

徐明, 雷小途, 杨秋珍. 应用联合极值分布评估热带气旋影响风险——以“海葵”对上海地区影响为例[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 124–130. [Xu Ming, Lei Xiaotu and Yang Qiuzhen. Risk Assessment on Impacts of Tropical Cyclone Haikui on Shanghai by Applying Multivariate Compound Distribution Function [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 124–130.]

应用联合极值分布评估热带气旋影响风险

——以“海葵”对上海地区影响为例*

徐 明, 雷小途, 杨秋珍

(中国气象局上海台风研究所 中国气象局台风预报技术重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 热带气旋成灾是致灾因子、受灾对象的物理暴露与脆弱性以及应对灾害能力等共同作用的复杂的非线性过程。在应灾能力无显著变化的前提下, 受灾风险大小及灾情轻重常与热带气旋风雨的影响强弱相一致。热带气旋风雨越大, 越趋于小概率事件时, 其超出承灾体忍受能力或设防标准可能性越大, 导致严重灾害的可能性越大。所以, 可根据热带气旋风雨强度的出现可能性大小确立风险阈值判据, 以此评估影响风险程度。该研究应用了气象随机现象在时间域与空间域分布上具等价性的原理, 以热带气旋“海葵”对上海地区影响为例开展试验, 建立了以日降水量区域极值、极大风速区域极值为边际分布的热带气旋风雨影响强度联合分布模型。结果显示, 根据联合分布模型得出的热带气旋影响风雨共现超越概率能较好地表征影响风险程度, 尤其对受灾严重的高风险区有相当确定的鉴别。这为基于气象资料提高极端事件影响评估的准确性提供了有价值的思路, 也为规避及转移风险或合理利用资源提供客观依据。

关键词: 热带气旋; 联合极值分布; 共现超越概率; 风险评估; 分区

中图分类号: X43; TP3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2014)03–0124–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2014.03.023

热带气旋是世界上致灾影响最大的自然灾害之一, 具有发生频次高、影响范围广、突发性强、成灾强度大等特征, 对我国危害十分严重。其主要致灾因素是强风和暴雨。尤其当狂风、暴雨与风暴潮并袭, 常会掀起狂涛猛浪, 造成更为严重的灾害^[1–2]。

2000年以来, 不少学者对热带气旋灾害风险成因与损失预测评估做了研究和探索, 相关的模型及应用也日益成熟。国际上对飓风(Hurricane)损失风险评估的研究较多集中在风工程方面, 尤其侧重结构易损性等方面^[3–10]。国内早在1990年代中期卢文芳^[11]用统计回归方法对上海热带气旋灾情评估进行过研究, 近10多年间热带气旋灾害研究主要采用灾情指数、层次分析、模糊评判、神经网络、可拓分析等方法评估热带气旋灾情或风险^[12–36], 同时将GIS技术应用于评估系统的构建及灾害的空间分析^[37–38]。上述工作的基本思路是先建立各类评估指标, 然后应用回归、判别等方法进行综合评估。由于在指标的选择上主观性较强, 且回归、神经网络等方法有向众数靠近的

特性, 不能较好地表征极端事件与巨灾。杨秋珍^[39–41]等人开发的基于热带气旋致灾因子超越概率的致灾风险评估方法, 能对致灾因子强度进行客观描述, 对极端事件也能较好刻画, 本文旨在探讨如何将此思路拓展应用于多重致灾因素影响下的风险的空间分区。

上海东濒东海, 南临杭州湾, 北界长江入海口, 5–11月间易受热带气旋影响, 常导致较大灾害损失。据统计, 近500年间造成上海万人以上死亡的热带气旋灾害多达17起。即使在防御能力相当强大的当今, 仍不时遭灾^[42]。如0509号“麦莎”、0513号“卡努”、0716号“罗莎”以及2012年的1211号“海葵”都给上海带来较大灾害损失。为此, 本文以上海为研究区域, 以“海葵”为例证, 依据前期致灾风险评估方法研究基础, 开发基于多变量联合分布的热带气旋影响风险空间分布评估方法, 以此对热带气旋灾害影响程度在空间上作出客观诊断, 为政府决策部门制定防台减灾提供有效依据。

* 收稿日期: 2013–10–24

修回日期: 2013–12–31

基金项目: 科技部行业专项“台风灾情资料整编技术研究”(GYHY200906005)

作者简介: 徐 明(1969–), 男, 江苏江阴人, 副研究员, 主要从事台风灾害研究工作. E-mail: xum@mail.typhoon.gov.cn

通讯作者: 杨秋珍(1963–), 女, 上海人, 高级工程师, 主要从事气象事件影响评估方法研究. E-mail: yangqz@mail.typhoon.gov.cn

1 思路与方法

1.1 热带气旋灾害随机事件发生风险的复合属性

具有确定概率分布的不确定性,就是常说的“风险”(risk)^[43-46]。气象要素在任何时空尺度上都具有一定程度的随机性。按照随机过程的遍历性原理,以时间域的频次为考察对象的单个测点的气象要素概率分布与以空间或质量占有数为对象的气象要素场空间概率分布,两者并无本质区别。从理论上说,借助于概率分布函数(PDF)的适当解析形式可以对气象要素的水平空间分布非均匀性作出严谨的数学描述。而确定恰当的PDF描述函数是反映气象要素的水平空间分布的非均匀性特征的关键步骤^[47]。

