

卢耀健,刘合香,王萌,等,2019.以月份动态变化为背景的华南台风动态风险评估[J].气象与减灾研究,42(4):261-269.  
Lu Yaojian, Liu Hexiang, Wang Meng, et al, 2019. Dynamic risk assessment of typhoon in South China based on monthly dynamic variation[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 42(4): 261-269.

## 以月份动态变化为背景的华南台风动态风险评估

卢耀健, 刘合香, 王萌, 李广桃

南宁师范大学 数学与统计学院, 广西南宁 530029

**摘要:**选取1983—2017年登陆华南地区的53个台风样本,进行以月份变化为条件的动态风险评估。首先,利用灰关联-模糊综合评价法构建风险指数;其次,采取信息扩散技术估计不同月份的台风风险强度概率分布,识别风险强度与直接经济损失之间的函数关系;最后,以添加时间要素且与月份有关的动态风险评估模型为基础,进行以损失期望为内涵的台风风险评估。结果表明,风险指数与直接经济损失相关显著(相关系数为0.7108);华南地区一年内不同月份的台风风险强度概率分布并不相同,承灾体脆弱性整体随风险强度的增大而增大;一年内的台风风险水平分布并不相同,7月达到台风风险水平的最大值,5—6月的台风风险水平最低。

**关键词:**台风,动态风险,灰关联-模糊综合评价,信息扩散

**中图分类号:** X915.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9033(2019)04-0261-09

**doi:** 10.12013/qxyjzjy2019-042

## Dynamic Risk Assessment of Typhoon in South China Based on Monthly Dynamic Variation

Lu Yaojian, Liu Hexiang, Wang Meng, Li Guangtao

*School of Mathematics and Statistics, Nanning Normal University, Nanning 530029, China*

**Abstract:** Fifty-three typhoon samples landing in South China from 1983 to 2017 were selected to carry out dynamic risk assessment under the condition of monthly variation. The corresponding risk index was constructed by using the grey correlation fuzzy comprehensive evaluation method firstly. then, the probability distribution of typhoon risk intensity in different months was estimated and the functional relationship between risk intensity and direct economic loss was identified by applying the information diffusion technique. Finally, the typhoon risk assessment based on loss expectation was carried out by the month related dynamic risk assessment model of adding time factor. The results showed that the risk index presented a good correlation with direct economic loss, with the correlation coefficient of 0.710,8. The probability distribution of typhoon risk intensity in South China was not the same in different months of a year, and the vulnerability value of disaster bearing body increased with the increase of risk intensity. The distribution of typhoon risk level in one year was different, the maximum value of typhoon risk level appeared in July, and the lowest typhoon risk level occurred in May - June.

**Key words:** typhoon; dynamic risk; grey correlation fuzzy comprehensive evaluation; information diffusion

### 0 引言

华南地区常年遭受台风侵袭,科学客观评估风

险能够有效减少台风带来的损失。在大多数台风风险评估中,主要以风险区划(胡波等,2012;于小兵等,2019)和灾情预评估(陈有利等,2018;顾小丽等,

收稿日期:2019-10-16;修订日期:2019-11-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(41665006);广西重点研发计划项目(AB19110020);广西研究生教育创新计划项目(YCSW2020195).

作者简介:卢耀健,硕士生,研究方向为概率统计、数学模型、自然灾害风险分析, E-mail:304374001@qq.com.

刘合香(通信作者),教授,研究方向为概率统计、数学模型、自然灾害风险分析, E-mail:hx\_post@163.com.

2018)为主,而以台风造成的损失期望为内涵的研究较少,且风险评估缺乏时间的动态特征,无法满足台风的应急管理措施。黄崇福(2015a)提出了自然灾害动态风险的基本定义,与静态风险相比,其本质的区别在于动态风险认为风险系统的随机规律会随着时间发生变化,动态风险评估就是研究综合环境的内在属性变化对风险承受体的影响,通过对风险源和风险承受体进行耦合,进行不确定意义下的动态系统量化分析。郭军等(2015)则以与月份和预警有关的动态风险评估模型为基础,利用信息分配和信息扩散技术实现了广东省台风风险动态评估。

以损失期望为内涵的动态风险评估关键在于找到风险变化的条件,估计不同条件的风险强度概率分布,找到能够表征台风风险强度与灾情损失的脆弱性函数关系(黄崇福,2015b)。华南地区台风主要发生在5—11月,而不同月份的台风风险并不相同,且以不同月份为条件的动态变化会导致台风样本量的减少;其次,台风造成的灾情损失不仅受多种致灾源强度影响,也与承灾体的脆弱性相关(史培军,2002)。因此,台风脆弱性函数应是多种致灾源强度、承灾体脆弱性与灾情损失间的关系。基于此,文中利用灰关联-模糊综合评价法耦合多种致灾源强度和承灾体脆弱性指标,构造登陆华南地区的台风风险指数;采用信息扩散技术估计台风风险强度条件概率分布和承灾体脆弱性函数,通过对与月份有关的台风动态风险评估模型添加时间要素以消除风险系统误差,实现华南地区台风动态风险评估。

