

叶丁嘉,王国复,尹宜舟,等. 基于灰色关联法的县域台风灾情评估方法初探[J].海洋气象学报,2019,39(1):68-75.
YE Dingjia, WANG Guofu, YIN Yizhou, et al. Study on typhoon disaster assessment at county level based on grey relational analysis [J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 68-75. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.007. (in Chinese)

基于灰色关联法的县域台风灾情评估方法初探

叶丁嘉¹, 王国复², 尹宜舟², 宋月旻¹, 孙劭²

(1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 利用2000—2016年的县域台风灾害历史灾情数据,选取受灾人数、死亡人数、倒损房屋数、农作物受灾面积和直接经济损失为评估指标,在对各项指标进行分级的基础上,通过灰色关联分析法建立了以县域为单位的台风灾害综合灾损指标,对所选取市县的台风灾害损失情况进行了分级评估分析。结果表明,所选取的指标能够快速实现不同台风灾害、不同市县间的台风灾害严重程度的对比分析,具有实际应用价值。灾害等级分布结果显示,东南沿海市县为台风灾害多发区,浙江省、广东省和福建省的各市县为严重灾害(特大型、大型灾害)的易发区;8月、9月为严重灾害的多发时间。以不同登陆地点、不同影响范围的1210号“达维”台风和1513号“苏迪罗”台风为例,对灾情评估的合理性进行了验证。

关键词: 台风灾害; 历史灾害损失; 灰色关联法; 灾情评估

中图分类号: P458.124 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)01-0068-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.007

Study on typhoon disaster assessment at county level based on grey relational analysis

YE Dingjia¹, WANG Guofu², YIN Yizhou², SONG Yuemin¹, SUN Shao²

(1. College of Ocean University, Qingdao 266100, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract According to the historical data of typhoon disasters in county regions from 2000 to 2016, a number of assessment indicators have been selected, including disaster affected population, death toll, the number of toppled and damaged houses, disaster affected crop areas, and direct economic loss. On the basis of grading these factors, an assessment index of typhoon-induced disasters in China at county level is established using grey relational analysis method, and the typhoon disasters in the selected cities and counties are graded and assessed. The results show that the indicators selected can provide comparative analysis of the extent of varied typhoon disasters and typhoon disasters in different cities and counties, making the index valuable for practical application. According to the grade distribution statistics, cities and counties in the southeast coast of China are prone to typhoon disasters, and cities and counties in Zhejiang Province, Guangdong Province, and Fujian Province are prone to serious (severe and extremely severe) disasters. Serious disasters are more likely to happen in August and September. Taking Typhoon DAMREY (2012) and SOUDELOR (2015), which are of different landing sites and ranges of influence, as examples, the reasonableness of disaster assessment is verified.

Key words typhoon disaster; historical disaster loss; grey relational analysis; disaster assessment

收稿日期:2018-12-01; 修订日期:2018-12-12

基金项目:公益性行业(气象)专项(GYHY201406017); 国家自然科学基金项目(41505060)

作者简介:叶丁嘉,女,硕士研究生,主要从事气象灾害风险的相关研究,yedingjia@stu.ouc.edu.cn。

通信作者:王国复,男,研究员,主要从事气象灾害风险、气候资料分析的相关研究,wanggf@cma.gov.cn。

引言

我国是世界上受台风灾害影响最为严重的国家之一,每年因台风灾害造成了重大的人员伤亡和经济损失^[1-4]。根据《中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告》,每年台风灾害所引起的直接经济损失 447.8 亿元,占全国因灾总经济损失的 18.3%;每年造成的死亡人口 290 人,占全国因灾死亡总人口的 10.4%^[5]。且自 2001 年以来,登陆中国的超强和强台风个数明显增多^[6-8],随着经济总量的增加,台风灾害的损失也呈现出增加趋势^[9-11]。在气候变化背景下,极端事件频发,创纪录的台风时有发生。如 1409 号台风“威马逊”7 月 18 日在海南省文昌市沿海登陆,登陆时中心附近最大风速达 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中心最低气压为 890 hPa,打破了 0608 号台风“桑美”的记录,成为新中国成立以来登陆我国最强的台风^[12];1614 号台风“莫兰蒂”是新中国成立以来登陆闽南的最强台风,造成厦门市大面积停电,基础设施毁坏严重^[13]。

