arXiv:2303.00919v1 [physics.soc-ph] 2 Mar 2023

农产品进口冲击的时空特征

Yin-Ting Zhang[a,b], Duc Khuong Nguyen[c,d],Wei-Xing Zhou[a,b,e,*]

[a]商学院，华东理工大学，中国上海*200237*[b]经济物理研究中心，华东理工大学，中国上海*200237*[c]*IPAG*商学院，法国巴黎[d]国际学院，越南国家大学，越南河内[e]数学学院，华东理工大学，中国上海 *200237*

摘要

确保粮食供应稳定是各经济体粮食安全的关键；对于食品生产不足的经济体而言，粮食进口对于保障粮食供应日益重要。粮食进口冲击会对目标经济体产生显著影响。本文利用1986年至2018年四种主粮作物（玉米、水稻、大豆和小麦）的进口贸易数据，识别了1995–2018年期间经济体遭受的粮食进口贸易冲击。我们比较了不同作物进口冲击的时间演变和空间分布，并基于局部加权多项式回归和Cook距离，分析了各大洲的冲击强度和冲击恢复情况。结果显示，2007/2008年粮食危机期间冲击频率较高，北美洲、非洲和亚洲的冲击频率也相对较高。同时，冲击恢复存在区域差异，亚洲的大多数冲击都能在短期内恢复。我们还发现，较高的进口多样性和较低的进口依赖率能够缓冲经济体所遭受的进口冲击，从而带来较低的冲击率和较高的恢复率。这些结果有助于我们理解粮食的外部供应风险，并强调粮食安全中的可及性问题。

关键词：经济物理学；农产品进口；冲击识别；恢复；粮食安全 经济学文献分类：C1、P4、Z13

1. 引言

粮食安全一直受到世界各经济体的高度重视，并再次被提上议程首位 [1]。2020年，COVID-19疫情不仅对全球经济产生了负面影响 [2, 3], ，还因破坏粮食供应链而导致全球饥饿人口增加[4]。在此前连续五年保持稳定后，营养不足发生率仅用一年便从8.4%上升至9.9%，使2030年消除饥饿的目标更加难以实现[1]。近期发布的《2022年全球粮食危机报告》警告称，有1.93亿人正面临严重粮食不安全问题，而且这一问题仍在不断恶化[2]。COVID-19疫情再次明确提醒我们，已经取得的粮食安全进展只是暂时性的成功。粮食可获得性是粮食安全的一项关键指标。过去几十年，全球粮食可获得性发生了巨大变化 [5]。冲突 [6], 、气候变率和气候极端事件 [7], ，以及经济放缓和经济衰退，使食品生产越来越难以满足不断增长的人口需求。此外，一些地区还存在大量食物浪费 [8, 9], ，导致粮食供应不足以满足当地需求。粮食既由当地农场生产，也通过贸易等互动网络从孤立市场中获得 [10]。

*通讯作者。电子邮箱地址：wxzhou@ecust.edu.cn (Wei-Xing Zhou)[1]《世界粮食安全和营养状况》（2021年），网址：https://www.fao.org。访问日期：2022年6月21日。[2]饥饿热点——联合国粮食及农业组织—世界粮食计划署关于严重粮食不安全的预警（2022年），网址：https://www.fao.org/3/cc0364en/cc0364en.pdf。访问日期：2022年6月21日。

食品包装技术的发展和运输成本的降低，通过粮食贸易提高了全球粮食分配的效率。粮食进口在国内供应遭受不利冲击时，对于弥补国内市场供应发挥着重要作用 [11]。一些经济体无法通过本地生产满足人们的粮食需求，需要通过粮食进口来实现粮食自给 [12]。目前，至少有34个经济体由于缺乏水土资源而无法生产充足的粮食，导致部分人口依赖进口粮食来避免饥饿。阿富汗、中非共和国、刚果民主共和国、吉布提和埃塞俄比亚等经济体长期以来一直因国内粮食生产不足而面临粮食危机[3]。这些经济体只能依靠粮食进口和国际粮食援助来满足基本粮食消费。一旦粮食进口受阻，它们将面临巨大的粮食供应危机。2022年俄罗斯与乌克兰之间的冲突，以及对俄罗斯出口的限制，造成了粮食供应链中断，将对粮食安全产生重大影响。俄罗斯和乌克兰在全球粮食生产和供应中发挥着重要作用。目前，约有50个经济体依赖从俄罗斯和乌克兰进口粮食，以确保其小麦供应的30%或以上，其中大多数是北非、亚洲和近东地区的最不发达经济体或低收入缺粮国[4]。对于这些经济体而言，粮食安全形势尤其严峻。因此，粮食进口贸易对于保障粮食供应的重要性日益上升，既是长期粮食供应的来源[5, 13], ，也是应对气候变化造成的短期粮食短缺的紧急补充 [14]。

国际粮食进出口贸易通过连接粮食盈余经济体和粮食短缺经济体 [14], ，提高粮食可获得性，并增强粮食系统的稳定性。另一方面，粮食短缺和价格上涨的风险会通过国际粮食贸易网络传播，从而加剧粮食不安全[5]。经济体之间的贸易联系越紧密，冲击传染的范围就越广 [15]。高度依赖进口的经济体尤其容易受到出口经济体的影响 [16]。出口经济体生产不足时会减少或限制出口，而全球粮食价格上涨进一步加剧了粮食危机 [17], ，影响进口经济体的粮食进口，并导致各经济体的粮食供应发生变化。我们将进口贸易量异常值视为进口贸易冲击，其数值显著低于正常水平。当经济体大幅减少粮食进口时，保障粮食安全的压力也随之增加。因此，识别粮食进口贸易中断或冲击，并量化粮食外部供应安全，有助于从粮食可获得性的角度探讨全球粮食安全问题。

由于2007—08年和2010—11年粮食价格大幅上涨，以及2010—11年的阿拉伯之春，越来越多的学者开始关注贸易在全球粮食系统中发挥的作用。人们更加关注国际粮食市场中价格风险的传导机制 [18], 、局部冲击沿粮食供应链产生的级联效应 [19], ，以及粮食贸易网络中关键节点受阻如何增加粮食贸易体系的脆弱性 [15, 20]。粮食进口贸易受到冲击，可能会限制外部粮食获取。

本研究刻画了国际粮食进口贸易冲击的时空特征。我们选取为人类提供大部分热量需求的四种作物（玉米、水稻、大豆和小麦），利用1986年至2018年的粮食贸易量数据构建国际粮食贸易网络。我们通过识别时间序列自相关结构中的异常值来检测冲击。为识别异常值，我们使用局部加权多项式回归（LOWESS）拟合粮食进口时间序列。我们将异常值与平均值之差定义为冲击幅度（强度），并将冲击恢复定义为粮食贸易量从冲击前平均值恢复至95%水平所需的过程。具体而言，本文考察不同作物的进口贸易，并比较单一食品进口贸易与四种食品汇总而成的粮食进口总贸易。通过上述研究，本文旨在探讨以下问题：1）粮食进口贸易冲击是否存在时空差异？2）四种粮食进口贸易冲击之间是否存在差异？3）与作物进口总量贸易网络中的冲击相比，单一作物进口贸易网络中的冲击是否具有独特特征？为此，我们还尝试分析导致冲击频率（某种粮食的冲击频率定义为当年经历冲击的经济体数量与参与粮食进口贸易的经济体数量之比）和恢复时间出现时空差异的因素。

[3]《最依赖他国粮食供应的国家（2017）》，网址：https://www.worldatlas.com/articles/the-countries-importing-the-most-food-in-the-world.html。访问于2022年11月29日。[4]《基于俄乌冲突的全球粮食安全新情景》（联合国粮食及农业组织），网址：https://www.fao.org/ director-general/news/news-article/zh/c/1476506/。访问于2022年6月21日。[5]《美国农业部水果和蔬菜试点计划评估：提交国会的报告》（2003年），网址：https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=43277。访问于2022年11月29日。

当然，这只是非常基础的探讨。未来还需要引入更多变量和方法，深入研究其内在因果关系。

本文首先分析经济体的粮食可获得性，并通过检验粮食进口贸易的异常值，识别外部粮食供应所受的进口冲击。同时，本文计算冲击幅度和恢复时间，以衡量粮食进口冲击的强度及粮食供应的可持续性。粮食安全评估是一项多维度的综合工作 [21]。本文的研究难免有所局限，但仍有助于我们更好地理解全球粮食安全。本文其余部分安排如下。第2 节介绍数据来源及所采用的方法。第3 节呈现粮食进口贸易冲击的识别结果，包括四种作物进口冲击的空间演变、冲击恢复和恢复时间的区域差异，以及单一粮食进口贸易冲击与粮食进口总贸易冲击的比较。第4 节总结研究结果，并探讨粮食进口贸易冲击在时间和空间上存在差异的原因。

2. 数据与方法

2.1. 数据描述

玉米、水稻、大豆和小麦是世界上最重要的四种作物，满足了全球绝大多数人口的能量和营养需求 [22]。为刻画国际粮食贸易结构的演变并识别经济体之间的贸易冲击，本文利用从联合国粮食及农业组织（FAO）获取的数据，构建了1986年至2018年的四个时序国际粮食贸易网络。鉴于各经济体报告的进口和出口数据存在差异，本文采用进口贸易量作为统计标准，以提高数据的准确性和一致性。考虑到部分小型经济体的数据缺失，本文使用出口经济体报告的出口数据补充数据，以确保数据的完整性。每个经济体i 都是国际粮食贸易网络中的一个节点，连边权重w_{ij} 表示从经济体i 流向经济体j的贸易流。

图1 展示了1986年至2018年各粮食贸易网络及汇总粮食贸易网络总权重的演变。深色箭头和浅色箭头分别表示波峰和波谷。如图 1所示，1986年至2018年，各类作物的贸易总量总体呈上升趋势。不同国际粮食贸易网络的演变呈现出不同特征。小麦的贸易总量始终最大，而水稻的贸易总量始终显著低于其他三种作物。大豆的贸易总量变化趋势最为明显。总体而言，国际粮食贸易网络规模不断扩大，各经济体间的粮食贸易总量有所增加。我们注意到，某些年份的权重显著下降，但这不足以说明粮食贸易经历了冲击。因此，我们采用基于异常值检测的定量方法来识别冲击。

