

恢复力减少了灾害的多少损失^①

——基于改进CGE模型的实证研究

吴先华^{1,2}, 谭玲³, 郭际^{1,2}, 周蕾³

(1. 上海海事大学经济管理学院, 上海 201306; 2. 南京信息工程大学气候与气象灾害协同创新中心, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 恢复力因素是灾害损失评估中需要考虑的重要因素, 但很少有文献定量评估恢复力在减少灾害损失中的作用. 纳入灾害恢复力因素, 对CGE模型进行改进, 然后以北京市“7·21特大暴雨”灾害为例, 对比分析恢复力在减少灾害损失中的作用. 结果发现, 在CGE模型的生产模块中纳入灾害恢复力因素, 考察生产函数中劳动和资本要素的减少所引起的弹性参数值的变化, 可以定量评估恢复力减少灾害影响的幅度. 以北京市“7·21特大暴雨”为例, 考虑恢复力因素后, 灾害经济损失的各项指标均有所减少, 各产业部门的恢复程度均有所不同. 拓展了Rose等的研究, 是灾害恢复力定量评估研究的有益补充, 所得结果可为政府等部门开展恢复力建设和灾后应急管理工作提供实证参考.

关键词: 恢复力; CGE模型; 北京市“7·21特大暴雨”; 经济损失

中图分类号: F224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2018)07-0066-11

0 引言

近年来, 随着气候变暖, 气象灾害频发, 给人类社会带来巨大的经济损失, 已成为人类社会可持续发展中急需应对的严峻挑战. 如何合理评估灾害的经济损失, 进而采取有针对性的防灾减灾措施, 成为政府、学术界和公众关注的重要问题^[1-3]. 在评估灾害的经济损失时, 学者们发现, 恢复力是评估灾害经济损失时需要考虑的重要因素, 可以减少灾害损失的80%左右^[4-6]. 恢复力包括增强防灾减灾制度体系、社区的防灾减灾能力、灾民的减灾意识等, 这些都能加快灾后恢复重建, 促使社会生产秩序恢复正常, 减少灾害带来的负面影响^[7]. 因此, 如何评估恢复力作用的大小成为灾害风险评估研究的热点和前沿问题.

目前定量评估灾害恢复力的研究文献较少,

且几乎没有看到利用CGE模型评估恢复力作用大小的研究. 国内仅有的一些定量研究侧重构建恢复力的评价指标体系进行评价等^[8-10]. 但这类研究的指标设计、权重设定、数据来源和评估模型的不同, 均会对研究结果产生较大影响. 可计算一般均衡模型(computable general equilibrium, CGE)是评估灾害综合经济损失的重要方法之一. 但目前很少有文献将恢复力纳入CGE模型, 对比评估恢复力在减少灾害损失中的作用^[11], 因而难以开展灾害的综合经济损失评估, 更难以为科学防灾减灾提供合理的数据支持. 基于此, 在CGE模型的生产模块中纳入灾害恢复力因素, 对比评估恢复力减少灾害影响的幅度. 然后以2012年北京市“7·21暴雨灾害”为例, 验证所改进模型的合理性. 不仅补充了灾害恢复力定量评估的文献, 而且扩展了CGE模型的应用范围, 所得结果还能对政

① 收稿日期: 2016-10-19; 修订日期: 2017-10-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91546117; 71373131); 国家社会科学基金规划资助项目(17BGL142); 国家社科基金重大招标资助项目(16ZDA047).

作者简介: 吴先华(1977—), 男, 湖北荆州人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: wxhua_77@nuist.edu.cn

府的防灾减灾工作提供支持,因而具有很好的研究意义和实践价值。

1 评估恢复力的相关文献综述

1973年,Holling^[12]将恢复力引入生态学领域,将其定义为系统吸收干扰并继续保持其功能、结构等不发生改变,保持系统稳定的能力。之后恢复力的概念便被引入工程科学和社会科学等领域的研究中。随着全球灾害事件的增加,灾害恢复力得到越来越多的关注。2004年,联合国国际减灾战略(united nations international strategy for disaster reduction, UNISDR)^[13]提出,面临灾害等的冲击时,恢复力是自然、统和经济系统维持稳定的内在属性,可以在一定程度上降低灾害的冲击,值得深入研究。

定量评估恢复力大小的文献主要可分为以下五种方法^[14]。一是构建指标矩阵的方法,如Bruneau等^[15]构建四维度矩阵测量社区在地震灾后恢复力的减损作用;Cox等^[16]构建指标矩阵计算了伦敦交通系统中恢复力的作用;Henry等^[17]提出了时间依赖的恢复力指标;Wang等^[18]构造了测量企业信息系统恢复力大小的指标;另外的研究还如吴先华等^[10]、Baroud等^[19]、Janić^[20]和Franchin等^[21]。第二类是概率方法,如Chang等^[22]根据损失值和恢复期两个因素,提出了评估恢复力的概率公式,将历史数据与仿真结果相结合确定概率值;Ouyang^[23]提出了随机动态矩阵,用来测量多灾种的年度恢复力弹性;Ayyub^[24]提出了一个随机的恢复力评价指标矩阵等;另外的研究还如Franchin等^[21]和Barker等^[25]。第三类是优化模型,如Faturechi等^[26]通过构建随机整数规划模型以评估和优化机场道路的恢复力;Faturechi等^[27]构建了多目标三阶段随机数学模型,定量评估和优化道路网络的恢复力;Azadeh等^[28]用DEA方法评估了石化工厂的相对恢复力;另外的研究还如Sahebjamnia等^[29]、Khaled等^[30]和Jin等^[31]。第四类是仿真模型,如Albores等^[32]提出了两个离散模型,评估恐怖袭击下火灾和救援服务设施的预防能力;Carvalho等^[33]构建了离散事件模型, Virginia等^[34]提出了动态仿真方法评估

