DOI:10.13502/j.cnki.issn1000-7636.2026.11.007

复杂网络视角下气候物理冲击与农业供应链韧性

刘雪宁 张应良

摘要:在气候物理风险加剧的态势下,实现农业高质量发展需要维护农业供应链长期安全稳定,增强农业供应链韧性。本文通过匹配2008—2024年农业上市公司上下游供应商和客户数据,从适应能力、组织能力、学习能力三个维度考察了气候物理冲击对农业供应链韧性的影响及作用机制。研究发现,供应端和需求端的气候物理冲击降低了农业供应链韧性。机制检验结果显示,气候物理冲击主要通过以存货和订单为依托的实物流、以商业信用为核心的资金流以及以绿色和合作创新为路径的创新流三条传导渠道影响农业供应链韧性。异质性分析表明,水文灾害、"特别重大"灾害和"重大"灾害对农业供应链韧性的影响更明显,供应链下游、依赖度较高的企业受气候物理冲击影响更大。本文的研究为相关政策制定和企业战略调整提供了参考。

关键词:韧性 农业供应链韧性 气候物理冲击 复杂网络 风险传染效应

中图分类号:F326.6;P467 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7636(2026)11-0091-17

一、问题提出

党的二十大报告提出"加快建设现代化经济体系,……着力提升产业链供应链韧性和安全水平"。农业供应链作为农业产业体系的重要组成部分,其韧性和安全水平的提升不仅是防范化解重大农业产业风险的基础,也对加快构筑现代农业产业体系具有重要意义。然而,农业供应链因自身的固有特性和复杂的业务关联,呈现出更高的风险与脆弱性,无论是源自供应链内部的产量波动和价格风险,还是外部的地缘政治危机、极端天气变化,都可能干扰和破坏农业供应链的稳定性。值得注意的是,由气候变化引致的物理风险,如洪水、干旱、极端温度等,会以自然灾害的形式对农业供应链运作产生直接的负面冲击[1]。农业供应链作为连接上下游企业的复杂网络,这些负面冲击极易沿着网络结构进行级联传递并逐级放大,提高供应链中断的概率,这种风险传染效应的影响不容忽视。为此,党中央、国务院高度重视气候变化对农业的影响。2026年中央一号文件《中共中央 国务院关于锚定农业农村现代化 扎实推进乡村全面振兴的意见》强调"加强气象、水文、地质灾害监测预报预警,提高应对极端天气能力",凸显了在气候变化的背景下增强农业供应链韧性水平的现实紧迫性与战略重要性。农业上市公司作为联结上游生产、中游加工流通与下游市场的核

收稿日期:2026-06-06;修回日期:2026-09-29

基金项目:国家社会科学基金重点项目"深入实施藏粮于地、藏粮于技战略的路径与政策研究"(21AZD032);西南大学研究生科研创新项目"气候物理冲击下农业供应链韧性的评估与优化路径研究"(SWUB25091)

作者简介:刘雪宁 西南大学商贸学院博士研究生,重庆,402460;
张应良 西南大学商贸学院教授、博士生导师,通信作者。

作者感谢匿名审稿人的评审意见。

心主体,其供应链韧性构成了农业产业体系安全稳定运行的基础。在此背景下,有必要构建以农业上市公司为核心的复杂网络,分析气候物理冲击对农业供应链韧性的影响,以期为加快构建现代农业产业体系、实现农业高质量发展提供理论启发与决策参考。

二、文献综述

与本文主题相关的研究情况如下。

第一,供应链韧性的概念内涵显示出从追求均衡状态的工程韧性和生态韧性向体现动态演化观点的适应性韧性转变的趋势。前两者强调系统的抵抗和恢复能力,而后者更侧重于重组与发展能力,这些能力源于系统的自组织以及不断适应和从干扰中学习的能力[2]。农业供应链韧性的相关概念可描述为以下几个维度:一是能预测和抵抗风险[3];二是在受到干扰后仍能维持基本功能,如食品持续供应和安全保障[4];三是在冲击后能以变革创新推动供应链升级[5];还有学者纳入中断后累积学习的能力以及有效适应各种风险冲击的能力[6]。

第二,供应链韧性的指标体系可归纳为以下四个方面:一是从定义中析出核心能力或者关键要素作为衡量标准,如张树山和谷城从供应链应对外部冲击的抵抗能力和恢复能力两个维度进行综合指数测算[7];二是以绩效指标量化供应链韧性,包括企业的财务指标、市场表现以及企业与供应商(客户)的绩效指标,如供应链效率、供需关系匹配程度等[8-9];三是以直接定量指标表征供应链韧性,图卡穆哈卜瓦等(Tukamuhabwa et al.)利用图论法提供了静态和动态两种方法,既考虑了性能水平、损失估计和恢复时间等因素,又考虑了供应链对于中断风险的自适应能力以及学习能力[10];四是以拓扑指标量化供应链韧性,如陈和文(Chen & Wen)运用复杂网络理论构建了适合知识密集型供应链的有向加权网络模型,以抵抗能力(网络凝聚力指标)和恢复能力(从开始遭受风险到大多数节点脱离风险的时间)进行定量评估[11]。有关农业供应链韧性的研究主要是从抵抗能力、恢复能力以及变革能力三个维度构建指标体系,耕地面积、灌溉水平、粮食产供等指标用以体现区域范围内农业供应链韧性的内涵[12],营业收入残差、股票市场表现等指标用以体现农业企业层面的内涵[13]。

鲜有研究直接探讨气候物理冲击与农业供应链韧性的关系,但围绕气候物理冲击与农业供应链其他方面及供应链韧性展开的相关研究对本文有所启发。第一,大多数研究基于供应商-客户的二元关系,探讨了气候物理冲击在农业供应链中的垂直溢出效应。生产端的气候物理冲击会改变农作物的生长环境,不仅会导致农作物损毁、土壤硬化、产量下降,还会引发授粉障碍,进而对下游企业的原材料供应产生直接冲击[14];销售端的气候物理冲击易导致水稻、玉米等主要农作物的价格上涨[15],食品价格的飙升将直接影响消费者的需求和市场预期,挤占上游企业的销售空间,使得企业的生产计划和运营策略难以有效实施[16]。第二,既有研究利用上市公司的供应链数据证实了企业自身遭受的气候物理冲击对供应链韧性的负面影响[17-18],这种影响主要通过以下三条渠道发挥作用:一是库存管理渠道,气候物理冲击不仅会直接造成企业库存的积压或消耗,还会降低企业对供需趋势预测的准确性,这种信息偏差容易引起库存波动,造成供需匹配失衡,从而降低供应链韧性;二是商业信用渠道,气候物理冲击通过降低企业的净商业信用,削弱了供应链合作伙伴之间的信任基础,从而降低供应链韧性;三是成本与创新渠道,气候物理冲击对企业生产设施、物流网络等的破坏,抬高了企业的生产与物流成本,挤压企业用于提升韧性的研发投入,从而削弱其供应链韧性。

综上所述,已有研究还存在进一步挖掘的空间。第一,有关农业供应链韧性的概念表达局限于对传统韧性观点抵抗和恢复的简单重复诠释,与工业供应链的研究范式基本相同。但工业供应链本身存在一个已知且合适的最优均衡状态,如最低成本、最高效率等,因此韧性管理的主要目标是在干扰发生后,通过备用产能、多源采购等适应性策略尽快恢复到原有状态。而农业供应链与自然生态系统深度耦合,并且面临的不确定性是内生且持续的,这些特征要求其具备不断适应复杂环境变化并从干扰中累积发展的韧性能力,

