

徐庆娟,潘金兰,刘合香. 基于二维云信息扩散和三维信息扩散的台风灾害风险估计[J]. 气象研究与应用,2021,42(3):23-30.
Xu Qingjuan, Pan Jinlan, Liu Hexiang. Typhoon disaster risk estimation based on two-dimensional cloud information diffusion and three-dimensional information diffusion[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(3): 23-30.

基于二维云信息扩散和三维信息扩散的台风灾害风险估计

徐庆娟¹, 潘金兰¹, 刘合香^{1,2}

(1. 南宁师范大学数学与统计学院, 南宁 530100; 2. 广西北部湾海洋灾害研究重点实验室, 广西 钦州 535000)

摘要: 基于二维云信息扩散和三维信息扩散提出了一个台风灾害风险估计模型, 构建二维云信息扩散模型, 估计不同风力等级和降雨极值下的台风灾害概率分布; 利用三维信息扩散模型估计台风直接经济损失分布; 基于条件概率分布将其合成风险, 估计不同水平致灾因子作用下的台风灾害损失风险; 并以 2000—2017 年华南台风为例, 对登陆时最大风力等级和降雨极值发生的可能性及其直接经济损失分布进行估计, 得到了不同风力等级和降雨极值下的台风灾害损失风险, 估计结果与实际基本相符。

关键词: 台风灾害; 二维云信息扩散; 三维信息扩散; 条件概率分布; 风险估计

中图分类号: P429

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.3.05

OSID:



引言

台风灾害中的模糊性和随机性等不确定性是进行风险估计的关键。信息扩散方法^[1]通过对不完备信息进行信息膨胀, 可进一步提高小样本模糊推理的精度, 被广泛应用于自然灾害风险评估领域。云模型理论^[2]有机融合了风险评估中的模糊性和随机性, 与信息扩散相结合, 生成了云化信息扩散方法^[3], 已被成功运用到自然灾害风险评估中^[4-5], 其适用性和可靠性均得到提高。

基于信息扩散估计自然灾害概率分布的研究日益丰富, 其成果已从一维的概率分布拓展到二维概率分布^[6], 从基于模糊正态的均匀信息扩散拓展到非均匀信息扩散^[7]。研究表明, 基于二维信息扩散估计概率分布, 可以消除简单统计方法出现的平缓 and 跳空现象, 在一定程度上提高小样本的工作效率, 改进风险估计的精度^[1]。

另一方面, 关于信息扩散方法的研究已拓展到多维信息扩散模型, 其形式主要有两种, 一种是基于

条件落影公式近似推理^[8-9], 一种是基于模糊概念生成模糊关系^[6,10]。其中, 黄崇福^[6]基于模糊概念生成模糊关系构建一个三维信息扩散模型, 来估计台风灾害脆弱性函数, 得到不同台风级别和减灾属性下的台风灾害损失分布, 为防灾减灾提供一定的理论参考。

为充分融合上述方法的优点, 将尝试构建二维云信息扩散模型, 估计两个致灾因子下的台风灾害概率分布, 并利用三维信息扩散模型估计风雨两个致灾因子共同作用下的台风灾害损失分布, 进而基于条件概率分布合成风险, 得到不同致灾因子水平下的台风灾害损失风险。最后, 以 2000—2017 年华南台风为例进行案例分析, 对不同风力等级和降雨极值下的华南台风灾害进行风险估计。

1 资料和方法

1.1 资料

2000—2017 年登陆华南的 29 个台风最大风力等级、降雨极值(最大日降雨量)和直接经济损失数

收稿日期: 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(41665006)、广西自然科学基金(2020GXNSFAA159103)、南宁师范大学博士科研启动项目(20180406001)

作者简介: 徐庆娟(1979—), 女, 山东成武人, 博士, 硕士生导师, 副教授, 主要从事最优化方法、自然灾害风险分析和金融统计研究。E-mail: xuqingjuan@163.com

据,其中最大风力等级和降雨极值数据来源于中国台风网^[11]和中国热带气旋年鉴^[12],直接经济损失数据来源于广西、广东和海南气候中心(2000—2003年)以及中国热带气旋年鉴(2004—2017年)^[12]。

1.2 二维云信息扩散

设两个因子样本观测值为 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 、 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, 所对应的风险因素指标论域分别为 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_J\}$ 和 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_K\}$ 。

考虑到样本事件的不确定性,可将单个样本视为云滴,利用正态云模型将每个样本点 (x_i, y_i) 携带的信息扩散到指标论域 (U, V) 中的点。将二维概率密度信息扩散函数^[6]和云化信息扩散原理^[3]相结合,可得二维概率密度云信息扩散函数:

$$\mu_i(u_j, v_k) = \frac{1}{En'_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(u_j - x_i)^2}{2En'^2_x}\right] \times \frac{1}{En'_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(v_k - y_i)^2}{2En'^2_y}\right] \quad (1)$$