## 1 数据来源与预处理

### 1.1 数据来源

选取1983—2017年登陆华南地区且数据资料较为完整的53个台风样本作为研究对象,其中致灾源数据来源于中国热带气旋年鉴(中国气象局,2015)和中国台风网(<http://typhoon.weather.com.cn/index.shtml/2017/07/14>),承灾体社会数据来源于国家统计局网站(<http://www.stats.gov.cn/tjsj>),灾情数据来源于《中国气象灾害大典》(温克刚,2006a;2006b;2006c)和广东、广西、海南三省(区)气候中心。

### 1.2 指标选取与构建

在台风危险性系统中,大风和强降水是大部分地区造成灾情损失的主要原因,而台风的影响常会导致灾情进一步加重。为此,考虑指标的代表性与可获取性,选取台风登陆时长 $A_1$ 、登陆时最大风速

$A_2$ 和降水极值 $A_3$ 作为致灾源系统的三项指标。

脆弱性系统中,承灾体的脆弱性主要体现在经济和农业的发展程度、建筑物和人口的密集程度等四个方面。因此,选取地区生产总值 $B_1$ 、农业总产值 $B_2$ 、建筑业总产值 $B_3$ 和上年末常住人口 $B_4$ 作为承灾体脆弱性系统指标,并将其转换为经济密度指数 $E_d$ 、农业发展指数 $A_d$ 、建筑业发展指数 $C_d$ 和人口密度指数 $P_d$ ,其计算式(张斌等,2010):

$$\begin{cases} E_d = B_1/S \\ A_d = B_2/B_1 \\ C_d = B_3/B_1 \\ P_d = B_4/S \end{cases} \quad (1)$$

其中, $S$ 为区域总面积。

灾情系统中,台风灾情主要体现在人口、农业、房屋三大部分,且都可以转换成直接经济损失指标,因此,采用台风造成的直接经济损失 $Y$ 作为台风的灾情指标。同时,为了对台风风险进行更客观评估,将以2017年的物价为基准,将其他年份台风的直接经济损失换算成以此基准年物价为基准的直接经济损失,其计算式(雷小途等,2009):

$$m = m_0 \cdot \beta \quad (2)$$

式中, $m$ 为定基的直接经济损失; $m_0$ 为台风造成的直接经济损失; $\beta$ 为定基物价比系数,经济学上是指调查商品报告期物价水平与某一固定时期物价水平的比值。

### 1.3 构造华南地区脆弱性指数

采用式(1)计算后得到了华南地区的四项脆弱性指标 $E_d$ 、 $A_d$ 、 $C_d$ 和 $P_d$ ,通过对其进行相关性分析,发现两两之间均具有显著相关性,因此利用主成分分析法进行线性降维,并计算得到脆弱性综合得分 $A_4$ ,与 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 共同构成评价指标集。

## 2 登陆华南地区台风风险指数构造与计算

### 2.1 隶属函数确定

台风风险具有模糊性,而模糊集就是用来研究和处理客观世界中存在的模糊现象,一般用隶属函数来刻画,从而实现定量地描述模糊性事物(刘合香,2012)。模糊综合评价法的隶属函数通常采用典型函数法的戒下型函数(李钢等,2014),其表达式为

$$f(u) = \begin{cases} 0, u \leq c \\ \frac{1}{1 + [a(u - c)]^{-b}}, u > c \end{cases} \quad (3)$$

式中, $f(u)$ 为指标 $u$ 的隶属函数。 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 均为参数,其中 $c$ 为指标 $u$ 的样本统计最小值,用以表示台

风灾害程度的大小,当评估指标  $u > c$  时,则认为可以成灾,否则认为不成灾;规定  $b = -2$ ;当因子  $u$  为样本统计量最大值时,隶属函数的值为 0.99,通过式(3)便可计算得到  $a$  值。同时,为了避免在计算时  $a$  值偏大,定义了一个经验系数  $K$ ,使得  $a$  值能够有利于隶属函数的计算,计算式为

$$a = K \frac{\sqrt{99}}{u_{\max} - u_{\min}} \quad (4)$$

经多次试验计算发现, $K$  值取 0.3 较好。

### 2.2 评价矩阵确定

已知选取的登陆影响华南地区的台风样本有 53 个,每个台风样本有 4 项评价指标。由于每项指标单位不同,但都属于正向型指标,即指标数值越大,台风风险也就越大,因此,需要对每项指标数据进行无量纲化处理,计算式为

$$a_{ij} = \frac{A_{ij} - \min(A_i)}{\max(A_i) - \min(A_i)} \quad (5)$$

式中, $A_{ij}$  为第  $i$  项指标第  $j$  个样本值; $a_{ij}$  为经无量纲化后的第  $i$  项指标第  $j$  个样本值。

利用式(5)计算得到各项指标中各个台风样本的隶属度值,得到相应的评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & \dots & f_{1,54} \\ f_{2,1} & f_{2,2} & \dots & f_{2,54} \\ f_{3,1} & f_{3,2} & \dots & f_{3,54} \\ f_{4,1} & f_{4,2} & \dots & f_{4,54} \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.3 评价指标权重确定

文中提出一种利用灰色关联度确定各评价指标权重的方法:首先利用灰色关联分析法(田民等,2008)确定各个评价指标与台风造成的直接经济损失的灰色关联度,然后以该灰色关联度为基础,计算相应权重。原因在于,灰色关联度能够综合反映各项评价指标与直接经济损失的关联程度,关联程度越高,表明该项指标对台风灾情的贡献越大,那么相应的风险也就越大。表 1 给出了经灰色关联分析法确定各评价指标的灰色关联度和相应权重。可以看出,各项评价指标与台风直接经济损失的灰关联度均大于 0.8,关联程度较大,并且关联程度大体相

