

蒋新宇, 方远, 杨丽娇. 基于复杂网络模型的灾害损失空间波及效应研究——以湖北省洪涝灾害情景为例[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 105–110, 125. [JIANG Xinyu, FANG Yuan, YANG Lijiao. Spatial Ripple Effect of Disaster Loss Based on Complex Network Model——Taking the Flood Disaster Scenario in Hubei Province for Example[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 105–110, 125. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.017.]

基于复杂网络模型的灾害损失空间波及效应研究^{*}

——以湖北省洪涝灾害情景为例

蒋新宇^{1,2}, 方远¹, 杨丽娇³

(1. 武汉理工大学 管理学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 数字治理与管理决策创新研究院, 湖北 武汉 430070; 3. 哈尔滨工业大学 经济与管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 随着区域经济一体化不断深入, 某个地区或部门遭受灾害冲击很容易通过产业关联对灾区外造成波及影响。研究灾害损失空间波及效应对于综合灾害风险管理很有必要。该文基于2012年中国区域间投入产出数据, 构建地区间产业关联复杂网络, 并以湖北省洪涝灾害情景为实例, 利用复杂网络模型的相关分析方法, 探究灾害损失空间波及效应。研究结果发现: 湖北省严重洪涝灾害情景下, 除农业、化学产业等对下游产业造成严重波及影响外, 整体上湖北省洪涝灾害对上游产业的波及强度为对下游产业的1.6倍左右; 对比一、二阶波及效应, 化学产业等对上游产业的二阶波及显著增强; 分区域看, 山西、陕西、江苏等省区受湖北省洪涝灾害波及影响较为严重; 从全局产业网络看, 湖北省洪涝灾害造成整体网络流通效率下降1.2%, 引发系统性风险。

关键词: 洪涝灾害; 复杂网络; 产业关联; 损失空间波及; 湖北

中图分类号: F224.3; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)03-0105-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.017

在区域经济一体化背景下, 产业活动在部门间、区域间存在紧密联系, 灾害造成的社会经济影响不再局限于灾区内部, 还会通过产业间直接或间接的关联波及到未受灾害直接冲击的其他区域, 形成经济损失波及效应^[1-2]。历史灾害证明, 即使灾区物理破坏有限, 企业停产时间短, 但由于产业间的高度关联性, 其造成的波及损失可能非常严重, 甚至影响到整个经济系统^[3-4]。跨区域的经济损失波及已经成为灾害风险管理领域不容忽视的问题。

目前关于灾害损失的研究多集中在灾区内遭受的直接经济损失, 即有形资产(基础设施、房屋建筑、生产设施等)自身价值降低或丧失所造成的损失^[5-7], 对灾害损失的跨区域经济波及探究较少。且已有关于灾害损失空间波及的研究, 也多关注灾区对其直接关联经济主体的影响, 很少从关联网络的视角对损失在经济系统中的“层层波及”展开研究。为深入了解灾害波及影响的机制, 制定和实施更加有效的风险管理策略, 有必要利用合理的评估方法, 进一步研究灾害损失空间波及效应。

现阶段灾害损失空间波及研究在方法上多将灾害模型与宏观经济系统模型结合, 以直接受灾产业部门的产能损失作为输入条件, 引入描述社会经济系统的可计算一般均衡(CGE)模型^[8-9]或投入产出(I-O)模型^[10-11], 来评估灾害损失的空间波及效应。但需要指出的是, 这两类经济系统模型存在一些限制。其一, I-O模型主要考察灾后产业损失的后向关联波及效应, 难以评估产业部门的前向关联损失波及问题, 且模型结构过于线性; 而CGE模型虽然可以从不同方面冲击, 但模型构造复杂, 结果依赖于替代弹性等需要深度研究的参数设置。其二, 基于一般均衡理论的经济系统模型难以从系统结构层面揭示损失在经济系统中层层扩散导致的系统性风险。

始于20世纪90年代末的复杂网络模型, 以其强大的泛化能力和简明的计算方式, 广泛应用于各种复杂系统研究, 如社会关系网络^[12]、交通运输网络^[13]、生物网络^[14]、电力网络^[15]等。其主要思想是通过“网络”定量构建系统, 借助网络特征指标, 如系统的基本特性、静态结构或动力学

^{*} 收稿日期: 2022-12-22 修回日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41907393); 国家自然科学基金面上项目(42177448)

第一作者简介: 蒋新宇(1985-), 男, 汉族, 重庆合川人, 博士, 副教授, 主要从事综合自然灾害风险评估与管理、灾害信息学研究。E-mail: jxy119@163.com

通信作者: 杨丽娇(1984-), 女, 汉族, 吉林榆树人, 博士, 副教授, 主要从事突发事件、自然灾害经济损失评估、环境经济学等研究。E-mail: yanglj976@163.com