其中, n 为样本的个数; En'_x 是以 En_x 为均值、 He_x 为标准差生成的正态随机数, En'_y 是以 En_y 为均值、 He_y 为标准差生成的正态随机数。相应云模型的数字特征由逆向云发生器估算得到,公式^[13]如下:

$$\begin{cases} Ex = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ En_x = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_i - Ex| \\ He_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - Ex)^2}{n-1} - En_x^2} \end{cases} \quad (2)$$

为确保超熵的计算有效,本文运用公式 $He = \sqrt{|s^2 - En^2|}$ 优化超熵 He 。

给定云滴个数 M , 样本值的确定度归一化信息分布为:

$$f_i^m(u_j, v_k) = \frac{\mu_i^m(u_j, v_k)}{\sum_{i=1}^n \mu_i^m(u_j, v_k)} \quad (3)$$

$i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, J; k=1, 2, \dots, K; m=1, 2, \dots, M$ 。

令 $q^m(u_j, v_k) = \sum_{i=1}^n f_i^m(u_j, v_k)$, $m=1, 2, \dots, M$, 则样本落在风险指标值 (u_j, v_k) 的 M 个云滴的频率值为:

$$p^m(u_j, v_k) = \frac{q^m(u_j, v_k)}{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K q^m(u_j, v_k)}, m=1, 2, \dots, M \quad (4)$$

为了有效地表示风险的大小,可取 M 个云滴的均值来表示样本落在 (u_j, v_k) 处的概率估计值:

$$P(u_j, v_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M P^m(u_j, v_k) \quad (5)$$

进而,超越风险指标值 (u_j, v_k) 的概率风险估计值可表示为:

$$P(u \geq u_j, v \geq v_k) = \sum_{s=j}^J \sum_{t=k}^K p(u_s, v_t) \quad (6)$$

1.3 三维信息扩散

步骤1 样本输入 x, y 和输出 z 构成样本集 C :

$$C = \{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)\} \quad (7)$$

取适当的步长,分别构造 x, y, z 的离散论域:

$$\begin{aligned} U &= \{u_1, u_2, \dots, u_J\}, V = \{v_1, v_2, \dots, v_K\}, \\ W &= \{w_1, w_2, \dots, w_L\} \end{aligned} \quad (8)$$

步骤2 利用公式(9)进行三维正态信息扩散:

$$\begin{aligned} \mu((x_i, y_i, z_i), (u_j, v_k, w_l)) &= \frac{1}{h_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(u_j - x_i)^2}{2h_x^2}\right] \\ &\times \frac{1}{h_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(v_k - y_i)^2}{2h_y^2}\right] \times \frac{1}{h_z \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(w_l - z_i)^2}{2h_z^2}\right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中,扩散系数 h_x, h_y, h_z 计算公式见文^[1,6,9]。

步骤3 基于公式(10),生成一个式(11)所示的三维原始信息矩阵 Q :

$$Q_{ji}^k = \sum_{i=1}^n \mu_{iww}(x_i, y_i, z_i) \quad (10)$$

$$Q = \begin{matrix} & & \begin{matrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_L \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ \vdots \\ u_J \end{matrix} & \begin{bmatrix} Q_{11}^1 & Q_{12}^1 & \cdots & Q_{1L}^1 \\ Q_{21}^1 & Q_{22}^1 & \cdots & Q_{2L}^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{J1}^1 & Q_{J2}^1 & \cdots & Q_{JL}^1 \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_J \end{matrix} & \begin{bmatrix} Q_{11}^2 & Q_{12}^2 & \cdots & Q_{1L}^2 \\ Q_{21}^2 & Q_{22}^2 & \cdots & Q_{2L}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{J1}^2 & Q_{J2}^2 & \cdots & Q_{JL}^2 \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{matrix} v_K \\ \vdots \\ u_J \end{matrix} & \begin{bmatrix} Q_{11}^K & Q_{12}^K & \cdots & Q_{1L}^K \\ Q_{21}^K & Q_{22}^K & \cdots & Q_{2L}^K \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{J1}^K & Q_{J2}^K & \cdots & Q_{JL}^K \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

其中, $j=1, 2, \dots, J; l=1, 2, \dots, L; k=1, 2, \dots, K$ 。

步骤 4 基于模糊概念生成模糊关系矩阵 $R_j^{[6]}$:

$$\begin{cases} R_j = \{r_{jl}^k\} J \times K \times L \\ r_{jl}^k = \frac{Q_{jl}^k}{\max_{\substack{1 \leq j \leq J \\ 1 \leq k \leq K}} \{Q_{jl}^k\}} \end{cases} \quad (12)$$

