

# 基于 Mixed-MRIO 模型的湖北省洪涝灾害脆弱性区域产业识别<sup>1</sup>

蒋新宇<sup>1, 2</sup> 林越<sup>1</sup> 杨丽娇<sup>3\*</sup>

(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发展, 某地区遭受洪涝灾害会通过产业关联对灾区外造成波及影响, 准确预估其影响大小有助于城市产业的规划建设。构建直接、波及损失集成评估框架, 利用功能脆弱性曲线估算不同超大规模淹没情景下受灾区各产业部门的直接损失, 将其设置为外生冲击变量, 输入混合多区域投入产出模型(Mixed-MRIO Model), 评估灾区外的波及损失, 识别湖北省内洪涝灾害脆弱性区域及产业部门。主要结论如下: (1) 武汉市中度淹没情景下造成的波及损失是直接损失的 36.61%; (2) 从区域关联角度分析, 荆门市和荆州市与省内其他区域的产业后向关联较为紧密且更加脆弱, 在超大规模洪涝灾害冲击数值模拟中所遭受的损失始终位于前列, 二者平均损失值约为损失值最小的天门神农架地区的 4.8 和 4.2 倍; (3) 从产业关联角度分析, 省内发生洪涝灾害造成的波及影响主要集中在农业、生活相关制造业以及居民服务业与交通运输、仓储和邮政业等生产性服务业, 其中损失值最大的生活相关制造业是损失最小的科学研究和技术服务业的百倍之多。研究结果可为政府制定防灾减灾政策、灾后重建决策等提供参考。

**【关键词】**: 洪涝灾害; 直接损失; 波及损失; 混合多区域投入产出模型; 脆弱性

**【中图分类号】**: X43; F223 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2023)04-0739-12

**【DOI】**: 10.11870/cjlyzyyhj202304006

全球气候变化背景下, 极端灾害事件频发。2022 年 IPCC 第 6 次评估报告以高置信度预测, 未来东亚地区的极端降水将会得到加强, 且更加频繁<sup>[1]</sup>, 洪涝灾害危险性将显著增加。应急管理部 2021 年发布的全国十大自然灾害中, 洪涝灾害就占 5 项, 其受灾人口、死亡失踪人口与直接经济损失占比分别高达 81.9%、93.2%和 84.9%<sup>[2]</sup>。随着区域经济一体化高速发展。一方面, 人口和财产不断集中, 使洪涝灾害暴露性不断增大; 另一方面, 区域之间产业关联度增加, 洪涝灾害影响范围突破了城市、省域甚至国家, 经济系统的脆弱性越来越大。已有研究表明, 部分情景下灾害造成的波及损失远大于直接损失<sup>[3,4,5]</sup>。目前灾害损失评估也

<sup>1</sup> **【收稿日期】**: 2022-05-17; **【修回日期】**: 2022-08-11

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

**【作者简介】**: 蒋新宇(1985~), 男, 副教授, 主要研究方向为自然灾害风险管理. E-mail: jxy119@163.com

**【\* 通讯作者 E-mail】**: yanglj976@163.com

已逐渐转向直接、波及损失并重的研究方向<sup>[6]</sup>。因此,构建集成评估框架,即在明确洪涝灾害危险性与灾区直接损失的关系之后,快速评估其对灾区外造成的波及影响,识别潜在的脆弱性区域及产业部门,对政府制定防灾减灾政策、灾后重建决策等具有重要的现实指导意义。

为保证波及损失评估模型良好的输入条件,首先需要明确灾区内直接损失。目前,直接损失评估已有相对成熟的方法,即通过统计或模拟评估致灾因子的特征,如水深、流量等危险性因素的概率分布,通过资产统计和空间分析评估承灾体的暴露性特征,再利用脆弱性曲线描述危险性强度与承灾体损失率之间的关系,最后整合3方面评估区域洪涝灾害直接损失<sup>[7,8,9,10,11]</sup>。本文使用其中较为成熟的功能脆弱性曲线来评估不同情景下灾区的直接损失。对于波及损失的评估,目前灾害领域常用的主要有投入产出模型(I-O)和可计算一般均衡模型(CGE)<sup>[12]</sup>。CGE模型的校准需要从外部获取弹性值且模型参数繁多。一方面,自然灾害情景下的企业及区域经济系统弹性尚未明晰,简单假设弹性会导致评估结果的严重偏颇<sup>[13]</sup>;另一方面,现有的灾害CGE模型中,关键参数取值大多是借鉴研究文献或简单赋值,没有进行充分验证,由此模拟出的结果可能与现实情况不符,导致模型的应用能力不足<sup>[14]</sup>。相比之下,I-O模型结构简单且计算方便。它以投入产出表为基础,通过一系列线性方程组来反映经济系统的内在关联性。在地震、洪涝、台风、雾霾等灾害研究中,I-O模型被广泛应用于波及损失的评估<sup>[15,16,17,18]</sup>。但是,传统的I-O模型仅能计算产业部门间的损失<sup>[19,20]</sup>,学者们为研究灾害的区域间影响,提出和构建了多区域I-O模型(MRIO)<sup>[21]</sup>。目前MRIO模型多应用于测算贸易隐含碳排放<sup>[22,23]</sup>及贸易隐含污染转移<sup>[24,25]</sup>,在多区域灾害波及损失评估研究中也有一部分学者进行了探索<sup>[26,27,28]</sup>。然而,无论是当前广泛使用的单区域还是多区域I-O模型,其大多是由需求侧驱动,将最终需求设定为外生变量,这在一定程度上会导致对经济损失的高估<sup>[29]</sup>。灾害导致波及损失的实际情况为灾区部分产业的产出以及其他灾区外产业的最终需求外生,因此学者们进一步提出了使用混合投入产出模型(Mixed IO Model)<sup>[30]</sup>。目前已有相关研究将其应用于评估地震等造成的经济影响<sup>[31]</sup>。此外,当前的研究多针对某一具体的灾害事件评估其造成的经济损失,而没有综合分析区域和产业潜在的脆弱性。故本文采用由供给侧驱动的混合多区域投入产出模型(Mixed-MRIO Model),计算由灾区内产业部门产出下降,造成其他地区相关产业投入不足形成的波及损失,进而评估灾区外的脆弱性。

综上所述,为实现直接、波及损失的集成评估以识别灾区外不同区域、产业的脆弱性,本文利用湖北省各市2017年多区域投入产出数据,结合各产业部门的功能脆弱性曲线,估算各区域在不同淹没情景下的直接损失,并将此作为外生变量输入Mixed-MRIO模型,进一步估算灾害对灾区外造成的波及经济影响,通过对不同淹没情景下灾区外波及损失数据的综合分析,识别湖北省内潜在的高脆弱性区域及产业部门,为洪涝灾害风险管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据资料

### 1.1 研究区概况

湖北省地处长江中游,经济发展迅速,是长江经济带中承东启西的重要枢纽。省内河流湖泊众多,水系发达(图1a),部分城市的企业分布较为集中在水体附近(图1b)。受东亚季风影响,每年6~7月省内的暴雨频次高且持续时间较长,易发生不同程度的洪涝灾害及泥石流、滑坡等次生灾害,在一定程度上制约了地区的经济发展<sup>[32]</sup>。以2020年发生的南方洪涝灾害为例,湖北省共有137.1万hm<sup>2</sup>的农作物受损,直接经济损失高达210.89亿元。

### 1.2 数据来源及处理

本文所使用的投入产出数据来源于北京数智经济管理咨询有限公司(CESSR)编制的《湖北省各市2017年投入产出表》。数据详细描述了湖北省各区域之间的宏观产业关联结构及贸易流动情况,包含武汉市、黄石市、十堰市、宜昌市、襄阳市、鄂州市、荆门市、孝感市、荆州市、黄冈市、咸宁市、随州市、恩施州、仙桃市、潜江市、天门市、神农架林区共17个区域、42个产业部门。天门市和神农架林区由于经济体量较小,投入产出表中将其数据合并作为一个区域。由于部分数据资料缺失,参考国际标准行业分类,将42部门合并为15部门。多区域投入产出表的基本结构如表1所示。

