引用本文：李廉水，蔡洋，谭玲. 基于动态 CGE 模型的中国暴雨洪涝灾害综合经济损失评估研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版)，2020，22(1)：28-36.

DOI：10.3876/j.issn.1671－4970.2020.01.005

基于动态 CGE 模型的中国暴雨洪涝灾害综合经济损失评估研究

李廉水，蔡　洋，谭　玲

（南京信息工程大学应用气象学院，江苏南京　210044）

摘　要：随着气候变暖，灾害发生的频率和强度不断增加，有效地开展灾害预防和灾害应急管理需要全面了解灾害对经济的影响。将动态可计算一般均衡模型(DCGE)引入灾害综合经济损失评估，以我国 2008—2016 年发生的暴雨洪涝灾害为例，构建灾害情境下的 DCGE 模型，测量每年暴雨洪涝灾害的发生对整个经济系统的影响轨迹。实证结果显示：从当期来看，每年暴雨洪涝灾害的发生都在不同程度上影响社会生产，2008—2016 年暴雨洪涝灾害造成总产出的损失值区间为[3 525.652，40 536.761]亿元。从长期来看，灾害的累积效应更不容忽视，暴雨洪涝灾害的发生不仅会影响当年的社会经济发展，也会对后期经济发展产生重大影响，若某一时期的灾情较重，后期社会经济所受影响甚至会高于当期灾害会经济系统的冲击。

关键词：一般均衡模型；暴雨洪涝灾害；综合经济损失

中图分类号：F224；X43　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671－4970(2020)01－0028－09

全球气候变暖，极端灾害发生的次数逐渐增加，灾害强度明显增强。现有研究表明，在没有大规模结构调整的情况下，未来 20 年全球由洪水造成的总经济损失将增加 17%，中国将遭受最强烈的直接损失，增幅为 82%[1]。在灾害损失评估体系中，灾害造成的综合经济损失往往被划分为直接经济损失和间接经济损失[2]。直接经济损失包括市场损失，如资产、建筑物、货物和服务的损失以及非市场损失，如生命损失、人体健康损失等[3]；间接经济损失是指灾害导致货物流、服务流和贸易流等的中断带来的损失[4]。由于社会经济系统日益复杂，各地区、产业部门之间的内在关联性越来越强，形成了一个复杂的供应链和价值链，局部地区或产业关键基础设施受到灾害影响后往往会通过供应链或价值链的前后相联系蔓延到其他产业部门，甚至会带来区域或全球性的影响[5]。因此，如何合理地评估灾害对社会经济发展的影响、探究灾害影响社会发展的一般性规律，是科学制定防灾减灾措施中的热点和难

收稿日期：2019－10－16

基金项目：国家社会科学基金重大项目(16ZDA047)

作者简介：李廉水(1957—)，男，江苏泰州人，博士，教授，从事气象灾害管理研究。

点问题。

2000 年以来,学术界对灾害经济学的重视程度不断加深,关于灾害与经济影响的实证文献逐渐增加。目前这方面的研究多局限于评估灾害对地区带来的静态损失,较少考虑灾害带来的动态影响,尤其是不同年份灾害影响的累积效应研究更为少见。灾害对经济系统的影响是长远的,当期的灾害对社会经济系统的未来影响程度如何?这方面的定量研究也很少见。基于此,采用动态可计算一般均衡 DCGE 模型,以中国 2008—2016 年发生的暴雨洪涝灾害为例,评估暴雨洪涝灾害带来的经济损失,深入分析不同年份灾害损失的变化趋势及灾害的累积效应。

一、文献综述

暴雨洪涝灾害综合经济损失评估的方法主要可分为以下 3 种。一是可计算一般均衡模型(CGE 模型),如 Pauw 等结合随机水文气象作物损失模型与 CGE 模型评估极端天气事件的经济影响,结果表明每年干旱和洪水灾害给 Malawi 带来的社会经济损失率约为 1.7%[6]。Joshi 等将 GIS 技术与 CGE 模型相结合,评估气候变化导致海平面上升对沿海城市的经济影响[7]。Borgomeo 等运用 CGE 模型模拟不同气候变化情景下强降雨冲击对埃塞俄比亚经济系统的影响[8]。二是投入产出模型(IO 模型),如 Veen 等综合了 IO 模型和脆弱性函数,并运用 GIS 技术创建了荷兰的经济中心南荷兰省面对洪水灾害时的风险图[9]。Jonkman 等介绍了荷兰运用 IO 模型构建的洪涝灾害综合损失评估系统[10]。Li 等构建了 2020 年伦敦的洪水灾害情景,评估了未来冲击对区域经济的影响,结果表明灾害当期服务业将亏损 40%,其他产业部门当期亏损 10% ~30% 左右,区域经济需要较长时间才能恢复到平衡状态[11]。三是基于水文模型和损失估算模型相结合的数学方法,如 Dutta 等基于不同水深淹没参数构建直接损失和间接损失估算的分阶段损失函数,并将其运用于日本一个中等规模且经常遭受洪水影响的流域,通过与实际调查数据相比,研究所构建的洪水参数的损失模型评估的洪水损失与实际调查后的损失结果一致[12]。Merz 等运用水文模型和树状结构模型构建多变量洪涝灾害损失评估模型,考虑了洪水及与洪水关联对象的特征,并使用德国的易北河和多瑙河流域的历年洪水灾害数据验证了所构建模型评估灾害损失率的准确性[13]。