表 1 评价指标与直接经济损失的灰色关联度和指标权重  
Table 1 Grey relational grade and index weight between evaluation index and direct economic loss

项目	评价指标			
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
灰色关联度	0.873 1	0.867 1	0.869 3	0.862 5
相应权重	0.251 5	0.249 7	0.250 4	0.248 4

因此得到的权重较为一致,可认为各项评价指标对台风灾害直接经济损失的影响贡献基本一致。

### 2.4 评价指数计算

对 53 个台风样本进行综合评价。已知经灰色关联分析法确定的  $A_1, A_2, A_3, A_4$  四项评价指标权重为  $W = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)$ ,根据评价矩阵(式(6)),53 个台风样本的模糊综合风险评价指数集为

$$R = W \circ R \quad (7)$$

风险指数越高,表明灾害程度越严重。其中,“ $\circ$ ”为广义模糊算子,采用加权平均算法进行计算,即

$$m_j = 100 \times \min \left\{ 1, \sum_{i=1}^4 \omega_i f_{ij} \right\} \quad (8)$$

式中, $m_j$  即为第  $j$  个台风样本的风险评价指数。根据评价矩阵对各项评价指标数值进行加权求和,并对每个台风样本的风险指数整体扩大 100 倍,这是为了方便之后的比较、分析和评估工作。将风险指数与台风造成的直接经济损失作对比,得到二者的对比曲线(图 1)。

分析图 1 发现,大部分台风样本的风险指数与所造成的直接经济损失的变化趋势较为一致,但同时也存在少部分台风样本并不相符。这是由于台风所造成的灾情涉及的不确定性非常复杂,其中更包含了较多的人为因素,而风险指数的评估是估计台风的危险性和承灾体脆弱性的综合程度,所能反映的是一个经济损失变化的趋势。通过对风险指数序列和直接经济损失序列进行相关性分析,得到二者的相关系数为 0.710 8,通过了信度 0.01 的显著性检验,表明二者变化趋势整体上较为一致,那么构造的风险指数也是较为合理的。

## 3 登陆华南台风的动态风险评估

### 3.1 添加时间要素的、与月份有关的动态风险评估模型

概率风险分析方法是采用概率分布函数表征风险源强度,用脆弱性函数描述风险承受体的脆弱性,采用损失期望值作为风险的度量。基于此,文中概率风险形式化模型(黄崇福,2015b)为

$$R = \int p(m) f(m) dm \quad (9)$$

式中, $m$  为台风的风险强度; $p(m)$  为风险强度的概率分布函数; $f(m)$  表示风险强度与台风灾损量的函数关系,即脆弱性函数。由于不同月份登陆华南台风的个数不同,不同的气候条件也会影响台风强度,那么风险强度的概率分布也一定会发生相应变

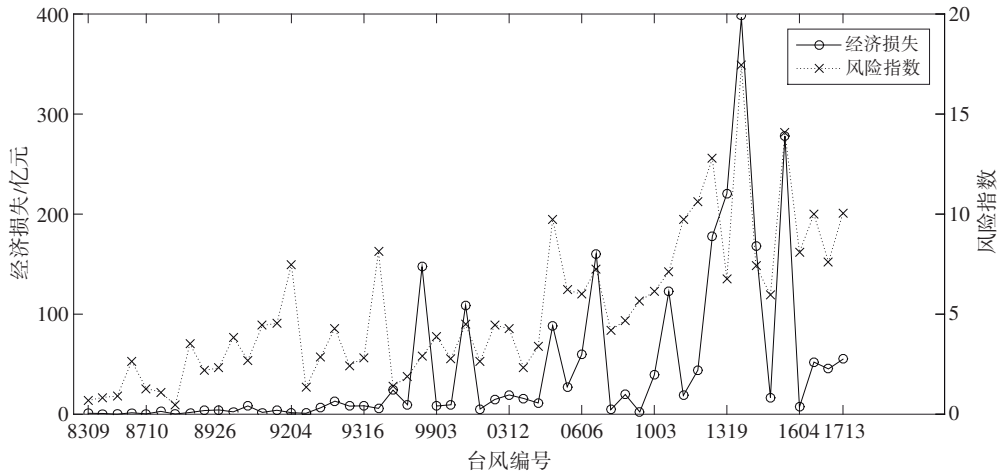


图1 登陆华南地区的台风风险指数和直接经济损失  
Fig. 1 Comparison between typhoon risk index and direct economic loss

化。因此,文中研究的华南台风风险动态变化的条件为月份的不同,其模型表达式:

$$R_{月份} = \int p(m | 月份) f(m) dm \quad (10)$$

式中,  $p(m | 月份)$  即为以不同月份为条件的登陆华南台风风险强度的条件概率分布。由于  $p(m | 月份) = p(m, 月份) / p(月份)$ , 因此  $p(m | 月份) = p(m, 月份)$ , 条件概率分布就是给定某一月份的台风风险强度概率分布。