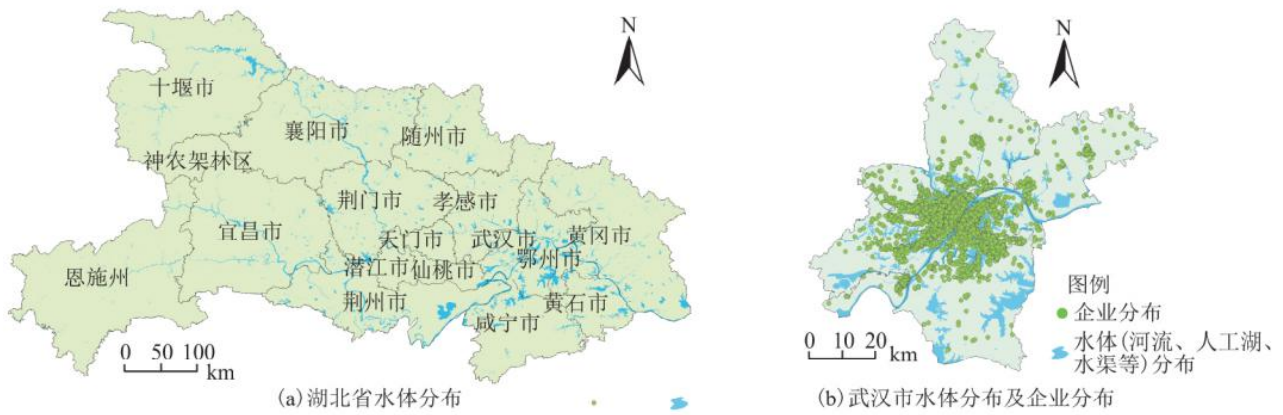


图 1 湖北省水体分布及部分城市企业分布情况

Fig. 1 Distribution of water bodies and some enterprises in Hubei Province

表 1 多区域投入产出表基本结构

		中间使用				最终消费	资本形成总额	流出	流入	出口	进口	总产出
		部门 1	部门 2	...	部门 n							
中间投入	部门 1	$z \cdot s_{1111} \cdot s$	$z \cdot s_{1212} \cdot s$	...	$z \cdot s_{1n1n} \cdot s$	TC1	GCF1	OF1	IF1	EX1	IM1	xs11s
	部门 2	$z \cdot s_{2121} \cdot s$	$z \cdot s_{2222} \cdot s$	...	$z \cdot s_{2n2n} \cdot s$	TC2	GCF2	OF2	IF2	EX2	IM2	xs22s
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	部门 n	$z \cdot s_{n1n1} \cdot s$	$z \cdot s_{n2n2} \cdot s$	...	$z \cdot s_{nnnn} \cdot s$	TCn	GCFn	OFn	IFn	EXn	IMn	xsnnns
增加值		vs11s	vs22s	...	vsnns							

总投入	xs11s	xs22s	...	xsnnns							
-----	-------	-------	-----	--------	--	--	--	--	--	--	--

注：流出细分为国内省外流出及省内市外流出的详细数据，流入也细分为国内省外流入及省内市外流入详细数据，由于篇幅限制不作具体展示。

## 2 研究方法 with 模型构建

### 2.1 直接损失评估方法

本文所涉及的直接损失评估指对商业停滞损失<sup>[33,34,35]</sup>的评估，其包含由淹没直接导致的建筑、资产损失以及由生命线工程等损坏对营业造成的损失，常通过构建不同淹没深度与产业部门损失率之间的关系曲线来估计损失的分布情况。本文参考国内外学者已有研究<sup>[10]</sup>，采用 Lognormal 分布函数构建功能脆弱性曲线，计算各类产业部门在不同淹没深度下损失率的概率密度和累积概率，以此评估受灾区的直接经济损失，如公式(1)(2)。

$$f_{\omega}(X, \mu_{\omega}, \sigma) = \frac{1}{X\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln X - \mu_{\omega})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$F_{\omega}(H) = \lim_{x \rightarrow \infty} \int_0^H f_{\omega}(X) dX \quad (2)$$

式中：X 为淹没水深； $\mu_{\omega}$  ( $\omega=1, 2, 3$ ) 和  $\sigma$  分别为不同损失情况下功能脆弱性曲线函数中的均值以及标准差，各参数的取值见表 2。

表 2 功能脆弱性曲线的估计参数

参数	制造业	原材料制造业	加工装配制造业	生活相关制造业	非制造业	批发和零售业	建筑业	服务业
$\mu_1$	1.274	0.604	1.741	1.942	2.574	1.353	3.036	2.977
$\mu_2$	4.534	4.093	5.279	4.101	3.905	3.434	4.016	4.205
$\mu_3$	5.512	5.804	5.597	4.790	4.441	4.406	4.120	4.808
$\sigma$	2.450	2.447	2.054	2.688	1.516	1.887	1.029	1.692

注： $\mu_1$  对应损失情况  $0\% \leq \text{损失率} \leq 33.3\%$ ； $\mu_2$  为  $33.4\% \leq \text{损失率} \leq 66.6\%$ ； $\mu_3$  为  $66.7\% \leq \text{损失率} \leq 100\%$ ，参数数据来源于文献[10]。

为简化计算，本文将3种损失情况的损失率分别设定为其平均值16.65%、50%和83.35%，构建各产业部门的功能脆弱性曲线如图2所示，随淹没水深增加，各产业部门的直接经济损失率也不断增加。但是由于不同产业的设备、资产类型以及对基础设施等的依赖程度不同，其损失随淹没深度增加的幅度不同。例如，水深较低时其他产业的损失率大于建筑业，但随着水深增加，由于存在大型机器设备等的淹没，导致了建筑业损失率的大幅增加从而逐渐超过其他产业。总体来看，制造业相关产业的平均损失率始终低于非制造业相关产业。

