

全球供应链风险评估与韧性测度 ——以大豆为例

卢昱嘉^{1,2}, 陈秧分², 吴振磊¹

(1. 西北大学经济管理学院, 西安, 710127; 2. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081)

摘要: 在全球不确定性事件频发背景下, 研究全球农产品供应链风险结构及其韧性水平, 不仅可为中国更好地利用国际资源与市场、保障农产品进口安全提供科学依据, 也可发展典型产品跨越地理空间的风险韧性治理理论与方法, 拓展资源地理研究。本文构建了包括供应、采购、运输、需求4个阶段和出口商、物流与运输部门、进口商3个环节的全球供应链分析框架, 采用两阶段DEA和CoDEA模型方法, 对中国典型进口依赖型农产品大豆的全球供应链风险和韧性进行了评估。结果显示: ① 2000—2020年大豆进口供应链整体风险不断上升, 风险主要来自需求和采购阶段, 供应和运输阶段风险较小但有明显增长, 与出口国的贸易关系、经济政策不确定性是影响大豆进口供应链安全的长期风险因子。② 中国自巴西进口大豆供应链整体韧性相比美国 and 阿根廷较强, 显示了与巴西探索优化供应链协作的充分潜力。③ 大豆全球供应链风险韧性治理需区分短期和长期风险, 短期视角下着重提升对区域减产、海运阻塞、贸易制裁等风险的应对能力, 长期视角下着力探索战略层面的布局优化和系统构建, 提升供应链话语权和掌控力。

关键词: 全球供应链; 进口大豆; 风险评估; 韧性测度; 资源地理

DOI: 10.11821/dlxb202410015

1 引言

随着经济全球化发展, 全球不等规模、不同层级的地域系统构成了一个相互依赖、相互耦合的地理网络^[1], 跨越地理空间的要素与产品流动成为联系中国和全球的重要纽带。包括农产品、能源等初级资源在内的国际贸易规模持续快速增长, 在做大全球发展“蛋糕”、增加全球总体产出的同时, 也面临利益分配不均衡等发展困扰。尤其是, 当今世界正处于百年未有之大变局, 国际合作的复杂性和不确定性明显增加, 国际贸易、对外投资和要素流动均受到阻碍^[2]。供应链韧性与安全成为各方重点关切^[3], 距离、制度、韧性等变量的作用显著增强^[4], 中国共产党的“二十大”报告明确要求“着力提升产业链供应链韧性和安全水平”。研究全球供应链韧性与安全, 具有重要的理论与实践意义。

全球供应链通常是指跨越国界的, 将产品和服务传递到特定消费市场的实体网络, 供应链韧性则指各环节各主体应对风险挑战并恢复至正常运行状态的能力水平。已有研

收稿日期: 2024-01-29; 修订日期: 2024-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(72073129); 中国农业科学院科技创新工程(10-IAED-ZX-2-2024, 10-IAED-04-2024, 10-IAED-RC-11-2024) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 72073129; The Agricultural Science and Technology Innovation Program, No. 10-IAED-ZX-2-2024, No. 10-IAED-04-2024, No. 10-IAED-RC-11-2024]

作者简介: 卢昱嘉(1996-), 女, 陕西渭南人, 博士, 研究方向为农业经济管理。E-mail: luyujia@nwu.edu.cn

通讯作者: 陈秧分(1983-), 男, 湖南湘乡人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为国际农业经济与贸易、农业农村发展战略、乡村产业经济。E-mail: chenyangfen@caas.cn

究围绕产品与产业安全、供应链韧性开展了大量研究,风险评价方面,主要从性质(可用性、可及性、可负担性和可接受性)^[5-6]、环节(储备、地缘政治、运输、技术和需求阶段)^[7]、维度(供应、经济、外贸和依赖)^[8]等角度测度供应链安全水平,或利用国际市场占有率和渗透率^[9]、替代弹性^[10]、网络中心度及变异指数^[11-12]、进口集中度指数^[13]等指标识别供应链脆弱性;韧性测度方面,主要通过韧性演化曲线、网络仿真模拟、贝叶斯网络建模等方法研究特定产业或产品供应链的韧性能力^[14-17],或利用增加值进口集中度^[18]、国产化比率^[19]、价值链长度波动性^[20]等单一指标评估产业链韧性水平。全球不确定性趋增背景下,关注气候变化、地缘冲突、关键节点禁运等非传统风险的研究增加^[21-22],主要通过定性分析和逻辑推演评估典型风险事件对全球供应链的冲击^[23],探索以应对多源风险为目标的供应链投资布局、区位选择、组建模式等优化策略^[24-26]。

农业领域从供应链视角出发研究粮食安全问题的文献逐渐增多,但仍处于起步阶段。学术界主要关注跨境农产品供应链的产生与发展^[27]、脆弱性来源^[28]、运作特征和关键要素^[29]等问题,强调其结构、主体、流程等方面的复杂性和不稳定性。大豆具有高进口依存度、高进口集中度、高进口规模量、长地理运输距离等显著特征,是典型的进口依赖型农产品和国家粮食安全的关键短板^[30]。相比超过1亿t的国内大豆消费需求,中国近中期都需要主要依赖国际市场和国际资源来保障国内大豆供应^[31]。国内学者围绕大豆进口依赖风险、地缘政治风险等影响开展了丰富研究,尤其关注中美贸易摩擦对大豆安全以及下游产业的冲击^[32-33]。引入供应链视角,主要关注特定环节(采购和加工环节)分析大豆链条的复杂性和风险性^[34]、或关注特定来源(巴西)分析大豆资源的挖掘与利用^[35]。国外学者更多关注大豆全球流动的环境与资源影响,提出“嵌入式”特征导致低估大豆生产和贸易的强度和广度,强调“供应链思维”对于量化和评估资源影响的关键作用^[36-38]。

总体来看,既有研究较少考虑上下游关联结构对供应链风险与韧性进行系统评价。地理学具有服务国内重大需求和国际全球战略的使命担当与发展前景^[39],面对有增无减的国际资源和市场利用风险^[40],创新方法定量评估供应链韧性与安全并揭示其地理资源含义,可以更好为后续提升供应链韧性、防控供应链风险提供依据。本文以大豆作为典型研究对象,深入分析全球供应链的潜在风险与韧性水平,边际贡献为:①在理论拓展层面,构建包括供应、采购、运输、需求4个阶段和出口商、物流与运输部门、进口商3个部门的全球供应链分析框架,拓展资源与经济地理研究,发展典型产品跨越地理空间的风险韧性治理理论。②在研究方法层面,一方面,采用两阶段数据包络分析方法评估大豆供应链风险状况,既能反映整体风险的时序变化,又能识别来源于各阶段的主要风险因子;另一方面,采用连贯数据包络分析方法评估疫情冲击下的大豆供应链韧性,弥补传统方法中以单个节点表现代表供应链整体的不足,更好反映供应链条上下游关联特征,更加符合经济现实。③在政策导向层面,从稳定性角度、供应链视角诊断中国的大豆进口安全水平,能够为国家层面优化大豆进口决策提供科学依据。

2 理论分析与评估方法

2.1 供应链风险与韧性的理论逻辑及其评估框架

结合中国大豆进口实践,可将大豆全球供应链界定为中国进口商从外部供应商采购大豆,将大豆运输到中国港口的整个过程,侧重跨境供应。相应地,全球供应链包括3个关键组成部门,即出口商、物流与运输部门、进口商,出口商负责大豆的生产和供给,进口商将各来源国的大豆通过相应的物流和运输部门转售至其本国的需求市场,进而供应链运行可分为4个关键阶段,即供应阶段、采购阶段、运输阶段和需求阶段(图1)。

