

用信息扩散模型改进台风风险估计

黄崇福^{1,2,3}

(1. 北京师范大学 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 教育部/民政部
减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875)

摘要 频繁且随机发生的台风, 其风险是概率风险, 具有统计学的意义. 用历史台风的损失记录作为样本来量化风险时, 台风风险就是台风损失样本的平均值, 它必等于由台风发生概率和易损性耦合估计出的损失期望值. 当统计资料较少时, 由于信息扩散模型能提高小样本的工作效率, 消除用简单统计方法估计风险时出现的平缓和跳空现象, 较好地表现统计规律, 从而能改进台风风险的估计精度. 按年分段形成的多个样本函数可用于计算物理意义明确的台风年度风险值, 并可用信息扩散模型对其加以改进. 蒙特卡罗法并不具有改进风险评估精度的功能. 本文以浙江省部分历史台风资料为样本, 演示了台风风险的估计. 信息扩散模型的改进程度如何, 将另文用计算机仿真的方法来加以检验.

关键词 台风; 年度风险; 样本函数; 信息扩散; 浙江省

Improving estimation of typhoon risk by using information diffusion model

HUANG Chongfu^{1,2,3}

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract The risk of typhoon occurring frequently and randomly is probability risk that has a statistical significance. When we quantify a typhoon risk by using loss records of historical typhoons as a sample, the typhoon risk is the average of the sample. The average is equal to the expected value of the loss that is estimated by coupling the probability of occurrence of typhoon and the vulnerability. When the statistical data is not much, the information diffusion model can improve the work efficiency of the sample, eliminate the flat and gap phenomenon in estimating risk with a simple statistical method, and more better show the statistical regulation, so that the model can improve the accuracy of estimating typhoon risk. A number of sample functions formed by yearly segmentation can be used to calculate the typhoon risk per year of a clear physical meaning. The information diffusion model also can improve the estimation of the risk per year. The Monte Carlo method cannot improve the accuracy of risk assessment. In this paper, some historical typhoon data in Zhejiang province are used as samples to demonstrate the estimation of typhoon risk. Using the computer simulation method in a subsequent article, we will show how degree the information diffusion model can improve an estimation of typhoon risk.

Keywords typhoon; risk per year; sample function; information diffusion; Zhejiang province

收稿日期: 2017-03-28

作者简介: 黄崇福 (1958-), 男, 云南个旧人, 教授, 研究方向: 自然灾害风险分析, 模糊信息优化处理, 物联网, 实验风险学.

基金项目: 国家自然科学基金 (41671502, 41471424, 41471426)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41671502, 41471424, 41471426)

中文引用格式: 黄崇福. 用信息扩散模型改进台风风险估计 [J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(9): 2315-2325.

英文引用格式: Huang C F. Improving estimation of typhoon risk by using information diffusion model[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(9): 2315-2325.

1 引言

台风每年给我国沿海地区造成严重的灾害, 制约着当地社会和经济的发展. 例如, 仅仅 2016 年 10 月 18 日在海南省万宁市登陆的台风“莎莉嘉”就造成海南、广西、广东 3 省直接经济损失 52.9 亿元. 提高台风频发地区台风风险的管理能力, 有效减轻台风灾害, 对确保可持续发展至为重要. 台风风险管理的首要工作, 是对台风风险有所研究, 对给定地区估计出台风风险水平.

通过对台风机理的研究和对社会系统在台风中的脆弱性的认识, 分析出台风风险水平, 理论上最为信, 而且人们已经在这两方面做了大量的努力. 人们早已从气候的视角总结了与台风形成有关的大量因素, 包括海面温度和暖水层厚度、对流不稳定、低层绝对涡度、高空辐散场等. 大量的台风个案分析揭露出台风的发生发展还与下垫面、冷空气、高空急流、西风槽、中小尺度系统等有关. 台风机理的研究甚至细化到了将影响我国近海台风强度变化的因子分为三类: 环境场、热带气旋内部结构和海洋, 同时也对影响和登陆我国的热带气旋基本气候特征进行了研究, 包括频数、强度的年际变化特征, 登陆位置的变化趋势、登陆初旋及终旋的变化特征等.

尽管早在 1967–2005 间的两千多份权威出版物中, 脆弱性术语现身了近千次, 近年来脆弱性一词更加热门, 甚至引伸到了社会系统 Resilience 的研究^[1]. 对此泊来热词的认识, 五花八门, 一些人视其为“恢复力”^[2], 另一些人则认为是“弹性”^[3], 还有人认为是“韧性”^[4]. 客观地讲, 人们至今对脆弱性的研究仍没有重大突破, 问题可能在于人们过分纠缠概念和结构, 具体的模型和方法受主观因素影响过重, 加权处理和层次分析法比比皆是. 本文认为, 脆弱性概念是易损性概念从独立承灾体向社会系统的拓展, 虽然理论上不排除恢复力、弹性、韧性等社会经济要素, 但脆弱性的核心还是系统的易损性. 对社会系统在台风下的脆弱性评价, 重点是易损性评价, 亦即是识别一个时段内社会系统的“台风强度 - 灾害程度曲线”. 这种曲线不可能主观给出, 而是要进行大量因果关系的研究. 最简单的方法是用同一发展时期的台风灾害数据统计出一条脆弱性曲线, 并用某种理论曲线来修订统计结果, 例如, 引入庞加莱 - 契达耶夫方程, 建立社会发展的广义力学系统运动微分方程, 在相关边界条件下求得的脆弱性曲线, 有望对修订提供帮助.

然而, 无论是对台风机理的研究, 还是对社会系统脆弱性的认识, 都还远没有达到用现有的数学模型和相关资料, 能较可靠地计算出一个省级区域台风年度风险的水平. 目前, 大量的台风风险计算, 仍然是基于历史台风灾害资料, 用概率统计模型来进行. 尤其对保险公司而言, 台风风险的概率意义更为重要^[5]. 在许多台风风险的模式识别方法中, 多元统计仍是首选^[6]. 换言之, 人们今天所谈论的台风风险, 是以往台风灾害现象的统计结果, 是统计意义上的台风风险, 而不是由台风机理和社会脆弱性推导出来的风险. 那么, 台风风险的统计学意义到底是什么? 估计出来的风险值存在什么问题? 如何改进? 本文和后续的用计算机仿真检验改进效果一文, 是在文 [7] 的基础上, 对用信息扩散模型来改进估计精度展开更详尽的讨论.