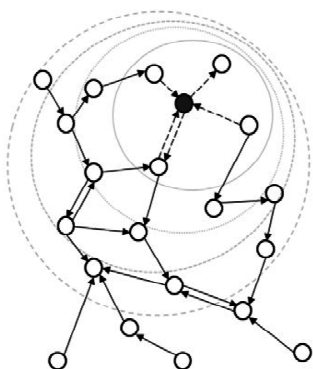
特征展开研究^[16-17]。经济系统也是一个典型的复杂系统,区域经济部门间存在的投入产出关系可用产业复杂网络来描述。通过构建产业复杂网络模型,既可以从局部产业层面捕捉产业损失前向和后向的层层波及效应,又可以从系统结构层面,对整个系统脆弱性作出综合测定。然而,目前产业复杂网络模型在灾害经济领域应用尚不成熟,仍具有较大的发展空间。一方面,现有研究较少结合灾害情景,主要以灾区产业关联完全中断作为输入条件,可能导致评估结果大于实际^[18]。另一方面,大多数研究将行业间关系表达为无权无向图,仅刻画行业间是否存在关联,没有从真正意义上反映出产业间相互依存的技术经济联系^[19]。

因此,本文基于复杂网络模型,利用2012年中国31省区域间投入产出表,构建以产业为节点,部门间投入产出系数为边权的有向加权的产业复杂网络模型,并以湖北省洪涝灾害情景为例,运用复杂网络分析方法,捕捉灾害损失在经济系统中的“层层波及”效应。不仅从供给和需求两端量化了湖北省各产业对其他地区产业的波及程度,而且在评估对整体网络效率波及影响的基础上识别出脆弱性产业部门。

1 研究方法

1.1 机理分析

经济损失波及指受灾产业通过上下游产业关联或者产业要素关联而对其他未受灾区域内的产业造成一定的影响^[20]。如图1所示,跨区域产业关联形成区域间产业网络。当网络中某个节点遭受外部灾害冲击,在局部,受灾产业会首先波及到与其直接关联的产业,将其定义为一阶产业关联;受到波及的产业又进一步影响与其具有投入产出关联的产业,将其定义为二阶产业关联。按此规律,灾害损失将通过多阶产业关联,在产业网络中不断扩散。从整体网络系统看,受灾冲击导致局部产业连接中断或减弱,甚至产生孤立存在的个体,造成节点间流通性下降。同时,受损连接可能会存在于多个通路之中,进而产生更严重的影响。



注:图中“○”表示产业部门,“●”表示受到灾害冲击的产业部门,“→”表示产业间关联,灰色圆圈表示波及范围,波及范围不断扩大,外围的受波及产业受损最小,用虚线圈表示。

图1 损失波及机理

1.2 投入产出关联的复杂网络建模

本文基于区域间投入产出表,构建产业关联复杂网络模型。其中每个产业部门是该网络系统中的节点,产业部门间投入产出关系是构成网络的弧,关系大小为弧的权重。考虑归一化的需要,以部门间投入产出系数作为边权,记作 w_{ij} ,一般 $w_{ij} \neq w_{ji}$ ^[21]。同时根据研究问题,建模时不能忽略对自身的消耗与投入,因此本文所构建的是有自环、有向、加权的复杂产业网络,记为 $N = (V, E, W)$ (V 为产业集, E 为弧集, $W = \{w_{ij}\}$ 为权重矩阵)。此外,考虑到产业灾后恢复时效以及产业间的短期可替代性,假设弱关联产业间不发生波及^[22]。本文参考Campbell算法,分别计算投入产出系数矩阵每一列非零系数的20%分位数作为临界值^[23]。在上述产业网络的基础上,剔除临界值以下的弱关联,由此建立一个更为符合现实的产业网络。

1.3 区域间损失波及效应测度指标

基于上述构建的产业网络,利用复杂网络相关拓扑性质分析测度区域间损失波及效应,包括局部和系统两个维度。

1.3.1 加权重度

在复杂网络理论中,度被定义为与节点直接连接的边的数量,是描述产业网络基础结构最基本的指标^[24]。加权重度在度的基础上,进一步从连接数量和关系强度两个方面刻画产业需求和供给情况。同时,纳入对直接经济损失的考虑,以加权度的变化衡量损失的波及效应,并将其定义为损失加权重度。根据关联的层级性,损失加权重度可分为一阶损失加权重度和高阶损失加权重度。

(1)一阶损失加权重度。一阶损失加权重度描述受冲击产业通过直接关联造成的损失波及情况,包含邻接至(入)和邻接自(出)某节点的损失波及程度。其中,区域 R 产业 i 的一阶损失加权入度 $SL_{R \cdot i}^{in}$ 定义为所有指向区域 R 产业 i 的有向边权与产业 i 直接经济损失率之积的和,即

$$SL_{R \cdot i}^{in} = \sum_{j=1} w_{ji} \times Loss_i \quad (1)$$

式中: $Loss_i$ 为产业 i 的直接经济损失率。反映区域 R 产业 i 受到外部冲击后对其直接上游产业的波及影响,即区域 R 产业 i 的需求下降导致其供给侧部门受损,既包括 R 区域产业,也包括 R 区域以外其他地区的产业。区域 R 产业 i 的一阶损失加权出度 $SL_{R \cdot i}^{out}$ 定义为所有从区域 R 产业 i 出发的有向边权与产业直接经济损失率之积的和,即:

$$SL_{R \cdot i}^{out} = \sum_{j=1} w_{ij} \times Loss_i \quad (2)$$

式中: $SL_{R \cdot i}^{out}$ 反映了区域 R 产业 i 受到外部冲击后对其直接下游产业的波及影响,即区域 R 产业 i 的供给下降从而导致其需求侧部门受损。同样地,既包括 R 区域产业,也包括 R 区域以外其他地区的产业。

