引文格式：张昆,黄全义,栗健,等. 中国沿海地区热带气旋危险性分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(2): 92-96. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.02.023

中国沿海地区热带气旋危险性分析

张　昆[1,2]，黄全义[3,4]，栗　健[3,4*]
（1. 华东师范大学地理科学学院 地理信息科学教育部重点实验室，上海 200241；
2. 自然资源部超大城市自然资源时空大数据分析应用重点实验室，上海 200241；
3. 清华大学 公共安全研究院，北京 100084；4. 清华大学 工程物理系，北京 100084）

摘　要：基于1980—2016年的西北太平洋热带气旋尺度资料，采用2种方法分析了热带气旋灾害的危险性。第一种方法根据热带气旋的风圈半径，用GIS生成了每个气旋的影响范围，对于登陆中国沿海的227个热带气旋，用叠加法得到了其影响范围与频次。第二种方法侧重热带气旋引发的风暴潮灾害，用潮位模型估算了热带气旋登陆时的潮位数据，提出了H3指标，该指标用潮位、风速和中心气压3个因子计算潮位点的风暴潮危险性，并根据H3指标得到了海岸线的危险性综合指标。分析结果表明，福建、广东两省受热带气旋的影响最为严重。37 a间，福建省有80%的面积（约9.8万km^2）受热带气旋影响的频次超过20次；广东省则有70%的面积（约12.6万km^2）受热带气旋影响的频次超过20次。受风暴潮危害大的海岸线主要位于广东、广西、福建、浙江四省，危险性指标在30以上的有广东的湛江市、茂名市、江门市、阳江市和珠海市；广西的北海市、防城港市和钦州市；福建的福州市以及浙江的台州市和温州市。

关键词：热带气旋；风圈半径；风暴潮；潮位；危险性指标
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）02-0092-05

Hazard Analysis of Tropical Cyclone in Coastal Areas of China

ZHANG Kun[1,2], HUANG Quanyi[3,4], LI Jian[3,4]
(1. Laboratory of Geographic Information Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
2. Key Laboratory of Spatial-temporal Big Data Analysis and Application of Natural Resources in Megacities, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200241, China;
3. Institute of Public Safety, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
4. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on tropical cyclone data in the northwest Pacific from 1980 to 2016, we used two methods to analyze the risk of tropical cyclone disasters. The first method used GIS to generate the influence range of each cyclone based on the wind circle radius. For the 227 tropical cyclones that landed on the mainland of China, the influence range and frequency were obtained by GIS overlay method. The second method focused on storm surge disasters caused by tropical cyclones, used tidal model to estimate the tide level at the time of tropical cyclone landfall, put forward a H3 index which calculating the storm surge risk by three factors of tide level, wind speed and central air pressure, and according to the H3 index, obtained a comprehensive index of coastline hazard. The analysis results show that Fujian and Guangdong Provinces are the most seriously affected by tropical cyclones. During the 37 years, 80% area of Fujian Province (about 98 000 km2) has been affected by tropical cyclone more than 20 times, 70% area of Guangdong Province (about 126 000 km2) has been affected by tropical cyclones more than 20 times. The coastlines which greatly affected by the storm surges are mainly located in the four provinces of Guangdong, Guangxi, Fujian and Zhejiang, and with risk indicators above 30 including Zhanjiang, Maoming, Jiangmen, Yangjiang and Zhuhai in Guangdong Province, Beihai, Fangchenggang and Qinzhou in Guangxi Province, Fuzhou in Fujian Province, Taizhou and Wenzhou in Zhejiang Province.

Key words: tropical cyclone, wind radius, storm surge, tide level, hazard index

热带气旋造成的损失严重，全球每年的热带气旋产生80~100个，其中38%的气旋生成于西北太平洋上，我国是受热带气旋影响最严重的国家之一，平均每年登陆的热带气旋约有7个[1]。热带气旋灾害危险性研究可分为数值模拟法与统计法，数值模拟通常采用专业的数值模型，如用于大风模拟的H*WIND[2]、用

收稿日期：2022-06-07。
项目来源：国家重点研发计划项目（2017YFC1405300）；国家自然科学基金青年科学基金资助项目（42007420）；中国博士后科学基金资助项目（2020M670284）。
第一作者简介：张昆（1973 —），博士，副教授，研究方向为GIS应用、空间选址、台风模拟，E-mail：kzhang@geo.ecnu.edu.cn。
通信作者：栗健（1989 — ），博士，助理研究员，研究方向为自然灾害损失评估和风险评估，E-mail：jianli@tsinghua.edu.cn。

