

张颖超,张美娟,张中秋,等. 2013. 浙江省登陆热带气旋灾害影响评估[J]. 大气科学学报,36(2):229-234.

Zhang Ying-chao, Zhang Mei-juan, Zhang Zhong-qiu, et al. 2013. Evaluation on disaster influence of tropical cyclone landing over Zhejiang Province [J]. Trans Atmos Sci, 36(2):229-234. (in Chinese)

浙江省登陆热带气旋灾害影响评估

张颖超¹, 张美娟¹, 张中秋¹, 王镇铭², 范金平¹

(1. 南京信息工程大学 信息与控制学院, 江苏 南京 210044; 2. 浙江省气象局, 浙江 杭州 310017)

摘要: 为了研究登陆浙江的热带气旋对当地社会经济的破坏程度, 对登陆热带气旋的灾害影响进行了预测预警, 以提高防台减灾服务水平。用模糊层次综合评价法对 1981—2007 年在浙江省登陆的热带气旋灾害的影响进行了评估。为了验证上述灾害影响评估模型的正确性, 对热带气旋的实际灾情进行评估, 并对灾害影响指数和灾情指数进行计算和分级。结果表明: 热带气象灾害影响指数和灾情指数同级的一致率达 92%, 且灾害影响指数与相应直接经济损失的相关系数达 0.79, 说明该评估模型能够较好地评估热带气旋的灾害影响。

关键词: 模糊数学; 热带气旋; 灾害; 评估; 层次分析法; 浙江省

中图分类号: P429 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7097(2013)02-0229-06

Evaluation on disaster influence of tropical cyclone landing over Zhejiang Province

ZHANG Ying-chao¹, ZHANG Mei-juan¹, ZHANG Zhong-qiu¹,
WANG Zhen-ming², FAN Jin-ping¹

(1. School of Information and Control, NUIST, Nanjing 210044, China; 2. Zhejiang Meteorological Bureau, Hangzhou 310017, China)

Abstract: In order to research the degree of social economic damage caused by tropical cyclones (TC) landing in Zhejiang Province and improve the service level of typhoon prevention and disaster reduction, this paper evaluates the disaster influence of TC occurred in Zhejiang Province from 1981 to 2007 by the fuzzy comprehensive evaluation method. In order to verify that the disaster effect assessment model is correct or not, the actual disaster situation of TC is evaluated, and the disaster influence index and the disaster index of TC are calculated and graded. Results show that the concordance rates between the disaster index and the disaster influence index can reach 92% for all samples. In addition, the correlation coefficient between the disaster influence index and the corresponding direct economic losses is 0.79. It indicates that the disaster effect assessment model can evaluate disaster influence of TC landing in Zhejiang Province.

Key words: fuzzy mathematics; tropical cyclone; disaster; evaluation; analytic hierarchy process; Zhejiang Province

0 引言

热带气旋是世界上灾害影响最强大的自然灾害

之一, 其危害十分严重。浙江省地处中国东南沿海, 海岸线长, 海域广, 有利于热带气旋的侵袭和影响, 造成的灾害损失比较严重。为了研究浙江省登陆热

收稿日期: 2011-11-06; 改回日期: 2012-11-28

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)200806017; GYHY(QX)201106040); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 张颖超(1960—), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士生导师, yc_nuist@126.com; 张美娟(通信作者), 女, 山东菏泽人, 硕士, meijuan827@163.com.

带气旋的灾害影响,提高防灾减灾服务水平,选取热带气旋灾害本身可以预测的主要物理指标和浙江省经济社会发展的指标,通过模糊层次综合评价的方法评估其灾害影响指数。通过对热带气旋灾害影响进行评价,能直观地反映出热带气旋的灾害影响水平,能对政府的防减灾提供决策依据。

