

高歌,黄大鹏,赵珊珊,2019. 基于信息扩散方法的中国台风灾害年月尺度风险评估[J]. 气象, 45(11):1600-1610. Gao G, Huang D P, Zhao S S, 2019. Annual and monthly risk assessment of typhoon disasters in China based on the information diffusion method[J]. Meteor Mon, 45(11):1600-1610(in Chinese).

## 基于信息扩散方法的中国台风灾害年月 尺度风险评估\*

高 歌<sup>1,2</sup> 黄大鹏<sup>1,2</sup> 赵珊珊<sup>1,2</sup>

1 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

**提 要:** 利用 1985—2014 年中国台风灾情和社会经济资料, 对中国年和月尺度的台风直接经济损失的时空变化规律进行分析, 并采用信息扩散方法开展损失风险评估, 为提高台风灾害风险管理能力提供参考。结果表明: 全国年及 7—9 月各月的直接经济损失均呈增加趋势。直接经济损失的月际变化特征明显, 8 月致灾台风个数多、损失最严重; 与 1985—1994 年相比, 后两个 10 年年内变化幅度大, 且 9—10 月损失大于 6—7 月。随着直接经济损失水平的增加, 发生中、高风险的地区逐渐减少, 年直接经济损失  $\geq 50$  亿、 $\geq 100$  亿元水平下, 浙江风险概率为全国最高。在 10 年、20 年、30 年一遇三个风险水平下, 浙江、广东、福建、广西年直接经济损失一直维持特重灾等级; 20 年、30 年一遇风险水平下, 北方地区的山东与辽宁年和 8 月、河北年台风直接经济损失也达特重等级, 防台应对不容忽视。

**关键词:** 台风, 直接经济损失, 风险评估, 多时间尺度, 信息扩散方法, 中国

**中图分类号:** P49

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.11.010

## Annual and Monthly Risk Assessment of Typhoon Disasters in China Based on the Information Diffusion Method

GAO Ge<sup>1,2</sup> HUANG Dapeng<sup>1,2</sup> ZHAO Shanshan<sup>1,2</sup>

1 Laboratory for Climate Studies of CMA, National Climate Centre, Beijing 100081

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** By employing the typhoon disaster information, social and economic data of China during 1985—2014, spatio-temporal characteristics of annual and monthly typhoon direct economic losses in China were analyzed. Risk assessments were carried out by using the information diffusion method to provide reference for improving the capability of typhoon disaster risk management. The results are as following. Annual and monthly typhoon-caused direct economic losses from July to September in China show slightly increasing trends during 1985—2014. The monthly variations of direct economic losses are obvious, particularly in August, in which the disaster-caused typhoons are most and the economic losses are most serious in a year. Compared to the period 1985—1994, the range of monthly variations become greater and total economic losses in September and October are greater than in June and July in the recent two decades, i. e., 1995—2004 and 2005—2014. Along with the increasing of direct economic losses levels, the regions with

\* 国家重点研发计划(2018YFC1509002、2016YFC0402405)和国家自然科学基金项目(41101517)共同资助

2018 年 11 月 8 日收稿; 2019 年 4 月 2 日收修定稿

第一作者: 高歌, 主要从事气象灾害风险评估、气候影响评价等方面研究. Email: gaoge@cma.gov.cn

middle and high risk levels are decreasing gradually. Under the condition with annual direct economic losses greater than or equal to 5 or 10 billion RMB yuan, risk probability in Zhejiang Province is the highest in China. Under the three risk levels (returning period=10, 20, 30 years), annual direct economic losses in Zhejiang, Guangdong, Fujian and Guangxi are kept at the specially serious degrees. Under the risk levels with 20 and 30 years returning periods, annual and monthly (August) direct economic losses in Shandong and Liaoning and annual losses in Hebei have also reached the specially serious degree. Thus, the defense response to typhoon should not be neglected in these regions.

**Key words:** typhoon, direct economic losses, risk assessment, multiple time scales, information diffusion method, China

## 引 言

我国是世界上少数几个遭受台风影响最为严重的国家之一,台风灾害发生频次高,具有明显的地域性和季节性特征。2004—2013年,我国平均每年台风直接经济损失高达447.8亿元(折算到2005年价格),占国民生产总值(GDP)的0.16%(赵珊珊等,2015)。随着社会经济的快速发展,台风造成的直接经济损失也呈现显著增加趋势(张娇艳等,2011; Wang et al, 2016; 温姗姗等, 2017),加上台风本身生成发展影响规律的不断变化,对我国科学防台减灾、风险应对提出挑战。

基于历史台风灾情,许多专家相继在台风灾情时空特征及变化分析(赵珊珊等,2015;张娇艳等,2011; Wang et al, 2016; 温姗姗等, 2017; Xiao and Xiao, 2010; 张俊香等, 2012)、灾情等级评估(钱燕珍等, 2001; 马清云等, 2008; 雷小途等, 2009; 魏章进等, 2012; 李祚泳等, 2016; 王秀荣等, 2018)、结合风、雨等致灾因子的损失定量评估模型(娄伟平等, 2010; 李钢等, 2014; 赵珊珊等, 2018; 丑洁明等, 2018)、灾损脆弱性曲线建立以及预评估(Wen et al, 2018; 赵飞等, 2011; 张永恒等, 2009; 陈佩燕等, 2009; 尹宜舟和李焕连, 2017)、风险评估与区划(杨慧娟等, 2007; 张容焱等, 2012; 温家洪等, 2012; 胡波等, 2012; 殷洁等, 2013; 郭君等, 2015; 朱婧等, 2017; Lu et al, 2018)等方面开展了大量的研究。研究的空间尺度多为省、市、县级等,社区尺度的灾损脆弱性分析和损失风险评估研究也有开展(温家洪等, 2012)。就时间尺度而言,已有研究多侧重年尺度和台风过程分析,但基于月尺度视角的台风灾

害损失特征分析较少,尤其是风险评估方面的研究少有涉及。摸清全国及区域的年和月多尺度的台风灾害损失特征及变化、掌握风险分布规律,有利于提高台风灾害风险管理的精细化水平和服务能力,具有非常重要的参考价值。

自然灾害风险通常定义为因自然灾害与承灾体及其脆弱性条件之间的相互作用产生的不良后果或预期损失的概率,风险评估就是量化评估影响或损失的可能程度,常采用概率统计、指标体系、信息扩散模型等方法(毛熙彦等, 2012)。其中信息扩散模型是基于历史资料将样本集值化的一类模糊数学的方法获取超越条件概率,分析可能性,主要适用于概率分布未知、样本数量较少情况,它与概率统计方法均以概率形式作为风险测度,与概率统计和指标体系方法相比,具有操作简便、数据量小、意义直观明确等方面的优势,可为风险决策提供良好的支撑(黄崇福, 2005)。此方法已在一些台风灾害风险评估研究中得到使用(郭君等, 2015; 苏高利等, 2008)。