2 风险的统计学意义

从数学的观点看, 统计学是应用数学的一个分支, 主要通过利用概率论建立的数学模型, 对收集的大量数据和资料进行量化分析、总结, 对相关现象进行推断和预测, 为管理决策提供依据和参考.

从学科体系上看, 统计学并非应用数学的一个分支, 而是一门独立的学科. 最早的统计学, 是对各地区的历史、行政、科学、艺术、人口、资源和财富等社会和经济情况的比较、分析、具有社会科学特点. 直到十七世纪, 统计方法才与数学计算和推理方法开始结合, 运用定量方法分析社会经济问题. 今天, 统计学家们研究的重点, 仍然是数据收集、数据整理. 数学模型的应用, 只是统计学的一部分工作. 正因为如此, 西方的大学中, 统计学并不设在数学系内. 用数学方法进行统计分析的学科, 通常称为数理统计.

当我们研究台风风险时, 数据收集、数据整理也是非常重要的工作, 但多由政府部门承担, 我们更关注的是用什么样的数学模型处理获得的数据, 才能较为可靠地评估出风险值. 本文所指台风风险的统计学意义, 是数理统计上的统计学意义^[8].

今天, 数理统计的理论和方法已经非常成熟, 但人们对风险的认识, 仍有一个从定性到定量; 从粗糙到精细的过程. 这主要是受到数据资料的制约. 我们认为, 风险是与某种不利事件有关的一种未来情景^[9]. 风险情景, 有时可以定量描述, 有时则不可以. 例如, 从图 1 所示的 2015–2016 年中国房地产泡沫“魔鬼”, 人们能

感觉到崩盘的风险越来越大, 但政府全力以赴保护泡沫, 人们无法计算风险有多大, 只能定性地认识到风险正在积累. 特别地, 当严厉的房地产调控异化成饥饿营销的手段; 2016年10月开始调控, 2017年3月人们就普遍看涨时, 人们甚至分不清是“魔鬼”还是“天使”, 更惶论用数理统计方法进行风险的定量分析.

要用数理统计方法定量描述风险, 必须有一定数量的统计样本. 例如, 搬进新家的床没放好, 会出现吃不饱睡不香的现象. 风水学关于卧室内床的摆放, 有许多的忌禁, 其实是风险问题. 图2所示的摆放均使睡在床上的人暴露在身体受损的风险之中.

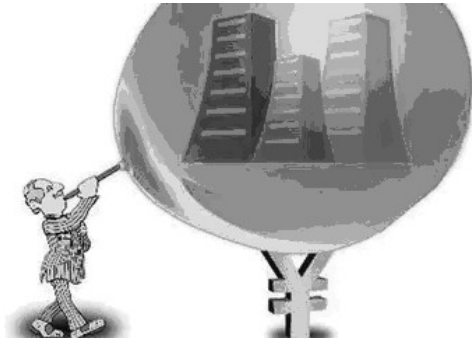


图1 2015–2016年中国房地产泡沫“魔鬼”正加速聚积着金融风险

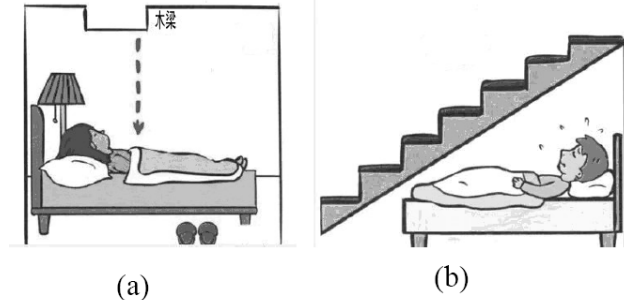


图2 风水学关于卧室内床的摆放忌禁是风险问题. (a) 睡在横梁下, 人体的微电系统 (尤其是大脑、心脏) 会直接受到负面影响, 造成睡眠不足、头痛等现象. (b) 床在楼梯下方的人, 睡眠状况一定不会好, 经常恶梦不断, 运势也会非常差

三月两月内, 睡在摆放不当床上的人, 身体受损的风险并不明显. 长年累月睡在这种床上的人, 风险不可忽视. 收集整理大量与此相关的病例, 进行统计分析, 就可用发病率的方式对床位摆放不当的风险进行量化.

在自然灾害风险分析领域^[10], 收集整理大量的历史灾害数据, 进行系统的统计分析, 定量地认识自然灾害风险, 已经相当普及. 设某地区在过去的 T 年内某种自然灾害发生了 n 次, 设第 i 次灾害事件的记录是 x_i . 我们将这些记录组成的集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 称为样本, 其内的元素 x_i 称为样本点. 最简单的记录是损失; 较全面的记录是致灾因子和灾情. 最全面的记录可以穷尽一切, 样本点中的一些分量甚至可以是文字等非量化内容.

我们可以用记录损失的样本对该种自然灾害的风险进行简单的量化分析: 选用某种合适的统计方法, 估计出 X 所来自母体的概率分布 $P(x)$, 其期望值, 就是对损失风险的量化估计. 这一估计值, 其实就是 x_1, x_2, \dots, x_n 的平均值. 换言之, 平均损失值就是统计学意义上的损失风险值. 由于致灾因子的强度与灾害损失不是一对一的物理关系, 根据自然灾害风险分析的基本模式^[11], 应该由致灾因子发生强度的概率分布和统计意义上的易损线曲线, 计算损失期望值.

3 用历史灾害数据计算台风风险

我们用中国气象局国家气候中心的消费者物价指数 (CPI) 校正后经济损失数据修正文献 [12] 中的 20 个台风资料, 再加上由国家气候中心得到的另 20 个台风资料, 共 40 个台风灾害事件 (表 1), 演示如何用最简单的数理统计方法——直方图方法, 来处理历史灾害数据, 计算台风风险. 表中的台风级别, 由中国天气台风网 (<http://typhoon.weather.com.cn>) 进行校核和补充.