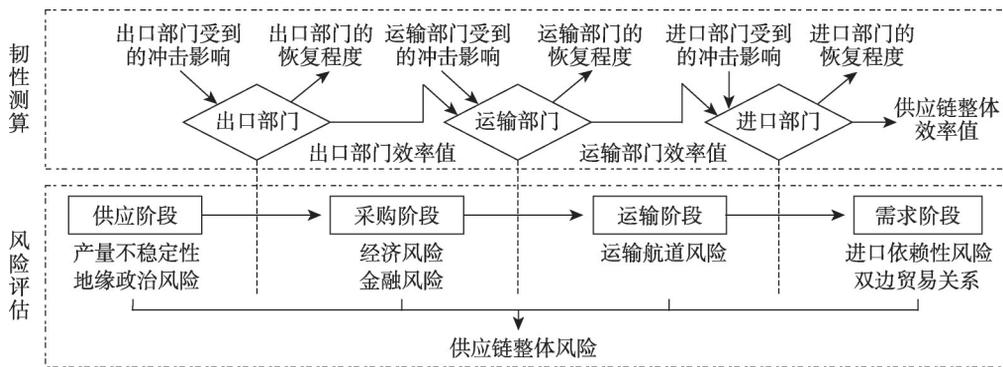


图1 研究框架

Fig. 1 Research framework

供应链风险主要指供应链各阶段潜在的风险因素，其中，供应阶段反映大豆的可获得性、采购阶段反映可接受性、运输阶段反映可及性、需求阶段反映可控性，影响海外大豆资源“买得到”“买得起”“运得回”。具体而言：① 供应阶段风险，可采用出口国生产风险、政治风险等进行测度，生产风险主要指主产国的产量波动性，产量波动越大，风险越高；政治风险侧重地缘政治风险，地缘政治风险越高，出口国政府可能会限制大豆贸易，极端情况下，正式的贸易关系可能会完全停止，导致供应短缺。② 采购阶段风险，可用出口国经济和金融环境风险进行衡量，其中经济风险反映中国大豆进口商进行贸易活动时面临的经济政策不确定性，金融风险主要是考虑到东道国的金融环境可能会对中国企业的经贸业务产生影响，一旦爆发影响范围较广的金融危机事件，将导致国际价格大幅波动，引发大豆进口供应链断裂。③ 运输阶段风险，主要考虑进口规模集中与远距离运输本身所存在的不确定性。④ 需求阶段风险，主要考虑双边依赖性与贸易关系指数，双边依赖性可反映进口来源国的断供能力，在极端情况下大豆或可被用作政治制裁的工具，进口国因此承担的风险更大；贸易关系指数反映了两国进行贸易往来的稳定性，往期的稳定贸易关系往往会形成较好预期，有利于后续交易活动的顺利开展。供应链韧性，重点衡量供应链各节点受到冲击后的抵抗能力和恢复能力，可根据3个节点构成的网链结构进行递进式测算。其中，东道国出口商主要涉及产品的生产与供给，关注生产及出口部门的韧性水平；跨境物流和运输部门在供应链中扮演中介角色，高效的运输部门是全球供应链稳定安全的重要推动力；中国进口商是供应链中的需求端主体，负责下游的分销及消费。由于供应链上下游存在投入产出关系，上游行业的产出用作下游行业的投入，上游部门应对风险的能力会影响下游部门面临的冲击程度，任何阶段的风险均可能向两端传播并产生涟漪效应，进一步塑造供应链的整体韧性水平。因此，东道国出口商韧性可以仅考虑东道国情况；跨境物流和运输部门韧性，除了考虑本部门韧性外，还需叠加考虑东道国出口商的韧性；中国进口商韧性，需要同时考虑东道国出口商、跨境物流和运输部门以及进口商本身的韧性。

借鉴相关研究^[23, 41-42]，利用2020年全球疫情暴发这一典型事件作为外部冲击变量，考察疫情前后的大豆供应链各部门产值变化情况，借此反映供应链韧性水平。如图2所示，横坐标、纵坐标分别代表时间和各环节产值， t_0 时外部冲击扰动发生， $t_0 \sim t_r$ 是扰动吸收阶段，在此期间大豆供应链的出口、运输、进口环节的生产值受到影响，分别表现为出口额、运输行业生产总值、进口额由 $N(t_0)$ 减少到 $N(t_r)$ ，之间的差值反映了供应链各环节对风险的抵抗能力，差值越大说明抵抗风险的能力越差。 $t_r \sim t_{rs1}$ 、 $t_r \sim t_{rs2}$ 、 $t_r \sim t_r$ 是冲击后的适应

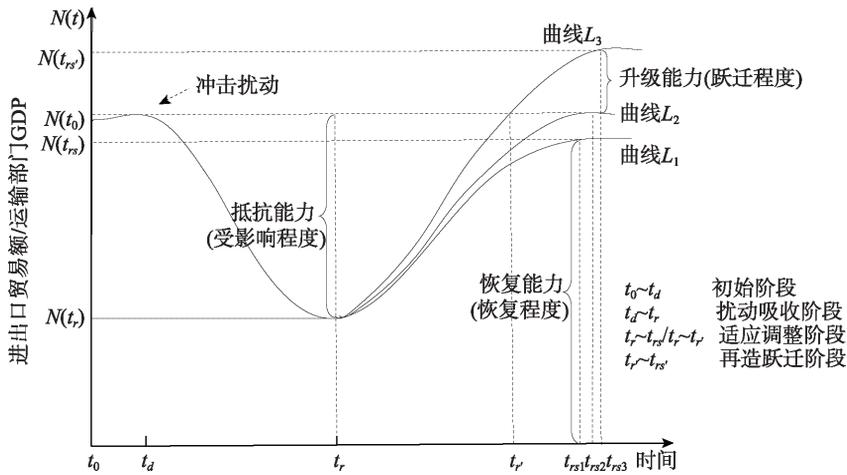


图2 供应链冲击扰动及恢复过程

Fig. 2 Supply chain shock disturbance and recovery process

调整阶段，在此期间大豆供应链各环节开始逐步恢复。若遭受冲击并恢复后各环节产值未超过冲击前的原始水平 ($N(t_{rs}) < N(t_0)$)， $N(t_{rs})$ 与 $N(t_r)$ 之间的差值反映了各环节的恢复能力 (曲线 L_1)；若 $N(t_{rs}) = N(t_0)$ ，说明各环节遭受冲击并经过适应调整后，产值仍能复原到冲击前的原始水平 (曲线 L_2)；若遭受冲击并恢复后产值超过冲击前的原始水平 ($N(t_{rs}) > N(t_0)$)，表明该环节能够实现一定程度的再造升级 (曲线 L_3)，从超越原水平 $N(t_0)$ 的时间点 t_r 起至 t_{rs3} 为再造跃迁阶段， $N(t_{rs})$ 与 $N(t_0)$ 之间的差值表示供应链的跃迁程度。

从供应链风险和韧性的关联互动性来看，供应链韧性是防范、抵御、治理风险的重要能力，决定了风险冲击在供应链中的传导范围、方向和强度。风险存在于供应链运行的各个阶段，本文从事前评估的角度识别供应链上存在的一系列可能影响其稳定运行的主要风险，这些风险一旦发生均会不同程度地影响供应链稳定运行，旨在揭示存在的潜在风险点，反映各类风险发生的概率。韧性是供应链上主体及结构抵御乃至治理风险的动态能力，可以用事前评估的方式揭示潜在的能力水平，但一定程度上容易与供应链风险评估相重叠，难以反映真正的能力表现。也可以用事后评估的方式，衡量供应链抵御乃至治理风险的能力，本文通过分析疫情这一典型风险事件发生前后供应链各节点贸易/产出的变化，揭示供应链对冲击的抵抗和恢复能力，可以评估风险冲击带来的实际后果，反映风险发生导致的损失。

2.2 变量选择及其测度方法

2.2.1 供应阶段因素

(1) 产量波动性。通过波动系数描述年间大豆总产出相对于产出趋势值的离散程度， $V_{it} = (Y_{it} - yf_{it}) / yf_{it}$ 。其中， V_{it} 表示*i*国*t*年大豆产量波动， Y_{it} 表示*i*国*t*年的实际大豆产量， yf_{it} 表示*i*国*t*年的趋势大豆产量。 V_{it} 的绝对值越大，表明大豆产量距离产出趋势值越远，离散程度越高，大豆产量波动性越大。首先通过OLS模型拟合出最优的大豆产量趋势曲线，计算出趋势值，进而测算其波动系数。其中，美国的回归方程中存在异方差，残差随着时间推移而增大，意味着可能存在某些因素 (例如生产技术、贸易政策等) 会随着时间变化而对美国大豆产量产生不同的影响，比如2018年贸易摩擦使得次年豆农生产积极性大幅降低，大豆产量减少19.8%。运用可行加权最小二乘法 (FWLS) 进行修正并得出优化的回归方程。

(2) 地缘政治风险。地缘政治风险可以看作国际贸易的隐性成本^[43]，对大豆供应链的影响主要取决于东道国的政策环境以及出口国在全球大豆供应市场中的地位：

$$PRR' = \sum_i (NSE'_i)^2 \times (100/prr'_i) \quad (1)$$

式中： PRR' 是大豆供应链地缘政治风险； NSE'_i 是*i*国*t*年净大豆出口量在世界净大豆出口量中所占的份额； prr'_i 是美国政治服务集团（PRS）发布的国家风险指南（the International Country Risk Guide）^①中披露的*t*年*i*国的政治风险指数。该指数反映了因东道国政策环境变化、政局不稳定等因素导致投资企业受到损失的可能性。

2.2.2 采购阶段因素

(1) 经济政策不确定性。采用Baker等测算的经济政策不确定性指数，反映中国大豆进口商进行贸易活动时面临的经济风险水平。该指标为衡量与政策相关的经济不确定性，利用3种类型的基础数据构建综合指数。以美国为例，首先索引10家大型报纸（如USA Today, The Miami Herald, The Chicago Tribune等），如果存在由于政策决定、政策行动、政策不作为、非经济因素等导致的经济不确定性，对其进行编码，得到新闻数量的不确定性指数；其次借鉴美国议会预算局的研究结果，得到联邦税收法律的不确定性指数；再次借鉴费城联储的专家预测问卷，通过对消费者物价指数、联邦政府支出、地方政府支出等指标的分散性分析，获得政策不确定性指数；最终根据上述3种数据得出一个综合指标。

(2) 金融风险。中国在拓展大豆进口来源市场的进程中，参与对外投资与贸易合作是稳定供应来源、提升供应链控制力的重要手段，东道国的金融环境往往是影响跨国企业经贸活动开展的重要变量。因此，通过引入进口份额的金融风险指数衡量大豆供应链面临的金融风险：

$$FIN' = \sum_i (X'_i/X'_T) \times (100/fin'_i) \quad (2)$$

式中： FIN' 为*t*年大豆进口供应链金融风险指数； X'_i 为*t*年从*i*国进口的大豆数量； X'_T 为*t*年中国进口大豆总量； fin'_i 为国家风险指南披露的*t*年*i*国的金融风险指数， fin'_i 分值越高，所面临的国际金融风险越小。通过数值转化， FIN' 分值越高，金融风险越大，供应链安全越容易受到威胁。