直接经济损失是反映台风灾情损失严重程度的重要定量指标之一,也是救灾备灾、风险转移的重要参考。为更好满足台风灾害精细化风险管理的需求,了解中国台风灾害直接经济损失的时空分布特点和变化趋势规律,掌握其风险格局,本文基于1985—2014年历次台风过程对我国大陆各省(区、市)造成的直接经济损失资料以及社会经济资料,探讨台风直接经济损失的时空分布特征以及变化趋势,尤其侧重月尺度分析。在此基础上,进一步采用信息扩散模型等方法,进行全国及各省(区、市)年尺度和各月定量风险评估,拟为各地台风防灾减灾部署、合理应对措施制定、灾害风险转移等提供科学依据。

# 1 资料和方法

## 1.1 资料

基于《全国气候影响评价》(中国气象局国家气候中心,1985—2014)及《中国气象灾害年鉴》(中国气象局,2005—2015),对 1985—2014 年我国历次台风致灾过程及各省(区、市)台风灾情资料进行整理,致灾台风灾情影响包括:直接经济损失、死亡人口、农业受灾面积等。在原始资料基础上,结合台风生成、结束日期以及登陆日期,确定每个台风过程影响省(区、市)灾情所属月份,如有跨月情况,按照台风过程影响该省主要时间段所在月份进行划分。1985—2014 年,省级台风过程灾情样本总数达 612 个,其中 6—10 月样本个数分别为 47、152、230、131、40 个,4—5 月及 11 月均少于 5 个。

社会经济资料采用同期的各省(区、市)历年年值统计数据,主要包括:国内及各省(区、市)地方生产总值(GDP)、居民消费者价格指数(CPI,上年=100)等。资料来自中华人民共和国国家统计局《中国统计年鉴》(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/nd-sj/>)、省(区、市)统计年鉴以及国家数据查询系统(<http://data.stats.gov.cn>)。

## 1.2 方法

### 1.2.1 直接经济损失价格折算及年、月值序列统计

为合理比较不同年份的直接经济损失,考虑年际间的价格变化影响,采用各省(区、市)年居民消费价格指数(CPI),将直接经济损失统一折算为 2014 年价格进行分析。这里忽略了 CPI 月变化对折算价格的影响。价格折算后,进行 1985—2014 年全国及各省(区、市)历年月、年台风直接经济损失量的统计,如果当月或年无台风致灾,记录记为空(无影响),在此基础上,开展年、月尺度特征分析评估。

### 1.2.2 趋势统计及显著性检验

长期变化趋势分析采用 Mann-Kendall 方法进行显著性水平检验,取  $\alpha=0.05$ ,且考虑了序列自相关的影响及序列修订(高歌和许崇育,2015)。变化幅度采用 Theil-Sen 方法(Theil,1992;Sen,1968)计算的倾斜度表示,对于时间序列  $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ,倾斜度计算公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left[ \frac{x_i - x_j}{i - j} \right], \quad \forall j < i \quad (1)$$

式中, $1 < j < i < m$ , $m$  为样本数。当  $\beta > 0$  时,为上升趋势,反之为下降趋势, $\beta=0$ ,无趋势。Median 为中位数函数。

### 1.2.3 风险概率估计

各地台风月值和年值直接经济损失时间序列,在台风影响频繁的区域,资料样本较多,但在非影响频繁区,大多数年份无影响,考虑到无影响年份对风险概率分析的影响,采用下式进行风险概率估计:

$$P(X \geq x) = P(X = \text{致灾})P(X \geq x | X = \text{致灾}) \quad (2)$$

式中, $P(X \geq x)$  为 30 年中直接经济损失大于等于某一直接经济损失值( $x$ )的超越概率; $P(X = \text{致灾}) = \text{序列中致灾年份}/30$ 年; $P(X \geq x | X = \text{致灾})$  则为致灾年份中大于等于某一直接经济损失值的超越概率,部分地区或时段由于致灾样本少,导致概率统计分布函数难以确定,因此统一选择信息扩散模型进行分析,基本原理如下:

灾害指数样本集合为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , $m$  是样本个数,这里灾害指数样本为历年台风致灾年份的年及月直接经济损失。设灾害指数论域为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , $U$  的控制点针对不同区域的年、月尺度台风灾害直接经济损失序列分别构建, $U$  的取值范围为:序列最小值~(序列最大值+间距),等间距设 100 个控制点。

单值观测样本  $x_i$  可将其所携带信息扩散给  $U$  中的所有点,这里采用正态扩散模型:

$$f_i(u_j) = \frac{1}{h \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x_i - u_j)^2}{2h^2} \right] \quad (3)$$

式中, $h$  为扩散系数,由样本的最大值  $b$ 、最小值  $a$  和样本个数  $m$  来确定。

$$h = \begin{cases} 0.8146(b-a), & m = 5 \\ 0.5690(b-a), & m = 6 \\ 0.4560(b-a), & m = 7 \\ 0.3860(b-a), & m = 8 \\ 0.3362(b-a), & m = 9 \\ 0.2986(b-a), & m = 10 \\ \frac{2.6851(b-a)}{m-1}, & m \geq 11 \end{cases} \quad (4)$$

令  $C_i = \sum_{j=1}^n f_i(u_j)$ ,相应模糊子集的隶属函数为:

$$\mu_{x_i}(u_j) = \frac{f_i(u_j)}{C_i} = \frac{f_i(u_j)}{\sum_{j=1}^n f_i(u_j)} \quad (5)$$

单值样本  $x$  变成了以  $\mu_{x_i}(u_j)$  为隶属函数的模糊子集  $x^*$ ,  $\mu_{x_i}(u_j)$  为样本  $x_i$  的归一化信息分布。

$$\begin{aligned} \text{令 } q(u_j) &= \sum_{i=1}^m \mu_{x_i}(u_j) \text{ 及 } Q = \sum_{j=1}^n q(u_j), \\ p(u_j) &= \frac{q(u_j)}{Q} = \frac{q(u_j)}{\sum_{j=1}^n q(u_j)} \end{aligned} \quad (6)$$

这就是样本点在  $u_j$  处的频率值, 可做为概率的估计值。

$x_i$  取为论域  $U$  中的某一个元素  $u_j$ , 超越  $u_j$  的概率值反映发生直接经济损失  $\geq u_j$  这种情况的可能性, 即风险估计值, 应为:

$$P(u \geq u_j) = \sum_{k=j}^n p(u_k) \quad (7)$$

在此基础上, 也可通过设定的超越概率获取相应的直接经济损失值。如果  $m < 5$ , 则不进行超越概率的统计分析。

## 2 结果分析

### 2.1 全国台风直接经济损失特征分析

#### 2.1.1 历年变化及趋势特征

通过有无 CPI 价格折算的年直接经济损失统计分析对比, 二者差别明显(图 1)。年直接经济损失价格折算后高于同期折算前的值, 两者差异最大时高达 414.4 亿元, 年均值相差 106.8 亿元, 价格折算后年直接经济损失最大值出现在 1996 年, 而折算