国内很多学者对热带气旋灾害进行了相关研究。李春梅等(2006)用层次分析法对热带气旋的灾害影响进行了评估。樊琦和梁必骐(2000)用基于模糊理论的评估方法对台风灾害进行了评估。马清云等(2008)用模糊综合评价法对我国登陆台风的灾害影响进行了评估。石蓉蓉等(2008)、楼丽银等(2006)、何彩芬和钱燕珍(2002)、姚棣荣和刘孝麟(2001)针对浙江省台风灾情进行了灾后评估。这些研究均取得了许多成果,但是,有些没考虑到天文大潮造成的风暴潮、有些评估指标较少、有些是灾后的灾情评估,对热带气旋灾害的预防预警意义不大,且针对登陆浙江省的热带气旋灾害影响研究较少。由于直接在浙江省登陆的热带气旋对浙江省危害最大,研究这类热带气旋更有意义,因此本文选取直接在浙江省登陆的热带气旋作为评估样本,研究浙江省登陆热带气旋对社会经济的影响。一般情况下,对气象灾害的评估分为灾前评估、灾中评估和灾后评估三种。而对热带气旋的灾前评估,对气象服务在台风预报上产生的效益的评估具有更为重要的意义。本文提出的热带气旋灾害影响评估模型,只要获得热带气旋的相关预报数据,就可以进行灾前预估,也可在获得热带气旋的观测数据后进行灾中和灾后的快速评估,评估结果可对热带气旋的灾害影响进行预测预警,使防台减灾部门提前采取相应防灾措施,以提高防台减灾水平。

本文数据来源于《2009 热带气象年鉴》(中国气象局,2011)、《2007 浙江统计年鉴》(中国统计局,2007)、《浙江省气象志》(朱鸣益和陈启泉,1999)以及“浙江省台风路径实时发布系统”等。

1 灾害影响指数评估方法的建模

1.1 隶属函数的确定

在模糊理论中,隶属函数的确定应该是反映客观模糊现象的具体特点,要符合客观规律(张颖超和叶小岭,2007)。但是,由于每个专家在实践经验、判断能力等方面各有所长,即使对同一个模糊概念的认定和理解,也会具有差别性,因此隶属函数的确定又带有一定的主观性和经验性(梁必骐等,1999)。由于戒下型函数的升半正态分布所表示的

曲线能够反映影响因子 x 对灾害影响的实际情况,因此采用典型函数法的戒下型函数的升半正态分布(Kim and Park,1990;诸静,2005),其表达式为

$$U_i(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ 1 - e^{-k(x-a)^2}, & x > a, k > 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $U_i(x)$ 为热带气旋灾害影响指标 x 的隶属函数; a 和 k 均为参数。当热带气旋灾害影响指标 x 的值大于某一值时,认为可以造成灾害,否则视为不成灾。随着数据 x 的增大,表示灾害影响大小的隶属函数值也会增大。

在解析式中,规定 $a = x_{\min}$ ($x_{\min}$ 指该灾害影响指标统计值中的最小值),令历年灾害物理指标最大统计数据 $x_{\max}$ 所对应的隶属度的值为 0.99,于是得到 k 的值,即:

$$k = \frac{4.605}{(x_{\max} - x_{\min})^2}. \quad (2)$$

1.2 灾害影响指数的计算方法

设有 n 个热带气旋样本等待评价,每个样本有 m 个评价指标来进行评价,则每个样本的评价集为 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。根据隶属函数公式计算,得出 n 个热带气旋样本的评价矩阵 R 。因此,当 a 和 k 确定后,即可得出每个热带气旋评价指标的隶属度值。总的评价矩阵(Chen,1985;蔡亲波和颜琼丹,2009)可表示为

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}.$$

权衡热带气旋各个物理指标造成破坏程度的相对重要性来分配其权重。通过专家评分,可用层次分析法得出。物理指标权重的分配记为 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, 其中 $a_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m, \sum_{i=1}^m a_i = 1$ 。因此,热带气旋的灾害影响指数为

$$b_j = \sum_{i=1}^m (a_i r_{ji}), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

1.3 影响因子的选取和灾害影响指数的计算

热带气旋造成的灾害通常包含大雨、大风,还包括泥石流、风暴潮等次生灾害(解以扬等,2004)。热带气旋的灾害影响一般由大风、大雨和其他天气系统共同促成(龚龙天等,2003),还要考虑影响区域的经济水平,因此,选用最低中心气压(A_1)、移动速度(A_2)、7 级风圈半径(A_3)、最大风速(A_4)、境内影响时间(A_5)、过程最大降雨量(A_6)、过程降水总量极值(A_7)、天文大潮指数(A_8)、浙江省人口