(2)高阶损失加权重度。高阶损失加权重度是一阶损失加权重度的延伸,由于区域间产业关联的层级性,损失会通过二阶产业关联、三阶产业关联进一步波及未受直接影响的其他产业,循环往复造成叠加波及效应。区域 R 产业 i 的 n 阶损失加权入度定义为指向区域 R 产业 i 的产业部门 j 的 $n-1$ 阶加权重度($S_{R \cdot i}^{n-1} = S_{R \cdot i}^{in, n-1} + S_{R \cdot i}^{out, n-1}$)与对应边权值及产业 i 直接经济损失率三者之积的和, n 阶损失加权出度 $SL_{R \cdot i}^{out, n}$ 同理,即:

$$S_{R \cdot i}^{in \ n} = \sum_{j=1}^n (S_{R \cdot j}^{n-1} \times w_{ji}); \quad (3)$$

$$S_{R \cdot i}^{out \ n} = \sum_{j=1}^n (S_{R \cdot j}^{n-1} \times w_{ij}); \quad (4)$$

$$SL_{R \cdot i}^{in \ n} = \sum_{j=1}^n (S_{R \cdot j}^{n-1} \times w_{ji} \times Loss_i); \quad (5)$$

$$SL_{R \cdot i}^{out \ n} = \sum_{j=1}^n (S_{R \cdot j}^{n-1} \times w_{ij} \times Loss_i). \quad (6)$$

出于高阶损失加权度逐级成幂次增加的计算复杂性以及相关意义的相似性, 本文只考虑二阶损失加权度来说明间接波及。二阶损失加权入(出)度描述区域 R 产业 i 受到冲击对其上(下)游产业的关联产业造成的波及影响, 反映某些本身不会造成较大波及, 但因其上游或下游是大型产业, 从而能够产生较大间接影响的产业。

1.3.2 全局网络效率

一般地, 用网络中所有节点间距离倒数的平均值来界定全局网络效率, 其中节点间距离定义为节点 i 到节点 j 所要经历的边的最小数目^[25]。但对于加权产业网络来说, 仅考虑节点之间是否存在连接, 不能体现价值流在经济系统中流动的全貌^[26]。本文对传统网络效率衡量方式进行改进, 纳入对各边流量 $w \times f$ 的考虑, 其含义是为满足 f 单位最终产品需求的各部门中间投入量。采用调和平均值的方式穷举节点间的所有连接, 通过改良的 Dijkstra 算法反复迭代, 迭代公式如下:

$$\tilde{d}_{ij}^{(k)} = \max_{i,j,k \in \{1,2,\dots,N\}} \left\{ \tilde{d}_{ij}^{(k-1)}, \frac{\tilde{d}_{ik}^{(k-1)} \tilde{d}_{kj}^{(k-1)}}{\tilde{d}_{ik}^{(k-1)} + \tilde{d}_{kj}^{(k-1)}} \right\} \quad (7)$$

式中: $\tilde{d}_{ij}^{(k)}$ 为节点 i 到节点 j 之间所有路径流量的调和平均值, 如果它们之间不存在任何连接, 则为 0, 并以其最大值作为节点间价值流通效率的衡量指标。按照上述方法, 在计算所有节点对流通效率的基础上, 以 $\tilde{d}_{ij}^{(k)}$ 的均值来衡量整个网络的流通效率。由于考虑的是产业间资源的流通, 因此 N

个节点的网络最多有 N^2 个流通过程。根据上述描述, 网络效率 E 定义如下:

$$E = \frac{1}{N^2} \sum \tilde{d}_{ij}^{(k)}. \quad (8)$$

2 案例分析

2.1 研究区域

湖北省地处长江中下游地区, 人口密集, 是中国经济高度发达的地区之一。受东亚季风的影响, 辖区范围内降雨量大且频繁, 加之境内长江河道异常弯曲, 洪水宣泄不畅, 是中国易爆发洪涝灾害的地区之一^[27-28]。例如, 2016 年进入梅雨季以来, 湖北省遭遇百年一遇特大暴雨, 全省大部累计降水量 100~1 295 mm, 共造成 750.60 亿元的直接经济损失。同时, 湖北省位于中国中部, 连接南北, 贯穿东西, 交通枢纽地位突出, 经济辐射范围广泛。因此, 选取湖北省作为研究区具有典型性。