前则出现在 2013 年。就 1985—2014 年总体变化趋势而言, 二者虽均呈增加趋势, 但增加幅度有差异。考虑到这些差异对统计特征的影响, 下文分析均基于经 CPI 价格折算的直接经济损失开展。

1985—2014 年, 全国累计台风直接经济总损失为 13051.5 亿元, 年均达 435.05 亿元, 且年际变化大, 标准差为 386.4 亿元。全国台风直接经济损失总体略呈增加趋势, 增加幅度为  $12.5 \text{ 亿元} \cdot \text{a}^{-1}$ , 阶段性偏重期明显, 集中在 1996—1997、2005—2006 和 2012—2014 年(图 1)。每 10 年累计值也呈现增加态势, 2005—2014 年累计值为 6492.1 亿元, 是 1985—1994 年的 2.6 倍。

全国台风直接经济损失与致灾台风个数关系密切。1985—2014 年, 有 218 个台风造成不同程度的直接经济损失, 平均每年致灾台风 7.3 个。1996、2013 和 2012 年台风直接经济损失之高排名前三位, 其中 2013 年致灾台风个数最多, 达 13 个; 而 1998、1987 年致灾台风个数最少, 仅有 4 个, 这两年均受厄尔尼诺现象影响, 台风生成、登陆个数均偏少, 其中 1998 年台风登陆异常少, 仅 3 个, 且登陆时中心附近最大风力均不足 12 级, 影响范围不大, 造成当年台风直接经济损失最少, 为 29.7 亿元, 1987 年为 76.1 亿元。登陆台风数占总致灾台风数比例高, 达 94%。1985—2014 年, 致灾台风个数也呈增加趋势。

台风影响关键期(7—9 月)各月台风直接经济损失呈不明显增加趋势, 增长速率分别为 0.2、5.3、4.1  $\text{亿元} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中 8 月增加趋势显著; 各月最大值均发生在 2005—2014 年。

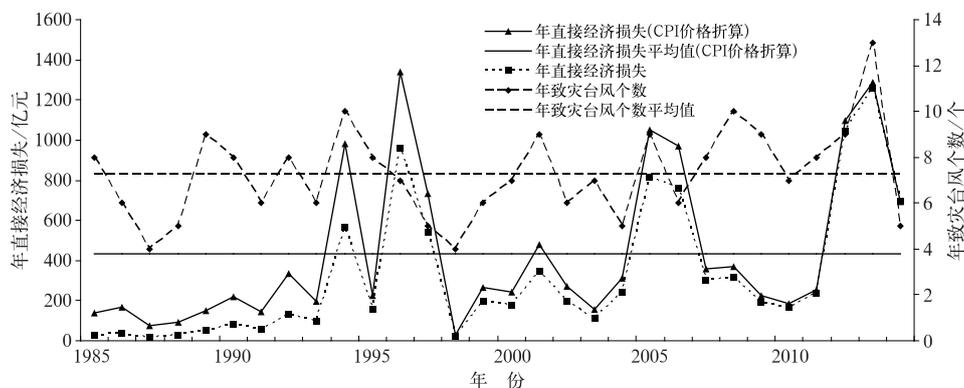


图 1 1985—2014 年全国台风直接经济损失和年致灾台风个数

Fig. 1 Time series of annual typhoon-caused direct economic losses and numbers of disaster-causing typhoons in China during 1985—2014

### 2.1.2 年内月际分布特征及其变化

6—10月为台风直接经济损失多发期,占全年总损失的98.5%。全国台风直接经济损失和致灾台风数月际变化特征明显,均呈现先增加后减少的态势,其中8月致灾台风数最多达68个,30年平均直接经济损失最重,为194.4亿元,为损失较为严重的7月、9月的2倍之多(图2)。8月致灾台风的发生频率高达93.3%,9和7月为90%,6和10月为50%左右,其他各月不足10%。

台风致灾数及直接经济损失年内月际分布也有明显的年代际变化。1985—1994年,致灾台风数年内变化幅度最小,9月最多,6—7月与9—10月总个数一致;1995—2004年,致灾台风个数月际变化最大,8月最多,9—10月总个数多于6—7月,2005—2014年与之类似(图3a)。1985—1994年,6—7月总损失多于9—10月,而这种情况在1995—2004年发生了反转,并且台风直接经济损失的年内变化尖陡态势也更为突出(图3b)。

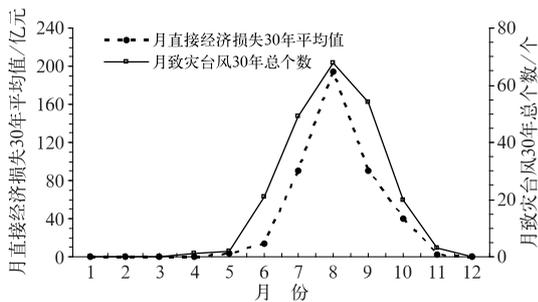


图2 1985—2014年各月直接经济损失平均值和致灾台风总数

Fig. 2 Monthly means of typhoon-caused direct economic losses and total number of disaster-causing typhoons in China during 1985—2014

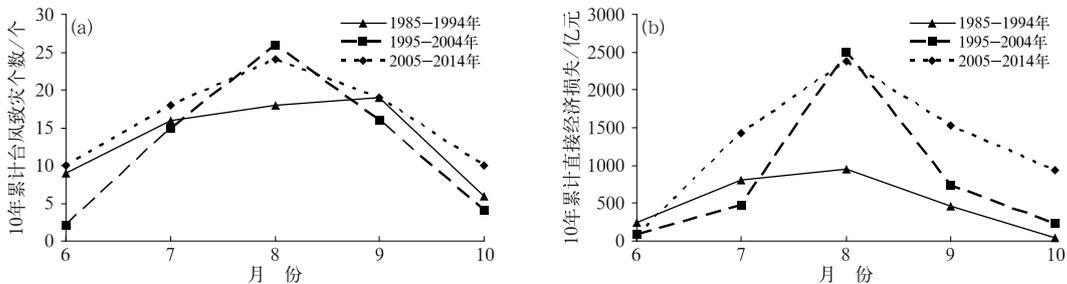


图3 1985—2014年6—10月每10年致灾台风个数(a)和全国累计台风直接经济损失(b)月际分布

Fig. 3 Monthly variations of numbers of disaster-causing typhoons (a) and accumulated typhoon-caused direct economic losses (b) in China from June to October every 10 years during 1985—2014

## 2.2 省(区、市)台风直接经济损失特征

### 2.2.1 年空间分布

1985—2014年,全国有24个省(区、市)遭受不同程度的台风直接经济损失,主要集中在我国中东部地区,华南及浙江、湖南以及北方的河北、山东等地,多年累计台风直接经济损失超过500亿元,浙江、广东、福建、广西4个省(区)超过1000亿元,其中浙江高达3373.2亿元,辽宁以及苏皖地区、江西等地一般在100~500亿元,其余地区不足100亿元(图4a)。致灾台风个数与之空间分布大体一致,二者正相关系数达0.86。但也出现少部分省(区、市)如:江苏、江西、上海等致灾台风个数多损失少,河北致灾台风个数少损失多的情况。