台风灾害灾情评估是制定灾害科学研究的重要基础,也是制定防灾减灾政策和社会发展计划的依据^[14]。目前,我国在台风灾情评估方面做了大量的工作,如陈佩燕等^[15]利用台风路径、强度、风雨及台风灾情等资料,初步分析了台风灾害的成因,并建立了灾情预估方程;雷小途等^[16]利用台风灾情资料,初步分析了中国台风灾害的特征,并进行了客观评估;方建等^[17]从台风风场出发,结合地理状况和社会人口经济状况,建立了长三角市县的台风灾害快速评估信息系统;张颖超等^[18]综合选取了台风风雨、天文潮,以及人口、经济农业等 12 个指标,对浙江省登陆热带气旋的灾害影响进行了评估;赵珊珊等^[19]通过热带气旋降水和大风及其造成的直接经济损失,对广东省县域的灾害损失进行了评估。我国现有的对台风灾情评估的大多研究是评估单次台风对全国造成的总体损失^[20-29],或是评估台风对某个省、市、县造成的损失^[18,25]。

常用的台风灾情评估方法有聚类与回归法^[20]、模糊综合评价法^[18,21-23]、可拓分析法^[24,25]、神经网络法^[26-27]、灰色关联法^[28-30]等。相比于其他方法,灰色关联法同时拥有客观、便捷、易实现的特点,且能够弥补县域灾情样本因统计困难而造成的样本资料缺失问题,有利于提高评估的精确度和可信度。因此,本文选用灰色关联法,从全国县域级台风历史灾情损失资料出发,选取受灾人数、死亡人

数、倒损房屋数、农作物受灾面积、直接经济损失等因子,较为全面地反映台风灾害给人们的生命财产和社会经济带来的损失,对 2000—2016 年的台风灾情进行了分析。采用灰色关联法建立台风灾情评价指标,对我国县域的台风受灾情况进行了初步的评估分析。

1 资料

1.1 资料说明

所用台风资料为中国气象局上海台风研究所热带气旋最佳路径资料,数据时间为 2000—2016 年,包括每 6 h 一次的中心位置、强度等信息。县域尺度台风灾情资料来自国家气候中心,包含台风灾害在人口、经济、农林牧业、工业、交通等方面受灾信息以及灾害发生的起止时间(简称为样本时间);考虑样本数据的充分性、可信性和完整性,本文选取其中的受灾人口、死亡人口、倒损坏房屋、农作物受灾面积、直接经济损失等进行分析,分析时段选为 2000—2016 年;利用 2014 年的居民消费价格指数(CPI)^[31]对各年直接经济损失进行了修正,以消除物价变动带来的影响,计算公式为:以 2014 年为基准的当年直接经济损失(x_s)=直接经济损失当年 CPI 指数/2014 年 CPI 指数。极大风速、日降水量资料来自于国家气象信息中心,为 2000—2016 年共 2 248 个气象台站的日观测数据。其中台风降水数据的提取采用任福民等^[32],REN et al.^[33]提出的客观天气图分析方法(OSAT),台风大风数据的提取采用陆逸等^[34]根据 OSAT 方法改进的风分离方法。

1.2 县域灾情资料质量控制

2000—2016 年台风灾害历史灾情数据共包含样本 4 847 条,由于研究样本总数较大,故本文借助热带气旋潜在影响力指数(tropical cyclone potential impact index, TCPI)^[35-37]进行初步处理,计算热带气旋影响过程中各县的 TCPI 数值,提取出各县数值大于 0 时对应的时间范围(称为 TCPI 时间),这样可以获取热带气旋对某市县潜在影响的起止时间范围。将样本时间和 TCPI 时间作对比,对于存在明显差异或无法进行时间对比的样本将核对热带气旋纸质材料,包括《台风年鉴》《中国气象灾害年鉴》《全国气候影响评价》等。剔除重复数据、明显记录错误数据;调整数据单位出错、数据时间出错等信息。最终选取台风灾害致灾样本在 10 个以上的台风过程共 79 次,灾情记录 4 327 条,各市县空间分布见图 1。

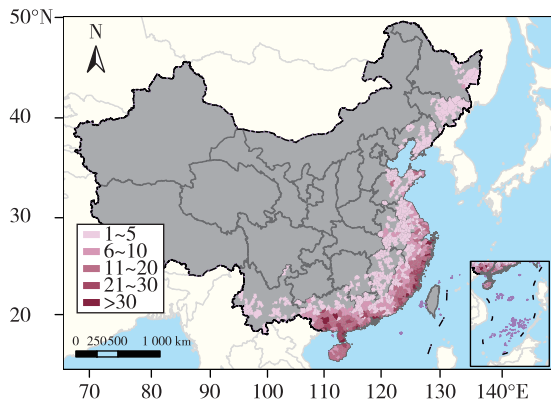


图1 2000—2016年台风灾情样本空间分布(填色表示样本个数)

