

张正涛, 李宁, 冯介玲, 等. 从重建资金与效率角度定量评估灾后经济恢复力的变化——以武汉市“2016. 07. 06”暴雨洪涝灾害为例[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 211–216. [ZHANG Zhengtao, LI Ning, FENG Jieling, et al. Quantitative assessment of Changes in post-disaster Resilience from the perspective of rescue funds and rescue efficiency—a case study of a flood disaster in Wuhan city on July 6, 2017[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 211–216. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.04.036.]

从重建资金与效率角度定量评估灾后经济恢复力的变化 ——以武汉市“2016. 07. 06”暴雨洪涝灾害为例*

张正涛^{1,2,3}, 李 宁^{1,2,3}, 冯介玲^{1,2,3}, 陈 曦^{1,2,3}, 刘 丽^{1,2,3}, 白 扣^{1,2,3}

(1. 北京师范大学 地理科学学部 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

3. 北京师范大学 地理科学学部 减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘 要: 自然灾害经济恢复力研究已成为优化灾害综合风险管理与提高防灾减灾能力的重要途径, 经济恢复力如何衡量以及灾后重建资金对经济恢复力的影响如何值得研究, 而基于经济学机理的间接经济损失评估模型, 为构建灾后重建资金、效率与灾后经济恢复力变化间的定量关系的模拟提供了新的方法。因此, 以武汉市 2016 年 7 月 6 日期间大暴雨洪涝灾害为例, 利用自然灾害间接经济损失动态评估模型, 模拟重建资金与效率变化下暴雨洪涝灾害对武汉市造成的间接经济损失以及经济恢复到灾前所需的时间, 进而定量评估其对承灾体经济恢复力与灾后恢复期的影响。结果显示: ① 灾后重建资金每提高 100 亿, 武汉市灾后经济恢复力提高近三分之一, 灾后恢复期缩短 12%; ② 重建效率每提高约 1/3, 武汉市灾后经济恢复力提高略高于五分之一, 灾后恢复期缩短 11%; ③ 两者同时提高则使其经济恢复力平均提高达四分之三, 灾后恢复期缩短五分之一。研究结果能从灾后重建的资金与效率两方面出发, 强调对承灾体经济恢复力的影响, 并为政府灾后重建分配方案的制定提供定量化的依据。

关键词: 自然灾害; 灾后重建; 恢复力; 经济损失; 风险管理; 暴雨洪涝; 武汉

中图分类号: P429; F223; TV87; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)04-0211-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.04.036

由气候变化引发的自然灾害频发, 不仅对灾区经济系统、人们生命财产形成巨大威胁^[1], 也对我国社会经济发展、政策实施构成影响, “一带一路”政策中节点城市及经济带暴雨洪涝、台风等灾害的频发一定程度上阻碍政策的发展与实施^[2]。如何提高抵抗灾害造成的损害并快速从灾害破坏中恢复, 已成为政府与学者关注的热点与重点。

自然灾害恢复力的提出与实践^[3-6]为解决相应的防灾减灾与风险管理对策提供了出路。2005 年第二届世界减灾大会通过了“2005-2015 兵库行动框架”, 明确提出构建国家和社区灾害恢复力需求^[7], 2015 年第三届世界减灾大会上通过“2015-2030 年仙台减灾框架”, 加入城市尺度, 将“提高灾后恢复”灾列为四项优先行动事项之一, 进一步提升恢复力研究在减轻灾害风险评估中的地位^[8-9]。恢复力评估旨在测度社会经济系统在遭受自然灾害冲击后, 通过政府社会重建与自我调节下不断适应灾害影响并尽快恢复到灾前水平的能

力^[3,10]。其评估方法目前也已得到学者的广泛研究。有从定性角度出发, 通过实地调研^[11]、入户访谈^[12]建立样本构建社区防灾减灾能力或利用“经验分析”给出恢复力建设的措施^[13]。也有从定量角度出发, 基于洪灾损失率模型建立损失率曲线^[14-15], 更多的是构建指标评估体系, 利用加权综合方法给出指标层与恢复力之间的数学关系^[16-18]。

然而, 多数研究关注道路、房屋、基础设施的破坏与恢复力之间的相互关系, 鲜有进一步发掘灾害造成的破坏均可统一用经济损失值来衡量, 恢复力可用经济损失进行定量化表征的问题。直接经济损失是反映承灾体在灾害发生那一时刻抵抗灾害的能力, 而灾害发生后经济系统由于灾害直接损失造成的企业减产停产(房屋设备等损坏)产生的间接经济损失^[19-20], 反映的正是承灾体从灾害造成的损害中恢复的能力, 因为间接经济损失值表征的是承灾体从遭受灾害起到完全从灾害