2.2.3 运输阶段因素 一般来说，进口规模越大、港口间距离越远，进口供应链面临的不确定性越大。此外，跨国运输对关键航道的依赖导致在遇到降雨减少、武装袭击等危机时船只搁浅或堵塞的概率增加，推升运输成本，扩大供应链稳定的不确定性。马六甲海峡是控制世界粮食贸易的关键中枢之一，发生中断或拥堵的可能性极大^[47-48]，2020年中国接近一半的进口大豆通过马六甲海峡运回中国，因此着重考虑通过马六甲海峡的运输风险，由于马六甲海峡由马来西亚、新加坡和印度尼西亚共同管理，使用这3个国家的平均“政治性军事指数”指数作为马六甲海峡风险的衡量标准：

$$TRR' = \sum_i (X'_i/X'_T) \times (D_i/D_{\max}) \times (6/MR)^\alpha, \quad D_{\max} = \max\{D_i\} \quad (3)$$

式中： TRR' 表示大豆供应链的运输风险； D_i 是从*i*国大豆出口港口到中国上海的航线距离； D_{\max} 是各国航线距离的最大值； MR 是国家风险指南中披露的“政治性军事指数”均值； α 是虚拟变量，如果航线未通过马六甲海峡，则 $\alpha=0$ ，否则， $\alpha=1$ 。

① 美国的“国际国别风险指南”（the International Country Risk Guide, ICRG）^[44]是目前较为权威的风险评级机构，ICRG每个月对140个国家和地区的政治、金融、经济风险进行预测和分析，其评级结果被称为“其他评级可以参考的标准”。政治风险通过政权稳定性、外部斗争、内部斗争、社会环境、投资概况、腐败状况、军事政治、宗教状况、法律秩序、种族状况、民主问责制、行政效率等12个层面评估了一国的政治稳定性；金融风险指数通过对经济增长、通货膨胀、财政平衡、转移支付、外债、国内总产值、流动性、货币稳定等方面进行分析，概括出5个细分指标：外债占国内生产总值的比率、外债占出口的比率、经常账户余额占出口的比率、汇率稳定程度、净国外流动性资产占每月进口的比率^[45-46]。

2.2.4 需求阶段因素

(1) 双边依赖性。根据相互依存理论, 进口国对国际资源的依赖往往伴随着出口国对国际需求市场的依赖, 进出口双方相对依赖性的不均衡关系决定了贸易中各主体的相对地位, 进而影响国际贸易利益的分割, 成为影响进口供应链安全的潜在风险因素。参考魏艳骄等^[49]对双边依赖性水平的测度方法:

$$dep_{ij} = r_{ij}/s_{ij} \quad (4)$$

$$r_{ij}^1 = X_i^h/Q_i^h \quad (5)$$

$$r_{ij}^2 = X_{ij}^h/X_i \quad (6)$$

$$r_{ij}^3 = EX_j^h/EX_w^h \quad (7)$$

$$r_{ij} = r_{ij}^1 \times r_{ij}^2 \times r_{ij}^3 \quad (8)$$

$$s_{ij}^1 = EX_j^h/Q_j^h \quad (9)$$

$$s_{ij}^2 = EX_{ij}^h/EX_j^h \quad (10)$$

$$s_{ij}^3 = X_i^h/X_w^h \quad (11)$$

$$s_{ij} = s_{ij}^1 \times s_{ij}^2 \times s_{ij}^3 \quad (12)$$

式中: X_i^h 和 Q_i^h 分别为 i 国 h 产品的总进口量和产量; r_{ij}^1 表示进口国对国际市场的依赖水平; X_{ij}^h 表示 i 国从 j 国进口 h 产品的进口量; r_{ij}^2 表示进口国对某一出口国的依赖水平; EX_j^h 、 EX_w^h 分别表示 j 国 h 产品的出口量和 h 产品的世界总出口量; r_{ij}^3 反映某一出口国出口产品的世界市场占有率; s_{ij}^1 表示出口国对国际市场的依赖水平; s_{ij}^2 表示出口国对某一进口国的依赖水平; s_{ij}^3 表示某一进口国的世界市场占有率。 dep_{ij} 为衡量双边依赖性水平的指标, $dep_{ij} > 1$, 说明进口国对进口来源国的依赖性超过后者对前者的依赖性; $dep_{ij} < 1$, 说明进口来源国的依赖性更强; $dep_{ij} = 1$, 说明进口国和出口国的相对依赖性持平。依赖性较低的国家往往拥有更高的权力, 可以用比其贸易伙伴更低的成本改变这种联系^[50]。双边依赖性考察进口国对出口国的相对依赖水平, 依赖水平越高, 进口面临的风险越大。

(2) 贸易关系指数。进口国与出口国的贸易相互依存关系及其不对称性是国际体系中权力分配的一个重要表征, 稳定的贸易关系有利于形成良好预期, 促使主体间形成更为紧密的供应链合作机制, 保障供应链持续稳定运转。大豆贸易关系指数可以被表示为:

$$TCD_i^t = (exp_i^t / texp_i^t) / \left(\sum_i x_i^t / X_w^t \right) \quad (13)$$

式中: exp_i^t 为从 i 国 t 年出口到中国的大豆数量; $texp_i^t$ 为 i 国 t 年大豆的总出口量; $\sum_i x_i^t$ 为 t 年中国进口大豆总量; X_w^t 为 t 年世界大豆进口总量。大豆贸易关系指数 $TCD_i^t > 1$ 时, 说明两国的大豆贸易联系比较紧密, $TCD_i^t \leq 1$ 说明贸易联系较少。在计算 t 年的大豆贸易关系指数时, 采用了 $t-1$ 年、 t 年、 $t+1$ 年的平均值, 以更好反映贸易关系的变化趋势。

2.3 评估方法与数据来源

2.3.1 评估方法

(1) 大豆全球供应链风险评估——两阶段DEA。由于主观权重可能会高估或低估某些指标, 从而导致评估结果产生偏差, 本文选择数据驱动的两阶段DEA模型, 以客观地确定权重^[51], 根据权重的不同判断主要影响因子, 既可以评估和比较供应链各阶段风险, 还可以结合可变权重和公共权重识别不同时期影响大豆全球供应链安全的动态关键风险因素^[52-53]。

为避免指标值为0而影响结果, 使用改进的归一化方法进行数据处理:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{ij}^-}{X_{ij}^+ - X_{ij}^-} \times 0.9 + 0.1 \quad (14)$$

式中： X_{ij} 是*i*年的第*j*个指标； X_{ij}^- 是第*j*个指标的最小值； X_{ij}^+ 是第*j*个指标的最大值； Z_{ij} 是归一化后*i*年第*j*个指标的值。

$$VES_i = \max \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_{ij} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_{kj} \leq 1, & k=1, 2, \dots, m \\ L_j \leq \frac{w_{ij} Z_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_{ij} Z_{ij}} \leq U_j \\ w_{ij} \geq 0, & j=1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (16)$$

$$\min \sum_{i=1}^m d_i \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n c_j Z_{ij} + d_i = VES_i, & i=1, 2, \dots, m \\ c_j \geq \varepsilon, d_i \geq 0, & j=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (18)$$

式中： VES_i 是*i*年可变权重的大豆全球供应链风险指数； m 、 n 分别为年份数和指标数； w_{ij} 是第*i*年第*j*个指标的权重； L_j 是第*j*个指标对大豆全球供应链风险贡献的下限； U_j 是第*j*个指标对大豆全球供应链风险贡献的上限； d_i 为*i*年可变权重下大豆全球供应链风险指数的偏差； c_j 是第*j*个指标的公共权重； ε 是公共权重的下界， ε 取0.05； CES_i 是*i*年具有公共权重的大豆全球供应链风险指数， $CES_i = c_j Z_{ij}$ 。

第1阶段：通过可变权重识别各年大豆全球供应链的主要风险因素，年份之间不能直接进行比较。该模型可以看作一个以 Z_{ij} 为多个输出和“1”为虚拟输入的输出最大化DEA模型。为避免某些指标值较高时其他指标被忽略，确保每个指标的贡献率都在合理的范围内，对权重进行限制（ $[L_j, U_j]=[0.05, 0.60]$ ）^[51]。第2阶段：通过①最大化所有决策单元的聚合指数、②最小化每个决策单元与供应链风险指数之和的偏差，能够分析大豆供应链风险的时序变化趋势。

(2) 大豆全球供应链韧性测度——CoDEA。CoDEA (Coherent Data Envelopment Analysis) 是一种基于传统DEA改进的方法，该方法可以基于虚拟互联概念在不存在中间措施的情况下评估一个复杂的供应链网络^[42]。传统DEA模型将供应链节点指定为决策单元，意味着以单个节点的表现代表了供应链的整体表现。从供应链的现实情况来看，上游部门的韧性会影响下游部门，出口商决定的出口数量和效率将直接影响物流与运输环节的价格和订单量，进而对物流运输部门的成本与收益产生冲击，具有较强韧性的物流运输部门能够提供更稳定高效的流通条件，从而提升下游进口商的效率和满意度。CoDEA的特点是将供应链中前一个节点的效率作为测算下一个节点效率时的输入指标之一，进而通过递进测算类推到最后阶段所得效率值即为供应链的整体韧性水平，更加准确且符合现实情况。CoDEA模型得到的全球供应链效率，通过引入虚拟中间测度考虑了不同决策单元之间的联系，能够反映各阶段节点韧性表现对整体供应链韧性的影响，可弥补传统DEA等方法在评估复杂的全球供应链韧性问题时所存在的不足^[41]，为评估中国的产业链供应链安全提供了比较可靠的理论依据。