就热带气旋灾害而言,对于一定区域,在应灾能力(风险控制管理能力)无显著变化的前提下,热带气旋降水与大风强度共同决定了灾害的形成与发展及最终的灾情程度,承灾体(人、财、物、生态环境)灾情的轻重与热带气旋风雨致灾因子的强弱是相一致的,当风雨强度越大、异常程度越大,越趋于低频偶发的小概率事件时,超出设防能力可能性越大,应对难度也越高,造成的破坏亦越严重,出现严重灾害的可能性越大。相反,当风雨强度较小,趋于可遇率大的常发事件时,灾情往往较轻或倾向无害甚或有益。可以推知,两种或以上影响变量同时达到极端情况时(即当各类因子都为小概率时),便有可能触发更极端联合事件,它是更小的小概率事件,成灾风险往往比单因子为小概率事件时更严重,出现巨灾的可能性更大。

所以关键是要准确反映出复合小概率事件这些特征信息,才能对发生风险做出客观的估量。对热带气旋灾害这种多因素复合事件,依托多变量联合分布模型的研究、以联合概率值作为度量致灾因子影响强度及致灾风险的描述指标应该是较为恰当的。近年来国际国内已有一些学者将联合分布应用在金融、海洋、水文领域,以表述多个变量同时达到极值的随机现象的概率问题。但在大气科学领域,绝大多数研究极值事件时,只局限于应用一维分布模型为主,仅有少量应用多维模式分析变量间的共同作用,而依托的联合分布模型研究热带气旋灾害风险尚未见涉及,因此是一个新的探索。当然在取得其它热带气旋灾害风险影响因素资料后,也可用类似的思路加以推广。

1.2 联合分布函数表征热带气旋风雨影响强度

设热带气旋风雨强度因子(极大风速 V 、日最大降水量 R)是定义在同一概率空间 (Ω, Ψ, P) 上的随机变量,则称由它们构成的 (V, R) 为二维随机变

量。二维随机变量 (V, R) 的性质不仅与 V 和 R 各自的性质有关,而且还依赖于这两个随机变量间的相互关系。因此,仅仅逐个研究 V 和 R 的性质是不够的,必须把 (V, R) 作为一个整体加以研究。为了描述二维随机向量整体的统计规律,引入联合分布函数的概念^[48-50]。

设 (V, R) 是概率空间 (Ω, Ψ, P) 上的二维随机向量,称二元函数

$$F(v, r) = P(V \leq v, R \leq r), (v, r) \in R^2 \quad (1)$$

为 (V, R) 的联合分布函数,简称为联合分布。

我们以共现超越概率 $P_{\cap}(v, r)$ 作为影响风险大小的表征,定义如下:

$$P_{\cap}(v, r) = 1 - P(V \leq v \cap R \leq r). \quad (2)$$

式中: $P_{\cap}(v, r)$ 表达的是风及雨皆超过各自某特定界限值的联合事件出现概率,其值越小,反映了风雨联合影响事件强度越大,而概率低的高强度风雨事件造成的灾情常较大;反之,出现概率高的一般风雨联合事件所造成的灾情往往较小。依据 $P_{\cap}(v, r)$ 与灾情的依存关系,确立风险分区阈值标准。

风雨随机变量 (V, R) 的联合分布 $F(v, r)$ 包含两方面的内容,一是每个变量各自的信息,即边缘分布 $F_V(v)$ 与 $F_R(r)$, $F_V(v) = P(V \leq v)$, $F_R(r) = P(R \leq r)$,分别表示 V 不超过 v 及 R 不超过 r 的累积分布(CDF);二是变量间的相互联系,如果变量间相互独立,则 $F(v, r)$ 仅仅由每个变量各自的信息组成,也就是说由边缘分布就可以确定联合分布。而边缘分布及联合分布的具体概型需要通过对风雨实际观测样本的频率密度分布态势的拟合效果加以优选。

1.3 模型参数估计及适度检验

随机变量分布概型参数估计通常由矩估计法、概率加权矩法、极大似然法等得到^[48-49, 51];评价分布模型能否很好地拟合变量实际分布的检验方法采用下述两种:一是Kolmogorov-Smirnov($K-S$)法^[49];二是均方根误差(RMSE)最小准则^[52]。

2 应用示范

2.1 资料来源说明

本文所用的气象资料取自上海地区受海葵影响期间自动气象站风雨记录,资料起迄时段为2012年8月7日0时至2012年8月10日23时。包括各地的过程降水量、日最大降水量、时最大降水量,最大风速、极大风速及相应风向,各级最大风速、各级极大风速、各级降水量持续时间等。

文中涉及的灾情资料来自于农林部门、因特网、民政部门公布的数据。并规定热带气旋影响上海期间凡导致灾情损失后果(包括人、财、物、生态环境等受损)的地区为受灾地点,否则为非受灾影响地区。

2.2 热带气旋“海葵”对上海影响情况

2012 年第 11 号强热带气旋“海葵”,于北京时间 8 月 3 日 08 时在台湾以东约 2 000 km 洋面 (140.7°E,23.2°N) 生成。生成后 48 h 内,较为稳定地向西北偏西方向行进;6 日 14 时至 8 日 3 时进入我国海域并迅速增强为强台风,移向由西转为西北;8 日 3:20 登陆浙江象山县鹤浦镇,登陆时近中心附近最大风力 14 级,登陆后西北行至浙皖交界处停滞消亡(9 日 20 时)。其产生的风雨浪潮的影响范围广、强度强,给浙、沪、苏、皖等省市造成较严重灾害。