2.2 数据来源与处理

2.2.1 湖北省洪涝灾害各产业直接经济损失率数据

考虑到损失数据统计的概括性和产业部门的相关性, 根据 2017 年修订的《国民经济行业分类》标准中的大类, 将 42 部门合并为 19 部门(表 1)。同一大类部门的产业采用同一损失率。基于王慧敏团队^[29]有关湖北省洪涝灾害不同淹没水深下直接损失与间接损失相关性的研究成果。其中淹没水深约 2 m 时, 产业关联造成的间接损失占据主导地位, 波及效应显著。本研究选取此淹没深度作为代表性灾害情景。同时借鉴日本京都大学 Tatano 团队^[30]有关洪涝灾害直接经济损失的评估研究, 估算得到代表性洪涝灾害情境下湖北省 19 个产业部门的直接经济损失率(表 1)。

表 1 湖北省涉及洪涝灾害的产业部门及其经济损失率

序号	19 产业部门大类	42 产业部门	损失率/%
1	农业	01 农林牧渔产品和服务	59.30
2	采矿业	02 煤炭采选产品; 03 石油和天然气开采产品; 04 金属矿采选产品; 05 非金属矿和其他矿采选产品	19.89
3	制造业	06 食品和烟草; 07 纺织业; 08 纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品; 09 木材加工品和家具; 10 造纸印刷和文教体育用品; 11 石油、炼焦产品和核燃料加工品; 12 化学产品; 13 非金属矿物制品; 14 金属冶炼和压延加工品; 15 金属制品; 16 通用设备; 17 专用设备; 18 交通运输设备; 19 电气机械和器材; 20 通信设备、计算机和其他电子设备; 21 仪器仪表; 22 其他制造产品; 23 废品废料; 24 金属制品、机械和设备修理服务	21.57
4	能源供应业	25 电力、热力的生产和供应; 26 燃气生产和供应; 27 水的生产和供应	21.08
5	建筑业	28 建筑	6.84
6	批发零售业	29 批发和零售	26.83
7	交通运输业	30 交通运输、仓储和邮政	17.39
8	住宿和餐饮业	31 住宿和餐饮	26.78
9	信息业	32 信息传输、软件和信息技术服务	21.26
10	金融业	33 金融	19.26
11	房地产业	34 房地产	42.15
12	租赁服务业	35 租赁和商务服务	16.62
13	科研技术服务	36 科学研究和技术服务	20.85
14	公共设施管理业	37 水利、环境和公共设施管理	17.55
15	居民服务业	38 居民服务、修理和其他服务	18.30
16	教育	39 教育	18.15
17	卫生和社会工作	40 卫生和社会工作	17.40
18	文化、体育和娱乐业	41 文化、体育和娱乐	17.21
19	社会保障	42 公共管理、社会保障和社会组织	17.21

2.2.2 投入产出数据

本文构建产业网络的基础数据来源于刘卫东等^[31],是目前较为权威的能反映中国省际间各部门经济联动的投入产出表。投入产出系数矩阵是产业网络建模的基础,包括直接消耗系数、完全消耗系数、直接分配系数、完全分配系数等^[32]。本文选取直接消耗系数作为产业间关联关系的衡量。一方面,分配系数描述的是产业分配给其他产业产品价值量占总产出的比例,不能衡量依存关系;另一方面,完全消耗系数中包含的间接消耗部分与损失层层波及有悖,即间接消耗未受影响就不会造成波及。相比之下,直接消耗系数更能反映产业间直接物料关联及技术关联,符合损失波及的实际。从投入产出表的纵向来,第二象限的 z_{ji} 表示 i 部门为满足其总的生产需要 X_i ,需消耗 j 部门产品的价值量。运用投入产出法,部门 i 的对部门 j 的直接消耗系数 a_{ij} 表示为 $a_{ij} = z_{ji}/X_i$,得到直接消耗系数矩阵 A 作为网络边权,权值越大,说明两部门间的消耗越大,当一个部门受到冲击后另一个部门遭受的波及也越大。

3 实证结果

利用上述方法与数据,构建中国31省市自治区42部门区域间投入产出复杂产业网络(图2)。该网络有1 274个节点和1 166 403条弧,其中湖北省所有产业均与其他地区产业存在投入产出关系。此外,湖北省各产业部门度值都比较大,出入度均在2 000左右,说明与其他产业部门关联关系稠密,联动程度高,有必要进一步探究其损失空间波及效应。

