A study on Analysis of Macroeconomic Loss Risk of Earthquakes: Take Chengdu City as an Example

Qing Wu

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

地震宏观经济损失风险分析研究：以成都市为例

吴 清

中国地震局地球物理研究所，北京 100081，中国

Abstract

Each district/county under the jurisdiction of a city was regarded as a site. The Monte Carlo method was used to simulate the seismic sequences. For each earthquake in the seismic sequence, the ground motion parameters of each site were calculated through the attenuation relationship and brought into the macroeconomic vulnerability model with GDP loss ratio as an indicator to assess the economic losses. Sum the loss values of all sites and use the maximum value as a seismic sequence simulation result. Through large-scale sampling simulation, the macroeconomic loss exceedance probability curve was given to measure the degree of urban earthquake disaster risk. The Monte Carlo method combined with the macroeconomic vulnerability model can quickly estimate the probabilistic risk of the seismic economic loss faced by a city and provide a scientific basis for earthquake prevention and disaster reduction measures.

Email: wuqing908@sina.com

Key words: Monte Carlo method; macroeconomic vulnerability model; exceedance probability curve

摘要

将一个城市所辖的各个区县各自视为一个场点，利用蒙特卡罗方法模拟地震序列，对于地震序列里的每一个地震通过衰减关系计算得到各场点地震动参数值，带入到以国内生产总值GDP损失比为指标的宏观经济易损性模型，计算各个场点经济损失。将所有场点的损失值求和，取最大值作为一个地震序列模拟结果。通过大规模抽样模拟，给出地震宏观经济损失超越概率曲线，以此衡量城市地震灾害风险的程度。结果表明以蒙特卡罗方法结合宏观经济易损性模型，能快速估算一个城市所面临的地震经济损失概率风险，为防震减灾措施提供科学依据。

关键词：蒙特卡罗方法；宏观经济易损性模型；超越概率曲线

1. 引言

灾害量化是地球科学、工程科学和社会经济科学的交叉领域。人口城市化是全球的发展趋势。现代城市在抗御自然灾害方面，比过去任何时候都显得更为脆弱^[1]。城市化在给人类带来富裕的物质生活

和丰富多彩的文化生活的同时,也会因人口、财富在有限空间的高度集中,造成维系城市正常运转的基础设施、生命线工程、建筑物的日益庞大和复杂。尤其是 GDP 值高的城市,经济发达、人口稠密,单位面积的社会财富远远高于全国的平均水平。一旦这些重要城市遭受大地震袭击,将会造成重大的人员伤亡和巨额的经济损失,甚至会对整个国家的经济发展造成巨大冲击。我国许多大城市和城市群位于易发生大地震的大型活动断裂带附近,其中包括 12 个省会城市。改革开放以来,大量的人口、资产和重大设施快速向这些城市集中。暴露在具备发生 7 级以上大地震的危险区域的人口、资产以指数方式迅速累积,导致地震风险飙升^[2]。如何分析一个城市在未来地震中的经济损失水平,对于在现阶段采取相应的防震减灾对策具有重大的决策参考意义。

传统的地震灾害损失研究通常采用易损性分类清单方法,要求对研究区内建筑设施建立分类数据库,并详尽的收集资料用以建立震害矩阵。但面对现代社会的快速发展,使得传统的方法在收集并及时更新资料方面都存在明显的局限性,而这种详细的分类资料在许多地区甚至是难以获得的。Xi Yu 等^[3]对灾害经济学做过系统介绍,并以地震灾害为例提出了灾害经济学的研究框架。陈颢等^[4]在执行联合国“国际减轻自然灾害十年”计划中论证了可以将承灾体脆弱性转化为国民生产总值(GDP)脆弱性,GDP 资料容易获得且更新及时,随后陈颢等^[5-6]、陈棋福等^[7]等建立了适用于不同尺度和地区的以 GDP 损失为指标的宏观经济易损性模型。刘吉夫等^[8-9]在此思路开展了地震灾害损失预测研究,完善了该分析方法的人口和 GDP 分配方案,以烈度区为分配单位,建立了地震宏观风险分析模型。王晓青等^[10]将此方法用于汶川地震损失快速评估中,其结果与袁一凡等^[11]进行现场调查得出的经济损失结果进行了比较,结果较为一致。杨斌等^[12],范志伟等^[13]都通过实

际震例验证了王晓青等^[10]提出的宏观经济易损性模型在小尺度空间范围内震后经济损失快速评估中的可行性。

过去的震害损失预测分析,一般在考虑地震危险性时是有概率水平的,可是在分析震害及经济损失时,没有充分考虑这些因素的概率特征。刘本玉等^[14]以全概率的公式为基础,建立了区域震害经济损失预测的概率分析模型,综合考虑了地震、场地、结构和当地经济发展水平的影响。但是在公式推导过程中,由于各因素之间的关系很难得到,而做了许多简化与平均,在实际应用中比较难以实现与推广。