“海葵”中心位置离上海最近时仅 120 km 左右,受“海葵”影响,8 月 7~8 日上海地区普遍出现狂风豪雨,24 h 最大降水量仅崇明岛为暴雨,其它地区均为 100 mm 以上的大暴雨,嘉定达 200 mm 以上(最大 1 h 降水量超过 50 mm),大部地区 > 10 mm 降水时次达 4~7 h,浦东、嘉定、松江 > 25 mm 的有 2 个时次。各区县局本部测站的最大 24 h 降水量为 215.4 mm(嘉定),非局本部测站最大值达 245 mm(市区鲁迅公园)。南部金山、奉贤、青浦地区出现 10~11 级大风,沿海及洋山地区在 12~13 级以上。期间,局本部测站的最大阵风风速除徐家汇外,均为 8 级以上,其中浦东、宝山、闵行为 8 级,嘉定、海洋台、崇明、松江为 9 级,青浦、奉贤 10 级,金山 11 级;嘉定、海洋台、崇明、奉贤、青浦、金山的 8 级大风持续时间超过 10 h(图 1、图 2);非局本部测站如洋山与奉贤海湾测得最强风速达 13 级以上。

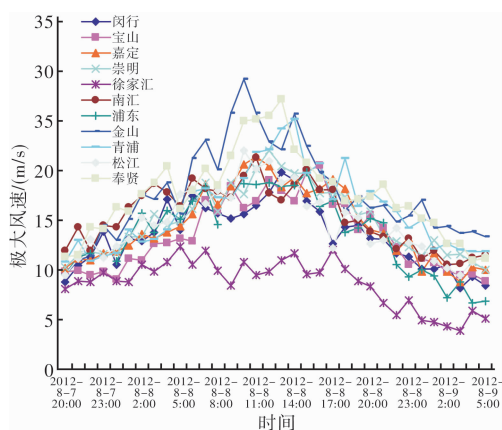


图 1 2012 年 8 月 7 日 08 时至 9 日 08 时上海自动气象站最大阵风风速

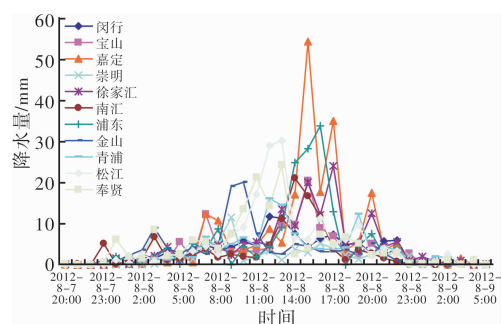


图 2 2012 年 8 月 7 日 08 时至 9 日 08 时上海自动气象站 1 h 雨量

2.3 确定热带气旋风雨影响强度的边缘分布

据以往对热带气旋灾害历史资料的研究结果,在众多影响上海的热带气旋致灾因素中,与灾情程度最为密切,通过置信水平 $\alpha = 0.01$ 极显著检验的是过程极大风速与日最大降水量。另外,热带气旋的位置(离沪最近点距离)、强风暴潮与致灾的相关系数也达极显著水平。考虑到资料的易得性及便于业务应用,本研究选取极大风速、日最大降水量两个变量作为评判热带气旋影响强度的关键因子。

计算表明,“海葵”影响过程造成上海风雨地区分布为有偏分布。日最大降水量地区分布数据的偏度系数大于零,为右偏(正偏)分布,峰度为负值,表明峰度比正态分布低。极大风速地区分布数据的峰度也为负值(低于正态分布),但偏度系数小于零,为左偏(负偏)分布。说明正态分布不适于“海葵”风雨地区分布规律的描述。根据参数估计及拟合结果检验方法,比较多种概率分布模型(Weibull 分布、Gumbel 分布、广义极值分布、GPD 分布、P-III 分布及生物种群模型)对实际风雨致灾因子数据的拟合效果进行筛选,发现 Weibull 分布适于拟合极大风速 V 的边缘分布函数 $F_V(v)$ 、而生物种群模型适合于拟合 24 h 最大日降水量 R 的边缘分布函数 $F_R(r)$ 。

极大风速分布函数具体形式:

$$F_V(v) = 1 - e^{-\frac{(v-0.828)^{4.464}}{e^{-14.026}}} \quad (3)$$

上式拟合相关系数为 0.993 8; $RMSE = 0.024 1$, $d_n \sqrt{n} = 0.070 9$,通过 $K-S$ 检验。

24 h 最大降水量分布函数具体形式:

$$F_R(r) = \frac{1.065}{\left[1 + e^{0.688 - 0.019r}\right]^{\frac{1}{0.258}}} \quad (4)$$