以 y 和 z 分别记台风级别和损失 (亿元), 此容量为 40 的样本如式 (1) 所示.

$$\begin{aligned}
 X &= \{(y_1, z_1), (y_2, z_2), \dots, (y_{40}, z_{40})\} \\
 &= \{(11, 9.2475), (12, 3.1373), (12, 3.151), (12, 10.96), (12, 43.0043), (9, 1.0686), (12, 9.66), \\
 &\quad (13, 63.48), (9, 0.9656), (10, 0.7729), (12, 237.4768), (12, 9.7726), (8, 0.6943), (12, 93.138), \\
 &\quad (12, 114.939), (12, 51.471), (15, 156.606), (12, 3.87), (10, 1.4848), (11, 8.8832), (17, 162.944), \\
 &\quad (12, 91.5), (10, 0.7488), (12, 16.9299), (8, 1.638), (9, 2.2698), (10, 100.418), (8, 1.482), (7, 0.54), \\
 &\quad (10, 24.408), (9, 2.756), (10, 289.274), (7, 3.64), (7, 6.344), (14, 623.376), (9, 1.313), (9, 2.323), \\
 &\quad (14, 19.47), (10, 84.1), (12, 14)\}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

表 1 2000–2015 年影响浙江的 40 个台风

序号	名称	入境日期	级别	损失(亿)	序号	名称	入境日期	级别	损失(亿)
1	启德	2000/7/10	11	9.2475	21	桑美	2006/10/17	17	162.944
2	杰拉华	2000/8/10	12	3.1373	22	罗莎	2007/10/7	12	91.5
3	碧利斯	2000/8/23	12	3.151	23	海鸥	2008/7/18	10	0.7488
4	派比安	2000/8/29	12	10.96	24	凤凰	2008/7/28	12	16.9299
5	桑美	2000/9/12	12	43.0043	25	森拉克	2008/9/15	8	1.638
6	飞燕	2001/6/23	9	1.0686	26	蔷薇	2008/9/29	9	2.2698
7	威马逊	2002/7/3	12	9.66	27	莫拉克	2009/8/9	10	100.418
8	森拉克	2002/9/7	13	63.48	28	莫兰蒂	2010/9/10	8	1.482
9	环高	2003/8/22	9	0.9656	29	米雷	2011/6/25	7	0.54
10	蒲公英	2004/7/3	10	0.7729	30	梅花	2011/8/7	10	24.408
11	云娜	2004/8/12	12	237.4768	31	苏拉	2012/8/3	9	2.756
12	艾利	2004/8/25	12	9.7726	32	海葵	2012/8/8	10	289.274
13	海马	2004/9/13	8	0.6943	33	苏力	2013/7/13	7	3.64
14	海棠	2005/7/19	12	93.138	34	潭美	2013/08/22	7	6.344
15	麦沙	2005/8/6	12	114.939	35	菲特	2013/10/7	14	623.376
16	泰利	2005/9/1	12	51.471	36	麦德姆	2014/7/23	9	1.313
17	卡努	2005/9/11	15	156.606	37	凤凰	2014/9/22	9	2.323
18	龙王	2005/10/2	12	3.87	38	灿鸿	2015/7/11	14	19.47
19	珍珠	2006/5/18	10	1.4848	39	苏迪罗	2015/8/8	10	84.1
20	碧利斯	2006/7/14	11	8.8832	40	杜鹃	2015/9/29	12	14

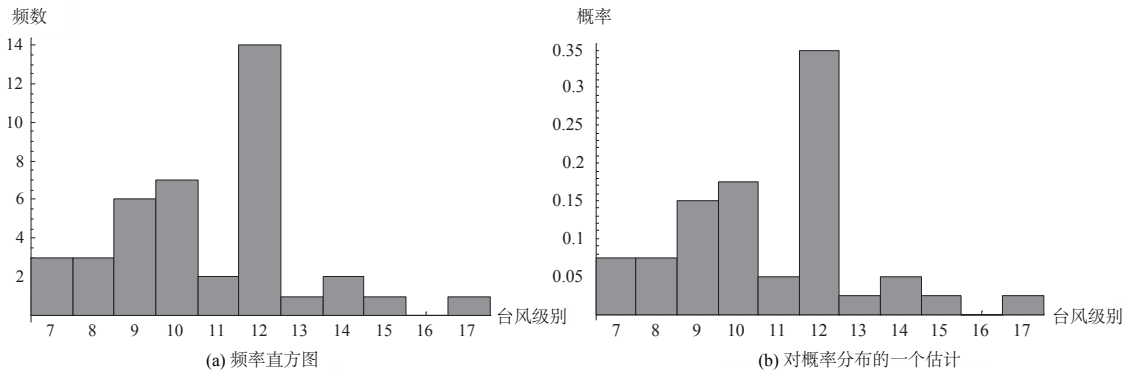


图 3 用直方图方法, 依据台风的历史记录, 对不同级别台风发生的概率进行估计

由 z_1, z_2, \dots, z_{40} 计算得平均损失值是

$$\bar{z} = 56.831(\text{亿元}). \quad (2)$$

图 3(a) 是 y_1, y_2, \dots, y_{40} 的频率直方图^[13]. 用其估计的概率分布见图 3(b).

对于台风级别

$$m_1 = 7, m_2 = 8, \dots, m_{11} = 17, \quad (3)$$

我们得到一个概率向量 P :

$$\begin{aligned} P &= (p(m_1), p(m_2), \dots, p(m_{11})) \\ &= (0.075, 0.075, 0.150, 0.175, 0.050, 0.350, \\ &\quad 0.025, 0.050, 0.025, 0.000, 0.025). \end{aligned} \quad (4)$$

估计台风易损性最简单的方法, 是统计式 (1) 中不同级别台风的平均损失, 如图 4 所示.