2.2. 粮食进口冲击检测

有许多方法可用于检测国际食品进口贸易中的冲击。通过识别时间序列异常值进行定量分析的方法，已用于检测食品生产和贸易中的冲击。本文基于 Cottrell 等人 [23], 提出的方法，将冲击定义为时间序列自相关结构的突变。冲击可通过发生频率、强度以及恢复所需时间来描述。在识别粮食贸易冲击时，某经济体 i 的每种食品（食品 =玉米、水稻、大豆和小麦）年度进口供应量s_i^{in}，食品(t)包含 33 年的观测值。为简化起见，我们可以省略下标食品 和上标，并使用$Imp(t)$表示某经济体在t年的粮食进口贸易，其中$t = \{1986, 1987, ..., 2018\}$，序列长度为$N_{\text{Origin}} = 2018 - 1986 + 1 = 33$。

对于每个经济体i，我们使用一种称为局部加权多项式回归（LOWESS）的方法来去除$Imp(t)$的时间趋势：

$$Imp(t) = g(t) + \varepsilon_t, \tag{1}$$

其中，g 是$Imp(t)$的多项式平滑函数，ε_t 是残差。令 $\hat{}s_t$ 为$g(t)$的估计值，采用加权最小二乘法，其中对于（t, $Imp(t)$），当t 接近t_k（k = 1、2、3.....n，且n 为点的数量）时，权重较大

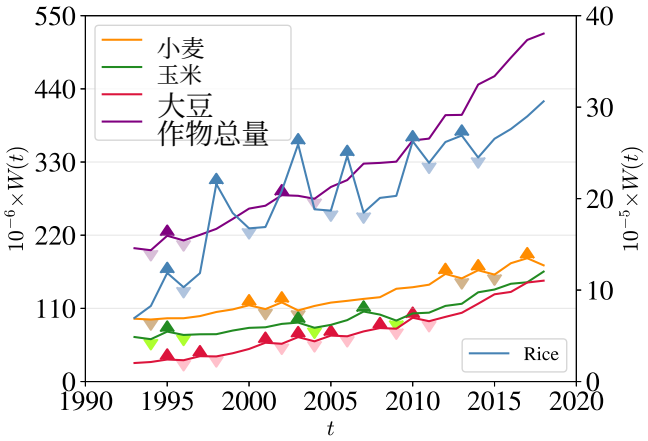


图1：总连接权重W，单位为吨。左侧坐标对应小麦、玉米、大豆以及四种作物的总量，右侧坐标对应水稻。

而当其不接近时，权重较小。现在我们给出平滑过程的具体细节。我们将构造一个M加权函数，该函数随非负t的增加而递减，用于计算每个t_k对应的权重$m_k(t)$。权重函数通常设为三次函数，即定义为：

$$M(x)=\begin{cases}\left(1-|x|^3\right)^3, & |x|<1\\ 0, & |x|\geq 1\end{cases}. \tag{2}$$

将分数系数设为$f\in(0,1]$,我们对fn进行四舍五入，以获得数据宽度$r=[fn]$。我们将M以$Imp(t)$为中心进行缩放，使其在r^{th}个$Imp(t)$的最近邻处的M首先变为零。对于每个点，令h_t表示t到r^{th}个$Imp(t)$最近邻的距离。对于$k=1$、2、3.....n，我们设定

$$m_k(t)=M\left(h_t^{-1}(t_k-t)\right). \tag{3}$$

对于每个点，估计参数应使

$$\sum_{k=1}^{n} m_k(t)\left[Imp(t_k)-g(t)\right]^2. \tag{4}$$

由此可得回归在t时的拟合值$\hat{s}_t$。事实上，这些估计值是通过回归得到的$Imp(t_k)$的系数。

通过这一过程，我们去除时间序列的时间趋势。ε_t的假设使我们能够构建一阶自回归模型，

$$\varepsilon_t=\phi\varepsilon_{t-1}+e_t, \tag{5}$$

其中e_t是随机扰动项。Cook距离可按如下方式计算，

$$d_t=\frac{\left[\hat{\Phi}-\hat{\Phi}_t\right]^T\Sigma\Sigma^T\left[\hat{\Phi}-\hat{\Phi}_t\right]}{\hat{e}_t^{\,2}}, \tag{6}$$

其中$\hat{\Phi}$是估计参数向量，$\hat{e}_t^{\,2}$是式（5）中AR(1)模型的估计随机扰动项，Σ是解释变量向量，而$\hat{\Phi}_t$是一个新的参数向量，包含除第t期数据以外的剩余样本数据信息。

要定义冲击，我们首先需要确定某个时间区间内的供应基线作为参照。我们

选择过去某个时间区间内食品进口贸易量的均值和中位数作为基线l，

$$Imp^{\text{base}}(t) = \text{mean}\left\{Imp(t-1), \cdots, Imp(t-l)\right\}, \tag{7}$$

or

$$Imp^{\text{base}}(t) = \text{median}\left\{Imp(t-1), \cdots, Imp(t-l)\right\}, \tag{8}$$

其中$t > l$。用于冲击识别的年份数为

$$N_{\text{Identify}} = N_{\text{Origin}} - l. \tag{9}$$

进口量下降幅度$\Delta Imp(t)$计算如下，

$$\Delta Imp(t) = Imp^{\text{base}}(t) - Imp(t). \tag{10}$$

当t时，Cook距离d_t大于某个阈值d_c，且在某个时间区间内进口量低于供应基线$Imp^{\text{base}}(t)$，则识别为一次冲击，

$$Shock_t = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta Imp(t) > 0 \text{ and } d_t > d_c \\ 0, & \text{if } \Delta Imp(t) \le 0 \end{cases}, \tag{11}$$

其中，$\Delta Imp(t)$为冲击幅度。粮食进口冲击后的恢复时间定义为进口流量恢复至冲击发生前水平的5%时的时间点，即，

$$\tau^{\text{re}} = \min_{\tau}\{\tau : Imp(t+\tau) \ge 0.95 Imp^{\text{base}}(t)\}. \tag{12}$$

图2 展示了斯威士兰玉米进口冲击的识别过程。图2(a)为LOWESS回归结果，图2(b)为残差的一阶自回归过程，图2(c)为玉米进口冲击的识别结果。Cook距离较大（> 0.25）且冲击幅度为正的点被识别为冲击。从图2(a)可以看出，LOWESS能够很好地拟合国际玉米进口量的时间趋势；图2(b)中的残差自回归结果显示存在异常值。图2(c)显示，2008年的点是一个异常值，且2008年的进口量低于此前九年粮食进口量的中位数。这表明2008年发生了玉米进口冲击。2007/2008年全球粮食价格危机及随后的经济衰退对粮食安全造成了沉重打击。玉米价格上涨了80%，2007 [24], 许多消费者转而选择其他作物来满足食物需求。这表明，我们的方法确实能够识别由某些极端事件 [25]驱动的粮食进口冲击。

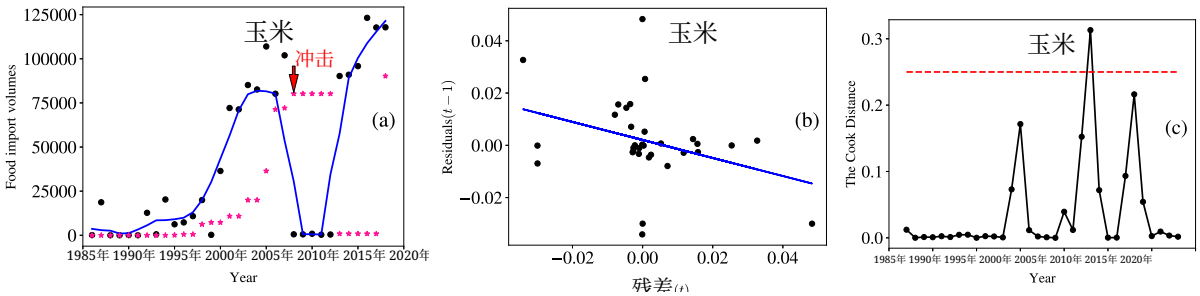


图2：斯威士兰（非洲大陆面积第二小的国家）玉米进口冲击识别过程。(a) 对粮食贸易量时间序列拟合的局部加权多项式回归（LOWESS）模型。黑点表示玉米进口量，蓝线表示拟合曲线。粉点表示冲击发生前9年粮食进口量的中位数。(b) LOWESS模型残差ϵ_t与滞后1期残差ϵ_{t-1}的回归。(c) 使用Cook距离，将2008年的点识别为(b)中回归的离群值。2008年的玉米进口量低于图(a)中粉点所示的供应基线。这表明2008年发生了玉米进口冲击。

2.3. 敏感性分析

进口冲击的识别结果取决于参数设定，包括LOWESS模型中的比例f、Cook距离的阈值d_c、供应基线的持续时间l以及基准值的统计方法m（即均值或中位数）。为获得最优参数组合，我们采用不同的参数设定来识别粮食进口冲击。我们使用一系列LOWESS比例值（$f = 0.2 \sim 0.8$，间隔为0.1）、进口量基线平均值所采用的持续时间（$l = 3$、5、7和9年）以及平均值类型（m =均值或中位数）进行冲击检测分析。通过改变参数，$7 \times 4 \times 2 = 56$可以得到多种识别结果。我们构建了一个简单的线性回归模型，以所有参数组合下识别出的冲击数量中位数为基准，将其与某一参数组合下随时间识别出的年度冲击数量进行回归。我们选择使该范围内各年份残差平方和（SSR）最小的参数组合 [26]。本文中，当LOWESS模型的比例为0.3、供应基线持续9年且平均值类型为中位数时，残差平方和达到最小。该参数组合下，残差平方和为82.22；SSR最大值为948.41，对应的参数组合为（$f = 0.2$，$l = 3$ 且m =中位数）。其他组合下的SSR值均超过90。因此，采用这一最优参数组合进行冲击识别。年度冲击频率的最大值和最小值用作置信区间。