上式拟合相关系数 0.995 7; $RMSE = 0.026 4$, $d_n \sqrt{n} = 0.522 1$,通过 $K-S$ 检验。

同时,由热带气旋海葵影响上海各地极大风速及 24 h 最大日降水量,分别求得各自的经验累积频率 F_{mv} 、 F_{mr} 。将风雨边缘分布函数计算所得的 $F_V(v)$ 、 $F_R(r)$ 值对 F_{mv} 、 F_{mr} 的拟合情况用图给出(图 3~图 6)。从它们的概率曲线拟合结果可以看出,各边缘分布的理论曲线能够很好地拟合出边缘分布的实际概率。所以可用上述分布概型表示各地风雨的边缘分布。

2.4 建立热带气旋风雨影响强度联合分布函数

统计表明,热带气旋极大风速与 24 h 降水量的肯德尔秩相关系数为 -0.177 9,根据统计量

$$|t_{\text{实}}| = \left| \frac{\gamma \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\gamma^2}} \right| \quad (n \text{ 为样本数}, \gamma \text{ 为秩相关系}$$

数),计算出秩相关系数统计值 $|t_{\text{实}}| = 1.555 2$,由于 $|t_{\text{实}}| < t_{0.01} = 2.651 6$,未能通过置信水平 $\alpha = 0.01$ 显著性水平检验,因此,可认为风雨随机变量 V 和 R 相互独立。据此,风雨联合分布概率

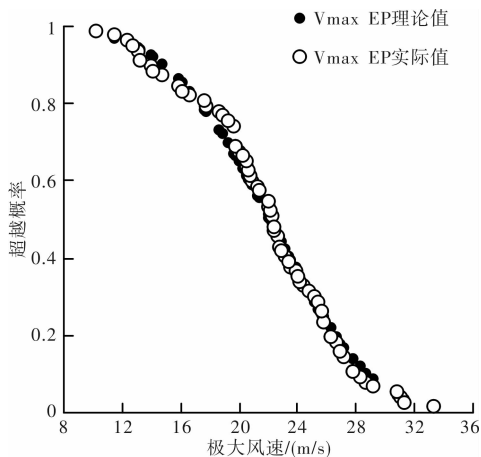


图3 极大风速空间分布超越概率(EP) 拟合值与经验值比较

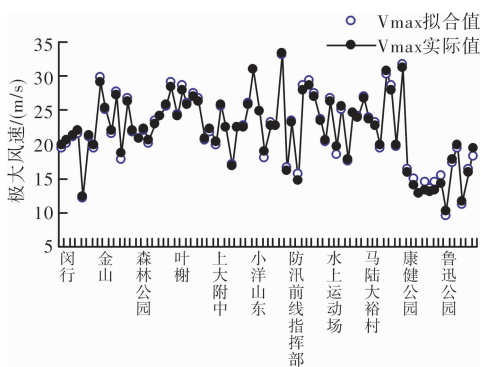


图4 极大风速空间分布拟合值与实际值比较

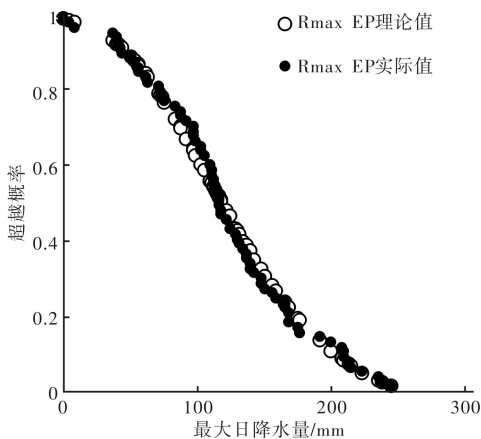


图5 24 h 最大降水量空间分布超越概率(EP) 拟合值与经验值比较

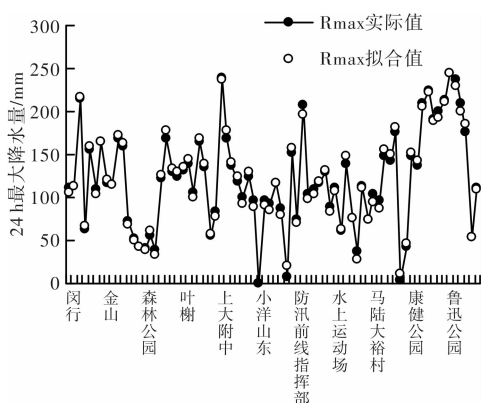


图6 24 h 最大降水量空间分布拟合值与实际值比较

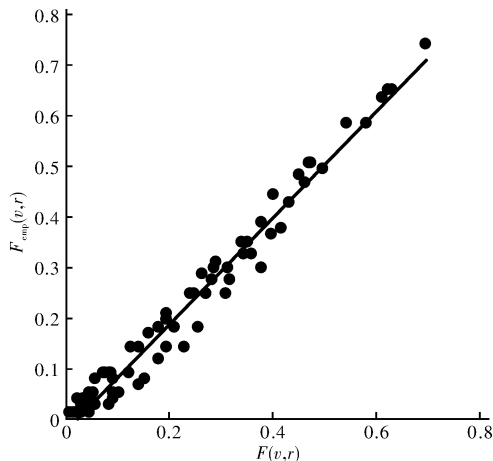


图7 极大风速与24 h 最大降水量联合经验累积概率和理论累积概率的比较

$F(v, r) = P(V \leq v, R \leq r)$, 可由下式计算之。

$$F(v, r) = (1 - e^{-\frac{(v-0.828)^{4.4638}}{e^{-14.026}}}) \left\{ \frac{1.0649}{[1 + e^{(0.6876 - 0.0188r)}]^{0.2579}} \right\} \quad (5)$$