蒙特卡罗方法则是一种基于合成地震序列的地震危险性计算方法,该方法根据地震活动性模型可以生成满足某一区域内地震时空分布规律的地震序列,对地震序列里的每一个地震通过衰减关系计算得到各场点地震动参数值,进一步带入易损性模型,可以对地震风险进行评估^[15-19]。本文拟将蒙特卡罗方法与宏观经济易损性模型结合起来,将蒙特卡罗方法模拟计算得到的地震事件影响场带入到以国内生产总值 GDP 损失为指标的宏观经济易损性模型,给出地震宏观经济损失超越概率曲线。

2. 方法介绍

蒙特卡罗(Monte Carlo)方法是一种应用随机数来进行计算机模拟的方法。此方法对研究的系统进行随机观察抽样,通过对样本值的观察统计,求得所研究系统的某些参数。其基本思想是当实验次数充分多时,某一事件出现的频率近似于该事件发生的概率,即

$$\frac{x}{N} \approx p \quad (\text{当 } N \text{ 充分大时}) \quad (1)$$

式中 p 是某一事件发生的概率; N 是实验次数; x 是在 N 次实验中该事件出现的频次。

中国地震动参数区划图(GB18306-2015)^[19]依据各个地区的地球

物理资料, 划分了地震带和潜在震源区, 建立了相宜的地震发生概率模型和空间分布模型, 并给出了各个地震带的基本参数。根据中国地震动参数区划图的基本假定和地震活动性参数, 可采用以下步骤合成地震事件集^[18]:

(1) 基于地震带内地震发生满足泊松分布的假定以及地震带的年平均发生率, 利用泊松随机数模拟时间长度为 T 的地震序列的地震数量 N ;

(2) 基于地震带内地震活动的震级分布满足截断 $G-R$ 关系 (震级-频度关系) 的假定以及最小震级水平和最大震级上限来确定震级。

$G-R$ 关系表达式为:

$$\log N = a - bM \quad (2)$$

式中, a, b 为系数, N 为震级大于等于 M 的地震个数

$M = 4, 4 + \Delta M, \dots, M_{UZ}$ (最大震级) 此处 $\Delta M = 0.1$, 中国地震动参数区划图的起算震级为 4 级。则地震事件累积数量的值为:

$$N(M) = e^{a-bM} \quad (3)$$

$$N(M) > N(M + \Delta M) \quad (4)$$

随机生成一个符合在 0 和 1 之间均匀分布的随机数 u , 判断它是否在

$\frac{N(M + \Delta M)}{N(4)}$ 与 $\frac{N(M)}{N(4)}$ 之间, 如果是, 则确

定地震事件的震级 M 。

(3) 震中位置的确定。首先, 确定地震事件所在的潜在震源区 n 。根据上步所确定的震级 M 判定地震所在的震级档 d , 因为每个震级档的地震落在各个潜在震源区的概率 $P_d(n)$ 是已知的并

且是归 1 的, 那么随机产生一个符合在 0 和 1 之间均匀分布的随机数 u ,

若 u 满足:

$$u \in \sum_{n=1}^{n-1} P_d(n) \sim \sum_{n=1}^n P_d(n) \quad (5)$$

则确定地震事件所在的潜在震源区 n 。基于震中在潜在震源区内均匀分布的假定, 随机抽取一点作为地震的震中位置。

(4) 根据潜在震源区衰减长轴方位角的概率, 随机抽样确定地震方位角 θ 。

至此, 确定了一个地震的基本要素。重复 (2) ~ (4) 步直至所需的地震数目, 综合考虑所有可能对场点造成影响的地震带, 由此确定出来一个地震序列。通过大规模抽样模拟, 形成地震概率事件集。

对于概率事件集里的每一个地震, 以地震的经纬度为原点, 衰减长轴方向为正方向, 将所有场点转换到平面坐标下。根据中国地震动参数区划图的椭圆烈度衰减关系, 采用最优椭圆搜索的数值计算方法计算地震在各个场点处的烈度值 I 。

宏观经济易损性模型可表示为:

$$F(I, GDP) = C \cdot A \cdot I^B \quad (6)$$

式中, $F(I, GDP)$ 代表 GDP 损失率, I 为地震烈度, A, B 为系数, C 为修正系数。 A, B 值直接从回归关系式获得, 修正系数 C 一般取 1.0。