Fig.1 Distribution of typhoon disaster samples in China from 2000 to 2016 (colored area for the number of samples)

2 县域单元台风灾情评估指数

2.1 灰色关联分析法

灰色关联分析法是我国学者邓聚龙^[38]提出的一种多因素统计分析方法。灰色关联是指事物之间的不确定关联,或系统因子之间,因子对主行为之间的不确定关联^[39]。灰色关联分析的主要目的是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近,以分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度。

表1 台风灾害单项评估指标分级标准

Table 1 Grading standard for individual assessment indicator of typhoon disaster

分级	受灾人数(x_1)/人	死亡人数(x_2)/人	倒塌房屋数(x_3)/间	农作物受灾面积(x_4)/ hm^2	直接经济损失(x_5)/万元
微型	(0, 100]	0	0	(0, 10]	(0, 100]
小型	(100, 10^3]	1	(1, 10]	(10, 500]	(100, 10^3]
中型	(10^3 , 10^4]	2	(10, 100]	(500, 5×10^3]	(10^3 , 10^4]
大型	(10^4 , 10^5]	(3, 10]	(100, 10^3]	(5×10^3 , 10^4]	(10^4 , 5×10^4]
特大型	$>10^5$	>10	$>10^3$	$>10^4$	$>5 \times 10^4$

构建受灾人口的转换函数为:

$$U_1(x_1) = \begin{cases} 0 & (x_1 < 10) \\ 0.2 \times \lg \frac{x_1}{10} & (10 \leq x_1 < 10^6) \\ 1 & (x_1 \geq 10^6) \end{cases} \quad (1)$$

死亡人口的转换函数为:

2.2 单项评估指标的选取及分级

从台风灾害对人口、经济和农业三个方面的影响综合考虑,选取台风灾害造成的受灾人数、死亡人数、倒塌房屋数、直接经济损失、农作物受灾面积等5个灾情指标进行台风灾害分级评估。在参考了2006年中国气象局预测减灾司在《气象灾情收集上报调查和评估试行规定》的灾害等级划分标准的基础上,结合灾情数据的分布规律和我国市县的国民经济发展水平、人口密度和土地面积等信息进行了调整,最终建立了中国台风灾害县域单项评估指标分级标准(表1),使得各项灾害等级分布满足以下条件:灾害等级符合历史情况;各灾害级别数据从大到小符合金字塔型排列规律。

2.3 评估指标的转换函数

由于研究选取的各个指标的单位量级各异,相互之间难以比较,因此需要对各指标进行函数转换,来消除各指标在同一灾害等级时的量纲差异,以便于进行关联分析。转换函数以单项指标的分级标准(表1)为基础,参考王秀荣等^[28,30]对台风灾害评估指标的构建,选取对数函数 $y = \lg x$ 等作为转换函数,使得引入转换函数后的指标函数值全部在(0, 1]之间,且各单项指标的转换函数值可与各单项指标灾害等级实现如下对应关系:微型(0, 0.2],小型(0.2, 0.4],中型(0.4, 0.6],大型(0.6, 0.8],特大型(0.8, 1]。

$$U_2(x_2) = \begin{cases} 0.2 & (x_2 = 0) \\ 0.4 & (x_2 = 1) \\ 0.6 & (x_2 = 2) \\ 0.6 + \frac{1}{35}(x_2 - 3) & (3 \leq x_2 < 10) \\ 0.8 + 0.2 \times \lg \frac{x_2}{10} & (10 \leq x_2 < 100) \\ 1 & (x_2 \geq 100) \end{cases} \quad (2)$$

倒损房屋数的转换函数为：

$$U_3(x_3) = \begin{cases} 0.2 & (x_3 = 0) \\ 0.2 + 0.2 \times \lg x_3 & (1 \leq x_3 < 10^4) \\ 1 & (x_3 \geq 10^4) \end{cases} \quad (3)$$