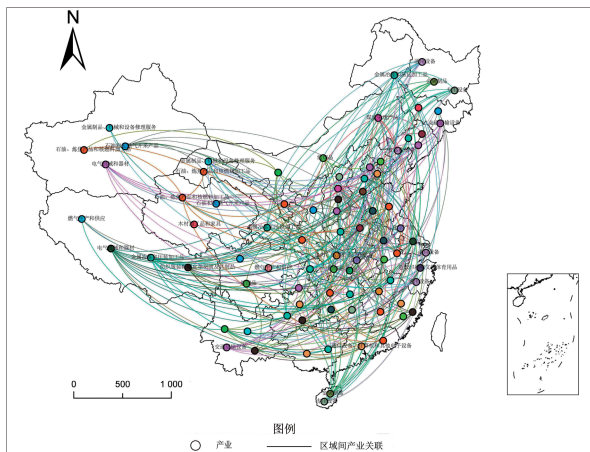


图2 复杂产业网络拓扑结构图
(审图号: GS(2021)3715号, 底图无修改, 下同)

3.1 局部关联波及

3.1.1 产业维度分析

通过式(1)、式(2)可以计算出湖北省各个产业部门在对应损失率下的一阶损失加权入度和一阶损失加权出度,以衡量湖北省各产业部门受洪涝灾害冲击后对上、下游产业造成的直接波及影响,如图3所示。各部门一阶损失加权入度集中在0.1~0.15之间,差异性较小。其中,01农林牧渔产品和服务(0.25)、08纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品(0.18)、07纺织业(0.17)、25电力、热力的生产和供应(0.17)等产业位居前列。相比之下,

湖北省各产业部门的一阶损失加权出度存在较大差异。最大的07农林牧渔产品和服务(0.73)的一阶损失加权出度达0.7以上,12化学产品(0.45)、14金属冶炼和压延加工品(0.36)、07纺织业(0.3)、25电力热力的生产和供应(0.26)等产业的一阶损失加权出度也均大于0.25,比较小的40卫生和社会工作(0.001)、37水利、环境和公共设施管理(0.008)等产业高出百倍。总体上,除部分行业外,湖北省产业对上游产业部门的一阶波及强度高于对下游产业部门1.5倍左右。这说明,当湖北省发生洪涝灾害时,需从整体上重点关注对其直接上游产业的一阶波及情况。纵观供需两侧,农林牧渔产品和服务、纺织业、电力、热力的生产和供应等产业同时存在较强的上下游影响力,其中应在防灾减灾过程中给予优先重点关注。

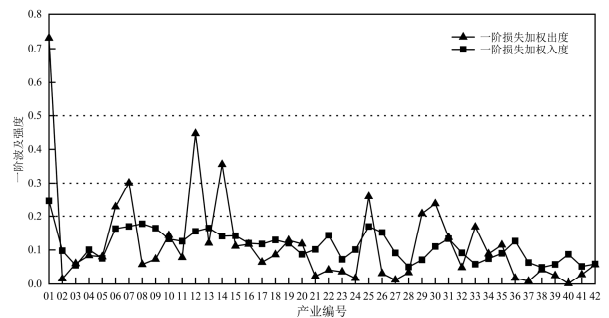


图3 产业一阶波及强度分布

为进一步捕捉湖北省各产业洪涝灾害损失波及的涟漪放大效应,在一阶损失加权度的基础上,利用式(5)、式(6)计算出各产业的二阶损失加权出入度,结果如图4所示。对下游产业的二阶波及强度与一阶相比,并未发生较大变化,造成波及损失较大的依旧是01农林牧渔产品和服务(0.95)、12化学产品(0.53)、14金属冶炼和压延加工品(0.39)、07纺织业(0.35)、25电力、热力的生产和供应(0.32)等一阶波及较大的产业。同样,对上游造成较大一阶波及影响的产业大部分二阶波及影响仍较大,但也有部分产业发生改变。其中,12化学产品(0.33)、22其它制造产品(0.31)两个产业的二阶波及强度显著上升,09木材加工品和家具行业(0.22)显著下降。这一变化可能与上游关联产业的产能规模有关。总体上,除部分行业外,湖北省产业对其上游产业的二阶波及程度依旧大于下游产业,约1.7倍。这说明在考虑损失二阶波及效应时,从整体上仍需重点关注各产业对其上游产业的影响。

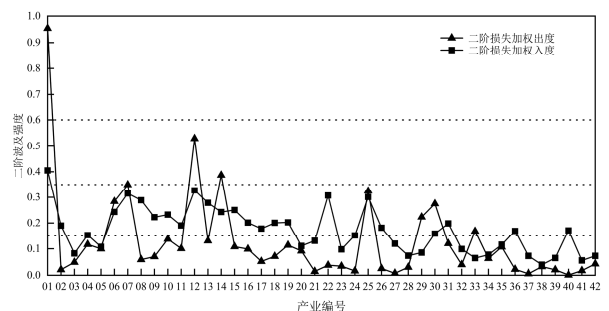


图4 产业二阶波及强度分布

此外,分别对比供需两侧一二阶波及强度发现,虽然理论上产业间波及强度逐层递减,但对

上游产业部门的波及损失, 除居民服务业外, 其余产业的二阶波及强度均高于一阶波及。究其原因: 一方面, 二阶波及范围比一阶波及范围广, 一阶波及对象只涉及直接关联产业, 而二阶波及对象则为其直接关联产业的上下游产业, 范围成幂增长; 另一方面, 二阶波及涉及两段关联: ①受灾产业与其上下游产业的关联; ②上下游产业与其关联产业间的关联。因此, 即使湖北省产业本身不是产能较大类, 但如果其上游产业产能较大, 上游产业与其关联产业存在较强关联, 则会进一步产生更大波及影响。再反观对下游产业的影响, 大部分产业的二阶波及程度都小于一阶波及。这一结果表明湖北省关联产业中, 直接上游产业相比于直接下游产业多是产能较大或规模较大的产业, 也表明高阶波及效应仍需优先关注对上游产业部门的影响。

