

产业网络灾害经济损失评估研究进展

李卫江, 温家洪, 李仙德

(上海师范大学地理系, 上海 200234)

摘要:开展产业网络灾害经济损失评估研究,是理解产业网络脆弱性和潜在风险,科学指导灾前风险防范及灾后恢复重建决策的关键环节。本文从产业网络中灾害扩散的角度,对其造成的经济损失类型及研究进展进行了系统梳理。结果表明,产业物理损失方面,主要通过建立灾害强度参数与厂房建筑、生产设备及存货等物理损失程度间的脆弱性曲线进行评估。受灾产业中断损失方面,应关注其组合投入要素物理受损情景下的生产能力损失程度(PCLR)。产业网络灾害波及损失方面,主要存在微观“企业供应链网络”和宏观“产业链网络”二种研究尺度。其中,前者以微观企业个体为基本粒度,利用复杂网络分析方法,模拟灾害依托企业供应关系扩散的空间过程及其造成的供应链中断损失;后者以聚合的产业部门或区域为基本粒度,利用投入产出(IO)、可计算一般均衡(CGE)等宏观经济计量模型,模拟灾害在产业部门或区域间的扩散过程及其造成的宏观区域经济损失。最后,从情景分析的视角,构建包括灾害事件场景、产业网络暴露、节点物理损失和中断损失、供应链网络中断损失、宏观产出损失于一体的多过程、多尺度经济损失集成评估体系,以综合模拟灾害损失在产业网络中的放大效应。

关键词:产业网络;灾害;直接损失;间接损失;进展

1 引言

经济全球化,使得地方企业、产业和市场高度依赖,构成一个复杂的供应链和价值链网络。同时,准时制和精益生产准则(Just-in-time & Lean principles),使得供应链上各节点对中间产品流转的时效性更为严格。局部关键节点、基础设施或道路网络一旦直接遭受损坏而失效,关联影响都可能通过供应链前向和后向作用扩散到整个产业经济系统,从局部受灾地区波及到更广泛的地域空间,引发系统性风险(Rose et al, 2002; Wagner et al, 2006; Helbing, 2013)。特别是,近年来日益频发的极端自然灾害事件,例如2005年卡特里娜飓风、2011年日本地震、2011年泰国洪水等,对地方制造业的破坏及其导致的全球经济间接波及影响,使得产业网络

的灾害扩散和经济损失问题日益受到关注。如何有效进行产业网络灾害风险建模,揭示灾害扩散路径和机理,定量评估灾害事件对产业网络造成的直接损失和间接影响,构建兼具效率和韧性(Resilience)的产业经济系统,成为灾害风险研究和管理领域亟待解决的热点和难点问题(Levermann, 2014; Okuyama et al, 2014; 李宁等, 2017)。

开展灾害经济损失评估研究,有助于理解产业网络的脆弱性和潜在风险,从而为合理的灾前风险防范和灾后恢复重建决策提供科学依据。少数研究(Khazai et al, 2013; Merz et al, 2013)从生产设施依赖性、劳动力依赖性、基础设施依赖性、供应网络依赖性等方面探讨了产业网络灾害脆弱性的驱动因素,利用指标体系法定性评估区域产业潜在受损的程度和相对高低排序。大多数研究则基于数据

收稿日期:2017-09-26;修订日期:2018-01-11。

基金项目:国家自然科学基金项目(41771540, 5161101688, 41601566, 71603168, 41301168);上海师范大学理工科科研项目(SK201721) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771540, No.5161101688, No.41601566, No.71603168, No.41301168; Science and Engineering Research Project of Shanghai Normal University, No. SK201721]。

作者简介:李卫江(1976-),男,河南灵宝人,博士,副教授,主要从事自然灾害影响评估、GIS开发与应用研究,E-mail: lwj@shnu.edu.cn。

引用格式:李卫江,温家洪,李仙德. 2018. 产业网络灾害经济损失评估研究进展[J]. 地理科学进展, 37(3): 330-341. [Li W J, Wen J H, Li X D. 2018. Progress of research on economic loss assessment of disasters in industrial networks[J]. Progress in Geography, 37(3): 330-341.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.03.004

驱动的定量方法,在综合考虑自然灾害事件情景、产业暴露以及脆弱性的基础上,试图估算灾害造成的产业网络直接和间接损失。但是,产业网络是由生产节点以及物流、资金信息流构成的地理空间网络,作为特殊承灾体,同时存在直接暴露和间接暴露,个体之间具有复杂关联性。受到灾害冲击后,由于影响持续时间不确定性、波及地理空间的广域性、网络关联结构复杂性、灾害影响传递机理认识的有限性,以及研究立场和服务主体的不同,对于灾害经济损失的理解、模拟方法、空间尺度(粒度)、结果可靠性和意义等方面都存在很大差异性(苏桂武等, 2003; 张继权等, 2007; 刘希林等, 2008; 叶珊珊等, 2010; 赵思健, 2012)。例如,由于研究主体和立场的不同,对于损失评估的范围会有所侧重。政府管理部门从宏观区域角度,需要综合评估灾害所导致的区域环境、经济产出、居民就业和收入等一系列影响;企业从微观角度,则更多考虑灾害对自身生产系统的物理损坏及生产经营过程中断所造成的停产损失;单一小企业仅关注自身的物理损失和停产损失,跨国企业则更关注局部地区生产节点受损对整个供应链网络中断的影响。研究空间尺度的不同,承灾体建模的精细程度也会存在很大差异。精细尺度研究通常以企业层面数据库或实地调查数据为主要来源,以物理设施个体(企业、工厂、建筑或基础设施)为基本粒度;中观或宏观尺度研究通常利用公开的、聚合的统计数据为主要来源,以完整的产业部门、行政区或土地利用功能区为基本单元。

由于立场角度、空间尺度、数据来源和方法等的差异,造成经济损失评估结果往往存在很大不确定性,并且导致防灾工程规划、灾害保险设计、企业业务连续性计划(BCP, Business Continuity Planning)以及政府宏观区域规划等实际应用决策出现偏差(Meyer et al, 2013)。针对现有研究存在的问题,本文从产业网络中灾害扩散的角度,厘清经济损失的概念范畴和最新研究进展,并构建动态情景化、多过程、多尺度的经济损失集成评估体系,为国内外产业经济领域灾害影响评估提供思路和方法借鉴。

2 产业网络灾害经济损失范畴的厘定

在早期,学者分别从不同角度对灾害经济损失

进行概念界定和类型划分,如直接损失和间接损失,存量损失与流量损失,直接损失、一阶损失与高阶影响等(Parker et al, 1987; National Research Council, 1999; Rose, 2004)。针对以上不同划分方法,Hallegatte (2015)立足于灾害在产业网络从局部节点到整体扩散的角度,对其不同阶段造成的经济损失类型进行了厘定。首先,灾害(特别是极端灾害)直接造成局部地区生产节点的厂房建筑、生产设施、存货等物理受损(Asset damages),供电、供水、供气等基础设施破坏,以及劳动力供给受阻等;以上因素的综合影响,导致直接受灾节点自身运行中断而形成停产或减产损失(Business interruption losses);同时,生产节点之间道路、港口等运输联系物理受损与中断,也将导致原材料、部件及信息供应流受阻;由于直接受灾节点和运输道路被整合在复杂供应链网络中,停止期间会导致整个供应链网络运行的中断,形成供应链中断损失(Supply chain disruption losses),并且依托供应链使灾害影响从局部的直接受灾地区扩散到外部空间甚至全球范围;企业个体及供应链网络中断损失构成了所在产业部门损失(Sector losses),产业部门损失通过部门之间的投入产出关系波及到整个产业网络形成总产出损失(Output losses);产出损失引发宏观市场供求关系发生变化,使企业、政府、金融机构及终端消费者受到影响,进一步导致长期的宏观经济反馈影响等(Macro-economic feedbacks)。

