

浙江省热带气旋灾损和等级评估*

金志凤¹ 叶建刚² 霍治国^{3**} 姚益平¹ 毛飞³

(¹浙江省气候中心, 杭州 310017; ²绍兴市气象局, 浙江绍兴 321000; ³中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 利用 2004—2008 年浙江省各县的热带气旋灾情资料和同期社会经济数据, 通过订正的转化函数建立区域对比度较好的相对受灾人口、相对受灾面积、倒塌房屋和相对直接经济损失指标值, 用多项式拟合的客观分析方法建立各指标相对损失值与致灾因子(过程雨量、暴雨日数、大暴雨日数、日最大雨量、极大风速、最大风速、极大风速 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的天数、最大风速 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的天数等)的灾情评估模型; 运用灰度聚类分析和专家定权相结合的方法, 对热带气旋灾害指标进行灾情精细化定级。在此基础上, 对 2009 年影响浙江省的“莫拉克”热带气旋进行灾情损失评估和等级划分。结果表明: 根据各单指标灾情模型计算的受灾面积指数、受灾人口指数、房屋倒塌指数和直接经济损失指数与实际值的相关系数分别达到 0.70、0.63、0.75 和 0.54, 基本能反映因致灾因子造成各方面的灾损等级分布。“莫拉克”综合灾情评估结果较准确反映了热带气旋影响期间不同县域的空间分布特点; 但受其他因素(孕灾环境、易损性、抗灾能力等)的影响, 拟合灾情值存在轻灾高估、重灾低估的现象。

关键词 热带气旋; 相对灾度; 灰度聚类分析; 灾损评估模型; 灾损等级划分

中图分类号 P447 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)6-1304-08

Tropical cyclone disaster loss and damage grade assessment in Zhejiang Province. JIN Zhifeng¹, YE Jian-gang², HUO Zhi-guo³, YAO Yi-ping¹, MAO Fei³ (¹Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China; ²Shaoxing Meteorological Bureau, Shaoxing 312000, Zhejiang, China; ³Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 10008, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(6): 1304-1311.

Abstract: By using the 2004-2008 tropical cyclone disasters data and social-economic information of the counties in Zhejiang Province, as well as the indices values with good regional contrast of relative affected population, relative disaster area, collapsed houses, and relative direct economic loss, which were built by revised conversion function, this paper established a disaster assessment model about the relative loss value of the indices and the hazard factors including process rainfall, rainstorm days, heavy rain storm days, maximum daily rainfall, extreme and maximum wind speed ($\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), and days of extreme and maximum wind speed by the method of polynomial fitting, and made a meticulous disaster grade classification of tropical cyclone via grey clustering and expert weighting. On these bases, the disaster assessment and grade dividing were given on the ‘Morakot’ tropical cyclone affected Zhejiang Province in 2009. The calculated indices values of relative affected population, relative disaster area, collapsed houses, and relative direct economic loss were approached to the actual indices values, with the correlation coefficients being 0.70, 0.63, 0.75, and 0.54, respectively, suggesting that the established assessment model could basically reflect the damage grade distribution caused by the hazard factors. The comprehensive results of ‘Morakot’ disaster assessment accurately reflected the spatial distribution characteristics of different counties in the Province during the ‘Morakot’ e-

* 国家科技支撑计划项目(2008BAK50B02)和科技部星火计划项目(2006EA141001)资助。

** 通讯作者 E-mail: huozhigg@cams.cma.gov.cn

收稿日期: 2010-11-08 接受日期: 2011-03-13

vent, but, affected by other factors (pregnancy disaster environment, vulnerability, and resilience, etc.), the fitted disaster was overestimated when the existing disaster was small, and underestimated when the existing disaster was great.

Key words: tropical cyclone; relative disaster degree; grey clustering analysis; disaster loss assessment model; disaster damage grade classification.