综合分析对上下游的损失波及, 一阶、二阶波及强度四个方面, 可以发现湖北省的农林牧渔产品和服务、化工产品、纺织品、电力、热力的生产和供应在这四个方面均造成较大波及, 是在考虑局部损失波及需要给予特别关注的产业。同时其中农林牧渔产品和服务, 化工产品同时对湖北省生产总值贡献率较大, 是需要关注的重中之重。

3.1.2 区域维度分析

在识别出湖北省高波及产业部门基础上, 探究受湖北省影响最严重的地区以明确损失传播路径也具有重要的现实意义。以一、二阶波及强度之和衡量总波及强度, 并按区域划分湖北省对其余 30 个省份的波及影响(图 5)。其中受湖北省洪涝灾害损失波及影响较为严重的地区有山西、陕西、江苏、广东以及内蒙古等。从空间分布看, 受波及较严重的地区分布在长三角、珠三角、呼包鄂榆城市群。而湖北省作为长江中游城市群的重要组成部分, 表明其损失波及与城市群之间密切的经济联系密不可分。

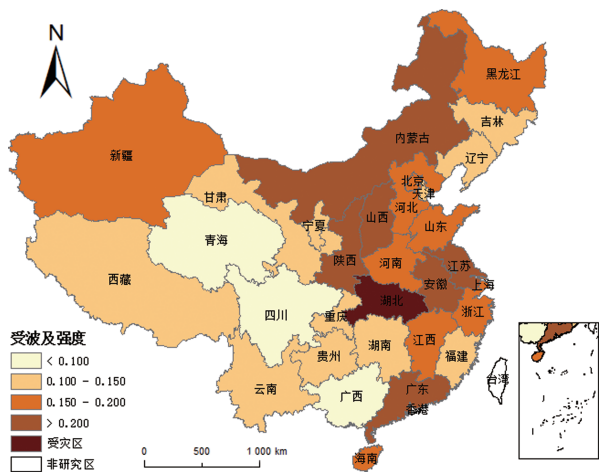
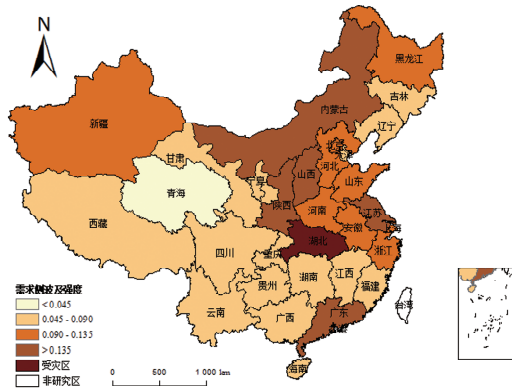
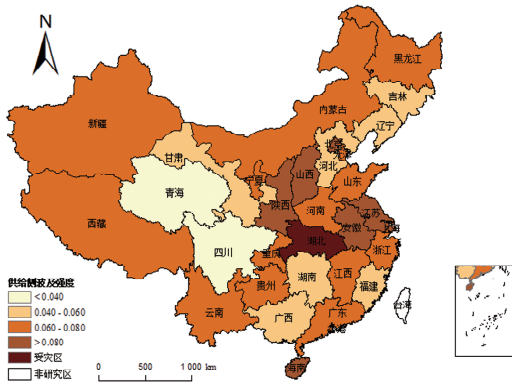


图 5 受湖北省洪涝灾害损失波及强度区划图

进一步计算湖北省供需两端对其他地区的波及强度(图 6)。图 6a 为湖北省作为需求端, 因灾受损而减少购买, 其上游地区遭受的波及影响; 图 6b 为湖北省作为供给端, 产能受损而无法供给, 其下游地区遭受的波及影响。通过综合对比, 山西、陕西、内蒙古、广东、江苏等地区受湖北省需求侧损失波及较为严重; 而海南、安徽、北京、陕西等地区受湖北省供给侧损失波及较为严重。