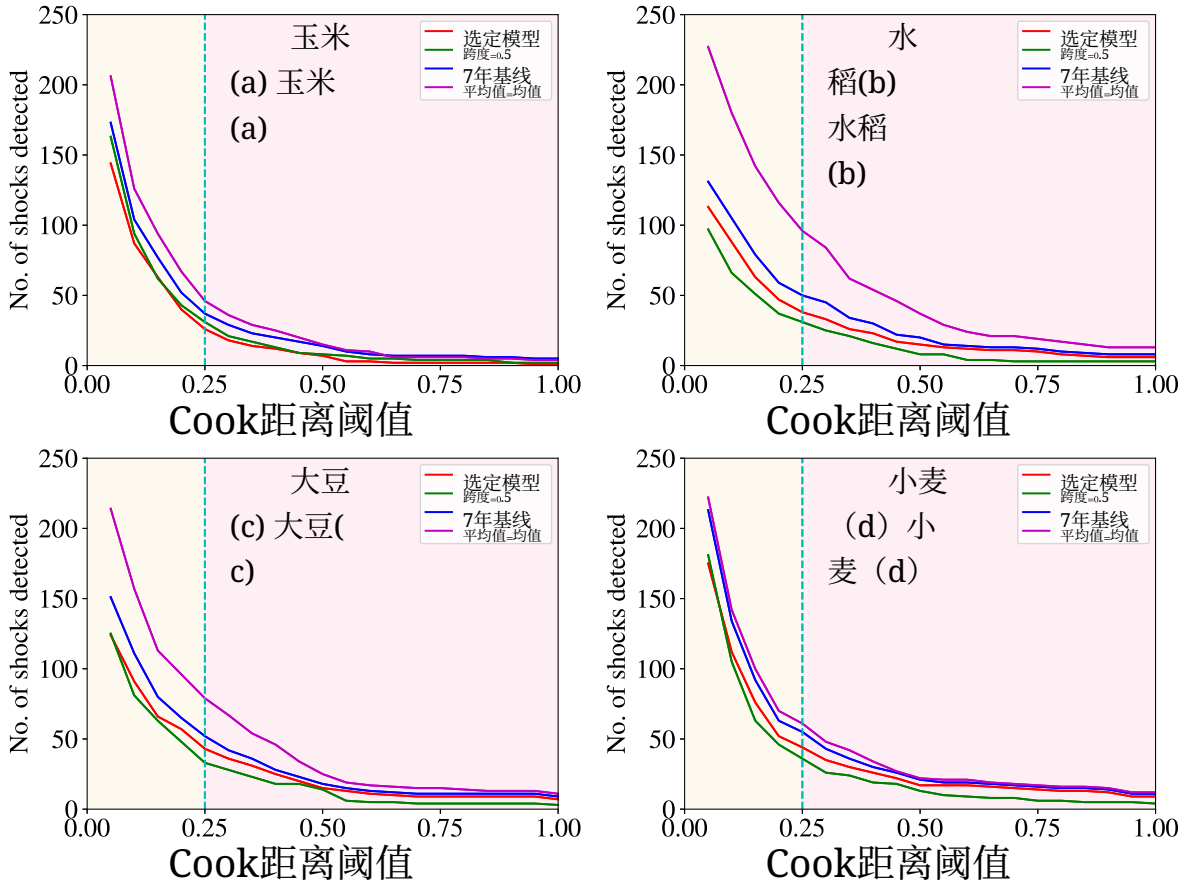


图3：随着 Cook距离值逐步变化，在玉米、水稻、大豆和小麦时间序列中检测到的冲击数量比较。线条表示本研究采用的模型参数组合（“选定模型”、LOWESS 跨度f = 0.6、贸易基线 = 7 年和所用平均值类型 = 中位数），或在改变模型跨度、贸易基线或平均值类型后重复分析的结果。垂直虚线表示本研究采用的 Cook距离值 0.25。

为确定识别异常值的 Cook距离阈值，我们采用不同阈值计算冲击频率。在以往研究中，Cook距离大于 1 或 $4/(n_t - p - 1)$（n_t （样本量为

ε_t，而 p 为估计参数的数量。在这里，$n_t = 32$ 和 $p = 2$。）通常被视为异常值 [23]。在本分析中，我们结合这两种方法，将 Cook距离阈值 d_c 设定在 0.05 至 1 之间变化，并将另外三个参数纳入敏感性分析。图3展示了四种食品进口时间序列中检测到的冲击数量随 Cook距离阈值变化的对比。我们发现，在所有作物中，0.25 都是这一关系中的合理取值；达到该值后，检测到的冲击数量开始趋于稳定 [23]。我们研究所选用的 Cook距离阈值与其他识别冲击的研究所采用的阈值相近 [23, 26]。

2.4. 粮食进口多样性与依赖率

有许多因素可以用来说明冲击随时间变化或在特定地区造成的后果。要将粮食进口冲击的识别方法标准化尤其困难。此外，由于全球粮食系统面临气候、经济和地缘政治风险，因此难以将所有冲击成因都纳入考量。本文仅讨论影响国际粮食贸易的一些因素。我们以数据为基础的方法有助于加深对粮食进口贸易冲击随时间变化及其跨地区差异的理解。

多样性是粮食系统韧性的重要决定因素。在国际粮食贸易网络中，一些经济体因贸易依赖度较高，更容易受到国外食品生产短缺的影响；而进口多样性可以缓冲此类风险对粮食安全造成的冲击 [27]。衡量多样性的方法有很多。我们借鉴 Gomez 等人 [28] 采用的方法来计算粮食供应的多样性，并使用香农熵计算一个经济体的粮食进口多样性，

$$D_i^{food}(t) = -\frac{1}{k_{i,food}^{\text{in}}(t)} \sum_{e_{ji}\in\mathscr{E}} \frac{w_{ji,food}(t)}{s_{i,food}^{\text{in}}(t)} \log \frac{w_{ji,food}(t)}{s_{i,food}^{\text{in}}(t)}, \tag{13}$$

其中 $D_i(t)$ 表示经济体 i 在 t 年的粮食进口多样性，$k_{i,food}^{\text{in}}(t)$ 表示经济体 i 的入度，$\mathscr{E} = \{e_{ij}\}$ 是网络边 e_{ij} 的集合，而 $w_{ji,food}(t)$ 表示 j 流向经济体 i 的食品贸易量（年份为 t）。

部分经济体的国内食品生产无法自给，需要从其他经济体进口食品以满足国内粮食需求。食品进口依赖率（IDR）可用于衡量一个经济体满足国内需求所依赖的食品进口比例。进口依赖率越高，需要进口的粮食供应就越多，即

$$IDR_i(t) = \frac{s_{i,food}^{\text{in}}(t)}{P_{i,food}(t) + s_{i,food}^{\text{in}}(t) - s_{i,food}^{\text{out}}(t)}, \tag{14}$$

其中 $P_{i,\text{食品}}(t)$ 表示 t 年的食品生产。

3. 进口冲击识别

3.1. 冲击的模式和趋势

如表1所示，玉米进口经济体有206个，大米进口经济体有213个，大豆进口经济体有199个，小麦进口经济体有201个。总计有819个长度为33的时间序列。对于每个时间序列，我们都执行冲击识别程序。由于 $l = 9$ 和 $t > l$，无法识别1995年之前的冲击。因此，我们有 $N_{\text{Identify}} = 33 - 9 = 24$。在1995年至2018年的24年间，我们识别出33次玉米进口冲击、43次大米进口冲击、42次大豆进口冲击和52次小麦进口冲击。

对于每一年中的特定作物，我们将 $\mathcal{N}_{\text{冲击},t}^{crop}$ 表示为在该作物进口中识别出冲击的经济体集合。我们计算每种作物的进口冲击频率，即该年至少经历一次冲击的经济体数量占参与进口贸易的经济体数量的比例 [10]

$$f_{\text{shock},t}^{crop} = \frac{\#(\mathcal{N}_{\text{shock},t}^{crop})}{\#(\mathcal{N}_t^{crop})}, \tag{15}$$

表1：时间序列数量（或进口经济体数量）、观测值数量以及在1986–2018年期间识别出的玉米、水稻、大豆和小麦冲击。

我们使用 $l = 9$ 来确定基线，以便识别1995年至2018年间的冲击。

作物	时间序列数量	观测值数量	冲击数量
玉米	206	6798	33
Rice	213	7029	43
大豆	199	6567	42
小麦	201	6633	52
总计	819	27027	170

其中 $\mathcal{N}^{crop}{}_{t}$ 表示在给定年份进口 作物 的经济体集合 t，$\#(\cdot)$ 表示计数函数。图4 展示了1995年至2018年冲击频率的变化趋势。通过改变第2.2节冲击检测方法中提到的参数，我们得到了年度冲击频率的范围。红线表示在最优参数组合下的年度冲击频率，其中 $f = 0.3$，$l = 9$，$d_c = 0.25$ 且 m =中位数。浅粉色置信区间表示不同参数组合下频率的范围。黑色虚线通过对各十年间（1995–2000年、2001–2010年和2011–2018年）的冲击频率取平均值计算得出，等于红线的十年均值。深粉色带表示置信区间的十年最低值和最高值。结果显示，四种作物的冲击频率随时间显著波动，但在某些年份明显较高，尤其是在1995–2000年和2005–2010年。这可能与1997/1998 [29] 经济危机以及2007/2008 [30, 31]粮食价格危机有关。2008年，随着粮食价格飙升，全球粮食不安全状况加剧。

不同作物的冲击频率各具特点。玉米在1996年、1999年、2000年、2006—2009年和2011年发生了显著粮食进口冲击，其中1999年和2009年的冲击尤为显著。大米进口在1999—2001年、2004年、2006年、2008—2010年、2012—2013年和2016—2018年发生了显著冲击，其中2001年和2003年的冲击尤为显著。大豆在1996年至2000年、2003年至2006年以及2008年至2018年均发生了显著冲击，其中2018年的冲击尤为显著。小麦在1996—1998年、2003年、2005年、2007—2011年、2015年和2017—2018年发生了显著冲击，其中1996年和2008—2009年的冲击尤为显著。十年平均冲击频率的趋势表明，2000—2010年间水稻和大豆的冲击频率较高，而2010—2018年间水稻和小麦的冲击频率较高。这表明不同作物具有各自独特的国际贸易模式。因此，在考量粮食安全时，将各类作物简单汇总为一个国际粮食贸易网络是不合理的。