农作物受灾面积的转换函数为：

$$U_4(x_4) = \begin{cases} 0.2 \lg x_4 & (1 \leq x_4 < 10) \\ 0.2 + \frac{1}{2450} \times (x_4 - 10) & (10 \leq x_4 < 500) \\ 0.4 + \frac{1}{5} \times \lg \frac{x_4}{500} & (500 \leq x_4 < 5 \times 10^3) \\ 0.6 + \frac{1}{25000} (x_4 - 5000) & (5 \times 10^3 \leq x_4 < 10^4) \\ 0.8 + \frac{1}{5} \times \lg \frac{x_4}{10^4} & (10^4 \leq x_4 < 10^5) \\ 1 & (x_4 \geq 10^5) \end{cases} \quad (4)$$

直接经济损失的转换函数为：

$$U_5(x_5) = \begin{cases} 0 & (x_5 < 10) \\ 0.2 \times \lg \frac{x_5}{10} & (10 \leq x_5 < 10^4) \\ 0.6 + \frac{1}{200000} (x_5 - 10^4) & (10^4 \leq x_5 < 5 \times 10^4) \\ 0.8 + \frac{1}{250000} (x_5 - 5 \times 10^4) & (5 \times 10^4 \leq x_5 < 10^5) \\ 1 & (x_5 \geq 10^5) \end{cases} \quad (5)$$

其中 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别为受灾人数、死亡人数、倒损房屋数、农作物受灾面积和直接经济损失。

2.4 关联系数

参照灰色关联系数的定义方法^[31-32]，设定参考序列为可能发生的最大台风灾情指标 $U_0 = (U_{0j})$ ， $U_{0j} = 1; j = 1, 2, 3, 4, 5$ 。即当受灾人口大于 100 万人，死亡人口大于 100 人，倒损房屋大于 1 万间，农作物受灾面积大于 10 万 hm^2 ，直接经济损失大于 10 亿元时，各灾害单项指标的转换函数值皆为 1，灾害级别属于特大型灾害。比较序列为原始序列经转换函数转化后得到的灾害序列 $U_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, 3, 4, 5)$ ，其中 n 为灾情样本条数，即 4 327 个。计算比较序列与参考序列之间的序列差：

$$\Delta_{ij} = |u_{0j} - u_{ij}| \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (6)$$

根据序列差计算得到比较序列与参考序列各个指标间的关联系数 λ_{ij} ：

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{1 + \Delta_{ij}} \quad (7)$$

因为差值序列 Δ 的取值区间为 $[0, 1]$ ，故关联系数 λ 的取值区间为 $[0.5, 1]$ 。

2.5 各评估指标权重

考虑到各评估因素对台风灾情的影响程度不同，为了使评估结果更加客观，采用层次分析法对各评估因子的权重进行计算。层次分析法是美国运筹学家 SAATY and VARGAS^[40] 提出的一种系统分析方法，是将与决策相关的元素分解成目标、准则、方案等层次，在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。该方法首先建立系统的递阶层次结构模型；再通过已确定的准则评估各指标的关系，构造两两比较的权重判断矩阵；最后根据判断矩阵计算各指标的合成权重，并进行总排序和一致性检验，由此获得各指标的权重系数^[41]（表 2）。

表 2 各灾情指标的权重系数

Table 2 Weight coefficient of each indicator

指标	权重系数
死亡人数	0.308
受灾人数	0.087
倒损房屋数	0.140
农作物受灾面积	0.130
直接经济损失	0.335

2.6 灾度计算和灾害等级划分

最终建立台风灾害综合灾损指数为：

$$R(i) = \sum_{j=1,5} r_j \lambda_{ij} \quad (8)$$

其中 r 为各指标的权重系数， λ 为各指标的关联系数。由此得到各地灾害等级划分，各灾害等级与灾度对应见表 3。

表 3 灾害等级与台风综合灾损指数的对应关系

Table 3 Correspondence between the disaster grade and the assessment index of the typhoon-induced disasters

灾害等级	灾度
微小	[0.5, 0.6)
小	[0.6, 0.7)
中	[0.7, 0.8)
大	[0.8, 0.9)
特大	[0.9, 1]

3 结果分析

3.1 灾害等级分布特征

通过台风灾害综合灾损指数获得各个灾害样本的灾害分级。除微型灾害之外,随着台风灾害等级的降低,灾害等级样本总数逐级增加,呈金字塔型结构分布,符合灾害增大规律,灾情评估指标分布合理。

灾害级别为特大型灾害的样本共46个(表4),主要出现在我国东南沿海市县,多为台风登陆市县,特大型灾害出现最多的市县主要分布在浙江省、广东省、福建省,共有29个灾害样本;其次分布