供应链的恢复力;Sterbenz等^[35]集成分析仿真、拓扑学和实验仿真等方法,评估了互联网网络的恢复力和生存能力;其他研究还如Jain等^[36]和Adjeteybahun等^[37]。第五类是模糊逻辑建模的方法,如Aleksić等^[38]提出了评估组织恢复力的模糊模型;Azadeh等^[39]通过模糊认知图(fuzzy cognitive map)评估了工程中的恢复力因素;Tadić等^[40]采用层次分析法和多准则比较技术,评估了组织的恢复力弹性等等。

从视野范围来看,目前几乎没有见到采用CGE模型评估经济系统恢复力的文献。Koks等^[41]提出,CGE模型不仅反映了经济因素和生产活动之间的相互依赖关系,且克服了IO模型缺乏行为响应、市场价格变化以及线性约束等缺点,不失为评估灾害综合经济损失的较好方法。Rose^[42]认为,尽管CGE模型有一些不足,如行为最优化假设、模型方程的弹性设置导致价格和数量的极端变化,可能会低估灾害对经济的综合影响等。但该模型以非线性方程的形式模拟各经济主体的生产、消费、就业等行为,更贴近现实活动^[43,44]。同时,通过模型的弹性参数可反映出各产业部门的替代水平,从而反映在不同情境下经济系统的恢复能力。在灾害情境下,通过弹性系数的变化,可模拟灾后恢复情境下的经济损失。Rose等^[42]进一步提出,在一般情境中,CGE模型已通过固定的弹性参数值体现经济系统固有的恢复力;在灾害情境下,可通过生产函数中资本和劳动要素投入的变化引起的弹性参数值的变化体现经济系统的适应性恢复力。因此,可以采用CGE模型评估系统恢复力的大小。但是,由于CGE模型的构建及其计算的难度较大,采用CGE模型开展灾害恢复能力评估的实证文献并不多见。如Rose等^[11]在CGE模型中嵌入水资源供给模块,评估区域水资源供给中断后的经济损失。灾害恢复力是通过生产模块的技术替代率和弹性参数值的变化体现的。由于恢复力的减缓作用,模拟所得的经济损失有所减少。但该文献对数据的需求量很大,且需要城市中有关水资源分布的微观数据,这些数据往往难以获取。因此,Rose等^[11]提出这种思路后,并未能进一步改进CGE模型以定量测度系统的恢复力大小,研究视野范围内也未见到后续的跟进研究。

基于此,将扩展 Rose 等^[11]的研究.在生产模块中纳入灾害恢复力因素,考察生产函数中劳动和资本要素的减少所引起的弹性参数值的变化,以定量评估恢复力减少灾害影响的幅度.再对比引入恢复力前后的经济损失值,定量评估恢复力在减灾中的作用.这种思路相对简洁,对比研究更具说服力.然后以北京市7·21暴雨灾害为例,验证本研究所提出的思路的可行性.最后提出有针对性的对策建议.

余下部分如下,第三部分是模型构建,第四部分介绍在模型中引入恢复力的方法,第五部分是实证分析,最后是结论和对策建议.

2 模型构建

2.1 CGE 模型结构

构造一个二要素多部门的CGE模型.所涉及的变量及参数的含义如表1所示.

表1 模型变量及参数说明

Table 1 The explanation of the variables and parameters of the model

X_i : 总产出	V_i : 增加值	IT_i : 中间投入
L_i : 劳动力投入	K_i : 资本投入	IT_{ji} : 部门中间投入
W_L : 劳动价格	W_K : 资本价格	
A_i : 总产出函数规模效率参数	δ_i : 总产出函数份额参数	σ_i : 总产出函数弹性参数
AV_i : 增加值函数规模效率参数	δV_i : 增加值函数份额参数	σV_i : 增加值函数弹性参数
ρ_i : 总产出函数弹性参数相关系数	ρV_i : 增加值函数弹性参数相关系数	a_{ji} : 直接消耗系数

根据灾害对产业部门造成的影响,将整个经济系统合并为8个部门,劳动和资本作为基本生产要素.每个部门的生产活动采用两层嵌套的函数来刻画,第一层的总产出用CES(constant elasticity of substitution)函数表示,包含中间投入和增加值两个部分;第二层中间投入部分采用列昂惕夫生产函数,增加值部分采用的是包含劳动要素和资本要素投入的CES函数.在贸易方面,区域

自产的商品在区域市场销售并出口至国外市场,区域内销售的商品不仅包括自产商品,还包括进口商品.模型进口方程用CES函数描述,采用“小国假设”.对于进口产品和出口产品,模型遵循Armington假设,出口方程采用恒替代弹性(constant elasticity of transformation, CET)函数刻画.区域市场上销售的商品被企业、政府和居民购买用于消费或者投资,居民消费受收入的约束,通过Cobb-Douglas生产函数的效用最大化原则进行消费,政府消费和投资需求按照固定支出份额的函数刻画.其中,居民和企业的收入来源于要素报酬和获得的转移支付,政府的收入来源包括间接税、居民及企业所得税等.最后,在模型均衡模块中,所有商品市场通过价格出清,实现投资储蓄均衡、外汇收支均衡.