不同经济体经历的冲击次数各不相同。我们将某个经济体的冲击率定义为其冲击次数（$N^{crop}{}_{\text{冲击},\ i}$）除以其进口时间序列的观测值数量（此处为$N_{\text{Identify}} = 24$）：

$$r_i^{crop} = \frac{N_{\text{shock},i}^{crop}}{N_{\text{Identify}}} \tag{16}$$

图5 展示了1995年至2018年四种作物在经济体层面的进口冲击率空间分布，颜色越深，表示发生的冲击越多。

显然，大米进口冲击和小麦进口冲击覆盖的地区更广。如图5（a）所示，玉米进口冲击主要集中在非洲和北美洲。位于南非的斯威士兰和位于北美洲的蒙特塞拉特各发生过两次玉米进口冲击。大洋洲的澳大利亚在1996年发生过一次玉米进口冲击。就大米进口而言，冲击广泛出现于欧洲、非洲、亚洲和北美洲。其中，非洲的尼日利亚大米进口冲击率最高；欧洲的爱尔兰和摩尔多瓦、亚洲的卡塔尔以及大洋洲的所罗门群岛大米进口冲击率较高。大豆进口冲击在亚洲和欧洲出现得更为频繁。24年间，五个经济体（古巴、拉脱维亚、立陶宛、塞舌尔和也门）分别经历了两次大豆进口冲击。小麦进口冲击同样波及广泛地区，主要发生在亚洲、大洋洲、非洲和北美洲。北美洲的瓜德罗普小麦进口冲击率较高。中国在1996年发生过一次小麦进口冲击。这与中国在1995年调整小麦进口政策的事件相一致。根据以往研究，中国在1995/96年是世界上最大的小麦进口国，但在1996年降至第五位97 [32]。根据上述结果，我们初步了解到，不同地区和作物的冲击率存在差异。同时

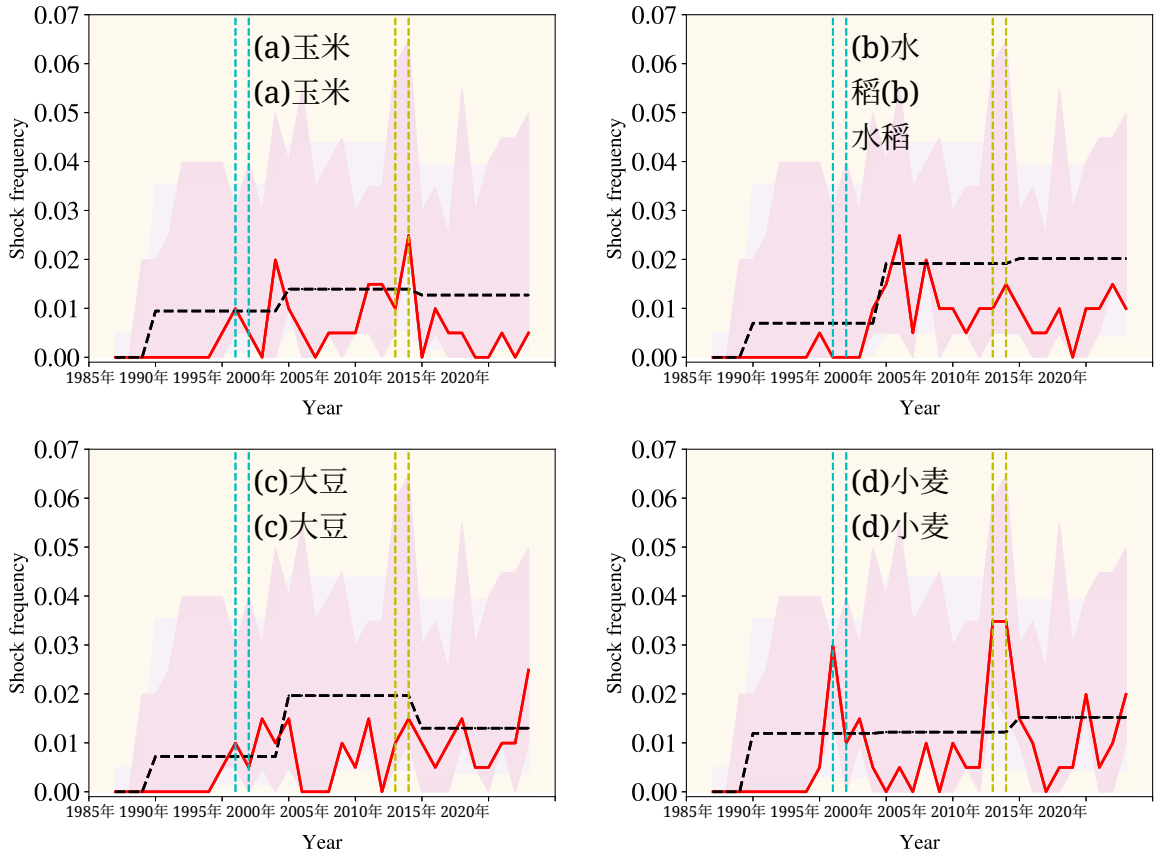


图4：1987—2018年玉米（a）、水稻（b）、大豆（c）和小麦（d）的粮食进口冲击频率趋势。时间序列中的红线表示本研究识别出的冲击的年度冲击频率。某种粮食的冲击频率等于当年遭受冲击的经济体数量占参与粮食进口贸易的经济体数量的比例。浅粉色置信区间表示在不同的 LOWESS 模型跨度（$f = 0.2 \sim 0.8$）、供应基线持续时间（l = 3、5、7 或 9 年）以及基线平均方式（均值或中位数）组合下，频率的可能范围。黑色虚线表示红线的十年均值。深粉色区域表示置信区间的十年最低值和最高值。蓝色和黄色点线分别对应金融危机（1996/1997）和粮食价格危机（2008/2009）。

间，冲击也可能与某一经济体的粮食贸易政策有关。

不同地区的冲击模式各不相同。我们计算了某一大洲的冲击率，其定义为1995年至2018年该大洲的冲击数量与观测值数量之比。

$$r_C^{crop} = \frac{\sum_{i \in C^{crop}} N_{\text{shock},i}^{crop}}{N_{\text{Identify}} \times \#(C^{crop})}, \tag{17}$$

其中，C^{crop} 是大洲 C 进口作物的经济体集合。同时，我们分析了1995年至2018年不同大洲的年度冲击幅度分布 Δs 。图6中，下方横坐标显示大洲缩写，上方横坐标显示相应大洲的冲击率，纵坐标显示年度冲击幅度的分布。总体而言，冲击率不高，幅度分布呈不对称状态。

从图 6（a）可以看出，北美洲的玉米冲击率较高，且大多数冲击接近冲击幅度的中位数。对于玉米进口而言，欧洲和南美洲的平均冲击幅度最高，而南美洲冲击幅度的分布明显较为离散。大洋洲只有少数经济体进口玉米，包括澳大利亚，因此冲击率较低，冲击幅度的范围也非常狭窄

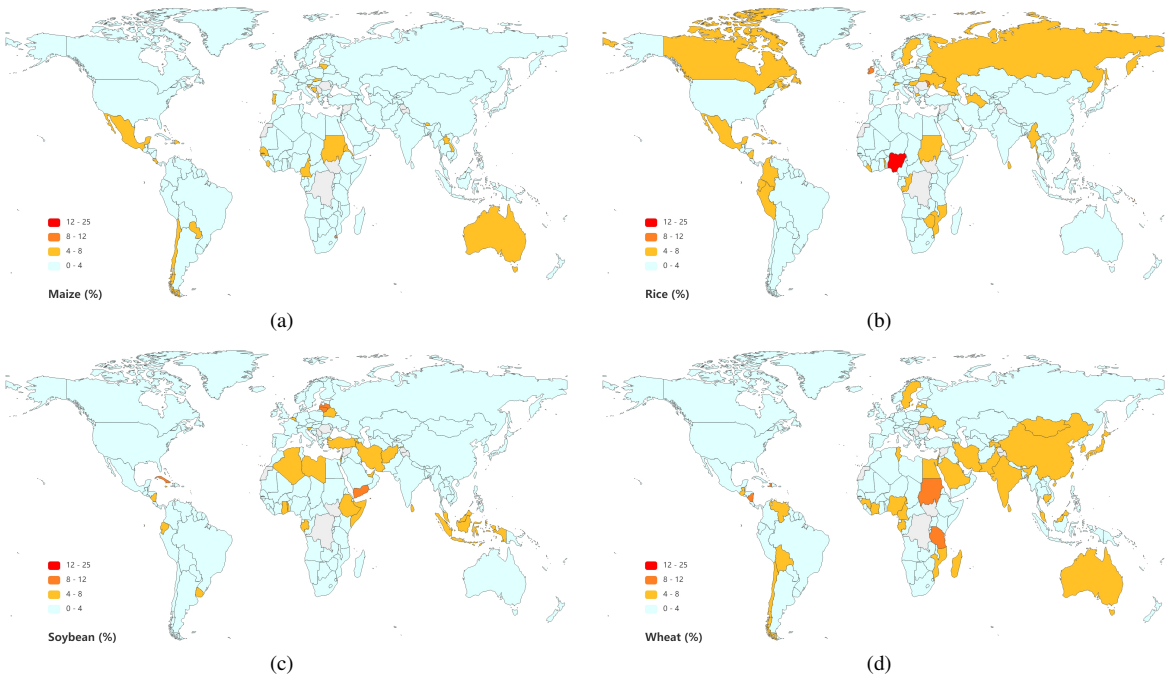


图5：1995年至2018年各经济体玉米（a）、水稻（b）、大豆（c）和小麦（d）部门食品进口冲击率的空间分布。经济体的冲击率是指冲击次数除以进口时间序列长度。颜色越深，发生的冲击越多。显然，水稻和小麦的冲击频率相对较高，区域分布也更广。