在广西壮族自治区和海南省,有11个灾害样本,其余市县少有发生(图2a)。温州市、台州市、福州市特大灾出现最多。大型灾害样本有323个,其多发市县同样在我国东南沿海市县,主要分布在台风登陆市县及其周边市县,大型灾害出现最多的市县分布在浙江省、广东省,共159个样本;其次分布在福建省、广西壮族自治区和海南省,有128个样本。少部分灾害等级达到大型灾害的市县分布在江苏省、安徽省、山东省等地(图2b)。将台风灾害等级达到大型灾害和特大型灾害的情况定为严重台风灾害,经统计,温州市、湛江市、台州市几个地区的市县受灾最为频繁,受灾频次分别为28次、27次、26次。

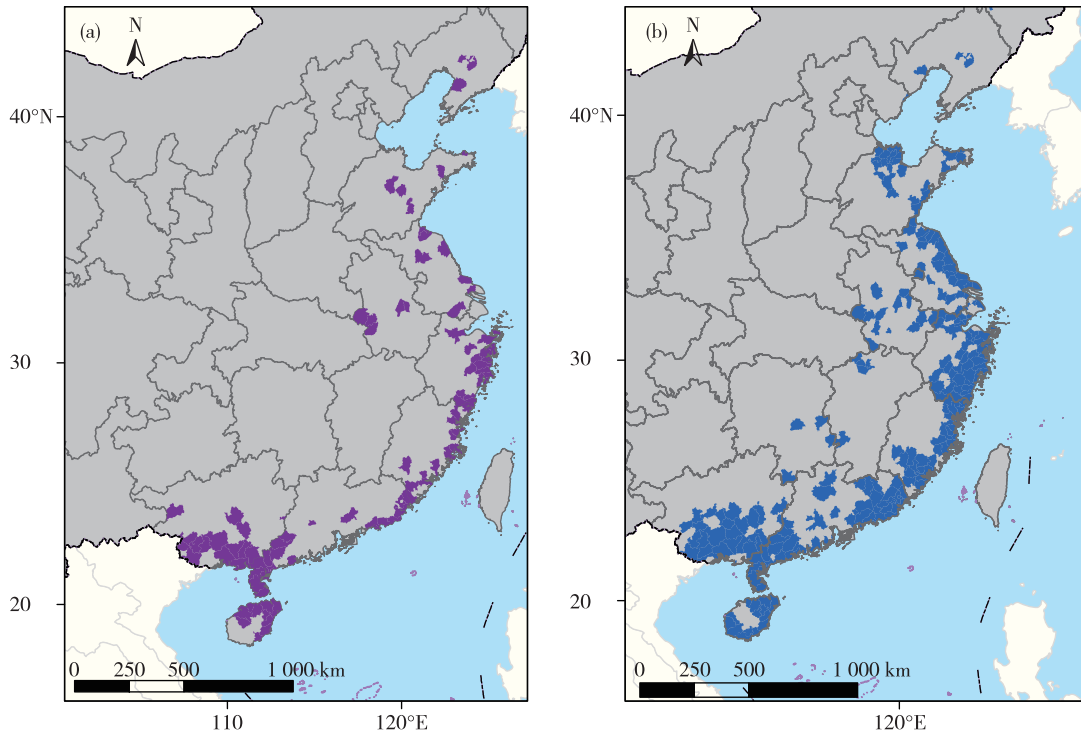


图2 特大型灾害(a)和大型灾害(b)发生地点空间分布

Fig.2 Locations of extremely severe disasters (a) and severe disasters (b)

表4 小型灾害及以上灾害等级样本月分布情况

Table 4 Monthly distribution of slight, medium, severe, and extremely severe disaster samples ↑

月份	特大型灾害	大型灾害	中型灾害	小型灾害
5月	2	6	10	31
6月	3	5	13	41
7月	9	69	281	537
8月	11	117	456	577
9月	19	96	248	325
10月	2	28	104	115
11月	0	2	12	9

从各市县受灾时间上看,台风灾害大多集中发生在7—10月,8、9月的台风更容易给市县造成严重灾害(灾害等级为大型灾害、特大型灾害);7、10月的台风有时也会给市县造成严重灾害;5、6、11月的台风很少会引发严重灾害,灾害等级多在中型及中型以下(表4)。

对各市县台风灾害的灾害等级分布情况与各次台风强度、各地实际受灾严重程度进行对比,验证指数的可信度。对比结果显示,灾情指数与各地历史情况基本符合,证明灾情评估指数能够较好地