这与适应性韧性观点相契合。第二,对于农业供应链韧性的测度过分强调可操作性与可测量性,指标选取局限在企业组织层面,抑或是扩展至区域范畴,对农业供应链网络的结构特征却鲜有说明。第三,既有研究侧重于分析气候物理冲击对农业供应链垂直关系的潜在影响,而对于农业供应链韧性的影响仍缺乏系统的理论解释和事实证据,尤其是影响背后的作用机制,值得进一步探讨。与此同时,有关气候物理冲击的度量主要聚焦于核心企业,而未能充分关注供应链上下游的气候物理冲击对农业供应链韧性的影响,这很大程度上忽略了气候物理冲击在农业供应链内部的风险传染效应。

鉴于此,本文通过匹配 2008—2024 年农业上市公司上下游供应商和客户数据,运用复杂网络分析方法构建农业供应链韧性指标,实证检验气候物理冲击对农业供应链韧性的影响及作用机制。与现有研究相比,本文的边际贡献有三点。一是拓展了农业领域有关供应链韧性的研究范畴。充分考虑农业供应链的固有特性及其与外部环境交互的本质,将农业供应链韧性概念化为以适应能力、组织能力和学习能力为核心的持续发展能力,回应并扩展了适应性韧性的基本观点,为重新理解和建构农业供应链韧性提供了更具解释力的分析框架。二是突破了现有研究视角与方法的局限性。陶锋等将供应链韧性描述为利益主体之间的关联效应[9],本文试图从这一观点出发,运用复杂网络分析法,结合供应链网络的结构特征,聚焦节点的核心地位和网络连通性加以论证,从而将分析边界扩展到供应链中所有二元关系和自我网络,以期为供应链韧性的研究以及其在农业经济领域的发展提供研究方法和工具上的有益补充。三是从供应链上的气候物理冲击这一新视角切入考察农业供应链韧性,通过将非上市的供应商、客户纳入研究样本,拓宽了农业供应链层面的样本覆盖范围,有助于得出更具普适性和可推广性的研究结论。本文充分考虑到气候物理冲击在农业供应链中的传导特性,以及供应商和客户的非对称影响,从实物流、资金流和创新流三个视角识别气候物理冲击与农业供应链韧性的逻辑进路,为增强农业供应链系统的气候韧性提供系统的理论解释和事实证据。

三、理论分析与研究假设

(一)农业供应链韧性的内涵与层次

在传统的“抵抗-恢复-变革”三维框架中,“抵抗”与“恢复”是工程韧性和生态韧性的核心观点,其假设系统是封闭的,追求稳定的均衡状态。例如,工厂面临的冲击主要是机器故障、供应商破产等,能够通过备用产能、多源采购构建强抵抗能力,从而在冲击发生时最小化成本或效率损失,这可视为一种均衡状态。然而,农业供应链根植于自然与社会经济系统,其面临的外部冲击是持续性的、不可控的,风险敞口更具系统性。例如,为规避气象和虫害风险而投资的温室,却因高额成本加剧了对市场价格波动的脆弱性。因此,为规避某一类风险采取的策略,可能无法简单“抵抗”外部环境的变化,而应是通过适应能力将各种生产要素、资产转化为抵抗风险的关键载体。更重要的是,由于农业生产周期长、不可逆以及订购合同期限长等问题,农业供应链的中断问题至少需要数月才能解决[6],这意味着其面对冲击后的恢复通常是缓慢的;尤其是当各种经济、社会与自然因素相互交织,推动种植结构、市场格局发生转变时,显然无法回到原有状态。韧性体现的是在环境变化中保持结构与功能稳定、确保持续供应的组织能力,不应以个别企业的经济效益指代供应链的恢复能力。此外,“变革”更偏向于根本性的转型升级,这可能伴随着巨大的沉没成本、信任资本甚至核心竞争力的丧失。农业供应链因自然依赖性、冲击持续性以及冗长的中间环节,其演变往往是渐进式的、温和的过程,这需要各参与主体不断进行经验交流、知识分享并持续学习,从而建立主动应对未来冲击的韧性。因此,持续性的、不可避免的外部冲击要求农业供应链在构建和保持韧性时需优先考虑:快速响应各种风险冲击的适应能力、在冲击中保持结构与功能稳定的组织能力以及冲击后累积学习的能力,从而确保韧性是一种相对于外部环境而言的能力,而不是静态的理想化状态。基于此,本文将农业供应链韧性定义为:农业供应链在复杂多变的环境中能够最大限度地吸收冲击甚至化危为机的适应、组织和学习能力,以

维持关键农产品和服务的供应与完整性。

农业供应链韧性具有多个内在层次。首先,适应能力是指农业供应链面对不确定和突发状况时快速响应、采取合适应对策略的能力。农业供应链是典型的链长主导型供应链,核心企业往往掌控着农业供应链的核心资源与能力,在维持农业供应链稳定发展中发挥着领导作用[19]。依托于核心企业的资源获取与调配能力,可以有效降低资源约束对上下游企业风险决策能力的限制,助力农业供应链形成短期缓冲能力,这关系到农业供应链的恢复速度与韧性。其次,组织能力是指农业供应链在冲击中保持其结构和功能稳定性的能力。一方面,稳定持久的合作关系有助于农业供应链在应对风险冲击时展现出更强的协同调度和互利共生能力,从而更具备韧性[9]。另一方面,在农业供应链内某一环节进行多元化布局,如降低供应链集中度并实现市场参与多元化,可通过分散风险和提高企业的吸收能力来降低负面冲击导致企业崩溃的概率,从而增强农业供应链韧性[20]。最后,学习能力是指农业供应链在冲击后广泛吸收分散的信息、历史经验并将其转化为应对冲击的适应性策略,从而累积学习、促进认知进化的能力。农业供应链不仅需要提升应对外部冲击的能力,还要适应分散的生产结构、产品易腐易损的特性,关注食品的可及性与稳定性。因此,在增强韧性能力时,应将关注点从单纯的响应与恢复能力扩展到强化对外部冲击的预判与学习能力上[6],这有赖于技术、信息和知识等资源的快速流动与广泛传播[21]。由此,核心企业的存在、高效的协作以及资源的扩散,构成了适应能力、组织能力和学习能力的基础,助力农业供应链在短期缓冲-中期稳定-长期进化的累积效应中建立起动态韧性。

(二)气候物理冲击对农业供应链韧性的影响

气候物理风险作为一种兼具突发性和系统性的外生冲击,使得供应链中任一主体因其造成的生产经营风险,都有可能通过供应链网络扩散至链内其他主体,进而造成供应链中断等连锁反应。气候物理冲击主要从三个方面削弱农业供应链韧性。第一,极端温度会扰乱农作物的生长周期,影响产量和质量,使得核心企业的原材料供应不稳定,而农业生产具有很强的自然依赖性,企业的供应缺口在短期内难以弥补;若备用供应商的产能弹性不足,还会造成品控下降、履约延迟等经营风险。洪水灾害可能摧毁企业的仓储设施,导致交通物流瘫痪;冷链的中断还会造成农产品腐坏,引发食品安全风险。这进一步推高了企业的运输成本、库存成本以及沟通协调成本,增加了企业的经营风险与现金流压力[18],从而降低农业供应链韧性。第二,气候物理冲击可能导致供应商的交付能力持续缺失、市场需求急剧下降,使核心企业投入的专用品种、冷链与加工设备等专用性资产闲置或贬值,双方积累的信任资本流失进而导致供应链合作关系的瓦解。更重要的是,寻找或培育新的合作伙伴不仅面临高额的转换成本,还会影响上游的生产协调能力和产品品质的稳定性,下游的透明度和协同规划能力也会被削弱,从而打破农业供应链结构的稳定性、降低农业供应链韧性。第三,气候物理冲击引发的需求不确定性不仅会造成核心企业的预测偏差、引发决策盲目性,还会向上游传递存在偏差的需求信息,放大供应链的牛鞭效应,最终让远离终端市场的原材料供应商受到剧烈冲击,尤其是农业供应链前端的种植养殖企业,无法通过中途停产应对需求缩减。由此,信息传递的扭曲与不对称进一步加剧了供需匹配失衡[22],最终降低农业供应链韧性。