热带气旋灾害的精确评估,它不仅是防灾、抗灾、救灾资金发放和保险理赔的重要依据,而且在制定防灾减灾决策、评价防灾减灾效益和社会经济发展规划中起着重要作用(刘燕华等,1995;袁艺,2010)。浙江省地处中国东南沿海,经济发达,人口稠密,社会财富高度集中,是热带气旋灾害最为脆弱地区之一,因此,建立一个科学、准确和精细化的热带气旋灾害评估系统尤为重要。目前,国内外许多学者陆续应用一些新的理论和方法从不同角度探讨热带气旋灾情损失评估和灾害等级划分的方法(许飞琼,1998;陈佩燕等,2009)。在国外,主要通过建立全面的承灾体数据库和承灾体与致灾因子相互作用的机理模型,来构建综合的飓风损失评估模型(Watson & Johnson, 2004; Vickery *et al.*, 2006a, 2006b)。国内学者对热带气旋灾情评估主要从两个角度出发,一是在历史热带气旋特征参数、气象数据及灾情资料的基础上,运用模糊数学方法和层次分析法等,建立热带气旋灾情大小的预评估模型,探究致灾因子强度和承灾体损失率之间的关系,进而对未来热带气旋灾害造成的可能损失进行预评估(樊琦和梁必骐,2000;李春梅等,2006;陈香,2007;马清云等,2008);二是通过转化承灾体灾情的实际值,运用综合评估方法,对热带气旋灾害进行等级划分,进而对热带气旋灾害等级进行评估(于庆东和沈荣芳,1995;任鲁川,1996;吴红华,2005;吴慧等,2009)。本文在前人研究的基础上,选用绝对灾情数据和社会经济数据相结合的方法建立相对灾情数据,通过修正转换函数中的参数,建立适合县域为单元的灾情评估模型,同时结合致灾因子(过程风雨数据)通过多项式拟合建立热带气旋灾情评估模型,并用灰色聚类分析和专家定权相结合方法确定各县市综合灾情等级,为浙江省热带气旋灾中应急评估和灾后综合评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 资料来源

热带气旋灾情资料选取记录比较完整的

2004—2009年浙江省68个县(市)逐年的受灾人口、农作物受灾面积、房屋倒塌数及直接经济损失4个灾情指标,数据来源于浙江省民政厅;社会经济数据选用2004—2009年68个县(市)的总人口数、农作物播种面积、GDP等,来源于浙江省统计年鉴;热带气旋影响期间的风速、雨量等气象数据和68个气象站点的地理位置(经度和纬度)数据来源于浙江省气候中心。

1.2 灾情资料预处理

考虑到浙江省各县(市)土地面积和人口密度相差较大,以及社会经济的快速发展,灾情绝对值不能较全面评价热带气旋对不同区域的影响程度(冯利华,1993;石蓉蓉等,2008),为此,本文提出了相对灾情数据,计算公式:

$$I_i = q_i / Q_i \quad (1)$$

式(1)中, q_i 实际灾情数据, Q_i 为年统计数据, I_i 为相对灾情数据。

应用式(1),把2004—2009年各县的4个灾情指标的绝对灾情数据换算成相对灾情数据。

2 灾损和等级评估的技术方法与分析

2.1 单指标灾情分级模型

由于各个相对灾情数据的量级不同,为了减少灾情指标的随机波动和资料本身的误差,参照文献(冯利华,1993)提出的灾害等级概念,把相对受灾人口,相对受灾面积,房屋倒塌数及相对直接经济损失折算成对应的规范化指数,即当灾损实际值小于一定量级时,灾损实际值与指数值呈线性关系;当灾损实际值大于一定量级,灾损实际值与指数值呈对数关系。由于灾害的等级概念是建立在以省为受灾单元的时间序列灾情数据的基础上,转换函数的参数不适合以县(市)为受灾单元的空间序列灾情数据,因此本文应用式(1)计算2004—2008年逐县的4个相对灾损数据,通过数理统计,当灾情绝对值小于集合的中位数时,通过线性函数转换成规范化灾情指数,当灾情绝对值大于集合的中位数,通过指数函数转换成规范化灾情指数。具体如下:当相对受