采用类似杨慧娟等(2007)方法,以某地台风灾害直接损失/台风致灾次数为指标,统计该指标的30年平均值得来表征单次台风袭击造成的损失程度。就平均单次台风袭击的严重程度而言,浙江位列第一,达40.7亿元/(次·a),其次为河北27.2亿元/(次·a),广东为23.6亿元/(次·a)。山东、福建、广西、海南也较为严重,均超过10亿元/(次·a)。河北台风致灾虽然不是很频繁,30年中有6年共8个台风致灾,但由于受1996年台风赫伯造成的极端直接经济损失的影响,导致平均单次台风损失也位列前茅,该台风造成河北省石家庄市西部山区暴雨集中,有34个市(县)48 h降水量>100 mm,20个市(县)>200 mm,井陘县吴家窑高达670 mm(杜青文和张迎新,1997),暴雨导致径流急洪峰流量大,直接经济损失十分严重,高达645.4亿元(2014年修订值)。经统计,河北省为1985—2014年单次台风过程造成省级直接经济损失最大的省份。由上述分

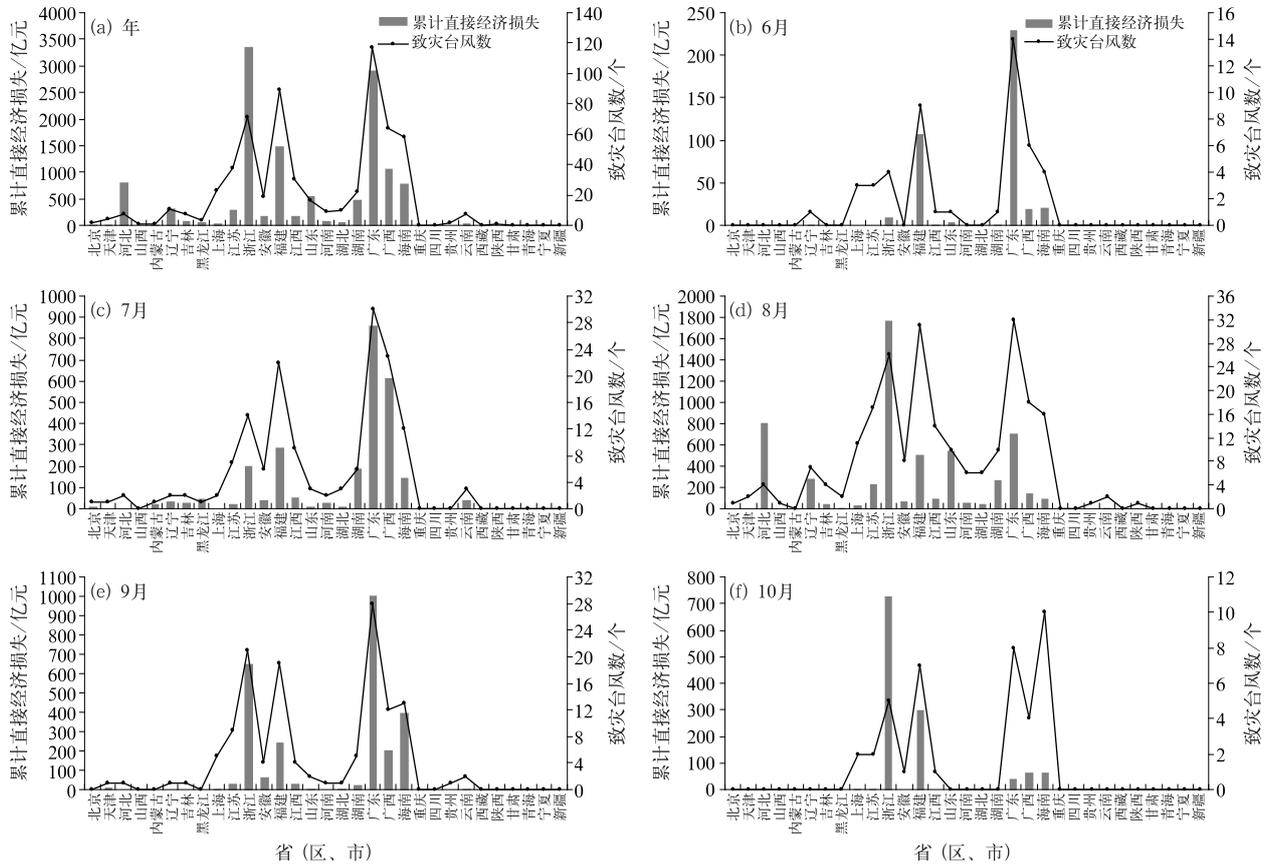


图 4 1985—2014 年全国各省(区、市)年(a)及 6—10 月(b~f)累计台风直接经济损失和致灾台风个数

Fig. 4 Annual (a) and monthly typhoon-caused direct economic losses and numbers of disaster-causing typhoons accumulated from June to October (b-f) in China in 1985—2014

析可见,北方地区由于个别台风因伴随降雨强度强,加上总体基础设施抗台能力不强、承灾体脆弱性高,也会产生极其严重的直接经济损失,应密切关注极端台风强降水对北方地区造成的危害。

2.2.2 月空间分布

各月台风直接经济损失的空间分布受台风盛行路径、登陆位置、频次、风雨潮等因素影响。从春到夏,台风登陆点的纬度逐渐北移,7、8 月达到最北,登陆点的平均纬度在 24°N 左右,9—10 月又逐渐南退(陈敏等,1999),台风致灾范围也随之改变(图 4b~4f)。

多年累计月台风直接经济损失超百亿元的省份,以 8 月最多,涉及浙江、河北、广东、山东、福建、辽宁、湖南、江苏、广西、江西等 10 个省(区),7 月次之,集中在华南及江南的浙江、湖南等地。全国损失最重的省份 6、7、9 月均为广东,8、10 月则为浙江,8 月高达 1778.5 亿元。致灾台风个数全国最多的省份 6—9 月均为广东,10 月为海南,其中 8 月多达 32 个(图 4b~4f)。

2.2.3 年内月际分布

直接经济损失年内月际分布各省(区、市)大多呈现单峰型,其中有 13 个省份最大峰值出现在 8 月,5 个出现在 7 月,4 个出现在 9 月,其中华南及浙江、上海为双峰型,但最高值和次高值出现的时间各不相同,浙江、福建、上海出现在 8 月和 10 月,广东、海南出现在 9 月和 7 月,广西则相反。各地致灾台风个数月际分布以单峰型居多。

2.3 台风直接经济损失风险评估

2.3.1 不同直接经济损失程度的超越概率风险

通过信息扩散方法估算不同台风直接经济损失水平下的超越概率,以此大小反映风险高低,划分等级见表 1。

随着直接经济损失水平的增加,超越概率风险逐渐减小,发生中、高风险的省份均逐渐减少(图 5)。年直接经济损失台风致灾且样本个数 ≥ 5 (个)的省份共有 17 个。年直接经济损失 ≥ 10 亿元水平下,华南各地及浙江为高风险区,超越概率为