对于一个行政区域 (市), 将其所辖的区县或乡镇各自视为一个场点, 每个场点附有各自的 GDP_i 值。对于用蒙特卡

罗方法模拟得到的地震序列里的每一个地震, 通过烈度衰减关系可以同时计算得到所有场点的影响烈度值 I_i , 带入宏

观易损性模型, 可以计算得到这个地震对行政区域可能造成的损失:

$$LOSS = \sum_{i=1}^n C \cdot A \cdot I_i^B \cdot GDP_i \quad (7)$$

式中 n 是区县或乡镇总数。这样地震序列里每一个地震对应一个 GDP 损失值, 选取序列里的最大值作为一次模拟的结果。随机模拟 N 次, 统计超越给定经济阈值的次数, 计算得到超越概率曲线。

在计算过程中需考虑经济及社会财富的动态发展，即 GDP 值的生长变化。如果以当前资料搜集年的 GDP 产值为基础，用简单的年均增长率 q 来考虑的话，则未来第 K 年的国内生产总值为 $GDP \times (1+q)^{K-1}$ ，如此 T 年内的 GDP 总值为：

$$Y = \sum_{k=1}^T GDP \times (1+q)^{k-1} = GDP \times \frac{(1+q)^T - 1}{q} \quad (8)$$

则在 T 年以内以 GDP 描述的社会平均财富为 $GDP = Y / T$ ，将之代替损失公式(7)中的 GDP 值。

王晓青等^[10]给出了宏观经济易损性模型：

$$F(I, GDP) = \begin{cases} 2 \times 10^{-8} \cdot I^{9.8082} & \text{人均GDP} < 2700 \\ 2 \times 10^{-10} \cdot I^{11.585} & 2700 \leq \text{人均GDP} < 10000 \\ 4 \times 10^{-11} \cdot I^{11.377} & \text{人均GDP} \geq 10000 \end{cases} \quad (9)$$

该模型用于汶川地震损失快速评估中，其结果与袁一凡等^[11]进行现场调查得出的经济损失结果进行了比较，结果较一致。杨斌等^[12]、范志伟等^[13]都通过实际震例验证了王晓青等^[10]提出的宏观经济易损性模型在小尺度空间范围内的可行性。因此，本文也借鉴这一模型进行计算。

3. 计算实例

成都市地处于龙门山地震带，邻近鲜水河-滇东地震带和巴颜喀拉山地震带，都是地震频发且可能发生重特大地震的地震带。本文以成都市为例，将成都市所辖的 20 个区县各自视为一个场点，取区县行政面积几何中心经纬度为场点经纬度，每个场点附有各自区县的 GDP_i ，表 1 是 2016 年成都市各区县 GDP 值（当年价）^[21]。

表 1 2016 年成都市各区县生产总值（GDP）

Table 1 GDP of Counties in Chengdu in 2016

单位：万元/ Unit: ten thousand yuan

区（市） 县	GDP 值	区（市） 县	GDP 值
锦江区	8345913	郫都区	4627253
青羊区	9456488	金堂县	3236557
金牛区	9500519	大邑县	2042304
武侯区	8678206	蒲江县	1179685
成华区	7562006	新津县	2592004
龙泉驿区	10392210	简阳市	3658526
青白江区	3670094	都江堰市	3062245
新都区	6321698	彭州市	3607288
温江区	4264588	邛崃市	2281261
双流区	9671540	崇州市	2540435

利用 GB18306-2015 中国地震动参数区划图川藏地区椭圆烈度衰减模型，按最优椭圆搜索法逐次计算地震序列里的每一个地震在 20 个场点处的烈度值 I 。川藏地区椭圆烈度衰减关系如下^[22]：

$$I_a = 6.458 + 1.2746 \cdot M - 4.4709 \cdot \lg(R + 25) \quad (10)$$

$$I_b = 3.3682 + 1.2746 \cdot M - 3.3119 \cdot \lg(R + 9) \quad (11)$$

$$\sigma = 0.6636 \quad (12)$$

式中， I_a 为长轴方向烈度， I_b 为短轴方向烈度， M 为震级， R 为震中距， σ 为标准差。

由于蒙特卡罗方法抽样次数越多结果越精确，为了统筹考虑计算量和结果精确程度，分别进行了 1 年地震序列的 10000 次、100000 次、1000000 次抽样计算，统计不同模拟次数下的经济损失超越概率，结果见图 1。由图 1 可以见到，对于 1 年地震序列，1000000 次的模拟足以给出稳定平滑的年超越概率曲线。由超越概率曲线可以看到，以 2016 年的经济水平为基础，成都市 100 亿元地震经济损失的年超越概率约为 3%，1000 亿元地震经济损失的年超越概率约为 0.4%，10000 亿元地震经济损失的年超越概率约为 0.001%。