* 收稿日期: 2018-02-06 修回日期: 2018-05-02

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2016YFA0602403); 国家自然科学基金项目(41775103); 北京市自然科学基金项目(9172010); 中央高校基本科研业务专项(310421101)

第一作者简介: 张正涛(1990-), 男, 山东济南人, 博士研究生, 主要从事自然灾害损失及风险评估研究。

E-mail: zhangzhengtao@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 李宁(1958-), 女, 江苏镇江人, 教授, 博士, 主要从事自然灾害及风险管理研究。E-mail: ningli@bnu.edu.cn

中恢复这一过程中的损失,该损失属于流量,与“恢复力则是灾害发生后,区域恢复、重建及安全建设与区域发展相互作用的动态量,它主要取决于区域综合灾害风险行政管理能力、政府与企业投入和社会援助水平。”的本质^[21]相同,灾后间接经济损失的重要性也已得到政府与学者的广泛认可^[19-27]。灾害造成的间接经济损失与恢复时间可利用基于经济学机理的评估模型计算,如投入产出模型^[22-25],可计算一般均衡模型^[26-27]等进行评估。

而灾害造成的间接经济损失、恢复时间与灾后重建力度关系密切。灾后重建资金的大小以及重建速度是影响间接经济损失大小非常重要的因素,重建资金与重建速度的差异会直接导致灾后承灾体遭受的间接经济损失程度不同(图1)。根据我国国情与重建体系,重大自然灾害后会有来自政府与社会的重建资金,而重建资金及重建速度本质属于灾后适应行为,它们对间接经济损失动态变化路径的改变(图1)与 Bruneau^[6]提出的恢复力模型中灾后适应行为对承灾体恢复力路径的改变仍高度一致(图2)。

重建资金的变化与恢复力之间、重建资金在恢复中单位时间的增长即恢复效率与恢复力之间有怎样的定量关系值的进一步研究(图3)。

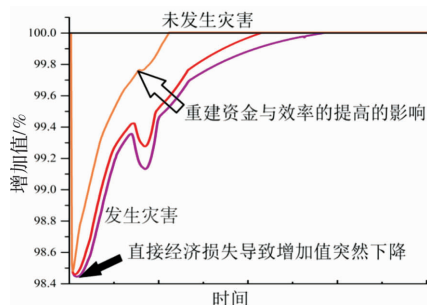


图1 重建资金与效率的提高对武汉市灾后间接经济损失的影响
(各曲线与Y轴, $Y=100\%$ 围成的面积为间接经济损失值)

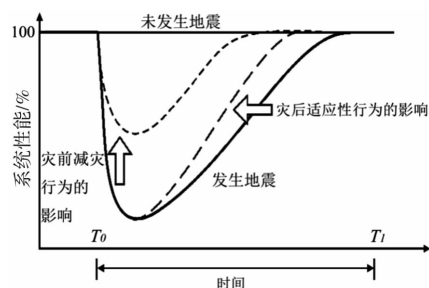


图2 灾后适应行为对承灾体灾后恢复力的影响
(改编自文献^[10])

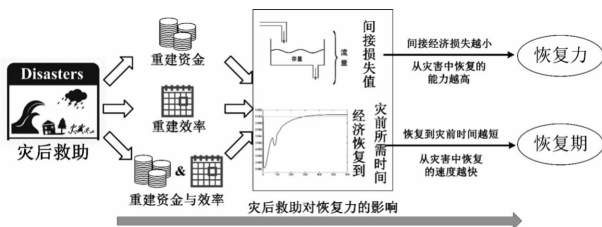


图3 重建资金与重建力度变化对恢复力与恢复期的影响示意图

本文的核心思路是以间接经济损失为纽带,分析与对比重建资金及其效率对承灾体灾后经济恢复力的提高程度,而非对比不同经济发展水平之间承灾体灾后恢复力差异。本文以武汉市“2017.07.06”期间大暴雨洪涝灾害(以下简称“武汉7·6暴雨洪涝”)为例,利用适应性区域投入产出存货(ARIO-Inventory)模型,设定重建资金的变化、重建效率的变化、重建资金与效率同时变化三种情景,模拟不同重建资金与效率变化下的间接经济损失与灾后恢复期,给出重建资金、效率的变化与经济恢复力变化之间的定量关系(图3)。从重建资金与效率角度出发,强调灾后重建对承灾体恢复进程、减小灾害损失的重要性,并为政府灾后重建分配方案的制定提供定量化的依据。