于风暴潮模拟的MIKE21[3]、ADCIRC[4]等，对特定的热带气旋进行模拟，分析热带气旋致灾因子影响的强度、范围、时间等。统计法则采用特定的指标，对历史上发生的热带气旋进行危险性分析。如刘少军[5]等研究了热带气旋对我国橡胶树种植区的危害，采用气旋频次、平均风速、最大风速作为热带气旋危险性的指标，将3个指标相乘得出一个综合性指标。叶金玉[6]等利用1949—2016年西北太平洋上的热带气旋最佳路径集，采用GIS技术获取了2 225条气旋路径，并用气旋累计袭击次数来评价危险性。陈楷俊[7]等采用热带气旋强度、日最大降雨量、登陆频次、持续时间评价了1989—2017年粤东地区热带气旋的危险性。牛海燕[8]等采用灾次指标来评价热带气旋的危险性，即某地区某时段内热带气旋灾害发生的次数，根据灾情报告，某地区凡是有灾情发生，就记为1，无灾情发生的记为0。

现有的热带气旋灾害危险性研究多面向单个致灾因子，对于热带气旋大风和风暴潮灾害的综合危险性的研究还较少。本文基于历史热带气旋资料，采用空间分析和统计方法，研究了中国沿海地区热带气旋的危险性，试图找出其空间分布特征。第一部分是数据的收集与处理；第二部分采用GIS叠加法计算热带气旋的影响范围，从频次和面积2个方面对我国沿海六省一市进行了分析；第三部分用热带气旋登陆时的潮位，并结合风速和气压提出了一个风暴潮危险性指标，根据该指标计算了海岸线的风暴潮危险性，并给出了对应城市的排名。

1　数据来源与处理

1.1　资料来源

热带气旋数据来自中国气象局热带气旋资料中心的“卫星分析热带气旋尺度资料”[9]，该资料记录了1980—2016年西北太平洋上所有被卫星捕捉到的热带气旋。排除热带风暴（地面近中心最大风速17.2 m/s）等级以下的气旋，37 a间共有824个热带气旋。每个热带气旋由逐6 h的观测点构成，观测点数据包括气旋位置、中心气压、风速、尺度等信息。其中尺度信息记录的是34 nm/h的风圈半径。该资料以文本的格式提供，不能直接用GIS软件分析。本文采用R语言读取文本资料，提取日期、经纬度坐标、中心气压等信息。由于逐6 h的观测点过于稀疏，生成的缓冲区不能很好地表示热带气旋的影响范围，有些相邻观测点的缓冲区甚至是分离的，因此R代码读取资料的同时也对观测点进行了线性内插（内插原理见下一节），最后的结果导出为csv文件，再导入GIS做分析。

1.2　数据内插

本文采用线性内插，在2个相邻的观测点间再内插一个点。由于热带气旋的运行路线通常很长，短的有几百公里，长的有5 000多km（例如2022年的“梅花”），此时的路线是一条球面曲线，不是平面曲线，因此在内插时要考虑地球球面曲率，这里采用了球面线性内插，在两点间的大圆弧上进行内插。如图1所示，o是地球球心，$\boldsymbol{p}$，$\boldsymbol{q}$是球面上两点，$\boldsymbol{r}$是两点间大圆弧上的一点。

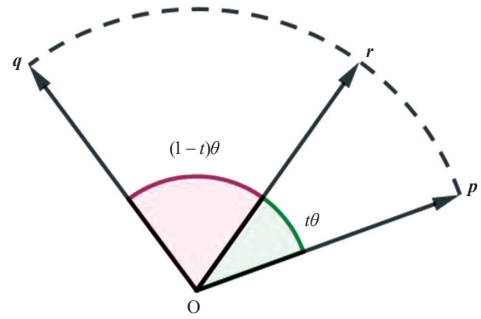


图1　球面线性内插示意图

将球面上的点看作向量，$\boldsymbol{r}$与$\boldsymbol{p}$，$\boldsymbol{q}$间的夹角分别是$t\theta$和$(1-t)\theta$，t是0，1之间的数，插值公式可以写为：

$$\boldsymbol{r}=a(t)\boldsymbol{p}+b(t)\boldsymbol{q} \tag{1}$$

其中a,b是t的函数，将公式（1）两边点乘$\boldsymbol{p}$，可得

$$\boldsymbol{p}\cdot r=a(t)\boldsymbol{p}\cdot\boldsymbol{p}+b(t)\boldsymbol{p}\cdot\boldsymbol{q} \tag{2}$$