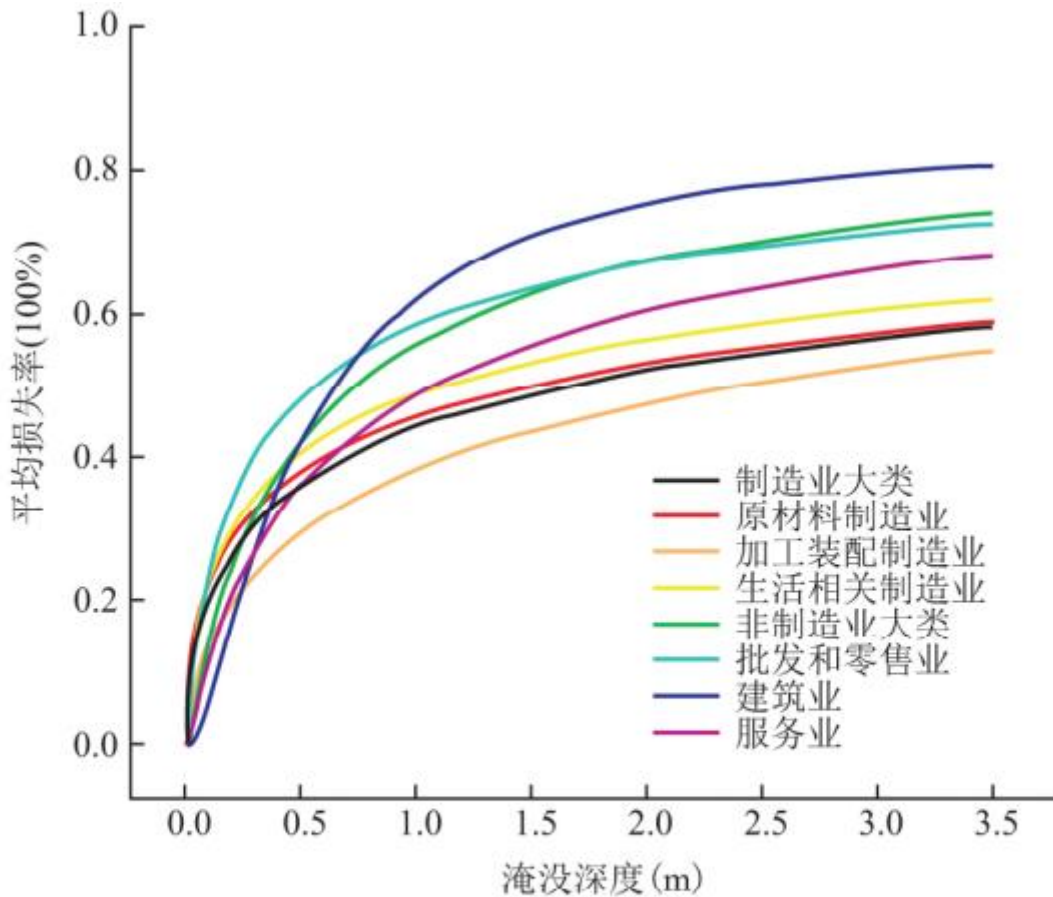


图2 各产业部门功能脆弱性曲线

Fig. 2 Functional fragility curves of different sectors

## 2.2 Mixed-MRIO 模型构建

Mixed-MRIO 模型本质上是经过简化和修正后加入区域间贸易关系的投入产出模型。其计算原理为灾害冲击经济系统中某区域的部分产业部门时，经济系统在短期内无法调整生产结构，形成局部生产资源累积或停滞，通过经济系统内在关系对灾区外的产业部门造成影响。模型以多区域投入产出表为基础，将受灾区域产业部门的直接经济损失归为总产出层次的系统外生变量，通过建立相应的线性方程组来反映各产业之间的技术经济联系和分配关系。不失一般性，以3区域2部门的经济系统为例来阐述Mixed-MRIO模型的基本原理：式(3)为最基本的多区域投入产出模型的形式，其中， $x_i$ 表示i区域各部门总产出的列向量

$(x_1, x_2)'$ ， $f_i$ 表示i区域的消费者对各部门最终需求的列向量  $(f_1, f_2)'$ ， $\delta_{ij}$ 表示区域i和区域j之间的商品贸易系数矩阵

$\begin{bmatrix} e_1^1 \\ e_2^1 \end{bmatrix}$ ,  $A_i$  为  $i$  区域的区域技术系数矩阵  $\begin{bmatrix} a_{11}^i & a_{12}^i \\ a_{21}^i & a_{22}^i \end{bmatrix}$ ; 设  $I$  为单位矩阵, 将式(3)中的  $f_1, f_2, x_3$  三个变量移到方程组右边作为系统的外生变量, 变型得到式(4), 式(4)的矩阵形式如式(5)所示, 进一步变型可以得到式(6)。

$$\begin{cases} x^1 = \hat{c}^{11} A^1 x^1 + \hat{c}^{12} A^2 x^2 + \hat{c}^{13} A^3 x^3 + \hat{c}^{11} f^1 + \hat{c}^{12} f^2 + \hat{c}^{13} f^3 \\ x^2 = \hat{c}^{21} A^1 x^1 + \hat{c}^{22} A^2 x^2 + \hat{c}^{23} A^3 x^3 + \hat{c}^{21} f^1 + \hat{c}^{22} f^2 + \hat{c}^{23} f^3 \\ x^3 = \hat{c}^{31} A^1 x^1 + \hat{c}^{32} A^2 x^2 + \hat{c}^{33} A^3 x^3 + \hat{c}^{31} f^1 + \hat{c}^{32} f^2 + \hat{c}^{33} f^3 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} (I - \hat{c}^{11} A^1) x^1 - \hat{c}^{12} A^2 x^2 - \hat{c}^{13} A^3 x^3 = \hat{c}^{11} f^1 + \hat{c}^{12} f^2 - (-\hat{c}^{13} A^3) x^3 \\ -\hat{c}^{21} A^1 x^1 + (I - \hat{c}^{22} A^2) x^2 - \hat{c}^{23} A^3 x^3 = \hat{c}^{21} f^1 + \hat{c}^{22} f^2 - (-\hat{c}^{23} A^3) x^3 \\ -\hat{c}^{31} A^1 x^1 - \hat{c}^{32} A^2 x^2 - \hat{c}^{33} A^3 x^3 = \hat{c}^{31} f^1 + \hat{c}^{32} f^2 - (I - \hat{c}^{33} A^3) x^3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} I - \hat{c}^{11} A^1 & -\hat{c}^{12} A^2 & -\hat{c}^{13} A^3 \\ -\hat{c}^{21} A^1 & I - \hat{c}^{22} A^2 & -\hat{c}^{23} A^3 \\ -\hat{c}^{31} A^1 & -\hat{c}^{32} A^2 & -\hat{c}^{33} A^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ f^3 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \hat{c}^{11} & \hat{c}^{12} & -(-\hat{c}^{13} A^3) \\ \hat{c}^{21} & \hat{c}^{22} & -(-\hat{c}^{23} A^3) \\ \hat{c}^{31} & \hat{c}^{32} & -(I - \hat{c}^{33} A^3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^1 \\ f^2 \\ x^3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ f^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I - \hat{c}^{11} A^1 & -\hat{c}^{12} A^2 & -\hat{c}^{13} A^3 \\ -\hat{c}^{21} A^1 & I - \hat{c}^{22} A^2 & -\hat{c}^{23} A^3 \\ -\hat{c}^{31} A^1 & -\hat{c}^{32} A^2 & -\hat{c}^{33} A^3 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{c}^{11} & \hat{c}^{12} & -(-\hat{c}^{13} A^3) \\ \hat{c}^{21} & \hat{c}^{22} & -(-\hat{c}^{23} A^3) \\ \hat{c}^{31} & \hat{c}^{32} & -(I - \hat{c}^{33} A^3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^1 \\ f^2 \\ x^3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

同理，研究包含 16 区域、15 部门的区域经济系统，对应的混合模型可由式(3)~(6)的方法推导，得到式(7)。其中，内生变量用上角标“en”标出，外生变量用“ex”标出。 $\Delta x^{ex}$  表示受灾地区受到的直接经济影响； $\Delta f^{ex}$  表示灾区外各部门的最终

$$A = \begin{bmatrix} A^{01} & & \\ & \ddots & \\ & & A^{16} \end{bmatrix}, \text{区域贸易系数矩阵 } C = \begin{bmatrix} \hat{c}^{0101} & \dots & \hat{c}^{0116} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{c}^{1601} & \dots & \hat{c}^{1616} \end{bmatrix},$$

当灾害冲击某个区域时，用  $M^{[.225]}$  和  $M^{[.-15]}$  分别表示  $(I-CA)$  矩阵的前 225 列和后 15 列，同理，用  $N^{[.225]}$  和  $N^{[.-15]}$  分别表示  $C$  矩阵的前 225 列和后 15 列。 $\Delta x^{en}$  表示灾区外受到的波及经济影响， $\Delta f^{en}$  表示灾区外各部门的最终需求变化。

$$\begin{bmatrix} \Delta x^{en} \\ \Delta f^{en} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^{[.225]} & -N^{[.-15]} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N^{[.225]} & -M^{[.-15]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f^{ex} \\ \Delta x^{ex} \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3 结果与分析

日本东京内阁府的《风暴潮、海啸风险评估和区划技术手册》中指出，不同淹没水深对人体及建筑物造成影响差异较大，可将淹没水深分为 7 个等级<sup>[36]</sup>。其中 1 m 淹没水深被界定为中度淹没等级。本文选取此淹没等级进行灾害情景模拟，以此情景下武汉市直接损失与灾区外波及损失评估为例，提出构建直接、波及损失同时评估的系统方法，进一步识别湖北省脆弱性区域及产业部门。在此基础上，对湖北省内所有地级市分别进行超大规模洪涝灾害冲击数值模拟，将不同区域相同淹没深度下的损失数据横向比较，判断中度淹没深度情景下脆弱性区域、产业识别结果的稳健性。

#### 3.1 武汉市单一淹没水深情景下直接损失及灾区外波及损失

首先，基于 2.1 节构建的功能脆弱性曲线，确定 1 m 中度淹没等级超大规模洪涝灾害情景下，武汉市各部门的直接经济损失率，结合多区域投入产出表中的总产出数据，即可得到各部门的直接损失。损失情况如表 3 所示，建筑业和房地产业损失最大，其次为加工装配制造业和原材料制造业，主要原因在于这些产业部门产能数据较高。