2.2 灾害对经济系统的影响

自然灾害对经济系统产生外生冲击,会直接导致各产业部门遭受影响.直接影响主要表现在,农业歉收、工业减产、服务业营业收入减少、居民住宅及财产受损等.另外,在市场机制作用下,由于系统的内部关联性,受损范围和主体将进一步扩大,继而寻求新的均衡状态.与原有的均衡相比,新均衡决定的产出量、价格、收入和投资水平等都会发生变化.

为模拟灾害对基础设施以及企业生产的外生冲击,在生产活动中添加灾害冲击参数 a_i ,令 X_i' 表示灾害情境下各部门的产出.

灾害情境下各部门对应的总产出方程为

$$X_i' = (1 - a_i) \cdot A_i \cdot [\delta_i V_i^{\rho_i} + (1 - \delta_i) IT_i^{\rho_i}]^{\frac{1}{\rho_i}} \tag{1}$$

另外,灾害对居民正常生活的影响可理解为灾害造成居民的财产损失,用经济主体的行为函数予以刻画,表示为居民收入及消费结构的变化,在此基础上构建CGE模型.

3 在CGE模型中引入灾害恢复力

使用两层嵌套的恒替代弹性(CES)生产函数.第一层的总产出用CES函数表示,包含中间投入和增加值两个部分;第二层中间投入部分采用的是具有固定消耗系数的列昂惕夫生产函数,

增加值部分采用的是劳动要素和资本要素投入的 CES 函数. 具体形式为

$$X_i = A_i [\delta_i V_i^{\rho_i} + (1 - \delta_i) IT_i^{\rho_i}]^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (2)$$

$$V_i = AV_i [\delta V_i^{\rho_{V_i}} + (1 - \delta V_i) K_i^{\rho_{V_i}}]^{\frac{1}{\rho_{V_i}}} \quad (3)$$

$$IT_{j_i} = a_{j_i} \cdot IT_i \quad (4)$$

CES 函数中各部门要素之间的关系以弹性参数 σ_i 表示. 要素替代的本质含义是指, 随着某一生产要素价格的改变, 一个部门在保持产量不变的前提下调整各种生产要素投入比例的行为^[45]. 在上述方程中, 要素投入为劳动和资本. 灾害发生后, 生产的要素资源会受到损坏, 在劳动要素上表现为人员伤亡、生产所需的基础设施和资源受到破坏或者一些中小企业无法抑制灾害造成的负面

影响导致停产^[46], 这就造成了劳动力闲置等; 在资本要素上的表现包括原有工厂房屋、库存等固定资产的破坏以及供应商之间的业务中断等^[46]. 灾后为了维持正常的生产运作, 使灾害造成的影响减少到最小, 区域市场和企业会立即采取各种恢复措施重新回归到正常、可接受的水平^[47]. 与此同时, 面对一些重大灾害, 政府也会通过一些政策措施调控生产资源, 所采取的恢复力措施包括通过设备或手段保护、节约使用和置换资源、更新技术提高生产效率、从国外或其他地区调入所需资源等^[11 48 49]. 在模型方程中, 这些应对灾害的恢复力措施表现为规模参数 (AV_i) 和弹性参数 (σ_{V_i}) 的变化. 灾害对生产要素的影响过程可用图 1 简要表示如下.

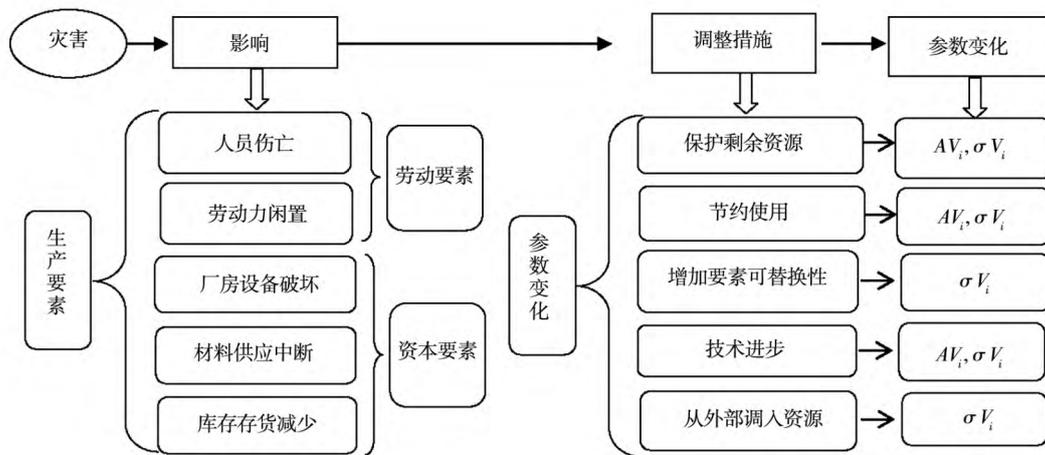


图 1 灾害对生产要素的影响

Fig. 1 The impact of disasters on production factors

灾后通常时间紧迫和财力不足, 短期内实施新技术较为困难^[50], 因此假设企业生产技术水平维持现状, 即规模参数 (AV_i) 保持不变, 灾害经济恢复力通过弹性参数 (σ_{V_i}) 的变化予以体现. 在 CGE 模型中, 弹性参数的值是外生给定的, 反映了一般情况下要素投入之间的替代关系, 由于灾害发生之后对总产出以及要素供应量等均会造成巨大影响, 原要素之间互相替代的平衡关系会被打破, 经济系统将寻求新一轮的平衡. 所以灾害恢复力的引入主要是通过外生变量值的变化重新校验生产函数增加值公式中的弹性参数值实现的. 具体原理和步骤如下, 设劳动要素和资本要素的价格分别为 W_L 和 W_K , C 表示生产成本, 根据成本最小化法则, 生产行为可以表现为

$$\min C = W_L L + W_K K \quad (5)$$

$$\text{s. t. } V = AV [\delta V \cdot L^{\rho_V} + (1 - \delta V) \cdot K^{\rho_V}]^{\frac{1}{\rho_V}} \quad (6)$$