一个全面刻画风险源和风险承受体综合作用的台风风险,需要包含时间、空间和水平值三个基本要素(苏桂武和高庆华,2003)。在上述风险评估模型中,模型仅考虑了台风的风险强度和台风造成的损失程度,却忽略了台风在一定时期内的发生率,即未考虑到风险三要素之一的的时间,这必然会带来相应的系统误差(郭君等,2017)。因此,对于台风风险评估模型需要添加相应的时间要素以消除系统误差。

采取郭君等(2017)的修正方法,为动态风险评估模型(式(10))添加相应的时间要素以消除系统误差,得到修正后的华南台风动态风险评估模型为

$$R_{月份} = \lambda_t \int p(m, 月份) f(m) dm \quad (11)$$

式中,  $\lambda_t$  为某时间段  $t$  内某一月份台风登陆华南地区的平均发生率。

### 3.2 一维信息扩散估计不同月份的台风风险强度概率分布

由于风险系统的动态变化性,不同月份的台风灾害样本数量会有不同,这可能会导致台风样本信息不足。信息扩散方法(Huang et al,1998)是为了弥补信息的不足,考虑利用样本模糊信息,对样本采

取集值化处理的模糊数学方法。因此,应利用信息扩散的方法估计不同月份登陆华南地区台风风险强度概率分布。由于在选取的1983—2017年53个台风样本中,5月和11月登陆华南地区的台风分别只有1个,不满足风险评估的要求,但是简单地剔除又会导致样本信息的减少,因此分别将5月与6月、10月与11月合并进行风险评估。

以下给出应用信息扩散方法估计7月登陆华南地区台风风险强度概率分布的具体步骤。根据式(8)计算得到的结果,记1983—2017年7月登陆华南地区台风的风险强度为  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{15}\} = \{0.9020, 1.8848, \dots, 5.5679\}$ 。考虑到53个台风样本中,风险强度的最大值为17.4560,风险强度的最小值为0.4449,因此取其论域为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{19}\} = \{0.01, 1.01, \dots, 18.01\}$ 。根据一维信息扩散算法步骤,将  $M$  扩散给论域  $U$  中所有的点:

$$f_j(u_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_m} \exp\left[-\frac{(m_j - u_k)^2}{2h_m^2}\right] \quad (12)$$

$$(i = 1, 2, \dots, 15; k = 1, 2, \dots, 19)$$

式中,  $h_m$  为扩散系数,可通过下式确定:

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

式中,  $n$  为样本数;  $b = \max_{1 \leq j \leq n} (m_j)$ ;  $a = \min_{1 \leq j \leq n} (m_j)$ 。

再令

$$C_j = \sum_{k=1}^{19} f_j(u_k) \quad (14)$$

然后,构造模糊子集的隶属函数为

$$\mu_{m_j}(u_k) = f_j(u_k)/C_j \quad (15)$$

进而可将  $m_j$  转换成以  $\mu_{m_j}(u_k)$  为隶属函数的模糊子集,并称  $\mu_{m_j}(u_k)$  为  $m_j$  的归一化信息分布。再令

$$q(u_k) = \sum_{j=1}^{15} \mu_{m_j}(u_k) \quad (16)$$

对于样本集  $M$ ,经过式(12)–(16)的信息扩散公式推算,在给定的台风风险强度论域范围内,考虑所有的样本集  $m_j$ ,论域  $u_k$  点上的个数应为  $q(u_k)$  个。显然,  $q(u_k)$  是一个不小于 0 的实数。

接着,令

$$Q = \sum_{k=1}^{19} q(u_k) \quad (17)$$

式中,  $Q$  是各个  $u_k$  点上的总和,经计算得到  $Q = 15$ 。接着计算样本点  $m_j$  落在论域  $u_k$  点上的概率,即作为概率的估计值。其计算式为

$$p(u_k) = q(u_k)/Q \quad (18)$$

重复以上步骤,可以计算得到 1983—2017 年 5—6 月、7 月、8 月、9 月、10—11 月登陆华南地区台风的风险强度概率分布(图 2)。分析发现,各月份的台风风险强度概率分布并不相同,但变化规律基本为先增加、后下降,并且风险强度越大,相应的概率估计值就越小。如果将发生概率值小于 0.05 的事件称为小概率事件,那么概率估计值大于等于 0.05 的台风风险强度区间,7 月为 0.01—7.01,5—6 月和 8 月均为 0.01—9.01,9 月为 0.01—8.01,10—11 月为 0.01—10.01。值得注意的是,10—11 月在风险强度大于等于 10.01 范围内其概率估计值高于其他月份,可以认为其台风风险强度大于 10.01 的可能性高于其他月份,但此期间台风登陆华南地区事件的可能性较低。因此,不能简单地认为高风险台风概率估计值越高则台风风险就越高,需要进行以损失期望为内涵的台风风险评估。