同时,根据各地极大风速 V 、最大日降水量 R 实测数据,求得联合经验频率值 F_{emp} (为 $V \leq v_i, R \leq r_i$ 的累积频率值),并将经验分布概率 F_{emp} 与理论联合分布概率值 $F(v, r)$ 绘于图7~图8中;根据 $RMSE$ 准则、 $K-S$ 检验准则计算的 $F(v, r)$ 对 F_{emp} 的拟合优度结果见表1。

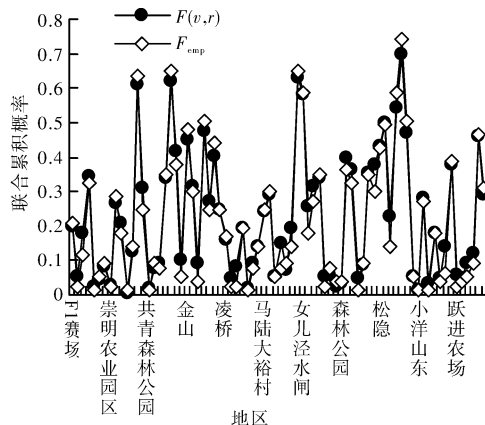


图8 风雨联合概率地区分布的拟合结果

表1 $F(v, r)$ 拟合优度检验

	统计量	计算值
$RMSE$ 准则	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{ei} - P_i)^2}$	0.032 3
$K-S$ 测验	$d_n \sqrt{n}$	$0.742\ 8 < \lambda_\alpha$

备注: P_{ei} 、 P_i 分别为经验频率和理论频率, i 为样本序号。当 $RMSE$ 值越小时,模型拟合效果越好。 d_n 为经验分布函数与理论分布函数样本点上的偏差中的最大值,若 n 很大,则 $d_n \sqrt{n}$ 近似地服从分布 $\theta_n(\lambda)$, λ_α 为信度 α 下满足 $\theta(\lambda_\alpha) = 1 - \alpha$ 的临界值,若 $d_n \sqrt{n} < \lambda_\alpha$ 则接受原假设,即理论分布函数与经验分布函数无差异。

另外,根据统计值 $F = \frac{\chi^2(n-2)}{1 - \gamma^2}$ (n 为样本数、

γ 为相关系数), 计算上述联合分布函数统计值 $F = 3\ 115.7$ 。由于 $F > F_{0.01}(f_1, f_2) = F_{0.01}(1, 74) = 6.996$, 表明建立的风雨联合分布函数通过置信水平 $\alpha = 0.01$ 极显著检验。

由此可见, 计算所得各地极大风速 V 、最大日降水量 R 的经验累积频率 F_{emp} 与理论累积频率 $F(v, r)$ 相关性较高, 反映出边缘分布及其参数的选择是合理的, 风雨联合分布函数对风雨水平分布的拟合精度较高, 适用于描述影响风险程度地区分布。

2.5 热带气旋影响风险水平阈值建立及在风险分区中的应用

由上不难看出, 上海地区风雨影响风险程度地区分布评判标准以共现超越概率 $P_{\cap}(v, r)$ 表达的计算式如下:

$$P_{\cap}(v, r) = 1 - (1 - e^{-\frac{(v-0.828)^4 \cdot 464}{e^{-14.026}}}) - \frac{1.065}{[1 + e^{(0.688-0.019r)}]^{\frac{1}{0.258}}} + (1 - e^{-\frac{(v-0.828)^4 \cdot 464}{e^{-14.026}}}) \left\{ \frac{1.065}{[1 + e^{(0.688-0.019r)}]^{\frac{1}{0.258}}} \right\}^{\circ} \quad (6)$$

将各地海葵影响造成的直接经济损失、农作物成灾面积、受灾人口、倒塌或严重损坏房屋间数, 转换成以累积频率表示的各类灾情程度指标(表2)。各类灾情程度指标与 $P_{\cap}(v, r)$ 均为负相关, 其置信概率基本都在95%以上, 说明 $P_{\cap}(v, r)$ 之值越小的地区, 各类灾情越重。所以风雨共现超越概率 $P_{\cap}(v, r)$ 能较好预示灾情风险大小地区分布。图9给出了 $P_{\cap}(v, r)$ 与综合灾情程度指标 F_{m1234} 的对应关系。

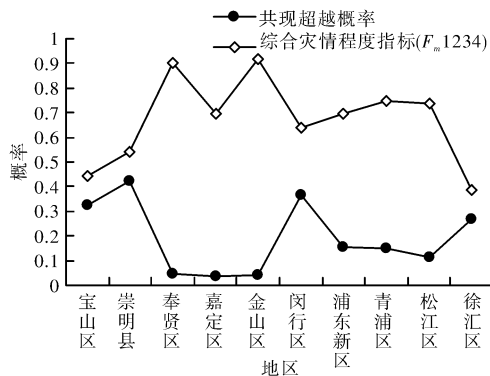


图9 $P_{\cap}(v, r)$ 与综合灾情程度

同时, 参照受灾损失风雨标准^[32-33], 建立不同 $P_{\cap}(v, r)$ 所对应的影响风险程度判据见表3所示。

根据上述分区标准对上海各地受海葵影响风险程度分区如表4所示。

3 结语

灾情轻重在应灾能力无显著变化的前提下, 常与热带气旋风雨的影响强弱相一致; 风雨强弱可用其出现概率示之。热带气旋风雨越大, 越趋于小概率事件时, 导致严重灾害的可能性越大。相反, 不利