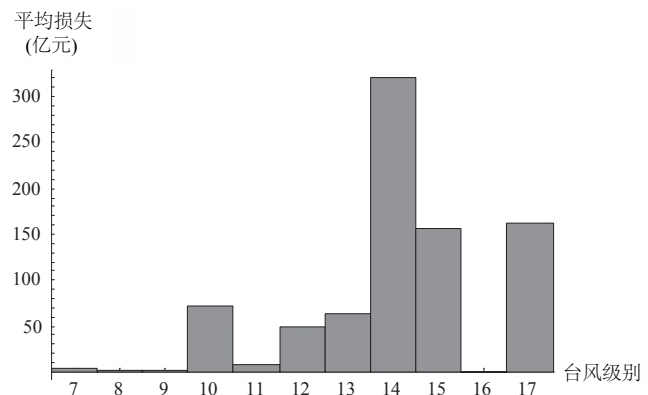


图 4 由 40 个台风灾害事件统计出来的易损性关系

对于式 (3) 中的台风级别, 我们得到一个平均损失向量 L :

$$\begin{aligned} L &= (l(m_1), l(m_2), \dots, l(m_{11})) \\ &= (3.508, 1.271, 1.783, 71.601, 9.065, 50.215, 63.48, 321.423, 156.606, 0, 162.944). \end{aligned} \quad (5)$$

由式 (4) 中概率向量 (分布) 和式 (5) 中损失向量, 估计出损失的期望值是:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{Loss}} &= 3.508 \times 0.075 + 1.271 \times 0.075 + 1.783 \times 0.15 + 71.601 \times 0.175 + 9.065 \times 0.05 + 50.215 \\ &\quad \times 0.35 + 63.48 \times 0.025 + 321.423 \times 0.05 + 156.606 \times 0.025 + 0 \times 0 + 162.944 \times 0.025 \\ &= 56.831(\text{亿元}). \end{aligned} \quad (6)$$

注: 式 (4) 和式 (5) 中我们只显示了三位小数, 但计算机中储存的是 6 位小数. 使用式 (6) 进行运算时, 是用计算机中储存的数. 例如, 在式 (5) 中, 9 级台风的平均损失是 1.783, 而其在计算机中储存的真实值是 1.782667. 如果仅仅用四舍五入后的有三位小数的数据进行计算, 结果是 56.83145.

即, 考虑到台风发生概率和易损性偶合, 由概率向量和损失向量估计出的损失期望值, 恰好是直接由表 1 中损失数据计算得到平均损失值. 这不是巧合, 而是必然.

事实上, 设 y_i 级台风发生了 n_i 次, 损失分别是 $z_1(y_i), z_2(y_i), \dots, z_{n_i}(y_i)$. 令 $i = 1, 2, \dots, m$. 于是平均损失值为:

$$\bar{z} = \frac{\sum_{1 \leq i \leq m} \sum_{1 \leq j \leq n_i} z_j(y_i)}{\sum_{1 \leq i \leq m} n_i}. \quad (7)$$

易知, 由这些记录估计出 y_i 级台风发生的概率是

$$p(y_i) = \frac{n_i}{\sum_{1 \leq i \leq m} n_i}. \quad (8)$$

y_i 级台风平均损失是

$$\bar{z}_i = \frac{\sum_{1 \leq j \leq n_i} z_j(y_i)}{n_i}. \quad (9)$$

$\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_m$ 表达的, 就是由台风灾害记录估计出的易损性. 于是, 损失的估计期望值为:

$$\mu_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^m \bar{z}_i p(y_i) = \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{1 \leq j \leq n_i} z_j(y_i)}{n_i} \frac{n_i}{\sum_{1 \leq i \leq m} n_i} = \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{1 \leq j \leq n_i} z_j(y_i)}{\sum_{1 \leq i \leq m} n_i} = \frac{\sum_{1 \leq i \leq m} \sum_{1 \leq j \leq n_i} z_j(y_i)}{\sum_{1 \leq i \leq m} n_i} = \bar{z}. \quad (10)$$

式 (10) 说明, 在统计学意义上, 用自然灾害风险分析基本模式^[11] “致灾因子的概率密度函数和承灾体脆弱性曲线” 计算台风风险是合理的. 特别地, 当历史灾害资料足够多, 确保直方图估计出的概率分布和脆弱 (易损) 性曲线较可靠时, 可直接用灾害的平均值作为风险值使用. 然而, 图 3 和图 4 说明, 仅仅由表 1 的历史灾害资料, 估计出的概率分布和易损性曲线并不可靠. 不仅在 16 级台风处跳空, 一些非跳空处也没有变化梯度, 没有反映出应有的统计规律. 问题的根源是, 统计资料不多, 容量为 40 的样本太小. 值得注意的是, 表 1 中的台风, 影响浙江的面积差别很大. 例如, 2012 年 8 月 8 日在浙江象山县鹤浦镇登陆的台风 “海葵” 是正面袭击浙江的台风, 对浙江的影响面积很大. 虽然只是 10 级台风, 但造成的损失高达 289.274 亿元. 而 2015 年 7 月 11 日台风 “灿鸿” 在浙江舟山朱家尖登陆台后就沿海北上, 对浙江的影响面积很小. 此次台风入境时风级高达 14 级, 但成的损失只有 19.47 亿元. 如果统计资料多达数百个, 路径的差异性就会被平均掉, 统计图就不会出现跳空或没有变化梯度的情况. 然而, 统计资料越多, 时间跨度就越长, 资料的一致性就很差, 统计结果失去意义.

于是, 为了在资料不多的时候算得 “好看” 一些, 人们热衷于寻找理论分布来替代图 3 中的概率分布, 寻找理论曲线来替代图 4 中的易损性关系, 但统计特征必须与它们一致, 估计出的损失期望值也应该基本相同. 换言之, 用拟合效果不错的概率分布和易损性曲线算出来的风险值, 与简单方法算出的值, 应该基本相同, 否则统计特征必定不一致.

如果统计资料充分多, 理论上讲, 用式 (6) 方式计算出的 μ_{Loss} 就是风险值. 然而, 笼统地讲一个地区的台风风险, 并没有物理意义. 因为统计用的历史台风灾害数据资料时间跨度不同, 统计意义也不同. 由于台风的发生具有年度的周期性, “年度风险” 的物理意义就很明确: 一年中由台风造成损失的期望值. 式 (1) 的样

本, 是 16 年记录, 每年平均发生 2.5 次台风灾害, 是否 μ_{Loss} 的 2.5 倍值就是该地区的年度风险呢? 要回答这个问题, 我们需要从随机过程的角度来观察台风灾害.

4 用随机过程计算年度风险

事物的变化过程分为两大类: 确定性过程和随机过程. 确定性过程须满足下述两个条件:

- 1) 每次观察得到的过程都相同.
- 2) 观察到的过程可用时间 t 的确定函数表示.