基于此,本文提出假设 1:气候物理冲击会降低农业供应链韧性。

(三)气候物理冲击影响农业供应链韧性的作用机制

在农业供应链中,核心企业与供应商、客户之间的相互依赖关系建立在双方产品、资金、技术及知识持续交换的基础上。依据供应链风险传导理论,供应端和需求端的气候物理冲击会依附于农业供应链的实物流、资金流、信息流等渠道,以订单调整、资金周转、创新挤出等形式被传递和扩散,从而产生风险传染效应,进而影响核心企业的资源获取和调配能力,削弱各参与方的合作信任基础,并抑制供应链中的知识溢出和创新潜力,最终降低农业供应链韧性。

1. 以存货和订单为依托的实物流传导

从实物流的角度看,供应端的气候物理冲击将直接影响农作物的产量和质量,导致供应商的产出和交付能力下降,使核心企业的上游供应延迟或中断,导致外部采购规模下降;而替代供应商的原材料或中间品可能无法满足客户的标准化要求并产生交易成本,短期内核心企业需要依靠安全库存以维持生产连续性,从而导致企业的库存水平被动下降。库存储备作为企业应对供需扰动的重要缓冲工具,能在很大程度上缓解原材料或生产中断带来的压力[23],但伴随着安全库存的消耗和外部采购规模的减少,核心企业面临的供应短缺问题使其履约能力和交付稳定性受到严峻挑战,客户流失的风险增加,供应链合作关系的稳定性受到影响[24]。需求端的气候物理冲击将导致客户的固定资产损毁、物流网络停滞,甚至经营活动中断,使其采购需求改变、采购能力急剧下降。客户无法按原计划完成收购订单,不仅导致核心企业的产品销路遇阻,还会因原材料或农产品的搁置而产生额外的仓储和管理成本,导致企业的销售收入下降,影响企业的运营能力。核心企业市场影响力和运营能力的下降往往意味着其在供应链中的议价能力和话语权被削弱,使得企业难以获得稳定的资源供给,加剧了供应链的信息不对称;在面对外部风险冲击时,企业很难调动上下游协同应对、分担风险,从而导致供应链断链风险上升[25],最终削弱农业供应链韧性。

基于此,本文提出假设 2:气候物理冲击会通过以存货和订单为依托的实物流进行传导,从而降低农业供应链韧性。

2. 以商业信用为核心的资金流传导

从资金流的角度看,当企业自身的运营和财务缓冲能力无法吸收短期冲击时,企业可能通过调整商业信用安排的方式应对风险[23]。一方面,当供应商遭遇气候物理风险、产生运营危机时,出于风险控制的考虑,强势的核心企业可能更不愿意提供信用支持,尤其是在上游供应商议价能力相对较弱的农业供应链中,反而会通过延长付款周期的方式来对冲自身的经营风险,从而削弱双方的合作信任基础,影响农业供应链的稳定性。农业供应链的中小参与者往往依赖核心企业的商业信用维持运营周期,商业信用紧缩将导致其现金流断裂,加剧供应链中断风险[26]。另一方面,当客户遭遇气候物理风险、产生现金流约束时,极有可能由于难以支付应付账款而出现违约行为,特别是在客户面临较强的外部融资约束以及管理者短视的情况下,核心企业的营运资本被大量占用[27],从而影响企业的资金流动能力。根据流动性约束理论,若无法完全吸收转嫁的资金压力,核心企业不仅无法灵活调整采购、物流和生产计划,降低供应链的运营弹性,还可能采取降低库存或推迟生产计划等措施以减少资金占用,而这些缓冲资源的减少会导致企业吸收需求波动、供应中断的能力明显下降,最终削弱了农业供应链韧性[8]。

基于此,本文提出假设 3:气候物理冲击会通过以商业信用为核心的资金流进行传导,从而降低农业供应链韧性。

3. 以绿色和合作创新为路径的创新流传导

从创新流的角度看,一方面,绿色创新具有资本投入大、回报周期长以及风险不确定性强等特征,更依赖于核心企业协调下的协同合作和集体行动,从而更容易激发农业供应链中的知识溢出和创新模仿过程。然而,依据前文分析,气候物理冲击可能通过实物流和资金流对核心企业构成双重挤压,收紧企业融资约束,从而削弱企业对于绿色创新的投入意愿和能力。根据实物期权理论,在外部环境不确定性较高时,企业更倾向于推迟具有高风险特征和不可逆性的研发投资;尤其是在气候物理冲击下,绿色创新投资的灵活性更小,期权价值下降幅度更大[28]。因此,气候物理冲击可能产生的融资约束与期权价值损失制约着核心企业的绿色创新活动,从而影响农业供应链学习能力的形成。另一方面,在农业供应链中,部分核心企业往往掌握着关键核心技术,技术和创新能力的不对等使得上下游主体不得不依附于核心企业的技术创新[25]。然而,气候物理冲击会破坏农业供应链成员间的信任,影响供应链关系的稳定性。这不仅增加了企业合作创新的制度与心理成本,还会阻碍跨组织间的信息流动与知识共享,使得创新潜力和协同进化能力被极大地

抑制。因此,由气候物理冲击产生的运营压力与信任危机形成了创新挤出效应,这不利于供应链成员间的知识溢出与学习,制约着农业供应链的集体学习能力,从而降低了供应链应对非预期冲击的认知多样性,最终削弱农业供应链韧性[18]。

基于此,本文提出假设 4:气候物理冲击会通过以绿色创新和合作创新为路径的创新流进行传导,从而降低农业供应链韧性。

四、实证设计

(一)样本选取与数据来源

本文以 2008—2024 年沪深 A 股上市公司为研究样本,相关数据主要来源于深圳希施玛数据科技有限公司 CSMAR 中国经济金融研究数据库和全球紧急灾难数据库(EM-DAT)。

一是深圳希施玛数据科技有限公司 CSMAR 中国经济金融研究数据库的数据。首先,参考杨志红和王小林[29]的研究,以中国证监会发布的 2012 版行业分类为标准选取农业企业样本,并剔除已经退市的、年末 ST、*ST、PT 以及上市时间不足三年的企业。其次,获取农业企业的前五大供应商和客户数据,并进行如下处理:剔除“第一名供应商”“客户 A”等以模糊方式披露的样本;根据供应商与客户的名录,在天眼查、企查查等网站中批量检索获取相关数据,剔除登记状态为注销、吊销和迁出的企业,剔除国外、中国港澳台地区的企业。最后,由于核心企业(F)当年(2020 年)可能对应多个上游供应商(S1、S2、S3)和下游客户(C1、C2、C3),本文参考陶锋等[9]的研究,构建两组非平衡面板数据集:第 1 组通过整合核心企业当年披露的所有供应商、客户数据,构造分年度的农业供应链样本(SC),最终得到 1 015 个农业供应链-年度观测值(SC—2020);第 2 组分别包含 649 个供应商-核心企业-年度观测值(S1-F-2020)和 869 个核心企业-客户-年度观测值(F-C1-2020),以考察供应端和需求端影响路径的差异。同时,对样本做如下处理:剔除主要变量存在缺失的样本,对连续型变量进行上下 1%的缩尾处理。

二是全球紧急灾难数据库的数据。本文选取发生在中国的气候灾害事件①,包括暴风雨/雪、寒潮、干旱、洪水、冰雹、热浪、闪电和雷暴、沙尘暴、极端天气、龙卷风、热带气旋等共 15 种灾害子类型,剔除地理位置缺失的灾害事件,最终得到 393 个气候灾害样本。