步骤 5 按照线性分配公式(13)和(14), 将样本输入 x, y 入进行模糊化处理:

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - u_j|}{\Delta_u}, & |x_i - u_j| \leq \Delta_u \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_B(v) = \begin{cases} 1 - \frac{|y_i - v_k|}{\Delta_y}, & |y_i - v_k| \leq \Delta_y \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\Delta_u = u_{j+1} - u_j, \Delta_y = v_{k+1} - v_k$ 。

步骤 6 以论域 U, V 上的模糊集 $\mu_A(u)$ 和 $\mu_B(v)$ 为输入, 利用式(15)进行模糊近似推理, 可得输出模糊集 $D^{[6]}$:

$$\mu_D(w) = \bigvee_{u,v} [\mu_A(u) \wedge \mu_B(v) \wedge \mu_{R_j}(u, v, w)], w \in W \quad (15)$$

步骤 7 基于重心法, 对输出模糊集 D 进行非模糊化处理, 输出一个分明值 \hat{z} :

$$\hat{z} = \frac{\sum_{l=1}^L \mu_D(w_l) w_l}{\sum_{l=1}^L \mu_D(w_l)} \quad (16)$$

1.4 基于条件概率分布的风险合成

本研究旨在对台风致灾因子造成的风险进行评估, 评估不同水平致灾因子发生的可能性及其造成的损失。选取台风登陆时最大风力等级和降雨极值作为致灾因子。基于 1.2 节二维云信息扩散模型可以估计不同风力等级和降雨极值条件下台风的概率分布 $P(U=u_i, V=v_j)$, 进而可以求得其条件概率分布 $P(U=u_i|V=v_j)$ 和 $P(V=v_j|U=u_i)$ 。将台风登陆时最大风力等级、降雨极值和直接经济损失作为样本输入, 利用 1.3 节三维信息扩散模型可估计不同风力等级和降雨极值条件下的台风直接经济损失分布 $f(U=u_i, V=v_j)$ 。

记 $R(V|U=u_i)$ 为最大风力等级 $U=u_i$ 条件下的台风灾害损失期望, 则其计算公式为:

$$R(V|U=u_i) = \sum_{j=1}^m P(V=v_j|U=u_i) f(U=u_i, V=v_j), i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m \quad (17)$$

同理, 在降雨极值 $V=v_j$ 下, 最大风力等级 U 导致的台风条件损失期望 $R(U|V=v_j)$ 为:

$$R(U|V=v_j) = \sum_{i=1}^n P(U=u_i|V=v_j) f(U=u_i, V=v_j), i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m \quad (18)$$

1.5 模型的结构

基于上述二维云信息扩散和三维信息扩散模型, 构建了一个新的台风灾害风险估计模型, 其具体结构如下:

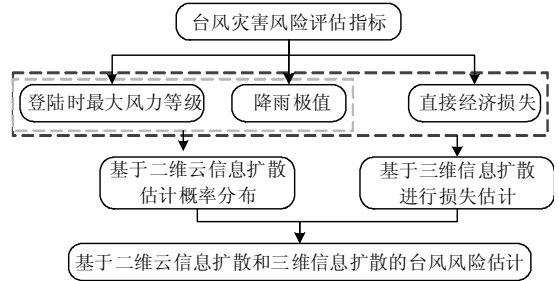


图 1 基于二维云信息扩散和三维信息扩散的台风灾害风险估计模型结构

2 正态性检验

调用 R 软件 MVN 程序包, 采用 Mardia 对 2000—2017 年华南台风登陆时最大风力等级和降雨极值数据进行二维正态分布检验。结果显示 Mardia 偏度和峰度检验统计量的值分别为 4.9083 和 -0.5800, 其显著性概率分别为 0.2968 和 0.5619, 均大于 0.05, 表明在 5% 显著性水平下, 该台风样本数据服从二维正态分布。同理, 可以验证 2000—2017 年华南台风登陆时最大风力等级、降雨极值和直接经济损失服从三维正态分布, 这为下面基于二维云信息扩散模型估计概率分布、基于三维信息扩散模型估计台风损失提供了理论依据。

3 基于二维云信息扩散的概率分布

选取 2000—2017 年华南 29 个台风样本, 记台风登陆时最大风力等级和降雨极值分别为:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{29}\} = \{13, 12, 12, \dots, 14, 12\}, \\ Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{29}\} = \{236, 380, 310, \dots, 399, 386.9\}。$$