其次，将直接损失数据输入 Mixed-MRIO 模型，估算因区域间产业关联造成的灾区外波及损失，结果如图 3 所示。灾区外总波及损失为 9 737.61 亿元，是直接损失的 36.61%。从区域层面来看，襄阳市、宜昌市和荆门市遭受的波及影响最大，分别占总波及损失的 19.82%、18.68%和 8.12%；受影响最小的为潜江市以及天门神农架。一方面，作为中三角汽车产业集群城市，武汉市和襄阳市汽车相关制造产业联系紧密；另一方面，武汉市、荆门市和宜昌市是湖北省内的化学工业走廊，化工行业上下游关联较强。因此当武汉市遭受洪涝灾害，易对这三个城市造成较大影响。而潜江市以及天门神农架由于本身经济体量较小与武汉市的联系较弱，遭受的总损失也较小。

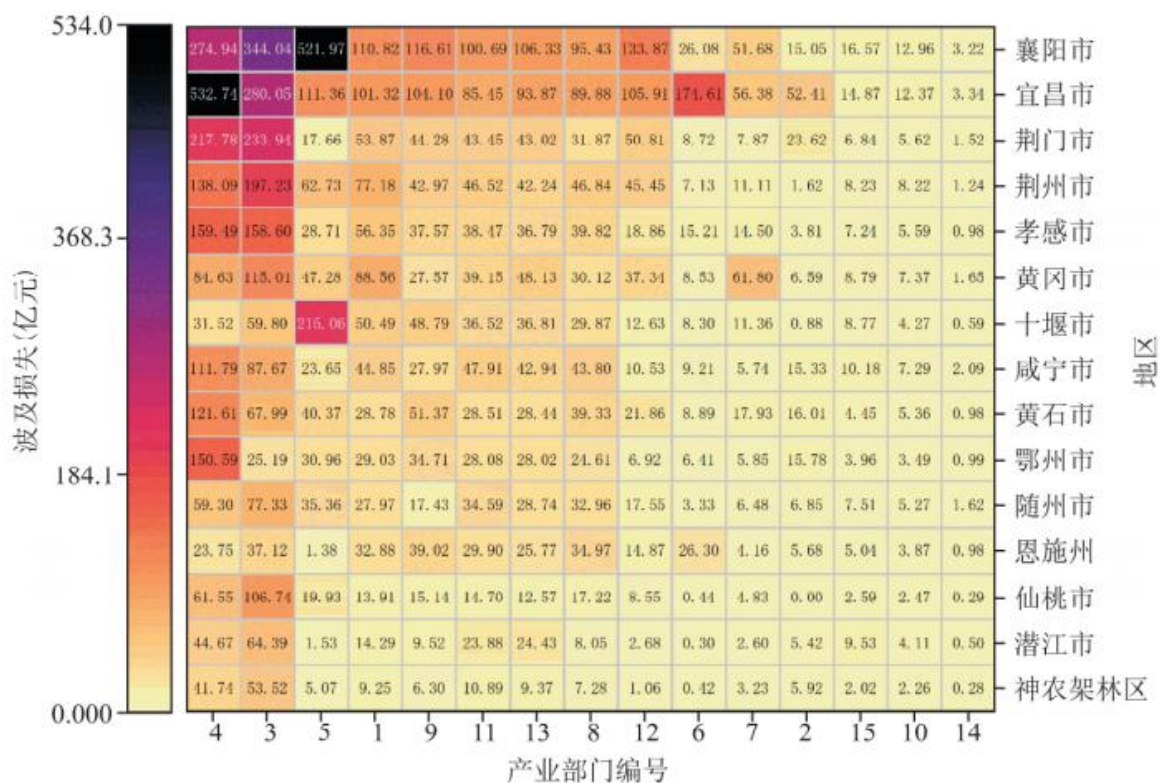
从产业部门层面来看，原材料制造业、生活相关制造业以及加工装配制造业遭受的波及影响最大，分别为 2 054.18、1 908.63 和 1 163.02 亿元，三者合计超过波及损失总额的一半；受影响最小的为科学研究和技术服务业以及住宿和餐饮业。一方面，制造业是经济发展的核心，而各区域制造业产业体系和分工不同，形成了不同的优势产业集群，产业间的协同发展促进了产品、劳务等多方面的关联；另一方面，受运输成本等因素影响，湖北省内其他地区的制造业多依赖武汉市提供设备与原材料，这一

结果也与部分学者已有研究相符<sup>[37]</sup>。因此，制造业类产业遭受的波及损失较大。而科学研究和技术服务业以及住宿和餐饮业主要受各区域内部消费需求的影响，故受影响相对较小。

表 3 武汉市中度淹没等级下直接损失情况

部门	损失率	损失值 (亿元)	部门	损失率	损失值 (亿元)	部门	损失率	损失值 (亿元)
1	44.12%	245.61	6	44.12%	560.79	11	48.73%	317.11
2	44.12%	13.10	7	62.20%	14 173.76	12	55.86%	958.52
3	48.88%	1 481.03	8	58.45%	789.90	13	48.73%	731.35
4	45.65%	1 692.03	9	55.86%	694.12	14	48.73%	214.58
5	38.17%	2 881.06	10	48.73%	503.14	15	48.73%	1 340.08

注：(1)其中数字 1、2、3...等代表产业部门编号，详见表 5；(2)鉴于部分产业部门估计参数的缺乏，估算农业、采矿业与电力、热力、燃气及水生产和供应业直接损失时使用制造业大类的脆弱性曲线；估算交通运输、仓储和邮政业以及金融业直接损失时使用非制造业大类的脆弱性曲线；估算住宿和餐饮业、信息传输、软件和信息技术服务业、科学研究和技术服务业以及教育、卫生和公共管理服务业直接损失时使用服务业的脆弱性曲线。



注：其中数字 4、3、5... 等代表产业部门编号，详见表 5。

图 3 武汉市遭受洪涝灾害时造成的波及损失

Fig. 3 Ripple losses caused by floods in Wuhan City

### 3.2 湖北省各市单一淹没水深情景下灾区外洪涝灾害脆弱性区域识别

根据上述评估框架，对湖北省内各区域分别进行相同程度的超大规模洪涝灾害冲击数值模拟，将各区域分别在中度淹没情景下造成的灾区外波及损失数据集按区域汇总，可以得到表 4 所示的结果，通过比较 16 次模拟冲击之下各区域遭受波及损失的平均值及其占区域经济体量的平均比重，两个维度的排名越靠前则对应的区域就越脆弱。

表 4 各区域波及损失汇总

冲击区域	灾区外波及损失值(亿元)							
	武汉市	黄石市	十堰市	宜昌市	襄阳市	鄂州市	荆门市	孝感市
武汉市		481.86	555.66	1 818.67	1 930.25	394.60	790.89	621.97
黄石市	536.80		71.91	299.88	268.38	66.79	131.10	101.36

十堰市	846.06	102.59		387.44	408.68	84.99	173.22	134.64
宜昌市	1 521.48	201.85	210.58		765.74	173.68	364.86	285.83
襄阳市	1 957.20	246.30	280.82	967.66		207.68	445.40	346.06
鄂州市	262.37	33.60	35.94	137.49	127.61		58.30	46.29
荆门市	574.09	74.51	81.66	291.44	293.43	62.51		108.24
孝感市	962.22	129.21	137.16	529.76	500.69	110.31	247.64	
荆州市	1 168.31	151.66	165.83	601.65	597.45	129.96	281.24	220.56
黄冈市	1 002.60	136.22	139.21	557.80	521.91	122.09	255.91	194.24
咸宁市	528.95	67.48	72.92	280.46	264.21	58.11	126.74	97.46
随州市	691.78	88.58	97.24	362.74	359.08	78.22	166.61	130.15
恩施州	1 094.71	141.81	145.61	562.98	526.32	112.33	266.72	200.48
仙桃市	278.49	37.82	41.87	145.29	148.23	30.03	72.98	55.09
潜江市	207.66	26.78	29.23	106.05	109.63	21.15	52.54	38.79
天门神农架	251.39	34.46	37.13	139.17	137.98	29.53	67.30	50.70
平均损失值	792.27	130.32	140.18	479.23	463.97	112.13	233.43	175.46
平均损失率(%)	1.60	2.68	2.77	3.27	3.28	3.13	3.80	3.38
冲击区域	灾区外波及损失值(亿元)							
	荆州市	黄冈市	咸宁市	随州市	恩施州	仙桃市	潜江市	天门神农架
武汉市	736.81	612.51	490.95	362.28	285.69	280.95	215.92	158.60
黄石市	112.55	95.38	76.54	52.80	41.17	45.06	33.17	25.33
十堰市	160.30	133.99	105.59	77.62	61.36	61.18	48.70	35.56
宜昌市	329.67	267.71	216.16	152.31	123.01	127.54	99.24	74.52
襄阳市	408.26	332.48	262.00	191.52	143.95	159.56	121.76	92.08
鄂州市	52.26	43.70	35.65	24.58	20.13	20.65	15.57	11.57
荆门市	125.53	110.61	80.63	56.66	45.67	48.61	38.27	28.80
孝感市	219.90	178.97	141.02	100.53	79.68	85.09	64.61	48.21
荆州市		219.80	166.11	117.96	90.27	100.02	80.20	60.05