1 数据来源与处理

1.1 研究区及案例选择

武汉市($29^{\circ}58'N \sim 31^{\circ}22'N$, $113^{\circ}41'E \sim 115^{\circ}05'E$)地处江汉平原,位于长江干流与汉江汇流区域,2016年长江流域中下游多数地区均遭受较强暴雨洪涝灾害袭击。其中,“武汉7·6暴雨洪涝”作为损失最为严重的单次灾害,民政部国家减灾中心与国家统计局为此启动《特别重大自然灾害损失统计制度》^[28]对此次灾害造成的直接经济损失与受灾人口等灾情信息进行详细统计。此外,为减轻暴雨洪涝灾害造成的内涝等问题,2013年武汉市政府启动《武汉市中心城区排水设施建设三年攻坚行动计划》^[29],投资140亿元重点治理武汉市排水系统。

1.2 直接经济损失

“武汉7·6暴雨洪涝”灾情资料来源于民政部国家减灾中心《特别重大自然灾害损失统计制度》^[28]统计数据,灾害共造成直接经济损失87.4亿元,约113万人受灾。为保持与投入产出表中的部门口径数一致,根据国家经济分类标准,将各部门直接经济损失数据调整至19部门。

1.3 固定资产存量

模型假设灾害对资本的破坏体现在固定资产存量的损失,因此灾后资本生产能力下降等于直接经济损失对固定资产存量的百分比,即:

$$Y_i^{Cap} = (1 - \frac{DL_i}{K_i}) \cdot Y_i^{pre}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: Y_i^{pre} 为灾前生产能力, DL 为各部门直接经济损失, K 为各部门固定资产存量。本文中,各部门固定资产存量利用永续盘存法^[30],基于武汉市各年固定资产投资计算得到。其中基年存量与折旧率采用前人研究结果计算的2012年武汉市固定资产存量,折旧率为9.58%^[31],而2012-2015年各部门固定资产投资数据则来源于武汉市统计年鉴,各年存量与投资以固定资产投资价格指数(2015=100)进行不变价折算。

1.4 武汉市2013年投入产出表

由于国家与各省市统计局均未发布市级投入产出表,为满足模型评估需求,本文中所用2013年武汉市投入产出表基于 Industrial Ecology Lab

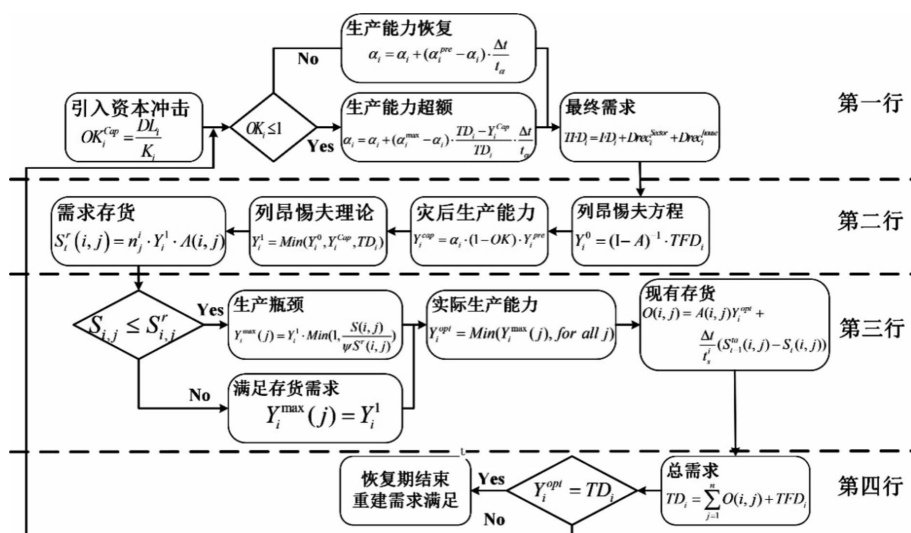


图4 ARIO - Inventory 模型理论框架(公式及参数的说明详见文献[24])

(IELab)技术,由澳大利亚与国内团队构建^[32]。IELab 技术基于广泛的搜集与应用底层社会经济统计数据的基础上展开研发,目前已成熟应用至澳大利亚、美国与全球投入产出表的开发与编制中。