(a) 湖北省作为需求端, 其上游地区遭受的波及影响



(b) 湖北省作为供给端, 其下游地区遭受的波及影响

图 6 湖北省洪涝灾害对其上下游波及强度区划图

3.2 整体网络系统波及

以洪涝灾害冲击湖北省后的产业网络效率与原始产业网络效率对比来衡量灾害对整个产业网络系统的波及情况。通过式(8)计算得到原始网络效率为 75 889.47, 表明平均每条边上的资源流量为 75 889.47 万元。当湖北省发生洪涝灾害, 所有产业淹没水深 2 m 情境下, 网络效率下降至 74 984.51。直观表明湖北省受洪灾影响后, 会对整个经济系统的资源流通效率造成一定负面影响, 平均每两个产业间的投入产出流量下降 904.96 万元, 全局网络效率下降 1.2%。这一结果也验证了局部损失会引发严重的系统性风险。进一步分析湖北省单个产业受损对整体产业网络效率的波及影响, 以结合局部关联损失共同探究各产业部门的波及强度(图 7)。

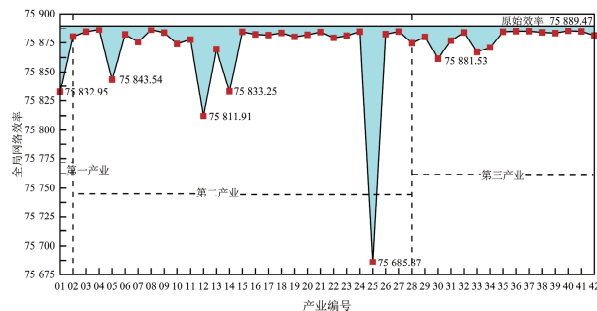


图 7 湖北省各产业受洪涝灾害冲击全局网络效率变化比较分析

从图 7 中可以看出 25 电力、热力的生产和供应对全局网络流通效率造成的影响最为严重, 使得全局网络效率下降 0.03%, 12 化学产品、01 农林牧渔产品和服务、14 金属冶炼和压延加工品以及 05 非金属矿和其他矿采选产品也产生较强的波及影响。此外, 对网络效率产生较强影响的产业都集中在第一产业及第二产业中的重工业。湖北

省地处长江中下游,农业资源丰富,是我国重要的农产品生产基地,同时第二产业为湖北省主导产业,占全省生产总值的 55%,因此从整体网络系统层面,需关注第一产业及第二产业中的重工业^[33]。

4 结论和讨论

本文从复杂网络视角,在构建符合灾害损失波及特征产业网络的基础上,结合湖北省洪涝灾害情景,计算分析严重洪涝灾害情景下,湖北省各产业在其需求侧、供给侧的一阶与二阶波及强度,以及对整体产业网络的波及影响。

结果表明:①湖北省各产业对下游产业的波及强度存在较大差距,其中较大的农林牧渔产品和服务、化学产品、金属冶炼和压延加工品、纺织、电力热力的生产和供应等产业需重点关注。除上述产业外,总体上湖北省对上游产业的波及强度为对下游产业的 1.6 倍左右,表明从整体上需重点关注湖北省各产业对上游产业的波及影响。②湖北省对上游产业的二阶波及分布较一阶未发生较大变化,而由于关联产业是否为大型产业的原因,化学产品、木材加工品和家具等产业对上游产业的二阶波及强度有所改变,说明在考虑二阶损失波及问题时需较一阶有所变动。③湖北省各产业受洪涝灾害冲击后导致整体网络效率下降 1.2%,表明局部(湖北省)损失会引发系统性风险。④从区域分布来看,山西、陕西、江苏、广东以及内蒙古等省区受湖北省洪涝灾害损失波及影响最为严重。

灾区产业供需两侧波及强度分析有助于政府部门明确工作重心,确定采取“针对性”或“全覆盖”的措施。各产业一阶波及强度结果可以指导灾后初期恢复工作,中后期则需要在一阶波及强度的基础上进一步考虑各产业的高阶波及强度。此外,通过网络效率识别出的脆弱性节点产业有助于提高整个产业系统的抗风险水平,保障整个产业系统的运作效率。

本文也证明复杂网络用于研究灾害损失空间波及效应的实用性和易用性,可以进一步推广到不同灾害类型中。但由于相关数据资料难以获取,本文对灾害情景的设定做了简化处理,未能精细化捕捉不同强度洪灾情景下各产业空间地理位置实际水深的损失波及情况。其次,本文构建网络采用的 2012 年投入产出数据,距今相距较远,相关结果与目前情况有些出入,但在经济正常运行且未发生重大变革的背景下,产业结构短时间内不会发生太大变化,且变化的产业数量不会太多。因此,基于 2012 年数据的研究结果仍具一定指导意义,且并不影响本文旨在提出一种研究方法来研究灾害损失波及效应的初衷。未来随着相关数据的公开与成熟,以上两点将得到进一步完善。此外,本文主要考虑产业间投入产出关联网络,而实际上产业间存在多种关联关系,如交通运输网络等,构建包含多重关联要素在内的复杂网络模型来探究灾害损失空间波及效应是未来研究的方向。

参考文献:

- [1] 张正涛,崔鹏,李宁,等. 武汉市“2016.07.06”暴雨洪涝灾害跨区域经济波及效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 433–441.
- [2] HELBING D. Globally networked risks and how to respond[J].