灾人口 $\geq 25\%$, 相对受灾面积 $\geq 0.5\%$, 倒塌房屋数 ≥ 100 间, 相对直接经济损失 $\geq 1\%$, 利用对数函数关系, 把各灾情指标换算成规范化指数:

$$\begin{aligned} I_d &= \ln(i_d \times 100, 10) - 0.398 \\ I_s &= \ln(i_s \times 1000, 10) + 0.3 \\ I_k &= \ln(k, 100, 10) \\ I_m &= \ln(i_m, 10) - 1 \end{aligned} \quad (2)$$

当相对受灾人口 $< 25\%$, 相对受灾面积 $< 0.5\%$, 倒塌房屋数 < 100 间, 相对直接经济损失 $< 1\%$ 时, 则利用线性函数关系, 把各灾情指标的数值折算成规范化指数:

$$\begin{aligned} I_d &= i_d/0.25 & I_s &= i_s/0.005 \\ I_k &= k/100 & I_m &= i_m/100 \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)和(3)中, I_d 、 I_s 、 I_k 和 I_m 分别为相对受灾人口、相对受灾面积、房屋倒塌数及相对直接经济损失的规范化指数。

2.2 单指标灾情评估模型

应用数理统计方法, 分析 2004—2008 年 68 个县(市)的热带气旋的相对灾情指数 (I_d 、 I_s 、 I_k 和 I_m) 与同期的过程雨量 (X_1)、暴雨日数 (X_2)、日最大雨量 (X_3)、大暴雨日数 (X_4)、极大风速 (X_5)、最大风速 (X_6)、极大风速 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的天数 (X_7) 和最大风速 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的天数 (X_8) 等 8 个气象致灾因子的相关性。由表 1 可知, 除 X_5 、 X_7 和 X_8 3 个气象要素以外, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 和 X_6 与 4 个相对灾情指数的相关性较高, 并均通过信度 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

应用 SPSS 统计软件和 2004—2008 年 68 个县(市)275 站次的灾情数据和过程气象数据, 建立基于风雨气象要素的单个灾情指标的多元非线性回归方程(表 2)。经检验, 均通过信度 $\alpha=0.01$ 的显著性检验, 即说明方程的建立是合理的。

表 1 灾情指标值与气象致灾因子的相关性
Table 1 Correlation of damage index and meteorological hazard factors

相关系数	I_s	I_d	I_k	I_m
过程雨量(X_1)	0.64	0.65	0.60	0.88
暴雨日数(X_2)	0.58	0.59	0.54	0.81
日最大雨量(X_3)	0.63	0.68	0.57	0.84
大暴雨日数(X_4)	0.70	0.53	0.61	0.77
极大风速(X_5)	0.49	0.25	0.41	0.56
最大风速(X_6)	0.61	0.65	0.55	0.84
极大风速 ≥ 8 的天数(X_7)	0.10	0.01	0.03	-0.19
最大风速 ≥ 8 的天数(X_8)	0.30	0.13	0.14	0.26

表 2 热带气旋单个灾情指标的灾情评估模型
Table 2 Models of tropical cyclone disaster assessment for single index

灾情指数	模拟方程	复相关系数
受灾面积	$Y = -1.349 + 0.21X_2 + 0.022X_4 + 0.51 \log(10X_3, 10)$	0.51
受灾人口	$Y = 0.58 + 0.0064X_1 - 0.00511X_3 - 0.108X_7 + 0.0000229X_4^3$	0.54
房屋倒塌	$Y = -4.4 + 0.00118X_1 + 0.12X_2^2 + 2.33 \log(10X_4, 10) - 0.0024X_3^3 - 0.15X_8$	0.47
直接经济损失	$Y = -1.73 + 1.14 \ln(X_1 \times 10) + 0.044X_2^3 - 0.23X_7$	0.54