表 1 超越概率风险等级划分  
Table 1 Risk grades of exceeding probability

超越概率( $P$ )	$P < 0.1$	$0.1 \leq P < 0.5$	$0.5 \leq P$
风险等级	低风险	中风险	高风险

0.66~0.95,其中广东风险最高;中风险等级的省份多达 11 个,北方地区,以山东风险最高,其次为辽宁、河北、河南;上海为低风险区(图 5a)。当 $\geq 50$ 亿元水平时,浙江、广东为高风险区,超越概率分别为 0.68、0.67;中风险区集中在华南、湖南及北方的山东、河北、辽宁等地(图 5g)。 $\geq 100$ 亿元水平时,浙江、广东、河北、福建、广西相对其他省份风险较高,属中等风险,浙江超越概率最高为 0.44。浙江在 $\geq 50$ 亿元、 $\geq 100$ 亿元等较高损失水平情况下,超越概率均大于广东,为全国风险最高的省份(图 5f)。

三个损失水平下,6—10 月台风致灾且样本个数 $\geq 5$  个的省份随时间变化先增后减,分别为 3、9、14、8、4 个,8 月最多;6—8 月,分布范围先由沿海向内陆及向北方扩展,8 月之后又向南方和沿海地区回退。8 月中、高风险等级出现省份均明显多于其他各月,其次为 7、9 月。月直接经济损失 $\geq 10$  亿元水平时,7—9 月,广东连续 3 个月处于高风险区且超越概率均为全国最大,分别为 0.57、0.66、0.54;8 月浙江、福建也处于高风险区(图 5b~5f)。当 $\geq 50$  亿元水平时,各月风险等级为中、低等级,其中 8 月中风险的省份有浙江、广东、山东、辽宁和湖南,浙江超越概率最大为 0.41(图 5h~5l)。当 $\geq 100$  亿元水平时,除浙江的 8、10 月、广东的 9 月为中风险

外,其他地区均为低风险(图 5n~5r)。

三个损失水平下,各地最大风险出现的月份各有不同。福建、浙江、江西、上海、江苏、安徽、湖北、山东、河南、辽宁等 10 个省(市)三个损失水平下超越概率最大值均出现在 8 月,而广西出现在 7 月,海南出现在 9 月;广东、湖南在月直接经济损失 $\geq 10$  亿元水平下,8 月最大,其他两个风险水平下,广东 9 月最大,湖南 7 月最大。

### 2.3.2 不同重现期下直接经济损失程度

统计不同重现期下的年和月台风直接经济损失,并根据损失大小确定严重等级(表 2):在 10 年、20 年、30 年一遇的风险水平下,随着年遇型增加,各地相应的年直接经济损失及等级均有不同程度增加(图 6a,6g,6m)。从空间分布格局来看,在 10 年一遇风险水平下,有 8 个省份以轻灾和中灾为主,浙江、广东、福建、广西及河北达特重灾级别,海南、湖南以及北方地区的辽宁和山东达重灾级别(图 6a);在 20 年一遇风险水平下,特重灾省份增到 9 个,10 年一遇水平下的重灾省份均升为特重灾等级,江苏由中灾级别升为重灾级别,无轻灾等级(图 6g);在 30 年一遇风险水平下,特重灾省份仍维持有 9 个,江苏、安徽升级重灾等级,中灾省份减少(图 6m)。总体来看,三个风险水平下,浙江、广东、福建、广西以及河北一直维持特重灾等级,浙江年直接经济损失最重,其次为河北、广东。三种年遇型下,重、特重灾省份除湖南、安徽外,大多分布在沿海,中灾省份则多集中在内陆。

表 2 直接经济损失程度等级划分  
Table 2 Grades of direct economic losses

直接经济损失 $L$ /亿元	$L < 10$	$10 \leq L < 50$	$50 \leq L < 100$	$100 \leq L$
程度等级	轻灾	中灾	重灾	特重灾

三种风险水平下,重、特重灾等级涉及的省份 8 月最多,其次为 7、9 月。特重灾分布区域月际之间变化明显,在 10 年一遇风险水平下,8 月浙江、9 月广东、10 月浙江达特重灾等级(图 6b~6f)。在 20 年和 30 年一遇水平下,7 月特重灾集中在广西、广东和湖南,8 月特重灾区域发生明显变化,分布在浙江、山东、辽宁、广东,9 月,广东、浙江、海南为特重灾区域,10 月,浙江及福建在 30 年一遇水平下达特重灾等级(图 6h~6l 和 6n~6r)。由上述分析可见,8 月,除南方地区为防台减灾的重点外,北方区域的山东、辽宁等地的防台应对也不容忽视。

## 3 结论与讨论

本文对 1985—2014 年中国及各省(区、市)台风直接经济损失的时空变化特征进行了探讨,并基于信息扩散等方法开展台风直接经济损失风险评估。得出以下结论:

(1) 年及台风影响关键期 7—9 月各月全国台风直接经济损失呈不同程度的增加趋势,其中 8 月增加趋势显著,近些年来不断提高的防台抗灾能力在一定程度上减小了直接经济损失增长的幅度。直接经济损失年内月际变化特征明显且有年代际变