(A_9)、浙江省 GDP(A_{10})、浙江省耕地面积(A_{11})和浙江省固定资产投资额(A_{12})共 12 个指标,构建浙江省登陆热带气旋的灾害影响评价指标体系。

指标数据的处理:最低中心气压、移动速度、7 级风圈半径和最大风速采用热带气旋的气象预报值或实际测量值;境内影响时间为热带气旋登陆后影响浙江并最终从浙江消失的时段;过程最大降雨量为热带气旋影响范围内多个站点的平均值,反映浙江省普遍区域的雨情;过程降水总量极值为热带气旋影响范围内单个站点的最大值,反映浙江省局部的雨情;天文大潮指数,即热带气旋在登陆时遇农历初一、初二、初三或十五、十六、十七时视为有天文大潮的影响,否则不考虑;浙江省人口、浙江省 GDP、浙江省耕地面积和浙江省固定资产投资额均为台风登陆年代的浙江省的相应数据。

进行灾害影响指数评估,指标权重的确定非常重要。对于权重的确定,这里采用层次分析法(analytic hierarchy process,简称 AHP; Saaty, 1980; Yu, 2002),其基本思想是将复杂问题分解为多个因素,并将这些因素按隶属关系进一步分解为目标层、影响层、指标层,排列起来形成有序的递阶层次结构(梅宝玲和陈舜华,2003; Saaty and Ozdemir, 2003)。将元素权重的整体判断转变为对这些元素进行“两两比较”,然后再转为对这些元素的整体权重进行排序判断,最后确立各元素的权重。本文对热带气旋的各个指标进行了分层,如图 1 所示。

构造判断矩阵是 AHP 法的关键,在专家咨询的基础上,引入合适的标度,通过指标间两两重要性的

比较打分,构造比较判断矩阵 A 。专家对指标系统的指标进行两两比较时,传统比较判断矩阵中,各元素值一般采用的是“1 ~ 9”比较标度法(许树柏, 1988),如表 1 所示。

表 1 1~9 标度的含义

Table 1 Meaning of 1—9 scale

标度	含义
1	表示元素 i 与元素 j 具有同样的重要性
3	表示元素 i 比 j 稍微重要
5	表示元素 i 比 j 比较重要
7	表示元素 i 比 j 非常重要
9	表示元素 i 与 j 绝对重要
2,4,6,8	表示上述两两判断中间的状态的标度值

若因素 i 与 j 比较得 a_{ij} ,则因素 j 与 i 比较的判断为 $1/a_{ij}$ 。

层次单排序是根据判断矩阵计算出,对于上一层某元素而言,本层次与之有联系的元素的重要性次序。层次单排序可以归结为计算判断矩阵的特征值和特征向量问题。其计算方法很多,有和积法、方根法、矩阵法等。由于方根法得出的结果更能突出某些指标的重要性,所以本文采用方根法(许遐楨等,2009)。计算步骤如下:

1) 判断矩阵 A 的元素按行相乘得 T_i : $T_i =$

$$\prod_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n。$$

2) 对所得到的乘积 T_i 分别开 n 次方根,得 $\overline{W}_i$:

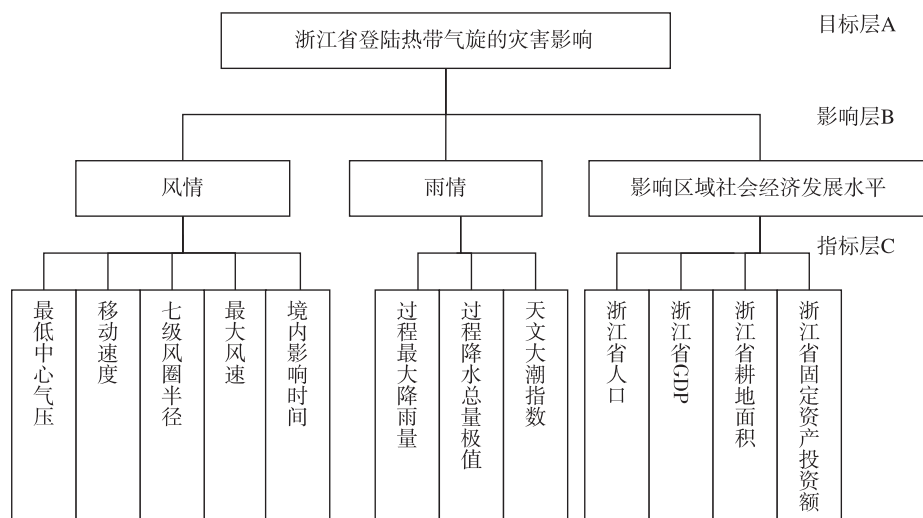


图 1 浙江省登陆热带气旋的评估指标分层

Fig. 1 The analytic hierarchy process of assessment index of tropical cyclone landing in Zhejiang Province

$\overline{W_i} = \sqrt[n]{T_i}。$

3)对向量 $\overline{W} = [\overline{W_1}, \overline{W_2}, \cdots, \overline{W_n}]^T$ 进行归一化处理: $W_i = \frac{\overline{W_i}}{\sum_{j=1}^n \overline{W_j}}。$

4) 计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$: $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}$, 式中 $(AW)_i$ 表示向量 AW 的第 i 个元素。

对层次单排序进行一致性检验,计算一致性指标 $I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 。当随机一致性比率 $R_C = \frac{I_C}{I_R} < 0.10$ 时,认为层次单排序具有满意的一致性(平均随机一致性指标 I_R 可查表 2 得到),否则需要修改判断矩阵的元素取值。

表 2 随机一致性指标值(I_R ;许树柏,1988)

Table 2 The randomly identical target value(I_R ;Xu,1988)

判断矩阵的阶数 n	3	4	5	6	7	8	9
I_R 值	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

为了确定指标权重,本研究向在气象方面有比较深入研究的多名专家教授就各指标重要性问题进行了咨询、打分,并运用层次分析法(判断矩阵计算结果 $R_C < 0.1$,通过一致性检验)得出各指标的权重(表 3)。

表 3 12 个指标因子的权重

Table 3 Weighs of 12 index factors

指标因子	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
权重	0.12	0.06	0.03	0.12	0.07	0.16
指标因子	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
权重	0.08	0.16	0.06	0.06	0.05	0.03

运用上面的模糊数学算法,计算出了由 12 个影响因子构成总的评价矩阵 R 。

$$b_j = \sum (a_i r_{ij}), \quad j = 1, 2, \cdots, 12。 \quad (4)$$

由此得出了 1949—2008 年主要影响浙江省的热带气旋灾害影响指数。

2 热带气旋灾害损失的灾情指数

为了验证上述评估模型的正确性,对热带气旋的实际灾情进行评估后进行一一对比检验。为了对热带气旋的灾情进行评估,采用冯利华(1993)、赵阿兴和马宗晋(1993)和陈香等(2007)提出的灾

概念(下称灾情指数),计算灾情指数。考虑到热带气旋这一特殊灾种对社会经济产生的影响,用受灾农田面积、因灾死亡人口和因灾损毁房屋 3 个指标来反映热带气旋的灾情指数,具体方法如下。

首先把因灾死亡人口、因灾损毁房屋和受灾农田面积 3 个指标换算成规范化指数,即当人口死亡人数(d)大于等于 100 人,房屋损毁间数(e)大于等于 1 000 间,农田受淹面积(h)大于等于约 66.67 hm^2 (等于 1 000 亩)时,利用对数函数关系转换成规范化指数,其数学表达式为 $I_d = \lg d - 1, I_e = \lg e - 2, I_h = \lg h - 2$ 。