从研究方法看,运用水文模型和损失估算模型相结合评估暴雨洪涝灾害损失的方法更适合评估灾害的直接影响,但不能全面反映出灾害对社会经济的间接影响。IO 模型能反映产业经济系统的内在关联性,应用最为广泛,但其具有线性和刚性特征,没有考虑经济系统的弹性[14]。相比之下,CGE 模型是目前定量评估灾害经济损失的最优选择,既能体现经济系统的内部关联性,也能避免线性、刚性特征。从研究内容看,暴雨洪涝灾害的综合经济损失评估研究主要偏向于确定当期经济损失的负面影响和恢复重建活动的正面影响的短期研究。由于经济水平提升及人力、资本和技术水平变化所带来的长期的灾害效应分析不足[15],当发生较大规模的灾害时,其影响不会快速消失,不仅会影响当期的社会经济发展,还会波及后期的社会经济发展。因此,基于 DCGE 模型,以中国 2008—2016 年发生的暴雨洪涝灾害为例,测量每年暴雨洪涝灾害的发生对整个经济系统的影响轨迹。

二、基于 DCGE 的灾害综合经济损失评估的流程分析

CGE 模型以一般均衡理论为基础,通过方程描述国民经济各个部门及国民经济核算账户之间的相互关联关系,在账户平衡和资源约束的条件下,各经济主体可通过价格响应实现行为的最优化。由于对致灾机理与恢复过程认识的不断加深,CGE 模型能够突出生产替代与价格弹性等经济因素在灾害冲击时的重要作用,已成为定量模拟灾害经济损失的主要方法。基于一般均衡理论,灾害发生前的区域经济通常假设是处于供给和需求平衡状态的,而灾害的发生会打破灾前区域经济的均衡状态,并引发波及效应,直至受灾区域经济经过一系列的调整才能重新回复均衡状态,灾区经济从灾前原有的均衡状态变化至灾后新的均衡状态所产生的产出损失即受灾区域的综合经济损失。

基于 DCGE 模型,评估暴雨洪涝灾害的综合经济损失涵盖以下步骤:①DCGE 模型构建。构建基准情景下的 DCGE 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。构建灾害情景下的 DCGE 模型,详细描述如何将暴雨洪涝灾害造成的农业、建筑业和劳动力损失情况作为直接冲

击引入经济系统。②数据来源分析。DCGE 模型的模拟需要社会核算矩阵(SAM)及相关参数,系统阐述数据来源。③综合经济损失计算。灾害的直接冲击会使灾区经济发生变化,进而通过生产函数和要素供应函数波及各产业部门,引发产业关联的涟漪,形成综合经济影响。为此,首先分析综合损失的变化趋势,随着经济系统中劳动投入的增加及资本要素的积累,灾害的损失也会随着时间的变化呈现动态变化的过程。④分析不同年份灾害造成的累积效应。当期灾害的发生不仅会对当期的社会经济系统带来影响,也会对后期社会经济的发展产生持续的影响。⑤对模拟结果进行敏感性分析。暴雨洪涝灾害经济损失的评估过程、算法流程如图 1 所示。

三、模型构建

1. 基准情景构建

基准情景是指中国的经济、社会等各方面在不受到任何外界冲击或政策干预时的发展状况。模型依据转型和发展中国家的经济特征进行设计。在劳动力市场中,假设工资具有刚性,劳动力市场调节不充分,即劳动力供应由模型内生决定,允许存在失业,劳动力市场有剩余。在资本市场中,资本要素相对紧缺,因此假设资本供应量和价格都由模型内生决定。为方便分析,将产业合并为 5 个性质相近的部门:农业、工业、建筑业、交通运输业和服务业。基于以上设计并借鉴 Rose 等[16]的模型框架,构建包含居民、企业、政府等经济主体的 DCGE 模型,涵盖生产、贸易、经济主体行为等模块。

(1)生产模块

生产函数使用的是 CD 生产函数形式。式(1)表示各部门的增加值由劳动力和资本生产要素的投入生产得到;式(2)描述的是各部门的中间需求,用 Leontief 投入产出矩阵进行描述;式(3)表示的是中间需求和增加值之和,代表各部门的总产出。

$$V_i = A_i KD_i\ \alpha_i LD_i\ 1 - \alpha_i \tag{1}$$

$$IT_{ij} = ca_{ij} \times IT_i \tag{2}$$

$$X_i = IT_i + V_i \tag{3}$$

式中:X_i 表示总产出;V_i 表示增加值;IT_i 表示中间投入;LD_i 和 KD_i 分别表示劳动和资本要素投入;ca_{ij} 表示直接消耗系数;A_i 表示生产函数的规模参数,即全要素生产率;α_i 表示投入要素的份额参数。

(2)贸易模块

市场上供应的商品包括国内生产国内销售的商品及进口商品,国内总产出也可分别国内生产国内销售的商品及出口商品。生产者在进行产品销售时对国内销售和出口进行优化组合,以实现收入最大