分布。从图6（b）可以看出，欧洲的大米进口冲击率最高，但冲击幅度却是倒数第二低。这表明欧洲的冲击相对频繁，但幅度不大。北美洲的大米进口冲击率位居第二，平均冲击幅度最高。亚洲的大多数冲击小于中位数。根据图 6（c），大豆进口冲击主要发生在北美洲，且冲击幅度相对较大。南美洲的大豆进口冲击率较低，但其冲击幅度的最高值要大得多。这是由乌拉圭造成的：该国在2009年发生了一次幅度较大的大豆进口冲击。就小麦进口贸易而言，如图 6（d）所示，冲击率最高的区域是亚洲，中国、日本、韩国及其他一些经济体都经历了小麦进口冲击。尽管中国是小麦主要生产国，但同时也是主要进口国 [32]。韩国的国内小麦消费[6] 和日本[7] 高度依赖进口。在1996年和2008年前后，受世界粮食危机影响 [33]，，亚洲许多地区遭受了进口冲击。

这些结果共同为理解冲击幅度和冲击率的空间特征提供了重要见解。总体而言，不同地区的食品进口冲击率和冲击幅度存在显著差异，在不同作物上也呈现出独特特征。相较而言，北美洲的粮食进口贸易冲击率较高，而南美洲的冲击幅度较大。

3.2. 冲击的恢复

粮食系统能够抵御冲击 [34]。由作物生产减少或粮食价格突然上涨引发的冲击，在这些外部扰动结束后，可以尽快恢复；而由政治问题引发的冲击，则可能难以在短时间内恢复。我们假设，当进口从

[6]韩国小麦进口量预计增加（2021年），网址：https://www.world-grain.com/articles/16078-south-korea-wheat-imports-forecast-higher [7]乌克兰危机期间日本进口小麦价格将创14年来新高（2015年），网址：https://english.kyodonews.net/news/2022/03/332c228c5346- japans-imported-wheat-price-to-rise-17-amid-ukraine-crisis.html

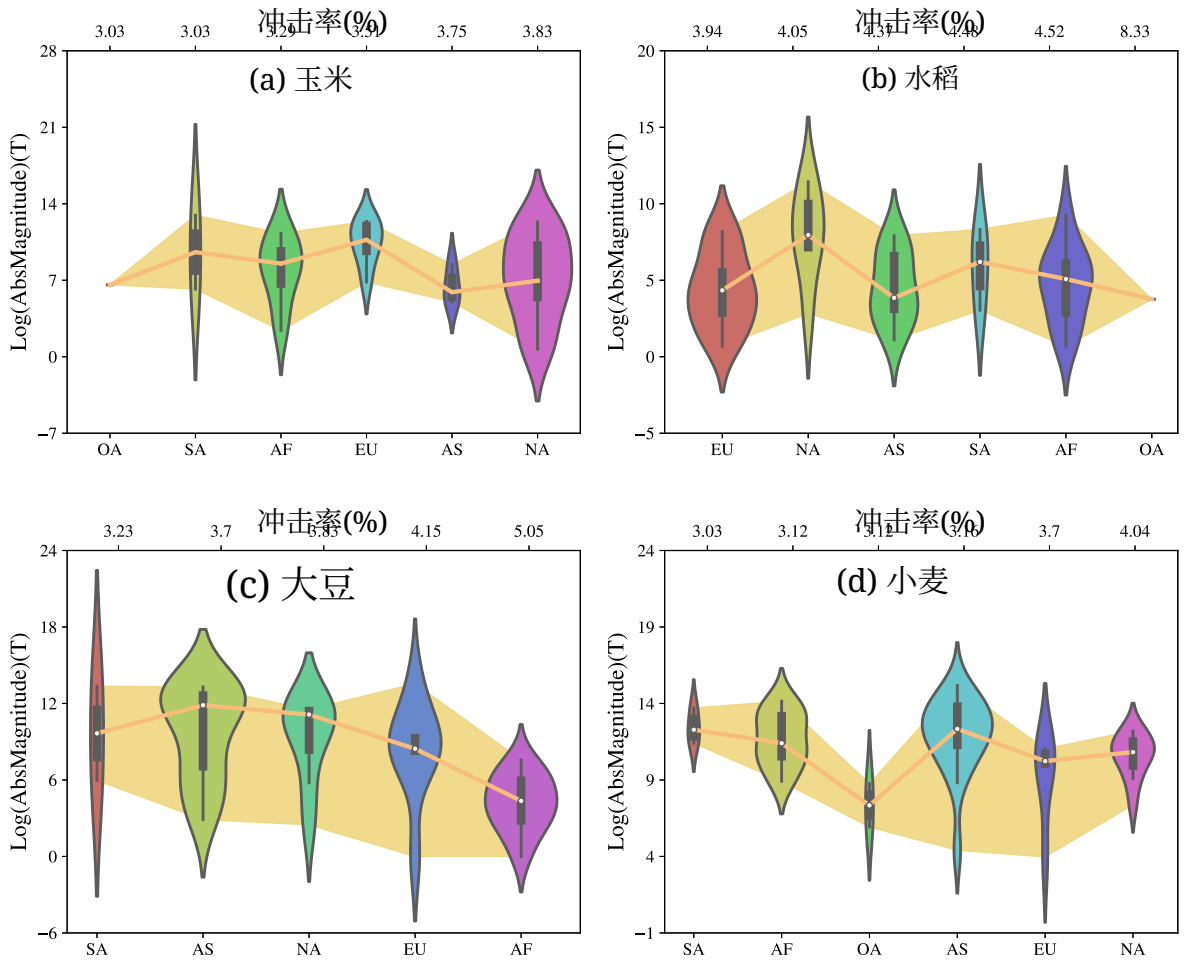


图6：洲际层面玉米（a）、水稻（b）、大豆（c）和小麦（d）的冲击率r_C^{crop}和幅度 Δs。深橙色线表示冲击幅度对数值的中位数，浅橙色表示最小值和最大值。请注意，AF 指非洲，AS 指亚洲，EU 指欧洲，OC 指大洋洲，NA 指北美洲，SA 指南美洲，AN 指南极洲。我们根据冲击率对各地区进行排序。

冲击中恢复时，作物进口量再次达到冲击发生前五年平均进口量的 95%。我们分析了各地区已恢复和未恢复案例的数量，以及冲击恢复时间。

表2：按地区划分的玉米（a）、水稻（b）、大豆（c）和小麦（d）已恢复案例数和未恢复案例数。恢复的定义是回到冲击发生前此前5年平均值的±5%范围内。请注意，AF 指非洲，AS 指亚洲，EU 指欧洲，OC 指大洋洲，NA 指北美洲，SA 指南美洲，AN 指南极洲。

Crop	已恢复						未恢复					
	大洋洲	亚洲	南美洲	非洲	欧洲	北美洲	大洋洲	亚洲	南美洲	非洲	欧洲	北美洲
玉米	1	3	2	7	4	8	0	0	0	1	2	5
Rice	2	7	2	8	9	5	0	2	1	2	4	1
大豆	0	9	0	6	3	2	0	4	2	5	5	6
小麦	1	13	2	12	4	6	1	5	1	1	1	5
总计	4	32	6	33	20	21	1	11	4	9	12	17

表 2 展示了1995年至2018年不同地区四种作物已恢复或未恢复冲击的数量。可以看出，北美洲发生的玉米进口冲击最多，共13次，但其中有5次冲击尚未恢复。亚洲、南美洲和大洋洲的玉米进口冲击少得多，且均已恢复。显然，欧洲的大米进口冲击数量最多，共13次，其中4次冲击尚未恢复。对于大豆进口冲击，亚洲的大多数案例已经恢复，而南美洲、欧洲和北美洲超过半数的案例尚未恢复到相应的冲击前水平。对于小麦进口，亚洲发生了18次冲击，其中13次已恢复；非洲发生了13次冲击，其中12次已恢复；北美洲发生了11次冲击，其中6次已恢复。

这些结果表明，不同地区的冲击恢复呈现出多样化特征，并且因作物而异。总体而言，亚洲的大多数作物进口冲击已经恢复。此外，在样本期内，除大豆外，玉米、大米和小麦的大多数进口冲击都已恢复。这与欧洲经济体通过发展大豆种植技术来增加国内生产的情况相一致 [35]。