黄冈市	225.22		150.31	105.85	79.40	89.00	68.94	51.64
咸宁市	113.17	95.42		51.54	41.49	44.36	33.93	25.31
随州市	151.90	128.21	97.80		51.71	60.18	45.23	34.06
恩施州	237.78	200.05	150.16	109.92		89.98	75.90	55.60
仙桃市	66.24	55.54	40.38	29.61	23.00		20.01	15.12
潜江市	48.06	40.61	28.85	21.05	16.39	18.56		10.09
天门神农架	61.24	50.63	38.52	27.31	21.16	23.94	17.48	
平均损失值	203.26	171.04	138.71	98.77	74.94	83.64	65.26	48.44
平均损失率(%)	3.77	2.64	3.42	3.93	4.31	3.51	2.89	3.01

注：图表对角线表示本区域到本区域的波及损失，由于本模型并未捕捉区域自身的反馈效应，故所有值为空值。

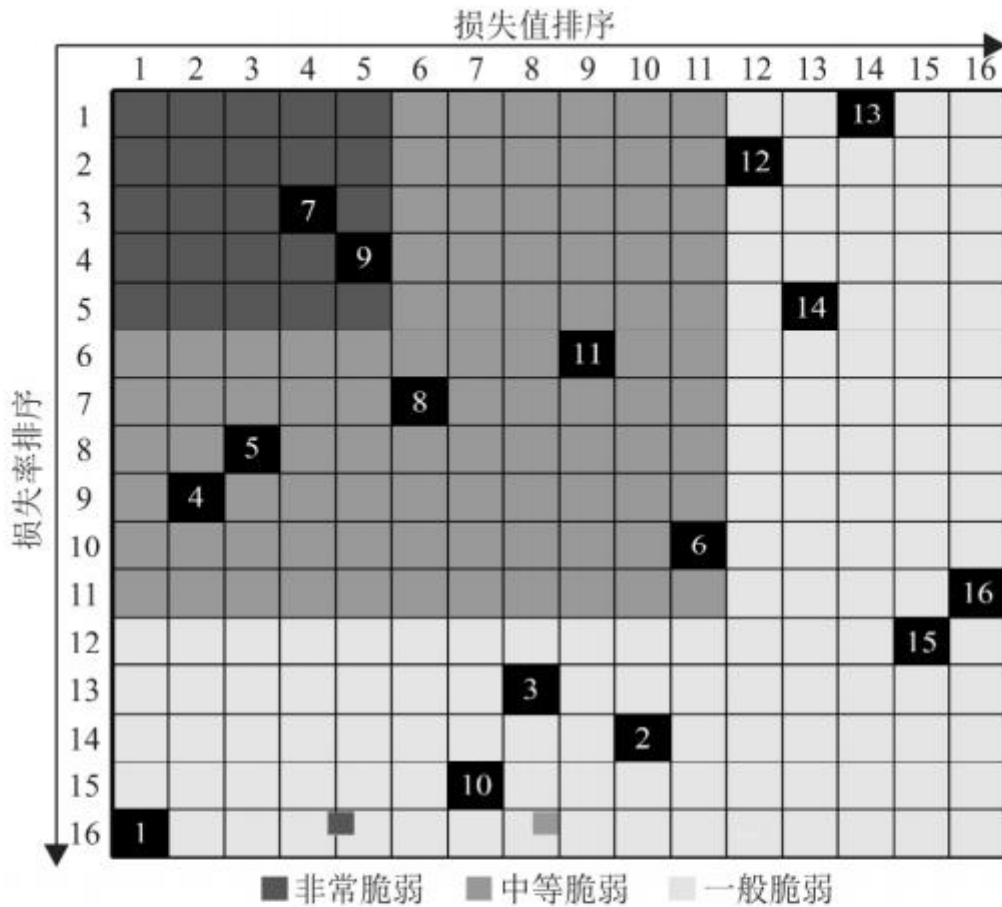
观察表 4, 从损失值角度分析：行方向上，无论哪个地区遭受洪涝灾害直接冲击，受波及影响最大的都是武汉市；列方向上，冲击武汉市对各地区带来的波及影响明显高于冲击其他任何城市。比较各区域遭受波及损失的平均值，多数城市都超过百亿元。武汉市、宜昌市及襄阳市最大，分别为 792.27、479.23 以及 463.97 亿元，约为平均损失最小的天门神农架地区(48.44 亿元)的 10 倍之多。主要原因在于这三个城市是湖北省经济发展的核心，对省内各市形成了强大的辐射与带动作用，但也导致其易受到其他区域相关产业的波及影响。

从损失率角度分析，虽然武汉市的平均损失值最大，但是其平均损失率(1.60%)却最小，反观平均损失值较小的恩施州，其平均损失率却最大(4.31%)，说明灾害对区域造成的影响不完全取决于损失金额，还和该区域的经济体量有关。城市的经济体量越大、发展水平越高，其内部的产业结构就越完善，对灾害的承载力就越高。

为识别中度淹没情景下湖北省内洪涝灾害脆弱性区域，基于不同区域的平均损失值和平均损失率构建了图 4 所示的相对影响矩阵，采用系统聚类的方法，通过损失值和损失率两个维度的排序将 16 个区域设定为 3 个等级：非常脆弱，中等脆弱和一般脆弱。其中，两个维度排序均在前 1/3 的区域为非常脆弱，两个维度排序均在后 1/3 的区域为一般脆弱，剩余部分为中等脆弱。由图 4 可知，中度淹没水深下，非常脆弱的区域有 2 个，分别为荆门市和荆州市，中等脆弱的区域有 5 个，一般脆弱的区域有 9 个。高脆弱性的区域在防灾减灾规划以及灾后重建工作开展时都应该着重优先考虑。

### 3.3 湖北省各市单一淹没水深情景下灾区外洪涝灾害脆弱性产业识别

类比 3.2 节，将各区域分别在中度淹没情景下造成的灾区外波及损失数据集按产业汇总，可以得到表 5 所示的结果，通过比较 16 次模拟冲击之下各产业部门遭受波及损失的平均值及其占省内该产业经济体量的平均比重，两个维度的排名越靠前则对应的产业就越脆弱。



注：方框内的数字代表区域编号，1-武汉市；2-黄石市；3-十堰市；4-宜昌市；5-襄阳市；6-鄂州市；7-荆门市；8-孝感市；9-荆州市；10-黄冈市；11-咸宁市；12-随州市；13-恩施州；14-仙桃市；15-潜江市；16-天门神农架。

图4 各地区损失值和损失率相对影响矩阵

Fig. 4 Economic losses and loss ratios impact matrix for different regions

观察表 5, 从各产业的平均损失值来看, 不同产业部门的损失情况差异巨大。损失最大的为制造业类产业, 包括生活相关制造业(752.19 亿元)、原材料制造业(624.03 亿元)及加工装配制造业(336.66 亿元); 损失最小的为科学研究和技术服务业(6.70 亿元), 生活相关制造业的平均损失值是其百倍之多。各区域制造业生产所需要的设备、原材料、零部件、能源供应等在很大程度上依赖省内其他城市, 这直接导致了某区域受灾时会出现供给短缺, 影响上下游的供给需求关系, 扩散到整个供应链进而造成严重的波及损失。

