系，但并非由多层网络结构中稳定的拓扑变化所致。例如，西欧在2019—2022年期间脆弱性下降，可能与新冠肺炎疫情期间以及随后俄乌战争期间全球谷物贸易减少有关 [34]。我们预计这只是暂时的脆弱性变化，但时间会告诉我们，这类危机的影响是否足以导致持续性脆弱性转变。

简而言之，在……之间 1986年至2022年，全球对生产短缺的脆弱性有所上升 .

这种增长并不均衡，既与贸易多层网络中观察到的稳定结构性转变有关，也与其他短暂效应有关。我们的分析还发现，面临冲击风险的不平等日益加剧。密克罗尼西亚、南亚和非洲大部分地区等对全球粮食安全至关重要的区域，脆弱性增幅最大；一旦发生全球生产短缺，这将显著加剧这些地区面临的风险。

3. 讨论

我们对全球粮食贸易网络时间演化的新见解揭示了异质的中心化—去中心化模式，这些模式改变了冲击传播，并导致系统脆弱性整体上升。然而，这种上升在各区域的分布并不均衡。南亚和非洲大陆的大部分地区的脆弱性不成比例地增加，而东欧、南欧和中美洲的脆弱性仅略有上升。这种脆弱性的不均衡再分配尤其令人担忧，因为它加剧了原有的不平等。此处所说的暴露度不平等，是指冲击脆弱性在各国间的分布日益不均，而这些国家吸收供应中断的能力差异显著；这并非指贸易量或经济表现本身存在差异。对于粮食可及性有限的区域，如密克罗尼西亚或非洲，尽管它们受益于国际贸易的稳定作用 [17, 35, 36], ，但这也使其面临日益加剧的溢出级联脆弱性；一旦发生冲击，其处境将会大幅恶化 [10, 17, 31, 37, 38]。从政策制定角度看，缓解这一额外风险颇具挑战，因为各国往往缺乏足够的基础设施，无法维持保护自身免受粮食短缺影响所需的库存。然而，粮食储存已被证明是一种有效的干预措施。例如，印度将储备谷物纳入其国家粮食安全战略。这些库存可满足约14%的谷物需求 [29], ，这与我们的脆弱性估计相符。南亚的脆弱性在1986年至2022年间有所上升，但储备相当于国内需求14%的谷物，可使印度免受目前令其易受影响的冲击中50%以上的冲击（$\beta_{20} = 0.037$，$\beta_{50} = 0.046$针对谷物产品）。了解各国面临的全球系统性脆弱性，对于增强应对系统性风险的适应能力至关重要；这类风险可能源自气候极端事件、地缘政治紧张局势、市场波动或其他危机。多层网络在粮食贸易研究中的应用仍相对有限 [10, 23]，但我们的结果表明，忽视产品异质性可能会掩盖结构迥异的脆弱性格局，并导致对系统韧性得出误导性结论。

尽管我们的框架捕捉了全球粮食贸易的关键结构和动态特征，但仍需承认其存在若干局限。首先，冲击传播模型侧重于短期危机应对，假设国家主要通过实施出口限制来应对产量短缺，而未考虑建立新的贸易联系、内生需求调整或长期生产响应。这一设计选择反映了许多粮食危机的发展时间尺度，但也意味着，我们的模拟应被视为对系统性风险暴露的一阶压力测试，而非对实际短缺的预测。其次，为确保数十年来数据的完整性和政策相关性，我们将食品产品归并为宽泛的 FoodEx2 类别；尽管这可能掩盖类别内部的异质性，但我们的结果表明，对于积极交易的产品，更精细的分类很可能会强化而非削弱我们所识别的中心化模式。第三，国家粮食库存数据的报告有限且不均衡，因而无法对动态库存消耗进行明确建模，我们因此用抽象的容忍参数来表示缓冲能力。尽管存在这些局限，跨时间、食品类别和区域的相对比较仍然稳健，使我们能够剖析贸易网络的结构性变化如何重塑了粮食供应冲击下脆弱性的地理分布。

4. 方法论

4.1. 数据获取和预处理

我们依据联合国粮食及农业组织（FAO） [39]提供的贸易和生产数据。这些数据的形式为1986年至2023年间220个国家、559种农作物和畜产品的标准化年度双边贸易流量矩阵和生产记录。