考虑大豆供应链3个连贯阶段受冲击和恢复的过程，①利用出口商受到的冲击程度作为投入、实际的恢复率作为产出，使用传统投入导向的DEA方法得到东道国出口商效率，反映了东道国出口商的韧性水平。在传统的DEA方法中，利用输入量 $X \in x^m$ 来传递输出量 $Y \in y^s$ ， m 、 s 分别表示投入和产出数量， x_{ij} 表示*j*单元第*i*个输入的值， y_{ij} 表示*j*单元第*r*个输出的值。每个DMU的效率得分 θ 和规模收益不变的投入导向公式为：

$$\theta = \frac{\sum_{r=1}^s \mu_r y_r}{\sum_{i=1}^m v_i x_i} \quad (19)$$

$$\min \theta - \varepsilon \left(\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \quad (20)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{i0}, & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{r0}, & r = 1, 2, \dots, s; j = 1, 2, \dots, n \\ \lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中： μ_r 、 v_i 分别是输出和输入权重； n 是一组DMU中的单元数； λ_j 是非负标量； ε 是非阿基米德无穷小； s_i^- 、 s_r^+ 分别是输入和输出的松弛量。在最优性结果（ $\theta=1$ ）和所有松弛为零的情况下，DMU被认为是CRS有效的，并且在CRS边界上运行。

② 将东道国出口商的效率得分视为虚拟中间投入，结合物流运输部门受到的冲击程度作为投入、实际恢复率为产出，得到物流运输部门效率，物流运输部门效率越高意味着物流行业更强的稳健性和柔韧性。③ 将物流运输部门效率和进口商受到的冲击程度作为投入、进口商恢复率作为产出，得到全球供应链效率，反映整体链条的韧性水平。当供应链效率为1时，说明供应链系统韧性较强，供应链越安全。

$$\min \phi - \varepsilon \left(\sum_{i=1}^u s_i^- + \sum_{t=1}^p z_t^- + \sum_{r=1}^v s_r^+ \right) \quad (22)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^h \rho_j \hat{y}_{rj} - s_r^+ = \hat{y}_{r0}, & r = 1, 2, \dots, v; j = 1, 2, \dots, h \\ \sum_{j=1}^h \rho_j \hat{x}_{ij} + s_i^- = \phi \hat{x}_{i0}, & i = 1, 2, \dots, u \\ \sum_{j=1}^h \rho_j \hat{\theta}_{tj} + z_t^- = \phi \hat{\theta}_{t0}, & t = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (23)$$

$$\rho_j, s_i^-, z_t^-, s_r^+ \geq 0 \quad (24)$$

式中： ϕ 为每个DMU的效率得分； h 是一组中游或下游节点的数量； ρ_j 是非负标量； u 、 v 分别表示投入和产出数量； \hat{x}_{ij} 表示 j 单元第 i 个输入值； \hat{y}_{rj} 表示 j 单元第 r 个输出值； θ_i 为每个初始或子链 p 的效率。从传统DEA模型的角度来看，投入应是效率评估的递减因素。因此 θ_i 被非线性单调递减变换为 $\hat{\theta}_i = 1/\theta_i$ ，将不期望的输入（需要增加）改为期望的输入（需要减少）； z_t^- 是 $\hat{\theta}_t$ 的松弛量。第3阶段以此类推。基于CoDEA模型的投入产出逻辑，当国际贸易供应链在重大突发事件冲击下，受损率越低（低输入）且恢复率越高（高输出）时，该供应链韧性评估得分保持一个较高的水平（高效率），意味着该供应链不易受到重大突发事件所产生的风险影响。

本文选取2020年全球疫情这一突发事件作为冲击变量，冲击的影响通过大豆进出口贸易额和运输部门GDP变化的比率反映，恢复能力通过在可接受的恢复时间结束时大豆贸易额和运输部门GDP变化的比率反映。考虑2018年中美贸易摩擦的影响，2018年7月到2019年12月中国对美国进口大豆征收25%关税，很大程度影响了大豆全球供应链格局。因此在考察疫情的影响时，选择2017年作为冲击事件前的基准情况，更能在剔除贸易摩擦的影响基础上反映疫情本身的冲击，2020—2021年对应图2中的扰动阶段，2022年为恢复阶段。考虑决策单元相较投入产出指标数量较少，引入IDMU（Ideal DMU）和ADMU（Anti-ideal DMU）两个虚拟决策单元。IDMU包含所有决策单元中的最低投入值和最高产出值，ADMU包含所有决策单元中的最高投入值和最低产出值，可用于解决传统DEA模型在计算少量DMU时识别能力丧失的缺点^[54]。

2.3.2 数据来源 大豆产量数据来自FAOSTAT数据库，进出口贸易数据来自于UNComtrade数据库，地缘政治风险指数、金融风险指数和政治性军事指数来源于美国政治服务集团

发布的国家风险指南,经济政策不确定性来自于Policyuncertainty.com,港口距离来自Searates.com,各国运输部门GDP来源于Trading Economics数据库。中国于2001年正式加入世界贸易组织,结合考虑各指标数据的可获得性,研究时段为2000—2020年。

3 研究结果

3.1 中国进口大豆的全球供应链风险

3.1.1 供应链风险总体演变特征

总体来看,中国进口大豆的全球供应链风险整体呈现显著的上升趋势,由2000年的0.27增加为2020年的0.97,年均递增7.3%(图3)。大豆进口供应链风险主要来自于需求阶段,贡献率保持在41.0%~58.2%,2020年需求阶段的风险指数为0.56,占58.2%。采购阶段是第2个主要风险来源,最低年份为2006年,风险指数为0.04,占8.0%,最高年份为2020年,风险指数为0.32,占32.7%。供应和运输阶段的风险较小但有明显增长,风险指数分别由2000年的0.07、0.01增加为2020年的0.05、0.04,2020年对总风险的贡献率为5.0%、4.1%。

就关键风险因子来看(表1),双边贸易关系在2000—2020年间的7个年份权重最高,经济政策不确定性在2000—2020年间的6个年份权重最高,是大豆进口供应链的长期风险来源;海运风险、地缘政治风险和产量稳定性分别在2000—2020年间的4个、3个、2个非连续年份的权重最高,是影响大豆进口供应链安全的短期因素;金融风险仅在2012年为权重最高的指标,各年权重均值为0.30,相比其他指标最低,表明金融风险对大豆进口供应链安全的威胁较小。

从时序变化来看(表1),2001—2004年和2005—2008年影响大豆进口供应链安全的关键风险因素按照供应、采购、运输、需求阶段的顺序经历了两轮转换,说明大豆供应链风险存在此消彼长的周期式演变规律,并且可能存在部门间的递进式影响;2009—2012年,受全球金融危机影响,各国政治经济格局复杂性增加,大豆进口采购阶段风险对供应链安全的威胁最为突出;2013—2017年中国进口大豆来源于巴西的份额超过美国,与出口国贸易关系的稳定性对于保障大豆进口供应链安全的重要性凸显;2018—2020年中美贸易摩擦和全球疫情等事件暴发,导致大豆供应阶段和运输阶段风险陡增。

3.1.2 供应链各阶段风险演变特征 分阶段来看,供应阶段的东道国大豆产量稳定性和地缘政治风险均呈现波动趋势。一方面,主要出口国大豆产量整体显著增长,产量稳定性不断波动。美国、巴西、阿根廷的大豆产量波动系数介于0.01~0.43之间,均值分别为0.08、0.09、0.15。阿根廷的大豆产量相比巴西和美国更加不稳定,比如2018年严重的干旱气候导致阿根廷大豆减产31.3%。另一方面,由于较高的依存度和集中度,中国进口大豆的地缘政治风险总指数在0.38~0.59之间浮动,均值为0.44,2018年受中美贸易摩擦影响达到峰值0.59,2020年降为0.52。进口自巴西和美国的大豆供应链地缘政治风险分别呈现波动上升和波动下降的趋势,均值为0.21,自阿根廷进口大豆的地缘政治风险值较小,均值为0.02。

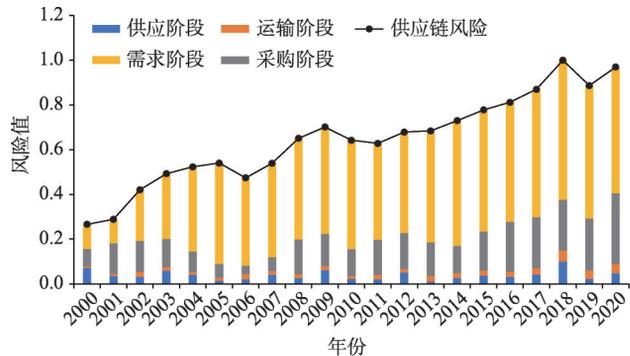


图3 2000—2020年中国大豆全球供应链风险演变情况
Fig. 3 Evolution of China's global soybean supply chain risks from 2000 to 2020

表1 2000—2020年中国大豆全球供应链风险因素权重
Tab. 1 Weight of risk factors in China's global soybean supply chain from 2000 to 2020