拉格朗日函数约束下的函数形式为

$$\min_{L, K, \lambda} LA = W_L L + W_K K + \lambda [V - AV (\delta V \cdot L^{\rho_V} + (1 - \delta V) \cdot K^{\rho_V})^{\frac{1}{\rho_V}}] \quad (7)$$

对相应变量微分, 可得到在拉格朗日函数约束下的成本最小化的条件为

$$\frac{W_L}{W_K} = \frac{\delta V}{(1 - \delta V)} \left(\frac{K}{L} \right)^{1 - \rho_V} \quad (8)$$

也可将方程 (8) 转化为

$$\delta V = \frac{W_L L^{\frac{1}{\sigma}}}{[W_L L^{\frac{1}{\sigma}} + W_K K^{\frac{1}{\sigma}}]} \quad (9)$$

结合公式(8)和公式(6),可得到要素需求函数

$$L = \left(\frac{V}{AV}\right) \left\{ \frac{[\delta V^{1-\rho} W_L \frac{1}{\rho^{V-1}}]}{[\delta V^{1-\rho} W_L \frac{\rho^V}{\rho^{V-1}} + (1-\delta V)^{\frac{1}{1-\rho}} W_K \frac{\rho^V}{\rho^{V-1}}]^{\frac{1}{\rho^V}}} \right\} \quad (10)$$

$$K = \left(\frac{V}{AV}\right) \left\{ \frac{[(1-\delta V)^{\frac{1}{1-\rho}} W_K \frac{1}{\rho^{V-1}}]}{[\delta V^{1-\rho} W_L \frac{\rho^V}{\rho^{V-1}} + (1-\delta V)^{\frac{1}{1-\rho}} W_K \frac{\rho^V}{\rho^{V-1}}]^{\frac{1}{\rho^V}}} \right\} \quad (11)$$

将公式(10)和公式(11)代入公式(8)中,可得

$$AV = \frac{V}{[\delta V \cdot L^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1-\delta V)K^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}} \quad (12)$$

将公式(9)代入公式(12)中,得

$$AV = \frac{V}{\left[\frac{(L+K)}{(L^{\frac{1}{\sigma}} + K^{\frac{1}{\sigma}})} \right]^{\frac{1}{\sigma-1}}} \quad (13)$$

$$L' = L^0 \left(\frac{Y'}{Y^0} \right) \quad (14)$$

$$K' = K^0 \left(\frac{Y'}{Y^0} \right) \quad (15)$$

得到灾后各产业部门的损失等数值后,通过公式(13)就可以重新校验发生灾害之后弹性参数 σ 的数值,以反映经济系统的恢复能力.用二分法和代入法求解公式(13)中的弹性参数.主要步骤如下,首先,在原替代水平下,各部门的灾后损失较大,产出率较低,故将原弹性参数值作为边界值,然后以0.01为单位不断调整弹性参数数值,使之不断接近灾后的产出水平.其中,灾后劳动要素和资本要素的变化值可利用公式(14)和

公式(15)得到.

4 实证分析——以北京市7·21暴雨灾害为例

4.1 北京市7·21暴雨灾害概况

2012年7月21日,北京遭遇了罕见的特大暴雨,强降雨持续16个小时左右,全市平均降水量170毫米,城区平均降雨量215毫米,为1951年有完整气象记录以来的最大降水量.暴雨灾害对北京市的道路、房屋、交通等基础设施、农林业以及居民正常生活等均造成重大影响.据统计,全市因灾死亡79人,受灾人口160.2万人,直接经济损失高达116.4亿元^②.

4.2 数据处理

以2012年为基准年构建北京市2012年社会核算矩阵(见表2所示),数据主要由《北京2012年投入产出表》、《中国统计年鉴2013》、《北京统计年鉴2013》和《中国财政年鉴2013》等整理得到.模型中的参数主要包括三类:1)弹性参数,包括CES函数中的替代弹性参数、贸易函数的替代弹性值等,借鉴贺菊煌等^[51]和Zhai等^[52]的研究计算得到;2)规模参数、份额参数及相关税率参数等利用SAM中的基年数据和外生给定的参数通过校准法或直接计算得到的;3)灾害冲击参数.计算方程为

$$\text{参数值} = (\text{部门直接经济损失值} / \text{部门总产值}) \times 100\%$$

表2 北京市2012宏观社会核算矩阵(单位:亿元)

Table 2 The macro social accounting matrix of Beijing in the year 2012 (unit: 100 million RMB)

	活动	商品	要素		居民	企业	政府	国外	国内地区	储蓄投资
			劳动	资本						
活动		45 434						7 078		
商品	34 632				6 203		4 452		64 730	7 410
要素	劳动	9 023								
	资本	5 925						261		
居民			9 023	618		2 313	424			
企业				5 569						
政府	2 931				282	821				842
国外		24 757								
国内地区		47 237								17 493
储蓄投资					5 893	2 434		17 418		