随机过程则每次观察得到的过程都不同, 观察到的过程也没有确定的变化形式, 不能用一个时间 t 的确定函数表示.

例如, 正弦信号就是一个确定性过程, 而示波器的噪声电压就是一个随机过程.

我们以年度为观察台风灾害的时间长度. 每一年观察到的各种台风发生时间都不一样, 也不能用一个日期 t 的确定函数表示一年中台风的变化形式.

于是, 针对表 1 的台风, 我们可用分别记录各年台风发生情况的 16 个样本函数 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_{16}(t)$ (每年一个样本函数) 来近似描述台风的随机过程. 注意到表 1 中台风发生的最短时间间隔为 5 天, 参考表 1 的日期, 我们锁定台风季是从 5 月 16 日到 10 月 20 日. 以 5 天为时间步长, 每月按 30 天计, 令:

$$\begin{cases} t_1 = [5\text{月}16\text{日}, 5\text{月}20\text{日}], \\ t_2 = [5\text{月}21\text{日}, 5\text{月}25\text{日}], \\ \dots \dots \\ t_{31} = [10\text{月}16\text{日}, 10\text{月}20\text{日}]. \end{cases} \quad (11)$$

于是, 采用 Excel 中的函数 DAYS360 对表 1 中的日期进行处理, 可得到近似描述台风的随机过程的 16 个样本函数, 列入表 2.

表 2 近似描述影响浙江的台风随机过程的样本函数

	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$x_3(t)$	$x_4(t)$	$x_5(t)$	$x_6(t)$	...	$x_{11}(t)$	$x_{12}(t)$	$x_{13}(t)$	$x_{14}(t)$	$x_{15}(t)$	$x_{16}(t)$
t_1	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_2	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_3	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_4	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_5	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_6	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_7	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_8	0	9	0	0	0	0	...	0	7	0	0	0	0
t_9	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{10}	0	0	12	0	10	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{11}	11	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{12}	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	7	0	14
t_{13}	0	0	0	0	0	12	...	0	0	0	0	0	0
t_{14}	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	9	0
t_{15}	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{16}	0	0	0	0	0	0	...	0	0	9	0	0	0
t_{17}	12	0	0	0	0	12	...	0	10	10	0	0	10
t_{18}	0	0	0	0	12	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{19}	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{20}	12	0	0	9	12	0	...	0	0	0	7	0	0
t_{21}	12	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{22}	0	0	0	0	0	12	...	0	0	0	0	0	0
t_{23}	0	0	13	0	0	0	...	8	0	0	0	0	0
t_{24}	12	0	0	0	8	15	...	0	0	0	0	0	0
t_{25}	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{26}	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	9	0

将表中的台风级数替换成式 (5) 中相应的平均损失, 我们得到近似描述浙江台风灾害 (损失) 随机过程的样本函数, 列入表 3 中.

表 3 近似描述浙江台风灾害 (损失) 随机过程的样本函数

	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$x_3(t)$	$x_4(t)$	$x_5(t)$	...	$x_{12}(t)$	$x_{13}(t)$	$x_{14}(t)$	$x_{15}(t)$	$x_{16}(t)$	期望
t_1	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	4.475
t_2	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_3	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_4	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_5	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_6	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_7	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_8	0	1.783	0	0	0	...	3.508	0	0	0	0	0.331
t_9	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{10}	0	0	50.215	0	71.601	...	0	0	0	0	0	7.613
t_{11}	9.065	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0.567
t_{12}	0	0	0	0	0	...	0	0	3.508	0	321.423	20.875
t_{13}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	7.613
t_{14}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	1.783	0	0.111
t_{15}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.138
t_{16}	0	0	0	0	0	...	0	1.783	0	0	0	0.111
t_{17}	50.215	0	0	0	0	...	71.601	71.601	0	0	71.601	24.177
t_{18}	0	0	0	0	50.215	...	0	0	0	0	0	3.138
t_{19}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{20}	50.215	0	0	1.783	50.215	...	0	0	3.508	0	0	6.608
t_{21}	50.215	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.138
t_{22}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.138
t_{23}	0	0	63.480	0	0	...	0	0	0	0	0	4.047
t_{24}	50.215	0	0	0	1.271	...	0	0	0	0	0	13.085
t_{25}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{26}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	1.783	0	0.111
t_{27}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	50.215	3.250
t_{28}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.138
t_{29}	0	0	0	0	0	...	0	0	321.423	0	0	23.227
t_{30}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{31}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	10.184

随机过程的数字特征是指先把时间 t 固定, 然后用随机变量的分析方法计算的数字特征. 随机过程的数字特征是时间的函数. 用样本函数估计的随机过程的数字特征期望, 就是各样本函数在时间点上的统计均值. 表 3 的最后一列是其近似描述的随机过程的期望估计.

台风灾害随机过程时间段 t 上的期望值, 其物理意义就是此时段的台风风险. 显然, 一年的台风风险就是所有时段的台风风险求和. 对表 3 中各时段期望求和, 我们得到年度风险:

$$R = 4.475 + 7.613 + 0.567 + 20.875 + 7.613 + 0.111 \cdots + 10.184 = 142.079 \text{ (亿元)}. \quad (12)$$

表 3 中所有样本函数的数值求和再除以 16, 可直接得出这一数值. 16 年中 40 个台风记录, 平均每年有 2.5 个台风. 以此数直接乘式 (2) 中的平均损失值, 我们得: $2.5 \times 56.831 = 142.078$ (亿元). 它与式 (12) 中的年度风险值 R 近似相等 (误差来自于计算中的四舍五入).