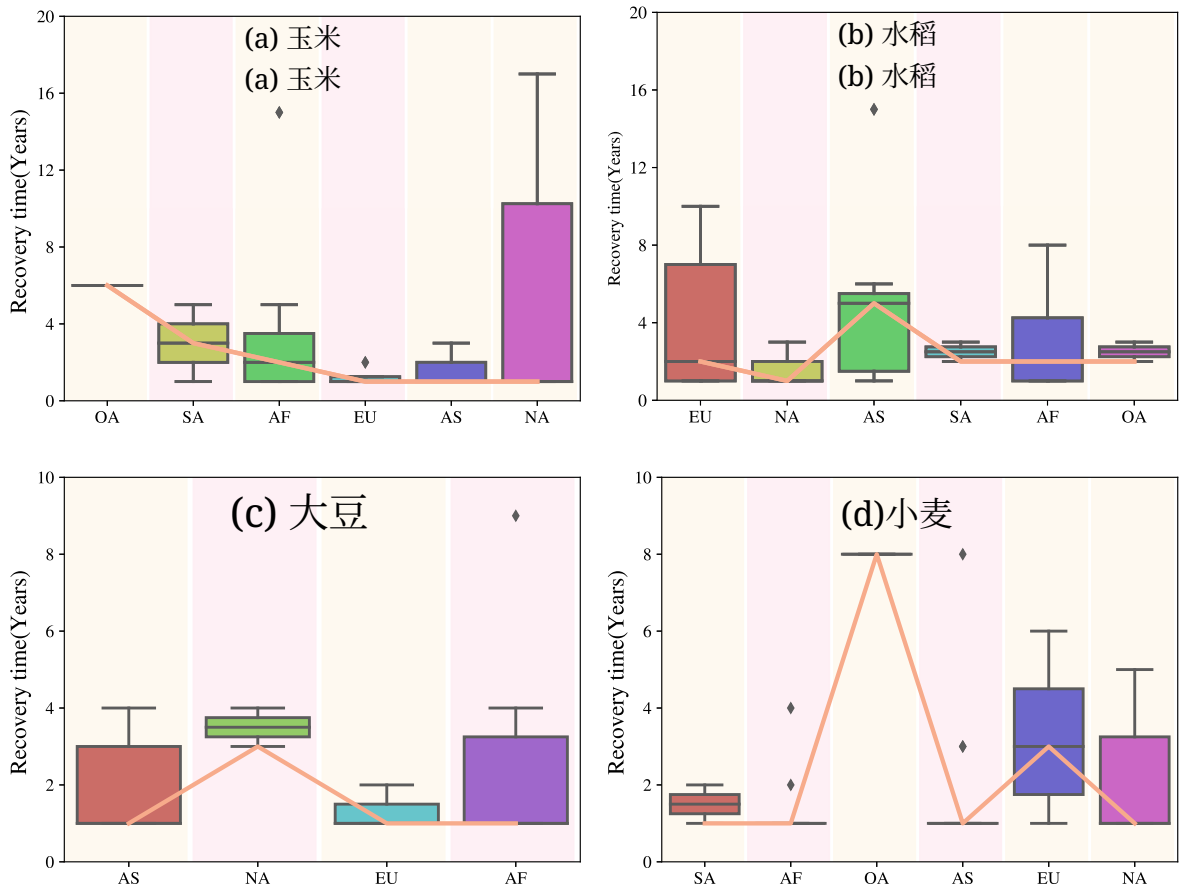


图7：各区域玉米 (a)、水稻 (b)、大豆 (c) 和小麦 (d) 冲击的恢复时间。恢复的定义是回到此前5年平均值的±5%以内。深橙色线表示冲击幅度的对数值的中位数。请注意，AF 指非洲，AS 指亚洲，EU 指欧洲，OC 指大洋洲，NA 指北美洲，SA 指南美洲，AN 指南极洲。我们根据冲击率对各区域进行排序。

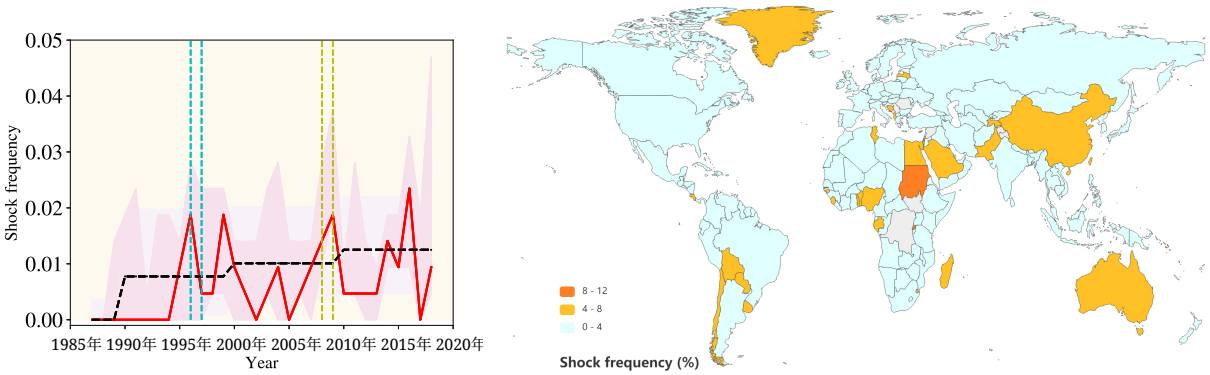
图 7展示了1995年至2018年不同地区作物进口冲击的恢复时间。显然，不同地区和作物的恢复时间各不相同。对于玉米、大米和小麦进口冲击，大洋洲的大多数冲击恢复相对缓慢，恢复时间较长。亚洲的大多数冲击恢复较快，尤其是玉米、大豆和小麦。这可能表明，亚洲的作物进口量会在短时间内进行调整。亚洲是主要的作物生产地区，但也依赖粮食进口来满足粮食供应，以应对不断增长的人口

增长和生物燃料需求。当粮食价格上涨时，大多数政府会迅速调整粮食贸易政策，以稳定国内粮食市场 [36]。然而，有些冲击需要很长时间才能恢复。例如，图 7（a）所示非洲冲击恢复中的明显异常值表明，有些冲击的恢复时间超过15年，且具有持续性。图7（d）中有许多异常值，表明某些地区的小麦进口冲击有时需要很长时间才能恢复。这些结果可能与某些经济体的贸易政策有关。对于玉米进口冲击，恢复时间波动显著。除大洋洲外，各地区的平均恢复时间相近。大米进口冲击的恢复时间中位数不到六年。在图 7（c）中，南美洲的箱线图缺失，因为研究期间在该地区识别出的冲击始终未能恢复。其他地区的冲击几乎都在五年内恢复。总体而言，当冲击率不高时，某一地区的大多数冲击都能迅速恢复。

3.3. 粮食总行业层面的结果

单种作物进口冲击的识别结果不同于所有作物总量的识别结果。我们检测到1995年至2018年间有51次作物进口总量冲击。图8（a）（黑色虚线）所示的十年平均冲击频率趋势表明，作物进口总量的冲击频率稳步上升。尤其是在1996年、1999年至2000年、2008年至2009年和2016年发生了显著粮食进口冲击（红线）。这与全球粮食价格危机的发生时间一致，表明粮食进口贸易受到了粮食价格飙升的影响。粮食价格飙升会导致一些经济体发生粮食进口冲击。此外，我们发现，在某一年经历了单种作物进口冲击的经济体，并不一定会经历粮食进口总量冲击。例如，阿鲁巴在1999年发生了玉米进口冲击，但没有经历粮食进口总量冲击。这可能表明，其他粮食进口弥补了玉米进口的减少。另一个例子是，巴哈马在2010年发生了大米进口冲击，但没有发生粮食进口总量冲击。粮食进口总量冲击可能是由某种作物进口贸易量减少所导致的，例如斯威士兰。该国因同时发生玉米进口冲击而经历了粮食进口总量冲击。粮食进口总量的区域分布

冲击也不同于单一作物进口冲击。从图8（b）可以明显看出，粮食进口总量冲击主要发生在非洲、南美洲、亚洲和大洋洲。苏丹的冲击率在所有经济体中最高。



(a) (b)

图8：1995年至2018年粮食部门层面作物供应冲击频率的时间趋势（左图）和空间格局（右图）。与蓝色和黄色虚线相对应的事件分别是金融危机（1996/1997）和粮食价格危机（2008/2009）。

图9 展示了1995年至2018年六大洲粮食进口总量冲击的幅度、已恢复和未恢复案例的数量，以及恢复时间。从图9(a)可以看出，不同地区的冲击幅度有所不同。亚洲的冲击幅度最大，其次是非洲。图9(b)为已恢复和未恢复案例数量的直方图。非洲的冲击均已恢复到相应的冲击前水平，而其他地区的冲击则部分恢复，尤其是北美洲和南美洲。如图9(c)所示，除南美洲的冲击恢复时间相对较长外，亚洲、北美洲和欧洲的平均冲击恢复时间均不足5年，而非洲和大洋洲则超过5年。

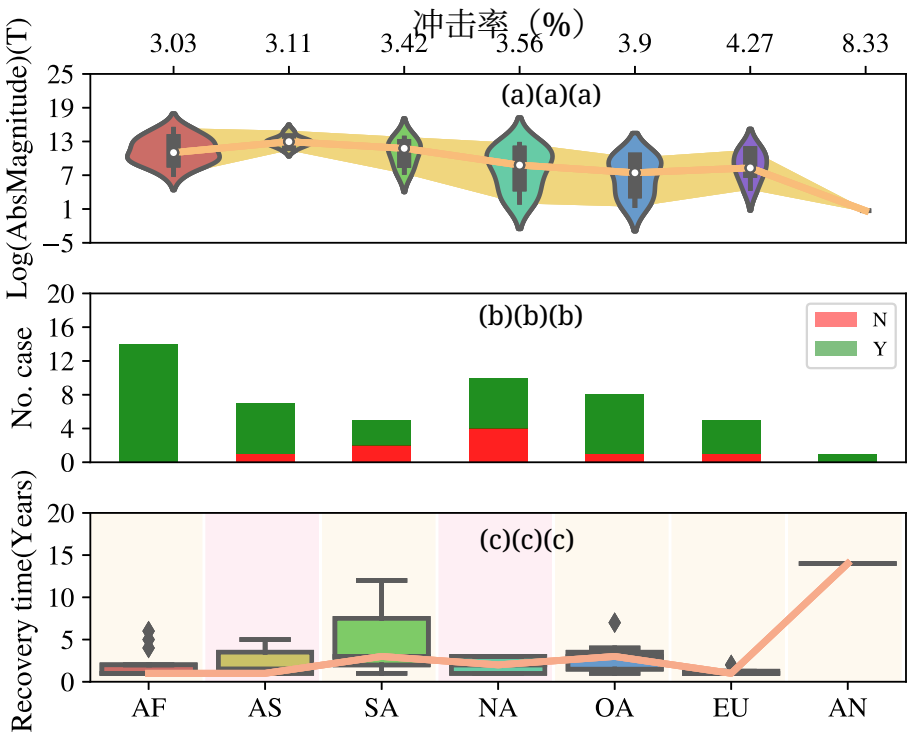


图9：各区域的冲击率（冲击次数除以该区域时间序列的数量）、冲击幅度、已恢复和未恢复案例数量以及恢复时间。使用方法部分所述的冲击检测方法识别国际进口量中的冲击。恢复定义为回到此前5年平均值的±5%范围内。请注意，AF指非洲，AS指亚洲，EU指欧洲，OC指大洋洲，NA指北美洲，SA指南美洲，AN指南极洲。N表示冲击尚未恢复，Y表示冲击已恢复。我们根据冲击率对各区域进行排序。