当 d 小于 100 人, e 小于 1 000 间, h 小于 1 000 亩(约等于 66.67 hm^2),利用线性函数关系转换成规范化指数,即 $I_d = \frac{d}{100}, I_e = \frac{e}{1\,000}, I_h = \frac{h}{1\,000}$ 。然后把各指标的规范化指数相加,得

$$G = I_d + I_e + I_h。 \quad (5)$$

3 评价结果分析

3.1 灾害影响指数和灾情指数的分级

登陆热带气旋与非登陆热带气旋对浙江省的影响程度不同,所以在灾害影响评估指标赋权的时候应有所差别。因此,本文研究对象为直接在浙江省登陆的热带气旋,并对其进行赋权评估。1980—2007 年共有 25 个热带气旋在浙江省登陆,剔除两个数据获悉不全的样本,共选用 23 个热带气旋样本进行灾害影响评估。根据以上灾害影响和灾情指数评估方法,计算了各热带气旋样本的灾害影响指数和灾情指数。热带气旋的灾情指数较好地反映了灾情的轻重程度,可以用它作为划分灾情的有效依据,也可以用来检验台风灾害影响评估模型的评估效果。采用有序样品的聚类分析方法即最优分割法(黄嘉佑,1990),将评价指数和灾级指数均分成 4 个等级(表 4)。

表 4 热带气旋灾害影响指数和灾情指数的等级划分

Table 4 Hierarchy of disaster influence index and damage index of tropical cyclone

灾害影响指数	灾情指数	灾情级别
$0.71 \leq b$	$8.50 \leq G$	1 级(重灾)
$0.45 \leq b < 0.71$	$6.25 \leq G < 8.50$	2 级(大灾)
$0.30 \leq b < 0.45$	$5.00 \leq G < 6.25$	3 级(中灾)
$b < 0.30$	$G < 5.00$	4 级(小灾)

3.2 评估结果分析

根据热带气旋灾害影响指数和灾情指数等级划分,将 23 个浙江登陆的热带气旋的等级、灾害影响指数、灾情指数及其对应灾害级别列于表 5 中。

由表 5 可以看出,在灾害影响评估模型的全部样本中,灾害影响指数和灾情指数同级的一致率达到了 92%。其中,灾情等级为 1 级(重灾)、2 级(大灾)、3 级(中灾)、4 级(小灾)的准确率分别达到了 100%、90%、50% 和 100%,且错报等级仅差一级。

以上分析表明,该热带气旋灾害影响评估模型能够很好地评估浙江省登陆热带气旋的灾害影响水平。

图 2 为热带气旋的灾害影响指数与灾情指数的比较。可知,23 个热带气旋的灾害影响指数和灾情指数的对应关系显著,两序列的相关系数达到 0.76,通过了 0.01 信度的显著性检验,说明灾害影响指数与灾情指数存在显著的正相关关系。

为了进一步验证灾害影响指数是否能很好地反映灾情,利用历次热带气旋给浙江省带来的直接经济损失,与热带气旋的灾害影响指数进行比较(图 3)。其中,考虑到当今社会经济的发展和通货膨胀水平,直接经济损失值是以 1990 年为基年,并根据浙江省历年的消费者物价指数折算得出。

在这 23 个热带气旋中,灾害影响指数和直接经济损失的对应关系比较明显,其变化趋势也基本相同(图 3),它们的相关系数达到 0.79,通过了 0.01 信度的显著性检验,说明两序列存在显著的正相关关系,由此可以判断出灾害影响指数能有效地反映热带气旋带来的灾情轻重程度。因此,此热带气旋灾害影响评估模型能够对灾害影响进行有效评估,评估结果能够较正确地反映热带气旋对社会经济的破坏程度(即灾情)。

表 5 热带气旋灾害影响指数和灾情指数及其灾害等级评价结果

Table 5 The disaster influence index and damage index of tropical cyclone and their rank evaluation results

热带气旋编号	热带气旋等级	灾害影响指数	灾情指数	灾害影响评估级别	实际损失级别
8108	热带风暴	0.09	4.91	小灾	小灾
8506	台风	0.70	8.04	大灾	大灾
8707	台风	0.46	7.52	大灾	大灾
8909	台风	0.49	8.29	大灾	大灾
8923	台风	0.46	8.12	大灾	大灾
9015	强台风	0.51	8.32	大灾	大灾
9219	台风	0.38	7.87	中灾	大灾
9417	超级台风	0.81	9.25	重灾	重灾
9507	强热带风暴	0.27	3.83	小灾	小灾
9711	台风	0.71	9.32	重灾	重灾
9806	强热带风暴	0.22	6.06	小灾	中灾
0004	强热带风暴	0.25	4.99	小灾	小灾
0008	台风	0.35	5.01	中灾	中灾
0216	强台风	0.66	6.57	大灾	大灾
0311	热带风暴	0.19	4.02	小灾	小灾
0407	强热带风暴	0.24	2.42	小灾	小灾
0414	强台风	0.77	8.50	重灾	重灾
0421	热带风暴	0.24	2.94	小灾	小灾
0509	强台风	0.70	6.87	大灾	大灾
0515	强台风	0.70	6.54	大灾	大灾
0608	超级台风	0.89	9.15	重灾	重灾
0713	超级台风	0.70	6.34	大灾	大灾
0716	台风	0.52	6.26	大灾	大灾