- Nature, 2013, 497(7447): 51–59.
- [3] NOY I. The macroeconomic consequences of disasters[J]. Journal of Development Economics, 2009, 88(2): 221–231.
- [4] 李卫江,温家洪,李仙德. 产业网络灾害经济损失评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(3): 330–341.
- [5] 陆进保. 主余震作用下混凝土桥梁地震灾害损失评估方法[J]. 华南地震, 2018, 38(2): 29–34.
- [6] 张宸铭,范钦栋,李延锋,等. 暴雨内涝情景下城市路网通行效率变化与修复策略:以郑州 7·20 暴雨灾害为例[J]. 经济地理, 2022, 42(7): 62–72.
- [7] KLEIST L, THIEKEN A H, KÖHLER P, et al. Estimation of the regional stock of residential buildings as a basis for a comparative risk assessment in Germany[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006, 6(4): 541–552.
- [8] ROSE A, KRAUSMANN E. An economic framework for the development of a resilience index for business recovery[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2013, 5: 73–83.
- [9] KAJITANI Y, TATANO H. Applicability of a spatial computable general equilibrium model to assess the short-term economic impact of natural disasters[J]. Economic Systems Research, 2018, 30(3): 289–312.
- [10] OKUYAMA Y, SANTOS J R. Disaster impact and input-output analysis[J]. Economic Systems Research, 2014, 26(1): 1–12.
- [11] 魏本勇,苏桂武. 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, 2016, 38(4): 1082–1094.
- [12] 张恺,马忠军,李科赞. 朋友关系网络的实证统计研究[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(3): 336–341.
- [13] 王正武,王杰,黄中祥. 控制城市道路交通网络级联失效的关闭策略[J]. 系统工程, 2016, 34(2): 103–108.
- [14] DI NANNI N, BERSANELLI M, CUPAIOLI F A, et al. Network-based integrative analysis of genomics, epigenomics and transcriptomics in autism spectrum disorders[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(13): 3363.
- [15] HUANG W J, ZHANG X R, ZHENG W Y. Resilient power network structure for stable operation of energy systems: a transfer learning approach[J]. Applied Energy, 2021, 296: 117065.
- [16] 赵炳新,尹翀,张江华. 产业复杂网络及其建模:基于山东省实例的研究[J]. 经济管理, 2011, 33(7): 139–148.
- [17] 谢赤,贺慧敏,王纲金,等. 基于复杂网络的泛金融市场极端风险溢出效应及其演变研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(8): 1926–1941.
- [18] 刘世锦,韩阳,王大伟. 基于投入产出架构的新冠肺炎疫情冲击路径分析与应对政策[J]. 管理世界, 2020, 36(5): 1–12, 51, 263.
- [19] 李茂,齐福全. 我国产业关联网络的拓扑特征研究[J]. 中国市场, 2016(13): 95–104.
- [20] 唐彦东. 灾害经济学[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.
- [21] 方爱丽,高齐圣,张嗣瀛. 投入产出关联网络模型及其统计属性研究[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(9): 34–38.
- [22] HENRIET F, HALLEGATTE S, TABOURIER L. Firm-network characteristics and economic robustness to natural disasters[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2012, 36(1): 150–167.
- [23] CAMPBELL J. Application of graph theoretic analysis to inter-industry relationships: The example of Washington state[J]. Regional Science and Urban Economics, 1975, 5(1): 91–106.
- [24] 赵炳新,相雪梅,张梦婕. 区域间总产出波动相互影响的网络模型[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(10): 2611–2620.
- [25] 郑义彬,蔡航鹏,赖伟伟,等. 基于复杂网络的湖北省高速公路网特性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 31–37.
- [26] 许英明,邢李志. 投入产出网络视角下的全球价值链复杂性研究[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2019, 11(4): 349–369.
- [27] 周悦,周月华,叶丽梅,等. 湖北省旱涝灾害致灾规律的初步研究[J]. 气象, 2016, 42(2): 221–229.
- [28] 岳岩裕,吴翠红,毛以伟,等. 2016 年湖北省梅雨期暴雨特征及灾情影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 412–420.
- [29] 宁思雨,黄晶,汪志强,等. 基于投入产出法的洪涝灾害间接经济损失评估:以湖北省为例[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 420–432.
- [30] YANG L, KAJITANI Y, TATANO H, et al. A methodology for estimating business interruption loss caused by flood disasters: insights from business surveys after Tokai heavy rain in Japan[J]. Natural Hazards, 2016, 84(1): 411–430.
- [31] 刘卫东,唐志鹏,韩梦瑶等. 2012 年中国 31 个省市区区域间投入产出表[M]. 北京:中国统计出版社, 2018.
- [32] 齐亚伟,陈洪章. 我国区域产业结构的投入产出关联特征分析[J]. 宏观经济研究, 2017(9): 79–90.
- [33] 湖北省统计局. 湖北统计年鉴. 2017: 汉英对照[M]. 北京:中国统计出版社, 2017.

(下转第 125 页)