上述台风样本中最大风力等级 X 最小值为 12 等级, 最大值 17 等级, 降雨极值 Y 最小值为 188mm, 最大值为 656.1mm, 基于最大最小值可构造其离散论域区间为 $[12, 17]$ 和 $[180, 660]$ 。若取最大风力等级离散论域步长为 1, 降雨极值离散论域步长为 60, 则其离散论域分别为:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} = \{12, 13, 14, 15, 16, 17\}$$

$V=\{v_1,v_2,v_3,v_4,v_5,v_6,v_7,v_8,v_9\}=\{180,240,300,360,420,480,540,600,660\}$
取云滴个数 $M=1000$ 。按照 1.2 节二维云信息扩

散模型的(1)–(5)式计算,得到登陆华南区域不同风力等级和降雨极值的台风的概率分布,见表 1。

表 1 基于二维云信息扩散的华南台风不同风力等级和降雨极值下的概率分布

风力 级别	降雨极值(mm)									$P_{i\cdot}$
	180	240	300	360	420	480	540	600	660	
12 级	0.0193	0.0300	0.0403	0.0435	0.0379	0.0255	0.0162	0.0106	0.0068	0.2302
13 级	0.0206	0.0326	0.0429	0.0449	0.0389	0.0274	0.0195	0.0148	0.0107	0.2521
14 级	0.0176	0.0288	0.0386	0.0404	0.0358	0.0269	0.0213	0.0176	0.0132	0.2403
15 级	0.0099	0.0167	0.0229	0.0250	0.0229	0.0187	0.0169	0.0153	0.0115	0.1599
16 级	0.0041	0.0069	0.0098	0.0111	0.0107	0.0097	0.0100	0.0098	0.0072	0.0793
17 级	0.0014	0.0024	0.0035	0.0042	0.0046	0.0050	0.0061	0.0064	0.0045	0.0382
$P_{\cdot j}$	0.0730	0.1174	0.1580	0.1691	0.1509	0.1132	0.0900	0.0744	0.0540	1

从表 1 可知,最大风力为 13 级、降雨极值 360mm 的台风发生的可能性相对较大,其次是最大风力为 12 级、降雨极值 360mm 的台风。同时,最大风力为 12 级至 15 级的台风,其降雨极值在 360mm

的可能性相对较大。最大风力为 16 级至 17 级的台风发生的可能性非常小。

下面给出华南台风在不同风力等级和降雨极值下的超越概率,见表 2。

表 2 基于二维云信息扩散的华南台风不同风力等级和降雨极值下的超越概率

最大 风力	降雨极值(mm)								
	180	240	300	360	420	480	540	600	660
12 级	1	0.9270	0.8096	0.6516	0.4825	0.3316	0.2184	0.1284	0.0540
13 级	0.7698	0.7161	0.6286	0.5110	0.3854	0.2724	0.1847	0.1110	0.0472
14 级	0.5176	0.4845	0.4297	0.3549	0.2742	0.2001	0.1398	0.0855	0.0364
15 级	0.2773	0.2619	0.2359	0.1996	0.1594	0.1211	0.0877	0.0548	0.0233
16 级	0.1175	0.1119	0.1026	0.0893	0.0740	0.0587	0.0439	0.0279	0.0117
17 级	0.0382	0.0368	0.0344	0.0309	0.0266	0.0220	0.0170	0.0109	0.0045

从表 2 可知,最大风力 ≥ 12 级、降雨极值 ≥ 300 mm 时的超越概率为 0.8096,可视为常态风险,由此预估未来登陆华南地区的台风,最大风力 ≥ 12 级、降雨极值 ≥ 300 mm 会有很大的可能性。最大风力 ≥ 13 级、降雨极值 ≥ 240 mm 时的超越概率为 0.7161,可以预估未来台风登陆华南地区时,会有较大的可能性。最大风力 ≥ 16 级、降雨极值 ≥ 600 mm 时的超越概率为 0.0279,小于 0.05,可视为小概率事件,可以估计未来华南地区遭遇最大风力 ≥ 16 级、降雨极值 ≥ 600 mm 台风的可能性很小,这与历史上登陆华南的台风实际情况基本相符。

4 基于三维信息扩散的台风直接经济损失估计

选取 2000—2017 年华南台风登陆时最大风力等级 x 和降雨极值 y 作为样本输入,直接经济损失 z 作为输出.根据台风资料,得到如下样本集:

$$C=\{(x_1,y_1,z_1),(x_2,y_2,z_2),\cdots,(x_{29},y_{29},z_{29})\}\\=\{(13,236,13.86),(12,380,1.66),\cdots,(12,386.9,7.1)\}$$

最大风力等级和降雨极值的离散论域同 1.3 节 U 和 V 。考虑到台风样本中直接经济损失 z 的最小值为 0.5752 亿元,最大值为 416.5226 亿元,故可取其离散论域区间为 $[0,420]$ 。令离散论域步长为 60,