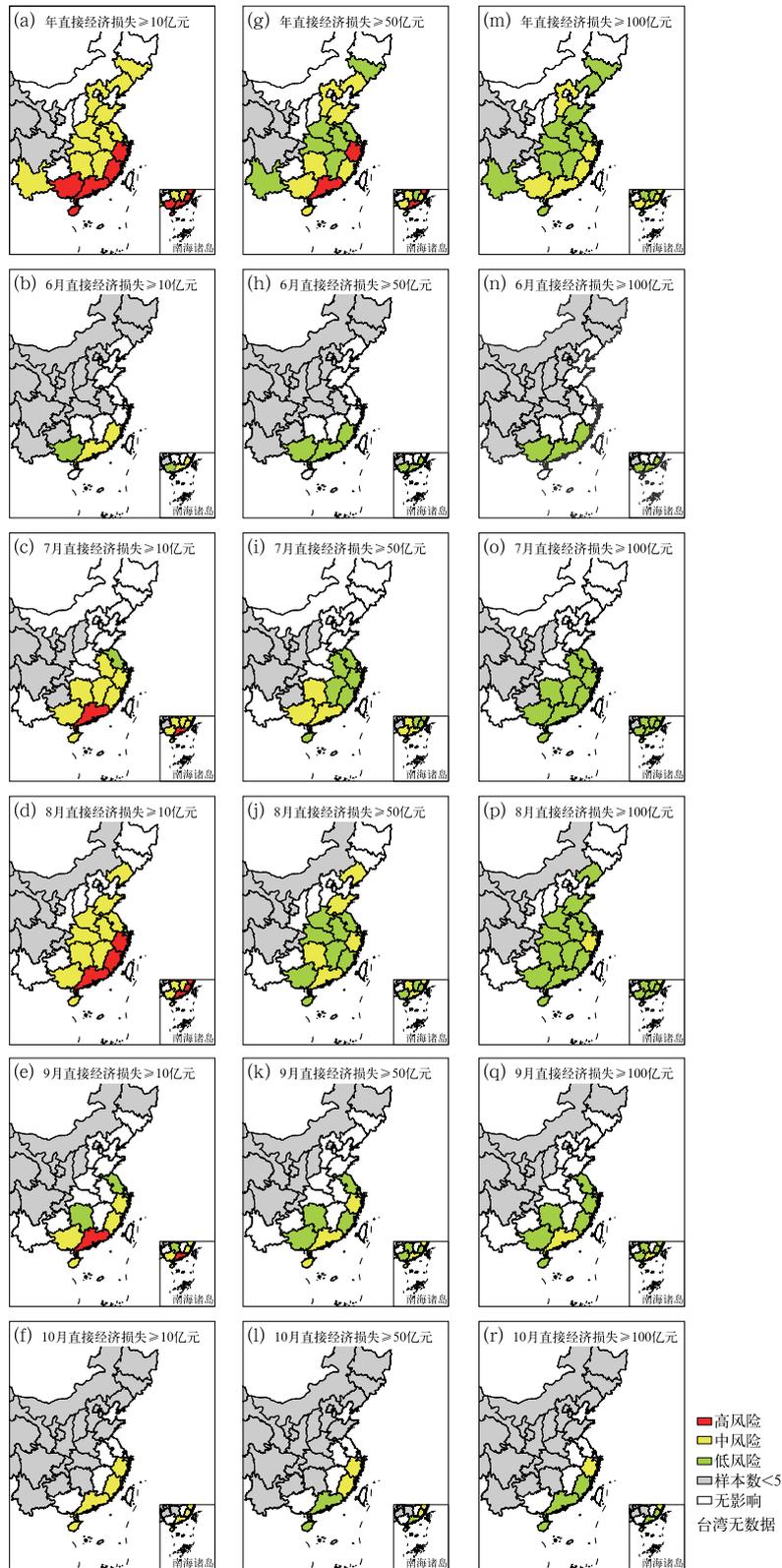


图 5 年(a,g,m)和 6—10 月(b~f;h~l;n~r)不同台风直接经济损失水平下超越概率风险等级分布 (a~f)  $\geq 10$  亿元, (g~l) 50 亿元, (m~r) 100 亿元

Fig. 5 Distributions of risk grades evaluated by exceeding probability under conditions with typhoon-caused direct economic losses  $\geq 1$  billion yuan (a~f), 5 billion yuan (g~l) and 10 billion yuan (m~r) RMB for a whole year (a, g, m) and each month from June to October (b~f; h~l; n~r) in China

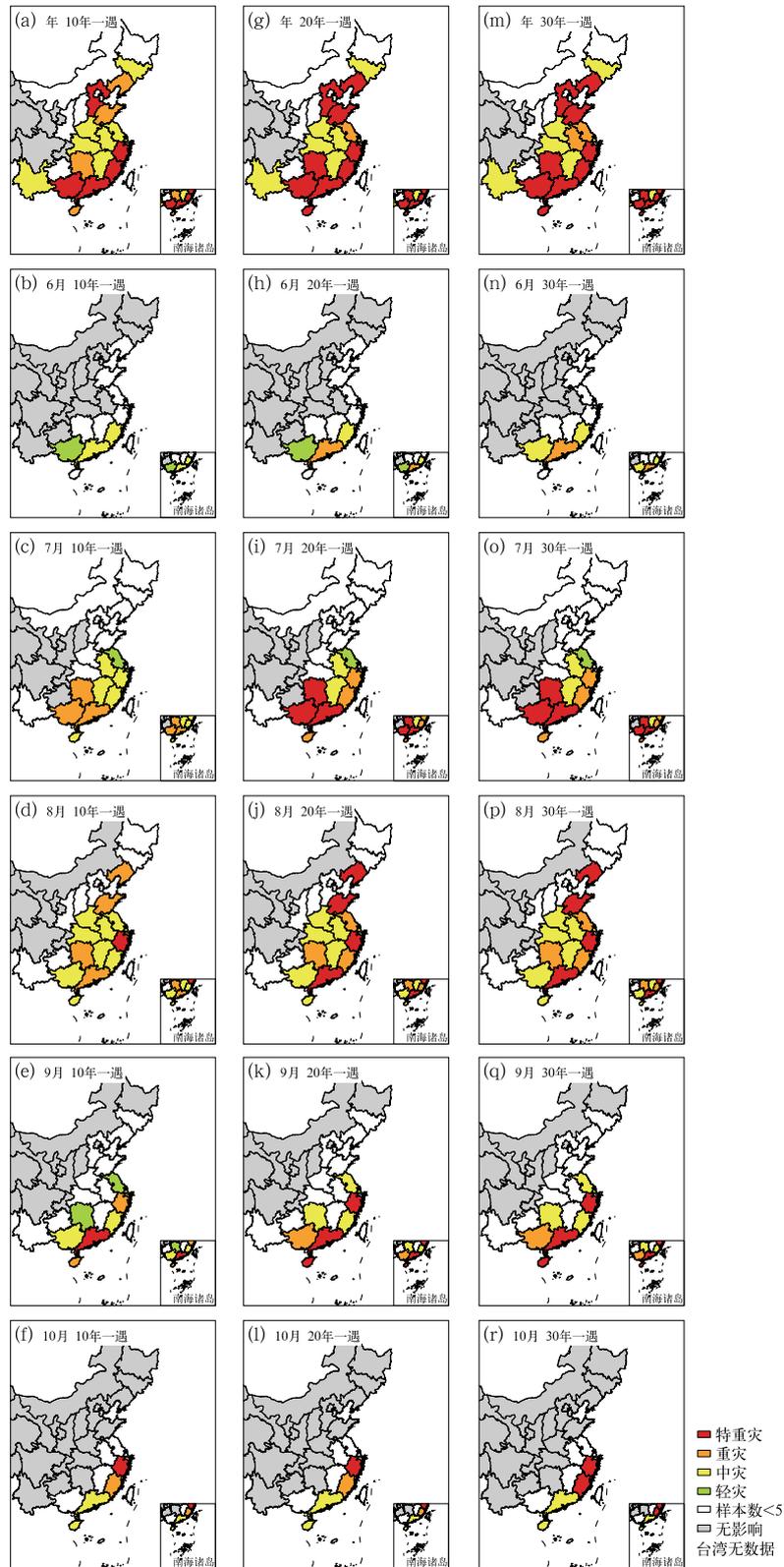


图 6 年(a,g,m)和 6—10 月(b~f,h~l,n~r)不同重现期:10 年一遇(a~f)、20 年一遇(g~l)、30 年一遇(m~r)台风直接经济损失等级分布

Fig. 6 Distribution of typhoon-caused direct economic losses grades under conditions with 10-year return period (a~f), 20-year return period (g~l) and 30-year return period (m~r) for the whole year (a, g, m) and each month from June to October (b~f, h~l, n~r) in China