另一方面，生产数据集仅以产品重量（吨）报告。此外，它仅适用于贸易产品中较小的一个子集。因此，在本研究中，我们仅考虑了215

种在1986年至2022年之间所有年份中两个数据集均可用的产品。

双边贸易流矩阵整合了进口和出口记录。因此，同一贸易流通常会被卖方和买方各报告一次。我们发现，60%的记录存在重复报告；在所有商品、国家和年份中，报告金额的相对差异（绝对值）均值为61%。我们采用报告可靠性最高的国家提供的交易报告来解决这一问题。报告可靠性按商品和年份分别衡量，采用基于数据的方法，并根据 Gehlhar 等人 [40]的方法改编。

其他预处理步骤包括：

- 删除原产国和目的国相同的所有记录，因为这些记录涉及“特殊商品”的国内贸易。
- 删除以“头”或“数量”为单位报告的畜产品记录（约占数据的1%）。
- 删除稻谷类别，因为它是一个汇总类别，合并了其他稻米产品的记录。
- 将所有贸易流表示为出口关系。
- 从食品生产中剔除不适合人类食用的副产品（例如干草或皮革）。

最终，我们得到了一份经过协调的贸易矩阵，其中所有贸易流均反映某种产品的出口总量 t 在两个国家之间某一特定年份的情况，涵盖体积（吨）和经济价值（1000 美元）两个方面。

国内生产总值

我们从联合国粮食及农业组织的宏观指标数据库 [41] 中提取了以美元计价的年度国内生产总值（GDP）数据。该数据库的内容基于各国通过年度国民账户问卷 [41] 报告的官方国民账户数据。对于联合国粮食及农业组织贸易数据中涵盖的202个国家，该数据库提供了其中194个国家的完整时间序列；另有7个国家的数据时间序列不完整，我们通过线性插补进行了重建，详见补充材料第3.1节。我们还将比利时和卢森堡在1986年至1999年的国内生产总值相加，估算了“比利时-卢森堡”（ISO 三字母代码：F15）的国内生产总值。

最终，我们使用了一个包含215种产品和202个国家的子集，这些国家和产品在1986年至2022年的所有年份均有完整的贸易、生产和国内生产总值记录。纳入考量的国家和产品完整清单见补充材料第3.2至3.3节。

食品组聚合

我们使用 FoodEx2 暴露层级数据库，将 FAO 数据库中的单项食品产品聚合为更具代表性的食品类别 [42]。FoodEx2 是欧洲食品安全局（EFSA）开发的食品分类与描述系统，用于膳食暴露计算 [43]。该分类系统提供 7 个不同的层级聚合级别，可将单项食品产品归入颗粒度逐渐细化的组和子组。我们手动将 FAOSTAT 数据库中的每种产品映射到 FoodEx2 最高层级（L1）中的一个类别。随后，对于每一对贸易国家，我们将该食品类别下所有交易的规模相加，计算其贸易总额。生产数据也采用类似方式进行聚合。我们的数据集包含 L1 层级 20 个类别中 12 个类别的样本，分布情况如补充表 S2 所示。

4.2. 食品贸易多层网络

多层网络 $M = (\mathcal{N}, \mathcal{E}, \mathcal{L})$ 是网络形式体系的一种扩展，使我们能够将连接同一组节点 $\mathcal{N} = \{n_i$ 的 L 网络表示为单一结构 [44, 45] 中的不同层 $i \in \{1, ..., N\}\}$。在多层网络形式体系中，边的集合 $\mathcal{E} = \{(n_i^l n_j^{l'}) : i, j \in \mathcal{N} \wedge l, l' \in \mathcal{L}\}$ 可分为两类：层内边，表示同一层中节点之间的连接（$l = l'$）；以及层间边，即层与层之间的耦合链接（$l \neq l'$）。这样，我们便可以同时研究各层内部节点的影响及其在整个系统中的重要性。