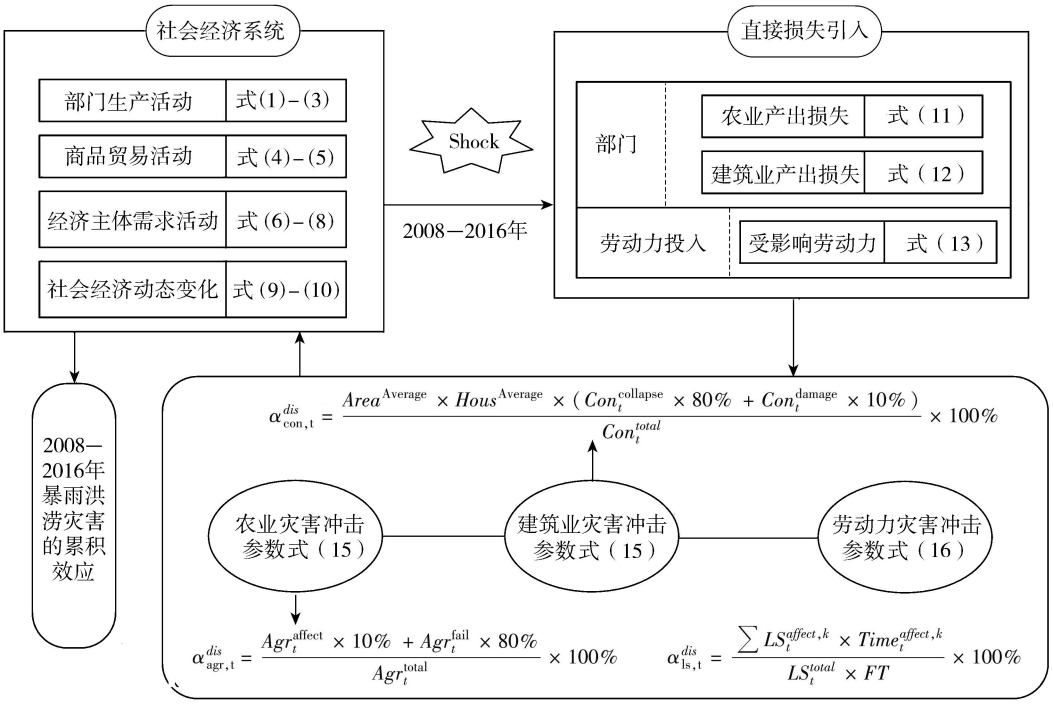


图 1　基于 DCGE 的灾害综合经济损失评估流程

化，消费者在进行商品购买时也会把国内商品和进口商品进行优化组合。因此，模型遵循 Armington 假设，进口方程用 CES 函数描述，出口方程采用恒变换弹性函数（CET）刻画。

$$Q_i = AQ_i[\delta Q_i \times DC_i \times \rho Q_i + (1 - \delta Q_i) M_i \times \rho Q_i]1/\rho Q_i \quad (4)$$

$$X_i = AT_i[\delta T_i \times DA_i \times \rho T_i + (1 - \delta T_i) E_i \times \rho T_i]1/\rho T_i \quad (5)$$

式中：Q_i 表示商品总供应量；DA_i、M_i 和 E_i 分别表示国内生产国内销售商品、进口商品和出口商品；AQ_i 和 AT_i 分别表示进口商品方程和出口商品方程的规模参数；δQ_i 和 δT_i 分别表示进口商品方程和出口商品方程的份额参数；ρQ_i 和 ρT_i 分别表示进口商品方程和出口商品方程的弹性参数系数。

（3）经济主体行为模块

模型的主要经济主体为居民、企业和政府。居民的收入来源于劳动、资本收益及政府和企业的转移支付；企业的收入来源于资本收益；政府的收入来源于间接税收入、居民所得税、企业所得税及进出口关税。

$$YH = WL \times LS + \beta^H \times WK \times KS + GTP + ETP \quad (6)$$

$$YE = \beta^E \times WK \times KS \quad (7)$$

$$YG = \sum (PQ_i \times t_i \times X_i + th_i \times YH + te_i \times YE) + (tm_i \times pwm_i \times M_i \times EXR) \quad (8)$$

式中：YH、YE、YG 分别表示居民收入、企业收入和政府收入；LS、KS 分别表示劳动供应量和资本供应量；GTP、ETP 分别表示政府和企业对居民的转移支付；β^H、β^E 分别表示资本收入分配给居民和企业的份额；WL、WK、PQ_i 分别表示劳动要素价格、资本要素价格和商品价格；pwm_i 和 EXR 分别表示进口商品的国际价格和汇率；th_i、t_i、te_i 和 tm_i 分别表示个人所得税率、间接税率、企业所得税率和进口税率。

（4）动态模块

为深入分析不同年份灾害损失的变化趋势，模型采用递归动态机制，即通过劳动力、资本积累的动态变化来实现模型的动态化。

$$LS_{t+1} = LS_t \times (1 + g_t^l) \quad (9)$$

$$KS_{t+1} = KS_t \times (1 - \delta_t) + I_t \quad (10)$$

式（9）表示劳动力的动态变化过程。其中，LS_t、LS_{t+1} 分别为 t 期、t+1 期的劳动力供给水平；g_t^l 为劳动力增长率。式（10）表示资本积累过程，t+1 期的资本存量等于 t 期的资本存量减去折旧之后再加上 t 期的新增投资额，KS_{t+1}、KS_t 分别为各部门 t+1 期、t 期的资本存量；I_t 为 t 期的新增投资额；δ_t 为折旧率。