(二)模型设定

本文设定如下双向固定效应回归模型进行实证检验:

$$ARES_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 CR_{it} + \boldsymbol{X}'_{it}\boldsymbol{\alpha}_i + \eta_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式(1)中,被解释变量 $ARES_{it}$ 代表企业 i 所处农业供应链在第 t 年的韧性水平;核心解释变量 CR_{it} 代表气候物理冲击,分别包括企业 i 在第 t 年是否受到供应链上的气候物理冲击 $ifrisk_{it}$ 以及受到气候物理冲击的程度 $\ln degree_{it}$;$\boldsymbol{X}'_{it}$ 表示控制变量向量;η_i、μ_t 分别为企业固定效应、年份固定效应,ε_{it} 为残差项。

(三)变量说明

1. 被解释变量

本文的被解释变量是农业供应链韧性($ARES$)。复杂网络理论是描述网络结构性质和节点关联关系的有力工具,可被用于衡量农业供应链网络的韧性[30]。

(1)农业供应链网络的构建。将农业企业及其披露的前五大供应商和客户作为网络中的节点,分别将采购额和销售额定义为网络中的边,作为衡量网络节点之间联系紧密度的指标,以此构建农业供应链的网络模型 G。该网络是按年份划分的、以农业企业为中心节点的自我网络,旨在捕捉中心节点的属性特征和

① 本文未考虑发生于中国港澳台地区的紧急灾害事件。

网络成员关系的变化。

$$G = (V, E, W) \tag{2}$$

式(2)中,V 是网络中所有节点的集合,E 是网络中所有节点间边的集合,W 是边的权重集合。

$$V_{ego} = \{v\} \cup \{v_i \in V \mid (v, v_i) \in E\} \tag{3}$$

$$E_{ego} = \{(v, v_i) \mid v_i \in V_{ego}\} \cup \{(v_i, v_j) \mid v_i, v_j \in V_{ego}, v_i \neq v_j, (v_i, v_j) \in E\} \tag{4}$$

式(2)和式(3)中,V_{ego} 和 E_{ego} 代表自我网络的节点集和边集合,v 是中心节点(ego),v_i 是与中心节点相连的所有邻居节点(alters)。

边权重 ω_{ij} 的定义如下:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 0, v_i \text{ 和} v_j \text{ 之间没有关联关系} \\ \text{采购额或销售额}, v_i \text{ 和 } v_j \text{ 之间存在关联关系} \end{cases} \tag{5}$$

(2)农业供应链韧性的指标选取与测度①。由上述农业供应链韧性的内涵和层次可知,农业供应链韧性可表征为面对环境复杂性变动所表现出的适应、组织和学习能力。据此,本文从这三个维度筛选相关指标,通过综合指数测算来衡量农业供应链韧性。

首先,本文选取平均边介数($\overline{B}$)和结构洞(C)两个指标以表征农业供应链网络的适应能力。在社会网络分析中,边介数指的是“超过个人社交圈的连接”,意味着这些连接能够帮助个体获取新资源和信息[31]。高平均边介数意味着中心节点或自我网络扮演着桥梁角色,对整个农业供应链网络的连通性和信息传递具有重要作用。结构洞体现了企业在供应链网络中获取非冗余、异质性信息的能力,丰富的结构洞有助于企业快速识别潜在风险,建立信息优势[32],从而增强应对不确定性的韧性。

其次,本文选取边变化率(τ)和供应链集中度(SCR)两个指标以表征农业供应链的组织能力。其中,边变化率的计算公式是第 t 年相比于 t+1 年直接邻居变动的数量(增加与减少的总和)占观察年间(t 至 t+1 年)直接邻居总数的比重[33],低边变化率意味着合作关系的稳定和持续。供应链集中度(SCR)反映关系强度的分散性,集中度越高代表对上下游企业的依赖度越高,那么供应链的稳定性就越低[8]。

最后,本文选取网络传播效率(L)、关系熵(H)两个指标以表征农业供应链的学习能力。这两个指标都是保障农业供应链中技术、信息和知识等资源被广泛吸收与扩散的基础,网络传播效率体现了资源的传递速度,这直接关系到信息共享与更新的及时性;而用以衡量关系分布均匀程度的关系熵指标决定了资源传递的广度[33]。提高网络传播效率和关系熵值,有助于驱动农业供应链网络的集体学习与进化,进而构建一个具备韧性的农业供应链。

本文使用 Python 软件中的 Networkx 库来构建可用于表征农业供应链的无向加权网络,进而计算出相应的韧性指标。在此基础上,采用熵权法对适应、组织和学习能力三个维度下的 6 个指标进行综合测算,所得结果即为农业供应链韧性指标。

2. 解释变量

本文的解释变量是气候物理冲击(CR)。现有的测量方法主要有两种:一是用气候要素(如温度和降水量等)的波动程度来表征[1],二是用短期内自然灾害事件的发生及程度来刻画[34]。本文选择后者,主要的原因是这种急性的气候物理风险通常具有突发性和不可预测性,使得农业供应链面临更大的风险,因此其对韧性的影响更容易在当期捕捉。通过披露的供应商和客户信息,本文构造两个供应链气候物理冲击的代理变量。一是企业的供应商或客户所在城市是否受到物理冲击的虚拟变量($ifrisk$),若受到冲击,该值取 1,否则为 0;二是企业的供应商和客户所在城市物理气候风险事件的发生次数,用以表征气候物理冲击程度($\ln degree$)。为减少变量分布的偏度,对气候物理冲击程度指标加 1 后取自然对数。此外,本文采用供应商

① 限于篇幅,农业供应链韧性指标的详细说明略,留存备索。

所在城市是否受到物理冲击(*ifrisk_s*)、客户所在城市是否受到物理冲击(*ifrisk_c*)、供应商所在城市发生物理气候风险事件的次数(ln*degree_s*)和客户所在城市发生物理气候风险事件的次数(ln*degree_c*)四个解释变量进行机制检验。

3. 控制变量

本文控制了其他可能影响农业供应链韧性的企业特征[13,17]:企业规模(ln*Size*),以年总资产的自然对数衡量;总资产净利润率(*Roa*),以净利润占总资产的比重表示;存货周转率(*Itr*),以营业成本占存货期末余额的比重表示;固定资产周转率(*Fat*),以营业收入占固定资产期末净额的比重表示;期间费用率(*Expense*),以销售费用、管理费用和财务费用之和占营业收入的比重表示;产权性质(*SOE*),以是否为国有企业表示;董事会规模(ln*Board*),以董事会人数的自然对数表示;两职合一(*Dual*),以董事长与总经理是否为同一人表示;机构持股比例(*Institution*),以机构投资者持有股份的比重表示;企业自身是否受灾(*Risk*),以企业自身是否受到气候冲击表示。

(四)变量描述性统计

表 1 报告了主要变量的描述性统计结果。农业供应链韧性的最大值为 0.778 0,最小值为 0.235 4,均值为 0.435 9,标准差是 0.114 3,这说明农业供应链的韧性水平存在一定的差异,但多数集中在均值附近。气候物理冲击的均值为 0.350 7,说明超过三分之一的农业企业面临供应链上的气候冲击,标准差为 0.477 4,说明冲击程度也存在较大差距。其他各项指标的统计结果与相关研究大体一致。