化。8 月致灾台风个数多,损失最严重。与 1985—1994 年相比,后两个 10 年年内变化幅度大,且 9—10 月损失大于 6—7 月。防灾部署策略需根据台风灾害变化特点做相应调整,提高针对性。

(2) 浙江、广东、福建年台风直接经济损失最重,主要是由于沿海地区台风影响频繁且经济发达,经济价值总量高,因而损失大。就平均单次台风袭击的严重程度而言,浙江位列第一,其次为河北、广东。北方地区台风直接经济损失明显少于南方,但由于个别台风因伴随降雨强度高,加上总体基础设施抗台能力不强、承灾体脆弱性高也会产生极其严重的直接经济损失。各月台风直接经济损失时空差异大,主要受不同月份的台风盛行路径、登陆位置、频次、风雨潮等多因素的影响。中国各地区台风灾害损失具有明显的月际变化特征,大多呈单峰型,峰值多出现在 8 月,华南及浙江、上海为双峰型。

(3) 随着台风直接经济损失水平的提高,超越概率风险等级逐渐减小,发生中、高风险的地区逐渐减少。浙江在年直接经济损失 $\geq 50$ 亿元、 $\geq 100$ 亿元水平下,概率风险均为全国最高。8 月台风中、高风险发生省份均多于其他各月;各地超越概率最大值出现的月份不同,大多数地区出现在 8 月。在 10 年、20 年、30 年一遇三个风险水平下,浙江、广东、福建、广西年直接经济损失一直维持特重灾等级,其中浙江最重,重、特重灾省份除湖南、安徽外,大多分布在沿海,中灾省份则多集中在内陆。在 20 年、30 年一遇风险水平下,山东与辽宁的年和 8 月、河北年的台风直接经济损失也达特重等级,也应为防台重点关注地区。

本文仅对台风灾害直接经济损失进行分析,未来将进一步选择其他主要承灾体的灾情损失指标开展风险评估,探讨不同承灾体的台风风险格局差异,为针对性防灾减灾措施、保险方案制定提供参考。

**致谢:**感谢黄崇福教授、许崇育教授对方法应用和数据处理等方面的交流指导。

## 参考文献

陈敏,郑永光,陶祖钰,1999. 近 50 年(1949—1996)西北太平洋热带气旋气候特征的再分析[J]. 热带气象学报,15(1):10-16. Chen M, Zheng Y G, Tao Z Y, 1999. An analysis on tropical cyclones' climatic feature in the western North Pacific for 1949—1996 [J]. J Trop Meteor, 15(1):10-16(in Chinese).

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[J]. 自然灾害学报,18(1):64-73. Chen P Y, Yang Y H, Lei X T, et al, 2009. Cause analysis and preliminary hazard estimate of typhoon disaster in China[J]. J Nat Dis, 18(1):64-73(in Chinese).

丑洁明,班靖哈,董文杰,等,2018. 影响广东省的热带气旋特征分析及灾害损失研究[J]. 大气科学,42(2):357-366. Chou J M, Ban J H, Dong W J, et al, 2018. Characteristics analysis and assessment of economic damages caused by tropical cyclones in Guangdong Province[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):357-366(in Chinese).

杜青文,张迎新,1997. “96.8”特大暴雨的中尺度对流云团特征[J]. 气象,23(10):39-43. Du Q W, Zhang Y X, 1997. Mesoscale convective cloud cluster analysis of the torrential rain in August 1996[J]. Meteor Mon, 23(10):39-43(in Chinese).

高歌,许崇育,2015. 1961—2010 年中国十大流域水分盈亏量时空变化特征[J]. 地理学报,70(3):380-391. Gao G, Xu C Y, 2015. Characteristics of water surplus and deficit change in 10 major river basins in China during 1961—2010[J]. Acta Geograph Sin, 70(3):380-391(in Chinese).

郭君,黄崇福,艾福利,2015. 与月份及预警有关的广东省台风动态风险研究[J]. 系统工程理论与实践,35(6):1604-1616. Guo J, Huang C F, Ai F L, 2015. Study of the typhoon dynamic risk in Guangdong Province with respect to months and early warning [J]. Syst Eng-Theory Pract, 35(6):1604-1616(in Chinese).

胡波,严甲真,丁焯毅,等,2012. 台风灾害风险区划模型[J]. 自然灾害学报,21(5):152-158. Hu B, Yan J Z, Ding Y Y, et al, 2012. Risk zoning model of typhoon disasters[J]. J Nat Dis, 21(5):152-158(in Chinese).

黄崇福,2005. 自然灾害风险评估:理论与实践[M]. 北京:科学出版社:45-100. Huang C F, 2005. Risk Assessment of Natural Disaster: Theory & Practice[M]. Beijing: Science Press: 45-100(in Chinese).

雷小途,陈佩燕,杨玉华,等,2009. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法[J]. 气象学报,67(5):875-883. Lei X T, Chen P Y, Yang Y H, et al, 2009. Characters and objective assessment of disasters caused by typhoons in China[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):875-883(in Chinese).

李钢,邱新法,张眉,等,2014. 浙江省台风灾害直接经济损失评估模型[J]. 热带地理,34(2):178-183. Li G, Qiu X F, Zhang M, et al, 2014. Direct economic losses assessment of typhoon disaster in Zhejiang Province[J]. Trop Geogr, 34(2):178-183(in Chinese).

李祚泳,徐源蔚,汪嘉杨,等,2016. 基于投影寻踪回归的规范指标的气象灾情评估[J]. 应用气象学报,27(4):480-487. Li Z Y, Xu Y W, Wang J Y, et al, 2016. Evaluation model of meteorological disaster loss with normalized indices based on projection pursuit regression[J]. J Appl Meteor Sci, 27(4):480-487(in Chinese).

娄伟平,陈海燕,邱新法,等,2010. 基于粒子群优化神经网络的台风灾情定量评估[J]. 自然灾害学报,19(4):135-140. Lou W P, Chen H Y, Qiu X F, et al, 2010. Quantitative assessment of typhoon disaster based on particle swarm optimization and BP neural network[J]. J Nat Dis, 19(4):135-140(in Chinese).

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[J]. 气象,34(5):20-25. Ma Q Y, Li J Y, Wang X R, et al, 2008. A fuzzy synthetic evaluation model for typhoon disaster[J]. Meteor Mon, 34(5):20-25(in Chinese).