从平均损失率来看, 损失最大的为信息传输、软件和信息技术服务业(6.68%)与交通运输、仓储和邮政业(5.18%)等生产性

服务业。生产性服务业是与制造业直接相关的配套服务业，贯穿企业生产的上、中、下游各个环节。在制造业受损严重的情况下，由于洪涝灾害还会造成公路、铁路及桥梁等基础设施破坏，生产性服务业的损失会进一步扩大。

为识别中度淹没情景下湖北省内洪涝灾害脆弱性产业，基于各产业的平均损失值和平均损失率构建了图 5 所示的相对影响矩阵。同样，基于两个维度的排序将 15 个产业设定为 3 个等级：非常脆弱，中等脆弱和一般脆弱。由图 5 可知，中度淹没水深下，湖北省内对灾害非常脆弱的产业有 3 个，分别为农业、生活相关制造业及交通运输、仓储和邮政业，中等脆弱的产业有 5 个，一般脆弱的产业有 7 个。

表 5 各产业部门波及损失汇总

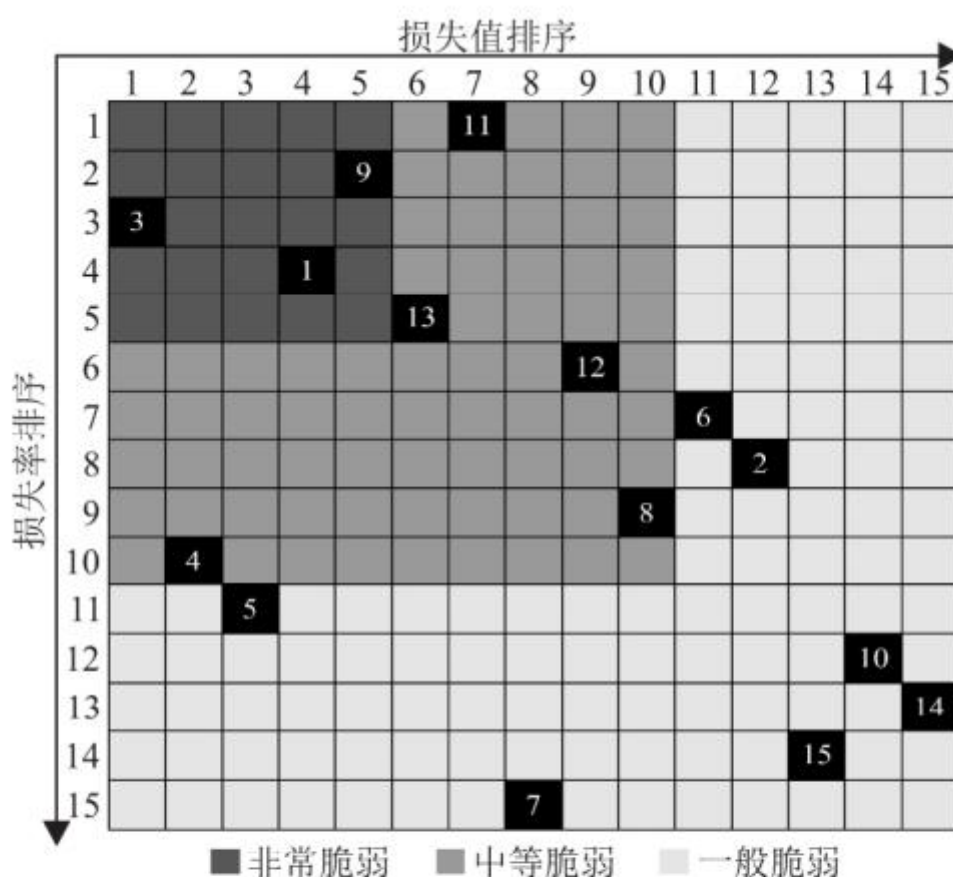
冲击区域	各产业部门编号与波及损失(亿元)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
武汉市	739.55	174.98	1 908.63	2 054.18	1 163.02	303.86	265.53	572.05
黄石市	137.48	43.51	390.40	475.97	198.13	74.94	89.59	79.99
十堰市	208.29	41.53	572.55	490.28	398.83	101.35	138.76	119.99
宜昌市	452.50	61.44	1 160.26	916.10	514.41	139.12	245.09	217.74
襄阳市	549.22	89.47	1 455.67	1 207.09	725.76	207.66	290.44	269.19
鄂州市	62.35	16.19	171.64	201.28	103.20	39.36	47.37	38.55
荆门市	236.69	23.36	512.83	327.86	195.29	69.62	128.79	66.84
孝感市	342.34	51.70	911.87	682.30	317.89	123.05	163.67	142.75
荆州市	415.53	57.58	1 038.84	761.44	429.49	128.72	236.39	153.15
黄冈市	291.34	62.07	857.03	828.66	350.55	111.99	160.54	174.90
咸宁市	170.53	26.98	472.45	369.18	184.27	77.44	101.82	60.38
随州市	244.13	37.97	630.81	519.56	272.90	75.52	130.94	81.47
恩施州	378.20	49.28	1 105.78	684.58	299.76	120.94	250.81	136.99
仙桃市	136.70	12.12	328.04	164.55	94.73	24.17	50.92	34.30
潜江市	84.71	8.52	237.73	118.78	60.29	19.69	44.12	21.37
天门神农架	114.73	12.61	280.45	182.60	77.98	24.83	44.72	40.15
平均损失值	285.27	48.08	752.19	624.03	336.66	102.64	149.34	138.11
平均损失率(%)	4.70	3.45	5.11	3.09	1.97	3.54	0.39	3.22

冲击区域	各产业部门编号与波及损失(亿元)						
	9	10	11	12	13	14	15
武汉市	623.35	90.51	608.73	488.90	607.45	20.28	116.59
黄石市	138.59	18.63	92.06	89.06	104.25	4.18	21.45
十堰市	204.68	28.03	173.67	121.50	187.91	6.03	28.52
宜昌市	314.37	49.14	260.28	228.47	282.76	10.41	62.10
襄阳市	362.36	59.29	298.28	227.53	334.64	12.90	73.21
鄂州市	72.47	9.16	52.62	41.08	56.45	2.00	12.00
荆门市	122.29	19.12	84.47	91.41	113.79	4.49	23.84
孝感市	204.77	32.37	178.98	140.43	197.87	7.14	37.86
荆州市	219.35	38.44	204.07	162.69	247.26	9.01	49.10
黄冈市	196.04	34.38	220.13	159.95	203.29	7.59	41.86
咸宁市	116.23	17.60	88.45	75.36	118.81	3.82	18.25
随州市	127.14	23.38	117.13	97.46	154.18	5.14	25.75
恩施州	179.54	37.88	231.93	182.50	243.65	8.61	59.88
仙桃市	61.90	9.22	38.10	36.55	57.22	2.07	9.12
潜江市	43.70	7.48	26.86	41.15	53.68	1.57	5.79
天门神农架	53.48	8.68	45.06	37.84	52.58	1.94	10.28
平均损失值	190.01	30.21	170.05	138.87	188.49	6.70	37.22
平均损失率(%)	5.18	1.17	6.68	3.55	4.38	0.62	0.56

注：其中数字 1、2、3...等代表产业部门序号，分别对应为 1-农业；2-采矿业；3-生活相关制造业；4-原材料制造业；5-加工装配制造业；6-电力、热力、燃气及水生产和供应业；7-建筑业和房地产业；8-批发和零售业；9-交通运输、仓储和邮政业；10-住宿和餐饮业；11-信息传输、软件和信息技术服务业；12-金融业；13-居民服务业；14-科学研究和技术服务业；15-教育、卫生和公共管理服务业。

### 3.4 湖北省各市连续淹没水深情景下灾区外洪涝灾害脆弱性区域产业识别

本文对中度淹没深度情景下的直接、波及损失进行了定量评估，但是此情景下识别出的脆弱性区域及产业部门是否具有稳健性，仍无法确定。为保证稳健性，进一步计算连续的多淹没水深情景下区域及产业的损失值、损失率，结果如图 6 所示。