2.3 综合灾情指数计算

基于各地社会经济系统的结构与分布及灾情数据采集方法的差异, 相对受灾人口指标值、相对受灾面积指标值、房屋倒塌数和相对直接经济损失指标值在同一区域存在一定差异, 本文使用灰色聚类法和专家定权相结合的方法对单个指标灾情值进行定级, 建立综合灾情指数值。

在对灾情损失评估中, 以受热带气旋影响的不同受灾地区为聚类对象, 表示为 $i=1, 2, \dots, n$; 以受灾地区的受灾人口、受灾面积、倒塌房屋数量、直接经济损失等为聚类指标, 表示为 $j=1, 2, \dots, m$; 根据各单项灾情指标值, 将聚类指标等级依次分为重灾、较重灾、中灾、轻灾 4 个级别, $k=1, 2, 3, 4$, 表示为聚类灰数(表 3)。

灰色聚类分析的基本原理就是根据第 i 个对象关于各指标的观察值 x_{ij} ($j=1, 2, \dots, m$) 的值将第 i 个对象归入第 k 个灰类。

灰色聚类分析的步骤如下:

第 1 步: 给出 j 指标 k 子类白化权函数 $f_j^k(x)$ ($j=1, 2, \dots, m$; $k=1, 2, \dots, s$)。

白化权函数表示 j 指标落入 k 灰类的可能性, 其取值范围为 $0 \sim 1$, 按照转折点的不同分为下限测度白化权函数 $f_j^k(x_j^k(1), x_j^k(2), -)$ 、适中测度白化权函数 $f_j^k(x_j^k(1), x_j^k(2), x_j^k(4))$ 和上限测度白化权函数 $f_j^k(-, -, x_j^k(3), x_j^k(4))$ (图 1)。

表 3 灰度数与灾情指标值对应关系
Table 3 Correspondence between gray value and index value of disaster

聚类灰数	灾情值范围	灾情描述
1	$I \geq 1.2$	重灾
2	$0.8 \leq I < 1.2$	较重灾
3	$0.4 \leq I < 0.8$	中灾
4	$I < 0.4$	轻灾

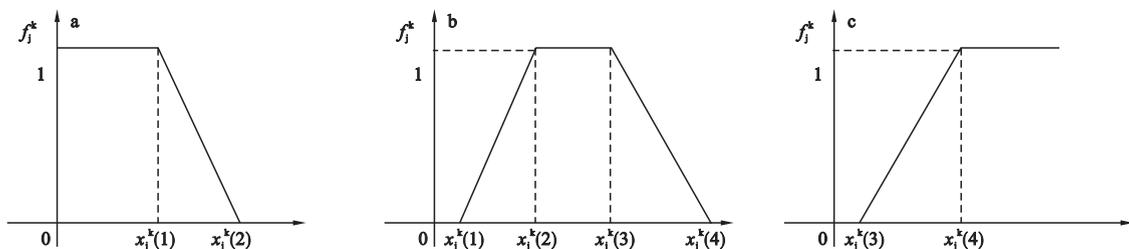


图1 白化权函数

Fig. 1 Whitening weight function

a, 下限测度; b, 适中测度; c, 上限测度。

根据灾情等级划分标准确定白化权函数如下:

$$f_1(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 1.2 \\ \frac{x - 0.8}{0.4} & 0.8 < x < 1.2 \\ 0 & x \leq 0.8 \end{cases} \quad (4)$$

$$f_2(x) = \begin{cases} 0 & x > 1.6 \\ \frac{0.4 - (x - 1.2)}{0.4} & 1.2 < x \leq 1.6 \\ 1 & 0.8 < x < 1.2 \\ \frac{x - 0.4}{0.4} & 0.4 < x \leq 0.8 \\ 0 & x \leq 0.4 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_3(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 1.2 \\ \frac{1.2 - x}{0.4} & 0.8 < x < 1.2 \\ 1 & 0.4 < x \leq 0.8 \\ \frac{x}{0.4} & x \leq 0.4 \end{cases} \quad (6)$$

$$f_4(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 0.8 \\ \frac{0.8 - x}{0.4} & 0.4 < x \leq 0.8 \\ 1 & x \leq 0.4 \end{cases} \quad (7)$$