2 评估模型

2.1 ARIO - Inventory 模型

本文建立的模型是基于 Stephane Hallegatte 于 2008 年提出、并于 2014 年升级的适应性区域投入产出存货模型 (Adaptive Regional Input - Output Inventory Model, ARIO - Inventory)^[24]。作为动态投入产出模型,在保留列昂惕夫方程简洁、便于计算优点的同时,充分考虑灾后各部门生产容量的变化、生产瓶颈的处理以及各部门之间因减产停产、产业关联影响造成的生产约束等经济响应特性,突出灾后各部门在重建初期、中期、后期因供需失衡导致的存货不足对整体恢复重建的异质性作用,以月为步长,实时动态模拟从灾害发生到重建完毕时间段内经济系统供需平衡的变化,刻画灾害对地区经济的影响,模型现已成熟运用到洪涝^[24,33]、地震^[27,34],等多灾种的损失评估中。模型的理论框架对比如图4所示。

加入的劳动力模块遵循列昂惕夫基本理论:即假定部门间用于生产或消费的商品或服务不可替代,一个部门的最终生产能力取其他各部门所能提供的产品、服务 ($\text{Min}(Y_i^0, Y_i^{\text{cap}})$),劳动力 (Y_i^{lab}) 以及其他部门对该部门产品、服务、劳动力需求 (TD) 的最小值。模拟评估分为以下三个阶段:

(1) 引入灾害冲击、重建资金与效率

第一阶段为图4中第一行,将灾害造成的冲击引入到经济系统中,资本受损为直接经济损失 DL 与其固定资本存量 K 的比值 (OK_i)。若 $OK_i < 1$,表明灾后生产能力仍未恢复到灾前水平(设定灾前水平为 100%),通过增加重建资金或提高重建效率使生产能力相比未发生灾害时得到提高(生产能力超额 α_i),但其提高幅度最多只能达到重建资金所能提供的上限 (α^{max})。若 $OK_i < 1$,表明灾后生产能力已恢复,其重建资金逐渐撤出,超额的生

产能力则逐渐恢复到灾前水平 (100%)。

(2) 灾后资本生产逐步恢复

该阶段为图4中第二行,针对资本恢复,模型首先设定初始生产能力 Y_i^0 ,从需求侧利用列昂惕夫方程求得各部门所需提供的生产能力。其次,考虑超额生产能力的提高 (α^{max}),从供给侧求解各部门所能提供的生产能力 Y_i^{cap} 。最终依据列昂惕夫基本理论,取 $\text{Min}(Y_i^0, Y_i^{\text{cap}}, TD)$ 作为部门生产能力。

(3) 考虑灾后存货的影响及恢复结束的判定

该阶段为图4中第三行,灾后恢复过程中,基础设施、道路等受到灾害冲击,部门生产更依赖存货量(不包括水、电、热力部门或服务部门),若在恢复期不同阶段不同部门存货出现不足,通过产业关联则会引起一系列波及影响。因此模型考虑存货在灾后恢复过程中的异质性,若某部门现有存货 ($S_{i,j}$) 无法满足生产的需求存货 ($S_{i,j}^r$) 时 ($S_{i,j} \leq S_{i,j}^r$),触发生产瓶颈,以其他所有部门中最小存货需求 $\text{Min}(S_{i,j} / \psi S_{i,j}^r, \text{for all } j)$ 作为该部门所能提供的实际生产能力 (Y_i^{opt})。

最后(图4中第四行),总需求量为最终需求 (TFD),中间需求 (AP) 与存货需求量(从现有存货 ($S_{i,j}$) 到目标存货 ($S_{i,j}^a$) 的差的和。通过迭代每一时间步长的总需求 (TD) 与实际生产力 (Y_i^{opt}) 是否相等判断供需是否平衡。若供需平衡 ($Y_i^{\text{opt}} = TD$),承灾体完全恢复,若不平衡,则继续迭代。

2.2 模型参数

模型所需外生参数如表1所示,其中超额生产能力最大值 α^{max} 设为 101.28%,来源于武汉市为治理城市内涝灾害用于治理城市排水系统等所投资的 140 亿元,该投资在“武汉 7·6 暴雨洪涝”灾后恢复过程发挥了重要作用,因此本文假设将 140 亿投资作为灾后恢复过程中的重建资金,并按 2015 年武汉市 GDP 换算百分比。单位时间超额生产能力增长值 $1/\tau_a$ 则根据重建资金额的大小及生产能力的响应速度设置。其他参数取值及参数的敏感性分析参见文献^[24]。