根据Hallegatte (2015)界定,并参考Rose (2004)提出的存量和流量损失分类方法,本文把受灾节点物理损失(Asset damages)归结为直接经济损失。受灾节点的停产减产损失(Business interruption losses),企业之间交易关联性所导致的其他节点及整个供应链网络运行中断损失(Supply chain disruption losses),产业部门之间投入产出依赖性所导致的总产出波及损失(Output losses),以及长期宏观经济反馈影响(Macro-economic feedbacks)归结为间接经济损失。

3 产业网络直接损失评估研究

自然灾害导致的产业物理设施损失评估已形成许多成熟方法。通常基于详细的灾害危险性数值模拟(如洪水淹没深度、地震烈度),探究不同强度灾害事件对物理设施损坏、劳动力伤亡以及其依赖

的关键基础设施运行中断影响等。主要研究方法是基于历史灾情调查或工程模拟的方法建立灾害强度参数与物理损失程度间的脆弱性曲线,但是这些曲线在具体的灾害强度参数、韧性指标、评估内容、损失表达形式等方面有所差异。

以洪水灾害为例,表1对比了针对产业部门洪水物理脆弱性的3种典型模型。在洪水强度参数方面,3个模型都选择了水深指标,但是水深等级划分上存在较大差异;FLEMOcs还考虑了浑浊度,并量化为3个等级;Multicoloured Manual还考虑了淹没时间,并划分为2个等级。除3种模型之外,其他一些针对山洪、风暴洪水的损失评估模型(Ernst et al, 2010; Pistrika et al, 2010)还考虑了流速、水位升降速度等指标。承灾体类型划分方面,HAZUS-MH考虑年代、地基类型、离地高度、材料和结构(分为木、钢、混凝土、砖、活动房)、体积等因素分类建立厂房建筑的脆弱性模型,并按照使用功能划分为重工、轻工、食品/医药/化工、金属/矿物加工、高新技术和商务办公等,分类建立生产设备和存货的脆弱性模型;FLEMOcs参照欧盟经济活动分类标准,仅粗略划分为工厂制造、公共服务、企业服务、商业贸易4大类,没有进一步的行业细分;Multicoloured Manual则按照使用功能自行划分为工厂、仓库、零售、办公及其他等5大类,并且给出每种类型单位面积资产价值。承灾体规模等级划分方面,HAZUS-MH根据设施实际尺寸划分等级;FLEMOcs根据员工数量划分等级;Multicoloured Manual则没有考虑规模因素。在物理损失表达方面,HAZUS-MH和FLEMOcs表示为相对损失率,Multicoloured Manual则表示为绝对损失金额。在评估内容方面,HAZUS-MH和FLEMOcs把厂房建筑、生产设备和存货分类评估,Multicoloured Manual仅给出1个综合值。除以上3个模型外,de Moel等(2014)还从土地利用的角度,将承灾体划分为工业、基础设施等36大类,给出每类用地的单位面积资产价值,并基于

历史洪灾资料建立淹没水深与损失率的关系。

以地震灾害为例,HAZUS-MH在进行厂房建筑脆弱性评估时,与洪水有所不同,重点根据建筑材料与结构、建筑高度、设计标准等指标划分类型;生产设备和存货的划分类型则与洪水模型相同。日本内阁府在建立本国的房屋建筑地震脆弱性曲线时,则重点考虑建筑年代和结构2个因素,按照建筑年代划分为旧(1971年以前)、中(1972-1980年)、新(1981以后)3类;按照材料和结构划分为木制和非木制结构2类;分别建立其不同烈度下的半损和全损概率曲线,并形成全国通用标准。

近年来,我国引入自然灾害风险管理的概念后,由于风险评估和灾害保险等领域应用需求的增加,定量的物理脆弱性曲线(模型)才逐步受到重视,针对住宅和室内财产损失评估方面的脆弱性模型构建和实证研究日益增多(尹占娥等, 2010; 李卫江等, 2014)。在产业经济领域,主要集中在气象灾害对农作物脆弱性和产量损失的影响,而针对制造业和商业等领域的实证研究较少。殷杰等(2012)从土地利用的角度,通过小样本灾损调查,尝试构建面向工业仓储、道路交通等7大类用地的风暴洪水脆弱性曲线,但其把工业仓储用地作为一个类型的划分方法较为粗略,没有考虑内部各门类暴露和脆弱性的差异。

虽然自然灾害物理损失评估已经形成了较为成熟的方法,但是针对产业经济部门仍然存在若干问题需要解决:①不同类型灾害对产业设施的致灾机理差异较大。目前针对河流洪水、地震、暴雨内涝灾害的相关研究较多,定量的物理脆弱性曲线较为丰富,而对于近年来沿海地区频率、强度和影响日益上升的台风(飓风)、风暴洪水等灾害研究相对不足。沿海地区往往是人口和产业活动最为密集的地区,使得物理损失评估缺少可靠的脆弱性曲线作为依据。②与居民住宅等灾害损失评估相比,由于产业经济部门类型繁杂,不同类别产业的厂房建

表1 产业部门洪灾物理脆弱性模型比较

Tab.1 Comparison of flood damage functions for the industrial sector

模型	国家	建立方式	损失形式	洪水强度参数	韧性因素	损失评估内容
HAZUS-MH (Scawthorn et al, 2006)	美国	灾损统计与工程模拟	损失率	水深	承灾体类型、尺寸	分为厂房建筑、生产设备、存货3个值
FLEMOcs (Kreibich et al, 2010)	德国	灾损统计	损失率	水深、浑浊度	承灾体类型、员工数量、防灾措施	分为厂房建筑、生产设备、存货3个值
Multicoloured Manual(Penning-Rowse et al, 2005)	英国	灾损统计与工程模拟	损失绝对值	水深、持续时间	承灾体类型、提前预警时间	1个综合值

筑、生产设备和库存结构差异性较大,韧性因素不尽相同,而且相关的灾损样本资料非常缺乏,导致适合各行业门类的资产价值折算及灾损曲线构建非常困难。因此,有必要借助政府机构、保险公司及企业共同调查获得大规模样本,或者通过情景模拟、工程试验等方法评估产业物理脆弱性,以缓解灾损资料不足的瓶颈。③由于所处区域社会经济条件的不同,在引入和使用国际上已有脆弱性曲线时,需要做深入、细致的本地化验证和修正。