权重类别	年份	供应阶段		采购阶段		运输阶段	需求阶段	
		产量稳定性	地缘政治风险	经济政策不确定性	金融风险	海运风险	双边依赖性	贸易关系指数
可变权重	2000	0.056	0.876	0.950*	0.103	0.950*	0.050	0.950*
	2001	0.143	0.950*	0.118	0.135	0.304	0.525	0.423
	2002	0.315	0.745	0.950*	0.093	0.119	0.052	0.165
	2003	0.061	0.135	0.135	0.947	0.950*	0.215	0.104
	2004	0.091	0.197	0.204	0.400	0.175	0.178	0.950*
	2005	0.950*	0.950*	0.299	0.188	0.240	0.950*	0.070
	2006	0.847	0.132	0.950*	0.529	0.113	0.207	0.936
	2007	0.446	0.950	0.256	0.337	0.950*	0.136	0.074
	2008	0.144	0.736	0.096	0.323	0.154	0.423	0.799*
	2009	0.074	0.090	0.950*	0.103	0.934	0.385	0.064
	2010	0.180	0.276	0.124	0.506	0.347	0.950*	0.740
	2011	0.197	0.250	0.950*	0.340	0.138	0.381	0.157
	2012	0.064	0.162	0.574	0.950*	0.146	0.296	0.066
	2013	0.467	0.350	0.103	0.183	0.206	0.236	0.729*
	2014	0.498	0.118	0.402	0.152	0.112	0.109	0.663*
	2015	0.168	0.116	0.267	0.144	0.102	0.107	0.685*
	2016	0.213	0.119	0.814*	0.471	0.114	0.164	0.057
	2017	0.186	0.259	0.066	0.152	0.092	0.182	0.638*
	2018	0.150	0.600*	0.079	0.050	0.050	0.073	0.050
	2019	0.950*	0.140	0.060	0.087	0.693	0.950*	0.044
2020	0.215	0.068	0.050	0.069	0.747*	0.499	0.159	
公共权重		0.050	0.050	0.281*	0.050	0.050	0.050	0.593*

注：*表示当年权重排名第1的指标，即当年主要风险因素。可变权重可用于反映2000—2020各年度中国大豆全球供应链的主要风险因素。权重越大，当年该风险越突出。可变权重仅可比较某一年份中的各项风险因素大小，揭示当年关键的风险点，由此计算的整体风险值在各年间是不可比的。公共权重给各风险因素在不同年份赋予相同权重，进而根据各指标历年的风险值，乘以相应的权重，可比较的各年大豆供应链整体风险水平，揭示总风险的时序变化(图3)。

采购阶段的经济风险和金融风险均有明显上升趋势。巴西、美国、阿根廷2020年的经济政策不确定性指数相比2000年分别上涨了22.9%、26.6%和34.2%，年均值分别为2.16、2.10和2.08。在此影响下，国际大豆市场寡头垄断、原油价格波动带动豆油消费、金融资本投机导致汇率频繁波动等因素引发的大豆价格波动风险提高日益成为影响进口可获性的关键因素。2020年起进口大豆价格波动加剧，自美国进口大豆价格波动较频繁、幅度更大，波动指数均值为0.034；相比之下，自阿根廷和巴西进口大豆价格波动频率和幅度相对较小，波动指数均值分别为0.029和0.022。

运输阶段风险整体增加，由2000年的1.01上涨到2020年的1.25，年均增长1.1%。全球变暖和世界谷物贸易增长强劲背景下，关键航道气候变化、主产国港口运力挤兑等成为推升大豆运输风险的主要因素。一方面，巴西农产品出口量攀升导致港口拥堵风险增加，比如桑托斯港承接了巴西约40%玉米出口、76%原糖出口和23%大豆出口，三者出口高峰有一定重合，每年7月起港口运力挤兑矛盾明显；另一方面，全球干旱事件的频率和严重程度增加，比如2023年7月降雨不足导致巴拿马运河水位降低，造成可通过船只减少，从

美国海湾和巴西北部运载大豆通过巴拿马运河运回的船只等待时间延长、过境成本显著增加。需求阶段,中国对国际大豆资源的总体依赖性有所提升,与主要出口国的贸易关系变化存在差异。中国与巴西的大豆贸易关系指数和双边依赖性显著增加,分别由2000年的0.75和2.82涨到2020年的1.23和4.79,年均增长2.7%和5.9%;随着中国进口大豆逐渐转向巴西市场,中国对美国大豆的依赖逐渐削弱,贸易关系稳定性和双边依赖性分别由2000年的0.80和13.33下降到2020年的0.73和2.42。中国自1996年取消大豆进口配额,进口关税下调至3%,之后除了中美贸易摩擦期间提高关税外再未进行调整,大豆长期以来是中国对外开放程度最高的农产品之一。受国内市场开放和需求高企影响,拉动以巴西为代表的主产国大豆产量不断攀升,相应地,出口国对中国需求市场的依赖性凸显,进出口双方的相对依赖关系趋于均衡。中国对美国大豆的双边依赖性由2000年的13.33下降到2020年的2.42;对巴西大豆的依赖性在中美贸易摩擦期涨到峰值6.09,之后下降到4.79,可以看出,中国在大豆国际市场中扮演着越来越重要的需求主体的角色,双边贸易的稳定性和韧性由于这种相互依存关系而得以加强。

3.2 中国进口大豆的全球供应链韧性

3.2.1 东道国出口商韧性 疫情影响下的贸易额变化显示,贸易冲击对东道国大豆出口商的影响存在非同步特征,出口国在其集中出口阶段能更好抵御突发风险扰动。美国大豆出口额在2020年上半年相比2017年明显减少,巴西和阿根廷的大豆出口额则在2020年下半年明显减少。结合各国大豆生产存在季节性差异、出口周期具有较强互补性(巴西主要从3—9月出口大豆,美国主要从10月到次年4月出口大豆)的禀赋特征,说明集中出口的规模效益有利于增强跨国供应链对风险的抵御能力。

东道国出口商韧性测度结果来看^②,各国大豆出口商韧性存在显著差异,呈现加拿大、巴西、阿根廷、美国依次递减趋势。其中,2020年、2021年、2022年巴西对华大豆出口额是2017年的0.96倍、1.24倍、1.75倍,受到冲击较小,恢复较快;同期美国对华大豆出口额是2017年的0.99倍、0.71倍和1.63倍,受到冲击较大,恢复较慢;加拿大大豆出口商受到的削弱较为微弱,2020年对华出口是2017年的0.98,2021年回升到1.38,但由于中国自加拿大进口大豆的份额较少,仅能说明加拿大是一个可称稳定的大豆供应来源,对中国大豆进口布局优化的贡献还需考虑未来生产和供给能力(表2)。

3.2.2 东道国出口和跨境运输部门韧性 东道国出口和跨境运输部门韧性存在显著差异,北美国家较南美国家运输效率更高,呈现美国、加拿大、巴西、阿根廷依次递减趋势(表3)^③。疫情期间各国采取的封锁、隔离政策直接影响物流运输工作的正常开展,对跨境供应链的中间环节产生明显的负面冲击。美国五大湖地区和北部地区的大豆分别依赖驳船和铁路运至墨西哥湾港口和西南岸港口,再经巴拿马运河和太平洋运往中国。铁路和驳船之间竞合关系的平衡促使形成美国国内高效率、低成本的运输系统,进而降低中间商利润、提高出口价格,是美国大豆在全球市场上保持竞争优势的重要来源之一。相比之下,巴西粮食运输效率较低,在遭受冲击时运输部门可能成为制约巴西大豆供应链韧性的关键短板。由于国内主产区与驳船和铁路码头之间的距离较远,铁路和内陆水道

^② 根据模型设定,冲击的扰动吸收阶段应出现产值的明显下降,适应调整阶段产值重新回升。巴西和加拿大2020年出口额分别是2017年的0.96倍、0.98倍,2021年出口额分别是2017年的1.24倍、1.38倍。美国和阿根廷2020年出口额分别是2017年的0.99倍、0.91倍,2021年出口额分别是2017年的0.71倍、0.99倍。因此,出口商韧性测算模型中,产出指标为各国2022年对华大豆出口额与2017年之比,巴西和加拿大的投入指标采用1—2020年大豆出口额与2017年之比,美国和阿根廷的投入指标为1—各国2020年和2021年对华大豆出口额与2017年之比的均值。

^③ 运输部门产出指标为2022年各国物流运输部门GDP与2019年之比,投入指标为1—2020年和2021年各国物流运输部门GDP与2019年之比的均值以及上一阶段出口商效率的倒数。

表 2 出口商效率得分

Tab. 2 Efficiency scores of export sectors

东道国	月份	2020年、2021年大豆出口额 与2017年之比的均值	2022年大豆出口额 与2017年之比	产出指标	投入指标	效率值	效率排名
美国	1月	0.94	1.12				
	2月	0.41	0.92				
	3月	0.34	1.69				
	4月	0.39	3.26				
	5月	0.28	2.27				
	6月	0.50	1.27				
	7月	0.47	1.76	1.63	0.15	0.12	5
	8月	1.22	1.75				
	9月	1.11	0.33				
	10月	1.36	1.56				
	11月	1.43	1.62				
	12月	1.74	2.01				
巴西	1月	0.63	3.36				
	2月	0.95	2.09				
	3月	1.09	1.53				
	4月	1.34	1.42				
	5月	1.29	1.31				
	6月	1.30	1.70				
	7月	1.35	1.70	1.75	0.04	0.44	3
	8月	1.04	1.49				
	9月	1.13	1.21				
	10月	1.27	2.29				
	11月	1.11	1.81				
	12月	0.68	1.03				
阿根廷	1月	-	-				
	2月	-	-				
	3月	-	-				
	4月	0.50	0.25				
	5月	0.75	0.13				
	6月	0.50	0.25				
	7月	1.57	1.32	1.79	0.05	0.37	4
	8月	1.75	0.52				
	9月	0.50	1.65				
	10月	0.30	6.84				
	11月	-	-				
	12月	-	-				
加拿大	1月	0.22	0.11				
	2月	0.18	0.27				
	3月	1.25	1.23				
	4月	0.30	0.29				
	5月	0.94	0.80				
	6月	1.63	0.82				
	7月	2.90	1.25	1.09	0.02	0.61	2
	8月	5.07	4.81				
	9月	0.68	0.07				
	10月	0.25	0.76				
	11月	0.27	1.55				
	12月	0.45	1.08				
		DMU1		1.79	0.02	1.00	1
		DMU2		1.09	0.15	0.08	6