5 用信息扩散模型对简单统计风险进行改进

从现实角度出发, 无论是笼统的风险分析, 还是用随机过程计算年度风险, 因为数据太少, 由表 1 进行的简单统计, 结果的可靠性都令人怀疑. 用很少的记录简单统计的风险, 很不靠谱. 于是, 一些研究人员推荐使用蒙特卡罗法生成任意多的台风样本点, 并声称可以改善台风风险的估计. 由于巧妙的包装, 许多学者不明就里, 真以为用蒙特卡罗法生成大量的台风样本点, 就能更好地估计台风风险. 其实不然. 蒙特卡罗法亦称

作随机模拟方法^[11]. 任何一种能够利用随机数实现模拟的方法, 都可称为蒙特卡罗法^[14,15]. 该方法能帮助人们直观地观察随机数的行为, 提高对随机系统的认识. 然而, 任何蒙特卡罗方法的实现, 都必须由一个或几个概率函数控制的伪随机发生器进行抽样来实现. 显然, 在台风风险分析中使用蒙特卡罗法, 先决条件是, 用于产生台风样本的概率函数能表达台风的随机规律. 既然相关概率函数已知, 其概率风险就能据此计算出来, 又何必多此一举又用抽取的样本来估计这个已经知道的概率函数? 诚如本文式(6)的 μ_{Loss} 是式(2)中的平均损失值的虚晃一枪一样, 假定概率分布后又用其生成的样本来估计此概率分布, 也是虚晃一枪. 也就是说, 如果控制抽样的概率函数不能近似描述台风的真实随机规律, 由蒙特卡罗法计算的台风风险值更不靠谱, 甚至不如真实的小样本简单统计出来的结果.

在小样本条件下, 我们建议用信息扩散模型对简单统计结果进行改进.

目前, 信息扩散理论的基础比较稳固, 应用涉及面较广. 信息扩散的最初思想是在研究震害面积和震级间的关系考虑如何使少量地震记录发挥更大作用时产生的. 严格定义是在 1997 年的文献^[16]中给出. 随着研究的不断深入, 建立了六个实用的模型体系: 1) 用信息分配方法计算软直方图; 2) 用正态信息扩散估计概率分布; 3) 生成输入 - 输出型模糊关系矩阵的自学习离散回归模型; 4) 能处理矛盾样本的信息扩散人工神经网络; 5) 计算机仿真输入非参数化模型; 6) 计算模糊风险的內集 - 外集模型.

随后, 人们围绕信息扩散理论和方法做了大量的工作. 通过求 Laplace 方程提出的对数型扩散函数, 用于研究黄土斜坡稳定性问题, 计算值与实际值的符合程度很高; 用渐近无偏准则给出的计算最优正态扩散系数的方法, 用于处理轨道交通工程的水准测量数据, 具有良好的抗差性; 用 MacCormack 方法求解非均匀各向异性体扩散方程提出的二维非均匀信息扩散, 用于研究保险产品高血压二维患病率的问题, 减少误差约 70%; 根据算法复杂度理论将內集 - 外集模型的组合算法简单化为排序算法, 彻底解决了计算困难的问题; 人们还用分析几何理论证明了信息扩散原理的普适性; 综合运用贝叶斯理论和概率密度向可能性转化的方法, 发展出的內集 - 外集模型的贝叶斯算法被用于评估伊斯坦布尔地区的地震风险, 证明了方法的实用性.

风险分析多是在样本不充足的条件下进行, 人们处于“无限的疑惑, 有限的认识”之状态, 所以信息扩散理论和方法在风险分析方面的应用较多. 从近年来在 Elsevier 出版物上发表的文章看, 主要有, 用于分析太湖蓝藻暴发风险, 为政府决策提供了重要依据^[17]; 用于研究美国东海岸飓风风险, 计算出保守风险值和冒险风险值^[18]; 用于研究中国最近 20 年的水灾数据, 计算出不同可能性的多值风险^[19]; 用于研究中国北方草原火灾风险, 为畜牧业生产制定补偿计划提供了依据^[20]; 用于研究洞庭湖区洪水、干旱、虫害和鼠害, 绘制出粮食生产的自然灾害风险图^[21]; 用正态扩散处理我国水利部数据库中的水灾数据, 生成可变模糊集, 拟合出了水灾风险曲线^[22]; 用于北塞浦路斯旅游保险气候指数计算, 绘制了风险图^[23]; 将信息扩散模型嵌入土壤流失方程, 评估环渤海地区不同降雨情况下的土壤侵蚀风险^[24]; 用于分析液化天然气站过去 12 个月的运行数据, 能及时发现潜在的风险^[25]; 用于研究草原生物灾害, 绘制出我国北方 10 省区的风险图^[26]; 用于研究农业保险业务数据, 计算不同损失的可能性, 为政府财政支持农险提供依据^[27]; 用于广东省北江、西江和绥江三江汇流区的洪水风险评估, 能根据洪峰水位推断水灾面积的几种可能性^[28].

用正态信息扩散估计概率分布的模型^[11] (式(13)) 来处理式(1)中 y_1, y_2, \dots, y_{40} 的台风数据, 得图 5 所示的概率分布估计. 此估计明显比图 3(b) 更具说明力, 因为它消除了平缓 and 跳空, 表现出一定的统计规律.

$$h = \begin{cases} 0.8146(b-a), & n=5; \\ 0.5690(b-a), & n=6; \\ 0.4560(b-a), & n=7; \\ 0.3860(b-a), & n=8; \\ 0.3362(b-a), & n=9; \\ 0.2986(b-a), & n=10; \\ 2.6851(b-a)/(n-1), & \text{当 } n \geq 11. \end{cases} \quad (13)$$

这里, n 是样本点个数, $b = \max_{1 \leq i \leq n} \{y_i\}$, $a = \min_{1 \leq i \leq n} \{y_i\}$.

使用正态信息扩散方法构造信息矩阵^[29], 再用全条件落影公式进行推理^[30], 识别台风与损失间的关系, 得图 6 所示的易损性曲线.

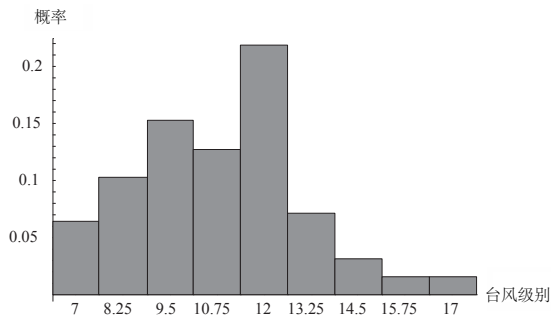


图 5 用正态信息扩散方法, 依据台风的历史记录, 对不同级别台风发生的概率进行估计

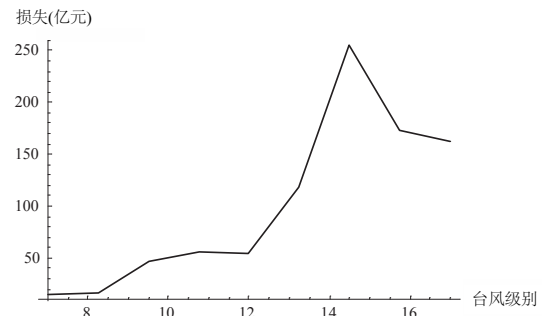


图 6 用信息扩散模型处理 40 个台风灾害事件估计出的易损性曲线

不同级别台风造成的损失列入表 4. 此易损性曲线明显比图 4 的易损性关系合理, 因为现实中 16 级的台风一定会造成相当大的损失, 而不是图 4 中的损失为 0.