在我们的分析中，我们使用联合国粮食及农业组织提供的预处理贸易数据，构建了食品贸易系统的年度多层网络表示。食品贸易多层网络 $F^y = (\mathcal{N}^y,\ \mathcal{E}^y,\ \mathcal{L})$ 的每个版本都包含相同的层集合$L = 12$，对应 FoodEx2 分类中的 12 个食品类别（见第 4.1 节）。不过，节点集合$\mathcal{N}^y$ 和边集合 $\mathcal{E}^y$ 会有所不同，以反映年份 y 的国家及其贸易关系。多层网络的每一层都是一个有向加权贸易网络 W_f^y，其中节点表示年份 y 存在的国家，边表示该年度该食品类别 f 的出口关系，权重为交易额。此外，我们还添加了无权重的层间连接，以连接不同层中代表同一国家的节点。

对于每一年，我们都构建了两个版本的食品贸易多层网络：一个以贸易体积（吨）为层内边赋权，另一个以经济价值（1000 美元）赋权。经济价值加权的多层网络用于第 2.1 节的拓扑分析，而体积加权的多层网络则用于冲击传播模拟（第 2.2 和 2.3 节）。

请注意，在多层网络形式体系中，同一年各层的节点集合 $\mathcal{N}^y$ （国家）是恒定的。因此，未参与特定食品类别贸易的国家在相应层中表示为孤立节点。然而，在比较不同年份的多层网络时，国家数量可能有所不同。这反映了全球政治格局变化所导致的国家建立或消亡。为简单起见，我们将每个国家视为独立实体。因此，尽管南苏丹于 2011 年从苏丹分离出去，我们仍将它们视为多层网络中的独立节点：“前苏丹”（1986年—2010年）、“苏丹”（2011年—2022年）和“南苏丹”（2011年—2022年）。

4.3. 平面 $Z(o_i) - P_i$

在有向多层网络中，加权重叠度（o_i）定义为节点 i 在所有层 [26]上所有向外连接的边（$o_{\mathrm{out}_i} = \sum_i w^l_{i,j}$）或向内连接的边（$o_{\mathrm{in}_i} = \sum_j w^l_{i,j}$）的重量之和。因此，它可以衡量一个国家作为全球出口国（o_{out}）或进口国（o_{in}）在所有食品贸易中的重要性。由于加权重叠度对贸易总量十分敏感，我们使用其 Z 分数来比较不同年份的多层网络。其定义如下：

$$Z(o_i) = \frac{o_i - \langle o_i \rangle}{\sigma_{o_i}}. \tag{1}$$

其中，$\langle o_i \rangle$ 和 σ_o 分别是 o_i 的均值和标准差。

另一方面，多层网络参与系数（P）定义为

$$P_i = \frac{L}{L-1} \cdot \left(1 - \sum_{l=1}^{L} \left(\frac{\sum_j w^l_{i,j}}{o_i} \right)^2 \right) \tag{2}$$

它使我们能够估算一个国家的贸易总量是集中在单一层 $P = 0$，还是均匀分布于所有层 $P = 1$ [26]。

Battiston 等人 [26] 提出使用这两个指标来定义一个包含 6 个区域（A1-A6）的空间平面，以反映节点（即我们的国家）在多层网络中可能承担的不同“角色”。在我们的情形中，可以将这些区域解释如下：

- **多产品枢纽（A6）：** 全球贸易的主要参与者，即贸易总量大、参与多种食品类别的国家， $Z(o_i) \geq 2$ 和 $P_i \geq 0.66$。
- **混合枢纽（A5）：** 贸易总量大，但参与的食品类别数量适中的国家， $Z(o_i) \geq 2$ 和 $0.33 < P_i < 0.66$。
- **局部化枢纽（A4）：** 贸易总量大、专注于少数几种食品类别的国家， $Z(o_i) \geq 2$和 $P_i \leq 0.33$。
- **多产品节点（A3）：** 贸易量较低，但参与多种食品类别的国家， $Z(o_i) \leq 2$ 和 $P_i \geq 0.66$。
- **混合节点（A2）：** 贸易量较低、适度参与多个食品类别的国家， $Z(o_i) \leq 2$ 和 $0.33 < P_i < 0.66$。

- **局部节点（A1）：** 贸易量较低、专注于少数食品类别的国家，$Z(o_i) \leq 2$和 $P_i \leq 0.33$。

4.4. 模拟生产冲击

为评估粮食贸易系统的稳健性，我们量化了所有可能影响该系统的生产短缺所引发的溢出级联规模。也就是说，对于每一年和每种食品类别，我们都量化了从其中每个全球生产国分别发生短缺后引发的溢出级联。我们模拟了一次初始冲击，在时间$t = 1$ 完全消除受影响国家（c_s）的生产（$s = 1$），之后生产恢复正常水平。补充材料第2.5节还提供了使用部分冲击（$s = 0.3$）进行的额外模拟。