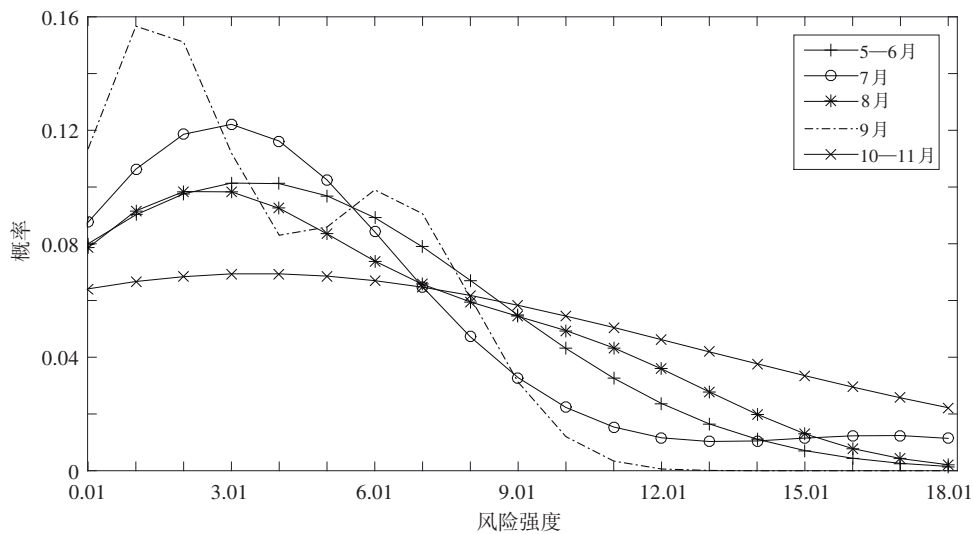


图 2 1983—2017 年不同月份登陆华南地区的台风风险强度概率

Fig. 2 Probability distribution curve of typhoon risk intensity landing in South China for different months during 1983–2017

### 3.3 二维信息矩阵方法估计台风脆弱性函数

台风的脆弱性函数是多种致灾源、承灾体脆弱性与台风灾害损失间的对应关系,第 2 章构造的台风风险指数,既是台风的风险强度,也是多种致灾源和承灾体脆弱性指标耦合得到的结果。因此,可通过识别台风风险强度  $M = \{m_j\}$  与台风造成的直接经济损失  $Y$  间的函数关系来得到台风脆弱性函数。因二维信息矩阵(Liu et al, 2012)不需作假设,又能有效处理离散样本,其精度高、人为干预少、适用面

广,是通过有限知识样本识别函数关系的有效方法之一,因此文中利用此方法识别台风风险强度与直接经济损失间的脆弱性函数关系。

首先,构建样本点集。利用 1983—2017 年 53 个台风样本风险强度和造成的直接经济损失构成样本对:  $W = \{(m_1, y_1), (m_2, y_2), \dots, (m_{53}, y_{53})\} = \{(0.683 \ 4, 0.915 \ 3), (0.838 \ 9, 0.746 \ 7), \dots, (10.057 \ 0, 55.000 \ 0)\}$ 。对输入  $m_j$  和输出  $y_j$  论域的选取上,理论上正态扩散的论域点应尽可能的多,

但通常需要根据样本点的精度进行选取,太多的论域点除了增加计算工作量外,对提高识别精度并无多大帮助。在第 3.2 节中已经选取了台风风险强度的论域点  $U$ ,因此这里依然令台风风险强度的输入论域为集合  $U$ ;而所有台风样本中造成的直接经济

$$\mu((m_j, y_j), (u_k, v_t)) = \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_m} \exp\left(-\frac{(u_k - m_j)^2}{2h_m^2}\right) \right] \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_y} \exp\left(-\frac{(v_t - y_j)^2}{2h_y^2}\right) \right] \quad (19)$$

$(j = 1, 2, \dots, 53; k = 1, 2, \dots, 19; t = 1, 2, \dots, 41)$

式中,扩散系数  $h_m$  和  $h_y$  都可通过式(13) 计算得到。利用式(19),将计算样本点  $W = \{(m_j, y_j)\}$  的信息扩散到监控论域  $U \times V$  上,从而得到一个模糊集合  $\{\mu_{jkt}\}$ ,各点扩散的信息量构成了其隶属度值。对模糊集合  $\{\mu_{jkt}\}$  进行叠加:

$$G_{kt} = \sum_{j=1}^{53} G^{(j)} = \sum_{j=1}^{53} (\mu_{jkt})_{19 \times 41} \quad (20)$$

进而得到  $W$  在  $U \times V$  上的原始信息矩阵  $(G_{kt})_{19 \times 41}$ 。进一步利用式(20)对  $(G_{kt})_{19 \times 41}$  的各列进行归一化处理,得到模糊关系  $R$ ,它描述了台风的风险强度和直接经济损失之间的模糊关系。

$$\begin{cases} R = \{r_{kt}\}_{19 \times 41} \\ r_{kt} = G_{kt} / S_t \\ S_t = \max_{1 \leq k \leq 19} G_{kt} \end{cases} \quad (21)$$

接下来计算输入与输出的分明因果关系,用模糊近似推理模型,生成脆弱性函数。设  $m_0$  为式(11)中的一个论域点,通过信息分配可生成  $U$  上的模糊集(输入)  $\tilde{m}_0$ :

$$\begin{aligned} \tilde{m}_0 &= \mu_{m_0}(u_j) \\ &= \begin{cases} 1 - |m_0 - u_j| / \Delta, & |m_0 - u_j| \leq \Delta \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

式中,  $\Delta = u_{j+1} - u_j$ 。

由  $\tilde{m}_0$  和  $R$  可得到论域  $V$  上的模糊集  $\tilde{n}_0$ :

$$\begin{aligned} \tilde{n}_0 &= \mu_0(v_t) = \sum_{k=1}^{19} \mu_{m_0}(u_k) \cdot r_{kt} \\ &(t = 1, 2, \dots, 41) \end{aligned} \quad (23)$$