4 产业网络间接损失评估研究

4.1 受灾产业运行中断损失评估研究

相关研究主要从灾后(Ex-post)损失统计的角度,通过3种方法估算直接受灾地区的产业中断损失(Meyer et al, 2013):①利用特定行业部门的参考指标值和实际中断时间评估,例如每个员工每天的增加值损失。②通过比较受灾年份和非灾年份的产出(产量)减少值。③利用物理损失乘以经验系数,例如,刘希林等(2008)面向工业等8大门类,建立地貌灾害(泥石流)造成的直接损失与间接经济损失的比例系数,利用经验系数法估算间接损失。上述评估方法简单、快速,但是存在较大的主观性。

对于产业系统而言,应该从灾前(Ex-ante)角度,关注不同灾害情景下,组合投入要素物理受损可能导致的生产能力损失程度(PCLR)变化(Kajitani et al, 2014; Okuyama et al, 2014; Hallegatte, 2015; Koks et al, 2015)。作为关键性指标因子,PCLR能综合反映直接受灾产业功能和产出水平受破坏程度,并影响其灾后生产中断时间及恢复过程,同时能为IO、CGE等宏观间接损失评估模型提供必要的输入参数(Kajitani et al, 2014)。通常认为自然灾害对产业造成的物理损失就是产出损失(Koks et al, 2015),这种利用单要素的物理损失表示产出损失的方法缺乏合理性,它忽视了各种投入生产要素转换为最终生产能力或产出水平的过程。

相关研究尝试基于特定的灾害情景,构建物理损失与产出损失的转换模型,估算灾区不同类型产业PCLR变化。如Nakano等(2013)重点考虑震后灾区厂房建筑和生产设施受损2个因素,面向基础材料、加工组装、食品、纺织以及其他日用消费品等产业部门,分别建立地震动强度与PCLR变化的关系模型。Kajitani等(2014)在Nakano研究的基础上,

进一步考虑产业所依赖的基础设施(包括电力、供水和燃气)中断以及劳动力受损程度。以2011年日本东北地震为例,建立灾区不同类型产业PCLR及空间分布的估算模型。该方法较周全地考虑了各种损失情景对产业生产能力的影响,但以实证调查为主,需要大量历史灾损数据为基础。Koks等(2015)以荷兰鹿特丹港区洪水灾害为情景,考虑固定资产和劳动力2个生产投入要素,分别基于de Moel建立的资产脆弱性曲线和Jonkman等(2008)建立的人口脆弱性曲线,模拟洪水造成的资产和劳动力损失额,并结合本地区投入产出表中各产业部门的要素投入构成关系和Cobb-Douglas生产函数,定量模拟不同频率洪灾情景下各类产业的生产能力损失。该方法虽然基于定量模型,但其利用水深与不同类别产业用地单位面积价值损失关系作为资产脆弱性曲线较为粗略。

不同类别产业都具有其自身的灾害脆弱性,对原材料、生产设施、劳动力、基础设施等生产要素投入依赖程度也呈现差异性。例如,冶金、石油冶炼、机械制造等重工业部门生产设备投入大,水、电能消耗量高,劳动力依赖性小。汽车制造等加工组装型产业,生产设备精密程度高,劳动力需求量大,大量部件的空间网络化生产对交通物流联系依赖性大。同一自然灾害情景,对不同类别产业造成的生产能力损失程度和中断时间会存在很大的差异性。因此,综合考虑物理损坏、劳动力供给受阻以及关键基础设施中断等情形,细分不同类型产业,构建生产能力损失程度及空间分布估算模型,仍是亟待解决的难点问题。

4.2 产业网络灾害扩散过程模拟与波及损失评估研究

由于产业网络节点之间的直接或间接关联性,受灾节点的不利影响会逐级传导到其他关联节点并且扩散到整个网络,形成灾害扩散效应和波及损失(Helbing, 2013)。相关研究表明,即使自然灾害造成的局部节点物理破坏很有限,停产时间很短,但是由于产业网络的高度延伸性和关联性,其造成的间接损失却可能非常严重,甚至波及到整个产业经济系统,间接损失通常在总损失中占有显著甚至主导性份额(Noy, 2009; Przyłuski et al, 2011; 吴吉东等, 2012)。

根据前述第2节Hallegatte(2015)界定,灾害在产业网络中的扩散过程可归结为“企业供应链网

络”和“产业链网络”2个层面,反映了对产业网络认知及建模研究的多尺度性。“企业供应链网络”是以微观企业个体为节点(或者基本粒度),灾害影响依托企业之间的复杂交易和供应关系网络进行扩散。例如,汽车制造工厂包括发动机、动力传动、车体、内外饰等部件制造工厂和整车组装厂,某个节点一旦受损就会造成相关联的整车供应链中断。整车生产线通常是基于全国甚至全球范围内的零部件供应工厂组织生产,因此灾害影响会间接扩散波及到更广域的空间。相互交织的整车生产线构成了汽车产业网络,整车生产线的中断会进一步导致汽车产业部门损失。“产业链网络”是以聚合的产业部门(或行政区域)为节点,灾害影响依托产业部门间投入产出依赖关系进行扩散。例如,汽车产业受损后,进一步间接波及到关联的钢铁、塑料等产业。

4.2.1 基于“企业供应链网络”的灾害扩散与中断损失评估研究

该类评估主要从企业的立场和角度出发,以微观企业个体为节点,利用企业之间的复杂交易和供应关系,构建供应链网络,定量模拟灾害依托供应链网络的空间扩散过程,并评估可能造成的供应链网络经济损失,目的是为合理制定企业业务连续性计划(BCP)和韧性策略提供科学依据。

企业是产业经济系统最基本的承灾体单元,灾害造成的宏观区域经济损失取决于微观企业个体的预警、备灾、应急响应行为(Haraguchi et al, 2014)及企业之间相互关联的网络结构(Henriet et al, 2012; Hallegatte, 2015),微观层次灾害损失是宏观经济损失的基础和最终决定因素(郑功成, 2010)。近年来,随着海量数据库技术及数据密集型计算科学的发展,可利用经济普查数据和各个行业领域企业层面数据库的逐步公开(如全球性汽车产业数据库—Marklines、中国经济普查基础数据库、日本帝国数据库—TDB、日本东京商工调查数据库—TSR、美国物流调查数据库—CFS等),基于大体量的企业个体数据及其复杂交易关系,从精细尺度构建企业供应链网络,利用复杂网络分析方法(Complex network analysis)模拟灾害扩散效应成为一种新的趋势(Henriet et al, 2012; Haraguchi et al, 2014; Saito, 2015),它更强调从结构的角度分析网络性能,能更好地模拟产业网络的结构可靠性、关键性节点,以及灾害扩散的因果机理及依赖路径等。

现有相关研究利用社会网络(Kim et al, 2011)、贝叶斯网络(Garvey et al, 2015)、人工神经网络(Teuteberg, 2008)、Agent (Bierkandt et al, 2014)、复杂适应性系统(Pathak et al, 2007)等,从供应链网络的层面进行结构可靠性、灾害扩散等关键问题的理论模拟研究,并提出不同调控策略以优化网络整体抗灾韧性。但是这些研究仅仅针对网络拓扑结构进行分析,没有考虑网络要素(节点和边)所处特定地理环境及空间结构关系对其脆弱性或者韧性的影响,无法模拟灾害的空间扩散过程并提出有效的空间应对措施。