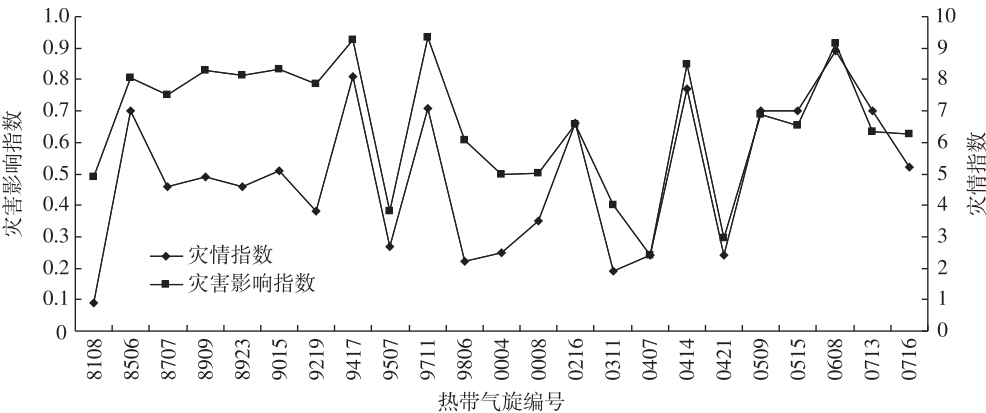


图 2 热带气旋灾害影响指数和灾情指数的比较

Fig. 2 Comparison between disaster influence index and damage index of tropical cyclone

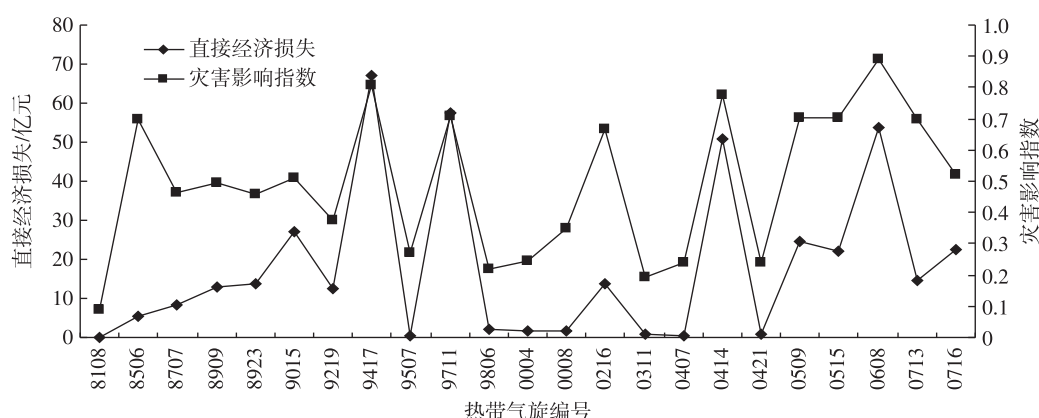


图3 热带气旋的灾害影响指数与直接经济损失的比较

Fig. 3 Comparison between disaster influence index and direct economic loss of tropical cyclone

4 结论

利用模糊层次综合评价法建立了热带气旋灾害影响指数模型,选用最低中心气压、移动速度、7级风圈半径、最大风速、境内影响时间、过程最大降雨量、过程降水总量极值、天文大潮指数、浙江省人口、浙江省GDP、浙江省耕地面积和浙江省固定资产投资额共12个指标,构建浙江省登陆台风的灾害影响评价指标体系,以反映热带气旋的灾害影响。对1981—2007年登陆中国浙江省的23个热带气旋的评估结果为:灾害影响指数和灾情指数同级的一致率达到了92%,且灾害影响指数与相应直接经济损失的相关系数达到了0.79,说明该评估模型能够较好地评估热带气旋的灾害影响。