表3 东道国出口和跨境运输部门效率
Tab. 3 Efficiency of export sectors and cross-border transportation sectors

东道国	年份	物流运输部门GDP	产出指标	投入指标1	投入指标2	效率值	效率排名					
美国	2019	2635	1.06	0.02	8.47	0.99	2					
	2020	2417										
	2021	2742										
	2022	2797										
巴西	2019	33683	1.07	0.07	2.25	0.73	4					
	2020	29406										
	2021	33196										
	2022	35986										
阿根廷	2019	226949	0.96	0.14	2.67	0.55	5					
	2020	188424										
	2021	201655										
	2022	217367										
加拿大	2019	1083048	0.92	0.18	1.64	0.86	3					
	2020	881472										
	2021	900966										
	2022	991034										
	DMU1							1.07	0.02	1.64	1.00	1
	DMU2							0.92	0.18	8.47	0.17	6

注：产出指标和投入指标1均为无单位的相对变化量，故各国物流运输部门GDP的单位采用Trading Economics数据库中直接导出的各国货币单位(USD Billion、BRL Million、ARS Million、CAD Million)，未统一换算为美元。

基础设施能力有限，巴西严重依赖卡车将粮食运往港口，2020年巴西大豆出口到中国的运输成本为92.04美元/t，较美国高12.61美元/t^④。

3.2.3 大豆全球供应链整体韧性 中国进口大豆的全球供应链韧性呈现巴西、美国、加拿大、阿根廷依次递减趋势^⑤，说明中国大豆进口需求对于来自巴西的供应链粘性较强，在遭受风险冲击之后能迅速恢复甚至达到更高水平（表4）。结合上游部门结果来看，美国的出口和运输部门效率均高于巴西，但供应链整体效率低于巴西，表明巴西大豆供应链在进口商的韧性表现更为突出。受中国需求拉动，巴西大豆种植面积不断扩张，推动产量大幅提升，自2009年起巴西出口到中国的大豆比例超过中国占世界进口大豆的比例，2022年巴西生产的大豆57%用于出口，其中68%的出口大豆运往中国，2023年巴西大豆丰收带来的价格优势更是在传统淡季表现出比美国更强的市场竞争力。可以看出，中国与巴西的大豆贸易相互依存关系不断加深，促使自巴西进口大豆供应链的整体韧性水平较高。

4 结论与讨论

稳定的供应链是耦合农产品供求的重要基石，不稳定不确定的外部环境凸显了供应链安全的重要性。本文以大豆为例，首次构建了中国进口大豆的全球供应链分析框架，

④ 美国大豆出口运输成本以爱荷华州达文波特的数据计算，巴西大豆出口运输成本以北马托格罗索州的数据计算，数据来源于美国农业部(<https://agtransport.usda.gov/stories/s/fvuv-b6b2>)。

⑤ 产出指标为2022年中国自各国大豆进口额与2017年之比，投入指标为1-2020年和2021年中国自各国大豆进口额与2017年之比的均值以及上一阶段东道国出口和跨境运输部门效率的倒数。

表 4 供应链整体效率

Tab. 4 Overall efficiency of supply chains

东道国	月份	2020年、2021年中国自各国大豆 进口额与2017年之比的均值	2022年中国自各国大豆 进口额与2017年之比	产出指标	投入指标1	投入指标2	效率值	效率排名
美国	1月	0.75	1.27	1.69	0.18	1.01	0.63	3
	2月	0.95	1.01					
	3月	1.17	0.96					
	4月	0.92	1.37					
	5月	0.28	1.98					
	6月	0.45	3.74					
	7月	0.11	1.43					
	8月	0.51	2.84					
	9月	0.73	2.17					
	10月	1.66	0.97					
	11月	1.16	1.14					
	12月	1.17	1.44					
巴西	1月	0.96	12.15	2.71	0.07	1.37	0.94	2
	2月	0.63	2.64					
	3月	0.51	2.43					
	4月	1.35	1.62					
	5月	1.04	1.58					
	6月	1.40	1.94					
	7月	1.21	1.67					
	8月	1.21	1.83					
	9月	0.97	1.65					
	10月	0.65	1.39					
	11月	0.77	1.48					
	12月	0.47	2.07					
阿根廷	1月	-	-	0.27	0.32	1.81	0.05	5
	2月	-	-					
	3月	-	-					
	4月	0.46	-					
	5月	-	-					
	6月	0.28	-					
	7月	0.77	0.16					
	8月	0.41	0.26					
	9月	1.17	0.85					
	10月	1.00	0.33					
	11月	-	-					
	12月	-	-					
加拿大	1月	0.04	0.37	1.01	0.07	1.17	0.37	4
	2月	0.15	0.16					
	3月	0.28	0.13					
	4月	2.16	3.89					
	5月	0.26	0.49					
	6月	2.64	3.23					
	7月	0.72	0.38					
	8月	1.58	0.99					
	9月	2.53	1.03					
	10月	0.32	0.13					
	11月	0.27	0.07					
	12月	0.27	1.20					
		DMU1		2.71	0.07	1.01	1.00	1
		DMU2		0.27	0.32	1.81	0.05	6

评估了大豆供应链的潜在风险，测算了全球疫情影响下大豆供应链的实际韧性，揭示供应链脆弱性的主要来源和关键短板，以便更好地应对突发风险事件的冲击。研究结果为：

(1) 全球供应链联结跨越国境的供求两端，是由上下游主体相互联系形成的网络结构，任何环节的风险均可能导致供应链受损甚至断裂。韧性反映供应链结构应对风险的能力，上游节点的韧性表现会影响下游节点，共同决定全球供应链的整体韧性。因此，供应链效率提升和安全保障需要依靠各环节各主体的协同合作尤其是国家主体的秩序共建。

(2) 全球大豆生产和出口的高度集中，决定了一国供应链出现问题将影响全球贸易投资格局的变化。中国进口大豆的全球供应链风险总体呈现不断上升趋势，以强双边依赖性与弱贸易关系为基础的需求阶段风险尤为显著，2022年占总风险的比例达到58.2%，短期的海运梗堵、地缘竞争、产量波动等因素也会显著冲击大豆进口的效率和成本。非传统风险叠加背景下，长期布局、短期应对结合的供应链风险防范与治理系统亟待构建。

(3) 来自不同国家的大豆进口供应链风险和韧性存在异质性。美国大豆供应链的出口和运输环节应对风险的能力更强，中国进口商对巴西大豆的粘性更强。巴西凭借其地理位置、气候和耕地资源优势，具备较强的大豆生产比较优势和出口能力，与中国大豆贸易关系的相互依存程度更高，但目前物流运输环节建设较为薄弱，尽管大豆持续丰收带来的价格优势能够一定程度弥补运输效率损失，但长远来看流通的脆弱性可能成为制约自巴西进口大豆供应链的关键短板，值得各方关注。

(4) 尽管中国对国际大豆资源的进口依赖性有所提升，作为主要进口国的重要地位也不断显现。各出口国在中国大豆进口市场中所占份额此消彼长、竞争激烈，对中国的出口依赖性不断增强。进出口双方相互依存关系的均衡化趋势有利于稳定市场预期、平滑价格波动，对提升供应链安全水平有重要作用。因此，以更好应对风险为目标的进口策略优化不仅限于多元来源的开拓，还应重视探寻与已有以及待拓展的贸易伙伴建立更紧密、高效、韧性的联结关系的模式与机制。

本文研究具有重要的政策含义：① 在战略层面高度重视全球供应链风险持续上升问题。当今世界正处于百年未有之大变局，统筹考虑供应链韧性与安全，对于保障国家粮食安全尤其是进口依赖型农产品的稳定安全供应至关重要，需要在综合考虑国内资源本底和进口经济成本的基础上，妥善处理好本地化生产与多元化进口布局的关系。② 瞄准关键影响因子出台长短结合的应对策略。瞄准提升抵抗风险能力和恢复重构能力，在短期内重点做好主产国政治、经济、气候等方面的实时监测，建立风险评级和分类，强化对区域减产、海运阻塞、贸易制裁等风险的应对能力；长远来看，需要重点做好战略层面的布局优化和系统构建，稳定美国、巴西等大豆市场，尤其做好巴西等主产国与潜在生产国的生产、运输、经销等各环节各主体的高效联结，扶持壮大大型粮油企业，构建自主可控的全球大豆供应链体系，提高对供应链条的掌控力。③ 因地制宜做好差异化供应链布局。合理利用北美和南美国家在大豆生产上的季节互补性进行进口布局，形成上半年以巴西为主、下半年以美国为主的互补型全球供应格局，并不断扩大对阿根廷、乌拉圭、加拿大、俄罗斯等国家的大豆产业投资与进口规模，长期探索对南美洲如巴拉圭和玻利维亚、中亚如哈萨克斯坦和缅甸、俄罗斯远东地区、东南亚如印度等大豆生产潜力地区的有效投资模式。④ 补齐不同来源供应链的关键短板。针对来源于美国的大豆供应链，在维护两国大豆贸易稳定的基础上，重点关注防范其地缘政治风险与政策不确定性的波动；针对以巴西为代表的其他大豆供应链，建议从长期视角布局主要海运路线的