式中, f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 分别为重灾、较重灾、中灾、轻灾的灰度。

第2步:确定各指标的聚类权。

聚类权表示灾害等级划分标准中各灾害要素在某一类灾害等级中所占的权重,请灾害评估方面的专家根据不同灾害要素在整个灾损评价中的重要性程度,确定受灾人口、受灾面积、房屋倒塌和直接经济损失的聚类权,分别为:

$$\eta_1 = 0.25, \eta_2 = 0.25, \eta_3 = 0.125, \eta_4 = 0.375$$

式中, η_1 为受灾人口聚类权, η_2 为受灾面积聚类权,

η_3 为房屋倒塌聚类权, η_4 为直接经济聚类权。

第3步:确定灰色聚类系数并构建聚类系数矩阵 σ_i^k []。

灰色聚类系数表示聚类对象 i 各灾害损失要素在灰类 k 种的白化程度值与聚类权的积的积累值:

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \mu_j^k \quad (8)$$

并构成聚类系数矩阵, σ_i [$\sigma_i^1, \sigma_i^2, \dots, \sigma_i^s$]

第4步:归属灾害等级。在 σ_i [] 中求最大的灰类等级。

$$\sigma_i^k = \max_{1 \leq k \leq s} (\sigma_i^k) \quad (9)$$

3 评估效果验证

3.1 灾情分级模型验证

应用公式(2)和公式(3),将2004年各地受热带气旋灾害影响的实际灾损值转换成规范化指数。图2所示,通过修正转换函数的参数,不同单项灾害指标的指标值范围大小基本相同,保持在0~2,同时各指标变化趋势较一致,两两相关系数均超过0.6,从而可以判断出运用此方法能较好地反映实际灾情的绝对灾情转化为具有比较意义的指标灾情。各指标间差值在不同区域间有一定的差异(图2),苍南、文成、慈溪和桐乡等县市各指标值较一致,均>1或<0.2,而金华、德清、松阳、庆元等县市不同指标值之间相差较大,特别是景宁县,其受灾人口指数和经济损失指数分别为1.18和1.6,而受灾面积指数和房屋倒塌指数分别为0.06和0,通过分析各县市指标值的标准差(图3),可知有16%的区域各指标间的标准差大于0.4,58%的区域各指标间的标准差大于0.2,说明灾情分级模型基本能反映出不同方面灾情之间的差异。