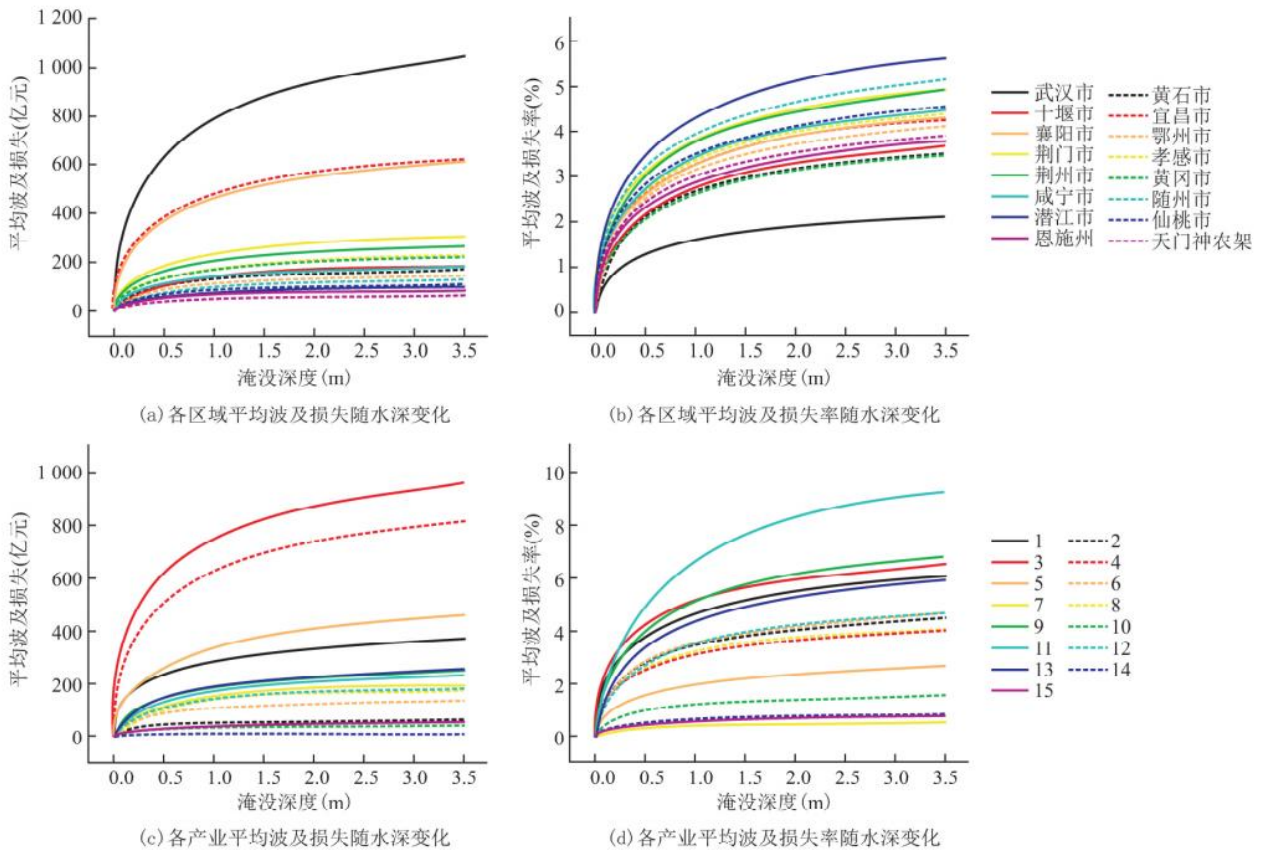
注：方框内数字代表产业部门编号，详见表 5。

图 5 各产业损失值和损失率相对影响矩阵

Fig. 5 Economic losses and loss ratios impact matrix for different sectors

从区域层面来看，虽然不同区域平均波及损失值(图 6a)和损失率(图 6b)随水深上升幅度不同，但其排序基本无变化。其中，荆门市和荆州市在连续淹没深度下其损失值和损失率两个维度的排序均始终靠前。因此可以认为中度淹没情景下识别出的脆弱性区域具有较好的稳健性。

从产业层面来看，交通运输、仓储和邮政业损失值和居民服务业的平均波及损失值(图 6c)相当，二者排名交替变化；产业损失率较大的产业虽然排名有小幅度变化，但总体基本保持稳健(图 6d)。但前述中度淹没深度下识别的脆弱性产业仅捕捉到交通运输、仓储和邮政业，忽略了居民服务业。综合来看，受运输成本、产品质量等因素影响，省内农业以及生活相关制造业联系紧密，易受到较严重的波及影响，而居民服务业与交通运输、仓储和邮政业等生产性服务业也易遭受波及。



注：(c) 和 (d) 图例中的数字代表产业部门编号，详见表 5。

图 6 各区域及产业波及损失值、损失率随淹没水深变化情况

Fig. 6 Ripple losses and loss ratios of each region and sector under different inundation depths

#### 4 结论与讨论

随着区域经济联系日益紧密，某地区遭受洪涝灾害时会通过产业关联对其他区域造成波及影响。集成直接、波及损失评估，识别灾区外潜在的脆弱性区域和产业部门，对政府制定防灾减灾政策、减轻区域经济损失具有重要意义。基于此，本文采用由供给侧驱动的混合多区域投入产出模型(Mixed-MRIO)，结合各产业部门的功能脆弱性曲线，系统评估不同淹没水深超大规模洪灾情景下多区域的直接、波及损失，识别湖北省内脆弱性区域及产业部门。相较于传统的基于需求驱动的 I-O 模型在一定程度上高估波及损失，本文的计算结果更加符合灾害冲击的实际情况。

主要研究结论为：(1)集成功能脆弱性曲线和 Mixed-MRIO 模型，从经济损失的机理层次上同时评估了灾区内直接损失以及由供给侧驱动的灾区外波及损失，从经济损失的空间结构上分析了灾区外波及损失的分布情况，能够综合识别出最脆弱的区域和产业；(2)尽管灾区外没有受到灾害的直接冲击，但是由于各区域间存在产业关联，仍会受到来自受灾区的波及影响，武汉市中度淹没情景下造成的波及损失是直接损失的 36.61%；(3)从区域关联角度来看，作为湖北省重要的化学产业基地，荆门市和荆州市与省内其他地区的产业后向关联较为紧密，超大规模洪涝灾害冲击数值模拟中两市所遭受的平均损失值和平均损失率始终位于前列，二者平均损失值约为损失值最小的天门神农架地区的 4.8 和 4.2 倍，说明其对外部的经济依存度较高，当其他城市发生洪涝灾害时易对其造成较严重的波及影响；(4)从产业关联角度来看，省内某城市发生洪涝灾害对其他地区造成的波及影响，主要集中在第一产业、第二产业中的生活相关制造业以及第三产业中的居民服务业与交通运输、仓储和邮政业等生产性服务业，其中损失值最大的生活相关制造业是损失最小的科学研究和技术服务业的百倍之多。

本文由于资料有限，对直接损失数据估算及灾害情景设定方面做了简化处理，在未来的研究中可以改进的方向如下：(1)提高脆弱性曲线精度。本文利用相关研究构建的功能脆弱性曲线，可能会由于区域不同、产业差异，使得灾害对经济系统造成的影响差异较大，因此，为提高模型估算精度，可首先从提高脆弱性曲线精度入手，基于各地区历史洪灾损失数据，综合判断采用损失率或损失状态脆弱性曲线并选取最优的拟合方法构建，进一步探究是否存在临界值、突变等可能的情形；(2)Mixed-MRIO模型应用的假设条件为灾害不会破坏经济系统的关联结构，估算的是灾害导致的短期影响，但实际上随着灾后地区的生产重建不同，可能会使经济系统超越原来的平衡，即改变经济系统的部分关联结构，后续研究可以考虑灾后恢复等因素对经济系统的关联带动作用。