鉴于模型的随机性，我们针对每次单一国家冲击进行了20次独立重复实验。每次模拟运行了 $T = 50$ 个时间步，这足以确保所有情况下溢出效应都完全消退。

4.5. 冲击传播模型

我们的模型模拟生产短缺发生后的即时影响，此时各国尚未来得及发展新的贸易伙伴或调整生产，只能依靠出口禁令来缓解供应短缺。因此，假设模拟在年内尺度（$t = 1$，2、.....、T）上运行，此时 F^y的结构、需求和生产均保持不变。

在这些条件下，没有面临产品短缺的国家将维持均衡需求，其定义如下

$$d^y_{c_i,f}(t) = \mathrm{prod}_{c_i,f}(t) + \mathrm{imp}_{c_i,f}(t) - \mathrm{exp}_{c_i,f}(t), \tag{3}$$

其中，$\mathrm{prod}_{c_i,f}(t)$、$\mathrm{imp}_{c_i,f}(t)$ 和 $\mathrm{exp}_{c_i,f}(t)$ 分别表示国家 c_i 在模拟时间 t [46]生产、进口和出口的 f 食品类别产品吨数。这些数据可从食品贸易多层网络F^y 和生产数据中提取，方法如下

$$\mathrm{exp}^y_{c_i,f}(t) = \sum_{j=1}^{N} W_{c_i,c_j,f}(t), \tag{4}$$

$$\mathrm{imp}^y_{c_i,f}(t) = \sum_{j=1}^{N} W_{c_j,c_i,f}(t), \tag{5}$$

$$\mathrm{prod}^y_{c_i,f}(t) = \mathrm{P}^y_{c_i,f}, \tag{6}$$

其中，$W^y_{c_i,c_j,f}$是食品贸易多层网络 F^y中第 f层的加权邻接矩阵，而$P^y_{c_i,f}$是国家 c_i 在年份 y的 f 食品类别总产量。需要注意的是，由于我们预先假定生产量恒定，$\mathrm{P}^y_{c_i,f}$ 不依赖于 t ；而 W^y 的重量（即贸易产品吨数）可在时间尺度t上变化，以适应冲击传播。

由于我们的模型还假设总需求在模拟时间尺度内无法改变，因此我们可以将未受扰动情景下的均衡需求视为常数$\delta^y_{c_i,f}$。该常数可直接根据贸易数据估算，方法如下

$$\delta^y_{c_i,f} = P^y_{c_i,f} + \sum_{j=1}^{N} W_{c_j,c_i,f} - \sum_{j=1}^{N} W_{c_i,c_j,f}. \tag{7}$$

根据定义，需求必须为正。因此，我们修正了少数经验估计为$\delta^y_{c_i,f} < 0$ 的情况：增加生产，直到 $\delta^y_{c_i,f} = 0$。这项修正仅影响了所评估样本的 1.2%。

定义未受扰动情景下系统的状态（$t = 0$）后，我们在 $t = 1$ 对生产施加外生冲击。该冲击包括将任意国家 c_s 的生产降低一定比例 s

$$\mathrm{prod}^{f}_{c_s}(t=1) = (1-s)\cdot \mathrm{prod}^{y}_{c_s,f}(t=0). \tag{8}$$

该冲击将打破均衡需求平衡（$d_{c_s,\ f}(t\ =\ 1) \neq\ \delta_{c_s,\ f}$），在国家 c_s 造成需求缺口，缺口为 $dd_{c_s,\ f}(t\ =\ 1) =\ \delta^{y}_{c_s,\ f} - d_{c_s,\ f}(t\ =\ 1)\ =\ s\cdot \mathrm{prod}^{y}_{c_s,\ f}(t\ =\ 0)$。面临 $dd > 0$ 的国家总会希望尽可能缩小其缺口。因此，它们会将部分（甚至全部）出口转用于满足国内消费。这些出口限制会导致依赖被削减出口的国家出现短缺，而这些国家随后也会采取自身的限制措施作为补偿，从而使冲击进一步沿贸易网络传播。