2. 灾害情景构建

灾害的发生对经济系统是一个外生冲击，会直接造成各产业部门遭受实质性损害，灾害对经济系统的直接影响主要表现为引起农业欠收、工业减产、服务业产值减少、居民住宅及财产受损等[17]。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，破坏原有的经济均衡状态，继而寻求新的均衡的状态。与原有均衡相比，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。综合经济损失评估往往是将直接经济损失值作为输入变量，采用 CGE 模型或 IO 模型研究灾害对产出、消费等经济指标的影响[18]。因此，为模拟暴雨洪涝灾害对经济系统的外生冲击，引入灾害冲击参数。农业和建筑业（受损房屋）的外生冲击在生产函数中描述，暴雨洪涝灾害导致的人口受灾情况可在模型中表示为劳动力投入水平的降低。模型方程表示为：

$$X_{agr,t}^{dis} = (1 - \alpha_{agr,t}^{dis}) \times (IT_{agr} + V_{agr}) \quad (11)$$

$$X_{con,t}^{dis} = (1 - \alpha_{con,t}^{dis}) \times (IT_{con} + V_{con}) \quad (12)$$

$$LS_t^{dis} = (1 - \alpha_{ls,t}^{dis}) \times LS \quad (13)$$

式中：$X_{agr,t}^{dis}$、$X_{con,t}^{dis}$ 和 LS_t^{dis} 分别为 t 时期灾害情境下产业部门和劳动力的受损情况，$\alpha_{agr,t}^{dis}$、$\alpha_{con,t}^{dis}$ 和 $\alpha_{ls,t}^{dis}$ 分别为 t 时期灾害冲击参数。当灾害未发生时，$\alpha_{agr,t}^{dis} = \alpha_{con,t}^{dis} = \alpha_{ls,t}^{dis} = 0$；当灾害发生时，灾害冲击参数值在 0～1，计算方法为受灾体的受灾情况除以损毁前的实际价值。

四、数据处理

模型的数据基础主要包括两部分内容：社会核算矩阵（SAM）的构建及参数的设定。SAM 表是 CGE 模型的数据基础。编制 SAM 表所需的数据资料包括投入产出表（采用最新发布的 2015 年 IO 表）、国家统计年鉴、年度政府财政决算数据、税收统计数据、资金流量表等。在对以上数据收集、归纳、分析后，采用矩阵的数学方式，用现代一般均衡理论，建立一个联立的非线性方程组，最终对经济系统中的各种平衡关系做出清晰地描述和分析。构建

的宏观 SAM 表,在账户设置中主要设置了活动、商品、劳动、资本、居民、企业、政府、固定资产、存货和世界其他地区(表 1)。

在 CGE 模型研究中,除了使用 SAM 表作为基础数据外,还需要外生设定若干参数。外生设定的参数主要包含 3 类:第一类是弹性参数类,其主要位于 CGE 模型的贸易模块中,主要参照 Zhai 等[19]的研究进行设定。第二类是模型动态模块的参数,包括劳动力增长率和资本折旧率。研究目的是对比 2008—2016 年暴雨洪涝灾害损失的动态变化趋势,因此动态模块参数的设置只是对变化趋势做出基本假设,为观察损失对比情况,对动态模块的参数设定如下:劳动力数量与人口数量保持同比例增长、下降,变化较稳定,因此将劳动力增长率的取值定为 2008—2016 年劳动力增长率的年均增速,为 0.770 2%;资本折旧率的取值参照了现有中国长期资本折旧率的研究结果[20],取值为 10%。第三类参数为灾害情景之下的灾害冲击参数。灾害冲击参数的计算方法为灾害情景之下的直接损失与受灾体损毁前的实际价值的比率。根据《中国统计年鉴》《中国气象灾害年鉴》和《中国农业年鉴》整理得到 2008—2016 年中国暴雨洪涝灾害受灾情况,所得到的直接灾害损失数据包括农作物受灾情况、人口受灾情况以及房屋受损情况(模型设定的具体数值见表 2)。

1. 农作物的受灾比例

农作物受灾面积是指因灾减产 10% 以上的农作物播种面积;农作物绝收面积是指农作物受灾面积中因灾减产 80% 以上的农作物播种面积,因此将 10% 和 80% 作为受灾和绝收比例计算农业的灾害冲击参数。计算式为:

$$\alpha_{agr,t}^{dis}=\frac{Agr_t^{affect}\times 10\%+Agr_t^{fail}\times 80\%}{Agr_t^{total}}\times 100\% \tag{14}$$

式中:$\alpha_{agr,t}^{dis}$ 表示 t 时期农业部门的灾害冲击参数,Agr_t^{affect} 表示农作物受灾情况,Agr_t^{fail} 表示农作物绝收情况,Agr_t^{total} 表示全年农业总耕种面积。

2. 建筑物的受灾比例

对于灾害导致的房屋损坏,将其灾害影响归并为灾害对建筑业的影响。根据政府部门公布的数据,2016 年中国居民人均住房建筑面积为 40.8 m^2,2008—2016 年平均每个家庭户人口通过查询《中国统计年鉴》可得,以人均面积住房乘以全国平均每个

表 1　2015 年中国宏观社会矩阵　　单位:亿元

变量	活动	商品	劳动	资本	居民	企业	政府	资本账户	存货变动	ROW
活动	—	1 932 998.17	—	—	—	—	—	—	—	148 448.34
商品	1 401 192.4	—	—	—	265 980.48	—	97 053.42	291 939	4 546.82	—
劳动	354 109.99	—	—	—	—	—	—	—	—	—
资本	243 869.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—
居民	—	—	354 109.99	24 908.8	—	21 581.68	22 567.28	—	—	—
企业	—	—	—	223 534.46	—	—	—	—	—	—
政府	82 274.78	2 560.84	—	—	8 617.27	27 133.87	—	—	—	—
资本账户	—	—	—	—	148 570	174 818.91	966.06	—	—	-27 869.15
存货变动	—	—	—	—	—	—	—	4 546.82	—	—
ROW	—	125 153.1	—	-4 573.91	—	—	—	—	—	—