现有相关研究着重探讨供应链网络的拓扑结构和地理空间因素对灾害扩散的影响。如 Saito (2015)基于2011年日本地震后企业交易网络的调查发现,小世界(Small-world)和无标度(Scale-free)交易结构对灾害扩散和传导具有加速作用;在企业交易网络中,枢纽(Hub)节点是决定灾害扩散和结构韧性的关键性因素;在经济全球化背景下,枢纽节点的空间分散趋势,会进一步加剧局部灾害损失向外部空间的扩散。Todo等(2015)探讨了企业交易网络的空间结构对其韧性影响,通过对2011年日本地震灾后企业的实地调查发现,企业的地理空间集聚程度会影响供应的多渠道性和抗灾韧性,对灾害的直接和间接损失呈现不同效应。Haraguchi等(2014)对2011年泰国洪水事件后不同企业供应链损失进行比较后得出,依赖性(对关键节点的依赖程度)、可视性(对上下游关关节点空间位置和脆弱性的认知)、可替代性(关键部件的标准化程度及其可替代性)和便携性(生产设施灾时的空间可移动性)是影响网络韧性的关键因素。李卫江等(2016)通过空间映射模型,把企业交易关系网络转换为所属生产工厂实体及其运输道路构成的地理空间网络,并模拟关键节点和边要素物理受损情景下的灾害空间扩散效应。

现有相关研究系统分析了自然灾害对企业及供应链网络的致灾机理及造成的间接损失(唐彦东等, 2011; Abe et al, 2013)。研究表明,除了直接物理损失外,自然灾害短期(对应于灾后的应急响应阶段和恢复阶段)还可能造成更为严重的间接损失。例如,由于生产节点或者运输联系受损,导致部件生产和供应短缺,影响网络整体运行而形成中断损失;灾害引发区域原材料、劳动力、公共设施供给稀缺性以及价格上涨,间接增加企业成本支出;

如果受灾产品在区域市场供给中占有较大比重,将导致市场供求关系发生变化,其他替代产品可能使企业丧失市场竞争力;灾害导致交通中断,改变原有部件产品运输方式或运输线路,增加企业运输成本;受灾节点增加应急与恢复重建支出等。Abe等(2013)从企业供应链网络的层面,构建了自然灾害对关联企业、政府、金融保险机构及终端消费者影响的概念流程图。Simchi-Levi等(2015)综合考虑网络节点暴露和关键性、网络结构以及恢复时间(TTR, Time To Recover)等因素,构建了供应链网络中断损失评估的概念模型。唐彦东等(2011)从经济学供求曲线及弹性角度,从理论上探讨了灾后供求关系及价格变化对企业产出的动态影响。

从企业供应链网络层面,利用复杂网络分析和GIS方法,可有效模拟拓扑和空间结构特征以及企业个体行为对于网络脆弱性的影响,有效识别网络关键性节点以及灾害扩散的因果机理及依赖路径等。但是,精细尺度研究仍受到几方面限制:①该方法属于数据密集型方法,需要大量的微观企业及其复杂交易关系数据做支持,全面获取这些基础数据较为困难。由于受到数据可获得性的限制,目前相关的实证研究仍主要限定在某一特定的局部区域、企业网络或行业部门。基于Web文本、企业年报、行业统计资料等大数据方法快速、准确挖掘相关海量信息,可以在一定程度上缓解基础数据不足的瓶颈。②企业供应链网络属于一种复杂网络,不仅企业之间存在复杂的组织结构、股权结构和资金信息交易结构,而且企业所属工厂实体之间还存在复杂的产品供应和物流空间结构,这些都是影响其灾时脆弱性和灾后恢复力的关键性因素。如何针对大体量的企业交易和供应关系数据,利用复杂网络分析方法和GIS技术,构建拓扑和地理空间网络、评估网络韧性、模拟灾害的扩散效应等,仍然是亟待解决的关键技术问题。

4.2.2 基于“产业链网络”的灾害扩散与产业波及损失评估研究

该类评估主要从宏观区域及政府管理的角度,以完整的产业部门、行政区(包括国家、省、城市等)作为节点,构建产业链网络,利用产业部门之间或者行政区域之间的投入产出关联系数,以及投入产出法(IO)、可计算的一般均衡模型(CGE)、社会核算矩阵模型(SAM)或者基于特定灾害事件的混合模型(ARIO)等方法,定量模拟灾害在产业部门间或区

域间的扩散过程及其造成的区域经济产出、居民就业和收入等一系列间接影响,目的是为灾后关键产业部门的恢复重建提供决策依据(Brookshire et al, 1997; Rose et al, 2005; Steenge et al, 2007; Hallegatte, 2008)。

Okuyama等(2014)对IO、CGE模型的优缺点进行了比较,认为IO模型结构简单、计算方便,但存在线性模拟、缺乏行为响应、市场价格缺失等不足;CGE是在IO基础上的非线性改进模型,考虑了各行为主体(如生产者、消费者、政府等)的经济行为,如价格关系、供需关系、商品要素的替代关系等,能更真实地刻画灾害冲击在不同经济部门和宏观经济领域的传导机制,但存在模型复杂、数据和计算技术要求高等问题。国内学者也针对IO、CGE模型进行了适用性探讨(王海滋等, 1998; 徐嵩龄, 1998; 路琮等, 2002),并开展了一系列评估实证研究,如1998年长江流域大洪水对湖南省各个部门的经济影响(张鹏等, 2012);2008年汶川地震对四川省各部门经济生产和恢复的影响(丁先军等, 2010; Wu et al, 2012; 李宁等, 2012; 吴先华等, 2015; 魏本勇等, 2016; Wu et al, 2017);2008年雨雪冰冻灾害对湖南省各产业部门的经济影响(解伟等, 2012);2011年长三角流域洪灾对流域范围内不同行业和区域的间接影响(姜玲等, 2016);2011年日本地震对世界各国各个部门的经济影响(孟永昌等, 2015)等。IO、CGE作为宏观经济计量模型,在模拟灾害的产业部门或者区域间的扩散效应、评估灾害造成的宏观经济影响、指导政府灾后恢复重建和资金分配等方面起到了非常关键的作用,也是目前使用最为广泛的方法。

但是,IO、CGE宏观模型存在几个方面问题需要解决:①模型主要应用在聚合的产业或区域尺度,把产业部门或者行政区域(如国家、省、城市等)作为整体单元,反映它们之间的关联性,由于对区域产业经济中微观企业个体关注较少,在一定程度上忽视了特定产业网络物理、拓扑及地理结构的复杂性(Schweitzer et al, 2009; Haraguchi et al, 2014),难以自下而上模拟微观企业个体行为及相互作用可能导致的系统非均衡动力学机制(Farmer et al, 2015),并进而回答“自然灾害对于单个关键生产节点或基础设施的物理损坏是如何放大演变为对宏观产业经济系统的影响?”这一风险防范领域中迫切需要解决的关键问题(Meyer et al, 2013)。②IO、CGE模型需要直接受灾产业部门的产能损失作为