实现对各市县台风历史灾情的评估。下面选取不同登陆地点、影响范围不同、致灾严重程度不同且样本较为完整的两个个例进行分析。

3.2 2012 年“达维”台风灾情评估

2012 年 8 月 2 日,1210 号台风“达维”在我国江苏省响水县登陆并向北深入内陆,对山东省、辽宁省等市县造成了非常严重的影响^[42]。经统计,该台风造成受灾人口 564 万余人,死亡 11 人,倒损房屋近 12 万间,农作物受灾面积超过 67 万 hm^2 ,损失近 213 亿元。

“达维”台风致灾市县样本共获得 39 个,根据上文得出的台风灾害综合灾损指数,计算了“达维”台风的灾害损失分布(图 3),其中达到特大型灾害的市县有 2 个,大型灾害的市县 6 个,中型灾害的市县 14 个,小型灾害的市县 15 个,微型灾害的市县 2 个。灾害等级较严重的市县分布在江苏省连云港市,山东省日照市、潍坊市,辽宁省辽阳市等市附近,与实际状况相符,且皆距离台风路径中心较近。

从“达维”台风的过程降水量和最大风速的分布(图 3)可以看出,灾情严重市县多为台风引发强降水的市县,累积降水量多在 100 mm 以上。可见指标对台风“达维”评估与历史情况相符,综合灾损指数可以对东北、华北地区登陆的台风做出快速、合理的评估。

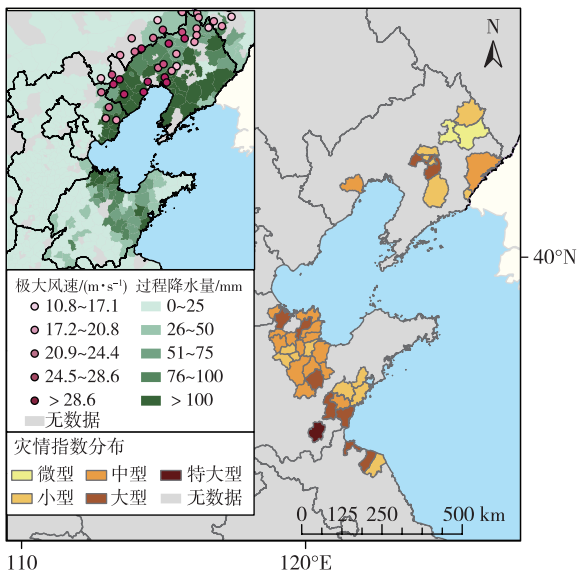


图 3 “达维”台风灾情分布及其最大极大风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和过程降水量(单位:mm)分布

Fig.3 Distribution of disaster index, extreme wind speed (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and process precipitation (units: mm) for Typhoon DAMREY

3.3 2015 年“苏迪罗”台风灾情评估

2015 年 7 月 10 日,1513 号台风“苏迪罗”在我国福建省莆田市秀屿区登陆并深入内陆,在我国东南沿海市县引起大范围强风和降水,对福建省、浙江省、江苏省等市县造成严重影响。据统计,该台风导致 677 万余人受灾,26 人死亡,60 万余间房屋倒损,直接经济损失达到 167.2 亿元。

“苏迪罗”台风致灾市县统计样本共 89 个,根据上文得出的台风灾害综合灾损指数,计算了“苏迪罗”台风的灾害损失分布(图 4),其中达到大灾市县 7 个,中灾市县 31 个,小灾市县 40 个,微灾市县 11 个。从图中可以看出,灾情严重的市县主要分布在受强降水和大风影响的市县,即江苏省盐城市、泰州市,安徽省六安市,浙江省台州市、温州市,以及福建省东部沿海市县。

结合图 4 给出的气象站观测到的“苏迪罗”台风过程降水量和最大风速的分布,分析得知,综合灾损指数达到中级灾害及以上级别的市县多有 75 mm 以上降水或者 7 级以上大风;灾情级别达到大灾及以上的市县,过程降水量多在 100 mm 以上,部分伴有 9 级以上的大风。该灾情评价指数对东南沿海市县的灾情评估基本符合实际情况,由此可认为,灾情评价指数也能够对我国东南部市县的台风灾情做出快速、准确的评估,具有较大的应用价值。