影响风险小。

本文提出了以热带气旋致灾因子空间分布联合概率来表征热带气旋影响风险地区分布的思路, 建立了与上海地区灾情显著相关的热带气旋日最大降水量、过程极大风速为边际分布的联合概型, 以风雨共现超越概率大小作为评判热带气旋影响风险程度的准则, 结合上海各地实测资料评估了海葵影响风险程度的空间分布。

对比收集到的灾情实况资料, 表明基于风雨共现超越概率大小为热带气旋影响风险程度划分准则的评估方法能够较为客观地表达各地实际受灾风险大小, 并便于识别巨灾的空间分布。并由此得到了反映热带气旋影响程度的客观风雨影响标准。

本研究主要探讨了风险因素之一即致灾因子对风险的影响, 虽然这是影响风险大小的最主要因素, 但热带气旋灾害必竟是涉及多个变量共同作用的复合事件, 是一个致灾因子、受灾对象(承灾体)的物理暴露与脆弱性以及减轻风险能力相互关联的复杂非线性过程, 因此对其它风险因素的影响的表达有待进一步的探讨。

表2 与各地灾情指标的相关系数

灾情程度指标	灾情程度指标含义	灾情程度与 $P_{\cap}(v, r)$ 间相关系数
F_{m1}	直接经济损失累积频率	-0.693
F_{m2}	农作物成灾面积累积频率	-0.775
F_{m3}	受灾人口累积频率	-0.541
F_{m4}	倒塌或严重损坏房屋间数累积频率	-0.578
F_{m12}	直接经济损失与农作物成灾面积平均累积频率	-0.756
F_{m13}	直接经济损失与受灾人口平均累积频率	-0.655
F_{m14}	直接经济损失与倒塌或严重损坏房屋间数平均累积频率	-0.738
F_{m23}	农作物成灾面积与受灾人口平均累积频率	-0.718
F_{m24}	农作物成灾面积与倒塌或严重损坏房屋间数平均累积频率	-0.697
F_{m34}	受灾人口与倒塌或严重损坏房屋间数平均累积频率	-0.691
F_{m123}	直接经济损失、农作物成灾面积与受灾人口平均累积频率	-0.724
F_{m124}	直接经济损失、农作物成灾面积与倒塌或严重损坏房屋间数平均累积频率	-0.762
F_{m134}	直接经济损失、受灾人口、倒塌或严重损坏房屋间数平均累积频率	-0.742
F_{m234}	农作物成灾面积、受灾人口、倒塌或严重损坏房屋间数平均累积频率	-0.741
F_{m1234}	直接经济损失、农作物成灾面积、受灾人口、倒塌或严重损坏房屋间数平均累积频率	-0.762

表 3 热带气旋海葵对各地影响风险程度判据

$P_{\cap}(v, r)$	影响风险程度分类	风雨影响特征
<0.05	特高风险区	风雨事件被其它地区超过可能性低于 5% , 也就是说发生了小概率高强度风雨事件, 风雨影响大, 灾情严重。风雨满足下列条件之一: ①极大阵风 $>31 \text{ m/s}$; ②最大降水量 $>100 \text{ mm}$ 且极大阵风 $>29 \text{ m/s}$; ③最大降水量 $>150 \text{ mm}$ 且极大阵风 $>27 \text{ m/s}$; ④最大降水量 $>200 \text{ mm}$ 。
$0.05 \leq P_{\cap}(v, r) < 0.15$	高风险区	风雨量级被超过可能性在 5% ~ 15% 之间, 仍是强风雨事件发生高风险区域, 灾情偏重。风雨满足下列条件之一: ①最大降水量 $>100 \text{ mm}$ 且极大阵风 $>25 \text{ m/s}$; ②最大降水量 $>120 \text{ mm}$ 且极大阵风 $>24 \text{ m/s}$; ③最大降水量 $>150 \text{ mm}$ 且极大阵风 $>22 \text{ m/s}$; ④最大降水量 $>190 \text{ mm}$ 。
$0.05 \leq P_{\cap}(v, r) < 0.3$	中等风险区	风雨被超过可能性在 15% ~ 30% 之间, 是中等强度风雨事件发生区域。风雨满足下列条件之一: ①最大降水量 $>100 \text{ mm}$ 且极大阵风 $>19 \text{ m/s}$; ②最大降水量 $>80 \text{ mm}$ 且极大阵风 $>22 \text{ m/s}$; ③最大降水量 $>130 \text{ mm}$ 但 $<180 \text{ mm}$; ④极大阵风 $>24.5 \text{ m/s}$ 。
$0.3 \leq P_{\cap}(v, r) < 0.5$	轻度风险区	风雨被超过可能性在 30% ~ 50% 之间, 是发生轻度强风雨事件区域, 灾情相对较轻, 故为轻度风险区。风雨满足下列条件之一: ①极大降水量 $>80 \text{ mm}$; ②极大阵风 $>22 \text{ m/s}$ 。
≥ 0.5	基本无风险区	最大降水量 $<80 \text{ mm}$ 且极大阵风 $<22 \text{ m/s}$, 表明这些地区风或雨, 或风雨被超过可能性达 50% 以上, 该类风险水平的风雨联合事件发生机率高, 是较弱风雨事件发生区域, 一般无灾害发生, 属于基本无风险区。