则该离散论域如下:

$$W = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8\} \\ = \{0, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420\}$$

利用 1.3 节三维正态信息扩散模型计算, 生成一个式(11)所示的三维原始信息矩阵 Q , 基于模糊概念, 将其转换为模糊关系矩阵 R_f :

$$R_f = \begin{matrix} & & \begin{matrix} w_1 & w_2 & w_3 & w_4 & w_5 & w_6 & w_7 & w_8 \end{matrix} \\ & & \begin{matrix} 0 & 60 & 120 & 180 & 240 & 300 & 360 & 420 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1=180 \\ v_2=240 \\ \vdots \\ v_9=660 \end{matrix} & \begin{matrix} u_1(12) \\ u_2(13) \\ u_3(14) \\ u_4(15) \\ u_5(16) \\ u_6(17) \\ u_1(12) \\ u_2(13) \\ u_3(14) \\ u_4(15) \\ u_5(16) \\ u_6(17) \\ \vdots \\ u_1(12) \\ u_2(13) \\ u_3(14) \\ u_4(15) \\ u_5(16) \\ u_6(17) \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccccccccc} 0.1829 & 0.1891 & 0.0492 & 0.0003 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.1215 & 0.0963 & 0.0203 & 0.0030 & 0.0056 & 0.0022 & 0.0002 & 0.0000 \\ 0.0482 & 0.0428 & 0.0164 & 0.0258 & 0.0491 & 0.0197 & 0.0015 & 0.0000 \\ 0.0042 & 0.0039 & 0.0017 & 0.0031 & 0.0057 & 0.0022 & 0.0002 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.3334 & 0.2763 & 0.0634 & 0.0005 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.3669 & 0.3672 & 0.0659 & 0.0409 & 0.0581 & 0.0223 & 0.0017 & 0.0000 \\ 0.2397 & 0.2449 & 0.1957 & 0.3596 & 0.5125 & 0.1966 & 0.0149 & 0.0000 \\ 0.0233 & 0.0251 & 0.0246 & 0.0535 & 0.0664 & 0.0231 & 0.0017 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0004 & 0.0015 & 0.0010 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0073 & 0.0205 & 0.0144 & 0.0004 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0643 & 0.1811 & 0.1475 & 0.0802 & 0.0414 & 0.0032 & 0.0001 & 0.0000 \\ 0.0090 & 0.0287 & 0.2592 & 0.7027 & 0.3727 & 0.0515 & 0.0129 & 0.0001 \\ 0.0012 & 0.0473 & 0.5389 & 0.2225 & 0.1181 & 0.2148 & 0.1102 & 0.0009 \\ 0.0001 & 0.0053 & 0.0589 & 0.0165 & 0.0088 & 0.0245 & 0.0391 & 0.0267 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0036 & 0.2338 & 0.2338 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (21)$$

按照式(13)和(14)的线性分配公式, 将台风登陆时最大风力等级 x 、降雨极值 y 进行模糊化处理. 由论域 U 和 V 的定义, 模糊集 A = “13 级台风” 和 B = “降雨极值为 240mm” 可表示为:

$$\mu_A(u) = \frac{0}{u_1} + \frac{1}{u_2} + \frac{0}{u_3} + \frac{0}{u_4} + \frac{0}{u_5} + \frac{0}{u_6} \quad (19)$$

$$\mu_B(v) = \frac{0}{v_1} + \frac{1}{v_2} + \frac{0}{v_3} + \frac{0}{v_4} + \frac{0}{v_5} + \frac{0}{v_6} + \frac{0}{v_7} + \frac{0}{v_8} + \frac{0}{v_9} \quad (20)$$

用式(15)进行模糊近似推理, 可得直接经济损失输出模糊集 D 关于论域 W 中的元素 w_1 的隶属度值为:

$$\begin{aligned} \mu_D(w_1) &= \bigvee_{u,v} [\mu_A(u) \wedge \mu_B(v) \wedge \mu_{R_f}(u, v, w)] \\ &= \mu_A(u_2) \wedge \mu_B(v_2) \wedge \mu_{R_f}(u_2, v_2, w_1) \\ &= 1 \wedge 1 \wedge 0.3669 \\ &= 0.3669 \end{aligned} \quad (21)$$

同理, 可模糊近似推理 W 中所有元素的隶属度, 进而得到其直接经济损失模糊集 D :

$$\begin{aligned} \mu_D(w) &= \frac{0.3669}{w_1} + \frac{0.3672}{w_2} + \frac{0.0659}{w_3} + \frac{0.0409}{w_4} + \\ &\frac{0.0581}{w_5} + \frac{0.0223}{w_6} + \frac{0.0017}{w_7} + \frac{0.0000}{w_8} \end{aligned} \quad (22)$$