总体而言，该模型可形式化如下：在每个时间步 t，任意国家 c_i 都会面临需求缺口

$$dd_{c_i,f}(t) = \delta^{y}_{c_i,f} - d_{c_s,f}(t) = \delta^{y}_{c_i,f} - \mathrm{prod}_{c_i,f}(t) - \mathrm{imp}_{c_i,f}(t) + exp_{c_i,f}(t) \tag{9}$$

并采取以下补偿策略

$$\mathrm{exp}_{c_i,f}(t+1) = max\{\mathrm{exp}_{ci,f}(t) - dd_{c_i,f}(t), 0\}. \tag{10}$$

如果生产或进口没有变化，$dd_{c_i,\ f} = 0$。这意味着 $\mathrm{exp}_{c_i,\ f}(t+1)\ =\mathrm{exp}_{c_i,\ f}(t)$，从而维持此前所述的均衡需求平衡。然而，当$dd_{c_i,\ f} > 0$时，补偿策略便会启动。国家 c_i 会对其贸易伙伴实施出口禁令，直至完全弥补需求缺口（$dd_{c_i,\ f} <\ \mathrm{exp}_{c_i,\ f}$），或用尽所有可用出口（$dd_{c_i,\ f} \geq\ \mathrm{exp}_{c_i,\ f}$）。请注意，当$dd_{c_i,\ f} \geq \mathrm{exp}_{c_i,\ f}$时，补偿策略不足以完全弥补缺口，因此受影响国家仍需承受部分剩余短缺 $dd'_{c_i,\ f}$。

每个时间步都会按照一种受 Grassia 等人启发的随机传播规则实施出口禁令 [47]。在他们的表述中，Grassia 等人提出了一种与国家国内生产总值成反比的确定性传播规则，旨在模拟资源受限情景下的价格竞争动态 [47]。我们沿用其思路，将国家 c_j 受到c_i 实施的贸易禁令影响的概率定义为

$$p(c_j|c_i) = \frac{GDP_{c_j}^{-1}}{\sum_{c_h\in N_{c_i}} GDP_{c_h}^{-1}}, \tag{11}$$

其中，N_{c_i} 是来自 c_i的进口方集合，即 $N_{c_i} = \{\, c_j \ \mid\ W_{c_i,c_j,f}(t)\ > 0\}$。接着，我们通过无放回随机抽取国家 c_j，来选出哪些贸易伙伴会受到出口禁令的影响，直到满足条件 $\sum_{c_j} \mathrm{W}_{c_i,\ c_j,\ f}(t) \geq dd_{c_i,\ f}(t)$。具有较高$p_{c_i,\ c_j}$的国家更有可能先被选中，因此其供应会被耗尽；而$p_{c_i,\ c_j}$ 较低的国家通常最后才会被选中，也更有可能维持其供应。然而，如果 $dd_{c_i} > \sum_{c_j\in N_{c_i}} \mathrm{W}_{c_i,\ c_j,\ f}$，所有$N_{c_i}$ 的供应都会耗尽，而 c_i 仍将面临剩余短缺

$$dd'_{c_i,f}(t) = dd_{c_i,f}(t) - \sum_{c_h\in N_{c_i}} \mathrm{W}_{c_i,c_h}(t). \tag{12}$$

剩余短缺 $dd'_{c_i,\ f}(t)$ 是我们模拟的主要观测指标。

4.6. 中断状态

为说明剩余短缺对各国粮食安全的影响，我们定义“中断状态”$\mu_{c_i,\ c_s,\ f}$。如果模拟从 c_s 开始的溢出级联过程中，在某个时间点，某国的剩余需求缺口超过预先设定的容忍阈值$dd'_{c_i,\ f}$，则认为该国受到中断影响。这可以形式化表示为

$$\mu_{c_i,c_s,f} = \begin{cases} 1 & \text{if } \max\limits_{t\in\mathcal{T}}\ dd'_{c_i,f}(t) > b\cdot\delta^{y}_{c_i,f}, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{13}$$