表 2　模型主要参数设定

灾害冲击参数	农作物受灾情况/万 hm^2			受损房屋/万间			人口受灾情况		
	受灾	绝收	α_{agr}^{dis}/%	倒塌	损坏	α_{con}^{dis}/%	受灾/万人	死亡/人	α_{ls}^{dis}/%
2008	668.2	77.2	0.99	37.0	94.9	1.94	10 372.4	915	1.55
2009	764.4	78.1	1.08	56.5	158.8	2.60	9 245.7	704	1.23
2010	1 752.6	165.9	2.39	222.1	496.4	9.45	19 935.4	3 104	4.64
2011	691.9	79.6	1.03	69.6	194.4	2.81	12 137.8	591	1.17
2012	772.9	88.9	1.15	61.0	209.4	2.56	11 392.4	887	1.51
2013	8 756.8	1 539.4	14.45	49.8	267.9	2.32	10 588.5	1 411	2.14
2014	473.9	62.8	0.68	26.9	123.1	0.12	7 200.1	631	1.04
2015	562	65.9	0.76	14.5	100	0.78	6 777.5	540	0.90
2016	853.1	129.7	1.31	44.1	215.5	2.31	9 954.9	942	1.50

家庭户的人口可估算得出受损房屋面积。其中,损坏房屋包括严重损坏和一般损坏房屋两类,参照农业灾害参数的计算方式,以 10% 和 80% 作为损坏和倒塌比例计算建筑业的灾害冲击参数。计算公式为:

$$\alpha_{con,t}^{dis} = \left[Area^{Average} House^{Average} \left(Con_t^{collapse} \times 80\% + Con_t^{damage} \times 10\% \right) \right] \Big/ Con_t^{total} \times 100\% \quad (15)$$

式中:$\alpha_{con,t}^{dis}$ 表示 t 时期建筑业的灾害冲击参数,$Area^{Average}$ 表示平均人住面积,$House^{Average}$ 表示平均户人数,$Con_t^{collapse}$ 表示房屋倒塌数,Con_t^{damage} 表示房屋受损数,Con_t^{total} 表示全年房屋建筑面积。

3. 人口的受灾比例

对于人口受灾而形成的劳动力投入水平降低的情形,因受灾人口的影响程度无法确定,参照了 Zhang 等[21]的研究,基于 Steenge 等[22]提出的灾害前后劳动力变化的基本方程、基本动态不等式模型及全时工作当量方法,将劳动力因灾受影响或因灾延误从而无法参加工作的时间累积作为人口受灾的依据。具体式如下:

$$\alpha_{ls,t}^{dis} = \frac{\sum LS_t^{affect,k} \times Time_t^{affect,k}}{LS_t^{total} \times FT} \times 100\% \quad (16)$$

式中:$\alpha_{ls,t}$ 表示 t 时期劳动力的灾害冲击参数,$LS_t^{affect,k}$ 表示因灾受影响的人口,LS_t^{total} 表示总劳动力人数,$Time_t^{affect,k}$ 表示因灾无法参与工作的时间,FT 表示一天总的工作时间。参考 Koks 等[23]对 FT 的设定,设置劳动力每天的工作时间为 8 个小时,并将每年休假或请假的时间抵消加班时间,因此,一年的 FT 为 52×5(天)×8(小时)。k 表示劳动力的不同的受灾类型,包括受灾及死亡。结合暴雨洪涝灾害的特征,将受灾人口的延误时间设置为 7 天,包括道路堵塞或中断、紧急转移安置、强制撤离或受伤,死亡造成的延误时间设置为 1 年。

五、结果分析

1. 模拟结果分析

当灾害发生时,经济系统的不平衡状态就会出现,经济主体的生产和消费活动以及经济要素流动都会发生变化,灾害的扰动效应一方面沿着供应链向下游传播蔓延到各产业,另一方面也引起了上游经济主体的需求异常。那么,生产活动在灾后就会受到灾害的直接影响、供应短缺的限制以及经济主体的需求变化影响。基于动态 CGE 模型和中国 2015 年 SAM 表,模拟灾害对经济系统的冲击情境,计算出 2008—2016 年不同年份的经济系统在暴雨洪涝灾害外生冲击下的动态响应情况,即系统均衡下的式(3)中区域总产出的变化。

从暴雨洪涝灾害的累积效应来看,每年暴雨洪涝灾害的发生不仅会影响当年的社会经济发展,也会对后期经济发展产生重大影响。从模拟结果来看,2010 年和 2013 年的总产出损失率在 t 期分别为 0.840% 和 1.948%,在 $t+1$ 期为 0.854% 和 1.982%,灾害损失分别增加了 276.827 亿元和 448.579 亿元。2010 年和 2013 年的相关产业部门在 t+1 期的损失值也要高于 t 期的损失值。如 2010 年 t 期农业、工业、建筑业、交通业和服务业的损失值分别为 1 265.406 亿元、6 766.142 亿元、7 640.037 亿元、515.363 亿元和 1 303.888 亿元;t+1 期农业、工业、建筑业、交通业和服务业的损失值分别为 1 302.572 亿元、6 510.709 亿元、8 065.713 亿元、519.896 亿元和 1 368.774 亿元,其中 t+1 期农业、建筑业、交通业和服务业的灾害损失程度相较于 t 期均在增加。2008、2009、2011、2012、2014、2015 和 2016 年的灾害经济损失则是随着时间的推移逐渐减小。这表明经济系统有一定的灵活性,可以通过调整经济主体需求分配、价格机制及生产水平形成系统内部的适应机制,能够减低经济系统的脆弱性,缓解供应中断的影响,但在面临一些较大的灾害时,经济系统内部的缓解机制会到达极限[24]。暴雨洪涝灾害给各部门产出带来的损失值见表 3。