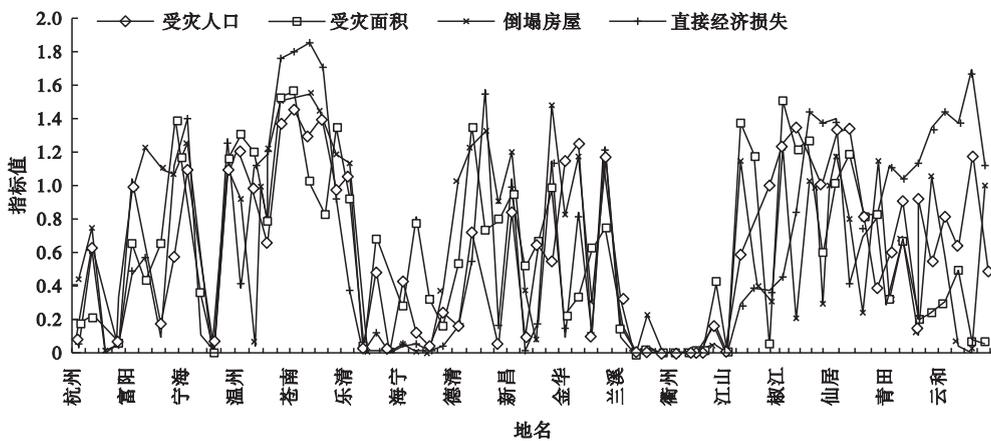


图2 灾度空间序列

Fig. 2 Disaster-dimensional sequence

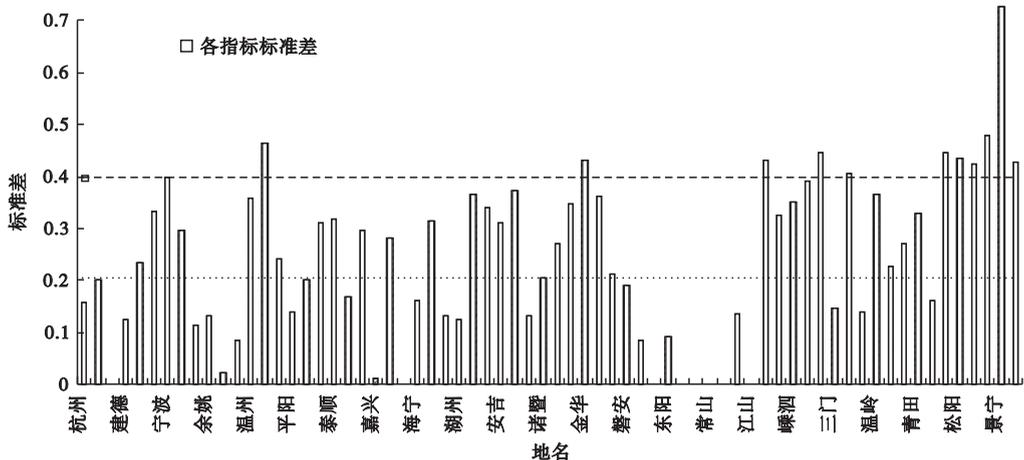


图3 各指标标准差

Fig. 3 Standard deviation of each index

3.2 单指标灾情评估模型验证

利用4个单指标灾情评估模型对2004年和2006年热带气旋受灾面积指数、受灾人口指数、房屋倒塌指数及直接经济指数的进行了拟合,对模拟结果中 <0 的值按0处理,模拟结果如图4。模拟的受灾面积指数、受灾人口指数、房屋倒塌指数和直接经济损失指数与实际值的相关系数分别达到0.70、0.63、0.75和0.54。由此可见,表2中灾情评估模型基本能反映了不同地区不同指标的受灾程度,同时各拟合指数间的相关系数均在0.8以上,超过了与实际值间的相关系数值,说明各模型方程较好的从致灾因子上反映了灾情大小,但对因其他因素造成的灾情变化未能较好的反映。

同时对受灾面积指数和直接经济损失指数的模拟结果进行残差分析(图5),残差值随实际值变化

存在明显的线性变化,说明当对灾情较轻的区域常常高估其灾情,而灾情严重的区域又往往会低估其灾情,且高估区域比低估区域多,导致这种结果主要原因:1)热带气旋灾情程度除了受致灾因子(气象要素风雨)的强度影响外,还与受灾地区的孕灾环境(地理特征)、易损性(经济水平等)、抗灾能力(基础设施)等密切相关,且影响力随着热带气旋强度的增强而增大;2)受各地实际灾情统计方法精度的影响,在实际的灾情数据收集,往往忽视危害程度较小的灾情。

3.3 2009年热带气旋“莫拉克”对浙江省灾情评估

选取2009年热带气旋“莫拉克”为例,运用单指标灾情评估模型和灾情分级模型对“莫拉克”造成的综合灾情损失进行灾损评估和灾害等级划分。应用GIS技术,以县域为单元编制了“莫拉克”热带