其中， $\mathcal{T} = \{t\colon \{1, \ldots, 50\}\}$是模拟时间步的集合，$b \cdot \delta^{y}_{c_i,\ f}$是容忍阈值。为简化起见，我们假设该阈值是国家需求的固定比例 b （在我们的模拟中设为 $b = 0.01$ ）。容忍参数反映了一个国家缓冲暂时性供应短缺的能力（例如通过库存或其他适应机制）。因此，这一表述使我们能够区分无关紧要的剩余短缺与会显著影响国家 c_i供应的剩余短缺。

4.7. 级联规模

接下来，我们可以用受扰国家的数量来量化从 c_s开始的冲击所触发的溢出级联规模。定义如下

$$\mathrm{S}_{c_s} \ = \ 100 \cdot \frac{\sum\limits_{c_n \in \mathcal{N}^{\dagger}} \mu_{c_n, c_s f}}{N}, \tag{14}$$

其中， $\mathcal{N}^{\dagger} = \{c_n\colon \{c_1, ...c_N\}\}$是年份 y存在的国家集合， N是该年份的国家数量。简单来说， S_{c_s} 反映了在从c_s 开始的冲击被完全吸收之前，受到该冲击影响的国家所占的百分比。

4.8. 脆弱性

我们将任意国家 c_i 的脆弱性 β^{f}_{X} 定义为该国 c_i 为避免受到原本会使其受扰的 X%冲击影响而必须维持的最小容忍阈值。

根据式13可知，若国家 c_i 未受到从 c_s开始的冲击影响（$\mu_{c_i,\ c_s,\ f} = 0$），则$dd'_{c_i,\ f}\ (t,\ \ c_s) < b \cdot \delta^{y}_{c_i,\ f}\quad \forall t \in \mathcal{T}$。此处我们改变了符号表示法，以明确指出剩余短缺对冲击起始国家的依赖关系。由此， c_i抵御从 c_s 开始的冲击所需的最小容忍阈值可定义为

$$b^{\min}_{c_i,f}(c_s) = \frac{\max\limits_{t \in \mathcal{T}} dd'_{c_i,f}(t, c_s)}{\delta^{y}_{c_i,f}}. \tag{15}$$

通过估算 $b^{\min}_{c_i\ f,}\ (c_s)$ 对所有扰乱 c_i的外部冲击进行分析，即 $S_{c_i} = \{c_s \neq c_i\colon \mu_{c_i,\ c_s,\ f} = 1\}$，我们可以提取各国家最低容忍度的分布。该分布可通过其累积分布函数 $G_{c_i,\ f} = \mathbf{Pr}[b^{\min}_{c_i,f} < x]$ 来表征。累积分布函数描述了最小容忍阈值大于特定值 x 的可能性。因此，我们可以利用其逆函数，找出克服导致某个国家失效的 X% 冲击所需的$b^{\min}_{c_i\ ,\ f}$。这就是我们对脆弱性的估计 β_X。

请注意，在对单国冲击进行多次重复实验时，我们通过计算具有相同 c_s 的各次重复实验中的平均 $b^{\min}_{c_i\ f,}\ (c_s)$，来估计$b^{\min}_{c_i\ ,\ f}(c_s)$ 的分布。

---

[1] McQuinn, K., O'Toole, C., Disch, W., Shiel, E. & Kenny, E. 季度经济评论，2022年冬季。技术报告，ESRI预测系列（2022年）。[2] Pingali, P., Alinovi, L. & Sutton. 复杂紧急情况下的粮食安全：增强粮食系统韧性。《灾害》**29**, S5–S24（2005年）。[3] Nes, K., Schaefer, K. A. & Yu, J. 印度对非巴斯马蒂大米出口的禁令的经济影响。*Food Policy* **134**, 102893 2025( )。[4] Falkendal, T. 等新冠肺炎疫情期间的谷物出口限制可能使许多低收入和中等收入国家面临粮食不安全风险。《自然·食品》**2**, 11–14（2021年）。网址：https://doi.org/10.1038/s43016-020-00211-7。[5] Gribble, S. D. 复杂系统中的稳健性。载于第八届操作系统热点问题研讨会论文集，21–26（IEEE，2001年）。[6] Bullock, J. M. 等韧性与粮食安全：重新思考一个生态学概念。《生态学杂志》**105**, 880–884（2017年）。