这些结果表明，单一作物进口贸易与作物进口总量贸易的结构和特征存在显著差异。在研究国际粮食贸易网络时，我们不能简单地将不同种类的作物汇总起来分析粮食进口贸易总量。尽管如此，粮食进口总量冲击与单一作物粮食进口冲击之间也存在相似之处。其一，两者的冲击频率在2008—2009年均较高，主要受到2007/2008年全球粮食价格危机的影响。其二，1995年至2018年间，非洲和亚洲都经历了大幅冲击，但很快便恢复。

3.4. 驱动因素

我们的结果表明，某些内部或外部因素会促使经济体遭受粮食进口冲击。由于这并非本文的主要议题，我们不深入分析冲击的驱动因素，仅尝试初步定性分析进口多样性、食品进口依赖率和食品价格如何影响冲击率和冲击恢复。从表3可以看出，经济体的进口多样性与冲击率似乎呈弱负相关。经济体的进口多样性越高，发生进口贸易冲击的可能性就越低。食品进口依赖率与进口贸易冲击率呈弱正相关。经济体的粮食供应越依赖粮食进口，就越容易发生进口冲击。相反，从表3 可以看出，已恢复冲击的占比与经济体的进口多样性略呈正相关，与食品进口依赖率呈负相关。进口多样性高、进口依赖率低，会带来较高的进口冲击恢复率。

相比之下，粮食价格似乎对冲击率的影响更为显著。我们在图中描绘了1995年至2018年四项食品价格指标和冲击率的时间趋势。 10，并发现2008—2009年，

表3：冲击率与进口多样性、冲击率与食品进口依赖率、恢复率与进口多样性，以及恢复率与食品进口依赖率之间的关系。恢复率是指1995年至2018年已恢复案例数与冲击次数之比。

皮尔逊相关系数	多样性	进口依赖率
冲击率	-0.00632	0.03807
恢复率	0.11430	-0.33482

粮食价格和食品进口冲击频率都较高。然而，我们只是简单分析了这两个变量时间趋势之间的关系，并未对其内在因果关系进行定量分析。尽管本研究具有探索性，但仍为理解粮食进口冲击的驱动因素提供了一些见解。

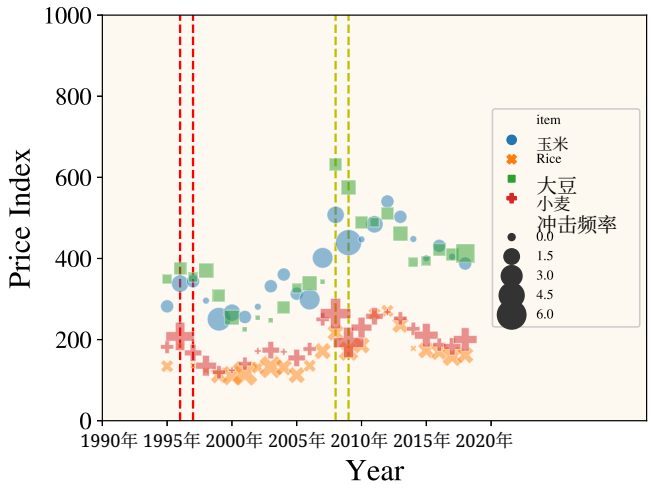


图10：食品进口冲击率与食品价格之间的关系。横坐标为时间，纵坐标为作物价格指数。不同种类的作物以不同颜色表示，点的大小代表冲击率的数值。虚线、红线和黄线对应的事件分别是金融危机（1996/1997）和粮食价格危机（2008/2009）。

4. 讨论与结论

确保粮食供应稳定是保障粮食安全的关键。由于资源、土地和气候限制，一些经济体无法通过国内生产满足人口的食物需求。因此，粮食进口贸易是粮食短缺经济体确保粮食供应的重要途径。然而，粮食进口贸易容易受到主要出口国食品生产和贸易政策的影响，可能导致进口经济体遭遇粮食进口贸易冲击和食品供应风险。粮食进口贸易冲击会严重阻碍全球粮食安全的改善及其他可持续发展目标的实现。因此，我们构建了国际粮食贸易网络，并基于局部加权多项式回归识别进口量异常值。这有助于检测粮食进口贸易冲击、了解经济体面临的外部食品供应风险，并从粮食可获得性维度衡量粮食安全。

我们研究了1995–2018年玉米、水稻、大豆和小麦粮食进口冲击的历史全球趋势。我们采用一种成熟且标准化的方法，识别联合国粮食及农业组织粮食进口量中的冲击。通过调整局部加权多项式回归模型，我们依据时间序列自相关结构的突变检测冲击，并将冲击点与一些特殊事件联系起来。本文绘制了粮食进口冲击频率的空间分布，比较了不同作物粮食进口冲击的时间演变趋势和空间分布，并分析了不同地区的冲击强度与冲击恢复情况。一个有趣的发现是

随着国际粮食贸易的增长（见图1），冲击并未随时间推移而变得更加频繁（见图4）。这表明，冲击是这些国际粮食贸易体系的常见特征。四种作物进口冲击的时间趋势各有特点，但在某些年份也存在相似之处。尤其是在2008—2009年，各类作物进口贸易都出现了明显冲击。这也与全球粮食价格飙升引发的粮食危机相吻合。这表明粮食进口与粮食价格之间存在明显关联。价格飙升会导致一些经济体的外部粮食供应大幅减少。

不同作物和地区的进口冲击率存在差异。我们发现，北美洲、非洲和亚洲经历了更频繁的作物进口冲击。进口冲击的空间特征取决于作物类型。水稻和小麦进口冲击发生得更频繁、范围也更广。这些冲击主要发生在非洲、亚洲和北美洲。玉米进口冲击主要发生在非洲和北美洲，而大豆进口冲击则主要发生在亚洲和欧洲。由于各地区根据当地作物生产和粮食需求制定了不同的粮食贸易策略，作物进口冲击率呈现出空间特征。水稻是养活世界一半以上人口的主食，并对全球粮食安全产生重大影响。非洲近40%的大米消费来自进口，尤其是撒哈拉以南非洲，该地区是水稻净进口方 [37]。2000年之前，受有利天气和过度生产影响，全球大米供应超过需求，市场价格保持稳定。当时，一些经济体的大米进口供应得到充分保障。此后，随着水稻单产增幅下降，外部大米需求增加。到2007年底，情况进一步恶化，许多大米出口国减少出口或停止供应大米，导致全球大米危机 [38]。这对非洲等主要大米进口国造成了重大冲击。因此，非洲经济体在2000年后频繁遭受大米进口冲击。除冲击频率外，冲击强度（或冲击幅度）也是描述粮食进口冲击的重要指标。本文通过计算冲击期间进口量与冲击前五年平均进口量之间的差额来衡量冲击强度。研究发现，南美洲的冲击幅度较高。然而，北美洲、欧洲和非洲的冲击幅度与作物种类有关。同时，我们注意到，冲击强度与冲击频率并不呈正相关。南美洲的进口冲击率较低，但冲击强度较大，这与北美洲的情况相反。这表明，冲击频繁的地区未必会遭受严重的进口贸易冲击，仍需考虑当地农业粮食生产和贸易政策。

面对各种甚至不可预见的冲击，粮食系统有能力提供充足且易于获取的粮食。有些冲击是暂时的，能在短时间内恢复；然而，有些冲击则会持续存在。我们以冲击发生前五年的平均粮食供应量作为参照。当进口量恢复至冲击前水平的95%时，我们认为系统已从冲击中恢复。从结果可以看出，不同地区的冲击恢复情况存在显著差异。尽管亚洲的冲击率较高，但大多数冲击很快便得到恢复。这表明，在粮食进口大幅减少后，亚洲能够及时调整进口，并恢复正常的外部粮食供应。亚洲，尤其是东亚的粮食安全状况优于世界其他地区。东亚的粮食安全主要由国内生产保障。2000年后，为满足不断增长的人口需求，亚洲的粮食进口量翻了一番，但亚洲对粮食进口的依赖程度仍较低。然而，粮食需求增加推动生物燃料发展，导致能源成本和粮食价格上涨，加剧了亚洲部分地区的粮食短缺。大多数政府干预都侧重于短期政策。政府倾向于通过实施临时贸易限制或价格管制来稳定国内粮食价格 [36]。这些措施可能导致粮食进口贸易在短期内减少，从而引发进口贸易冲击。但随着粮食市场状况变化，局面可以及时得到调整。

一些地区的冲击未能迅速恢复。欧洲和北美洲的大多数大豆进口冲击至今仍未恢复。2015年之前，欧洲，尤其是欧盟，面临严重的大豆短缺。大豆进口占欧洲年度大豆消费量的95%。多瑙河沿岸经济体加入欧盟，以及欧盟与其他东欧经济体签署联系国协定，为增加大豆生产创造了新的机遇。这些地区通过开发或改进大豆种植技术，种植产量高、遗传性状优良的大豆品种 [35]。当一个经济体的国内大豆生产增加时，其对外部进口的依赖就会降低。这会造成持久的进口冲击。这似乎可以解释为什么大多数大豆进口冲击都未能恢复。

如果粮食进口冲击能在短时间内恢复，经济体的外部粮食供应就不会受到显著影响。但如果冲击恢复时间超过15年，外部粮食供应就会长期下降。除非经济体提高国内粮食生产以满足内部供应需求，否则很容易遭遇粮食短缺。

我们进一步分析了进口多样性、进口依赖率和作物价格对冲击率和冲击恢复率的影响。研究发现，进口多样性高、进口依赖率低会带来较低的冲击率和较高的恢复率。此外，作物价格高时，往往也伴随着较高的冲击率。

本文旨在基于异常值识别方法检测作物进口冲击。由于冲击表现为进口量的突然下降，该检测方法无法识别长期且更为渐进的下降。此外，该方法也无法识别高变异性系统中的冲击。在高变异性系统中，大幅偏离频繁发生，因此在本分析中不被视为冲击。本研究受限于缺乏有关导致进口冲击的因素信息，但已指出其中涉及的粮食进口贸易风险。此外，本研究有助于我们理解作物进口贸易冲击的时间和空间特征。未来可重点关注粮食危机和贸易结构对国际食品进口贸易的影响。本研究所得见解可能有助于加深我们对外部粮食供应风险的理解，并更加关注粮食的可获得性。仍需开展更多工作，在粮食贸易、生产、消费和储备的背景下，对粮食供应问题进行更全面、系统的分析 [27]。这是一个富有成果的后续研究方向，有助于我们更广泛地理解粮食安全。