从暴雨洪涝灾害对社会总产出的影响来看,2008—2016 年每年暴雨洪涝灾害的发生都在不同程度上影响着社会生产。从短期来看,暴雨洪涝灾害作为一种突发性事件,会导致基础设施破坏、人员伤亡,造成直接经济损失,随后通过产业关联从而触发经济系统,引发灾害的高阶效应,最终影响区域经济总产出,对社会经济造成较大的负向影响。2008—2016 年灾害发生当年灾损率分别为 0.285%、0.343%、0.84%、0.353%、0.366%、1.948%、0.169%、0.181% 和 0.311%,损失值高达 5 933.816 11 亿元、7 133.401 596 亿元、17 490.835 89 亿元、7 341.371 344 亿元、7 614.252 791 亿元、40 536.761 29 亿元、3 525.651 907 亿元、3 766.399 556 亿元和 6 482.567 879 亿元。因而,2008—2016 年暴雨洪涝灾害当年造成中国总产出的损失值区间为[3 525.652, 40 536.761]亿元。由

表 3　2008—2016 年暴雨洪涝灾害对部门经济的影响　　单位:亿元

灾害年份	影响时期	各部门的产出变化情况				
		农业	工业	建筑业	交通业	服务业
2008	t	-502.094	-2579.733	-1811.076	-179.115	-861.797
	t+1	-488.532	-2200.578	-1793.016	-160.954	-737.627
	t+2	-442.749	-1625.972	-1661.871	-129.688	-548.263
	t+3	-381.778	-966.987	-1476.756	-92.123	-330.601
	t+4	-319.648	-456.669	-1296.131	-68.684	-132.561
2009	t	-564.187	-3054.947	-2327.950	-218.195	-968.123
	t+1	-545.008	-2720.194	-2295.867	-200.827	-857.883
	t+2	-470.284	-1829.677	-2087.570	-150.813	-566.992
	t+3	-362.784	-1144.185	-1664.309	-104.372	-347.739
	t+4	-272.841	-712.632	-1369.883	-78.429	-207.950
2010	t	-1265.406	-6766.142	-7640.037	-515.363	-1303.888
	t+1	-1302.572	-6510.709	-8065.713	-519.896	-1368.774
	t+2	-1168.067	-5372.612	-7806.514	-510.005	-761.631
	t+3	-1100.333	-4900.590	-8217.030	-491.889	-519.442
	t+4	-841.097	-3252.516	-7163.786	-386.367	-318.248
2011	t	-551.340	-3111.520	-2467.263	-226.336	-984.911
	t+1	-525.165	-2936.752	-2402.517	-200.611	-827.746
	t+2	-439.101	-2206.351	-2112.160	-155.878	-591.972
	t+3	-329.848	-1647.093	-1668.818	-103.527	-339.494
	t+4	-282.513	-1017.081	-1522.079	-84.859	-196.794
2012	t	-600.586	-3247.296	-2370.350	-232.035	-1163.986
	t+1	-568.832	-2931.972	-2309.236	-218.327	-1039.990
	t+2	-523.672	-2216.658	-2199.199	-175.484	-773.935
	t+3	-461.762	-1571.181	-2021.212	-137.698	-533.495
	t+4	-437.434	-1012.996	-2017.652	-109.158	-319.978
2013	t	-6425.523	-22595.293	-6614.366	-984.318	-3917.261
	t+1	-6732.831	-23062.505	-6917.675	-963.404	-3573.397
	t+2	-6613.090	-21784.679	-6512.055	-882.048	-3102.177
	t+3	-6404.105	-19243.959	-6208.055	-892.771	-2376.720
	t+4	-5922.656	-15804.623	-5609.828	-795.643	-1935.396
2014	t	-345.792	-1946.114	-524.950	-115.611	-593.185
	t+1	-269.812	-1289.867	-394.524	-75.717	-352.553
	t+2	-234.847	-701.506	-302.040	-40.708	-205.261
	t+3	-198.519	-269.719	-247.874	-8.142	-67.153
	t+4	-173.889	135.495	-141.258	25.354	186.228
2015	t	-366.133	-1719.822	-908.567	-111.540	-660.338
	t+1	-323.150	-1325.486	-817.040	-78.973	-448.992
	t+2	-266.433	-1016.989	-704.569	-49.664	-383.816
	t+3	-212.221	-645.273	-506.345	-22.796	-185.202
	t+4	-159.031	-271.551	-354.313	15.507	75.819
2016	t	-631.633	-2964.430	-2079.608	-191.327	-615.570
	t+1	-614.774	-2773.414	-2145.498	-184.436	-569.584
	t+2	-588.179	-2338.595	-2058.806	-158.335	-476.992
	t+3	-484.913	-1725.473	-1685.257	-112.897	-327.374
	t+4	-382.782	-1060.668	-1333.898	-78.550	-188.631