[7] Carr, J. A., D'Odorico, P., Suweis, S. & Seekell, D. 全球粮食系统中的哪些商品和国家会影响不平等? Environmental Research Letters 11, 095013 (2016). [8] Sartori, M. & Schiavo, S. 携手共进：贸易与全球粮食安全的网络视角。Food Policy 57, 114–127 (2015). [9] Yin, Z. 等。全球主要谷物贸易格局的时空演变。Journal of Integrative Agriculture 23, 1075–1086 (2024). [10] Torreggiani, S., Mangioni, G., Puma, M. J. & Fagiolo, G. 识别粮食贸易国际多重网络的社群结构。Environmental Research Letters 13, 054026 (2018). [11] Hu, W. 等。从比较视角考察粮食贸易网络的演变：对中国、美国、俄罗斯、欧盟和非洲国家的分析。Foods 13, 2897 (2024). [12] Wang, X., Ma, L., Yan, S., Chen, X. & Growe, A. 以贸易保障粮食安全：全球农业贸易网络的稳定性。Foods 12, 271 (2023). [13] Karakoc, D. B. & Konar, M. 全球粮食贸易中效率与韧性权衡的复杂网络框架。Environmental Research Letters 16, 105003 (2021). [14] Jafari, Y., Engemann, H. & Zimmermann, A. 农业贸易网络中韧性的多个维度。Q Open 4, qoae024 (2024). [15] Ma, J., Li, M. & Li, H.-J. 国际小麦贸易网络的稳健性。IEEE Transactions on Network Science and Engineering 11, 14–23 (2023). [16] Swinnen, J. & McDermott, J. 新冠肺炎与全球粮食安全。EuroChoices 19, 26–33 (2020). [17] Puma, M. J., Bose, S., Chon, S. Y. & Cook, B. I. 评估全球粮食系统不断演变的脆弱性。Environmental Research Letters 10, 024007 (2015). [18] Laber, M., Klimek, P., Bruckner, M., Yang, L. & Thurner, S. 俄乌冲突引发的冲击在国际多层粮食生产网络中的传播决定了全球粮食可获得性。Nature Food 4, 508–517 (2023). [19] Bertassello, L., Winters, P. & Müller, M. F. 全球小麦储备的获取决定国家层面对冲突导致的乌克兰小麦供应中断的脆弱性。Nature Food 4, 673–676 (2023). [20] Kuhla, K., Puma, M. J. & Otto, C. 国际合作是俄罗斯入侵乌克兰后稳定小麦价格的关键。Communications Earth & Environment 5, 481 (2024). [21] Akter, S. 粮食出口限制对出口国国内经济的影响：综述。Global Food Security 35, 100657 (2022). [22] Headey, D. & Ruel, M. 中低收入国家的粮食通胀与儿童营养不良。Nature Communications 14, 5761 (2023). [23] Baum, S. 等。全球粮食生产与贸易多层网络中的自适应冲击补偿。arXiv 预印本 arXiv:2411.03502 (2024). [24] Nes, K., Schaefer, K. A., Gammans, M. & Scheitrum, D. P. 极端天气事件、气候预期与农产品出口动态。American Journal of Agricultural Economics 107, 826–845 (2025). [25] FAO, C. J., Commission, W. F. S. P. C. A. 等。食品和动物饲料的食品法典分类，第2卷（食品法典，罗马，1993）。[26] Battiston, F., Nicosia, V. & Latora, V. 多层网络的结构测度。Physical Review E 89, 032804 (2014). [27] Goltsev, A. V., Dorogovtsev, S. N., Oliveira, J. G. & Mendes, J. F. 复杂网络中的疾病局域化与传播。Physical Review Letters 109, 128702 (2012). [28] Meijaard, E. 等。探索植物油的未来：油料作物影响——脂肪、森林、预测与未来（世界自然保护联盟，2024）。[29] Singh, S. K. & Richards, K. 谷物与饲料年度报告。GAIN报告 IN2025-0023，美国农业部海外农业局，新德里，印度（2025）。由新德里农业事务办公室编写。[30] Dodge, Y. 移动平均，360–362（Springer New York，纽约，NY，2008）。[31] Fanzo, J. 等。粮食安全与粮食系统的全球与地方视角。Communications Earth & Environment 5, 227 (2024). [32] Gunstone, F. D. 植物油的生产与贸易。《食品技术中的植物油：组成、性质与用途》第2版，1–24（2011）。[33] Furumo, P. R. & Aide, T. M. 拉丁美洲商业油棕扩张的特征：土地利用变化与贸易。Environmental Research Letters 12, 024008 (2017). [34] Guerrero, M. 欧盟谷物与饲料秋季更新。GAIN报告 IN2025-0023，美国农业部海外农业局，马德里，西班牙（2022）。[35] Trade, U. 等。《2024年非洲经济发展报告：释放非洲贸易潜力：促进区域市场并降低风险》（联合国，2025）。[36] Sgarbi, F. & Nadeu, E. 粮食系统研究中的韧性与可持续性：主要问题和知识空白综述。研究简报，欧洲环境政策研究所（IEEP），布鲁塞尔，比利时（2023）。欧洲可持续农业对话（ESAD）；由欧盟 LIFE 计划资助。[37] Mary, S. 渴望自由贸易？发展中国家的粮食贸易与极端饥饿。Food Security 11, 461–477 (2019).