利益冲突声明

数据可用性声明

本研究分析了公开可用的数据集。数据可在此处获取：https://www.fao.org。

参考文献

[1] J. Zhan, F. Zhang, Z. Li, Y. Zhang, W. Qi，基于数据包络分析法评估粮食安全：黑河流域案例研究，《运筹学年鉴》290 (1-2) (2020) 697–706。doi:10.1007/s10479-018-2889-9。[2] M. I. Marobhe，新冠疫情恐慌期间加密货币作为投资组合的避险资产：比特币、以太坊和莱特币案例，《中国金融评论国际版》12 (1) (2022) 51–68。doi:10.1108/CFRI-09-2021-0187。[3] A. R. B. Sajid Iqbal，新冠疫情期间的能源融资：公共支持如何发挥作用？《中国金融评论国际版》12 (2) (2022) 219–240。doi:10.1108/CFRI-07-2021-0137。[4] D. Sharma, A. Singh, A. Kumar, V. Mani, V. G. Venkatesh，COVID-19疫情期间粮食供应网络的重构：新兴经济体视角，《运筹学年鉴》（2021）。doi:10.1007/s10479-021-04343-2。[5] M. Porkka, M. Kummu, S. Siebert, O. Varis，从粮食不足走向贸易依赖：全球粮食可获得性的历史分析，《公共科学图书馆·综合》8 (12) (2013) e82714。doi:10.1371/journal.pone.0082714。[6] J. Jaegermeyr, A. Robock, J. Elliott, C. Mueller, L. Xia, N. Khabarov, C. Folberth, E. Schmid, W. Liu, F. Zabel, S. S. Rabin, M. J. Puma, A. Heslin, J. Franke, I. Foster, S. Asseng, C. G. Bardeen, O. B. Toon, C. Rosenzweig，区域性核冲突将危及全球粮食安全，《美国国家科学院院刊》117 (13) (2020) 7071–7081。doi:10.1073/pnas.1919049117。[7] D. Tilman, C. Balzer, J. Hill, B. L. Befort，全球粮食需求与农业的可持续集约化，《美国国家科学院院刊》108 (50) (2011) 20260–20264。doi:10.1073/pnas.1116437108。[8] D. G. Mogale, S. K. Kumar, M. K. Tiwari，兼顾风险和收获后损失的绿色食品供应链设计：案例研究，《运筹学年鉴》295 (1) (2020) 257–284。doi:10.1007/s10479-020-03664-y。[9] M. Dora, J. Wesana, X. Gellynck, N. Seth, B. Dey, H. De Steur，可持续运营对减少粮食损失的重要性：来自比利时食品加工业的证据，《运筹学年鉴》290 (1-2) (2020) 47–72。doi:10.1007/s10479-019-03134-0。[10] C. Tu, S. Suweis, P. D'Odorico，全球化对自然资源韧性和可持续性的影响，《自然·可持续发展》2 (4) (2019) 283–289。doi:10.1038/s41893-019-0260-z。[11] B. Chen, N. B. Villoria，气候冲击、粮食价格稳定与国际贸易：来自27个净进口国76个玉米市场的证据，《环境研究快报》14 (1) (2019) 014007。doi:10.1088/1748-9326/aaf07f。[12] A. Garre, P. S. Fernandez, P. Brereton, C. Elliott, V. Mojtahed，利用贸易数据预测食品安全事件的来源与传播：一种创新的数学建模方法，《国际食品研究》123 (2019) 712–721。doi:10.1016/j.foodres.2019.06.007。[13] M. Porkka, J. H. A. Guillaume, S. Siebert, S. Schaphoff, M. Kummu，利用粮食进口克服本地增长限制，《地球未来》5 (4) (2017) 393–407。doi:10.1002/2016EF000477。[14] U. L. C. Baldos, T. W. Hertel，国际贸易在管理气候变化引发的粮食安全风险中的作用，《粮食安全》7 (2) (2015) 275–290。doi:10.1007/s12571-015-0435-z。[15] N. J. Foti, S. Pauls, D. N. Rockmore，世界贸易网络随时间的稳定性——灭绝分析，《经济动态与控制杂志》37 (9) (2013) 1889–1910。doi:10.1016/j.jedc.2013.04.009。[16] M. Kummu, P. Kinnunen, E. Lehikoinen, M. Porkka, C. Queiroz, E. Roos, M. Troell, C. Well，贸易与粮食系统韧性的相互作用：供应多样性随时间提升，代价是贸易独立性下降，《全球粮食安全》24 (2020) 100360。doi:10.1016/j.gfs.2020. 100360。

[17] P. E. Giordani, N. Rocha, M. Ruta，食品价格与贸易政策的乘数效应，《国际经济学杂志》101 (2016) 102–122。doi:10.1016/j.jinteco.2016.04.001。[18] F. Ceballos, M. A. Hernandez, N. Minot, M. Robles，发展中国家国际市场向国内市场的谷物价格及波动传导，《世界发展》94 (2017) 305–320。doi:10.1016/j.worlddev.2017.01.015。[19] S. C. Moser, J. A. F. Hart，气候变化的深远影响：社会遥相关与气候变化影响研究的未来，《气候变化》129 (1-2) (2015) 13–26。doi:10.1007/s10584-015-1328-z。[20] L. Wellesley, F. Preston, J. Lehne, R. Bailey，全球粮食贸易中的瓶颈：风险评估，《交通运输研究：商业与管理》25 (2017) 15–28。doi:10.1016/j.rtbm.2017.07.007。[21] L. J. Hubbard, C. Hubbard，英国的粮食安全：外部供应风险，《食品政策》43 (2013) 142–147。doi:10.1016/ j.foodpol.2013.08.006。[22] R. Burkholz, F. Schweitzer，国际作物贸易网络：冲击与级联效应的影响，《环境研究快报》14 (11) (2019) 114013。doi:10.1088/1748-9326/ab4864。[23] R. S. Cottrell, K. L. Nash, B. S. Halpern, T. A. Remenyi, S. P. Corney, A. Fleming, E. A. Fulton, S. Hornborg, A. Johne, R. A. Watson, J. L. Blanchard，陆地和海洋的粮食生产冲击，《自然·可持续发展》2 (2) (2019) 130–137。doi:10.1038/s41893-018-0210-1。[24] G. Anriquez, S. Daidone, E. Mane，食品价格上涨与营养不足：一项跨国研究，《食品政策》38 (2013) 190–202。doi:10.1016/j.foodpol.2012.02.010。[25] K. Harttgen, S. Klasen, R. Rischke，分析马拉维价格和收入相关冲击对营养的影响：模拟家庭粮食获取权，《食品政策》60 (2016) 31–43。doi:10.1016/j.foodpol.2015.03.007。[26] J. A. Gephart, L. Deutsch, M. L. Pace, M. Truell, D. A. Seekell，鱼类生产冲击：识别、趋势与后果，《全球环境变化》42 (2017) 24–32。doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.11.003。[27] P. Marchand, J. A. Carr, J. Dell' Angelo, M. Fader, J. A. Gephart, M. Kummu, N. R. Magliocca, M. Porkka, M. J. Puma, Z. Ratajczak, M. C. Rulli, D. A. Seekell, S. Suweis, A. Tavoni, P. D'Odorico，储备与贸易共同决定对粮食供应冲击的暴露程度，《环境研究快报》11 (9) (2016) 095009。doi:10.1088/1748-9326/11/9/095009。[28] M. Gomez, A. Mejia, B. L. Ruddell, R. R. Rushforth，供应链多样性增强城市抵御粮食冲击的能力，《自然》595 (7866) (2021) 250–254。doi:10.1038/s41586-021-03621-0。[29] M. Rosegrant, C. Ringler，亚洲经济危机与全球粮食长期形势，《食品政策》25 (3) (2000) 243–254。doi: 10.1016/S0306-9192(00)00004-X。[30] S. S. Ahmed，2008年粮食危机和全球经济危机对埃及粮食安全的影响，《非洲与亚洲研究》13 (1-2) (2014) 205–236。doi:10.1163/15692108-12341292。[31] D. Headey，重新审视全球粮食危机：贸易冲击的作用，《食品政策》36 (2) (2011) 136–146。doi:10.1016/j.foodpol. 2010.10.003。[32] C. Carter, F. Zhong，中国农村小麦消费，《美国农业经济学杂志》81 (3) (1999) 582–592。doi:10.2307/1244017。[33] P. McMichael，"世界粮食危机"的粮食体制分析，《农业与人类价值》26 (4) (2009) 281–295。doi:10.1007/ s10460-009-9218-5。[34] J. R. A. Butler, F. Davila, R. Alders, R. M. Bourke, S. Crimp, J. McCarthy, A. McWilliam, A. S. M. Palo, L. Robins, M. J. Webb, M. v. Wensveen, T. Sanderson, D. Walker，粮食系统冲击快速评估框架：从COVID-19在印太区域的影响中汲取的经验，《环境科学与政策》117 (2021) 34–45。doi:10.1016/j.envsci.2020.12.011。[35] D. C. Dima，罗马尼亚、保加利亚和摩尔多瓦共和国的大豆作物：现状与前景，《农业与农业科学会议录》6 (2015) 3–8。doi:10.1016/j.aaspro.2015.08.030。[36] C.-C. Chang, H.-L. Lee, S.-H. Hsu，粮食安全：全球趋势与区域视角，并以东亚为例，《太平洋评论》26 (5) (2013) 589–613。doi:10.1080/09512748.2013.842315。[37] P. A. Seck, E. Tollens, M. C. S. Wopereis, A. Diagne, I. Bamba，稻米价格的上涨趋势与变异性：撒哈拉以南非洲面临的威胁与机遇，《食品政策》35 (5) (2010) 403–411。doi:10.1016/j.foodpol.2010.05.003。[38] P. A. Seck, A. Diagne, S. Mohanty, M. C. S. Wopereis，养活世界的作物7：水稻，《粮食安全》4 (1) (2012) 7–24。doi:10.1007/s12571-012-0168-1。