② 人民网: <http://society.people.com.cn/n/2012/0725/c41158-18598812.html>

根据搜狐财经相关报道^③,暴雨对北京市农业部门造成的经济损失近 4.5 亿元,《北京统计年鉴 2013》中提出 2012 年北京市农业生产总值为 166.289 1 亿元,故农业灾害冲击参数约为 2.71%。由于统计资料缺失,难以获取其他部门准确的损失值,综合新华网等各类新闻及北京政府公布的报道可知,此次灾害对制造业、电力、交通以及服务业的影响也不容小觑,故假设上述四部门的灾害冲击参数约为 2%,采矿业、建筑业、批发和零售业的灾害冲击参数约为 1。

4.3 模拟结果分析

基于构建的 CGE 模型和北京市 2012 年的 SAM 表,区分原始状态和灾害恢复状态两种情景,评估北京市 7·21 暴雨灾害所造成的经济损失。首先假设政府和市场在面对灾害发生时,未采取应急措施,即在原始状态下,评估灾害的经济损失;随后引入恢复力因素,随着投入替代可能性的变化,抵消灾害所造成的部分经济损失,进一步研究各个经济指标损失值的变化情况。对于所得模拟结果,从宏观经济效应和各部门结构效应两个方面进行对比,计算发现,未考虑恢复力情况下的各项经济指标的损失率均超过了纳入恢复力因素后的对应指标数值,说明考虑恢复力因素后,各部门的灾害损失得以减少。具体可以分为宏观经济效应和部门结构效应。

1) 灾害的宏观经济效应

暴雨灾害导致基础设施破坏、人员伤亡,造成直接经济损失,通过经济系统内在的关联关系,导致企业生产能力下降、产出下降;居民收入减少导致购买力下降、居民需求降低,最终影响区域经济。政府的收入来源包括间接税、居民及企业所得税等。暴雨过后,由于部门产出下降,政府收入下降了 2.928 6%。同时,短期内,为修复或改造基础设施,政府部门的财政支出也随之增加,致使政府储蓄减少,下降幅度为 -14.029 1%。另外,灾害短期内造成大量基础设施损毁,投资总额由 7 409.6 亿元变为 7 120.659 亿元,导致灾后投资总量有所减少。但相比之下,减少幅度并不大,主要原因是为了灾后重建,政府将会加大投资,相关单位和部门也会增加新的固定资产投资。随着灾

害恢复力的引入,这种损失值进一步减少,最后增加 0.039 8%。

这也在一定程度上验证了 Okuyama^[53] 的结论,当自然灾害破坏资本时,老旧设备更易受损,而替换老旧设备,增添新设备会对经济发展带来积极影响。总体而言,引入恢复力后,随着各部门之间投入替代率的增加,各宏观指标的损失值将进一步减少,经济系统复苏加快,区域灾害的恢复时间缩短。结果如表 3 所示。

表 3 宏观经济指标变化率(单位:%)

Table 3 The change rate of macroeconomic indicators (unit: %)

主要经济变量	原始状态	考虑恢复力因素后
居民消费	-2.587 5	-0.069 7
居民收入	-2.586 9	-0.069 7
政府收入	-2.928 6	-1.471 1
居民储蓄	-2.586 2	-0.069 7
政府储蓄	-14.029 1	-7.043 5
资本存量	-8.474 3	-4.967 1
就业水平	-8.895 2	-5.455 2
投资总量	-3.899 5	0.039 8

2) 灾害的部门结构效应

表 4 显示了暴雨灾害对各部门总产出和增加值的影响。可以看出,灾害在不同程度上减少了各部门总产出和增加值。其中,农业、批发零售业和服务业的损失最为严重。北京市“7·21”暴雨灾害中,强降水持续时间较长,导致农田被淹或积水,农田泥沙沉积、土壤缺氧、植株根部活力下降,对当年农业生产造成很大影响。灾后农业的总产出由 395.750 亿元降至 375.992 亿元,增加值由 149.113 亿元降至灾后的 136.462 亿元。引入灾害恢复力后,随着政府和农户采取积极有效的救援措施,如挖建沟渠、抽排积水等,农业总产出和增加值的损失率分别减少了 1.345 3% 和 3.473 2%。批发零售业等服务业的规模普遍较小,受影响幅度也较大。但通过转移货物、加快流转,增强了恢复能力。如批发零售部门和服务部门总产出损失率分别减少了 1.615 0% 和 1.607 5%。采矿业受此次灾害的影响相对较小,产出变化率为 -1.717 1%。但加强重建后,总产出减少率为 0.453 4%。

③ 搜狐财经: <http://business.sohu.com/20120724/n348852792.shtml>

总体而言,引入恢复力后,各部门的灾害损失值均有所下降,但恢复程度有所不同,从高到低依次为:批发和零售业>服务业>农业>交通运输>仓储和邮政业>制造业>建筑业>电力、燃气及水的生产和供应业>采矿业。结果如表4所示。

表4 各部门产出变化率(单位:%)

Table 4 The change rate of sectoral output (unit:%)

部门	原始状态		考虑恢复力因素后	
	总产出	增加值	总产出	增加值
农业	-4.992 5	-8.484 2	-3.647 3	-5.011 0
采矿业	-1.717 1	-7.306 1	-1.263 7	-3.833 2
制造业	-2.368 9	-5.395 2	-1.830 8	-1.798 9
电力、燃气及水的生产和供应业	-2.196 9	-5.018 8	-1.712 4	-1.401 7
建筑业	-1.875 3	-7.547 7	-1.365 3	-4.044 5
批发和零售业	-5.102 2	-9.225 9	-3.487 1	-5.777 6
交通运输、仓储和邮政业	-3.300 2	-7.627 9	-2.430 1	-4.119 6
其他服务业	-5.484 0	-9.046 2	-3.876 5	-5.591 4