关键性输入参数,目前主要依靠灾后统计或者某种假设来得到这一参数,这使得模型主要局限应用在灾后的恢复重建阶段。在企业供应链网络全球化背景下,受灾产业部门的经济损失不仅仅局限在直接受灾地区,还可能会通过供应链网络波及其他外部行政区域(空间溢出效应),这使得准确获取模型参数的难度非常大,也造成IO、CGE模型间接损失评估结果的不确定性。如何从灾前风险分析的视角,设定不同强度的灾害情景,叠加企业空间网络和脆弱性模拟,合理评估主要受灾产业部门的经济损失,为IO、CGE提供必要输入参数,实现直接损失和间接损失的集成评估,是亟待解决的关键问题(Kajitani et al, 2014; Koks et al, 2015)。^③由于受到可利用投入产出表限制,IO、CGE模型通常应用在宏观的行政区域尺度,模拟结果难以反映灾害损失在行政区单元内部的空间变化,空间粒度不能有效满足精细化灾害风险管理的应用需求。因此,如何提高区域投入产出表(区域间投入产出表)中行业部门、区域单元的细分程度,是解决问题的关键。

5 产业网络灾害经济损失集成评估体系

传统上,防洪、防震等工程领域主要关注灾害的物理损失,企业BCP主要关注供应链网络灾害脆弱性和中断经济损失,政府公共管理部门主要关注灾害对区域宏观产业经济影响。由于分属于不同的研究领域,处于相对分割状态(Meyer et al, 2013),导致难以从整体上模拟和理解灾害影响从局部关键节点的物理损失扩散波及到整个产业网络的过程和机理(Przytulski et al, 2011),并难以综合评估灾害事件造成的经济损失。因此,亟待从灾前情景分析的视角,构建包括灾害事件场景、产业暴露、节点物理损失与中断损失、供应链网络中断损失到产业部门波及损失于一体的动态、多过程、多尺度经济损失集成评估体系(图1)。

5.1 产业暴露

作为特殊类型的承灾体,产业网络可能覆盖全球范围,远超出直接受灾区域;节点之间的关联网络具有特定的拓扑和地理空间结构特征;具有多级性,属于网络中的网络;网络节点分布具有非均衡性,某些关键节点的受损可能会导致整个网络功能崩溃等。因此,针对产业网络的建模较为复杂,

需要同时考虑直接和间接暴露,兼顾个体节点资产暴露及其关联网络的整体结构韧性,注重自下而上的空间多尺度性。

针对局部脆弱性区域或关键性产业,可利用各种企业层面基础数据,构建精细尺度的产业暴露。主要思路为:根据企业地址信息,通过地理编码(Geocoding)建立企业节点的点状分布数据,并得到固定资产、存货、从业人员、产出规模等资产清单;利用企业之间的多层级交易关系和图(Graph)模型构建供应链拓扑网络;根据各企业节点的地理坐标和供应关系,依托区域道路网络和部件物流信息,利用GIS方法把拓扑网络映射为地理空间网络。

同时,利用复杂网络分析和GIS技术评估网络结构的韧性。基本思路为:利用社会网络分析(SNA),计算网络节点的拓扑属性(例如,节点度、所处网络等级),评估网络拓扑结构特征对其韧性影响;利用GIS空间分析模型,计算不同等级节点的空间集聚特征和空间关联结构,评估网络空间结构对灾害空间扩散的影响;从节点的部件生产属性(如标准化及可替代性)、部件类型关键性、拓扑学属性等多个维度,识别网络关键性节点;利用Agent模型,把不同类型节点抽象为具有一定属性和行为特征的主体,模拟关键节点在不同响应行为和韧性策略下,如改变节点的上下游供应关系、增加节点的多源供给及可替代性、提高节点库存水平、提高节点的备灾和灾后恢复水平、改变节点的空间布局、调整部品运输联系的空间结构等,对灾害扩散的阻滞效应及其对网络整体韧性的影响。

5.2 节点物理损失与中断损失评估

对国内外已有成熟的厂房建筑、生产设施、基础设施、道路网络、人口等物理脆弱性曲线进行本地化验证和修正;根据物理脆弱性曲线,选择某一强度自然灾害情景,评估受灾地区产业节点的物理损失程度;综合考虑节点物理设施和劳动力损失,以及基础设施中断的影响,利用区域投入产出表及Cobb-Douglas生产函数,把有形资产及劳动力等生产要素的物理损失转换为生产能力损失,估算其生产能力受损程度(PCLR)变化;根据PCLR,推演其停产(减产)时间及恢复进程,评估其潜在的运行中断损失。

5.3 企业供应链网络中断损失评估

基于网络中直接受损关键节点的生产能力损失程度和中断时间,估算整个供应链网络运行中断

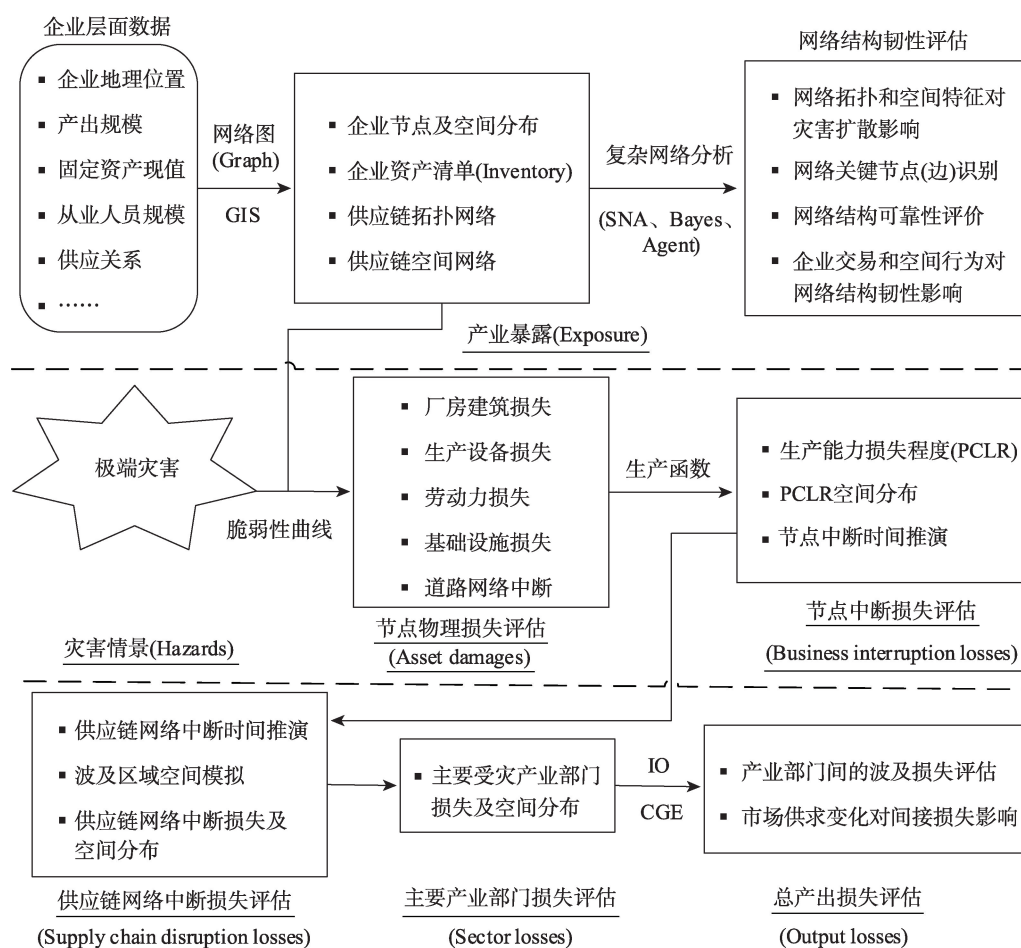


图1 产业网络灾害经济损失集成评估体系

Fig.1 Integrated assessment system of economic losses induced by disasters in industrial networks