结合模型参数取值来源与其含义(表1),重建资金主要由超额生产能力 α^{max} 控制,资金的重建效率主要单位时间超额生产能力增长值 $1/\tau_a$ 控制,通

过改变以上两个参数表征其重建资金及其效率的变化,其他参数及参数的敏感性分析请参见文献^[24]。

表1 重建资金与重建效率对应模型参数及取值

参数性质	名称	参数描述	数值
重建资金	α_{\max}	灾后生产能力最大值 (超额生产能力)	101.28%
重建效率	$1/\tau_{\alpha}$	单位时间超额生产能力增长值	1/120

3 灾后重建资金与效率变化对经济恢复力影响的结果分析

3.1 重建资金与效率变化参数设置

本文通过 ARIO - Inventory 模型的模拟,以评估得到的间接经济损失及恢复到灾前所需的时间为纽带,分析重建资金与效率的变化对经济恢复力及恢复期的影响,以期为灾后经济恢复力提供最合理的建设方案。

重建资金变化:在基础重建资金 140 亿元(101.28%)上,每组增加 100 亿元的重建资金,其超额生产能力分别为 102.20%, 103.12% 以及 104.03%,控制其他参数保持不变(表2),分析重建资金的增加对经济恢复力与恢复期的影响。

重建效率变化:在基础恢复时间 120 d 上,逐级提高超额生产能力的增加量,每组按照 1/3 的速度提高,最后一组时间设定为上一组的 1/2(表2),即重建效率逐级提高约 1/3,并控制其他参数保持不变,分析重建效率的提高对经济恢复力与恢复期的影响。

重建资金与效率同时变化:基础重建资金(140 亿)与时间(120 d)与以上两组相同,同时增加、提高与以上两组相同幅度的重建资金(100 亿)、重建效率(1/3)(表2),分析两者的变化对经济恢复力与恢复期的影响。

3.2 结果对比与分析

3.2.1 重建资金变化对武汉市灾后经济恢复力影响

将 Group1 中的参数代入 ARIO - Inventory 模型,结果显示“武汉 7·6 暴雨洪涝”灾害共造成 91.98 亿元的总经济损失,其中包括 87.4 亿元的直接经济损失与 4.58 亿元的间接经济损失,表明在关注灾害造成的直接经济损失同时,也不能忽略其对灾区造成的间接经济损失。

本文设置 Group1 中的评估结果为基础值,即设定为 100%(下同,均保持相同设置):若灾后重建资金从 140 亿增加至 440 亿,灾害造成的间接经济损失则从 4.58 亿元(100%)下降至 0.46 亿元(10.04%),下降幅度为 4.12 亿美元(89.96%),

平均降幅为 1.37 亿元(29.99%)(图5)。而经济恢复到灾前水平所需要的时间则由 275 d(100%)缩短至 180 d(65.46%),缩短幅度 95 d(34.55%),平均缩短 32 d(11.51%)(图5)。

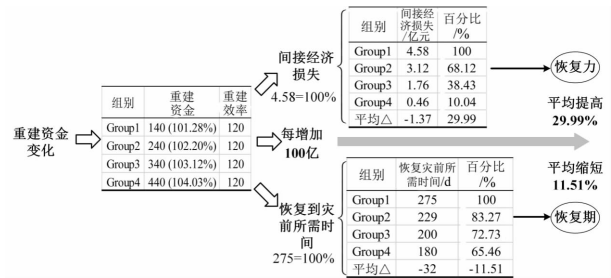


图5 重建资金变化对经济恢复力影响的定量评估
(平均Δ为下一组与上一组的差值后的平均值)

而经济恢复力可用灾害造成的间接经济损失定量表征,恢复期可用灾后经济系统恢复到灾前所需要的时间定量表征。因此,其结果表明若将洪涝灾害后,重建的重点集中于提高重建资金,每提高 100 亿重建资金,可使承灾体经济恢复力平均提高 29.99%,恢复期平均缩短 11.51%。灾后重建资金的增加可较大程度降低灾后间接经济损失的同时缩短恢复到灾前的时间,使灾后经济系统快速恢复到灾前水平,对经济恢复力提高的贡献较大。但经济恢复力的提高不仅依靠灾后重建资金的支持,同时也需要提高重建效率。