5 结束语

扩展了 Rose^[11] 的研究,通过引入恢复力因素,对 CGE 模型进行改进,定量评估恢复力在减少灾害损失中的作用大小。以北京 2012 年“7·21 暴雨灾害”为例验证,发现在 CGE 模型中纳入恢复力因素后,可以定量评估恢复力的减损幅度,能更客观地评价不同产业和部门的损失情况,为各级政府制定灾后恢复与重建对策提供更科学的依据^④。还得到了其他一些结论。

1) 科学、全面地定量评估灾害经济损失,必须全面考虑恢复力的作用。考虑恢复力因素后,在灾害初期,各部门和承灾体采取防灾减灾措施,各部门之间的投入替代率发挥作用,有效减少了各部门产出以及宏观经济指标的损失。这对于准确

把握灾害损失幅度,进而开展灾害应急救援工作具有非常重要的意义。

2) 采取多种方式,增强经济系统的灾害恢复能力。在增强系统恢复力的过程中,各经济主体都能发挥积极作用。如政府建立健全灾后重建管理体系、制定和实施重建计划、加强灾区基础设施建设等,可全面提高灾害的恢复力^[54];受到灾害冲击时,市场通过价格机制重新分配资源,能提高系统内在的恢复力;社会团体开展灾害捐助、企事业单位投入各类救灾设备和技术人员,有利于灾后的快速恢复;对居民开展防灾减灾培训,增加救灾知识,积极响应灾情,节约受灾资源,也能减少灾害损失;快速动员劳动力、资金和资源积极投入到抗灾救灾和灾后恢复重建过程,开展互帮互助等,对恢复正常的生产和生活秩序均有非常重要的作用。

3) 根据产业特点,有针对性地开展救援工作。开展救助工作时,需要充分了解当地的产业结构,了解不同的受灾行业所应采取的减灾措施,有针对性地开展灾后恢复与重建工作。一些关键性行业,如采矿业、电力、燃气及水的生产和供应业等,它们的恢复速度普遍较慢,要予以重点关注。可通过抽排积水、疏通道路、加快物资周转等,加大救援力度,尽可能减少灾害的关联性损失^[55]。

定量评估了恢复力在减少灾害损失中的作用,但还有进一步研究之处。如研究的假设情景为灾害的短期影响,未考虑技术进步在提高恢复力时发挥的作用。可考虑通过改进 DSGE (dynamic stochastic general, equilibrium) 模型,定量评估恢复力的动态和长期影响等;另外,由于难以得到各部门的直接经济损失值,除农业部门有确定的直接损失值外,其余部门都是根据受灾情况给定的估计值等等。今后还可以在多个案例分析和实地调研的基础上,对测算得到的结果进行核对,以更好地完善本研究所提出的思路和方法。以上种种不足,留待后续认真探讨。

参考文献:

[1] Okuyama Y. Modeling spatial economic impacts of an earthquake: Input-output approaches [J]. Disaster Prevention & Man-

^④ 作者还以广东省超强台风海马(2016年第22号超强台风)为例,对恢复力的作用进行评估,得到了与类似结论。限于篇幅,此处不一一赘述。

- agement, 2004, 13(4): 297–306.
- [2] Heatwole N, Rose A. A reduced-form rapid economic consequence estimating model: Application to property damage from U. S. earthquakes [J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2013, 4(1): 20–32.
- [3] 祁明亮, 秦凯杰, 赵 琰. 雪灾救援物资车辆——直升机联合运送的调度问题研究 [J]. *中国管理科学*, 2014, 22(3): 59–67.
- Qi Mingliang, Qin Kaijie, Zhao Yan. Research on problem of scheduling of helicopter coordinated with vehicle for resources distribution in snowstorm [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(3): 59–67. (in Chinese)
- [4] Tierney K J. Impacts of Recent U. S. Disasters on Businesses: The 1993 Midwest Floods and the 1994 Northridge Earthquake [R]. University of Delaware, Disaster Research Center, Preliminary Paper No. 230, 1995.
- [5] Rose A, Lim D. Business interruption losses from natural hazards: Conceptual and methodological issues in the case of the Northridge earthquake [J]. *Environmental Hazards*, 2002, 4(1): 1–14.
- [6] Wu X H, Zhou L, Gao G, et al. Urban flood depth-economic loss curves and their amendment based on resilience: Evidence from Lizhong town in Lixia river and Houbai town in Jurong river of China [J]. *Natural Hazards*, 2016, 82(3): 1981–2000.
- [7] Park J Y, Cho J, Rose A. Modeling a major source of economic resilience to disasters: Recapturing lost production [J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(1): 163–182.
- [8] 李 强, 陈志龙, 赵旭东. 地震灾害下城市生命线体系恢复力双维度综合评估 [J]. *土木工程学报*, 2017, (2): 65–72.
- Li Qiang, Chen Zhilong, Zhao Xudong. Seismic resilience assessment of urban lifeline systems: A double-dimensional approach [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, (2): 65–72. (in Chinese)
- [9] 王 群, 陆 林, 杨兴柱. 千岛湖社会—生态系统恢复力测度与影响机理 [J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 779–795.
- Wang Qun, Lu Lin, Yang Xingzhu. Study on measurement and impact mechanism of socio-ecological system resilience in Qiandao Lake [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 779–795. (in Chinese)
- [10] 吴先华, 周 蕾, 高 歌, 等. 考虑防灾减灾能力的洪涝灾害灾损率曲线构建——以里下河地区的李中镇为例 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(2): 223–231.
- Wu Xianhua, Zhou Lei, Gao Ge, et al. Flood depth-damage curves for urban properties considering disaster prevention and mitigation capabilities: Evidence from Lizhong town, Lixiahe region, China [J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 223–231. (in Chinese)
- [11] Rose A, Liao S Y. Modeling regional economic resilience to disasters: A computable general equilibrium analysis of water service disruptions [J]. *Journal of Regional Science*, 2005, 45(1): 75–112.
- [12] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1973, 4(4): 1–23.
- [13] UN/ISDR. Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives [M]. New York: United Nations Publications 2014.
- [14] Hosseini S, Barker K, Ramirez Marquez J E. A review of definitions and measures of system resilience [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 145: 47–61.
- [15] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the science the seismic resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733–752.
- [16] Cox A, Prager F, Rose A. Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics [J]. *Transport Policy*, 2011, 18(2): 307–317.
- [17] Henry D, Ramirez-Marquez J E. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 99(99): 114–122.