[38] Meng, B., Yang, Q., Mehrabi, Z. & Wang, S. 作物多样性带来的稳定效应对大国的益处大于对小国的益处。《自然·食品》**5**, 491–498 (2024年)。[39] FAOSTAT详细贸易矩阵（2024年）。网址：https://www.fao.org/faostat/en/#data/TM。数据下载于2025年9月25日。[40] Gehlhar, M. 为用于GTAP而协调双边贸易数据。技术报告，GTAP技术论文（1996年）。[41] FAOSTAT宏观指标（2025年）。网址：https://www.fao.org/faostat/en/#data/MK。数据下载于2025年9月25日。[42] Marchand, P. 等。储备与贸易共同决定对粮食供应冲击的暴露程度。*Environmental Research Letters* **11**, 095009 (2016年)。[43] (EFSA), E. F. S. A. 食品分类与描述系统FoodEx 2（第2次修订版）。技术报告，Wiley在线图书馆（2015年）。[44] Cozzo, E., De Arruda, G. F., Rodrigues, F. A. & Moreno, Y. 多层网络：基本形式体系与结构性质，第2卷（Springer, 2018年）。[45] Aleta, A. & Moreno, Y. 多层网络简述。《凝聚态物理年度评论》**10**, 45–62 (2019年)。[46] Burkholz, R. & Schweitzer, F. 国际作物贸易网络：冲击与级联效应的影响。*Environmental research letters* **14**, 114013 (2019年)。[47] Grassia, M., Mangioni, G., Schiavo, S. & Traverso, S. 基于网络的模拟揭示各国对食品贸易冲击的暴露程度与脆弱性。《科学报告》**12**, 4644 (2022年)。

利益冲突声明

所有作者均声明不存在利益冲突。

作者贡献

概念构思：A.F.、A.A.、R.C. 和 Y.M.；方法论：A.F.、A.A.、R.C. 和 Y.M.；调查研究：A.F.、A.A.、R.C. 和 Y.M.；写作——初稿：A.F.、A.A.、R.C. 和 Y.M.；写作——审阅与编辑：A.F.、A.A.、R.C. 和 Y.M.；正式分析与验证：A.F.、A.A.、R.C. 和 Y.M.；软件：A.F.。所有作者均已阅读、编辑并批准最终稿件。

资助

A.F.、A.A. 和 Y.M. 获得了阿拉贡政府（西班牙）的部分资助，以及通过 E36-23R（FENOL）资助项目获得的“欧洲区域发展基金：建设欧洲的一种方式”资助；同时还获得科学、创新与大学部和西班牙研究署（MICIU/AEI/10.13039/501100011033）项目编号 PID2023-149409NB-I00 的资助。A.A. 感谢由 MICIU/AEI/10.13039/501100011033 和欧盟下一代复苏计划/复苏、转型与韧性计划资助的 RYC2021-033226-I 项目提供的支持。

数据可用性

本研究使用的所有数据均可从以下来源公开获取。标准化的年度双边贸易流量矩阵、生产记录和国内生产总值数据均提取自 FAOSTAT [39, 41]。食品层级分类提取自 FoodEx2 数据库 [25]。

代码可用性

代码可在此代码库中获取：https://github.com/AFosch/food_trade_shocks .