及恢复时间(TTR),并建立其灾后产出(产量)水平随时间变化函数;利用Simchi-Levi等(2015)提出的供应链风险评估模型,考虑中断时间和产出变化2个因素,定量评估灾害造成的供应链网络中断损失;由于供应链网络跨区域组织生产,通过区域聚合模型计算供应链网络中断损失的空间分布特征;产业部门是由微观企业个体及供应链网络构成,根据企业供应链网络中断损失进一步估算主要受灾产业部门的经济损失及空间分布,为IO、CGE模型提供必要输入参数。

5.4 产业部门之间的波及效应与总产出损失评估

从产业部门尺度,以主要受灾产业部门的产值(产量)损失作为输入变量,利用区域投入产出表和IO、CGE模型,估算对其他关联产业部门和区域所造成的间接波及损失;分析区域产品市场格局,参考产品市场需求和供给弹性曲线,评估灾后市场供求和价格变化对产出损失的动态影响。

6 结论

深入理解产业网络脆弱性(包括节点/边要素物理脆弱性和网络结构脆弱性),情景化模拟和理解灾害在产业网络扩散的动态过程、依赖路径与形成机理,是科学进行关键节点保护、网络结构优化、增强韧性并防范系统性风险的重要依据。同时,针对复杂产业网络,定量、精细、合理评估灾害造成的直接和间接经济损失,是科学进行灾害风险计算、费用效益分析和空间应对的重要性基础工作。

(1) 产业物理设施损失评估已形成较为成熟方法,主要是基于历史灾情调查或工程模拟方法建立灾害强度参数与厂房建筑、生产设备、存货等物理损失程度间的脆弱性曲线,但是这些曲线在灾害强度参数、韧性因素、评估内容、损失表达形式等方面有所差异。

(2) 现有研究主要从灾后评估受损产业的运行

中断损失。今后应进一步从灾前角度,关注不同灾害情景下,组合投入要素物理受损可能导致的产业生产能力损失程度(PCLR)及空间变化。

(3) 产业网络灾害扩散过程模拟及波及损失评估,主要有微观“企业供应链网络”和宏观“产业链网络”2种研究尺度。其中,“企业供应链网络”以微观企业为基本粒度,利用复杂网络分析和GIS方法,能有效考虑网络拓扑和地理空间结构的复杂性,识别网络关键性节点以及灾害扩散的因果机理及依赖路径,并提高灾害损失评估结果的空间精度。“产业链网络”以聚合的产业部门或区域为基本粒度,利用IO、CGE等宏观经济计量模型,模拟灾害在产业部门或区域间的扩散过程及其造成的宏观区域经济影响。

(4) 未来亟待从情景分析的视角,构建包括灾害事件场景、产业暴露、局部节点物理损失和运行中断损失、供应链网络中断损失、宏观产出损失于一体的,多过程、多尺度的产业网络灾害经济损失集成评估体系,以深入模拟和揭示灾害损失从局部关键节点或基础设施扩散放大到整个产业经济系统的过程和机理。

参考文献(References)

丁先军, 杨翠红, 祝坤福. 2010. 基于投入-产出模型的灾害经济影响评价方法[J]. 自然灾害学报, 19(2): 113-118. [Ding X J, Yang C H, Zhu K F. 2010. A method based on input-output model to evaluate economic impact of disasters [J]. Journal of Natural Disasters, 19(2): 113-118.]

姜玲, 张伟, 刘宇. 2016. 基于多区域CGE模型的洪灾间接经济损失评估: 以长三角流域为例[J]. 管理评论, 28(6): 25-31. [Jiang L, Zhang W, Liu Y. 2016. Assessment of indirect economic loss of flood disaster based on multi-regional CGE model: A case of Yangtze River Delta Basin[J]. Management Review, 28(6): 25-31.]

李宁, 吴吉东, 崔维佳. 2012. 基于ARIO模型的汶川地震灾后恢复重建期模拟[J]. 自然灾害学报, 21(2): 68-75. [Li N, Wu J D, Cui W J. 2012. Simulation of post-disaster recovery and reconstruction period of Wenchuan earthquake based on adaptive regional input-output model[J]. Journal of Natural Disasters, 21(2): 68-75.]

李宁, 张正涛, 陈曦, 等. 2017. 论自然灾害经济损失评估研究的重要性[J]. 地理科学进展, 36(2): 256-263. [Li N, Zhang Z T, Chen X, et al. 2017. Importance of economic loss evaluation in natural hazard and disaster research[J]. Progress in Geography, 36(2): 256-263.]

李卫江, 蒋湧, 温家洪, 等. 2016. 地震灾害情景下产业空间网络风险评估: 以日本丰田汽车为例[J]. 地理学报, 71(8): 1384-1399. [Li W J, Jiang Y, Wen J H, et al. 2016. Risk assessment of industrial geographical network in the scenario of seismic disaster: A case study of Toyota in Japan [J]. Acta Geographica Sinica, 71(8): 1384-1399.]

李卫江, 温家洪, 吴燕娟. 2014. 基于PGIS的社区洪涝灾害概率风险评估: 以福建省泰宁县城区为例[J]. 地理研究, 33(1): 31-42. [Li W J, Wen J H, Wu Y J. 2014. PGIS-based probabilistic community flood disaster risk assessment: A case of Taining County Town, Fujian Province[J]. Geographical Research, 33(1): 31-42.]

刘希林, 赵源. 2008. 地貌灾害间接经济损失评估: 以泥石流灾害为例[J]. 地理科学进展, 27(3): 7-12. [Liu X L, Zhao Y. 2008. Estimation on indirect economic losses of geomorphic hazards: Taking debris flow as an example[J]. Progress in Geography, 27(3): 7-12.]

路琮, 魏一鸣, 范英, 等. 2002. 灾害对国民经济影响的定量分析模型及其应用[J]. 自然灾害学报, 11(3): 15-20. [Lu Z, Wei Y M, Fan Y, et al. 2002. Quantitatively analytic model for the impact of natural disaster on national economy[J]. Journal of Natural Disasters, 11(3): 15-20.]

孟永昌, 王铸, 吴吉东, 等. 2015. 巨灾影响的全球性: 以东日本大地震的经济影响为例[J]. 自然灾害学报, 24(6): 1-8. [Meng Y C, Wang Z, Wu J D, et al. 2015. Global economic impacts of large-scale disasters: Case study of the Great East Japan Earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 24(6): 1-8.]