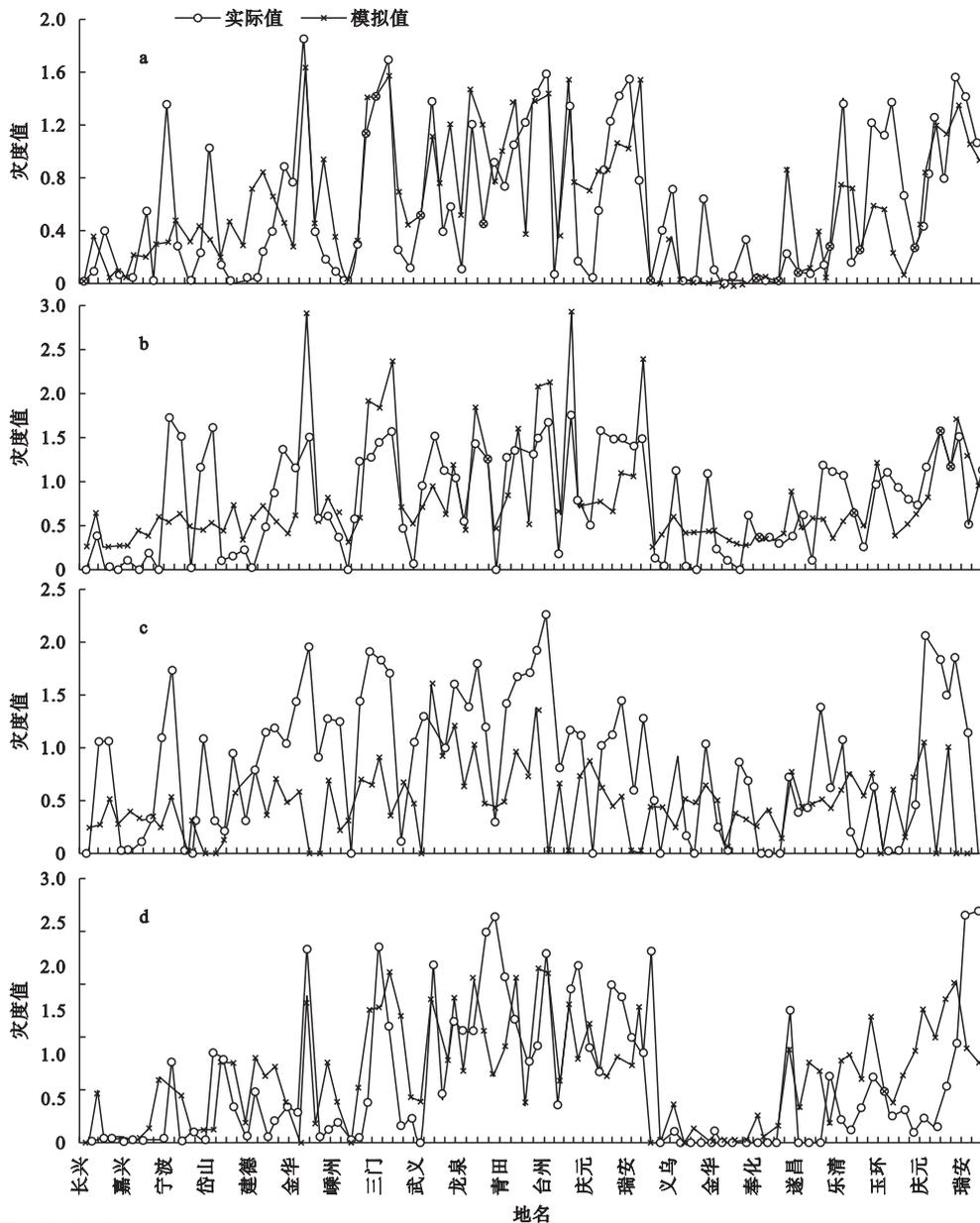


图4 模拟结果对比分析

Fig. 4 Comparison of simulation results

a, 受灾面积指数; b, 受灾人口指数; c, 房屋倒塌指数; d, 直接经济损失指数。

气旋灾害等级分布图。图6表明,浙江东南部、沿海地区,以及西北部分县灾情较重;中部金华和北部绍兴、嘉兴较轻;西南衢州以及杭州南部灾情最小。通过分析“莫拉克”影响过程,可知灾情较重的区域与实际过程相符:1)浙东温州、台州以及宁波等沿海地区,这些地区靠近热带气旋源地,同时由于“莫拉克”在进入台湾海峡后,强度大,移速较慢,造成东南部沿海地区遭受暴雨大风持续时间较长,灾情严重;2)丽水地区,在“莫拉克”未登陆前受其外围云系影响,降水较多,在福建登陆后向北进入丽水,受