3.2.2 重建效率变化对武汉市灾后经济恢复力影响

将重建效率提高约 1/3(由 120 d 缩短为 30 d),灾害造成的间接经济损失从 4.58 亿元(100%)下降至 1.63 亿元(35.59%),下降幅度为 2.95 亿元(54.41%),平均降幅为 0.98 亿元(21.47%)(图6)。而经济恢复到灾前水平所需要的时间则由 275 d(100%)缩短至 185 d(67.27%),缩短幅度 90 d(32.73%),平均缩短 30 d(10.91%)(图6)。

其结果表明若灾后重点提高重建效率,即将资金应用于重建的时间每缩短约三分之一,承灾体经济恢复力将提高 21.47%,恢复期缩短 10.91%。重建效率的提高对经济恢复力的影响相比重建资金的增加对经济恢复力的影响低 8.52%,对恢复期的影响低 0.6%,一定程度上表明经济恢复力的提高对重建资金的增加相比其重建效率的提高可能更敏感。但重建效率的评估结果是在重建资金为 140 亿的情况下得到的,若增加重建资金的同时提高重建效率,则能有效弥补重建资金对灾后资本恢复程度的限制,可能使得承灾体经济恢复力得到更大程度的提高。

表2 重建资金与效率变化的参数组合

	名称	Group1	Group2	Group3	Group4
重建资金变化	重建资金/亿	140(101.28%)	240(102.20%)	340(103.12%)	440(104.03%)
	重建效率/(1/d)	120	120	120	120
重建效率变化	重建资金/亿	140(101.28%)	140(101.28%)	140(101.28%)	140(101.28%)
	重建效率/(1/d)	120	90	60	30
重建资金与效率变化	重建资金/亿	140(101.28%)	240(102.20%)	340(103.12%)	440(104.03%)
	重建效率/(1/d)	120	90	60	30

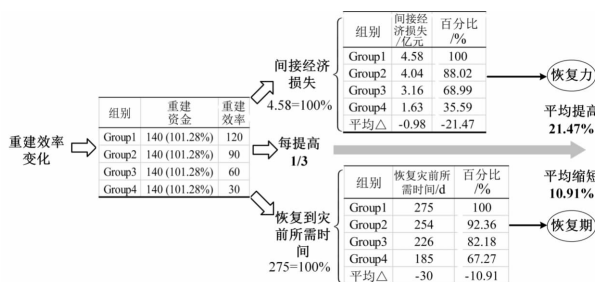


图6 重建效率变化对经济恢复力影响的定量评估

3.2.3 重建资金与效率同时变化对武汉市灾后经济恢复力影响

将重建资金从基础值 140 亿增加至 440 亿,重建效率提高约 1/3 (由基础值 120 d 缩短为 30 d),灾害造成的间接经济损失将从 4.58 亿元 (100%) 下降至 0,且从中获益 4.92 亿元 (-130.59%),若将获益部分算入影响,其下降幅度达 10.56 亿元 (230.59%),平均降幅为 3.52 亿元 (76.86%) (图 7)。而经济恢复到灾前水平所需要的时间则由 275 d (100%) 缩短至 110 d (40.00%),缩短幅度 165 d (60.00%),平均缩短 55 d (20.00%) (图 7)。

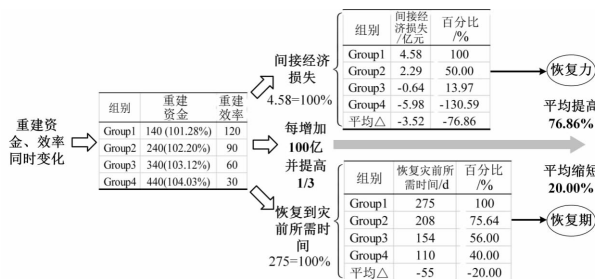


图7 重建资金与效率变化对经济恢复力影响的定量评估

其结果表明若重建资金每增加 100 亿元,同时重建效率每提高 1/3,武汉市灾后经济恢复力将提高 76.86%,恢复期将缩短 20%,将较程度的提高灾区经济恢复力,并且其提高幅度是仅增加重建资金情景的 2.23 倍,是仅提高重建效率情景的 3.58 倍,而恢复期缩短幅度是仅增加重建资金情景的 1.74 倍,是仅提高重建效率情景的 1.83 倍。因此,灾后经济恢复力的建设与恢复期的缩短需要依靠灾后重建资金及其重建效率的同时提高,若无法同时提高,可将重建重点偏向于提高灾后重建资金。考虑到重建资金的使用并非针对一次灾害而言(如提高城市防洪排水系统等),承灾体经济恢复力的提高可有效提高防灾减灾能力,降低未来灾害造成的间接经济损失。