表 4 用信息扩散模型处理 40 个台风灾害事件估计出不同级别台风造成的损失

台风级别	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
造成损失 (亿元)	14.464	15.958	34.524	50.400	55.728	54.557	106.048	200.317	221.955	170.916	162.507

表 5 优化处理后的台风灾害随机过程的样本函数

	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$x_3(t)$	$x_4(t)$	$x_5(t)$	...	$x_{12}(t)$	$x_{13}(t)$	$x_{14}(t)$	$x_{15}(t)$	$x_{16}(t)$	期望
t_1	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.150
t_2	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_3	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_4	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_5	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_6	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_7	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_8	0	34.524	0	0	0	...	14.464	0	0	0	0	3.062
t_9	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{10}	0	0	54.557	0	50.400	...	0	0	0	0	0	6.560
t_{11}	55.728	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.483
t_{12}	0	0	0	0	0	...	0	0	14.464	0	200.317	16.907
t_{13}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	6.560
t_{14}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	34.524	0	2.158
t_{15}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.410
t_{16}	0	0	0	0	0	...	0	34.524	0	0	0	2.158
t_{17}	54.557	0	0	0	0	...	50.400	50.400	0	0	50.400	19.420
t_{18}	0	0	0	0	54.557	...	0	0	0	0	0	3.410
t_{19}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{20}	54.557	0	0	34.524	54.557	...	0	0	14.464	0	0	9.881
t_{21}	54.557	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.410
t_{22}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.410
t_{23}	0	0	106.048	0	0	...	0	0	0	0	0	7.625
t_{24}	54.557	0	0	0	15.958	...	0	0	0	0	0	19.277
t_{25}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{26}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	34.524	0	2.158
t_{27}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	54.557	5.568
t_{28}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	3.410
t_{29}	0	0	0	0	0	...	0	0	200.317	0	0	15.930
t_{30}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0
t_{31}	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	10.157

根据台风级别的定义, 必然是台风级别越高, 所经之地造成的损失就越大, 但图 4 和图 6 均没有反映这种情况, 损失分别在 14 和 15 级台风处达最大, 随后就降低了. 这就涉及到风险的暴露度问题. 在浙江的台

风风险问题上, 风险暴露度, 就是台风登陆后对浙江省全域影响面积的大小. 台风正面袭击浙江省, 浙江的风险暴露度就大; 台风擦着浙江省的边而过, 暴露度就小. 如果将台风路径转化为风险暴露度参数, 则资料中没有 16 级台风, 浙江省暴露于这一级别台风的风险暴露度就是 0. 于是, 人们可以估计出更具解释性的, 关于台风级别和风险暴露度的二维随机变量的概率分布, 和关于台风级别和风险暴露度的易损性曲面. 然而, 对式 (10) 作适当的拓展, 不难证明, 考虑风险暴露度的损失期望值, 也恰好是直接由表 1 中损失数据计算得到平均损失值. 显然, 在已有样本基础上, 通过增加维度改进台风风险估计, 得不偿失; 改进概率分布和易损性曲线的估计精度, 才是根本之路.

由图 5 的概率分布和图 6 的易损性曲线估计的损失期望值为:

$$\tilde{\mu}_{\text{Loss}} = 63.516 \text{ (亿元)}. \quad (14)$$

它比简单统计出的式 (6) 中的风险 μ_{Loss} 略大. 研究证明, 信息扩散模型估计出的风险较为稳定和可靠. 用表 4 中台风灾害损失数据替代表 3 中相应台风级别台风损失, 得到优化处理小样本后近似描述浙江台风灾害随机过程的样本函数和相应的期望, 列于表 5 中.

对表中各时段期望求和, 我们得到年度风险:

$$\tilde{R} = 3.150 + 3.062 + 6.560 + 3.483 + 16.907 + 6.560 + \dots + 10.157 = 151.101 \text{ (亿元)}. \quad (15)$$

它比简单统计的, 由表 3 进行估计, 在式 (12) 中给出的年度风险值 142.079 亿元略大.

尽管大量的研究已经表明, 在小样本条件下, 信息扩散模型比简单统计方法有明显的优势, 从而可以推测, 用信息扩散模型估计的风险值 (式 (15) 中的 \tilde{R}), 是对简单统计方法估计的风险值 (式 (12) 中的 R) 的改进, 但是, 仅仅由两者的差, 并看不出是否改进, 更看不出改进的程度如何. 我们将另文用计算机仿真的方法来检验改进的效果, 并展开上面一带而过的关于构造信息矩阵和全条件落影公式推理等的技术细节.

6 结论与讨论

一定量的历史台风灾害数据资料, 可使台风风险具有统计学的意义. 用历史台风的损失记录作为样本来量化风险时, 台风风险就是台风损失样本的平均值; 概率意义上讲, 就是损失的期望值.

简单的数学推导表明, 由台风在研究区发生的概率分布和研究区关于台风的易损性曲线偶合估计出的损失期望值, 必然等于直接由损失数据计算得到平均损失值. 这一现象说明, 当统计资料较少时, 解决风险估计的精度问题, 既不是概率分布通过了统计检验就保证了精度, 也不是易损性曲线的统计误差小精度就高.

一些学者认为, 用蒙特卡罗法可以生成任意多的台风及灾害随机样本, 从而可以改进台风风险的估计. 事实上, 在台风风险分析中使用蒙特卡罗法, 必须知道台风随机规律的概率密度函数, 用其来控制伪随机数发生器. 使用须要估计的概率分布去控制伪随机数发生器, 抽取伪随机数再来估计此概率分布, 在风险分析中毫无意义. 可见, 蒙特卡罗法并不具有改进风险评估精度的功能.