地形影响,该地区雨量较大,灾害较重;3)湖州安吉附近地区,“莫拉克”在浙江中部北上与北部南下的冷空气交汇,安吉、临安地区短时雨量较大,灾情比较严重。

运用单指标灾情评估模型对浙江省各县(市)因“莫拉克”造成的灾害等级进行模拟并与实际灾情等级进行比对。图7所示,在59个可对比的县(市)中,其中有39个的拟合综合灾害等级与实际一致,占66%;12个县县的拟合综合灾害等级偏大,占20%,偏大主要集中在轻灾和中灾之间;8个县的预测

切相关。然而,由于资料不全等原因,本研究在灾情评估中仅考虑到致灾因子,未考虑受灾地区的孕灾环境、承载体和防灾能力等影响,在此基础上建立起来的区域灾情模拟方程,对灾情较轻的区域常常高估其灾情,而灾情严重的区域又往往会低估其灾情。因而,热带气旋灾害的成因分析以及灾情评估模型研制等有待以后进一步的深入研究。

参考文献

陈 香. 2007. 福建省台风灾害风险评估与区划. 生态学杂志, **26**(6): 961-966.

陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 2009. 我国台风灾害成因分析及灾情预估. 自然灾害学报, **18**(1): 64-73.

樊 琦, 梁必骐. 2000. 热带气旋灾情的预测及评估. 地理科学, **52**(5): 52-55.

冯利华. 1993. 灾害损失的定量计算. 灾害学, **8**(2): 17-19.

李春梅, 罗晓玲, 刘锦鑫, 等. 2006. 层次分析法在热带气旋灾害影响评估模式中的应用. 热带气象学报, **22**(3): 223-228.

刘燕燕, 李钜章, 赵跃龙. 1995. 中国近期自然灾害程度的区域特征. 地理研究, **11**(3): 14-25.

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评估模型. 气象, **34**(5): 20-25.

任鲁川. 1996. 灾害损失定量评估的模糊综合评判方法. 灾害学, **11**(4): 5-10.

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. 科技通报, **224**(5): 612-616.

吴 慧, 陈德明, 吴胜安, 等. 2009. 灰色关联分析在热带气旋灾害等级评估中的应用. 热带作物学报, **30**(2): 244-248.

吴红华. 2005. 灾害损失评估的灰色模糊综合方法. 自然灾害学报, **14**(2): 115-118.

许飞琼. 1998. 灾害损失评估及其系统结构. 灾害学, **13**(3): 80-83.

于庆东, 沈荣芳. 1995. 自然灾害绝对灾情分级模型及应用. 系统工程理论方法应用, **4**(3): 47-52.

袁 艺. 2010. 自然灾害灾情评估研究与实践进展. 地球科学进展, **25**(1): 22-32.

Vickery PJ, Lin J, Skerlj PF, et al. 2006a. HAZUS-MH hurricane model methodology. I. Hurricane hazard, terrain, and wind load modeling. *Natural Hazards Review*, **7**: 82-92.

Vickery PJ, Skerlj PF, Lin J, et al. 2006b. HAZUS-MH hurricane model methodology. II. damage and loss estimation. *Natural Hazards Review*, **7**: 94-103.

Watson CC, Johnson ME. 2004. Hurricane loss estimation models: Opportunities for improving the state of the art. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **85**: 1713-1726.

作者简介 金志凤,女,1966年生,高级工程师。主要研究方向为农业气象灾害和农业气候资源分析。E-mail: jzfeng0423@163.com
责任编辑 李凤芹