4 结论与讨论

本文基于“武汉 7·6 暴雨洪涝”灾情统计资料,通过改进 ARIO-Inventory 模型,模拟重建资金变化、重建效率变化以及两者同时变化下武汉市灾后间接经济损失与恢复到灾前所需时间,表征其承灾体经济恢复力与恢复期,以期量化的求得重建资金与效率提高对提高灾后经济恢复力

提升的贡献。得到结果如下。

(1) 灾害共造成总的经济损失 88.98 亿元,其中直接经济损失 87.4 亿元,产生的间接经济损失 4.58 亿元,经济恢复到灾前所需的时间为 9 个月。

(2) 重建资金每增加 100 亿元可使经济恢复力提高近三分之一,恢复期缩短约 12%,而重建效率每提高 1/3 则使经济恢复力提高近四分之一,恢复期缩短 11%,而两者同时提高则能最大程度的降低灾害造成的间接经济损失甚至从中获益,使经济恢复力平均提高达四分之三,恢复期缩短五分之一。

(3) 重建资金与效率同时提高对承灾体经济恢复力的贡献是仅增加重建资金的 2.23 倍,是仅提高重建效率的 3.58 倍,对恢复期的贡献是仅增加重建资金的 1.74 倍,是仅提高重建效率的 1.83 倍,表明灾后经济恢复力的建设与提高需要重建资金与效率的同步支持,使重建资金能在尽量短的时间内作用到灾后恢复与建设中。

在加强恢复力概念的理解的同时,只有将恢复力概念中的重建强度与效率等关键要素具体化、量化,才能详细揭示灾后恢复期重建资金、效率与恢复力变化的定量关系,清楚展示恢复力在对推动灾后恢复进程对减小灾后损失的贡献。才能使恢复力成为“提高承灾体防灾减灾能力、优化灾害风险管理政策与措施”实实在在科学依据。这些量化的模型应该基于灾害学、经济学、地理学多学科交叉。

参考文献:

- [1] IPCC: Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation, in: Special report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [R]. Edited by: Field C B, Barros V, Stocker T F, et al, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.
- [2] 杨涛,郭琦,肖天贵.“一带一路”沿线自然灾害分布特征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(10): 165-171.
- [3] 刘婧,史培军,葛怡,等. 灾害恢复力研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2006, 21(2): 211-218.
- [4] 周雷,吴先华,吉中会. 考虑恢复力的洪涝灾害损失评估研究进展[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(2): 11-21.
- [5] Ayyub B M. Systems resilience for multihazard environments: Definition, metrics, and valuation for decision making[J]. Risk Analysis, 2014, 34(2): 340-355.
- [6] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. Earthquake spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [7] 史培军,郭卫平,李保俊,等. 减灾与可持续发展模式——从第二次世界减灾大会看中国减灾战略的调整[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(3): 1-7.
- [8] 范一大. 我国灾害风险管理的未来挑战——解读《2015-2030 年仙台减轻灾害风险框架》[J]. 中国减灾, 2015(7): 18-21.
- [9] 史培军. 仙台框架: 未来 15 年世界减灾指导性文件[J]. 中国减灾, 2015(7): 30-33.
- [10] 葛怡,史培军,徐伟,等. 恢复力研究的新进展与评述[J]. 灾害学, 2010, 25(3): 119-124, 129.
- [11] Mavhura E, Manyena S B, Collins A E, et al. Indigenous knowledge, coping strategies and resilience to floods in Muzarabani, Zimbabwe[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2013, 5: 38-48.
- [12] Mustafa D. Rain forcing vulnerability? Disaster relief recovery and response to the 2001 flood in Rawalpindi, iPakistan[J]. Global