## 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability [EB/OL]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf).
- [2] 国家应急管理部. 应急管理部发布2021年全国十大自然灾害 [EB/OL]. [https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202201/t20220123\\_407199.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202201/t20220123_407199.shtml). Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. The Ministry of Emergency Management announced the country's top ten natural disasters in 2021 [EB/OL]. [https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202201/t20220123\\_407199.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202201/t20220123_407199.shtml).
- [3] HALLEGATTE S. An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina [J]. *Risk Analysis*, 2008, 28(3): 779-799.
- [4] WANG G, LI X, WU X, et al. The rainstorm comprehensive economic loss assessment based on CGE model: Using a July heavy rainstorm in Beijing as an example [J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(2): 839-854.
- [5] 黄小莉, 李仙德, 温家洪, 等. 极端洪灾情景下上海汽车制造业经济损失与波及效应评估 [J]. *地理研究*, 2017, 36(9): 1801-1816. HUANG X L, LI X D, WEN J H, et al. Measuring the economic losses and ripple effects of Shanghai automobile firms under extreme flood scenarios [J]. *Geographical Research*, 2017, 36(9): 1801-1816.
- [6] 吴吉东, 何鑫, 王菜林, 等. 自然灾害损失分类及评估研究评述 [J]. *灾害学*, 2018, 33(4): 157-163. WU J D, HE X, WANG C L, et al. A review on classification and loss assessment of natural disasters [J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(4): 157-163.
- [7] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估 [J]. *地理学报*, 2010, 65(5): 553-562. YIN Z E, XU S Y, YIN J, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 553-562.
- [8] 程先富, 郝丹丹, 韩平, 等. 基于格网数据的巢湖流域洪涝灾害损失评估 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(10): 1479-1484. CHENG X F, HAO D D, HAN P, et al. Flood loss assessment in Chaohu Basin based on grid data [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(10): 1479-1484.
- [9] YANG L, TATANO H, KAJITANI Y, et al. A case study on estimation of business interruption losses to industrial sectors due to flood disasters [J]. *Journal of Disaster Research*, 2015, 10(5): 981-990.

- 
- [10] 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.
- [11] JIANG X,MORI N,TATANO H, et al. Simulation-based exceedance probability curves to assess the economic impact of storm surge inundations due to climate change:A case study in Ise Bay, Japan[J]. *Sustainability*,2019, 11(4):1090.
- [12] BOTZEN W J, DESCHENES O, SANDERS M. The economic impacts of natural disasters:A review of models and empirical studies[J]. *Review of Environmental Economics and Policy*,2019, 13(2):167-188.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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. WEI B Y,SU G W. Assessment on indirect economic loss of Wenchuan earthquake disaster based on input-output analysis[J]. *Seismology and Geology*,2016, 38(4):1082-1094.
- [16] 张鹏, 李宁, 吴吉东, 等. 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*, 2012, 21(6):773-779. ZHANG P,LI N,WU J D, et al. Assessment of regional flood disaster indirect economic loss based on input-output model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2012, 21(6):773-779.
- [17] 刘远, 李宁, 张正涛, 等. 台风“艾云尼”动态间接经济损失评估[J]. *灾害学*, 2019, 34(3):178-183. LIU Y, LI N, ZHANG Z T, et al. Indirect economic loss and its dynamic change assessment of typhoon Ewiniar in Guangdong[J]. *Journal of Catastrophology*,2019, 34(3):178-183.
- [18] 王桂芝, 顾赛菊, 陈纪波. 基于投入产出模型的北京市雾霾间接经济损失评估[J]. *环境工程*, 2016, 34(1):121-125. WANG G Z,GU S J,CHEN J B. Assessment of the indirect economic loss caused by heavy haze in Beijing based on input-output model[J]. *Environmental Engineering*,2016, 34(1):121-125.
- [19] 姜玲, 邱志德. 城市洪涝灾害的间接经济损失评估——以北京市为例[J]. *现代城市研究*, 2014(7):7-13. JIANG L,QIU Z D. The assessment of indirect economic loss of urban flood disaster:A case study of Beijing[J]. *Modern Urban Research*,2014(7):7-13.
- [20] 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. NING S Y,HUANG J,WANG Z Q, et al. Indirect economic losses of flood disaster based on an input-output model:A case study of Hubei Province[J]. *Progress in Geography*,2020, 39(3):420-432.
- [21] MOSES L N. The stability of interregional trading patterns and input-output analysis[J]. *The American Economic Review*,1955, 45(5):803-826.
- [22] 庞军, 石媛昌, 谢希, 等. 基于 MRIO 模型的中美欧日贸易隐含碳特点对比分析[J]. *气候变化研究进展*,

---

2015, 11(3):212-219. PANG J, SHI Y C, XIE X, et al. Study on the carbon embodied in trades of China, the United States, EU and Japan using the MRIO model[J]. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis*, 2015, 11(3):212-219.

[23] DUARTE R, PINILLA V, SERRANO A. Factors driving embodied carbon in international trade: A multiregional input-output gravity model[J]. *Economic Systems Research*, 2018, 30(4):545-566.

[24] WANG H, ZHANG Y, ZHAO H, et al. Trade-driven relocation of air pollution and health impacts in China[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1):1-7.

[25] 黄永明, 陈小飞. 中国贸易隐含污染转移研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(10):112-120. HUANG Y M, CHEN X F. Transfer of embodied pollution of China's trade[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(10):112-120.

[26] 周蕾, 吴先华, 高歌. 基于MRIO模型的“一带一路”典型国家气象灾害间接经济损失分析——以2014年中国“威马逊”台风灾害为例[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(5):1-11. ZHOU L, WU X H, GAO G. Analysis of indirect economic loss of meteorological disasters among the Belt and Road typical countries based on the MRIO model: Taking the China's typhoon Rammasun in 2014 as an example[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(5):1-11.

[27] 王德运, 谭亚妮, 柯小玲, 等. 中国热带气旋灾害经济损失时空特征分析[J]. *灾害学*, 2020, 35(2):62-69. WANG D Y, TAN Y N, KE X L, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of economic loss caused by tropical cyclones in China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(2):62-69.

[28] 闫绪娟, 范玲, 阮嘉璐. “一带一路”沿线国家台风灾害关联经济损失研究——以2018年“山竹”台风灾害为例[J]. *灾害学*, 2021, 36(1):7-12, 23. YAN X X, FAN L, RUAN J J. The relational economic losses assessment of typhoon disaster among the Belt and Road countries: Taking the typhoon mangkhut in 2018 as an example[J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(1):7-12, 23.

[29] CHO C J. A note on distortions from estimating the regional impacts of exogenous changes in output[J]. *Economic Systems Research*, 2017, 29(3):418-429.

[30] DIETZENBACHER E, MILLER R E. Reflections on the inoperability input-output model[J]. *Economic Systems Research*, 2015, 27(4):478-486.

[31] 孟永昌, 王铸, 吴吉东, 等. 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*, 2015, 24(6):1-8. MENG Y C, WANG Z, WU J D, et al. Global economic impacts of large-scale disasters: Case study of the Great East Japan Earthquake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(6):1-8.

[32] 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. YUE Y Y, WU C H, MAO Y W, et al. Analysis of rainstorm characteristics and disaster influence during the Meiyu period of 2016 in Hubei Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(2):412-420.

[33] OKUYAMA Y, CHANG S E. Modeling spatial and economic impacts of disasters[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004.

---

[34] CHANG S E, ROSE A Z. Towards a theory of economic recovery from disasters [J]. *International Journal of Mass Emergencies & Disasters*, 2012, 30(2):171-181.

[35] NAKANO K, KAJITANI Y, TATANO H. Functional fragility curves for a production facility of industrial sectors in case of earthquake disaster[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 2013, 69(1):57-68.

[36] 津波・高潮ハザードマップ研究会事務局. 津波・高潮ハザードマップマニュアル[R]. 東京: 内閣府, 2003. Tsunami・Storm Surge Research Association. Tsunami・storm surge manual[R]. Tokyo, Japan: The Cabinet Office, 2003.

[37] 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. ZHANG Z T, CUI P, LI N, et al. Research on the assessment of the multi-regional economic ripple effect caused by disasters: A case study of a flood disaster in Wuhan city on July 6, 2016[J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(4):433-441.