再将  $\tilde{n}_0$  非模糊化为一个分明值  $n_0$ :

$$n_0 = \frac{\sum_{t=1}^{41} \mu_0(v_t) \cdot v_t}{\sum_{t=1}^{41} \mu_0(v_t)} \quad (24)$$

例如,当  $m_0 = 0.01$  时,将其在  $U$  上使用式(22)进行信息分配处理,得到模糊集合  $\tilde{m}_0$ 。将此模糊集和式(21)中的模糊关系矩阵  $R$  代入式(23),可得输出模糊集  $\tilde{n}_0$ 。最后,利用式(24)对其进行非模糊化

损失最大值为 396.567 7 亿元,最小值为 0.008 3 亿元,因此,选取的直接经济损失输出论域为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{41}\} = \{0, 10, \dots, 390, 400\}$ 。

利用二维正态信息扩散函数将样本点信息扩散到相应的论域点上。函数表达式为

处理,则得到  $n_0$ 。

让  $m_0$  取遍第 3.2 节强度集合  $M$  中的每一个点,就可得到登陆华南地区台风风险强度与直接经济损失的输入与输出关系  $f(m_0) = n_0$ ,即可得到脆弱性函数的估计值(图 3)。

分析图 3 发现,脆弱性曲线图呈现出一定的变化规律,尽管在某段风险指数范围内存在波动,但整体上脆弱性值随着台风风险的增大而增加。在风险指数小于 8.01 区间,直接经济损失虽然也是随着风险指数的增大而增加,但幅度较小;在风险指数大于 11.01 区间,台风所造成的直接经济损失的增长速率显著上升,幅度也较大。风险指数在 0.01—8.01 范围内台风脆弱性值增加了 114.028 8 亿元,而在 11.01—18.01 范围内台风脆弱性值增加了 288.775 3 亿元。由此可知,台风的脆弱性值随着风险指数的增大会呈现出类似于指数式的增长,前期增长较为缓慢,后期急剧增长。

### 3.4 华南台风灾害认知动态风险耦合

在以往自然灾害风险评估中,都是利用已有的并且是有限的数据,根据风险评估模型进行计算,得到一个相当于“风险”的结果,然而这并不是真正的风险,而是认知风险,是人们利用有限的知识和工具对于风险系统的一种逼近(黄崇福,2015a),能够在未来应对灾害时,有足够充分的心里准备和预防措施。同样,文中计算得到的华南地区台风灾害动态风险也只能是认知动态风险。在第 3.2 和 3.3 节中,已经利用信息扩散技术得到了华南台风灾害风险强度不同月份的概率分布列  $p(m, \text{月份})$  和脆弱性函数  $f(m)$ ,可以发现,概率分布和脆弱性估计都是离散型的,根据第 3.1 节给出的华南地区台风动态风险形式化模型(式(11)),得出以风险承受体损失的直接经济损失期望值为内涵的离散型台风动态风险值:

$$R_{\text{月份}} = \lambda_{\text{月份}} \sum_{j=1}^{19} p(u_j, \text{月份}) f(u_j) \quad (25)$$



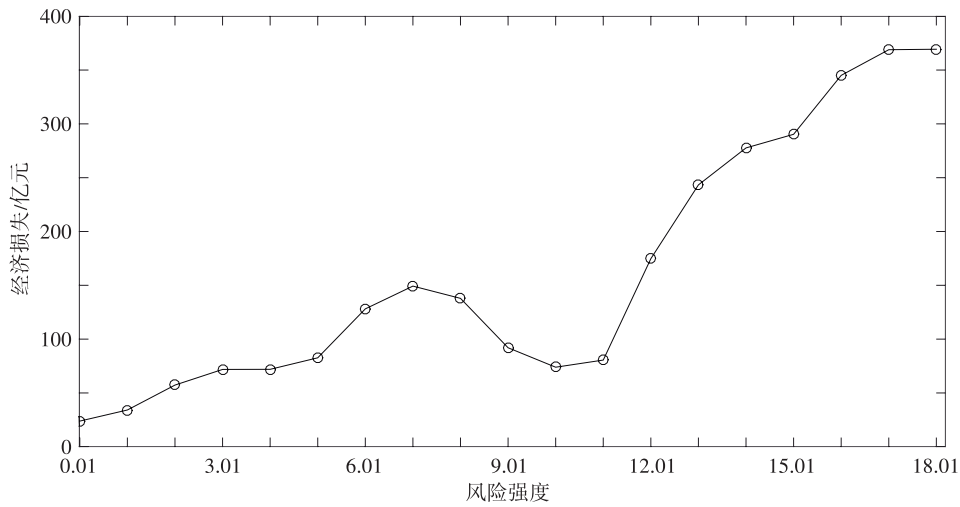


图3 1983—2017年登陆华南地区的台风脆弱性

Fig. 3 Vulnerability curve of typhoon landing in South China during 1983-2017

以华南地区7月的认知动态风险为例,说明其计算过程。将1983—2017年7月登陆华南地区的台风风险强度的概率分布、脆弱性函数以及发生率,代入式(25)可得台风认知动态风险  $R_{7月} = 40.6244$  亿元。