$$\cos(t\theta)=a(t)+b(t)\cos(\theta) \tag{3}$$

同理，将公式(1)两边点乘$\boldsymbol{q}$，可得

$$\cos\left[(1-t)\theta\right]=a(t)\cos(\theta)+b(t) \tag{4}$$

由公式（2）（3）（4）可解出：

$$b(t)=\frac{\sin(t\theta)}{\sin(\theta)} \tag{5}$$

$$a(t)=\frac{\sin\left[(1-t)\theta\right]}{\sin(\theta)} \tag{6}$$

若已知$\boldsymbol{p}$，$\boldsymbol{q}$的经纬度坐标λ和φ，根据球面直角坐标与球面坐标之间的关系式（7），联立公式（1）就可求出内插点r的经纬度坐标。

$$\begin{cases}x=\cos(\varphi)\cos(\lambda)\\ y=\cos(\varphi)\sin(\lambda)\\ z=\sin(\varphi)\end{cases} \tag{7}$$

本研究的内插点$\boldsymbol{r}$选取$\boldsymbol{p}$，$\boldsymbol{q}$的中点，即$t=0.5$，内插点的气压、风速等属性取前后两点的平均值。内插计算采用R语言的geosphere包（midPoint命令），内插前后的对比如图2所示。

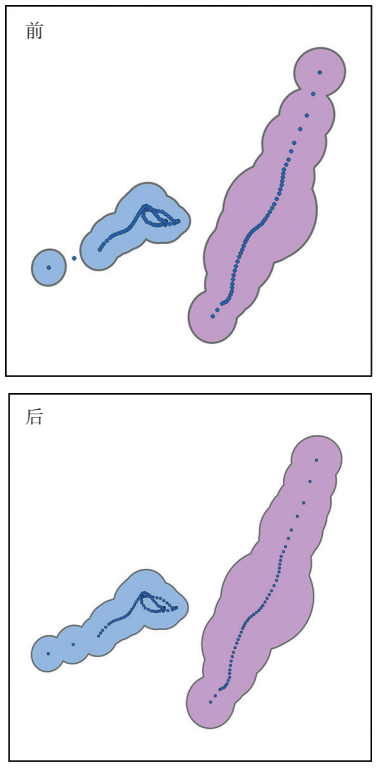


图2 热带气旋影响范围内插前（前）和内插后（后）的比较示意图

2 热带气旋的叠加分析

并不是所有的热带气旋都会影响到中国大陆沿岸，没有影响的气旋在本研究中不考虑。研究范围选择中国大陆沿海地区，不包括海南、中国台湾、中国香港和中国澳门。采用ArcPy对824个热带气旋进行批处理，用空间选择命令（Select Layer By Location）挑选出对我国大陆沿岸有影响的227个样例，即热带气旋的缓冲区与大陆存在交集。用Intersect analysis命令找出交集，然后转为栅格图层，再用Mosaic命令将栅格叠加。可能是由于数据量过大的缘故，一次叠加几百个栅格文件会出现报错，因此采用了分批处理的方案，每次叠加十几个图层，最后再把分批的结果叠加。

从叠加结果可以看到热带气旋的影响范围和频次（重叠次数），渤海湾是一个明显且自然的分界，将影响范围分为南北2个区域，北部区域的辽宁省受热带气旋影响较大；南部的影响范围集中在东南沿海，一些非沿海省份如安徽、江西也受到了范围较大的热带气旋影响；江苏、上海、浙江、福建、广东的全境都处于热带气旋的影响范围内；山东和广西有小部分内陆地区不受热带气旋的影响。用沿海省份的多边形数据裁剪Mosaic栅格数据，可以按省份统计。

表1列出了受影响较大省市的统计数据。从频次和面积看，江苏省是东南沿海受热带气旋影响最轻的；其次是上海市，气旋影响频次超过20次的面积约为2 172 km^2，虽然该面积不算大，但是面积占比却达到了31.5%，甚至高于广西省的25.3%。浙江省有57%的面积（约5.8万km^2）受热带气旋影响的频次超过20次；频次超过40次的面积却不到1%，只有0.26%。福建省则有80%的面积（约9.8万km^2）受热带气旋影响的频次超过20次，频次超过40次的面积几乎占全省面积的1/4；广东省有70%的面积（约12.6万km^2）受热带气旋影响的频次超过20次，频次超过40次的面积同样占全省面积的1/4。