最后, 使用式(16)的重心法, 对输出模糊集 D 进行非模糊化处理, 输出一个分明值, 估计出“13 级台风” 其“降雨极值为 240mm” 的经济损失为 63.8632 亿元。

遍历所有样本点, 得到华南地区不同风力等级和降雨极值下台风导致的直接经济损失估计值, 其结果见表 3。

从表 3 估计结果可知, 华南地区最大风力 12 级、降雨极值 360mm 的台风导致的直接经济损失估计为 49.9193 亿元。实际上 1003 号台风“灿都”, 登陆华南时最大风力 12 级、降雨极值 386mm, 导致的直接经济损失约 46.538 亿元, 比其估计值略小。表 3 中华南地区最大风力 14 级、降雨极值 660mm 台风的直接经济损失估计达 187.1492 亿元, 而登陆华南的台风“尤特”(1311) 最大风力 14 级、降雨极值 656.1mm 直接经济损失 190.7 亿元, 因此估计值略微偏小。估计最大风力 15 级、降雨极值 540mm 台风的直接经济损失约 267.6326 亿元, 与最大风力 15 级、降雨极值 577.9mm 的台风“彩虹”(1522) 的直接经济损失 288.0887 亿元相比, 结果偏离很小。估计

表 3 华南地区不同风力等级和降雨极值下台风的直接经济损失估计值(亿元)

风力等级	降雨极值(mm)								
	180	240	300	360	420	480	540	600	660
12 级	41.0555	36.0661	36.5212	49.9193	66.0455	73.8328	73.3526	70.8999	71.2893
13 级	43.4641	63.8632	83.8808	98.6959	127.4957	118.2491	70.0886	84.9321	104.1151
14 级	134.6838	164.5556	168.5120	185.4195	197.8986	157.5745	132.4995	187.7775	187.1492
15 级	146.7571	172.5570	183.4866	194.0787	197.8956	234.8147	267.6326	235.3105	191.7079
16 级	170.0128	194.1974	196.3409	196.6366	198.4960	319.2054	324.5840	297.4297	250.6380
17 级	195.9570	196.6436	196.6921	206.8689	383.7807	389.2929	389.2977	389.2835	389.2445

最大风力 17 级、降雨极值 600mm 台风的直接经济损失约 389.2977 亿元,与超强台风“威马逊”(1409)最大风力 17 级、降雨极值 581.2mm 相比,直接经济损失估计偏低了一些。

与历年台风实际数据比较可知,上述不同风力等级和降雨极值下的台风直接经济损失估计是基本有效的。然而,由于导致台风直接经济损失的因素很多,不仅与最大风力等级、降雨极值有关,还与登陆路径、潮位等因素有关。因此,估计结果与实际很可能会出现一定的偏离。例如,表 3 中估计最大风力 13 级、降雨极值 600mm 的台风直接经济损失约 84.9321 亿元,与登陆华南时最大风力 13 级、降雨极值 622.5mm、直

接经济损失为 48.4 亿元的 0915 号台风“启德”相比,直接经济损失估计偏高了很多。因此,进一步考虑登陆路径等因素,是本文未来研究的方向。

5 不同致灾因子水平下的台风灾害损失风险

5.1 条件概率分布

给定台风登陆时最大风力等级,计算降雨极值的概率分布。例如,给定最大风力等级 $U=12$,对表 1 第一行求和可知 $P(U=12)=P_1=0.2302$,再将该行各元素分别除以 P_1 ,可得到降雨极值 V 的条件分布列,见表 4。

表 4 华南区域台风灾害给定风力等级 $U=12$,降雨极值 V 的条件分布

$V U=12$	180	240	300	360	420	480	540	600	660
P	0.0839	0.1302	0.1752	0.1889	0.1648	0.1109	0.0704	0.0460	0.0297

从表 4 可知,在最大风力等级 $U=12$ 时,降雨极值为 360mm 的可能性相对较大,降雨极值在 540mm 及其以上的可能性相对较小。同理,给定不同的最大风力等级 U ,均可得到降雨极值 V 的条件分布列,结果按行汇总到表 5 中。类似可得到,给定不同的降雨极值 V ,最大风力等级 U 的条件分布列。