- [18] Wang J W , Gao F , Ip W H. Measurement of resilience and its application to enterprise information systems [J]. *Enterprise Information Systems* , 2010 , 4(2) : 215 – 223.
- [19] Baroud H , Barker K , Ramirez-Marquez J E , et al. Importance measures for inland waterway network resilience [J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review* , 2014 , 62(1) : 55 – 67.
- [20] Janić M. Modeling the resilience , friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* , 2015 , 81(C) : 77 – 92.
- [21] Franchin P , Cavalieri F. Probabilistic assessment of civil infrastructure resilience to earthquakes [J]. *Computer Aided Civil & Infrastructure Engineering* , 2015 , 30(7) : 583 – 600.
- [22] Chang S E , Shinozuka M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra* , 2004 , 20(3) : 739 – 755.
- [23] Ouyang M , Dueñas-Osorio L , Min X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems [J]. *Structural Safety* , 2012 , 36 – 37(2) : 23 – 31.
- [24] Ayyub B M. Systems resilience for multi hazard environments: Definition , metrics , and valuation for decision making [J]. *Risk Analysis* , 2014 , 34(2) : 340 – 355.
- [25] Barker K , Ramirez-Marquez J E , Rocco C M. Resilience-based network component importance measures [J]. *Reliability Engineering & System Safety* , 2013 , 117(2) : 89 – 97.
- [26] Faturechi R , Levenberg E , Miller-Hooks E. Evaluating and optimizing resilience of airport pavement networks [J]. *Computers & Operations Research* , 2014 , 43(43) : 335 – 348.
- [27] Faturechi R , Miller-Hooks E. Travel time resilience of roadway networks under disaster [J]. *Transportation Research Part B Methodological* , 2014 , 70(70) : 47 – 64.
- [28] Azadeh A , Salehi V , Ashjari B , et al. Performance evaluation of integrated resilience engineering factors by data envelopment analysis: The case of a petrochemical plant [J]. *Process Safety & Environmental Protection* , 2014 , 92(3) : 231 – 241.
- [29] Sahebjamnia N , Torabi S A , Mansouri S A. Integrated business continuity and disaster recovery planning: Towards organizational resilience [J]. *European Journal of Operational Research* , 2015 , 242(1) : 261 – 273.
- [30] Khaled A A , Jin M , Clarke D B , et al. Train design and routing optimization for evaluating criticality of freight railroad infrastructures [J]. *Transportation Research Part B Methodological* , 2015 , 71: 71 – 84.
- [31] Jin J G , Tang L C , Sun L , et al. Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services [J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review* , 2014 , 63(2) : 17 – 30.
- [32] Albores P , Shaw D. Government preparedness: Using simulation to prepare for a terrorist attack [J]. *Computers & Operations Research* , 2008 , 35(6) : 1924 – 1943.
- [33] Carvalho H , Barroso A P , Machado V H , et al. Supply chain redesign for resilience using simulation [J]. *Computers & Industrial Engineering* , 2012 , 62(1) : 329 – 341.
- [34] Virginia L M S , Mohamed M N , Joakim W. A control engineering approach to the assessment of supply chain resilience [J]. *International Journal of Production Research* , 2012 , 50(21) : 6162 – 6187.
- [35] Sterbenz J P G , Hutchison D , Çetinkaya E K , et al. Resilience and survivability in communication networks: Strategies , principles , and survey of disciplines [J]. *Computer Networks* , 2010 , 54(8) : 1245 – 1265.
- [36] Jain S K , Bhunya P K. Reliability , resilience and vulnerability of a multipurpose storage reservoir / Confiance , résilience et vulnérabilité d' un barrage multi-objectifs [J]. *Hydrological Sciences Journal* , 2008 , 53(2) : 434 – 447.
- [37] Adjeteybahun K A , Birregah B B , Châtelet E C , et al. A simulation-based approach to quantifying resilience indicators in a mass transportation system [C]. *Proceedings of the 11th International ISCRAM Conference-University Park , Pennsylvania , USA , May 2014: 75 – 79.*
- [38] Aleksić A , Stefanović M , Arsovski S , et al. An assessment of organizational resilience potential in SMEs of the process in-