苏桂武, 高庆华. 2003. 自然灾害风险的行为主体特性与时间尺度问题[J]. 自然灾害学报, 12(1): 9-16. [Su G W, Gao Q H. 2003. Behavior subject-oriented qualities and time scale issues of natural disaster risk[J]. Journal of Natural Disasters, 12(1): 9-16.]

唐彦东. 2011. 灾害经济学[M]. 北京: 清华大学出版社. [Tang Y D. 2011. Economics of disasters[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press.]

王海滋, 黄渝祥. 1998. 地震灾害产业关联间接经济损失评估[J]. 自然灾害学报, 7(1): 40-45. [Wang H Z, Huang Y X. 1998. The measurement of indirect economic loss of seismic disaster due to the linkage of the sectors[J]. Journal of Natural Disasters, 7(1): 40-45.]

魏本勇, 苏桂武. 2016. 基于投入产出分析的汶川地震灾害间接经济损失评估[J]. 地震地质, 38(4): 1082-1094. [Wei B Y, Su G W. 2016. Assessment on indirect economic loss of Wenchuan earthquake disaster based on input-output analysis[J]. Seismology and Geology, 38(4): 1082-1094.]

吴吉东, 李宁. 2012. 浅析灾害间接经济损失评估的重要性[J]. 自然灾害学报, 21(3): 15-21. [Wu J D, Li N. 2012. El-

- ementary discussion about importance of indirect economic loss estimation of disasters[J]. *Journal of Natural Disasters*, 21(3): 15-21.]
- 吴先华, 宁雪强, 周蒙蒙, 等. 2015. 自然灾害后应对口支援多少: 基于间接经济损失评估的视角[J]. *灾害学*, 30(3): 10-15. [Wu X H, Ning X Q, Zhou M M, et al. 2015. The amount of counterpart support that should be given after natural disasters: Based on an estimation of indirect economic loss[J]. *Journal of Catastrophology*, 30(3): 10-15.]
- 解伟, 李宁, 胡爱军, 等. 2012. 基于 CGE 模型的环境灾害经济影响评估: 以湖南雪灾为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 22(11): 26-31. [Xie W, Li N, Hu A J, et al. 2012. Assessing the economic impact of environmental disaster: A computable general equilibrium analysis[J]. *China Population, Resources and Environment*, 22(11): 26-31.]
- 徐嵩龄. 1998. 灾害经济损失概念及产业关联型间接经济损失计量[J]. *自然灾害学报*, 7(4): 7-15. [Xu S L. 1998. The concept of economic loss by disasters and measuring the sector-related-type indirect economic loss[J]. *Journal of Natural Disasters*, 7(4): 7-15.]
- 叶珊珊, 翟国方. 2010. 地震经济损失评估研究综述[J]. *地理科学进展*, 29(6): 684-692. [Ye S S, Zhai G F. 2010. A review on seismic economic loss estimation[J]. *Progress in Geography*, 29(6): 684-692.]
- 殷杰, 尹占娥, 于大鹏, 等. 2012. 风暴洪水主要承灾体脆弱性分析: 黄浦江案例[J]. *地理科学*, 32(9): 1155-1160. [Yin J, Yin Z E, Yu D P, et al. 2012. Vulnerability analysis for storm induced flood: A case study of Huangpu River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 32(9): 1155-1160.]
- 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 2010. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估. *地理学报*, 65(5): 553-562. [Yin Z E, Xu S Y, Yin J, et al. 2010. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging[J]. *Acta Geographica Sinica*, 65(5): 553-562.]
- 张继权, 李宁. 2007. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京: 北京师范大学出版社. [Zhang J Q, Li N. 2007. Quantitative methods and applications of risk assessment and management on main meteorological disasters[M]. Beijing, China: Beijing Normal University Press.]
- 张鹏, 李宁, 吴吉东, 等. 2012. 基于投入产出模型的区域洪涝灾害间接经济损失评估[J]. *长江流域资源与环境*, 21(6): 773-779. [Zhang P, Li N, Wu J D, et al. 2012. Assessment of regional flood disaster indirect economic loss based on input-output model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 21(6): 773-779.]
- 赵思健. 2012. 自然灾害风险分析的时空尺度初探[J]. *灾害学*, 27(2): 1-6, 18. [Zhao S J. 2012. A preliminary study on the spatial and temporal scales of natural disaster risk analysis[J]. *Journal of Catastrophology*, 27(2): 1-6, 18.]
- 郑功成. 2010. 灾害经济学[M]. 北京: 商务印书馆. [Zheng G C. 2010. Disaster economics[M]. Beijing, China: Commercial Press.]
- 日本内閣府. 2012. 南海トラフの巨大地震建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要[EB/OL]. (2013-03-18) [2018-01-07]. http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/2_2.pdf.
- Abe M, Ye L H. 2013. Building resilient supply chains against natural disasters: The cases of Japan and Thailand[J]. *Global Business Review*, 14(4): 567-586.
- Bierkandt R, Wenz L, Willner S N, et al. 2014. Acclimate - a model for economic damage propagation: Part 1: Basic formulation of damage transfer within a global supply network and damage conserving dynamics[J]. *Environment Systems and Decisions*, 34(4): 507-524.
- Brookshire D S, Chang S E, Cochrane H, et al. 1997. Direct and indirect economic losses from earthquake damage[J]. *Earthquake Spectra*, 13(4): 683-701.
- De Moel H, Van Vliet M, Aerts J C J H. 2014. Evaluating the effect of flood damage-reducing measures: A case study of the unembanked area of Rotterdam, the Netherlands[J]. *Regional Environmental Change*, 14(3): 895-908.
- Ernst J, Dewals B J, Detrembleur S, et al. 2010. Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data [J]. *Natural Hazards*, 55(2): 181-209.
- Farmer J D, Hepburn C, Mealy P, et al. 2015. A third wave in the economics of climate change[J]. *Environmental and Resource Economics*, 62(2): 329-357.
- Garvey M D, Carnovale S, Yeniyurt S. 2015. An analytical framework for supply network risk propagation: A Bayesian network approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 243(2): 618-627.
- Hallegatte S. 2008. An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina[J]. *Risk Analysis*, 28(3): 779-799.
- Hallegatte S. 2015. The indirect cost of natural disasters and an economic definition of macroeconomic resilience[R/OL]. World Bank Policy Research Working Paper, 1-37. 2015-07-02[2018-01-07]. <http://documents.worldbank.org/curated/en/186631467998501319/pdf/WPS7357.pdf>.
- Haraguchi M, Lall U. 2014. Flood risks and impacts: A case study of Thailand's floods in 2011 and research questions for supply chain decision making[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14(3): 256-272.