同理,可得到其他月份华南地区台风灾害认知动态风险值(图4)。分析发现,除7月以外其他月份的台风损失期望风险均与实际平均值存在一定差距,特别在9月和10—11月存在较大差距,这是因为在计算实际平均值时,给予了每个台风造成的直接经济损失相同的权重,即认为每个台风造成经济损失事件出现的概率是相等的。然而事实上并非如此,台风所造成的灾情损失与台风致灾源、承灾体脆弱性之间存在复杂的线性和非线性关系。从图2就

可以看出,每个月份的台风风险强度的概率分布并不相同。以简单平均来计算各个月份的台风灾害风险值就会造成将9月和10—11月的台风风险值认知为最高,然而在实际经验中并非如此,因此简单平均的计算结果并不可靠。但是,9月和10—11月的台风损失期望与实际平均值两条曲线的变化趋势一致,在一定程度上说明该评估结果是可靠的。

进一步地分析图4可知,华南地区台风灾害的风险水平在5—6月为风险最低点,之后的7月则上升到了最高点,之后的8月台风风险水平开始回落,9月的风险水平略微上升,但与8月的差距不大,10—11月的风险水平仅高于5—6月。与图2中各月台风风险强度概率分布对比发现,10—11月风险强度大于10.01的台风出现的概率估计值在所有月份中最大,但是1983—2017年10—11月仅有7次台风登陆华南地区,这7次登陆事件中仅有1522号超强台风的风险强度高于10.01,但因为过少的台风样本会使得10.01以上的风险强度会分配得到更大的概率估计值,又因为10—11月台风发生率较低,那么发生风险强度大于10.01的台风登陆事件的概率就会更低。因此,需要添加相应的时间要素(即台风发生率),以消除风险系统本身的系统误差。

文中旨在计算不同月份的以直接经济损失期望为内涵的登陆华南台风动态风险,其意义在于当台风袭来时决策者在未掌握具体灾情情况下得到一个预估的损失情况,这是以历史数据和不同月份为条件得到的一个条件期望,能够在台风的应急管理上给予一定的帮助。根据计算的结果来看,华南地区应按月份、有重点地开展台风防范措施,同时重视

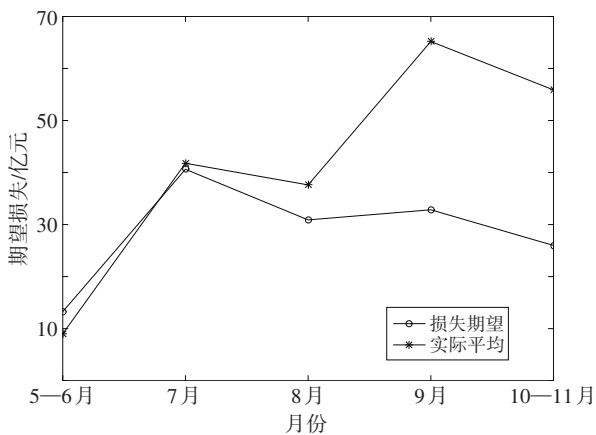


图4 添加时间要素的华南地区年度台风认知动态风险

Fig. 4 Typhoon cognitive dynamic risk curve in South China with time elements

10—11月的台风登陆,虽然此期间台风发生率较低,但一旦发生台风登陆事件,造成的直接经济损失同样很大。

#### 4 结论与讨论

文中,首先基于模糊综合评价法构造台风风险指数,再以灾害期望损失为内涵进行台风认知动态风险评估,最后添加时间要素来以消除风险系统误差,更为准确地评估华南地区台风的认知动态风险,得到以下基本结论:

1) 风险指数能够较好地反映直接经济损失的变化趋势,可通过风险指数的大小大致判断台风带来的灾损程度。

2) 各月份的台风风险强度概率分布并不相同,风险概率的变化规律并不一致,这也会导致不同月份的台风风险水平存在差异;脆弱性曲线反映了台风风险强度与灾损间的函数关系,这是一种以风险强度为条件的灾损期望,且可以看到较大的风险对应较高的灾损值。

3) 华南地区的台风风险水平在各月份并不相同,风险会在7月达到最大值,其次为8月和9月,要特别重视7月、8月和9月的台风防范,同时不能忽视10—11月的台风防范,一旦10—11月发生台风登陆华南地区事件,就会有较大的可能出现高风险台风,造成较严重的直接经济损失。

在台风认知动态风险中,影响风险变化的是综合环境因素和内在自然属性的改变,小到社区排水通道的建设改变了排水效率,大到全球变暖背景下台风的综合强度发生的改变。因此,捕捉到这些变化进行准确地评估最为关键,这就需要更为精细的数据收集与整理工作。同时,在对台风灾害的认知动态风险评估中,可以以某一具体方面进行评估,例如房屋、农业或海洋业,这样风险系统中的综合环境因素变化范围缩小,能够实现更为精细化的评估。

#### 参考文献 (References)

陈有利,朱宪春,胡波,等,2018.基于BP神经网络的宁波市台风灾情预估模型研究[J].大气科学学报,41(5):668-675. Chen Y, Zhu X C, Hu B, et al, 2018. Research on prediction model of typhoon disaster in Ningbo City based on BP neural network[J]. Trans Atmos Sci,41(5):668-675. (in Chinese)

顾小丽,陈有利,钱燕珍,等,2018.宁波市台风灾情评估和基于层次分析法的风险评估[J].热带气象学报,34(4):489-498. Gu X L, Chen Y, Qian Y Z, et al, 2018. Ningbo typhoon disaster assessment and risk assessment based on analytic hierarchy

process[J]. J Trop Meteor,34(4):489-498. (in Chinese)