参考文献:

- 蔡亲波,颜琼丹. 2009. 二维多路多普勒雷达风场自动退模糊算法应用研究[J]. 气象科学, 29(5): 625-632.
- 陈香,沈金瑞,陈静. 2007. 灾损度指数法在灾害经济损失评估中的应用[J]. 灾害学, 22(2): 31-34.
- 樊琦,梁必骥. 2000. 热带气旋灾害经济损失的模糊数学评测[J]. 气象科学, 20(3): 360-366.
- 冯利华. 1993. 灾害损失的定量计算[J]. 灾害学, 8(2): 17-19.
- 龚龙天,陆维松,陈东升. 2003. 浙江省登陆热带气旋气候特征初探[J]. 南京气象学院学报, 26(6): 773-779.
- 何彩芬,钱燕珍. 2002. 2000年浙江省热带气旋灾情评估[J]. 浙江气象, 23(2): 4-6; 19.
- 黄嘉佑. 1990. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社: 265-268.
- 李春梅,罗晓玲,刘锦玺,等. 2006. 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, 22(3): 223-228.
- 梁必骥,樊琦,杨洁,等. 1999. 热带气旋灾害的模糊数学评价[J]. 热带气象学报, 15(4): 305-311.
- 楼丽银,何婧,王忠东. 2006. TC灾情评估分析及减灾对策[J]. 科技通报, 22(1): 48-50.
- 马清云,李佳英,王秀荣,等. 2008. 基于模糊综合评价法的登陆台风灾害影响的评估模型[J]. 气象, 34(5): 20-25.
- 梅宝玲,陈舜华. 2003. 内蒙古生态环境预警指标体系研究[J]. 南京气象学院学报, 26(3): 384-394.
- 石蓉蓉,雷媛,王东法,等. 2008. 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, 24(5): 612-616.
- 解以扬,韩素芹,由立宏,等. 2004. 天津市暴雨内涝灾害风险分析[J]. 气象科学, 24(3): 342-349.
- 许树柏. 1988. 实用决策方法——层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社: 5-25.
- 许遐祯,潘文卓,缪启龙. 2009. 江苏省龙卷风灾害风险评价模型研究[J]. 大气科学学报, 32(9): 792-797.
- 姚棣荣,刘孝麟. 2001. 浙江省热带气旋灾情的评估[J]. 浙江大学学报: 理学版, 28(3): 344-348.
- 张颖超,叶小岭. 2007. 沿江开发中的统计建模与评价研究[M]. 北京: 科学出版社: 120-140.
- 赵阿兴,马宗晋. 1993. 自然灾害损失评估指标体系的研究[J]. 自然灾害学报, 2(3): 1-7.
- 中国气象局. 2011. 2009热带气象年鉴[M]. 北京: 气象出版社: 10-201.
- 中国统计局. 2007. 2007浙江统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社: 52-100.
- 朱鸣益,陈启泉. 1999. 浙江省气象志[M]. 北京: 中华书局: 201-210.
- 诸静. 2005. 模糊控制理论与系统原理[M]. 北京: 机械工业出版社: 190-197.
- Chen S. 1985. Ranking fuzzy numbers with maximizing set and minimizing set[J]. Fuzzy Sets and Systems, 17: 113-129.
- Kim K, Park K S. 1990. Ranking in fuzzy numbers with index of optimism[J]. Fuzzy Sets and Systems, 35: 143-150.
- Saaty T L. 1980. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill.
- Saaty T L, Ozdemir M. 2003. Negative priorities in the analytic hierarchy process[J]. Mathematical and Computer Modelling, 37(9/10): 1063-1075.
- Yu Chian-Son. 2002. AGP-AHP method for solving group decision-making fuzzy AHP problems[J]. Computers and Operations Research, 29(14): 1969-2001.

(责任编辑:倪东鸿)