物流设施建设,建设收储、港口、航运等方面的战略性物流通道,着力提升供应链运输效率、防范供应链梗阻风险。

受数据资料可获得性等方面的限制,本文在研究供应链风险时,仅考虑了国家层面的风险因素,未考虑企业层面的具体供应链风险,产业部门韧性仅考虑了贸易额的变化情况,未考虑价格、就业等方面的冲击影响。未来全球供应链风险韧性与治理领域仍有广阔的研究空间,比如,大豆贸易背后昭示的自然资源治理问题存在稀缺性、空间性、系统复杂性和问题应对性,亟待结合地理学及相关学科^[55],利用“立体思维模式”,围绕大豆资源的需求数量和质量、从哪里来到哪里去的完整线索、高效利用模式等关键战略问题进行系统研究,进而从顶层设计到具体实施,促使形成技术、产业、政策在空间上的有效集成^[56]。再如,突发冲击在农产品供应链中的传递方式,风险在供应链交互网络中相互影响传染、叠加变异的过程,以及供应链上的投入产出关系、主体行为决策、中断缓解策略对风险传导产生的影响及其作用机制仍未厘清,针对农产品供应链的多层关联复杂网络建模、风险动态演化过程探索以及基于多场景仿真的韧性评价等还需进一步深入研究。

参考文献(References)

- [1] Tan Minghong, Li Xiubin. Paradigm transformation in the study of man-land relations: From local thinking to global network thinking modes. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(10): 2333-2342. [谈明洪,李秀彬.从本土到全球网络化的人地关系思维范式转型. *地理学报*, 2021, 76(10): 2333-2342.]
- [2] Chen Yangfen, Qian Jingfei. China's agricultural opening-up during the 14th Five-Plan period: Situation, problem and countermeasures. *Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition)*, 2021(1): 49-56, 175-176. [陈秧分,钱静斐.“十四五”中国农业对外开放:形势、问题与对策. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2021(1): 49-56, 175-176.]
- [3] Hong Liu, Zhao Xiaobo, Wang Shouyang, et al. Key scientific issues on supply chain resilience and security. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(3): 418-428. [洪流,赵晓波,汪寿阳,等.供应链韧性与安全中的关键科学问题. *中国科学基金*, 2023, 37(3): 418-428.]
- [4] Mao Xiyan, He Canfei. The new narrative of economic globalization and the new trends in economic geography. *Geographica Sinica*, 2023, 78(12): 2905-2921. [毛熙彦,贺灿飞.经济全球化新叙事与中国经济地理学发展新趋势. *地理学报*, 2023, 78(12): 2905-2921.]
- [5] Sun X L, Liu C, Chen X W, et al. Modeling systemic risk of crude oil imports: Case of China's global oil supply chain. *Energy*, 2017(121): 449-465.
- [6] Chen S, Song Y, Ding Y T, et al. Using long short-term memory model to study risk assessment and prediction of China's oil import from the perspective of resilience theory. *Energy*, 2021, 215(15): 119152. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119152.
- [7] Zhao C F, Chen B. China's Oil Security from the supply chain perspective: A review. *Applied Energy*, 2014, 136(31): 269-279.
- [8] Zhang H Y, Ji Q, Fan Y. An evaluation framework for oil import security based on the supply chain with a case study focused on China. *Energy Economics*, 2013, 38: 87-95.
- [9] Mao rui, Zhang bin. China's export competitiveness: Facts, causes and changing trends. *The Journal of World Economy*, 2013, 36(12): 3-28. [茅锐,张斌.中国的出口竞争力:事实、原因与变化趋势. *世界经济*, 2013, 36(12): 3-28.]
- [10] Kee H L, Tang H W. Domestic value added in exports: Theory and firm evidence from China. *American Economic Review*, 2016, 106(6): 1402-1436.
- [11] Cui Xiaomin, Xiong Wanting, Yang Panpan, et al. Measuring global supply chain fragility: Evidence from trade network analysis. *Statistical Research*, 2022, 39(8): 38-52. [崔晓敏,熊婉婷,杨盼盼,等.全球供应链脆弱性测度:基于贸易网络方法的分析. *统计研究*, 2022, 39(8): 38-52.]
- [12] Luo Chaoliang, Fu Zhengping, Liu Bing, et al. Research on the evolution of strategic emerging industries' international trade network and its dynamic mechanism. *Journal of International Trade*, 2022(3): 121-139. [罗超亮,符正平,刘冰,等.战略性新兴产业国际贸易网络的演化及动力机制研究. *国际贸易问题*, 2022(3): 121-139.]

- [13] Lv Yue, Deng Lijing. Striving to improve the resilience and security of the industrial chains and supply chains: Measurement and analysis on China's automobile industrial chain. *Journal of International Trade*, 2023(2): 1-19. [吕越, 邓利静. 着力提升产业链供应链韧性与安全水平: 以中国汽车产业链为例的测度及分析. *国际贸易问题*, 2023(2): 1-19.]
- [14] Zhu Yongguang, Zhang Wufeng, Wang Di, et al. Resilience evaluation of China's copper resources industrial chain and supply chain. *Resources Science*, 2023, 45(9): 1761-1777. [朱永光, 张伍丰, 王迪, 等. 中国铜资源产业链供应链韧性评价. *资源科学*, 2023, 45 (9): 1761-1777.]
- [15] Zhou Meijing, Wang Fuyuan, Shao Liuguo. Resilience evaluation of the rare earth supply chain in countries (regions) outside China: A case study of NdFeB permanent magnet. *Resources Science*, 2023, 45(9): 1746-1760. [周美静, 王甫园, 邵留国. 中国境外国家(地区)稀土供应链韧性评估: 以钕铁硼永磁体为例. *资源科学*, 2023, 45 (9): 1746-1760.]
- [16] Yu Yu, Ma Daipeng, Wang Xianmei. International trade network resilience for products in the whole industrial chain of iron ore resources. *Resources Science*, 2022, 44(10): 2006-2021. [于娱, 马代鹏, 王贤梅. 国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性. *资源科学*, 2022, 44(10): 2006-2021.]
- [17] Ojha R, Ghadge A, Tiwari M K, et al. Bayesian network modelling for supply chain risk propagation. *International Journal of Production Research*. 2018, 56(17), 5795-5819.
- [18] Pan Yuchen, Chen Zhicheng, Liu Zhen. The Belt and Road regional division of labor, digital Level and the resilience of China's industrial chains. *Inquiry into Economic Issues*, 2024(2): 65-81. [潘雨晨, 陈志成, 刘震. “一带一路”区域分工、数字化水平与中国产业链韧性. *经济问题探索*, 2024(2): 65-81.]
- [19] Chen Xiaodong, Chang Haoliang. Can digital economy enhance the security of industrial chain? Research based on world input-output table. *Reform of Economic System*, 2023(3): 15-24. [陈晓东, 常皓亮. 数字经济可以增强产业链安全吗? 基于世界投入产出表的研究. *经济体制改革*, 2023(3): 15-24.]
- [20] Yang Renfa, Zheng Yuanyuan. Research on the impact of digital economy development on the labor division evolution and resilience of global value chain. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2023, 40(8): 69-89. [杨仁发, 郑媛媛. 数字经济发展对全球价值链分工演进及韧性影响研究. *数量经济技术经济研究*, 2023, 40(8): 69-89.]
- [21] Fan Shenggen, Zhang Yumei, Chen Zhigang. Antiglobalism and global food security. *Issues in Agricultural Economy*, 2019(3): 4-10. [樊胜根, 张玉梅, 陈志钢. 逆全球化和全球粮食安全思考. *农业经济问题*, 2019(3): 4-10.]
- [22] Hoyweghen K V, Fabry A, Feyaerts H, et al. Resilience of global and local value chains to the Covid-19 pandemic: Survey evidence from vegetable value chains in Senegal. *Agricultural Economics*, 2021, 52(3): 423-440.
- [23] Li Kunwang, Zhan Kuan. Analysis and evaluation of China's industrial chain and supply chain security: Measurement index based on CoDEA method. *Economist*, 2023(10): 76-87. [李坤望, 占宽. 中国产业链供应链安全的分析与评估: 基于CoDEA方法的测算指标. *经济学家*, 2023(10): 76-87.]
- [24] Kim Y, Chen Y S, Linderman K. Supply network disruption and resilience: A network structural perspective. *Journal of Operations Management*, 2015, 33: 43-59.
- [25] Yu W T, Jacobs M A, Chavez R, et al. Dynamism, disruption orientation, and resilience in the supply chain and the impacts on financial performance: A dynamic capabilities perspective. *International Journal of Production Economics*, 2019, 218: 352-362.
- [26] Brien M, Lambert L H, Lambert D M, et al. A social network analysis approach to estimate export disruption spread in the US during the Covid-19 pandemic: How policy response and industry ties relate. *Journal of Industrial and Business Economics*, 2023, 50(4): 943-961.
- [27] Christopher M, Ryals L. Supply chain strategy: Its impact on shareholder value. *The International Journal of Logistics Management*, 1999, 10(1): 1-10.
- [28] Sui Bowen, Tan Xiang. Research on the influencing factors of cross-border agri-food supply chains vulnerability. *China Business and Market*, 2019(6): 66-73. [隋博文, 谭翔. 跨境农产品供应链脆弱性的影响因素. *中国流通经济*, 2019(6): 66-73.]
- [29] Wu Yamin, Guo Lifang, Ma Jiaqi, et al. Research on the impact of conflict management, execution and performance of cross-border agricultural supply chain alliances. *World Agriculture*, 2018(7): 53-59. [武雅敏, 郭丽芳, 马家齐, 等. 冲突管理、执行力与跨境农产品供应链联盟绩效影响研究. *世界农业*, 2018(7): 53-59.]
- [30] Lu Yujia, Chen Yangfen, Hong Yu. Optimization of China's soybean import layout considering risk and cost. *Economic Geography*, 2022, 42(12): 104-114. [卢昱嘉, 陈秧分, 洪宇. 兼顾风险和成本的中国大豆进口布局优化. *经济地理*, 2022, 42(12): 104-114.]
- [31] Si Wei, Han Tianfu. China's soybean yield increase potential and realization path during the 14th Five-Year Plan period. *Issues in Agricultural Economy*, 2021, 42(7): 17-24. [司伟, 韩天富. “十四五”时期中国大豆增产潜力与实现路径. *农*