此可以看出,暴雨洪涝灾害的综合损失是巨大的,造成社会总产出锐减。从长期来看,伴随着要素投入、技术进步及系统内部各经济主体的行为调整的影响,灾区的经济系统将加快复苏,总产出偏离基准线的幅度逐渐变小,灾害带来的综合经济损失最终将会减少。如 2008 年发生灾害后,4 年的灾损率如下:2009 年为 -0.127%,2010 年为 -0.575%,2011 年为 -0.149%,2012 年为 -0.187%,2013 年为 -1.445%,2015 年为 -0.033%,2016 年为 -0.146%,2014 年的社会经济总产值甚至增加了 0.002%。

从灾害造成的各部门产出损失来看,2008—2016 年每年暴雨洪涝灾害对 5 个部门的产出均造成了严重影响。分析总体变化趋势可知,各部门产出的变动和社会总产出的变动基本一致,表现为偏离基准线程度逐年减小。从各部门的变化趋势来看,可以发现恢复最快的部门为工业、交通业和服务业。例如,2008 年农业、工业、建筑业、交通业和服务业的损失值分别为 502.094 亿元、2 579.733 亿元、1 811.076 亿元、179.115 亿元和 861.797 亿元,灾害发生 4 年后的损失值变为 319.648 亿元、456.669 亿元、1 296.131 亿元、68.684 亿元和 132.561 亿元,工业、服务业和交通业受损情况的改善程度最大,其他年份的情况也均是如此。这在一定程度上与本文灾害情景的设定有关,也印证了 Otto 等[25] 的观点,即未受直接影响的产业部门降低了供应链中断的风险,系统通过产品需求的适应和分配可以将经济主体的产品需求从受影响的产业部门转移到不受影响的产业部门,继而有能力继续扩大生产,提高了经济的弹性,以有效减轻间接损失。

2. 敏感性分析

由于 CGE 模型需要设置较多参数,这些参数中的一部分往往根据经验判断进行假设,可能会影响 CGE 模型结果的可靠性,因此需要对模型的这些参数进行敏感性分析。参照 Mahmood 等[26] 的方法对模型的弹性参数进行了敏感性分析,即将相关的弹性参数分别设置高弹性(增加 20%)和低弹性(降低 20%),并基于新的弹性数值进行模拟,从而获得相关经济指标的变化率。敏感性检验结果显示,弹性参数上下浮动 20% 对 2008—2016 年灾害发生当期损失的影响不大,即研究结果并未体现较大的差异性,变量方向与原先一致,数值大小也未发生较大改变。因此,模型的模拟结果可信度较高。2008—2016 年总产出的损失值变化率见表 4。

3. 不确定性讨论

尽管通过DCGE模型定量评估了中国2008—

表 4　模型弹性参数的敏感性检验　单位:%

社会总产出损失率	原弹性	高弹性（增加 20%）	低弹性（减少 20%）
2008	-0.285 1	-0.284 5	-0.285 6
2009	-0.342 7	-0.342 1	-0.343 4
2010	-0.840 3	-0.839 8	-0.843 6
2011	-0.352 7	-0.352 1	-0.353 4
2012	-0.365 8	-0.365 1	-0.366 7
2013	-1.947 5	-1.925 1	-1.969 1
2014	-0.169 4	-0.169 2	-0.169 7
2015	-0.181 0	-0.180 7	-0.181 3
2016	-0.311 4	-0.310 8	-0.311 5

2016 年暴雨洪涝灾害的经济损失,但还存在一些不确定性。①数据收集不够完整所带来的不确定性。在案例分析中,尽管采用的灾害数据为中国政府官方公布的数据,但还是相对笼统、不够细化。在模拟灾害冲击时,部门的受灾数据只覆盖到农业、建筑业和受灾劳动力,若在数据量充足的情况下,当多个部门的直接受灾数据都纳入模型中进行综合评估时,模拟结果是否会有所变化? 这需要进一步探究。②CGE 模型本身的结构特点所带来的不确定性。CGE 模型反映了经济因素和生产活动的相互依赖关系,克服了 IO 模型缺乏行为响应、市场价格以及线性化等缺点,且 CGE 模型可以明确考虑到灾后的生产弹性、价格弹性等问题,反映经济的恢复能力。但 CGE 模型本身也存在一些不可避免的缺陷,例如模型构建中经济主体行为最优化的假设以及模型方程中的弹性设置往往会导致的价格和数量的极端变化,可能低估了灾害对经济的综合影响[5]。

六、结　语

CGE 模型作为经济损失评估的定量分析模型,在模拟灾害的产业部门扩散效应、指导政府灾后恢复重建和资金分配等方面起到了非常重要的作用,也是目前使用最为广泛的方法之一。采用 DCGE 模型,以中国 2008—2016 年发生的暴雨洪涝灾害为例,通过灾害直接经济损失数据对模型进行冲击,构建灾害情境下的 DCGE 模型,并得到了整个产业系统相关指标的灾后变化趋势。所得到的建议如下:

需要科学、全面地定量评估灾害的综合经济损失。经济系统是一个整体,当某产业遭受灾害破坏后停减产,往往会波及上下游产业,进而传导到整个产业经济系统,全面反映灾害带来的影响,更利于全社会动员,共同开展防灾减灾工作。此外,针对受损较为严重的行业也可以适当进行政策倾斜,加大救援力度,使其尽快恢复灾前水平。我国 2008—2016 年每年发生的暴雨洪涝灾害都带来了巨大的经济损失,在不同程度上影响着产业部门的生产能力,抑制着社会经济的增长。

灾害带来的累积效应不容忽视。灾害的发生是对当期经济系统的短时冲击,但所带来的影响确是深远的,不仅会对灾害发生当期的社会经济产生影响,并且还会在更长时间范围内影响着社会生产,若某一时期的灾情较重,那么后期社会经济所受影响甚至会高于当期灾害会经济系统的冲击。因此,在评估灾害造成的经济影响时,不能只评估当期灾害的影响,还要考虑前期灾害对经济系统的冲击影响。