- Environmental Change Part B: Environmental Hazards, 2003, 5 (34): 71–82.
- [13] World Economic Forum. Building resilience to natural disasters; a framework for private sector engagement[C]//Geneva: World Economic Forum, 2008: 10–11.
- [14] 吴先华, 周蕾, 高歌, 等. 考虑防灾减灾能力的洪涝灾害损失率曲线构建: 以里下河地区的李中镇为例[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 223–231.
- [15] Domeneghetti A, Carisi F, Castellarin A, et al. Evolution of flood risk over large areas: Quantitative assessment for the Po river[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 809–823.
- [16] 何树红, 邹丽华. 巨灾风险经济损失研究方法综述[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 120–124.
- [17] 刘婧, 方伟华, 葛怡, 等. 区域水灾恢复力及水灾风险管理研究—以湖南省洞庭湖区为例[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 56–61.
- [18] Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. Global Environmental Change, 2008, 18(4): 598–606.
- [19] 李宁, 张正涛, 陈曦, 等. 论自然灾害经济损失评估研究的重要性[J]. 地理科学进展, 2017, 36(2): 256–263.
- [20] FEMA (Federal Emergency Management Agency). HAZUS 99 estimated annualized losses for the United States[R]. Publication No. 366, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., 2001.
- [21] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 18(6): 1–9.
- [22] 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.
- [23] 魏章进, 马华铃. 台风灾害间接经济损失评估方法综述[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 157–161.
- [24] Hallegatte S. Modeling the role of inventories and heterogeneity in the assessment of the economic costs of natural disasters[J]. Risk analysis, 2014, 34(1): 152–167.
- [25] ZHANG Zhengtao, LI Ning, XIE Wei, et al. Assessment of the ripple effects and spatial heterogeneity of total losses in the capital of China after a great catastrophic shock[J]. Natural Hazard and Earth System Science, 2016, 17(3): 1–21.
- [26] XIE Wei, LI Ning, WU Jidong, et al. Disaster risk decision: a dynamic computable general equilibrium analysis of mitigation investment[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2015, 21(1): 81–99.
- [27] 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.
- [28] 周洪建, 王丹丹, 袁艺, 等. 中国特别重大自然灾害损失统计的最新进展—《特别重大自然灾害损失统计制度》解析[J]. 地球科学进展, 2015, 30(5): 530–538.
- [29] 武汉市政府, 武汉市水务局. 武汉市中心城区排水设施建设三年攻坚行动计划[EB/OL]. (2013–04–01), [2016–08–10]. <http://www.whwater.gov.cn/water/tzgg/7709.jhtml>.
- [30] 单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算: 1952–2006 年[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 17–31.
- [31] WU Jidong, Li Ning, Shi Peijun. Benchmark wealth capital stock estimations across China's 344 prefectures: 1978 to 2012[J]. China Economic Review, 2014, 31: 288–302.
- [32] WANG Yafei. An industrial ecology virtual framework for policy making in China[J]. Economic Systems Research, 2017, 29(2): 252–274.
- [33] Ranger N, Hallegatte S, Bhattacharya S, et al. An assessment of the potential impact of climate change on flood risk in Mumbai[J]. Climatic Change, 2011, 104(1): 139–167.
- [34] 李宁, 吴吉东, 崔维佳. 基于 ARIO 模型的汶川地震灾后恢复重建期模拟[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 68–75.

Quantitative Assessment of Changes in Post-disaster Resilience from the Perspective of Rescue Funds and Rescue Efficiency

——A Case Study of a Flood Disaster in Wuhan City on July 6, 2017

ZHANG Zhengtao^{1, 2, 3}, LI Ning^{1, 2, 3}, FENG Jieling^{1, 2, 3}, CHEN Xi^{1, 2, 3}, BAI Kou^{1, 2, 3} and LIU Li^{1, 2, 3}
(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs and Ministry of Education, Faculty of Geographical Science, Beijing 100875, China)

Abstract: The resilience to natural disasters has become an important method for optimizing disaster risk management and improving the ability of disaster prevention and mitigation. The economic impact evaluation based on economic mechanism has become a hotspot in the study of resilience, the evaluation provides a new way to study the quantitative relationship between the changes in rescue funds, rescue efficiency and the changes in resilience to natural disaster. Therefore, this paper utilizes dynamic economic impact evaluation model to assess the impact of economic impacts and the time required to recover to pre-disaster on the resilience and recovery period when evaluating them under the changes in rescue funds and rescue efficiency using a case study of a flood disaster that occurred in Wuhan city on July 6, 2016. The results show that: (1) with per 1 million increase of rescue funds, the post-disaster resilience of Wuhan will increase by about a third, recovery period will be shortened by 12%; (2) with per 1/3 increase of rescue efficiency, the post-disaster resilience of Wuhan will increase by about one fifth, recovery period will be shortened by 11%; (3) if both of them increase the same magnitude, the post-disaster resilience of Wuhan will increase up to more than three quarters, recovery period will be shortened by one fifth. The results emphasize the importance of rescue funds and rescue efficiency on post-disaster resilience, which can provide quantitative support for the program of post-disaster rescue allocation.

Key words: natural disaster; post-disaster rescue; resilience; economic loss; risk management; flood; Wuhan