提高小样本的利用效率, 是改进台风风险估计的途径之一, 本文建议用信息扩散模型来改进台风风险的估计. 在我们后续文章中表述的, 用计算机仿真的方法来检验信息扩散模型的改进效果时, 也会用到蒙特卡罗法, 但明确其控制伪随机数发生器的概率分布并非真实的, 它不能用于描述真实的台风随机系统, 只是作为理论分布用于比较信息扩散模型和直方图方法用于风险分析时的估计误差.

笼统地讲一个地区的台风风险, 并没有物理意义. 因为用损失期望值作为风险的度量时, 是讲一次台风发生的损失期望值呢, 还是讲统计资料时间跨度上的损失期望值? 统计用的历史台风灾害数据资料时间跨度不同, 统计意义也不同. 由于台风的发生具有年度的周期性, “年度风险” 的物理意义就很明确: 一年中由台风造成损失的期望值.

可以将台风灾害标于一年的各时间段上, 多年的记录形成多个样本函数, 近似描述台风灾害的随机过程. 各样本函数在时间段上的统计均值, 是此时间段上的风险. 累积一年的各时间段的风险, 可计算出台风年度风险, 它与平均损失值乘以年平均台风发生数所得结果, 差别很小. 用信息扩散模型, 也可改进台风年度风险的估计. 改进程度如何, 将另文加以研究.

致谢: 衷心感谢中国气象局国家气候中心的姜彤研究员, 他为本文的研究提供了台风对浙江省造成经济

损失的重要数据资料.

参考文献

- [1] Ayyub B M. Systems resilience for multihazard environments: Definition, metrics, and valuation for decision making[J]. *Risk Analysis*, 2014, 34(2): 340–355.
- [2] 费璇, 温家洪, 杜士强等. 自然灾害恢复力研究进展 [J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 19–31.
- [3] 翟国方, 崔功豪, 谢映霞等. 风险社会与弹性城市 [J]. *城市规划*, 2015(12): 107–112.
- [4] 周利敏. 韧性城市: 风险治理及指标建构 —— 兼论国际案例 [J]. *北京行政学院学报*, 2016(2): 13–20.
- [5] Mornet A, Opitz T, Luzi M, et al. Index for predicting insurance claims from wind storms with an application in France[J]. *Risk Analysis*, 2015, 35(11): 2029–2056.
- [6] Chen W K, Sui G J, Tang D L. A study on typhoon risk prediction by different methods of pattern recognition[C]// Tang D L, Sui G J. *Typhoon Impact and Crisis Management, Advances in Natural and Technological Hazards Research 40*. Berlin: Springer-Verlag, 2014: 461–480.
- [7] 黄崇福. 台风风险的统计学意义及年度风险的计算 [C]// 中国灾害防御协会风险分析专业委员会第七届年会论文集, 长沙, 2016: 1–9.
- [8] Marcek D, Falat L. Volatility forecasting in financial risk management with statistical models and ARCH-RBF neural networks[J]. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2014, 4(2): 77–95.
- [9] Huang C F, Ruan D. Fuzzy risks and an updating algorithm with new observations[J]. *Risk Analysis*, 2008, 28(3): 681–694.
- [10] Pang X L. Dynamic vulnerability analysis of population for flood disaster in urban area[J]. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2013, 3(4): 166–174.
- [11] 黄崇福. 自然灾害风险分析与管理 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [12] 黄崇福. 自然灾害动态风险分析的一个虚拟案例 [J]. *灾害学*, 2015, 30(4): 1–11.
- [13] Bakhshi P, Touran A. A new approach for contingency determination in a portfolio of construction projects[J]. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2012, 2(4): 223–232.
- [14] Li M Y, Huang D Y, Liu M. MCSim-based occupational health risk assessment on benzene[J]. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2013, 3(3): 135–145.
- [15] Zeng X K, Wang D, Wu J H. Evaluating the three methods of goodness of fit test for frequency analysis[J]. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2015, 5(3): 178–187.
- [16] Huang C F. Principle of information diffusion[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 91(1): 69–90.
- [17] Chen Q, Rui H, Li W, et al. Analysis of algal bloom risk with uncertainties in lakes by integrating self-organizing map and fuzzy information theory[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 482–483(1): 318–324.
- [18] Feng L, Luo G. Application of possibility-probability distribution in risk analysis of landfall hurricane — A case study along the east coast of the United States[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(8): 4563–4568.
- [19] Zou Q, Zhou J, Zhou C, et al. Fuzzy risk analysis of flood disasters based on diffused-interior-outer-set model[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(6): 6213–6220.
- [20] Liu X, Zhang J, Cai W, et al. Information diffusion-based spatio-temporal risk analysis of grassland fire disaster in northern China[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2010, 23(1): 53–60.
- [21] Zhong L, Liu L, Liu Y. Natural disaster risk assessment of grain production in Dongting Lake Area[J]. *China, Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2010, 1(1): 24–32.
- [22] Li Q, Zhou J, Liu D, et al. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion[J]. *Safety Science*, 2012, 50(1): 1275–1283.
- [23] Olya H G T, Alipour H. Risk assessment of precipitation and the tourism climate index[J]. *Tourism Management*, 2015, 50: 73–80.
- [24] Xu L, Xu X, Meng X. Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with information diffusion model: A case study of Bohai Rim, China[J]. *Catena*, 2012, 100(2): 74–82.
- [25] Chu Y Y, Dong W L, Li Y, et al. Risk prediction model of LNG terminal station based on information diffusion theory[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 52: 60–66.
- [26] Hao L, Yang L, Gao J M. The application of information diffusion technique in probabilistic analysis to grassland biological disasters risk[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 272: 264–270.
- [27] Xing L, Lu K. The importance of public-private partnerships in agricultural insurance in China: Based on analysis for Beijing[J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2010, 1(1): 241–250.
- [28] Zou Q, Zhou J, Zhou C, et al. The practical research on flood risk analysis based on IIOSM and fuzzy α -cut technique[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(7): 3271–3282.
- [29] 黄崇福. 自然灾害风险分析的信息矩阵方法 [J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(1): 1–10.
- [30] 黄崇福. 自然灾害风险评价: 理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.