5.2 给定最大风力等级,降雨极值导致的台风损失风险

根据表 4 和表 5,由式(17)进行风险合成,可得到华南台风在不同风力等级条件下的直接经济损失风险,见表 6。

从表 6 可知,登陆华南最大风力为 12 级台风造成的直接经济损失最低,约为 53.6 亿元;最大风力为 13 级台风造成的直接经济损失高于 12 级台风,

约为 90.9 亿元;最大风力为 14 级台风造成的直接经济损失约为 170.8 亿元;最大风力为 15 级和 16 级的台风所造成的直接经济损失已超过 200 亿元,分别为 204.3 亿元和 243.7 亿元;最大风力为 17 级的台风所造成的直接经济损失约为 331.3 亿元。

为进一步说明本文模型的可靠性,与采用简单统计方法估算(对原始数据统计、整理分类、取均值)的台风灾害损失结果进行比较,如图 2 所示。

由图 2 可知,在最大风力 12~14 级间,本文模型估计的直接经济损失略高于简单统计方法估算的结果。在 15 级时,两种方法估计结果很接近。在 16 级时,简单统计估算的结果出现跳空现象,这是由于收集的台风样本中没有 16 级的台风数据。而本文模型消除了这种跳空现象,可靠性更强。在 17 级时,估计的台风直接经济损失略低于简单统计估算

表 5 华南台风基于不同最大风力等级的条件概率分布 (VIU)

最大 风力	降雨极值(mm)								
	180	240	300	360	420	480	540	600	660
12 级	0.0839	0.1302	0.1752	0.1889	0.1648	0.1109	0.0704	0.0460	0.0297
13 级	0.0818	0.1292	0.1701	0.1779	0.1542	0.1085	0.0773	0.0586	0.0425
14 级	0.0734	0.1200	0.1605	0.1683	0.1491	0.1121	0.0888	0.0731	0.0548
15 级	0.0622	0.1042	0.1436	0.1561	0.1435	0.1169	0.1055	0.0960	0.0721
16 级	0.0517	0.0874	0.1233	0.1398	0.1354	0.1223	0.1258	0.1235	0.0908
17 级	0.0371	0.0633	0.0918	0.1110	0.1207	0.1315	0.1594	0.1663	0.1190

表 6 华南区域台风不同风力等级条件下的直接经济损失风险

最大风力等级	12	13	14	15	16	17
损失风险(亿元)	53.5832	90.9329	170.7874	204.2341	243.6961	331.3282

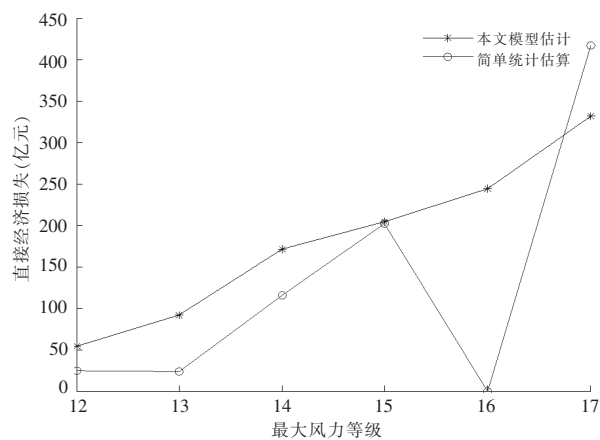


图 2 不同风力等级条件下台风直接经济损失风险

的结果。

5.3 给定降雨极值，最大风力等级导致的台风损失风险

类似地，可计算华南台风在不同降雨极值条件下的直接经济损失期望,见表 7。与基于采用简单统计方法估算的台风灾害损失进行比较,如图 3 所示。

从表 7 可以看出，登陆华南区域降雨极值为

180mm 的台风造成的直接经济损失最低，约为 88.98 亿元；降雨极值为 240mm、300mm、360mm 的台风造成的直接经济损失约在 100~130 亿元之间；降雨极值为 420mm、480mm、540mm 的台风造成直接经济损失约在 150~175 亿元之间；降雨极值为 600mm 和 660mm 的台风造成的直接经济损失最大,已超过 180 亿元。

由图 3 可知，台风降雨极值为 480mm 到 540mm 时,简单统计方法估算的台风直接经济损失风险比本文模型估计要低许多，且在降雨极值 480mm 处出现了跳空现象,估计结果没有出现跳空现象更合理。然而，在降雨极值 600mm 和 660mm 时，本文模型估计的台风直接经济损失比简单统计估算的结果普遍要低。

综上可知，除了简单统计方法估算的台风灾害损失存在个别跳空现象外，图中折线的变化趋势总体一致，模型估计的华南台风直接经济损失风险普遍高于简单统计估算的结果。因此人们要额外加强防范,做好台风的防灾与减灾工作。

表 7 华南区域台风不同降雨极值条件下的直接经济损失风险

降雨极值(mm)	180	240	300	360	420	480	540	600	660
损失风险(亿元)	88.9825	107.3509	116.3596	130.1042	152.3377	166.0525	172.3391	192.1394	182.4784