图1 宏观经济损失年超越概率曲线

Fig. 1 annual exceedance probability curve of macroeconomic loss

4. 结论与讨论

基于中国地震动参数区划图(GB18306-2015),利用蒙特卡罗方法建立概率地震事件集和地震动影响场,带入到宏观经济易损性模型,简单直接的统计归算未来一段时间内城市经济损失水平的超越概率。通过大规模模拟抽样,以2016年经济水平为基础,得到成都市未来可能面临的地震经济损失超越概率曲线,此方法给地震经济损失估计赋予了概率的意义。

由于蒙特卡罗方法是逐次计算每个模拟地震可能对城市造成的经济损失,那么很容易找到给城市造成最大损失的那些地震,进而构建更为详细的地震情景,以更精确的估计它们可能的影响。

蒙特卡罗方法原理简单直接,可以很容易被规划者、施政者和保险公司理解接受。以此方法来估计一个城市在未来地震中的经济损失水平,对于在现阶段制订相应的防震减灾对策具有十分重大的决策参考意义,更为保险公司厘定费率提供借鉴。

Acknowledgements

This study was supported by Major Research Plan of Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Basal Research Fund(DQJB17B02) and Major Research Plan of Institute of Geophysics,

China Earthquake Administration, Basal Research Fund(DQJB17C08).

致谢

本研究得到了中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项 DQJB17B02 和 DQJB17C08 的资助。

参考文献

- [1] 陈颢, 彭文涛, 徐文立. 21世纪地震灾害的一些新特点. 地球科学进展, 2004, 19(3): 359-363
- [2] 高孟潭. 新一代国家地震区划图与国家社会经济发展. 城市与减灾, 2016, (3): 1-5
- [3] Yu X, Tang Y D. A critical review on the economics of disasters. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2017, 7(1): 27-36
- [4] 陈颢, 朱宏任. 地震灾害量化研究. 国际地震动态, 1991, (5): 5-9
- [5] 陈颢, 陈棋福, 陈凌. 地震损失预测评估中的易损性分析. 中国地震, 1999, 15(2): 97-105
- [6] Chen Y, Chen Q F, Chen L. Vulnerability analysis in earthquake loss estimate. Natural Hazards, 2001, (16): 1-16
- [7] 陈棋福, 陈颢, 陈凌. 利用国内生产总值和人口数据进行地震灾害损失预测评估. 地震学报, 1997, 19(6): 640-649
- [8] 刘吉夫. 宏观震害预测方法在小尺度空间上的适用性研究. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2006: 21-39
- [9] 刘吉夫, 陈颢, 史培军等. 中国大陆地震风险分析模型研究. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(5): 520-523
- [10] 王晓青, 丁香, 王龙, 等. 四川汶川8级大地震灾害损失快速评估研究. 地震学报, 2009, 31(2): 205-211.
- [11] 袁一凡. 四川汶川8.0级地震损失评估. 地震工程与工程振动, 2008, 28(5): 10-19.

- [12] 杨斌, 马朝晖. 灾害损失宏观预测模型震后快速评估. 地震地磁观测与研究, 2013, 34 (3/4): 213-216
- [13] 范志伟, 杨凡, 陈晓燕. 基于宏观经济指标对张家口地区地震灾后经济损失快速评估. 防灾减灾学报, 2016, 32(3): 15-18
- [14] 刘本玉, 苏经宇, 江见鲸, 李刚. 震害经济损失的全概率预测, 世界地震工程, 2003, 19(1): 15-20
- [15] Musson R M W. Determination of design earthquakes in seismic hazard analysis through Monte Carlo simulation. J. Earthquake. Eng., 1999, 3: 463-474
- [16] Musson R M W. The use of Monte Carlo simulations for seismic hazard assessment in the U.K.. ANNALI DI GEOFISICA, 2000, 43(1): 1-9
- [17] Smith W D. Earthquake Hazard and Risk Assessment in New Zealand by Monte Carlo Methods. Seismological Research Letters, 2003, 74(3): 298-304
- [18] 郭星. 基于蒙特卡罗模拟的概率地震危险性分析方法. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2008: 16-18
- [19] Shunsuke H, Kohei F, Tsuyoshi I etc. A physics-based Monte Carlo earthquake disaster simulation accounting for uncertainty in building structure parameters, Procedia Computer Science, 2014, 29:855-865
- [20] 高孟潭主编. GB18306-2015, 中国地震动参数区划图. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2015.5
- [21] 成都市统计局. 成都统计年鉴2017. 成都: 成都市统计局, 2017. http://m.chdstats.gov.cn/htm/detail_75067.html
- [22] 肖亮. 水平向基岩强地面运动参数衰减关系研究. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2011: 120.