表 4 上海各地受海葵影响风险分区

影响风险程度分类	区县风险归属	市区公园绿地风险归属
特高风险区	金山、奉贤、嘉定	鲁迅公园(虹口)、大宁灵石公园(闸北)、人民公园(黄浦)
高风险区	松江、浦东新区	甘泉公园(普陀)、和平公园(虹口)、闸北公园、襄阳公园(徐汇)、延中绿地
中等风险区	青浦、宝山	曹阳公园(普陀)、康健公园(徐汇)、徐家汇
轻度风险区	闵行、崇明	上海动物园(长宁)、杨浦公园(杨浦)
基本无风险区		共青森林公园(杨浦)

参考文献:

- [1] Xu Ming, Yang Qiuzhen, Ying Ming. Impacts of Tropical Cyclones on Lowland Agriculture and Coastal Fisheries of China// Natural Disasters and Extreme Events in Agriculture (Impacts and Mitigation) [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 137 - 144.
- [2] Yang Qiuzhen, Xu Ming, Duan Yihong, et al. Typhoon Disaster Impacts on Public Safety of Shanghai And Its Mitigation Strategy [C]//Proceedings of the World Engineers Convention 2004, Vol. D (Environment Protection and Disaster Mitigation). Beijing: China Science and Technology Press, 2004: 623 - 626.
- [3] Jagger T, J B Elsner, X Niu. A dynamic probability model of hurricane winds in coastal counties of the United States[J]. Appl. Meteor, 2001, 40: 853 - 863.
- [4] Darling R W R. Estimating probabilities of hurricane wind speeds using a large - scale empirical model[J]. Climate, 1991, 4 (10): 1035 - 1046.
- [5] Georgiou P N, Davenport A G, Vickery P J. Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones[J]. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 1983, 13: 139 - 152.
- [6] Nelson J O'Brien, Scott D, Webb T. Model estimates hurricane wind speed probabilities[J]. Eos, 2000, 81: 433 - 438.
- [7] Russell L R. Probability distributions for hurricane effects[J]. Wtrwy. , Harb. and Coast. Engrg. Div. , ASCE, 1971, 97(1): 139 - 154.
- [8] Landsea C W, Pielke R A Jr. Normalized hurricane damages in the United States: 1925 - 1995[J]. Wea. and Forecast, 1998, 13: 621 - 631.
- [9] Vickery P J, Skerjil P F, Twisdale L A. Simulation of hurricane risk in the U. S. using empirical track model[J]. Struct. Eng. , 2000, 126: 1222 - 1237.
- [10] Cobaner M, Unal B, Kisi O. Suspended sediment concentration estimation by an adaptive neuro - fuzzy and neural network approaches using hydro - meteorological data[J]. Journal of Hydrology, 2009, 367(12): 52 - 61.
- [11] 卢文芳. 上海地区热带气旋灾情的评估和灾年预测[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(3): 40 - 45.
- [12] 林继生, 罗金铃. 登陆广东的热带气旋灾害评估和预测模式[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(1): 92 - 97.
- [13] 梁必骥, 樊琦, 杨洁, 等. 热带气旋灾害的模糊数学评价[J]. 热带气象学报, 1999, 15(4): 305 - 311.
- [14] 樊琦, 梁必骥. 热带气旋灾情的预测及评估[J]. 地理学报, 2001(Supp. 1): 52 - 56.
- [15] 樊琦与, 梁必骥. 热带气旋灾害经济损失的模糊数学评测[J]. 气象科学, 2000(3): 360 - 366.
- [16] 钱燕珍, 何彩芬, 杨元琴, 等. 热带气旋灾害指数的估算与应用方法[J]. 气象, 2001, 27(1): 14 - 18.
- [17] 丁燕, 史培军. 台风灾害的模糊风险评估模型[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 34 - 43.
- [18] 周俊华, 史培军, 范一大, 等. 西北太平洋热带气旋风险分析[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(3): 146 - 151.
- [19] 刘玉函, 唐晓春, 宋丽莉. 广东台风灾情评估探讨[J]. 热带地理, 2003, 23(2): 119 - 122.
- [20] 李春梅, 罗晓玲, 刘锦奎, 等. 层次分析法在热带气旋灾害