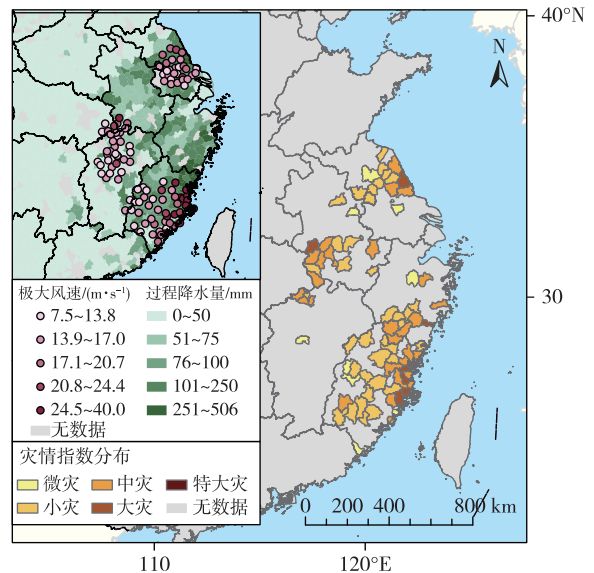


图 4 “苏迪罗”台风灾情分布及其最大极大风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和过程降水量(单位:mm)分布

Fig.4 Distribution of disaster index, extreme wind speed (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and process precipitation (units: mm) for Typhoon SOUDELOR

4 结论与讨论

本文采用灰色关联法,利用2000—2016年的县域台风灾害历史灾情数据,选取受灾人数、死亡人数、倒损房屋数、农作物受灾面积和直接经济损失为评估指标,选取对数函数为转换函数,计算各指标的关联系数;并利用层次分析法获取了各个指标的权重系数,建立了我国县域台风灾害评估指标。并将评估指标分为微型灾害、小型灾害、中型灾害、大型灾害、特大型灾害这五个等级,建立了我国县域台风灾害评估指标,对台风灾害进行了分级评估分析。评估等级与各地实际灾情的灾情级别状况接近,说明该指标可以较好地评估登陆我国的台风对各市县造成的灾情,且实现了全国各市县的横向对比。并对各省的各灾害等级分布状况、易发时间进行了分析,其中浙江省、广东省、福建省、广西各市县为严重灾害多发区。8、9月为严重灾害多发时段。

通过该台风综合灾损指数,实现了较为快速、便捷的对单次台风灾害从全国范围进行评估,并以1210号台风“达维”和1513号台风“苏迪罗”为例进行了个例分析,结合台风过程极大风速、过程降水量发现,台风受灾区域与台风引起大风、暴雨区域基本一致,且受灾严重区域距离台风路径中心较近,验证了灾情评估指数的可靠性。

由于县域灾情资料统计困难、获取资料存在缺失等问题,本文中的综合灾损指数对台风灾情的评估仍存在许多不足,个别灾情评估结果存在误差,综合灾损指数还需要不断的改进和完善。且台风风雨状况与灾害分布区域存在的联系,各市县灾害级别与距台风路径中心的距离间是否存在关联,仍有待进一步研究。

参考文献:

- [1] LIU D F, PANG L, XIE B T. Typhoon disaster in China: prediction, prevention, and mitigation[J]. *Nat Hazards*, 2009, 49(3):421-436.
- [2] 隋广军,唐丹玲,陈和. 台风灾害的经济影响及其防御系统建设—以台风“莫拉克”为例[J]. *国际经贸探索*, 2010,26(2):32-36.
- [3] 赵珊珊,任福民,高歌,等. 近十年我国热带气旋灾害的特征研究[J]. *热带气象学报*, 2015, 31(3):424-432.
- [4] ELLIOTT R J R, STROBL E, SUN P Y. The local impact of typhoons on economic activity in China: A view from outer space[J]. *J Urban Econ*, 2015, 88:50-66.
- [5] QIN D H, ZHANG J Y, SHAN C C, et al. China national assessment report on risk management and adaptation of climate extremes and disasters [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [6] 尹宜舟. 我国热带气旋潜在影响力分析[D]. 北京:中国科学院大学/中国科学院研究生院, 2012.
- [7] ZHANG Q, WU L G, LIU Q F. Tropical cyclone damages in China 1983-2006.[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2009, 90(4):489-495.
- [8] 赵宗慈,罗勇,高学杰,等. 21世纪西北太平洋台风变化预估[J]. *气候变化研究进展*,2007,3(3):158-161.
- [9] 隋广军,唐丹玲. 台风灾害评估与应急管理[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [10] 隋广军,蒲惠炎.沿海地区受台风影响的易损性指标体系与应急管理策略[J]. *改革*, 2012(3):145-154.
- [11] XIAO F J, XIAO Z N. Characteristics of tropical cyclones in China and their impacts analysis [J]. *Nat Hazards*, 2010, 54(3):827-837.
- [12] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2016)[G].北京:气象出版社,2016.
- [13] 陈德花,张玲,张伟,等.“莫兰蒂”台风致灾大风的结构特征及成因[J]. *大气科学学报*, 2018, 41(5):692-701.
- [14] 袁艺,张磊. 中国自然灾害灾情统计现状及展望[J]. *灾害学*, 2006, 21(4):89-93.
- [15] 陈佩燕,杨玉华,雷小途,等. 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.
- [16] 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.
- [17] 方建,徐伟,史培军. 台风灾害快速评估信息系统设计与开发[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(5):517-521.
- [18] 张颖超,张美娟,张中秋,等. 浙江省登陆热带气旋灾害影响评估[J]. *大气科学学报*,2013,36(2):229-234.
- [19] 赵珊珊,高歌,任福民,等. 广东省县域单元热带气旋灾害损失评估方法研究[J]. *热带气象学报*, 2018, 34(3):332-338.
- [20] 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):14-18,24.
- [21] 樊琦,梁必骐. 热带气旋灾害经济损失的模糊数学预测[J]. *气象科学*,2000,20(3):360-366.
- [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] YU D J. Intuitionistic fuzzy theory based typhoon disaster evaluation in Zhejiang Province, China: A comparative

- perspective[J]. *Nat Hazards*, 2015, 75(3):2559-2576.
- [24] 刘少军,张京红,何政伟,等. 基于GIS的台风灾害损失评估模型研究[J]. *灾害学*,2010,25(2):64-67.
- [25] 刘少军,张京红,何政伟,等. 改进的物元可拓模型在台风灾害预评估中的应用[J]. *自然灾害学报*,2012, 21(2):135-141.
- [26] 娄伟平,陈海燕,郑峰,等. 基于主成分神经网络的台风灾害经济损失评估[J]. *地理研究*, 2009, 28(5): 1243-1254.
- [27] LOU W P, CHEN H Y, QIU X F, et al. Assessment of economic losses from tropical cyclone disasters based on PCA-BP[J]. *Nat Hazards*, 2012, 60(3):819-829.
- [28] 王秀荣,王维国,马青云. 台风灾害综合等级评估模型及应用[J]. *气象*, 2010, 36(1):66-71.
- [29] 巩在武,胡丽. 台风灾害评估中的影响因子分析[J]. *自然灾害学报*,2015,24(1):203-213.
- [30] 王秀荣,张立生,李维邦. 台风灾害综合等级评判模型改进及应用分析[J]. *气象*,2018,44(2):304-312.
- [31] 中华人民共和国国家统计局. *中国统计年鉴 2016*[G]. 北京:中国统计出版社,2016.
- [32] 任福民, GLEASON B, EASTERLING D. 一种识别热带气旋降水的数值方法[J]. *热带气象学报*, 2001, 17(3):308-313.
- [33] REN F M, WANG Y M, WANG X L, et al. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations [J]. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24(4):700-711.
- [34] 陆逸,朱伟军,任福民,等. 1980—2014年中国台风大风和台风极端大风的变化[J]. *气候变化研究进展*, 2016,12(5),413-421.
- [35] 尹宜舟,肖风劲,罗勇,等.我国热带气旋潜在影响力指数分析[J].*地理学报*,2011,66(3):367-375.
- [36] YIN Y, Zhu Z, YE D, et al. Analysis on the character of tropical cyclones making landfall on different regions of Chinese continent [J]. *J Trop Meteor*, 2013, 19(3): 276-283.
- [37] YIN Y, LUO Y, XIAO F, et al. Yearly tropical cyclone potential impact index in China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(3):558-568.
- [38] 邓聚龙. 灰色系统综述[J].*世界科学*,1983(7):1-5.
- [39] 傅立.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1992.
- [40] SAATY T L, VARGAS L G. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process [J]. *International*, 2017, 7(2):159-172.
- [41] 陈仕鸿,刘晓庆.基于离散型Hopfield神经网络的台风灾情评估模型[J].*自然灾害学报*,2011,20(5):47-52.
- [42] 周雪松,孙兴池. 台风“达维”(1210)非对称性结构及其对风雨分布的影响分析[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(4):58-64.