毛熙彦,蒙吉军,康玉芳,2012. 信息扩散模型在自然灾害综合风险评估中的应用与扩展[J]. 北京大学学报(自然科学版),48(3):513-518. Mao X Y, Meng J J, Kang Y F, 2012. Natural disasters risk assessment based on information diffusion model: application and improvement[J]. Acta Sci Nat Univ Pekinens, 48(3):

- 513-518(in Chinese).
- 钱燕珍,何彩芬,杨元琴,等,2001.热带气旋灾害指数的估算与应用方法[J].气象,27(1):14-18,24. Qian Y Z, He C F, Yang Y Q, et al,2001. An assessment of damage index for tropical cyclones[J]. Meteor Mon,27(1):14-18,24(in Chinese).
- 苏高利,苗长明,毛裕定,等,2008.浙江省台风灾害及其对农业影响的风险评估[J].自然灾害学报,17(5):113-119. Su G L, Miao C M, Mao Y D, et al,2008. Typhoon hazard in Zhejiang Province and risk assessment of its influence on agriculture[J]. J Nat Dis,17(5):113-119(in Chinese).
- 王秀荣,张立生,李维邦,2018.台风灾害综合等级评判模型改进及应用分析[J].气象,44(2):304-312. Wang X R, Zhang L S, Li W B,2018. Improvement and application analysis of the comprehensive grade evaluation model of typhoon disaster[J]. Meteor Mon,44(2):304-312(in Chinese).
- 魏章进,隋广军,唐丹玲,2012.台风灾情评估及方法综述[J].灾害学,27(4):107-113. Wei Z J, Sui G J, Tang D L,2012. An overview of assessment and approaches on typhoon disaster[J]. J Catastrophol,27(4):107-113(in Chinese).
- 温家洪,黄蕙,陈珂,等,2012.基于社区的台风灾害概率风险评估——以上海市杨浦区富禄里居委地区为例[J].地理科学,32(3):348-355. Wen J H, Huang H, Chen K, et al,2012. Probabilistic community-based typhoon disaster risk assessment—a case of Fululi Community, Shanghai[J]. Sci Geograph Sin,32(3):348-355(in Chinese).
- 温姗姗,翟建青, Fisher T, 等,2017. 1984—2014年影响中国热带气旋的经济损失标准化及其变化特征[J].热带气象学报,33(4):478-487. Wen S S, Zhai J Q, Fisher T, et al,2017. Variation of normalized economic losses from influential tropical cyclones in China for 1984—2014[J]. J Trop Meteor,33(4):478-487(in Chinese).
- 杨慧娟,李宁,雷飏,2007.我国沿海地区近54a台风灾害风险分析[J].气象科学,27(4):413-418. Yang H J, Li N, Lei Y,2007. Features of typhoon in southeast coastal regions of China in the recent 54 years[J]. Sci Meteor Sin,27(4):413-418(in Chinese).
- 殷洁,戴尔阜,吴绍洪,2013.中国台风灾害综合风险评估与区划[J].地理科学,33(11):1370-1376. Yin J, Dai E F, Wu S H,2013. Integrated risk assessment and Zoning of typhoon disasters in China[J]. Sci Geograph Sin,33(11):1370-1376(in Chinese).
- 尹宜舟,李焕连,2017.我国台风灾害年景预评估方法初探[J].气象,43(6):716-723. Yin Y Z, Li H L,2017. Preliminary study on pre-evaluation method of typhoon disaster in China[J]. Meteor Mon,43(6):716-723(in Chinese).
- 张娇艳,吴立广,张强,2011.全球变暖背景下我国热带气旋灾害趋势分析[J].热带气象学报,27(4):442-454. Zhang J Y, Wu L G, Zhang Q,2011. Tropical cyclone damages in China under the background of global warming[J]. J Trop Meteor,27(4):442-454(in Chinese).
- 张俊香,刘旭拢,宫清华,2012.近60年华南沿海登陆热带气旋特征和热带气旋巨灾灾情分析[J].热带地理,32(4):357-363. Zhang J X, Liu X L, Gong Q H,2012. Tropical cyclones landing on the coastal areas of South China and related catastrophes over the past 60 years[J]. Trop Geogr,32(4):357-363(in Chinese).
- 张容焱,徐宗焕,游立军,等,2012.福建热带气旋风雨空间分布特征及风险评估[J].应用气象学报,23(6):672-682. Zhang R Y, Xu Z H, You L J, et al,2012. Wind and rainfall features and risk assessment of tropical cyclone in Fujian[J]. J Appl Meteor Sci,23(6):672-682(in Chinese).
- 张永恒,范广洲,马清云,等,2009.浙江省台风灾害影响评估模型[J].应用气象学报,20(6):772-776. Zhang Y H, Fan G Z, Ma Q Y, et al,2009. The evaluation model of typhoon disaster influence on Zhejiang Province[J]. J Appl Meteor Sci,20(6):772-776(in Chinese).
- 赵飞,廖永丰,张妮娜,等,2011.登陆中国台风灾害损失预评估模型研究[J].灾害学,26(2):81-85. Zhao F, Liao Y F, Zhang N N, et al,2011. A pre-evaluation model for typhoon disasters in China[J]. J Catastrophol,26(2):81-85(in Chinese).
- 赵珊珊,高歌,任福民,等,2018.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,34(3):332-338. Zhao S S, Gao G, Ren F M, et al,2018. Method of typhoon disaster loss assessment for county-based units in Guangdong[J]. J Trop Meteor,34(3):332-338(in Chinese).
- 赵珊珊,任福民,高歌,等,2015.近十年我国热带气旋灾害的特征研究[J].热带气象学报,31(3):424-432. Zhao S S, Ren F M, Gao G, et al,2015. Characteristics of Chinese tropical cyclone disaster in the past 10 Years[J]. J Trop Meteor,31(3):424-432(in Chinese).
- 中国气象局,2005—2015.中国气象灾害年鉴[M].北京:气象出版社. China Meteorological Administration,2005—2015. Yearbook of Meteorological Disasters in China[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 中国气象局国家气候中心,1985—2014.全国气候影响评价[M].北京:气象出版社. National Climate Center of China Meteorological Administration,1985—2014. China Climate Impact Assessment[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 朱婧,陆逸,李国平,等,2017.基于县级分辨率的福建省台风灾害风险评估[J].灾害学,32(3):204-209. Zhu J, Lu Y, Li G P, et al,2017. Risk assessment of typhoon disasters in Fujian Province of each county[J]. J Catastrophol,32(3):204-209(in Chinese).
- Lu Y, Ren F M, Zhu W J,2018. Risk zoning of typhoon disasters in Zhejiang Province, China[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci,18(11):2921-2932.
- Sen P K,1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. J Amer Stat Assoc,63(324):1379-1389.
- Theil H,1992. A rank-Invariant method of linear and polynomial regression analysis[M]//In:Raj B, Koerts J. (eds) Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics. Advanced Studies in Theoretical and Applied Econometrics, Vol 23. Springer, Dordrecht.
- Wang Y J, Wen S S, Li X C, et al,2016. Spatiotemporal distributions of influential tropical cyclones and associated economic losses in China in 1984—2015[J]. Nat Hazards,84(3):2009-2030.
- Wen S S, Su B D, Wang Y J, et al,2018. Economic sector loss from influential tropical cyclones and relationship to associated rainfall and wind speed in China[J]. Global Planet Change,169:224-233.
- Xiao F J, Xiao Z N,2010. Characteristics of tropical cyclones in China and their impacts analysis[J]. Nat Hazards,54(3):827-837.