- 影响评估模式中的应用[J]. 热带气象学报, 2006, 22(3): 223-228.
- [21] 陈香. 福建省台风灾害风险评估与区划[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 961-966.
- [22] 马清云, 李佳英, 王秀荣, 等. 基于模糊综合评价法的登陆台风灾害影响评估模型[J]. 气象, 2008, 34(5): 20-25.
- [23] 张斌, 陈海燕, 顾骏强. 基于 GIS 的台风灾害评估系统设计开发[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 47-50.
- [24] 石蓉蓉, 雷媛, 王东法, 等. 1949-2007 年影响浙江热带气旋灾情分析及评估研究[J]. 科技通报, 2008, 24(05): 612-616.
- [25] 雷小途, 陈佩燕, 杨玉华, 等. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 875-883.
- [26] 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途. 我国台风灾害成因分析及灾情预估[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 64-73.
- [27] 孙伟, 高峰, 刘少军, 等. 海南岛台风灾害损失可拓评估方法及应用[J]. 热带作物学报, 2010(2): 319-324.
- [28] 陈海燕, 严浏娜, 娄伟平等. 热带气旋致灾因子综合影响强度评估指标研究[J]. 热带气象学报, 2011, 27(1): 139-144.
- [29] 陈惠芬. 热带气旋灾害等级预评估方法初探[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 136-140.
- [30] 陈仕鸿, 隋广军, 唐丹玲. 一种台风灾情综合评估模型及应用[J]. 灾害学, 2012, 27(2): 87-91.
- [31] 孙伟, 高峰, 刘少军, 等. 海南岛台风灾害损失可拓评估方法及应用[J]. 热带作物学报, 2010, 31(2): 319-324.
- [32] 陈惠芬. 热带气旋灾害等级预评估方法初探[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 136-140.
- [33] 陈长坤, 纪道溪. 基于复杂网络的台风灾害演化系统风险分析与控制研究[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 1-4.
- [34] 高安宁, 张瑞波. 2011 年秋季强台风“纳沙”导致广西灾情成因分析[J]. 灾害学, 2013, 28(1): 54-58.
- [35] 张广平, 张晨晓, 谢忠. 基于 T-S 模糊神经网络的模型在台风灾情预测中的应用—以海南省为例[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 86-89.
- [36] 魏章进, 隋广军, 唐丹玲. 台风灾情评估及方法综述[J]. 灾害学, 2012, 27(4): 107-113.
- [37] 张忠伟, 张京红, 赵志忠, 等. 基于 GIS 的海南岛台风灾害致灾因子危险性分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11): 6587-6590.
- [38] 张斌, 陈海燕, 顾骏强. 基于 GIS 的台风灾害评估系统设计开发[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 47-50.
- [39] 杨秋珍, 徐明, 李军. 热带气旋对承灾体影响利弊及巨灾风险诊断方法研究[M]//中国气象局上海台风研究所. 大气科学研究与应用. 北京: 气象出版社, 2010: 1-20.
- [40] Yang Qiuzhen, Xu Ming. Preliminary Study of the assessment of methods for disaster-inducing risks by TCs using sample events of TCs that affected Shanghai[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2010, 16(3): 299-304.
- [41] 杨秋珍, 徐明, 李军. 对气象致灾因子危险度诊断方法的探讨[J]. 气象学报, 2010, 68(2): 277-284.
- [42] 薛正平. 台风暴雨和暖冬对绿叶菜价格影响初探//大气科学研究与应用[M]//中国气象局上海台风研究所. 北京: 气象出版社, 2008: 44-51.
- [43] 张波, 张景肖. 应用随机过程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 3-19.
- [44] 中国保险监督管理委员会网站. 什么是风险[EB/OL]. [2013-09-28]. <http://www.circ.gov.cn/web/site47/tab4286/info181279.htm>.
- [45] Baidu 百科. 动量效应-不确定性的两种分类[EB/OL]. [2013-09-28]. <http://baike.baidu.com/view/136531.htm>.
- [46] 张继权, 李宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M]//黄崇福, 倪晋仁, 吴宗之. “风险分析与危机反应”国际丛书. 北京: 北京师范大学出版社, 2007: 537.
- [47] 丁裕国. 气候概率分布理论的新内涵及其展望[EB/OL]. [2013-09-28]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-3100-5987.html>.
- [48] 鲍兰平. 概率论与数理统计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 47-142.
- [49] 屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 气象应用概率统计学[M]. 北京: 气象出版社, 1984: 208-216.
- [50] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 3 版. 北京: 气象出版社, 2004: 298.
- [51] 丁裕国. 探讨灾害规律的理论基础—极端气候事件概率[J]. 气象与减灾研究, 2006, 29(1): 44-50.
- [52] Baidu 百科. 均方根误差[EB/OL]. [2013-09-28]. <http://baike.baidu.com/view/2327686.htm>.

Risk Assessment on Impacts of Tropical Cyclone Haikui on Shanghai by Applying Multivariate Compound Distribution Function

Xu Ming, Lei Xiaotu and Yang Qiuzhen

(Laboratory of Typhoon Forecast Technique, Shanghai Typhoon Institute of CMA, Shanghai 200030, China)

Abstract: TC catastrophe is a complex non-linear result of multiple factors. The risk of catastrophe is positively related to the impact of typhoon under the premise of stable reaction capability. The possibility of serious impact from catastrophe increases when typhoon is stronger and probability is smaller. Multivariate compound distribution function are introduces to discuss TC joint risk probability in wind and rain. Based on the fact that climate stochastic events possess equivalence property over time and space, a joint probability risk assessment model is established by using TC Haikui as an example. The marginal distributions of the model are the maximum precipitation and the maximum wind speed, and the determining factor of risk is the exceedance probability of co-occurrence in wind and rain. The results suggest that the simultaneous of the exceedance probability in wind and rain describes TC risk level accurately; especially in terms of the high risk area with sever catastrophe impact. This leads to a meaningful clue for the accuracy of extreme events risk assessment using meteorological data.

Key words: tropical cyclone; multivariate compound distribution; exceedance probability of co-occurrence events; risk assessment; zoning