- dustry , a fuzzy approach [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* ,2013 ,26(6) : 1238 – 1245.
- [39]Azadeh A , Salehi V , Arvan M , et al. Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by fuzzy cognitive maps: A petrochemical plant [J]. *Safety Science* ,2014 ,68(10) : 99 – 107.
- [40]Tadić D , Aleksić A , Stefanović M , et al. Evaluation and ranking of organizational resilience factors by using a two-step fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS [J]. *Mathematical Problems in Engineering* ,2014 ,2014(4) : 1 – 13.
- [41]Koks E E , Carrera L , Jonkeren O , et al. Regional disaster impact analysis: Comparing input-output and computable general equilibrium models [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences Discussions* ,2016 ,16(8) : 1911 – 1924.
- [42]Rose A. *Economic Principles , Issues , and Research Priorities in Hazard Loss Estimation* [M]. New York: Springer ,2004.
- [43]时佳瑞 , 汤 铃 , 余乐安 , 等. 基于 CGE 模型的煤炭资源税改革影响研究 [J]. *系统工程理论与实践* ,2015 ,35(7) : 1698 – 1707.
- Shi Jiarui , Tang Ling , Yu Lean , et al. Impacts of coal resource tax reform on China's economy based on a CGE model [J]. *Systems Engineering Theory & Practice* ,2015 ,35(7) : 1698 – 1707. (in Chinese)
- [44]徐晓亮 , 程 倩 , 车 莹 , 等. 资源政策调整对减排和环境福利影响——以煤炭资源税改革为例 [J]. *管理科学学报* ,2017 ,20(2) : 18 – 31.
- Xu Xiaoliang , Cheng Qian , Che Ying , et al. The impacts of resource policy adjustment on CO₂ emission reduction and environment welfare: Based on coal resource tax reform [J]. *Journal of Management Science in China* ,2017 ,20(2) : 18 – 31. (in Chinese)
- [45]Caloghirou Y D , Mourelatos A G , Thompson H. Industrial energy substitution during the 1980s in the Greek economy [J]. *Energy Economics* ,1997 ,19(4) : 476 – 491.
- [46]Asgary A , Anjum M I , Azimi N. Disaster recovery and business continuity after the 2010 flood in Pakistan: Case of small businesses [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction* ,2012 ,2(1) : 46 – 56.
- [47]Chang S E , Rose A Z. Towards a theory of economic recovery from disasters [J]. *International Journal of Mass Emergencies & Disasters* ,2012 ,32(2) : 171 – 181.
- [48]Hallegatte S , Hourcade J C , Dumas P. Why economic dynamics matter in assessing climate change damages: Illustration on extreme events [J]. *Ecological Economics* ,2007 ,62(2) : 330 – 340.
- [49]Henriet F , Hallegatte S , Tabourier L. Firm-network characteristics and economic robustness to natural disasters [J]. *Journal of Economic Dynamics & Control* ,2012 ,36(1) : 150 – 167.
- [50]Benson C , Clay E J. *Understanding the Economic and Financial Impacts of Natural Disasters* [M]. Washington , D. C. : World Bank Publications ,2004.
- [51]贺菊煌 , 沈可挺 , 徐嵩龄. 碳税与二氧化碳减排的 CGE 模型 [J]. *数量经济技术经济研究* ,2002 ,19(10) : 39 – 47.
- He Juhuang , Shen Keting , Xu Songling. CGE model of carbon tax and carbon dioxide emission reduction [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics* ,2002 ,19(10) : 39 – 47. (in Chinese)
- [52]Zhai F , Hertel T. Impacts of the Doha Development Agenda on China: The Role of Labor Markets and Complementary Education Reforms [R]. Washington , D. C. : Policy Research Working Paper No. 3702 , September ,2005.
- [53]Okuyama Y. *Economics of Natural Disasters: A Critical Review* [R]. Regional Research Institute , Research paper 2003 – 12 , West Virginia University.
- [54]王治莹 , 李勇建. 政府干预下突发事件舆情传播规律与控制决策 [J]. *管理科学学报* ,2017 ,20(2) : 43 – 52.
- Wang Zhiying , Li Yongjian. Propagation law and coping strategies for public opinions in emergency with the consideration of the government intervention [J]. *Journal of Management Sciences in China* ,2017 ,20(2) : 43 – 52. (in Chinese)
- [55]吴先华 , 肖 杨 , 李廉水 , 等. 大数据融合的城市暴雨内涝灾害应急管理述评 [J]. *科学通报* ,2017 ,62(9) : 920 – 927.
- Wu Xianhua , Xiao Yang , Li Lianshui , et al. Review and prospect of the emergency management of urban rainstorm water-

logging based on big data fusion[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(9): 920–927. (in Chinese)

How much damage does resilience reduce: An empirical study based on improved CGE model

WU Xian-hua^{1,2}, TAN Ling³, GUO Ji^{1,2}, ZHOU Lei³

1. School of Economics and Management, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;
2. Collaborative Innovation Center on Climate and Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
3. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Resilience factor is an important factor to be considered in disaster loss assessment; however, there are few literatures that quantitatively evaluated the effect of resilience on reducing disaster losses. In this paper, factors of disaster resilience are taken into consideration to improve the CGE model, and the “7·21 severe rainstorm” in Beijing is used as an example to compare and analyze the role of resilience in reducing disaster losses. The results show that the magnitude of disaster reduction caused by resilience can be quantitatively assessed, when incorporating the disaster resilience factors into the production module of CGE, by investigating the change of elastic parameter value caused by reduction of labor and capital factors in the production function. Taking the “7·21” rainstorm in Beijing city as an example, it is found that the loss rate of various economic indexes has been reduced after considering the resilience factor, and the recovery degree of each industry sector is different. This paper expands the series of researches on Rose and so on, and supplements the quantitative evaluation of disaster restoration. The results can provide an empirical reference for the government and other departments to carry out resilience construction and post disaster emergency management.

Key words: resilience; CGE model; the extreme rain event in Beijing on July 21th, 2012; economic losses