6 结论

构建了二维云信息扩散模型，对不同风力等级和降雨极值下的台风概率分布进行估计；采用三维

信息扩散模型估计了不同风力等级和降雨极值下台风导致的直接经济损失;进一步计算条件概率分布，与直接经济损失分布进行风险合成，得到不同致灾因子水平下的台风灾害损失风险。以 2000—2017 年

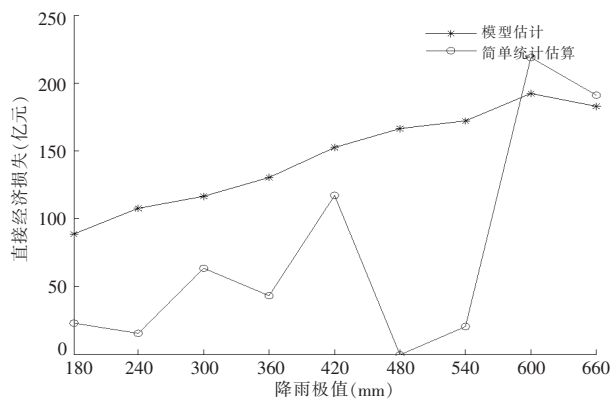


图3 不同降雨极值条件下台风直接经济损失风险

华南台风样本为例进行风险估计,得到不同风力等级和降雨极值下的华南台风概率分布、超越概率、直接经济损失分布,与实际基本相符。进而基于条件概率分布,得到不同条件下的台风灾害损失风险,进行风险合成和简单统计方法估算的结果进行比较,验证了本文模型的可靠性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Li D Y, Shi X M, Ward P, et al. Soft Inference Mechanism Based on Cloud Models[C]. Bonn Germany, 1996:38–63.
- [3] 李梅.不完备信息下的河流健康风险预估模型研究[D].西安:西安理工大学,2007.

- [4] 龚艳冰,胡娜,刘高峰,等.基于正态云信息扩散方法的水旱灾害风险评估模型——以徐州市为例[J].系统工程,2016,34(11):54–58.
- [5] Zhong M, Wang J, Gao L, et al. Fuzzy Risk Assessment of Flash Floods Using a Cloud-Based Information Diffusion Approach [J]. Water Resour Management, 2019, 33(8), 2537–2553.
- [6] 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.
- [7] 张韧,徐志升,申双和,等.基于小样本案例的自然灾害风险评估—信息扩散概率模型 [J]. 系统科学与数学,2013,33(4):445–456.
- [8] 李炳华.基于模糊信息优化处理方法的火灾风险分析研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
- [9] 徐庆娟,潘金兰,刘合香.基于三维信息扩散和随机过程的台风灾害风险估计[J].南宁师范大学学报(自然科学版),2020,37(4):54–69.
- [10] 黄崇福,田雯,王润东.在救灾智联网中推测信息孤岛救助需求强度的空间信息扩散模型[J].自然灾害学报,2021,30(2):1–13.
- [11] 中国台风网.<http://typhoon.weather.com.cn/index.shtml/> 2017/07/14.
- [12] 中国气象局.热带气旋年鉴(2004—2017年)[Z].北京:气象出版社,2005–2019.
- [13] 宋占智,蒋尚明,金菊良,等.蚌埠市农业旱灾脆弱性综合评价[J],水利水运工程学报,2017(3):56–63.

Typhoon disaster risk estimation based on two-dimensional cloud information diffusion and three-dimensional information diffusion

Xu Qingjuan¹, Pan Jinlan¹, Liu Hexiang^{1,2}

(1. School of Mathematics and Statistics, Nanning Normal University, Nanning Guaxngxi 530100;

2. Guangxi Beibu Gulf Marine Disaster Research Key Laboratory, Qinzhou, Guangxi 535000)

Abstract: In this paper, a typhoon disaster risk estimation model was proposed based on two-dimensional cloud information diffusion and three-dimensional information diffusion. A two-dimensional cloud information diffusion model was constructed to estimate the probability distribution of typhoon disaster under different wind levels and rainfall extremes. The direct economic loss distribution of typhoon was estimated by using three-dimensional information diffusion model. Based on the conditional probability distribution, the risk was synthesized, and the typhoon disaster loss risk under different levels of hazard factors was estimated. Taking the typhoon in South China from 2000 to 2017 as an example, the possibility of maximum wind level and extreme rainfall at landing and its direct economic loss distribution were estimated, and the typhoon disaster loss risk under different wind levels and extreme rainfall were obtained. The estimated results are basically consistent with the reality.

Key words: typhoon disaster; two-dimensional cloud information diffusion; three-dimensional information diffusion; conditional probability distribution, risk estimation