表 1 描述性统计结果

变量类型	变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	*ARES*	1 015	0.435 9	0.114 3	0.235 4	0.778 0
解释变量	*ifrisk*	1 015	0.350 7	0.477 4	0	1
	degree	1 015	1.234 5	3.384 9	0	60
控制变量	*Size*	1 015	$5.374\ 8\times10^{9}$	$1.028\ 5\times10^{10}$	$7.875\ 6\times10^{7}$	$1.366\ 8\times10^{11}$
	Roa	1 015	0.046 9	0.068 3	−0.191 1	0.230 3
	Itr	1 015	5.790 0	15.447 1	0.038 5	395.662 9
	Fat	1 015	3.776 7	5.132 0	0.329 5	71.173 8
	Expense	1 015	0.274 1	2.138 0	−0.048 4	67.946 1
	SOE	1 015	0.433 5	0.495 8	0	1
	Board	1 015	8.716 3	1.908 2	4	21
	Dual	1 015	0.225 6	0.418 2	0	1
	Institution	1 015	39.969 9	22.929 6	0.374 0	84.256 9
	Risk	1 015	0.063 1	0.243 2	0	1

五、实证结果与分析

(一)基准回归

表 2 为气候物理冲击对农业供应链韧性影响的基准回归结果。在列(1)中,是否受到气候物理冲击(*ifrisk*)的回归系数在 1%水平下显著为负,表明气候物理冲击会抑制农业供应链韧性;在列(2)中,ln*degree*的回归系数绝对值大于 0,且在 1%水平下显著,意味着随着气候风险事件的相互叠加,农业供应链的韧性水平

表 2　基准回归结果

变量	(1)	(2)
CR	−0.022 2***	−0.014 3***
	(0.007 5)	(0.005 2)
ln*Size*	−0.001 4	−0.001 3
	(0.011 9)	(0.012 0)
Roa	0.021 3	0.024 4
	(0.076 9)	(0.077 4)
Itr	0.000 2**	0.000 2**
	(0.000 1)	(0.000 1)
Fat	−0.000 2	−0.000 2
	(0.000 5)	(0.000 6)
Expense	−0.001 0***	−0.000 9***
	(0.000 2)	(0.000 2)
SOE	0.033 2	0.029 8
	(0.033 1)	(0.031 6)
ln*Board*	−0.094 4***	−0.098 7***
	(0.033 1)	(0.033 1)
Dual	0.014 7	0.015 2
	(0.013 5)	(0.013 4)
Institution	0.000 4**	0.000 4**
	(0.000 2)	(0.000 2)
Risk	0.000 8	0.001 0
	(0.012 2)	(0.012 2)
常数项	0.641 0**	0.646 3**
	(0.264 1)	(0.266 9)
企业固定效应	控制	控制
年份固定效应	控制	控制
观测值	1 015	1 015
R^2	0.486 5	0.485 4

注：*、**、*** 分别表示在 10%、5%、1%水平下显著；小括号内为聚类至企业层面的标准误。后表同。列(1)和列(2)的被解释变量分别为 *ifrisk* 和 ln*degree*。

将进一步降低。从经济意义来看，当农业企业遭遇供应链上的气候物理冲击后，其供应链韧性水平相较于均值下降约 5.092 9%(−0.022 2/0.435 9×100%)，该降幅具有较强的经济显著性；而气候风险事件的次数每增加 10%，农业企业的供应链韧性将下降约 0.136 3 个百分点(0.014 3×ln1.1)，该降幅约占样本均值的 31.27%(0.136 3/0.435 9×100%)。综上，假设 1 得以验证。

(二)内生性分析

1. 工具变量法

尽管气候物理冲击具有较强的外生性，本文的基准回归结论仍可能受到遗漏变量、测量误差等问题的影响。为缓解上述情况可能带来的内生性问题，本文采用工具变量法验证核心结论。

第一，参考周宏伟等[35]的做法，将处于同一省份的其他城市气候风险事件发生次数的均值作为工具变量 1(*IV*1)。同一省份内的城市具有相似的地理条件和气候系统，导致气候物理冲击呈现群发性、连锁性特征，具有相关性。同省份其他城市受灾本身并不会直接改变企业的生产环境与经营决策，其对农业供应链韧性的影响需要先通过影响企业所在城市的受灾程度来实现，符合排他性约束。如表 3 第一列和第二列回归结果所示，第一阶段 *IV*1 的回归系数在 1%水平下显著为正，说明工具变量影响企业所在城市的受灾情况；Kleibergen-Paap rk Wald *F* 统计量大于 Stock-Yogo 在 10%显著性水平下的临界值，表明通过弱工具变量检验；Kleibergen−Paap rk *LM* 统计量在 1%显著性水平下拒绝了识别不足假设。第二阶段的结果显示，*ifrisk* 的回归系数仍在 1%水平下显著为负。

第二，参考勒贝尔(Lewbel)[36]的做法，采用解释变量(ln*degree*)与其均值之差的三次方作为工具变量 2(*IV*2)。如表 3 第三列和第四列回归结果所示，*IV*2 的回归结果通过不可识别检验

和弱工具变量检验,且第二阶段 ln*degree* 的回归系数仍显著为负。综上,在缓解内生性问题后,本文的基准回归结论可靠。

表 3 内生性分析回归结果

变量	工具变量法				倾向得分匹配法	
	ifrisk		ln*degree*		*ifrisk*	ln*degree*
	第一阶段	第二阶段	第一阶段	第二阶段		
*IV*1	0.042 1***					
	(0.008 1)					
*IV*2			0.386 5***			
			(0.045 4)			
CR		−0.142 2***		−0.010 9*	−0.024 3***	−0.014 2**
		(0.050 3)		(0.005 9)	(0.008 4)	(0.005 6)
常数项	0.292 7		0.740 0		0.565 6**	0.566 8**
	(0.741 8)		(0.630 2)		(0.253 8)	(0.257 7)
Kleibergen-Paap rk *LM*	12.687 3		34.754 7			
	[0.000 4]		[0.000 0]			
Kleibergen-Paap rk Wald *F*	26.918 9		72.578 1			
	{16.380 0}		{16.380 0}			
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
观测值	1 015	1 015	1 015	1 015	878	878
R^2	0.319 1	−0.292 6	0.730 9	0.035 8	0.473 0	0.470 7

注:中括号内为不可识别检验 *P* 值,大括号内为 Stock-Yogo 弱工具变量检验在 10%水平下的临界值。

2. 倾向得分匹配法

为了进一步缓解样本偏差问题,本文采用倾向得分匹配(PSM)法验证研究结论。具体而言,将样本期内受到气候物理冲击的企业作为处理组,选取企业规模、资产负债率、固定资产比率、流动比率、两职合一等变量作为协变量,采用卡尺内 k 邻近匹配(设定 $k=4$、卡尺半径为 0.05),以确保每一个处理组样本在对照组样本中能找到尽可能接近的匹配对象。表 3 第五列和第六列回归结果显示,核心解释变量(*CR*)的回归系数均显著为负,前文结论依然成立。

(三)稳健性检验①

第一,排除性检验。气候物理冲击对农业供应链韧性的影响可能通过其他渠道传导,而不局限于供应链结构,如气候物理冲击可能造成整个区域内的农业产出变化、价格波动、物流中断以及劳动力供给冲击等,进而影响农业供应链韧性。为此,本文依次加入省级农作物成灾面积占比(农作物成灾面积占总播种面积的比重)、农产品生产价格指数(上年=100)、交通网密度(公路里程与铁路里程之和占行政区划面积的比重)以及第一产业就业人数占比(第一产业就业人数占总就业人数的比重)作为控制变量,对基准模型重新进行回归。第二,替换变量的度量方式。参考张树山和谷城[7]的测量方法,本文采用变异系数法重新进行农业供应链韧性的综合指数测算并进行回归检验。第三,调整回归样本。前文将气候物理

① 限于篇幅,稳健性检验的详细说明与结果,略留存备索。

冲击的影响范围限定在城市层面,并与供应商和客户的所在地进行空间校准,这一做法可能会放大发生在直辖市的气候物理冲击程度,从而影响研究结论的可靠性。为此,本文剔除供应商与客户位于直辖市的样本后重新进行回归。第四,其他稳健性检验。尽管本文控制了企业和年份的双重固定效应以排除潜在因素的干扰,但仍可能未完全涵盖行业和城市层面的其他因素。为此,本文分别调整固定效应类型和聚类标准,加入了城市-行业和行业-年份固定效应,并将标准误聚类到行业和城市层面,重新进行估计。上述稳健性检验的结果表明,核心解释变量(*CR*)的回归系数均显著为负,即气候物理冲击能够削弱农业供应链韧性,本文的基本结论稳健。

(四)机制检验

基于前文理论分析,本文设定如下模型进行机制检验:

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 CR_{it} + \boldsymbol{X}'_{it}\boldsymbol{\beta}_i + \eta_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式(6)中,M_{it} 为机制变量,解释变量 *CR* 细分为 CR_S_{it} 和 CR_C_{it}。前者代表供应端的气候物理冲击,包括供应商所在城市是否受到物理冲击(*ifrisk_s*)和供应商所在城市发生物理气候风险事件的次数(ln*degree_s*);后者代表需求端的气候物理冲击,包括客户所在城市是否受到物理冲击(*ifrisk_c*)和客户所在城市发生物理气候风险事件的次数(ln*degree_c*)。其余符号的含义与模型(1)相同。

第一,从实物流角度进行分析。在供应商层面,本文参考袁淳等[37]的方法,选取企业采购额与营业收入的比值(*Purchase*)作为企业采购规模的代理变量,选取存货增长率(*Inv*)①作为企业存货波动的代理变量,实证结果如表 4 第一列和第二列回归结果所示②。解释变量的回归系数均显著为负,表明供应端的气候物理冲击显著降低了企业的外部采购规模与库存水平,从而降低了其应对供需扰动的缓冲能力,进而抑制农业供应链韧性。在客户层面,本文选取企业营业收入的自然对数(ln*sale*)作为代理变量,实证结果如表 4 第三列回归结果所示。解释变量的回归系数显著为负,说明需求端的气候物理冲击容易导致企业的采购订单减少、产品销路遇阻,降低核心企业的销售收入与运营能力,进而抑制农业供应链韧性。因此,假设 2 得以验证。

第二,从资金流角度进行分析。在供应商层面,本文选取企业应付账款周转天数(*DPO*)指标,周转天数越长,说明核心企业延迟向供应商付款,相当于从上游获取了更多商业信用。实证结果如表 4 第四列回归结果所示,解释变量的回归系数显著为正,这表明气候物理冲击延长了核心企业对上游的付款周期,这容易引起农业供应链上的信任危机,进而抑制农业供应链韧性。在客户层面,本文基于周立宏等[38]的研究,选取应收账款坏账准备增长率(*Baddebt*)③指标,企业坏账准备金额增长越多,说明应收账款的回收风险上升,下游客户的信用质量下降。表 4 第五列回归结果显示,解释变量的回归系数显著为正,这表明需求端的气候物理冲击增加了客户的违约概率,导致核心企业的坏账准备金额增加,这将影响核心企业的资源获取与掌控能力,进而抑制农业供应链韧性。因此,假设 3 得以验证。

表 4　机制检验回归结果一

变量	实物流		资金流		
	Purchase	*Inv*	ln*sale*	*DPO*	*Baddebt*
ln*degree_s*	-0.019 5**	-0.108 9**		18.326 0*	
	(0.008 9)	(0.044 7)		(10.066 6)	

① 存货增长率=(本期期末存货数-上期期末存货数)/上期期末存货数×100%。

② 限于版面,仅汇报解释变量气候物理冲击程度(ln*degree*)的结果,其余变量结果与之类似,留存备索。异质性分析亦同。

③ 坏账准备增长率=(本期期末坏账准备金额-上期期末坏账准备金额)/上期期末坏账准备金额×100%。

表4(续)

变量	实物流		资金流		
	Purchase	*Inv*	ln*sale*	*DPO*	*Baddebt*
ln*degree_c*			−0.043 6**		0.276 9**
			(0.019 6)		(0.110 7)
常数项	0.448 2	−0.837 4	9.251 8***	274.941 0	−2.235 5
	(0.480 1)	(1.351 6)	(1.489 8)	(386.069 0)	(3.212 7)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
观测值	632	604	805	632	781
R^2	0.761 8	0.099 1	0.957 1	0.564 9	0.154 6

第三,从创新流角度进行分析。本文参考王红建等[39]的研究,选取绿色发明专利申请数量(*GP*1)和绿色发明专利申请占比(*GP*2)两个指标作为企业绿色创新水平的代理变量。进一步地,本文选取企业与其他企业联合申请的专利数量(*CP*1)以及联合申请的专利数量总和(*CP*2)两个指标作为企业合作创新水平的代理变量。实证结果如表 5 所示,解释变量的回归系数均显著为负,这表明由气候物理冲击产生的资金压力与信任危机,对核心企业的绿色和合作创新活动形成挤出效应,影响农业供应链上的信息流动与知识共享,进而抑制农业供应链韧性。因此,假设 4 得以验证。

表 5 机制检验回归结果二

变量	绿色发明专利		联合申请专利	
	*GP*1	*GP*2	*CP*1	*CP*2
ln*degree*	−0.132 5**	−0.018 0***	−0.309 9*	−0.394 4*
	(0.054 0)	(0.006 5)	(0.185 5)	(0.209 5)
常数项	−5.059 4**	−0.729 3**	1.643 2	−0.897 4
	(2.136 7)	(0.307 9)	(6.837 0)	(7.814 7)
控制变量	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
观测值	967	967	1 015	1 015
R^2	0.464 4	0.252 8	0.487 4	0.499 1

(五)异质性分析

前文验证了气候物理冲击能够降低农业供应链的韧性,而在不同的内外部环境下,这一影响可能会存在差异。为此,接下来将从外部自然灾害和内部供应链特征两个方面进行异质性检验。

1. 自然灾害

(1)灾害类型。全球紧急灾害数据库参照由国际科学理事会(ICS)与联合国减灾办公室(UNDRR)共同赞助的减灾综合研究科学计划(IRDR)的标准,将收录的自然灾害分为水文灾害、气象灾害、气候灾害、地质灾害、生物灾害、天文灾害 6 个组别。本文样本期内纳入的灾害类型包括前 3 类①,气候灾害的样本数量较少,仅占全部样本的 0.69%,容易导致统计结果的可靠性降低,故这里暂不对其进行深入分析。参考魏龙等[34]的做法,分别对两种类型的自然灾害事件对农业供应链韧性的影响进行分析,并且采用两种自然灾害的发生次数作为代理变量,气象灾害、水文灾害分别记为 *mete_de*、*hyd_de*。表 6 第一列和第二列回归结果显示,水文灾害事件回归系数的显著性以及数值明显高于气象灾害,这表明洪水事件的发生对农业供应链韧性更具影响力。

表 6　灾害异质性分析回归结果

变量	灾害类型		灾害强度	
	气象灾害	水文灾害	“重大”及以上灾害	“较大”及以下灾害
mete_de	−0.009 5			
	(0.007 2)			
hyd_de		−0.015 3***		
		(0.005 7)		
major_de			−0.014 9***	
			(0.005 3)	
large_de				−0.000 1
				(0.014 2)
常数项	0.631 4**	0.651 0**	0.650 1**	0.631 7**
	(0.268 8)	(0.267 5)	(0.268 8)	(0.268 4)
控制变量	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
观测值	1 015	1 015	1 015	1 015
R^2	0.481 5	0.484 9	0.485 6	0.480 4

(2)灾害强度。参照中国各类突发公共事件的划分等级,以及国务院《特别重大、重大突发公共事件分级标准(试行)》中“自然灾害”类的划分标准,本文将样本中的自然灾害事件划分为“重大”及以上灾害和“较大”及以下灾害两类。其中,“重大”及以上灾害包括“特别重大”灾害和“重大”灾害两类,划分标准为造成 10 人以上死亡或经济损失 1 000 万元以上;除此之外的其他事件定义为“较大”及以下灾害,包括“较大”灾害、“一般”灾害以及其他未分级灾害事件。在此基础上,本文采用两类等级自然灾害的发生次数作为代理变量,“重大”及以上灾害、“较大”及以下灾害分别记为 *major_de*、*large_de*。表 6 第三列和第四列回归结果显示,“重大”及以上灾害事件回归系数的显著性以及系数值明显高于“较大”及以下灾害,这表明气候物理冲击对农业供应链韧性的不利影响主要是由供应商、客户受到的“特别重大”和“重大”灾害事件引致的,更

① 水文灾害包括洪水,气象灾害包括暴风雨/雪、寒潮、冰雹、热浪、闪电和雷暴、沙尘暴、极端天气、龙卷风、热带气旋,气候灾害包括干旱。

需要引起管理者的注意。

2. 供应链特征

(1)供应链位置。根据中国证监会 2012 年版行业分类,将“农林牧渔业”归类为农业供应链上游样本,将其他行业归类为农业供应链下游样本,以探究农业企业所处供应链位置对结论的异质性影响。表 7 第一列和第二列回归结果显示,在农业供应链下游的样本中,解释变量的回归系数在 5%水平下显著为负。这表明,农业企业的业务范围越靠近供应链下游,受气候物理事件的冲击越大,其农业供应链的韧性水平越容易降低。这可能是因为:农业供应链上游企业所面临的气候风险更多地来源于自身经营环境,因为气候的变化直接影响他们的核心资产,如农作物、牲畜等;而下游企业所面临的是农业供应链断裂风险,这源于他们对上游农业原材料稳定供应和下游稳定市场渠道、消费预期的高度依赖,极易导致气候物理冲击经由农业供应链链条进行传导和放大。

(2)供应链依赖度。参考陶锋等[9]的研究,本文根据核心企业披露的供应商与客户数量,取供应商采购额占比和客户销售额占比两个指标的平均值,然后依据该数值的中位数将样本划分为供应链依赖度较高和供应链依赖度较低两组,以探究核心企业对供应商和客户的依赖度对结论的异质性影响。表 7 第三列和第四列回归结果显示,在供应链依赖度较高的样本中,解释变量的回归系数在 5%水平下显著为负。这表明面对气候物理冲击时,核心企业对供应商和客户的依赖度越高,农业供应链韧性水平降低得越多,并且这一影响随着气候风险事件的相互叠加愈加明显。相反,低供应链依赖度意味着农业企业本身具有多元化的网络结构,对于供应商和客户的选择有较高的灵活性,更容易通过替代供应商和销售渠道以缓解气候物理冲击的不利影响。

表 7 供应链异质性分析回归结果

变量	供应链位置		供应链依赖度	
	供应链上游	供应链下游	依赖度较低	依赖度较高
ln*degree*	-0.025 0	-0.013 9**	-0.003 7	-0.017 7**
	(0.021 6)	(0.005 5)	(0.007 2)	(0.008 3)
常数项	0.345 6	0.605 7**	0.875 5**	0.689 9*
	(0.703 9)	(0.290 9)	(0.361 6)	(0.374 3)
控制变量	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
观测值	126	887	429	525
R^2	0.580 0	0.455 9	0.434 9	0.582 2

六、结论与建议

本文基于 2008—2024 年农业上市公司上下游供应商和客户数据,构建供应链层面的气候物理冲击指标,深入探讨气候物理冲击对农业供应链韧性的影响。研究发现,供应端和需求端的气候物理冲击对农业供应链韧性具有抑制作用,且经过一系列内生性分析和稳健性检验后结论依然成立。这一效应主要通过以存货和订单为依托的实物流、以商业信用为核心的资金流以及以绿色创新和合作创新为路径的创新流三条传导渠道实现;水文灾害、“特别重大”和“重大”灾害事件对农业供应链韧性的影响更明显,气候物理冲击对

下游供应链以及高依赖度供应链的韧性抑制作用更明显。

基于上述结论,本文提出建议。

第一,政府需重点培育兼具气候风险治理能力与产业引领能力的农业供应链链长,并将农业供应链风险辨识与管控的责任和措施纳入链长制政策中,通过设立专项基金、提供要素保障和融资支持等方式,鼓励其整合技术、知识以及数据等资源,带动上下游中小企业协同共治。如支持链长搭建数字化协同平台,实现农业供应链全链路可视化管理,不仅能及时识别和预测潜在风险,还能辅助制定应急管理方案,从而避免气候风险传递过程中的传染效应。

第二,政府应将财政与社会资本优先引入被识别为高风险的环节和主体,重点支持气候智慧型农业、抗旱水利设施、产后减损设施和冷链物流网络的建设,提升产销区农业基础设施对气候变化的适应性;对农业供应链中议价能力较弱、受气候冲击明显的经营主体,通过财政贴息、信贷绿色通道等政策工具,吸引社会资本投入其韧性改造项目。政府应创新气候风险金融工具,开发覆盖全链条的综合性气象指数保险,通过提供低息贷款或税收减免,引导支持与农业供应链相关的绿色创新、合作创新项目等,鼓励企业增加应对气候风险的研发投入与技术扩散。

第三,企业应着力增强应对各种自然灾害的能力,特别是水文灾害,分析其可能对生产、基础设施以及设备运营等方面带来的不利影响并制定相应的应急预案,如积极与气象、水利、交通等部门协同联动,实现信息实时共享;加强基础设施韧性,对企业的厂房仓库、加工厂和关键节点设施进行加固升级。此外,企业在自然灾害分级管理中,还要专门为“特别重大”灾害和“重大”灾害分别建立明确的应急储备、保险制度和触发机制等,避免农业供应链因维持和等待而陷入低质量供给和低效率运行状态。

第四,针对农业供应链下游企业,应通过多元采购,增加易受影响原料的库存,投资建设产区预处理、仓储物流节点以及利用供应链金融工具等方式应对气候风险。针对供应链依赖度较高的企业,应开展全链条气候风险评估,及时识别高风险和薄弱节点,并开展系统性情景分析,建立针对性的风险应急预案。如联合上下游企业进行风险预测与库存管理,并在合同中纳入基于气候指数的弹性条款,构建风险共担的合作关系。

参考文献:

[1]宁博,汤旭东,梁师赫,等. 气候物理冲击与企业金融资产配置:来自异常降水的证据[J]. 世界经济,2025,48(2):196-229.

[2]Walker B,Holling C S,Carpenter S R,et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. Ecology and Society,2004,9(2):5.

[3]张锦华,石帅伟. 提升我国粮食供应链韧性:理论内涵、风险外溢与逻辑思路[J]. 学术论坛,2025,48(1):125-137.

[4]Yontar E. An analytical exploration of barriers to resilient circular food supply chains using integrated structural methods[J]. Supply Chain Analytics,2025,11:100144.

[5]王娟娟,曲健. 数字经济赋能粮食供应链韧性的效应及区域分异研究[J]. 西北民族大学学报(哲学社会科学版),2024(1):138-154.

[6]Stone J,Rahimifard S. Resilience in agri-food supply chains:a critical analysis of the literature and synthesis of a novel framework[J]. Supply Chain Management:An International Journal,2018,23(3):207-238.

[7]张树山,谷城. 企业数字化转型与供应链韧性[J]. 南方经济,2024(8):137-158.

[8]白俊,任超,黄纪晨. 全国统一票据市场建设与企业供应链韧性:来自上海票据交易所的证据[J]. 经济与管理研究,2026,47(5):66-81.

[9]陶锋,王欣然,徐扬,等. 数字化转型、产业链供应链韧性与企业生产率[J]. 中国工业经济,2023(5):118-136.

[10]Tukamuhabwa B R,Stevenson M,Busby J,et al. Supply chain resilience:definition, review and theoretical foundations for further study[J]. International Journal of Production Research,2015,53(18):5592-5623.

[11]Chen J K,Wen H Y. The application of complex network theory for resilience improvement of knowledge-intensive supply chains[J]. Operations Management Research,2023,16(3):1140-1161.
[12]艾百,多力昆,赵振男. 农村数字化与粮食供应链韧性:理论机制、经验证据及政策选择[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版),2024,24(4):83-90.
[13]宋瑛,付俊治,张驰. 数字技术创新能否提升农业供应链韧性:来自涉农上市企业的经验证据[J]. 中国农村经济,2025(11):83-102.
[14]江激宇,刘嘉铭,赵勇,等. 淮河流域气候变化对粮食生产用水绿色效率的影响[J]. 经济地理,2024,44(8):181-190.
[15]Armah F A,Odoi J O,Yengoh G T,et al. Food security and climate change in drought-sensitive savanna zones of Ghana[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2011,16(3):291-306.
[16]孙志娟. 气候变化、人工智能与全要素生产率:基于 A 股涉粮企业的实证分析[J]. 经济问题,2025(4):120-129.
[17]余怒涛,成杭,阮萍,等. 从脆弱性到适应性:气候风险对供应链韧性的影响研究[J]. 证券市场导报,2025(10):30-42.
[18]汤清柳,刘嫦,孙洪锋. 气候风险对企业供应链韧性的影响研究[J]. 统计与信息论坛,2025,40(12):103-117.
[19]孙志忠,张晓燕,周韬. 农产品供应链核心企业履责如何影响金字塔底层包容性增长?:基于社会交换理论的案例研究[J]. 管理案例研究与评论,2025,18(3):371-383.
[20]Stevens A W,Teal J. Diversification and resilience of firms in the agrifood supply chain[J]. American Journal of Agricultural Economics,2024,106(2):739-778.
[21]Umar M,Wilson M,Heyl J. The structure of knowledge management in inter-organisational exchanges for resilient supply chains[J]. Journal of Knowledge Management,2021,25(4):826-846.
[22]孟德霖,李延喜,李廷刚. 客户企业极端气候风险的供应链传染效应:基于上游供应商供需匹配失衡的经验证据[J/OL]. 南开管理评论,2025-10-31. https://link.cnki.net/urlid/12.1288.f.20251030.1255.003.
[23]但佳丽,包群,谢幼木. 外需冲击与国内供应链调整:生产网络的扩散效应[J]. 世界经济,2025,48(6):3-38.
[24]史青,孟恩恩,陈梦婷. 极端天气、贸易信贷传导与供应链稳定[J]. 世界经济,2026,49(5):3-38.
[25]张鹏杨,肖音,刘会政,等. 数字化转型对供应链上下游产出波动的非对称影响研究[J]. 世界经济,2024,47(7):123-152.
[26]高星,李麦收. 物流标准化试点对制造业企业供应链韧性的影响研究[J]. 经济与管理研究,2026,47(7):94-109.
[27]章一帆,王珮瑶. 气候风险冲击如何影响企业劳动力需求:基于供应链传导效应的研究[J]. 财经科学,2026(4):125-140.
[28]汪顺,余璐,雷玲. 气候政策不确定性与中国企业升级困境[J]. 财经研究,2024,50(2):123-138.
[29]杨志红,王小林. 涉农企业数字化转型与高质量发展[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),2025(1):108-120.
[30]丁存振,纪祥宇. 全球粮食供应链韧性测度及其演化研究[J]. 地理科学进展,2025,44(1):103-116.
[31]Tabassum S,Pereira F S F,Fernandes S,et al. Social network analysis:an overview[J]. WIREs:Data Mining and Knowledge Discovery,2018,8(5):e1256.
[32]陈雯,范茵子. 企业供应链风险感知与合作关系稳定性[J]. 管理世界,2024,40(11):209-228.
[33]郜钰格,谢永平,杨艳萍. 网络合作能力与风险投资自我网络动态性:知识属性的调节作用[J]. 管理评论,2023,35(5):29-41.
[34]魏龙,蔡培民,潘安. 供应链冲击、多元化战略与企业发展韧性:来自中国重大自然灾害的证据[J]. 中国工业经济,2024(9):118-136.
[35]周宏伟,张露文,陈晓英,等. 供应链外部冲击与全球供应链转移:基于全球重大自然灾害的证据[J/OL]. 财经科学,2026-06-29. https://doi.org/10.27041/j.cnki.cjkx.20260627.001.
[36]Lewbel A. Constructing instruments for regressions with measurement error when no additional data are available, with an application to patents and R&D[J]. Econometrica,1997,65(5):1201-1213.
[37]袁淳,肖土盛,耿春晓,等. 数字化转型与企业分工:专业化还是纵向一体化[J]. 中国工业经济,2021(9):137-155.
[38]周立宏, 祁晓凤, 李孟霏. 科技金融、供应链外溢与劳动力就业——基于促进科技与金融结合试点政策的证据[J]. 经济学动态, 2024, (12):18-35.
[39]王红建,张高昂,吴涛,等. 客户环境关注、压力传导与供应商企业绿色创新[J]. 经济研究,2026,61(1):72-94.

Climate Physical Shocks and Agricultural Supply Chain Resilience from a Complex Networks Perspective

LIU Xuening, ZHANG Yingliang
(Southwest University, Chongqing 402460)

Abstract: Climate physical risks are increasingly frequent, intense, and complex, seriously disrupting agricultural supply chains. As complex networks, these supply chains are prone to cascading disruptions, and the risk contagion effect cannot be ignored. Thus, exploring the impact of climate physical shocks on agricultural supply chain resilience from a complex network perspective holds significance for maintaining the long-term security and stability of agricultural supply chains and achieving high-quality agricultural development.

Based on complex network analysis methods, this paper constructs a climate physical shock index at the supply chain level by matching data from upstream suppliers and downstream customers of listed agricultural firms from 2008 to 2024. It examines the impact of climate physical shocks on the resilience of agricultural supply chains and the underlying mechanisms from the perspectives of adaptive, organizational, and learning abilities. The findings show that climate physical shocks can weaken the resilience of agricultural supply chains, and this conclusion still holds after endogeneity analysis and a series of robustness tests. Mechanism analysis reveals that climate physical shocks are transmitted through three channels: physical flow based on inventory and orders, financial flow centered on commercial credit, and innovation flow based on green and cooperative innovation. Heterogeneity analysis indicates that hydrological, extremely major disaster and major disaster events have a more notable impact on agricultural supply chain resilience, and these shocks have a more pronounced negative effect on the resilience of downstream and highly dependent supply chains. These results can provide references for policy formulation and firms' strategic adjustments.

The contributions lie in three aspects. First, this paper fully considers the inherent features of agricultural supply chains and their interaction with the external environment, conceptualizes them as a continuous development ability centered on adaptive, organizational, and learning abilities, thereby expanding the research scope of supply chain resilience in the agricultural sector. Second, this paper uses complex network analysis methods and integrates the structural features of the supply chain network. It measures agricultural supply chain resilience by focusing on node centrality and network connectivity, extending the analysis to all dyadic relationships and ego-networks in the supply chain and thereby addressing the limitations of existing perspectives and methods. Third, focusing on the transmission features of climate physical shocks in agricultural supply chains and the asymmetric effects between suppliers and customers, this paper identifies the logical path between climate physical shocks and agricultural supply chain resilience from the perspectives of physical, financial, and innovation flows, thereby providing empirical references for improving the climate resilience of the agricultural supply chain system.

Keywords: resilience; agricultural supply chain resilience; climate physical shock; complex network; risk contagion effect

编校:宛恬伊