- Helbing D. 2013. Globally networked risks and how to respond [J]. *Nature*, 497: 51-59.
- Henriet F, Hallegatte S, Tabourier L. 2012. Firm-network characteristics and economic robustness to natural disasters[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 36(1): 150-167.
- Jonkman S N, Bočkarjova M, Kok M, et al. 2008. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands[J]. *Ecological Economics*, 66(1): 77-90.
- Kajitani Y, Tatano H. 2014. Estimation of production capacity loss rate after the great East Japan earthquake and tsunami in 2011[J]. *Economic Systems Research*, 26(1): 13-38.
- Khazai B, Merz M, Schulz C, et al. 2013. An integrated indicator framework for spatial assessment of industrial and social vulnerability to indirect disaster losses[J]. *Natural Hazards*, 67(2): 145-167.
- Kim Y, Choi T Y, Yan T T, et al. 2011. Structural investigation of supply networks: A social network analysis approach[J]. *Journal of Operations Management*, 29(3): 194-211.
- Koks E E, Bočkarjova M, de Moel H, et al. 2015. Integrated direct and indirect flood risk modeling: development and sensitivity analysis[J]. *Risk Analysis*, 35(5): 882-900.
- Kreibich H, Seifert I, Merz B, et al. 2010. Development of FLEMOcs: A new model for the estimation of flood losses in the commercial sector[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 55(8): 1302-1314.
- Levermann A. 2014. Climate economics: Make supply chains climate-smart[J]. *Nature*, 506: 27-29.
- Merz M, Hiete M, Comes T, et al. 2013. A composite indicator model to assess natural disaster risks in industry on a spatial level[J]. *Journal of Risk Research*, 16(9): 1077-1099.
- Meyer V, Becker N, Markantonis V, et al. 2013. Review article: Assessing the costs of natural hazards: State of the art and knowledge gaps[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(5): 1351-1373.
- Nakano K, Kajitani Y, Tatano Y. 2013. Functional fragility curves for a production facility of industrial sectors in case of earthquake disaster[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers: Ser. A1: Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)*, 69(1): 57-68 (in Japanese).
- National Research Council. 1999. The impacts of natural disasters: A framework for loss estimation[M]. Washington, DC: United States National Academies Press.
- Noy I. 2009. The macroeconomic consequences of disasters [J]. *Journal of Development Economics*, 88(2): 221-231.
- Okuyama Y, Santos J R. 2014. Disaster impact and input-output analysis[J]. *Economic Systems Research*, 26(1): 1-12.
- Parker D J, Green C H, Thompson P M. 1987. Urban flood protection benefits: A project appraisal guide[M]. Aldershot, England: Gower Technical Press.
- Pathak S D, Day J M, Nair A, et al. 2007. Complexity and adaptivity in supply networks: Building supply network theory using a complex adaptive systems perspective[J]. *Decision Sciences*, 38(4): 547-580.
- Penning-Rowsell E, Johnson C, Tunstall S, et al. 2005. The benefits of flood and coastal risk management: A manual of assessment techniques[M]. London, UK: Middlesex University Press.
- Pistrika A K, Jonkman S N. 2010. Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina[J]. *Natural Hazards*, 54(2): 413-434.
- Przyluski V, Hallegatte S. 2011. Indirect costs of natural hazards [R/OL]. 2011-09-01[2018-01-07]. https://www.ufz.de/export/data/2/122162_CONHAZ%20REPORT%20WP02_2.pdf.
- Rose A. 2004. Economic principles, issues, and research priorities in hazard loss estimation[M]//Okuyama Y, Chang S E. Modeling spatial and economic impacts of disasters. Berlin, Germany: Springer: 13-36.
- Rose A, Liao S Y. 2005. Modeling regional economic resilience to disasters: A computable general equilibrium analysis of water service disruptions[J]. *Journal of Regional Science*, 45(1): 75-112.
- Rose A, Lim D. 2002. Business interruption losses from natural hazards: Conceptual and methodological issues in the case of the NCorthridge earthquake[J]. *Environmental Hazards*, 4(1): 1-14.
- Saito Y U. 2015. Geographical spread of interfirm transaction networks and the Great East Japan Earthquake[M]//Watanabe T, Uesugi I, Ono A. The economics of interfirm networks. Tokyo, Japan: Springer: 157-173.
- Scawthorn C, Flores P, Blais N, et al. 2006. HAZUS-MH flood loss estimation methodology: II: Damage and loss assessment[J]. *Natural Hazards Review*, 7(2): 72-81.
- Schweitzer F, Fagiolo G, Sornette D, et al. 2009. Economic networks: The new challenges[J]. *Science*, 325: 422-425.
- Simchi-Levi D, Schmidt W, Wei Y H, et al. 2015. Identifying risks and mitigating disruptions in the automotive supply chain[J]. *Interfaces*, 45(5): 375-390.
- Steenge A E, Bočkarjova M. 2007. Thinking about imbalances in post-catastrophe economies: An input-output based proposition[J]. *Economic Systems Research*, 19(2): 205-223.
- Teuteberg F. 2008. Supply chain risk management: A neural network approach[M]//Ijioui R, Emmerich H, Ceyr M. Strategies and tactics in supply chain event management. Berlin, Germany: Springer: 99-118.

- Todo Y, Nakajima K, Matous P. 2015. How do supply chain networks affect the resilience of firms to natural disasters. Evidence from the Great East Japan Earthquake[J]. *Journal of Regional Science*, 55(2): 209-229.
- Wagner S M, Bode C. 2006. An empirical investigation into supply chain vulnerability[J]. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 12(6): 301-312.
- Wu J D, Li N, Hallegatte S, et al. 2012. Regional indirect economic impact evaluation of the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. *Environmental Earth Sciences*, 65(1): 161-172.
- Wu X H, Xue P P, Guo J, et al. 2017. On the amount of counterpart assistance to be provided after natural disasters: From the perspective of indirect economic loss assessment [J]. *Environmental Hazards*, 16(1): 50-70.

Progress of research on economic loss assessment of disasters in industrial networks

LI Weijiang, WEN Jiahong, LI Xiande

(Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Assessing the economic losses induced by disasters in complex industrial networks is fundamental for understanding the vulnerability and potential risks in industrial networks, and for making decisions on pre-disaster risk reduction and post-disaster reconstruction. From the perspective of disaster impact propagation in industrial networks, we systematically reviewed the types of disaster-induced economic losses and the remarkable research advances in recent years. The main method used in asset damage assessment is to establish the fragility curves between hazard intensity and damage degree of assets such as buildings, equipment, and inventory. For business interruption loss assessment, more research should be focused on production capacity loss rate (PCLR) of industrial sectors resulting from the physical damages of various input factors. Two distinctive analysis scales are often adopted for ripple loss assessment in industrial networks: micro-scale supply chain network and macro-scale industrial chain network. The former takes individual firms as basic units of analysis and utilizes complex network analysis to model the disaster impact spreading through inter-firm transactions and estimate the resulting supply chain disruption losses. In contrast, the latter considers industrial sectors or administrative regions as basic units and employs macro-scale econometric models, such as Input-Output (IO), Computable General Equilibrium (CGE), and so on, to simulate disaster impact propagation among industrial sectors or administrative regions, and evaluate the resulting gross output losses. Finally, from the perspective of scenario analysis, we proposed a multi-process, multi-scale integrated assessment methodology that combines hazard scenario, industrial network exposure, asset damages and business interruption losses at local nodes, supply chain disruption losses, and gross output losses, to comprehensively simulate the amplification effect of disasters in industrial networks.

Key words: industrial network; disaster; direct losses; indirect losses; research progress