为减少灾害带来的损失,需要加强抵御灾害风险的能力。以暴雨洪涝灾害为例,政府部门一方面应完善防汛基础工程和设施,提高排水除涝标准和排水系统建设标准,另一方面也要进一步加强灾害应急管理体系和灾害监测预警服务体系建设。产业部门在接收到灾害预警的消息时,需要尽早做好预防工作,及时疏散劳动者,保护好生产原料和设备,最大程度地减少人员伤亡和物质损失;居民在接收到灾害预警的消息时也应提前做好灾前的准备工作,如储备生活材料,检查住宅的防水排水设施是否完善。

参考文献:

[1] WILLNER S N, OTTO C, LEVERMANN A. Global economic response to river floods[J]. Nature Climate Change,2018(8):594-598.

[2] CARRERA L, STANDARDI G, BOSELLO F, et al. Assessing direct and indirect economic impacts of a flood event through the integration of spatial and computable general equilibrium modelling [J]. Environmental Modelling & Software,2015(63):109-122.

[3] NATHO S, THIEKEN A H. Implementation and adaptation of a macro-scale method to assess and monitor direct economic losses caused by natural hazards[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018(28):191-205.

[4] BAGHERSAD M , ZOBEL C W . Economic impact of production bottlenecks caused by disasters impacting interdependent industry sectors[J]. International Journal of Production Economics, 2015(168):71-80.

[5] ROSE A, LIM D. Business interruption losses from natural hazards: conceptual and methodological issues in the case of the Northridge earthquake [J]. Global Environmental Change. Part B: Environmental Hazards, 2002,4(1):1-14.
[6] PAUW K, THURLOW J, BACHU M, et al. The economic costs of extreme weather events: a hydrometeorological CGE analysis for Malawi [J]. Environment and Development Economics,2011,16(2):177-198.
[7] JOSHI S R, VIELLE M, BABONNEAU F, et al. Physical and economic consequences of sea-level rise: a coupled GIS and CGE analysis under uncertainties[J]. Environmental & Resource Economics,2015,65(4):1-27.
[8] BORGOMEO E, VADHEIM B, WOLDEYES F B,et al. The distributional and multi-sectoral impacts of rainfall shocks: evidence from computable general equilibrium modelling for the Awash Basin, Ethiopia[J]. Ecological Economics,2018(146):621-632.
[9] VEEN A V D, LOGTMEIJER C. Economic hotspots: visualizing vulnerability to flooding[J]. Natural Hazards, 2005,36(1-2):65-80.
[10] JONKMAN S N, BOČKARJOVA M, KOK M, et al. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands[J]. Ecological Economics, 2008,66(1):77-90.
[11] LI J, CRAWFORD B D, SYDDALL M,et al. Modeling imbalanced economic recovery following a natural disaster using input-output analysis[J]. Risk Analysis,2013,33(10): 1908-1923.
[12] DUTTA D, HERATH S, MUSIAKE K. A mathematical model for flood loss estimation[J]. Journal of Hydrology, 2003,277(1-2):24-49.
[13] MERZ Z, KREIBICH H, LALL U. Multi-variate flood damage assessment: a tree-based data-mining approach [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2013,13(1):53-64.
[14] OKUYAMA Y, SANTOS J R. Disaster impact and input-output analysis[J]. Economic Systems Research,2014,26(1):1-12.
[15] OKUYAMA Y. Long-run effect of disaster: case study on the Kobe earthquake [J]. The Singapore Economic Review,2016,16(1):164-169.
[16] 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.
[17] PORFIRIEV B. Evaluation of human losses from disasters: the case of the 2010 heat waves and forest fires in Russia [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2014(7):91-99.
[18] COCHRANE H. Economic loss: myth and measurement [J]. Disaster Prevention & Management, 2004, 13(4): 290-296.
[19] ZHAI F, HERTEL T W. Impacts of the Doha Development Agenda on China: the role of labor markets and complementary education reforms[M]//HERTEL T W, WINTERS L A. Poverty and the WTO: impacts of the Doha Development Agenda. Washington DC: The World Bank and Palgrave Macmillan, 2005: 285-318.
[20] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. 经济研究, 2004(10):35-44.
[21] ZHANG Z T, LI N, CUI P, et al. How to integrate labor disruption into an economic impact evaluation model for post disaster recovery periods[J]. Risk Analysis, 2019, 39(4):2443-2456.
[22] STEENGE A E, BOČKARJOVA M. Thinking about imbalances in post-catastrophe economies: an input-output based proposition[J]. Economic Systems Research,2007, 19(2):205-223.
[23] KOKS E E, BOČKARJOVA M, DE MOEL H, et al. Integrated direct and indirect flood risk modeling: development and sensitivity analysis[J]. Risk Analysis, 2014,35(5): 882-900.
[24] 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.
[25] OTTO C, WILLNER S N, WENZ L, et al. Modeling loss-propagation in the global supply network: the dynamic agent-based model acclimate [J]. Journal of Economic Dynamics & Control,2017(83): 232-269.
[26] MAHMOOD A, MARPAUNG C O P. Carbon pricing and energy efficiency improvement—why to miss the interaction for developing economies? An illustrative CGE based application to the Pakistan case[J]. Energy Policy, 2014(67):87-103.

(责任编辑:高 虹)