- 业经济问题, 2021, 42(7): 17-24.]
- [32] Zhang Ying, Ding Zixin, Huang Tao. The substitution effect of importing soybean from South America in the context of Sino-U.S. trade friction. *Journal of Latin American Studies*, 2019, 41(6): 95-117, 157. [张莹, 丁梓欣, 黄涛. 中美贸易摩擦背景下中国进口南美大豆的替代影响: 基于GTAP模型的模拟. 拉丁美洲研究, 2019, 41(6): 95-117, 157.]
- [33] Zhang Yumei, Sheng Fangfang, Chen Zhigang, et al. Potential impacts of Sino-US trade agreements on the world soybean: Based on global agricultural partial equilibrium model with bilateral trade module. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2021(4): 4-16. [张玉梅, 盛芳芳, 陈志钢, 等. 中美经贸协议对世界大豆产业的潜在影响分析: 基于双边贸易模块的全球农产品局部均衡模型. 农业技术经济, 2021(4): 4-16.]
- [34] Ding Hua, Gao Zhan. Structural model China's supply chain of international purchasing soybean and the key points. *Reform*, 2008(9): 110-115. [丁华, 高詹. 中国国际采购大豆供应链的渠道与主要节点. 改革, 2008(9): 110-115.]
- [35] Qiang Wenli, Cheng Shengkui, Liu Aimin, et al. A study on Brazil's soybean resources and the supply chain system. *Resources Science*, 2011, 33(10): 1855-1862. [强文丽, 成升魁, 刘爱民, 等. 巴西大豆资源及其供应链体系研究. 资源科学, 2011, 33(10): 1855-1862.]
- [36] Heron T, Prado P, West C. Global value chains and the governance of 'Embedded' food commodities: The case of soy. *Global Policy*, 2018, 9(S2): 29-37.
- [37] Taherzadeh O, Caro D. Drivers of water and land use embodied in international soybean trade. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223: 83-93.
- [38] Escobar N, Tizado E J, zu Ermgassen E K H J, et al. Spatially-explicit footprints of agricultural commodities: Mapping carbon emissions embodied in Brazil's soy exports. *Global Environmental Change*, 2020, 62: 102067. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102067.
- [39] Fu Bojie. Geography: From knowledge, science to decision making support. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 1923-1932. [傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. 地理学报, 2017, 72(11): 1923-1932.]
- [40] Ding Cunzhen, Xu Xuanguo. Research on security risks of international food supply chain and countermeasures. *Economist*, 2022(6): 109-118. [丁存振, 徐宣国. 国际粮食供应链安全风险与应对研究. 经济学家, 2022(6): 109-118.]
- [41] Jomthanachai S, Wong W P, Soh K L, et al. A global trade supply chain vulnerability in COVID-19 pandemic: An assessment metric of risk and resilience-based efficiency of CoDEA method. *Research in Transportation Economics*, 2022, 93: 101166. DOI: 10.1016/j.retrec.2021.101166.
- [42] Zhang Wei, Tuo Jingyi, Wang Naihe, et al. Research on resilience assessment and risk transmission in international trade supply chains: International perspective based on major contingency shocks. *South China Journal of Economics*, 2024 (3): 56-75. [张炜, 妥璟漪, 王乃合, 等. 国际贸易供应链韧性评估与风险传导研究: 基于重大突发事件冲击下的国际视角. 南方经济, 2024(3): 56-75.]
- [43] Moser C, Nestmann T, Wedow M. Political risk and export promotion: Evidence from Germany. *The World Economy*, 2008, 31(6): 781-803.
- [44] ICRG. ICRG methodology, International Country Risk Guide. 2022.
- [45] Dong X C, Kong Z Y. The impact of China's natural gas import risks on the national economy. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36: 97-107.
- [46] Li W Q, Fu F, Ma L W, et al. A process-based model for estimating the well-to-tank cost of gasoline and diesel in China. *Applied Energy*, 2013, 102: 718-725.
- [47] Sun Hongxia, Zhao Yuxin. Research on the optimization of China's transnational food supply chain based on crisis response. *Economist*, 2020(12): 107-115. [孙红霞, 赵予新. 基于危机应对的我国跨国粮食供应链优化研究. 经济学家, 2020(12): 107-115.]
- [48] Zhu Jing, Zang Xingyue, Li Tianxiang. China's food security risks and prevention strategy under the new development pattern. *Chinese Rural Economy*, 2021(9): 2-21. [朱晶, 臧星月, 李天祥. 新发展格局下中国粮食安全风险及其防范. 中国农村经济, 2021(9): 2-21.]
- [49] Wei Yanjiao, Zhang Huiyan, Zhu Jing. An analysis of dependence risk and market layout optimization for soybean import of China under the new development pattern. *Chinese Rural Economy*, 2021(12): 66-86. [魏艳娇, 张慧艳, 朱晶. 新发展格局下中国大豆进口依赖性风险及市场布局优化分析. 中国农村经济, 2021(12): 66-86.]
- [50] Wang M, Liu D, Wang Z X, et al. Structural evolution of global soybean trade network and the implications to China. *Foods*, 2023, 12(7): 1550. DOI: 10.3390/foods12071550.
- [51] Ji Q, Zhang H Y, Zhang D Y. The impact of OPEC on East Asian oil import security: A multidimensional analysis. *Energy Policy*, 2019, 126: 99-107.
- [52] Zhou P, Ang B W, Poh K L. Comparing aggregating methods for constructing the composite environmental index: An

- objective measure. *Ecological economics*, 2006, 59(3): 305-311.
- [53] Hatefi S M, Torabi S A. A common weight MCDA-DEA approach to construct composite indicators. *Ecological Economics*, 2010, 70(1): 114-120.
- [54] Wang Y M, Luo Y. DEA efficiency assessment using ideal and anti-ideal decision making units. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 173(2): 902-915.
- [55] Pu Lijie, Huang Xianjin. The interdisciplinary study and integration of disciplines for geography and resources science. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(8): 1830-1838. [濮励杰, 黄贤金. 地理学与资源科学研究的交叉与融合. *自然资源学报*, 2020, 35(8): 1830-1838.]
- [56] Cai Guotian, Li Pei, Zhao Daiqing. China's energy strategy research: From the perspective of economic geography. *World Regional Studies*, 2018, 27(1): 94-103. [蔡国田, 李沛, 赵黛青. 中国能源战略研究的经济地理学视角探讨. *世界地理研究*, 2018, 27(1): 94-103.]

Global supply chain risk assessment and resilience measurement: Taking soybean as an example

LU Yujia^{1,2}, CHEN Yangfen², WU Zhenlei¹

(1. School of Economics and Management, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Amid the increasing global uncertainties, studying the risk structure and resilience level of global supply chains for agricultural products highlights their importance. It not only provides China with a scientific foundation for better utilizing international markets and resources and ensuring the safety of agricultural product imports, but also promotes the development of risk resilience management theories and methods for typical products across geographical spaces, thus expanding research in resource geography. This study builds a framework that consists of three sectors (export sectors, logistics and transportation sectors, and import sectors) and four stages (supply, procurement, transportation, and demand). Using two-stage DEA and CoDEA models, it evaluates the supply chain risks and resilience of soybeans, which is the typical import-dependent agricultural product in China. The findings indicate that: (1) The risk of China's imported soybean supply chain increased from 2000 to 2020, with risks predominantly from the demand and procurement stages. By contrast, the supply and transport stages are less risky but significantly increased. Trade relations with exporting countries and economic policy uncertainty are the main long-term risk factors that threaten the security of soybean import supply chains. (2) China's soybean supply chain from Brazil is more resilient than that from the US and Argentina, suggesting great potential for improving supply chain cooperation with Brazil. (3) Making the distinction between short- and long-term threats is necessary for managing the risk resilience of the global soybean supply chain. Improving the capacity to react to sudden hazards represented by trade restrictions, maritime obstructions, and trade sanctions should be the priority in the short term. Long-term exploration of system construction and strategic layout optimization is necessary to improve the discursive power of the supply chain.

Keywords: global supply chain; imported soybeans; risk assessment; resilience measurement; resource geography