郭君,黄崇福,艾福利,2015.与月份及预警有关的广东省台风动态风险评估[J].系统工程理论与实践,35(6):1604-1616. Guo J, Huang C F, Ai F L, 2015. Study on typhoon dynamic risk in Guangdong province related to month and early warning[J]. System Engineering-Theory Practice, 35(6): 1604-1616. (in Chinese)

郭君,赵思健,黄崇福,2017.自然灾害概率风险的系统误差及校正研究[J].系统工程理论与实践,37(2):523-534. Guo J, Zhao S J, Huang C F, 2017. Study on systematic error and correction of probability risk of natural disasters[J]. System Engineering-Theory Practice,37(2):523-534. (in Chinese)

胡波,严甲真,丁焯毅,等,2012.台风灾害风险区划模型[J].自然灾害学报,21(5):152-158. Hu B, Yan J Z, Ding Y Y, et al, 2012. Typhoon risk zoning model[J]. J Natur Disasters,21(5): 152-158. (in Chinese)

黄崇福,刘新立,周国贤,等,1998.以历史灾情资料为依据的农业自然灾害风险评估方法[J].自然灾害学报,7(2):4-12. Huang C F, Liu X L, Zhou G X, et al, 1998. Risk assessment method of agricultural natural disasters based on historical disaster data [J]. J Natur Disasters,7(2):4-12. (in Chinese)

黄崇福,2015a.自然灾害动态风险分析基本原理的探讨[J].灾害学,30(2):1-7. Huang C F, 2015. Discussion on the basic principle of dynamic risk analysis of natural disasters[J]. J Catastroph,30(2):1-7. (in Chinese)

黄崇福,2015b.自然灾害动态风险分析的一个形式化模型[J].灾害学,30(3):1-9. Huang C F, 2015. A formal model for dynamic risk analysis of natural disasters[J]. J Catastroph,30(3):1-9. (in Chinese)

雷小途,陈佩燕,杨玉华,等,2009.中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法[J].气象学报,67(5):875-883. Lei X T, Chen P Y, Yang Y H, et al, 2009. Characteristics of typhoon disasters in China and their objective assessment methods[J]. Acta Meteor Sinica,67(5):875-883. (in Chinese)

李钢,邱新法,张眉,等,2014.浙江省台风灾害直接经济损失评估模型[J].热带地理,34(2):178-183. Li G, Qiu X F, Zhang G M, et al, 2014. Evaluation model of direct economic loss of typhoon disaster in Zhejiang province[J]. Tropical Geography,34(2):178-183. (in Chinese)

刘合香,2012.模糊数学理论及其应用[M].北京:科学出版社:4-14. Liu H X, 2012. Fuzzy mathematics theory and its application [M]. Beijing: Science Press:4-14. (in Chinese)

Liu H X, Zang D L, 2012. Analysis and prediction of hazard risks caused by tropical cyclones in Southern China with fuzzy mathematical and grey models[J]. Appl Math Model,36(2):626-637.

史培军,2002.三论灾害研究的理论与实践[J].自然灾害学报,11(3):1-9. Shi P J, 2002. Three on the theory and practice of disaster research[J]. J Natur Disasters,11(3):1-9. (in Chinese)

苏桂武,高庆华,2003.自然灾害风险的分析要素[J].地学前缘,10(S1):272-279. Su G W, Gao Q H, 2003. Analysis elements of natural disaster risk[J]. Earth Sci Front,10(S1):272-279. (in Chinese)



- 田民,刘思峰,卜志坤,2008.灰色关联度算法模型的研究综述[J].统计与决策,(1):24-27. Tian M, Liu S F, Pu Z K, 2008. A review of the research on grey correlation degree algorithm model[J]. Statistics Decision,(1):24-27. (in Chinese)
- 温克刚,2006.中国气象灾害大典:海南卷[Z].北京:气象出版社. Wen K G, 2006. China meteorological disaster ceremony: Hainan volume[Z]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese)
- 温克刚,2006.中国气象灾害大典:广东卷[Z].北京:气象出版社. Wen K G, 2006. China meteorological disaster ceremony: Guangdong volume[Z]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese)
- 温克刚,2006.中国气象灾害大典:广西卷[Z].北京:气象出版社. Wen K G, 2006. China meteorological disaster ceremony: Guangxi volume[Z]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese)
- 于小兵,俞显瑞,吉中会,等,2019.基于信息扩散的东南沿海台风灾害风险评估[J].灾害学,34(1):73-77. Yu X B, Yu X R, Ji Z H, et al, 2019. Disaster risk assessment of typhoon in southeast coast based on information diffusion[J]. J. Catastroph, 34(1):73-77. (in Chinese)
- 张斌,赵前胜,姜瑜君,2010.区域承灾体脆弱性指标体系与精细量化模型研究[J].灾害学,25(2):36-40. Zhang B, Zhao Q S, Jiang Y J, 2010. Study on vulnerability index system and fine quantitative model of regional disaster bearing body [J]. J. Catastroph, 25(2):36-40. (in Chinese)
- 中国气象局,2015.热带气旋年鉴1983—2014年[M].北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2015. Tropical cyclone yearbook 1983 - 2014[M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese)