

自然灾害风险主要分析方法及其适用性述评

刘希林^{1,2}, 尚志海³

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275;

2. 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275; 3. 岭南师范学院地理系, 广东 湛江 524048)

摘要:自然灾害风险分析方法的选择, 决定了风险分析所需资料的详细程度、风险模型的使用情况和分析结果的可靠性, 是风险研究的核心内容之一, 直接关系到风险分析的成败。风险定量分析方法主要有相对值方法和绝对值方法两大类。风险相对值分析方法的研究成果比较丰富, 其方法可归纳为概率统计法、期望损失法和情景模拟法3类。基于风险概率的分析方法比较适用于具备较长时间统计资料的宏观空间尺度研究; 基于期望损失的分析方法实际应用中较易操作, 多用于中观空间尺度的研究; 基于情景模拟的分析方法结果精度较高, 较适合于微观空间尺度的研究。风险绝对值分析方法中, 生命风险最受重视, 但基于历史资料的生命风险分析方法还不够成熟, 其数学模型的生命风险分析方法还有待检验, 基于情景模拟的生命风险分析方法可能是未来发展方向。相对而言, 经济风险分析方法比较成熟, 而生态环境风险定量分析的有效方法尚需进一步探索。在风险绝对值表达的定量研究方面, 今后应重视情景模拟和土地利用的作用。不论是哪种风险表达方式, 分析方法的选用都要基于风险机制、考虑研究尺度、运用现代技术, 以提高分析方法的实用性和分析结果的可靠性。

关键词:自然灾害; 风险分析; 定量方法; 适用性

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.11.006

中图分类号: X43

文献标识码: A

1 引言

近年来, 极端自然灾害事件在全球范围内肆虐, 灾害风险并没有因为社会经济发展明显降低(IPCC, 2012)。当前, 风险分析是风险科学研究的核心内容, 已成为现代社会的三大基石之一(黄崇福, 2012)。1990年联合国开展“国际减灾十年”活动以来, 国内外有关自然灾害风险的研究, 在灾害危险性、易损性、恢复性、风险分析和风险区划等方面取得了不少成果。进入21世纪, 灾害风险评估的研究和实践出现了新一轮热潮。许多机构和学者在全球范围内对风险分析的定量方法上进行了大量探索性研究(尹圆圆等, 2014), 代表性研究成果有联合国开发计划署的风险指数系统(UNDP, 2004), 全球风险热点地区研究计划, 美国哥伦比亚大学和美洲发展银行构建的灾害风险管理指标系统(Mosquera-Machado et al, 2009)。此外, 还有一些其他空间尺度的风险分析方法, 如大尺度空间(Shi et al, 2010; Fu et al, 2013)、中尺度空间(Ge et al, 2013;

Wang J et al, 2013)和小尺度空间(尹占娥等, 2010; Holec et al, 2013;)的自然灾害风险分析, 都是比较有特色的区域风险研究成果。

灾害风险分析方法的适用性和可信性决定了风险评估的成败。国内外学者历来重视风险研究方法, 包括专业判断和正规分析(Fischhoff et al, 1981), 逻辑分析和统计分析、GIS的作用等(Aleotti et al, 1999)。Jonkman等(2003)全面总结了定量风险分析的方法, 主要有风险矩阵方法、成本效益分析、FN曲线图法、综合方法等。近年来, 自然灾害风险分析及其实践也得到了较好的总结(Nicola et al, 2006; Gong et al, 2014; 巫丽芸等, 2014)。总的来看, 相对值表达的风险定量分析得到了广泛关注, 绝对值表达的生命风险和经济风险的研究成果也有不少, 而生态环境的风险研究还处于探索阶段(尚志海等, 2010a)。

风险分析的方法多种多样, 新的方法也层出不穷, 但是风险类型不同, 风险研究目的也不同, 并不是每种方法放之四海而皆准, 因此需要研究各种方

收稿日期: 2014-07; 修订日期: 2014-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171407)。

作者简介: 刘希林(1963-), 男, 湖南新邵人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事灾害地貌过程及评估和预测研究,

E-mail: liuxilin@mail.sysu.edu.cn。

法的适用性,对分析方法进行优化选择。本文在总结既有自然灾害定量风险主要分析方法的基础上,通过对其使用的针对性和风险类型的适用性,以及方法学本身的优缺点进行适当述评,以期提高风险分析方法选取的准确性和风险分析结果的可靠性,更好地为风险评估和风险管理服务。

2 自然灾害风险相对值分析方法

对自然灾害风险含义的理解,是风险定量分析的基础。目前风险含义的相对值表达主要有3种:风险概率类定义、期望损失类定义、风险情景类定义,其中可能性和概率类定义最多(黄崇福等, 2010)。在风险分析应用中,指数类定义最受关注,因其最终的风险值大小落在标准化数值[0~1]或[0%~100%]的区间范围(尚志海等, 2014)。基于风险情景定义的风险分析方法也开始显现出活力(尹占娥, 2009)。自然灾害风险相对值分析方法很多,限于篇幅,本文仅选择有代表性的主要方法作简要介绍并加以述评。

2.1 基于风险概率的分析方法

风险被定义为可能性或概率(黄崇福等, 2010),通过对自然灾害的随机性进行分析,计算灾害发生的概率,以此推断风险的大小。大多数情况下,基于风险概率的分析方法是对已发生事件的大量数据进行统计处理,以此估计相关事件发生的概率(黄崇福, 2011)。目前使用的主要方法包括重现期法、蒙特卡罗法、一次二阶矩法、贝叶斯法、事件树法、故障树法等,其中蒙特卡罗法最为常用,多用于地震灾害、洪水灾害研究中(Benito et al, 2004; 马玉宏等, 2008; 李琼, 2012)。蒙特卡罗方法也称随机模拟方法,是一种统计试验方法,根据各影响因素的随机分布模式,采用随机数组成的办法,从大量数值计算结果中求得概率,从而给出一个估计的近似风险值(黄崇福, 2012),其特点是计算结果精确度较高,尤其是对非线性概率统计模型而言更为有效。该方法可以考虑各种影响因素,无论何种情况都能取得计算结果,其缺点是完全依赖样本数量和模拟次数,且对基本变量的假设很敏感(肖义, 2004),计算工作量也很大。

基于风险概率的分析方法,利用历史数据进行自然灾害风险分析,给出历史灾情的概率分布估计,适用于具有长时间灾情记录的自然灾害种类,比如气象水文灾害。从研究的空间尺度而言,适用

于宏观空间尺度的风险分析,因为越是微观空间尺度的区域,越难提供详尽的历史资料。风险分析结果亦主要适用于大区域尺度的风险管理,可以为其提供背景资料。此外,基于风险概率的分析方法是以纯粹数学计算为基础(王天化, 2010),要求研究人员熟练掌握数学知识和计算技能。其不足之处在于风险分析所需的灾情数据往往较难获取,有时甚至简单地将灾害危险性等同于灾害风险,评估结果不能精确反映风险的区域差异,不适合在小尺度区域应用,另外历史灾情未必与未来灾害风险一致(权瑞松, 2012)。

2.2 基于期望损失的分析方法

一些学者认为风险大小可以表达为期望损失值(UNDP, 2004)。自然灾害风险是对自然灾害系统进行风险评估,由孕灾环境稳定性、致灾因子风险性、承灾体脆弱性共同决定的(史培军, 2005)。由于不同学者对风险组成要素的理解不同,风险分析模型也不相同(尹占娥等, 2009; 尚志海等, 2014),其中以“风险度=危险度×易损度”的表达模式研究最多(刘希林等, 1995)。也有学者认为在此表达模式中加入“防灾减灾能力”(张继权等, 2007)或者“抗灾能力”(金菊良等, 2014)可使对易损度的理解更加明确。IPCC第五次评估报告认为,灾害风险来自于脆弱性、暴露度与各种危害的叠加(IPCC, 2014)。基于期望损失的风险分析方法是目前使用最多、应用最广泛的方法。本文主要评述多因子加权评价法、模糊综合评判法、人工神经网络法、地理信息叠加法等。

(1) 多因子加权评价法

多因子加权评价法是在风险要素构成基础上建立若干一级指标,然后将一级指标分解为若干二级指标,有的二级指标甚至分解至若干三级指标。一级指标一般以乘法或幂函数运算得到风险值,下级的指标多采用加权求和得到上级指标值(Kappes et al, 2012)。由于在指标体系建立过程中已充分考虑了其可行性和可操作性,资料数据容易获取,数学运算简便易行,因而多因子加权评价法是目前自然灾害风险相对值分析中最普及的方法(Yin et al, 2013)。不论是有无灾害风险背景的学者,都可以根据自己的理解,提出相应的指标体系,构建相应的加权评价模型并进行风险分析。也正因为如此,许多学者采用多因子加权评价法得出的定量风险值权威性不够,只能就事论事,更谈不上不同学者研究结果的可比性和风险变化的动态性。究其原

因,主要是不同学者在不同地区,哪怕是对同一种自然灾害,选取的评价指标都差异较大;其次,加权评价中权重往往借助层次分析法来确定,存在较大的主观性,黄崇福(2011)认为层次分析法只不过是主观判断法的一种数学包装。

(2) 模糊综合评判法

模糊综合评判法是应用模糊关系合成的原理,从多个构成要素中对灾害风险隶属等级状况进行综合性评判的一种方法(肖辞源, 2004)。模糊综合评判包含6个基本要素:评判因素论域,评语等级论域,模糊关系矩阵,评判因素权向量,合成算子,评判结果向量(孙铮, 2008)。模糊综合评判法在灾害风险分析中应用较多(Lee et al, 2013),其意义在于使模糊现象适度精确化,为定量分析自然灾害风险提供了理论基础和实践工具(蒋泽军, 2004)。在实际应用中,各项指标的权重对风险分析的结果具有举足轻重的作用,而模糊综合评判指标的权重通常是由专家经验给出的,不可避免地带有专家的主观性,实际上与层次分析法没有本质的区别。

(3) 人工神经网络法

人工神经网络是以生物体的神经系统工作原理为基础建立的网络模型,通过人工神经元这一基本单元的构建,形成复杂且神奇的网络功能(朱大奇等, 2006)。目前应用较广的是BP神经网络法。该方法通过提取历史灾情数据作为评估样本,构建灾害风险分析网络结构,然后将样本分为两部分,其中一部分作为训练样本,另一部分作为测试样本。训练样本输入网络进行学习,不断调整网络的层数、隐层节点数、初始权值和阈值,以及学习系数等参数,比较不同情况下收敛状况及测试精度并确定学习的终止点,最后得出网络的所有参数(金有杰, 2013)。近年来人工神经网络在气象灾害、地质灾害风险评价得到了较好应用(娄伟平等, 2009; Park et al, 2013),推动了灾害定量化研究的发展。

人工神经网络具有高速寻找优化解的能力,具有良好的容错性与联想记忆功能,具有较强的自适应、自学习能力,能够在完全不知道变量和自变量之间确切函数关系式的情况下,较好地实现各参数之间的非线性映射。人工神经网络法对神经网络样本的选择要求非常高,样本的训练数量也很重要。在解决实际问题时,选择一个包容性大、又具有代表性的典型样本是关键,且计算过程较为复杂,难度较大,实际推广应用的操作性不强(陈成名, 2010)。

(4) 地理信息叠加法

地理信息技术和遥感技术的不断发展,使得地理信息叠加方法在灾害风险分析中得到了越来越多的应用(Carrara et al, 1999; Sanyal et al, 2005; Armenakis et al, 2013)。地理信息叠加方法的一般步骤为:确定自然灾害类型、分析致灾因子的强度和概率,在地理信息系统平台上将自然灾害的空间信息进行叠加,得到叠加的危险性分布图,再对研究区域的易损性信息进行评估,然后将叠加的危险性与易损性分级,通过重分类生成的等级值图来评估风险,最后可根据事件链耦合关系矩阵确定灾害风险评估结果(盖程程等, 2011)。地理信息叠加法是在风险指标体系上的技术处理,可以更直观地反映致灾因子的危险范围以及承灾体的空间分布特征,可用于灾前的风险预测,也可用于灾中的灾情监控,以及灾后的抗灾救灾。该方法的优点是促使灾害风险分析进一步精细化,缺点是往往局限于遥感图像的空间分辨率大小。

实际应用中经常有学者选用两种或两种以上的方法(齐信等, 2012; Sun et al, 2014)。从灾害种类来说,几乎所有灾害都可以采用指标体系法来进行灾害风险分析,但无论何种指标体系,由于在微观空间尺度应用时会受到资料来源和精度限制,应用的实际效果会大打折扣,且其风险预测功能也较弱,因而主要适用于中观空间尺度的自然灾害风险分析,为中观尺度的区域发展和规划提供参考。

多因子加权评价法、模糊综合评判法、人工神经网络法、地理信息叠加法及其他基于期望损失的分析方法,其优缺点见表1。

2.3 基于风险情景的分析方法

黄崇福认为,风险是由自然事件或力量为主因导致的未来不利事件情景(黄崇福等, 2010),基于风险情景的分析方法已成为自然灾害风险模拟的主要手段之一(赵思健等, 2012)。情景是对某类灾害风险的描述,从事件背景、发生概率和可能后果3方面进行。风险情景模拟以Kaplan等(1981)的研究为代表,是在假定灾害事件的关键影响因素有可能发生作用的前提下,构造出来的未来灾害的情景模型(Liu et al, 2012)。

情景模拟法首先根据不同概率灾害事件的强度参数模拟灾害情景,进行危险性分析,确定受灾区域范围内的主要承灾体并进行价值估算,各承灾体遭受的具体灾害强度也可得到反映,并完成暴露性分析,然后由脆弱性衡量承灾体承受一定强度自

表 1 自然灾害风险不同指标体系评价方法优缺点

Tab. 1 Advantages and disadvantages of different index system for the assessment of natural disaster risk

方法名称	优点	缺点
多因子加权评价法	建立指标体系和分析模型简便可行	不同研究结果可比性较差
模糊综合评判法	较好解决风险的模糊性、不确定性,使模糊现象适度精确化	评判指标权重确定具有主观性
人工神经网络法	客观性较强,可靠性较高	对样本要求很高
地理信息叠加法	风险表达的直观性较强	受制于信息处理技术与遥感数据的分辨率
层次分析法	系统性较强,所需数据较少,可操作性较强	客观性不够
灰色关联分析法	对数据要求较低,计算量较小,易于程序化处理	分析结果有争议
物元分析法	计算方法简便,结果比较客观,易于计算机编程	预测结果精度不够
信息扩散模型法	可操作性较强、数据需求较小、结果意义比较明确	对不同类型扩散函数的适用条件及相应扩散系数的确定有一定难度,分析结果不够全面
集对分析法	结构简单,计算简洁,评价结果可信度较高	评价指标的选取和评价结果分级标准化程度不够,置信值确定方面存在不足
数据包络分析法	不需要预先估计参数,能够一定程度上避免主观干扰,并能简化运算、减少误差	数据处理结果不稳定,同类结果可比性较差
投影寻踪法	克服了评价等级的模糊性,提高了评价结果客观性	计算过程复杂,编程实现困难
信息熵法	计算过程较简单,结果较客观,数据获取方便	数据来源单一,可靠性有待检验
突变理论评价法	无需计算权重,减少了人为主观性,计算简便	评价结果数值有一定缺陷

然灾害时的损失程度,最终将受灾区域内所有承灾体的损失程度之和作为该区域在当前灾害情景下的灾害损失,不同概率事件下的灾害损失即为该区域面临灾害的风险(Penning-Rowsell et al, 1977; 石勇, 2010)。Wang H W 等(2013)对气候变化背景下台湾西南地区洪涝灾害脆弱性进行了评估,根据 3 种洪水情景,计算了最大淹没水深作用下不同土地利用区域的潜在灾害经济损失。

华东师范大学灾害研究团队对灾害风险情景模拟进行了卓有成效的研究(尹占娥, 2009; 赵庆良, 2009; 石勇, 2010; 刘耀龙, 2011; 刘敏等, 2012; 权瑞松, 2012)。他们认为灾害情景风险的表达是指在典型情景组合条件下,灾害风险的数量表征和空间展布,提出了灾害风险情景的界定和类型。在风险情景的研究尺度上,社区灾害风险研究受到了不少学者关注(温家洪等, 2012)。殷杰等(2009)结合遥感影像和实地调查,以及基础资料数据与 GIS 技术,对上海市社区暴雨内涝灾害进行了情景分析和灾害风险评估。

灾害情景模拟下的风险研究,能以较高精度反映灾害事件的影响范围和程度,展示灾害风险的空间分布特征,同时能解决风险研究中样本较少的问题,还能将风险研究中的概率论、不确定性等进行定量表达。情景模拟方法对区域地理背景和历史灾害资料要求较高,计算复杂,工作量较大。与概率统计方法和指标体系方法相比,情景模拟方法更

适用于微观尺度的灾害风险分析,适合灾害系统形成机理比较清楚、基础数据资料比较详细的灾害种类,以及小尺度的区域规划和风险管理决策。

3 自然灾害风险绝对值分析方法

在灾害风险研究中,仅仅得出自然灾害定量风险评价的相对值,已远不能满足当代社会对自然灾害风险评估的现实要求。因此,用货币化数值来表达经济财产的期望损失,用绝对数值来表达生命风险的期望损失,已是时代的需要和风险科学发展的必然。

3.1 生命风险分析方法

3.1.1 基于历史资料的分析方法

国外对灾害生命风险的研究比较重视,欧美国家的学者基于历史灾情资料,于 20 世纪 80 年代末就提出了洪水灾害生命风险估算方法,主要有 Brown-Graham 法、Decay 法、Graham 法和 Assaf 法(Brown et al, 1988),其中使用较多的是 Decay 法和 Graham 法。Dekay 等(1993)提出潜在生命损失的计算公式为:

$$L_{OL}=0.075P_{AR}^{0.56}\exp[-0.759W_T+(3.790-2.223W_T)F_C]$$

(1)

式中: L_{OL} 为潜在生命损失; P_{AR} 为风险人口; W_T 为警报时间; F_C 为洪水强度(在高水力风险的峡谷区,水深流急,取 F_C 为 1;在低水力风险的平原区,水浅流

缓,取 F_c 为0)。

Graham在此基础上,提出了溃坝洪水生命损失计算公式(Graham, 1999):

$$L_{OL} = P_{AR} f_P \quad (2)$$

式中: L_{OL} 是指受到溃坝洪水淹没而遇害的死亡人数; P_{AR} 是指溃坝洪水淹没范围内遭受风险的人口数; f_P 为风险人口死亡率。Graham通过进一步的深入研究,提出了溃坝洪水生命损失死亡率建议值(尚志海等, 2010b),简单明了,得到了较为广泛的应用。但在世界各地的应用中,建议应根据各国的实际国情和社会经济状况加以适当修正和调整。

除了洪水灾害外,地震灾害生命损失也很受学者们重视。美国USGS发布了用于地震应急的全球地震快速评估系统,该系统可快速估计地震严重受灾地区的人口伤亡,采用最优化方法得到了基于地震烈度的人员死亡率,(Jaiswal et al, 2010)。国内学者施伟华等(2012)以1992-2010年云南地区破坏性地震的伤亡人数资料为主,将其分别与地震震级和烈度统计拟合,得到云南地区震级和烈度与死亡人数的关系曲线及表达式。

3.1.2 基于数学模型的分析方法

数学模型是在统计资料的基础上,结合生命风险的影响因子而形成的分析方法。姜树海等(2003)给出了洪水灾害生命损失的概念性表达形式:

$$L_{OL} = f(F_c, W_r, L, N) \quad (3)$$

式中: L_{OL} 为洪水灾害死亡人数; F_c 为洪水强度; W_r 为警报时间; L 为洪泛区土地利用状况和建筑物的抗洪性能; N 为洪水淹没区人口总数。由于所需资料较多,且各要素间的相互关系尚未定量化,因而这一方法尚无具体应用案例。

周克发等(2007)在Graham法的基础上,提出溃坝洪水生命损失评价模型:

$$L_{OL} = P_{AR} f_P a \quad (4)$$

该方法与Graham法的区别是增加了溃坝事件的严重程度系数 a 。这一模型实际上是对Graham方法的修正,但在计算人口死亡率时,重复考虑了溃坝洪水的严重性。

张桂荣等(2007)对区域滑坡灾害人口伤亡风险预测进行了研究,通过式(5)计算出每个评价单元(0.25 km^2)受滑坡威胁的人数,并绘制了浙江省永嘉县滑坡灾害人口伤亡风险栅格图。

$$R_{pi} = P_{li} V_{pi} D_{pi} \quad (5)$$

式中: R_{pi} 为第 i 单元在一定时间内滑坡灾害人口伤

亡风险预测值(人/ km^2); P_{li} 为第 i 单元在一定时间内滑坡发生的概率; V_{pi} 为第 i 单元内的人口易损性(主要受人口年龄结构、居民对滑坡灾害风险的防范意识、政府对滑坡灾害的重视程度及滑坡灾害预警预报体系的完善程度的影响); D_{pi} 为第 i 单元内的人口密度。

Badal等(2005)构建了利用震级、人口密度等指标评估人员伤亡的模型,并用来评估西班牙8个城市假设遭遇6级和6.5级地震时的人员伤亡数量。徐中春等利用1990-2009年中国历史地震灾情数据,建立地震烈度与人员死亡率之间的地震害灾人口死亡脆弱性曲线,利用地震灾害风险分析模型对中国各县域单元的人口死亡风险进行定量分析,分析模型为(Xu et al, 2011):

$$R = DEP \quad (6)$$

式中: R 为地震灾害人口死亡风险; D 为灾害破坏水平(指不同地震强度的人口敏感性); E 为暴露人口; P 为地震灾害发生概率。

尚志海等(2010b)初步建立了泥石流灾害生命损失风险评价模型。在新方法的使用上,王志军等(2008)将支持向量机(SVM)引入到灾害生命损失评估中,利用其对小样本统计学习的优势来克服资料缺乏的问题,借助其对非线性数据的处理能力来解决影响因素复杂问题。李升(2011)提出影响溃坝生命损失的13个因素,建立了改进支持向量机模型,其精度优于王志军等的SVM模型和改进的Graham法。基于数学模型的生命风险分析方法,需要的数据有时较难获取,因而会直接影响风险结果的准确性和可靠性。

3.1.3 基于情景模拟的分析方法

情景模拟不仅使用在灾害风险的相对分析中,也被大量应用于灾害风险的绝对分析中。Jonkman等(2008)认为,洪水灾害生命风险分析的基础是洪水特性、暴露人口以及暴露人口的死亡率,提出了洪水灾害生命损失分析的3个步骤:洪水特征模拟、风险人口分析、暴露人口死亡率估算,并提出洪水灾害死亡人数分析模型(Jonkman et al, 2009):

$$N = F_d N_{exp} \quad (7)$$

式中: N 为洪水死亡人数; F_d 为洪水事件死亡率; N_{exp} 为洪泛区暴露人口。

胡德秀等(2008)在综合分析大坝失事类型、失事时间、预警时间、历险人数和洪水强度等不确定性因素影响的基础上,将洪灾情景按不确定性分为

15种,并通过对国内外57座水库大坝失事统计数据的不确定性分析,给出了不同失事洪灾情景下可能导致的生命风险建议值。

总的来看,情景模拟在生命风险分析中的应用还处于探索阶段,由于生命风险的影响因素众多,且有些因素不易于直接定量分析,因此如何发挥情景模拟的优势,同时考虑生命风险的特征,将两者有机结合,是今后灾害生命风险分析的努力方向。

3.2 经济风险分析方法

3.2.1 基于期望损失的分析方法

在经济风险分析方法中,期望损失是经济风险的最常用表达方式,也是国内外学者都十分关注的研究领域(Ergonul, 2005; Crowley et al, 2006; Remondo et al, 2008; Apel et al, 2009)。荷兰学者采用的洪灾经济损失分析公式为(王宝华等, 2007):

$$D = \sum_i^n a_i n_i d_i \quad (8)$$

式中: D 为洪水灾害造成的经济损失值; a_i 为第 i 类资产的洪灾损失系数(与淹没深度有关); n_i 为第 i 类资产的数量; d_i 为第 i 类资产的估计最大损失值。

罗元华(2000)提出了泥石流灾害的受灾体破坏损失率的概念和计算方法,用于确定受灾体遭受泥石流灾害损害的强度,计算公式为:

$$S_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} M_{ij} \quad (9)$$

式中: S_m 为泥石流灾害风险损失; P_{ij} 为第 i 个分析单元的第 j 类受灾体的破坏损失率; M_{ij} 为第 i 个分析单元的第 j 类受灾体的经济价值; n 为分析单元个数; m 为受灾体类型个数。

汪敏等(2001)提出了滑坡灾害期望损失分析基本步骤:根据历史滑坡灾害活动规律以及滑坡灾害基础条件和激发条件的充分程度,分析滑坡灾害的活动频率以及不同频率下滑坡灾害的可能危害范围和危害强度;按照易损性分析中提出的方法核算受灾体价值以及不同强度危害下受灾体的价值损失率,然后计算灾害预估(期望)损失:

$$S(q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} I_{sij} J_{di} N_{ij} \quad (10)$$

式中: $S(q)$ 为滑坡灾害期望损失; i 为受滑坡灾害危害的受灾体类型; j 为受灾体损毁程度等级; P_{ij} 为评估区(单元)第 i 类受灾体遭受一定强度灾害危害后发生 j 级破坏的概率; I_{sij} 为 i 类受灾体发生 j 级破坏情况下的价值损失率; J_{di} 为 i 类受灾体平均单价; N_{ij} 为 i 类受灾体发生 j 级破坏的数量。

基于期望损失的经济风险分析,在国内外已经发展得比较成熟。在使用有关方法时,应注意不同灾害种类的承灾体及其易损性会略有差异,所以要具体问题具体分析。

3.2.2 基于土地利用的分析方法

近年来,基于土地利用类型的灾害经济风险分析受到学者们的重视(石勇等, 2009)。Jonkman等(2008)提出了一个集成模型用来分析洪水灾害损失,该模型综合了土地利用信息、社会经济数据和洪水特征资料等,并利用GIS技术来实现。Wang H W等(2013)对气候变化背景下台湾西南地区洪涝灾害脆弱性进行了评估,根据3种洪水情景,计算了最大淹没水深条件下不同土地利用区域的潜在灾害经济损失。唐川等(2006)探讨了以城市为承灾主体的泥石流灾害损失分析方法,包括泥石流堆积泛滥区的危险区划、城市土地覆盖类型遥感解译、损失评估模型构建和价值核算,分析模型概括为:“受灾体价值损失=受灾体成本价值×受灾体价值损毁度”。

赵庆良(2009)提出了基于不同淹没模拟情景的洪灾损失分析方法,计算公式如下:

$$L = CAV \quad (11)$$

式中: L 表示洪灾损失; C 表示单位面积不同土地利用类型成本价值; A 表示不同土地利用类型受灾面积; V 表示不同土地利用类型的洪灾脆弱度。

灾害经济风险分析遇到的主要困难为:各类承灾体的分布及其价值难以精确估算,不同类别承灾体的易损性特征难以真实体现,间接经济损失难以度量,以及灾害风险分析中如何体现时间因素的影响等(唐川等, 2002; Downton et al, 2005)。

3.3 生态环境风险分析方法

生态环境风险(简称生态风险)是由安全风险和健康风险发展而来(郭先华等, 2009),其评估在西方发达国家较受重视并得到广泛应用。美国环保局(Environmental Protection Agency, EPA)《生态风险评估指南》认为,生态风险是指一个种群、生态系统或整个景观的生态功能受到外界胁迫,从而在目前和将来对该系统健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值产生不良影响的一种状况(US EPA, 1998)。目前,生态风险研究主要集中在化学和物理胁迫以及人类活动对生态系统的威胁方面(付在毅&许学工, 2001; 许学工等, 2001),对由自然灾害造成的生态风险研究不多。

付在毅和许学工(2001)认为,生态风险源应该

包括灾害,生态风险是具有不确定性的事故或灾害对生态系统及其组分可能产生的不利作用,包括生态系统结构和功能的损害,从而危及生态系统安全和健康。许学工等(2001)和付在毅、许学工、林辉平等(2001)评估了自然灾害对黄河三角洲和辽河三角洲湿地生态系统的危害及其区域生态风险。许学工等(2011)选择10种自然灾害作为生态风险源,22种生态系统作为风险受体,根据风险源、脆弱性、风险受体3大指标,综合评估了中国自然灾害生态风险。尚志海和刘希林(2010c)以汶川地震极重灾区次生泥石流灾害为例,探讨了区域泥石流灾害生态环境风险评估的方法。总的来说,自然灾害生态风险的研究还比较少,尤其是不同自然灾害造成的生态风险还需根据其差异性展开深入的研究。

3.4 风险绝对值分析方法的适用性

由于中国自然灾害生命损失记录不全、历史不长,以及人口众多、伤亡严重等原因,国外建立的生命损失模型在中国的应用并不十分理想,目前尚未发展出适合中国的基于历史资料的生命风险分析方法。在实际应用中,学者们多在外国模型的基础上不断修正,用改进的分析模型对中国自然灾害生命风险损失进行粗略估算。

基于数学模型的生命风险分析方法还处于发展初期,只有地震、洪水、滑坡泥石流灾害有了一些初步的分析模型,模型的适用性尚待验证,但这也是生命风险定量分析绝对值表达的必经阶段。基于情景模拟的分析方法是生命风险分析的发展方向,但在应用过程中定性数据的有效处理将直接关系到该分析结果精度。

与生命风险分析方法相比,经济风险分析方法已趋成熟。基于期望损失和基于土地利用的经济风险分析方法都得到了良好的应用。应用高新技术,尤其是结合土地利用、GIS技术和RS集成,提高分析精度和效率,将是今后努力的方向。

在自然灾害风险分析的绝对值表达中,生态环境风险的定量分析研究成果很少,这与当今世界人们对高质量生活和居住环境的强烈追求愿望十分不符,生态环境风险的定量分析方法与科学合理表达,还有很大的探索空间。

4 结语

自然灾害风险分析是灾害风险研究的核心内

容,无论采用何种风险分析方法,都应明确风险内涵、辨明风险源、识别风险类型、进行风险分析,评估风险后果,最后实施风险管理。在这一系列环节中,风险分析是其中不可缺少的关键一环。不同的风险分析方法可能会产生不同的风险评估结果,因此正确认识风险分析方法的实质及其适用性,是确保风险成功管理的前提。

根据风险表达方式的差异,自然灾害风险分析方法可以分为基于风险相对值和绝对值的两大类方法。基于风险相对值的分析方法,根据不同学者对风险定义理解的差异,包括基于风险概率、期望损失、风险情景3种主要分析方法。基于风险绝对值的分析方法,根据自然灾害风险后果的不同,主要有生命风险、经济风险、生态环境风险分析方法3种。概括起来,风险分析方法的选取主要取决于灾害历史资料、数学评估模型和情景模拟技术。基于历史资料的方法受制于资料来源的可靠性和累积程度;基于数学模型的方法其优点是较易操作,缺点是由于不同的评估模型,其风险分析结果可能会产生较大差异;不论是在风险相对值还是绝对值表达中,基于情景模拟的方法都是今后发展的方向,在数据收集途径和数据处理技术方面还有需要改进和完善之处。

基于风险相对值和绝对值的分析方法既有不同之处,也有共同特征。自然灾害风险的相对值表达在先,分析方法种类繁多,简单易行,应用广泛;自然灾害风险的绝对值表达在后,分析方法种类不少,但指标众多,计算繁复,尽管如此,也势在必行,是现代风险社会精细化管理之必须。两类风险分析方法的共同之处,都是以风险分析的定量表达为目标,风险分析的基础数据获得、数学模型选取、新技术手段的运用,都是决定风险分析方法适用性的控制因素,其共同面临的挑战都包括对灾害风险不确定性的处理、如何区分客观知识和主观价值、以及对生命价值的理解 and 环境破坏的处置。

风险分析方法可以根据风险分析目标、可用的信息数据分为不同的层次。风险分析方法包括定性、半定量、定量以及它们的组合,其选取取决于风险分析的情景。自然灾害风险分析的核心并不是为了不断追求令人炫目的新技术和新方法,而是要力图从根本上搞清楚灾害风险的形成机制,找到灾害风险的合理表达途径,并使得风险分析结果能够得到可靠性检验,并最终服务于灾害风险管理。

参考文献(References)

- 陈成名. 2010. 西南山区城镇地质灾害易损性评价理论与实践: 以汶川县为例[D]. 成都: 成都理工大学. [Chen C M. 2010. Study on vulnerability assessment of geo-hazards in southwest mountainous towns: Wenchuan County Town as an example[D]. Chengdu, China: Chengdu University of Technology.]
- 付在毅, 许学工. 2001. 区域生态风险评价. 地球科学进展, 16(2): 267-271. [Fu Z Y, Xu X G. 2001. Regional ecological risk assessment. Advance In Earth Sciences, 16(2): 267-271.]
- 付在毅, 许学工, 林辉平, 等. 2001. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价. 生态学报, 21(3): 365-373. [Fu Z Y, Xu X G, Lin H P, et al. 2001. Regional ecological risk assessment in the Liaohe River Delta wetlands. Acta Ecologica Sinica, 21(3): 365-373.]
- 盖程程, 翁文国, 袁宏永. 2011. 基于GIS的多灾种耦合综合风险评估. 清华大学学报: 自然科学版, 51(5): 627-631. [Gai C C, Weng W G, Yuan H Y. 2011. Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 51(5): 627-631.]
- 郭先华, 崔胜辉, 赵千钧. 2009. 城市水源地生态风险评价. 环境科学研究, 22(6): 688-694. [Guo X H, Cui S H, Zhao Q J. 2009. Ecological risk assessment for urban water sources. Research of Enviromental Sciences, 22(6): 688-694.]
- 胡德秀, 周孝德, 杨杰. 2008. 基于不确定性分析的溃坝失事生命损失风险概率估算方法. 西安理工大学学报, 24(2): 133-138. [Hu D X, Zhou X D, Yang J. 2008. Risk probability evaluation based on uncertainty analysis for loss of life by dam failure. Journal of Xi'an University of Technology, 24(2): 133-138.]
- 黄崇福. 2011. 风险分析基本方法探讨. 自然灾害学报, 20(5): 1-10. [Huang C F. 2011. Discussion on basic methods for risk analysis. Journal of Natural Disasters, 20(5): 1-10.]
- 黄崇福. 2012. 自然灾害风险分析与管理. 北京: 科学出版社. [Huang C F. 2012. Ziran zaihai fengxian fenxi yu guangli. Beijing, China: Science Press.]
- 黄崇福, 刘安林, 王野. 2010. 灾害风险基本定义的探讨. 自然灾害学报, 19(6): 8-16. [Huang C F, Liu A L, Wang Y. 2010. A discussion on basic definition of disaster risk. Journal of Natural Disasters, 19(6): 8-16.]
- 姜树海, 范子武. 2003. 大坝的允许风险及其运用研究. 水利水电工程学报, 25(3): 7-12. [Jiang S H, Fan Z W. Study of tolerable risk analysis for dam safety. Hydro-science and Engineering, 25(3): 7-12.]
- 蒋泽军. 2004. 模糊数学教程. 北京: 国防工业出版社. [Jiang Z J. 2004. Mohu shuxue jiaocheng. Beijing, China: National Defense Industry Press.]
- 金菊良, 邴建强, 周玉良, 等. 2014. 旱灾风险评估的初步理论框架. 灾害学, 29(3): 1-10. [Jin J L, Li J Q, Zhou Y L, et al. 2014. Theoretical framework of drought risk assessment. Journal of Catastrophology, 29(3): 1-10.]
- 金有杰. 2013. 基于GIS的潍坊市暴雨洪涝灾害损失评估方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. [Jin Y J. 2013. The Weifang City flood and waterlogging disaster loss evaluation method research based on GIS[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science and Technology.]
- 李琼. 2012. 洪水灾害风险分析与评价方法的研究及改进[D]. 武汉: 华中科技大学. [Li Q. 2012. The research and improvement of risk analysis and evaluation method on flood disaster[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology.]
- 李升. 2011. 大坝安全风险关键技术研究及其系统开发[D]. 天津: 天津大学. [Li S. 2011. Key technology research and system development of dam safety risk management[D]. Tianjin, China: Tianjin University.]
- 刘敏, 权瑞松, 许世远. 2012. 城市暴雨内涝灾害风险评估: 理论、方法与实践. 北京: 科学出版社. [Liu M, Quan R S, Xu S Y. 2012. Risk assessment of urban rainstorm waterlogging disaster: theory, methods and practice. Beijing, China: Science Press.]
- 刘希林, 唐川. 1995. 泥石流危险性评价. 北京: 科学出版社. [Liu X L, Tang C. 1995. Danger assessment on debris flow. Beijing, China: Science Press.]
- 刘耀龙. 2011. 多尺度自然灾害情景风险评估与区划: 以浙江省温州市为例[D]. 上海: 华东师范大学. [Liu Y L. 2011. Multi-scale natural disaster scenarios' risk assessment and zoning: a case study of Wenzhou City, Zhejiang Province[D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 娄伟平, 陈海燕, 郑峰, 等. 2009. 基于主成分神经网络的台风灾害经济损失评估. 地理研究, 28(5): 1243-1254. [Lou W P, Chen H Y, Zheng F, et al. 2009. Economic loss assessment of typhoon based on principal component analysis and neural network. Geographical Research, 28(5): 1243-1254.]
- 罗元华. 2000. 泥石流堆积区灾害破坏损失评价方法. 中国地质矿产经济, 18(4): 33-36. [Luo Y H. Method on evaluation of losses of disasters in the regions of debris flow accumulation. China Geology and Mining Economics, 18(4): 33-36.]
- 马玉宏, 赵桂峰. 2008. 地震灾害风险分析及管理. 北京: 科学出版社. [Ma Y H, Zhao G F. 2008. Dizhen zaihai fengxian fenxi ji guangli. Beijing, China: Science Press.]
- 齐信, 唐川, 陈州丰, 等. 2012. 地质灾害风险评估研究. 自然灾害学报, 21(5): 33-40. [Qi X, Tang C, Chen Z F, et al. Research of geohazards risk assessment. Journal of Natural Disasters, 21(5): 33-40.]
- 权瑞松. 2012. 典型沿海城市暴雨内涝灾害风险评估研究

- [D]. 上海: 华东师范大学. [Quan R S. 2012. Research on risk assessment of rainstorm waterlogging disaster in typical coastal city[D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 尚志海, 刘希林. 2010a. 可接受风险与灾害研究. 地理科学进展, 29(1): 23-30. [Shang Z H, Liu X L. 2010a. Acceptable risk and disaster research. Progress in Geography, 29(1): 23-30.]
- 尚志海, 刘希林. 2010b. 泥石流灾害生命损失风险评价初步研究. 安全与环境学报, 10(4): 184-188. [Shang Z H, Liu X L. 2010n. Preliminary risk evaluation study on life loss due to debris flow disaster. Journal of Safety and Environment, 10(4): 184-188.]
- 尚志海, 刘希林. 2010c. 自然灾害生态环境风险及其评价: 以汶川地震极重灾区次生泥石流灾害为例. 中国安全科学学报, 20(9): 3-8. [Shang Z H, Liu X L. 2010c. Assessment on eco-environmental risk and losses for natural disasters: with the disaster of debris flow induced by Wenchuan Earthquake as an example. China Safety Science Journal, 20(9): 3-8.]
- 尚志海, 刘希林. 2014. 自然灾害风险管理关键问题探讨. 灾害学, 29(2): 159-164. [Shang Z H, Liu X L. 2014. Discussion on the key problems of natural disaster risk management. Journal of Catastrophology, 29(2): 159-164.]
- 施伟华, 陈坤华, 谢英情, 等. 2012. 云南地震灾害人员伤亡预测方法研究. 地震研究, 35(3): 387-392. [Shi W H, Chen K H, Xie Y Q, et al. 2012. Prediction method research on casualties due to earthquake disaster in Yunnan. Journal of Seismological Research, 35(3): 387-392.]
- 石勇. 2010. 灾害情境下城市脆弱性评估研究: 以上海市为例[D]. 上海: 华东师范大学. [Shi Y. 2010. Research on vulnerability assessment of cities on the disaster scenario: a case study of Shanghai City[D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 石勇, 许世远, 石纯, 等. 2009. 洪水灾害脆弱性研究进展. 地理科学进展, 28(1): 41-46. [Shi Y, Xu S Y, Shi C, et al. A review on development of vulnerability assessment of floods. Progress in Geography, 28(1): 41-46.]
- 史培军. 2005. 四论灾害系统研究的理论与实践. 自然灾害学报, 14(6): 1-7. [Shi P J. 2005. Theory and practice on disaster system research in a fourth time. Journal of Natural Disasters, 14(6): 1-7.]
- 孙铮. 2008. 城市自然灾害定量评估方法及应用[D]. 青岛: 中国海洋大学. [Sun Z. 2008. Quantitative methodology and application of urban natural disaster assessment[D]. Qindao, China: Ocean University of China.]
- 唐川, 张军, 万石云, 等. 2006. 基于高分辨率遥感影像的城市泥石流灾害损失评估. 地理科学, 26(3): 358-363. [Tang C, Zhang J, Wan S Y, et al. 2006. Loss evaluation of urban debris flow hazard using high spatial resolution satellite imagery. Scientia Geographica Sinica, 26(3): 358-363.]
- 唐川, 朱大奎. 2002. 基于 GIS 技术的泥石流风险评价研究. 地理科学, 22(3): 300-304. [Tang C, Zhu D K. 2002. Assessment of debris flow risk of Yunnan Province by using GIS. Scientia Geographica Sinica, 22(3): 300-304.]
- 汪敏, 刘东燕. 2001. 滑坡灾害风险分析中的易损性及破坏损失评价研究. 工程勘察, (3): 7-11. [Wang M, Liu D Y. 2001. Study on evaluation of damage susceptibility and failure loss in analyzing landslide disaster. Geotechnical Investigation and Surveying, (3): 7-11.]
- 王宝华, 付强, 谢永刚, 等. 2007. 国内外洪水灾害经济损失评估方法综述. 灾害学, 22(3): 95-99. [Wang B H, Fu Q, Xie Y G, et al. 2007. A review on evaluation method of economic loss of flood in the world. Journal of Catastrophology, 22(3): 95-99.]
- 王天化. 2010. 水库大坝安全应急管理区域风险分析及损失评估方法研究[D]. 武汉: 长江科学院. [Wang T H. 2010. Study on the risk analysis of dam safety emergency management region and the methods of losses assessment[D]. Wuhan, China: Changjiang River Scientific Research Institute.]
- 王志军, 顾冲时, 娄一青. 2008. 基于支持向量机的溃坝生命损失评估模型及应用. 水力发电, 34(1): 67-70. [Wang Z J, Gu C S, Lou Y Q. 2008. Model for evaluation of loss-of-life caused by dam breach based on support vector machine. Water Power, 34(1): 67-70.]
- 温家洪, 黄蕙, 陈珂, 等. 2012. 基于社区的台风灾害概率风险评估: 以上海市杨浦区富禄里居委地区为例. 地理科学, 32(3): 348-355. [Wen J H, Huang H, Chen K, et al. 2012. Probabilistic community-based typhoon disaster risk assessment: a case of Fululi Community, Shanghai. Scientia Geographica Sinica, 32(3): 348-355.]
- 巫丽芸, 何东进, 洪伟, 等. 2014. 自然灾害风险评估与灾害易损性研究进展. 灾害学, 29(4): 129-135. [Wu L Y, He D J, Hong W, et al. 2014. Research advances and prospects of natural disaster risk assessment and vulnerability assessment. Journal of Catastrophology, 29(4): 129-135.]
- 肖辞源. 2005. 工程模糊系统. 北京: 科学出版社. [Xiao C Y. 2005. Gongcheng mohu xitong. Beijing, China: Science Press.]
- 肖义. 2004. 水库大坝防洪安全标准及风险研究[D]. 武汉: 武汉大学. [Xiao Y. 2004. Study on safety standards and risk of reservoir dams[D]. Wuhan, China: Wuhan University.]
- 许学工, 林辉平, 付在毅. 2001. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价. 北京大学学报: 自然科学版, 37(1): 111-120. [Xu X G, Lin H P, Fu Z Y. 2001. Regional ecological risk assessment of wetland in the Huanghe River Delta. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 37(1): 111-120.]
- 许学工, 颜磊, 徐丽芬, 等. 2011. 中国自然灾害生态风险评

- 价. 北京大学学报: 自然科学版, 47(5): 901-908. [Xu X G, Yan L, Xu L F, et al. 2011. Ecological risk assessment of natural disasters in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 47(5): 901-908.]
- 殷杰, 尹占娥, 王军, 等. 2009. 基于GIS的城市社区暴雨内涝灾害风险评估. *地理与地理信息科学*, 25(6): 92-95. [Yin J, Yin Z E, Wang J, et al. 2009. GIS-based disaster risk assessment of the urban community rainstorm water-logging. *Geography and Geo-Information Science*, 25(6): 92-95.]
- 尹圆圆, 王静爱, 黄晓云, 等. 2014. 全球尺度的旱灾风险评估指标与模型研究进展. *干旱区研究*, 31(4): 619-626. [Yin Y Y, Wang J A, Huang X Y, et al. 2014. Progress of indices and models of drought risk assessment at global scale. *Arid Zone Research*, 31(4): 619-626.]
- 尹占娥. 2009. 城市自然灾害风险评估与实证研究[D]. 上海: 华东师范大学. [Yin Z E. 2009. Research of urban natural disaster risk assessment and case study[D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 2010. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估. *地理学报*, 65(5): 553-562. [Yin Z E, Xu S Y, Yin J, et al. 2010. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging. *Acta Geographica Sinica*, 65(5): 553-562.]
- 张桂荣, 殷坤龙, 陈丽霞. 2007. 浙江省永嘉县区域滑坡灾害人口易损性评价和伤亡风险预测. *地质科技情报*, 26(4): 70-75. [Zhang G R, Yin K L, Chen L X. 2007. Population vulnerability assessment on regional landslide hazards and casualty risk forecasting in Yongjia County, Zhejiang Province. *Geological Science and Technology Information*, 26(4): 70-75.]
- 张继权, 李宁. 2007. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及其应用. 北京: 北京师范大学出版社. [Zhang J Q, Li N. 2007. Quantitative methods and applications of risk assessment and management on main meteorological disasters. Beijing, China: Beijing Normal University Publishing Group.]
- 赵庆良. 2009. 沿海山地丘陵型城市洪灾风险评估与区划研究: 以温州龙湾区为例[D]. 上海: 华东师范大学. [Zhao Q L. 2009. Research on flood risk assessment and risk zoning in coastal mountainous and hilly city: a case study of Longwan District, Wenzhou City[D]. Shanghai, China: East China Normal University.]
- 赵思健, 黄崇福, 郭树军. 2012. 情景驱动的区域自然灾害风险分析. *自然灾害学报*, 21(1): 9-17. [Zhao S J, Huang C F, Guo S J. 2012. Scenario-driven risk analysis of regional natural disasters. *Journal of Natural Disasters*, 21(1): 9-17.]
- 周克发, 李雷, 盛金保. 2007. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究. *安全与环境学报*, 7(3): 145-149. [Zhou K F, Li L, Sheng J B. 2007. Evaluation model of loss of life due to dam breach in China. *Journal of Safety and Environment*, 7(3): 145-149.]
- 朱大奇, 史慧. 2006. 人工神经网络原理及应用. 北京: 科学出版社. [Zhu D Q, Shi H. 2006. Rengong shenjing walu yuanli ji yingyong. Beijing, China: Science Press.]
- Aleotti P, Chowdhury R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1): 21-44.
- Apel H, Aronica G T, Kreibich H, et al. 2009. Flood risk analyses: how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1): 79-98.
- Armenakis C, Nirupama N. 2013. Prioritization of disaster risk in a community using GIS. *Natural Hazards*, 66(1): 15-29.
- Badal J, Vazquez-prada, Gonzale A. 2005. Preliminary quantitative assessment of earthquake casualties and damages. *Natural Hazards*, 34(3): 353-374.
- Benito G, Lang M, Barriendos M, et al. 2004. Use of systematic, palaeo flood and historical data for the improvement of flood risk estimation, review of scientific methods. *Natural Hazards*, 31(3): 623-643.
- Brown C A, Graham W J. 1988. Assessing the threat to life from dam failure. *Water Resources Bulletin*, 24(6): 1303-1309.
- Carrara A, Guzzetti F, Cardinali M, et al. 1999. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards*, 20(2-3): 117-135.
- Crowley H, Bommer J J. 2006. Modelling seismic hazard in earthquake loss models with spatially distributed exposure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(3): 249-273.
- Dekay M L, McClelland G H. 1993. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood. *Risk Analysis*, 13(2): 193-205.
- Downton M W, Pielke R A. 2005. How accurate are disaster loss data? the case of U.S. flood damage. *Natural Hazards*, 35(2): 211-228.
- Ergonul S. 2005. A probabilistic approach for earthquake loss estimation. *Structural Safety*, 27(4): 309-321.
- Fischhoff B, Lichtenstein S, Slovic P, et al. 1981. Acceptable risk. New York, NY: Cambridge University Press.
- Fu X Y, Svoboda M, Tang Z H, et al. 2013. An overview of US state drought plans: crisis or risk management? *Natural Hazards*, 69(3): 1607-1627.
- Ge Y, Dou W, Gu Z H, et al. 2013. Assessment of social vulnerability to natural hazards in the Yangtze River Delta, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(8): 1899-1908.
- Gong Z W, Forrest J Y. 2014. Special issue on meteorological disaster risk analysis and assessment: on basis of grey systems theory. *Natural Hazards*, 71(2): 995-1000.
- Graham W J. 1999. A procedure for estimating loss of life

- caused by dam failure. DSO-99-06. Denver, CO: Dam Safety Office, US Department of Interior Bureau of Reclamation.
- Holec J, Bednarik M, Sabo M, et al. 2013. A small-scale landslide susceptibility assessment for the territory of Western Carpathians. *Natural Hazards*, 69(1): 1081-1107.
- IPCC. 2012. managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jaiswal K S, Wald D J. 2010. An empirical model for global earthquake fatality estimation. *Earthquake Spectra*, 26(4): 1017-1037.
- Jonkman S N, Bočkarjova M, Kok M, et al. 2008. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands. *Ecological Economics*, 66(1): 77-90.
- Jonkman S N, Maaskant B, Boyd E, et al. 2009. Loss of life caused by the flooding of New Orleans after Hurricane Katrina: analysis of the relationship between flood characteristics and mortality. *Risk Analysis*, 29(5): 676-698.
- Jonkman S N, Van Gelder P H, Vrijling J K. 2003. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*, 99(1): 1-30.
- Jonkman S N, Vrijling J K, Vrouwenvelder A C W M. 2008. Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method. *Natural Hazards*, 46(3): 353-389.
- Kaplan S, Garrick B J. 1981. On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, 1(1): 11-27.
- Kappes M S, Papathoma-Köhle M, Keiler M. 2012. Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32(2): 577-590.
- Lee G, Jun K S, Chung E S. 2013. Integrated multi-criteria flood vulnerability approach using fuzzy TOPSIS and Delphi technique. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(5): 1293-1312.
- Liu Y L, Chen Z L, Wang J, et al. 2012. Large-scale natural disaster risk scenario analysis: a case study of Wenzhou City, China. *Natural Hazards*, 60(3): 1287-1298.
- Mosquera-Machado S, Dilley M. 2009. A comparison of selected global disaster risk assessment results. *Natural Hazards*, 48(3): 439-456.
- Nicola A D, McCallister A. 2006. Existing experiences of risk assessment. *European Journal on Criminal Policy and Research*, 12(3): 179-187.
- Park S, Choi C, Kim B, et al. 2013. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea. *Environmental Earth Sciences*, 68(5): 1443-1464.
- Penning-Rowsell E C, Chatterton J B. 1977. The benefits of flood alleviation: a manual of assessment techniques. Farnborough, UK: Saxon House.
- Remondo J, Bonachea J, Cendrero A. 2008. Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences. *Geomorphology*, 94(3-4): 496-507.
- Sanyal J, Lu X X. 2005. Remote sensing and GIS-based flood vulnerability assessment of human settlements: a case study of Gangetic West Bengal, India. *Hydrological Processes*, 19(18): 3699-3716.
- Shi P, Shuai J, Chen W, et al. 2010. Study on large-scale disaster risk assessment and risk transfer models. *International Journal of Disaster Risk Science*, 1(2): 1-8.
- Sun Z Y, Zhang J Q, Zhang Q, et al. 2014. Integrated risk zoning of drought and waterlogging disasters based on fuzzy comprehensive evaluation in Anhui Province, China. *Natural Hazards*, 71(3): 1639-1657.
- UNDP. 2004. Reducing disaster risk: a challenge for development[DB/OL]. 2004-4-10[2014-10-1]. <http://www.undp.org/bcpr>
- US EPA. 1998. Guidelines for ecological risk assessment. 1-10. Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- Wang H W, Kuo P H, Shiau J T. 2013. Assessment of climate change impacts on flooding vulnerability for lowland management in southwestern Taiwan. *Natural Hazards*, 68(2): 1001-1019.
- Wang J, Chen Z, Xu S Y, et al. 2013. Medium-scale natural disaster risk scenario analysis: a case study of Pingyang County, Wenzhou, China. *Natural Hazards*, 66(2): 1205-1220.
- Xu Z C, Wu S H, Dai E F, et al. 2011. Quantitative assessment of seismic mortality risks in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2(1): 83-90.
- Yin J, Yin Z E, Xu S Y. 2013. Composite risk assessment of typhoon-induced disaster for China's coastal area. *Natural Hazards*, 69(2): 1423-1434.

Risk analysis methods of natural disasters and their applicability

LIU Xilin^{1,2}, SHANG Zhihai³

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, Guangzhou 510275, China;

3. Department of Geography, Lingnan Normal College, Zhanjiang 524048, Guangdong, China)

Abstract: Risk analysis method for natural disasters is one of the key questions of risk research, and it directly affects the data needed for analysis, the selection of mathematical models, and the reliability of analysis results. There have been numerous published research on risk analysis methods. The applicability and reliability of these methods may determine whether the result of risk analysis is useful and may influence risk management. Among existing research, relative level of risk has been examined more often than absolute risk. However, the choice of method should be based on objective of the analysis and risk categories. This article reviews the advantages and disadvantages of various existing quantitative risk analysis methods and analyzes their applications and suitability. The following are found through this review. First, relative risk analysis methods may be divided into three categories, that is, probability analysis, expected loss analysis, and scenario simulation. Among the three types of methods, probability analysis methods have been commonly used in long time series data and macro-scale analysis. The limitation to their application is that historical disaster data may not be easily available. Expected loss analysis methods may be easily applied and are mostly used in analysis at medium -spatial scales, but their predictive power is weak. The precision of the methods based on scenario analysis is high, and they are widely applied in micro-scale analysis where basic data are sufficient. Secondly, for absolute risk, loss of life been the focus of attention and may be examined through historical data analysis, mathematical models, and scenario simulation. Those methods based on historical data analysis need to be improved. Usually the methods for analyzing the risk of loss of life from international studies cannot be directly applied in research for China. Mathematical models for analyzing the risk of loss of life still need to be tested because quantification of qualitative data require greater scrutiny. Scenario analysis methods are most promising and represent the future direction of analyzing the risk of loss of life from natural disasters. In addition, economic risk analysis based on expected losses and land use using remote sensing and GIS techniques are commonly practiced. Ecological-environmental risk analysis is relatively weak among the three types of risks due to the difficulty in quantifying ecological-environmental values. In the future, more attention should be paid to scenario analysis and the role of land use for the absolute risk. Last, similarities and differences are found among the analysis methods of both relative risks and absolute risks. No matter what types of risks are being assessed, the choice of method should be based on risk mechanism, scale of study, and application of modern technologies in order to improve the usability of risk analysis methods and the reliability of the result of analysis.

Key words: natural disaster; risk analysis; quantitative methods; applicability