表1 部分省市受热带气旋影响的频次与面积

省市	热带气旋频次 > 20		热带气旋频次 > 40	
	面积 / km^2	全省面积占比/%	面积 / km^2	全省面积占比/%
江苏	13.7	0.01	0	0
上海	2 172	31.5	0	0
浙江	58 775	57.2	273	0.26
福建	98 603	80.7	30 165	24.7
广东	126 122	70.9	44 890	25.2
广西	59 947	25.3	3 439	1.4

从叠加结果还可以看出一个非常明显的阶梯式结构，由沿海向内陆，热带气旋的影响频次逐渐递减。为了进一步分析，将Mosaic得到的栅格图层转为矢量点（76万多个），用ArcGIS Pro的Near命令计算每个矢量点到最近海岸线的距离，用R读取矢量点的属性表并用ggplot2绘制出图3的散点图，用geom_smooth命令的loess method进行局部多项式回归（local polynomial regres-

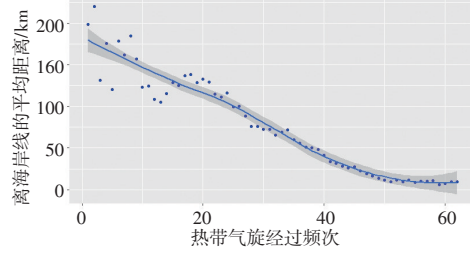


图3 热带气旋频次与距离关系图

sion fitting），拟合出曲线（灰色阴影是95%的置信度区间）。可以看到非常明显的趋势，热带气旋经过频次低的地方通常离海岸线较远，经过频次高的地方离海岸线近，这个规律在离海岸线100 km的范围内非常显著。

3　台风风暴潮危险性评价

3.1　危险性指标构建

热带气旋带来的风暴潮（台风风暴潮）会引起海面水位异常升高，严重威胁到沿海城市的人员和财产安全。因此热带气旋登陆时的潮位是衡量风暴潮危险性的重要指标。本文采用DHI MIKE来模拟历年的潮位数据；MIKE是丹麦水利研究所（danish hydraulic institue，DHI）开发的水动力模拟软件。其中的Tide Prediction of Heights工具可以预测潮位数据。本研究选取北起辽宁省丹东市、南至广西省东兴市的海岸线，在海岸线上均匀布设了1 224个潮位点，用MIKE模拟了每个潮位点从1980年4月1日0时至2016年12月31日0时逐6 h的潮位数据（共53 693条记录）。

图4绘制的是浙江温岭附近，2008年7、8月的潮位变化图；其中蓝点是模型计算出的潮位；从图中可以看出潮位呈现出涨落交替的规律，周期大约为半个月。最高潮位2.39 m，最低潮位—2.79 m；潮位的起伏相对于平均海水面基本上是对称的。热带气旋登陆时的潮位计算方法如图5所示。

编写ArcPy代码，调用ArcGIS Pro的Intersect命令找出每个热带气旋影响范围与海岸线的交集，并找出离该海岸线最近的热带气旋观测点，得到观测点的日期信息，例如图5中的1987年6月19日0时，然后根据日期信息和交集内潮位点的编号，到MIKE生成的潮位文件中查询对应潮位点的潮位。基于潮位数据，本文提出下面的公式来计算潮位点的风暴潮危险性。

$$H3=\frac{V\cdot e^{\text{tide}}}{P_0} \tag{8}$$

式中，H为危险性Hazard；数字3为危险性，由3个指标计算得到，这3个指标是风速V（m/s）；中心气压P_0（百帕）；潮位tide（m），潮位指标采用了指数的形式，目的是避免出现零值和负值，同时适当增大潮位因子的权重。因此，风速越大，气压越低，潮位越高，则风暴潮的危险性指数也越大，在现实中对应诸如大风吹倒树

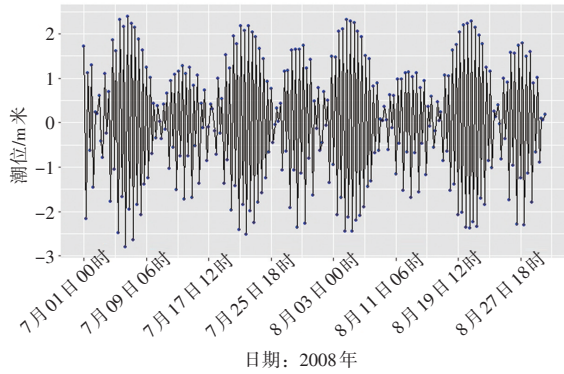


图4　潮位变化图

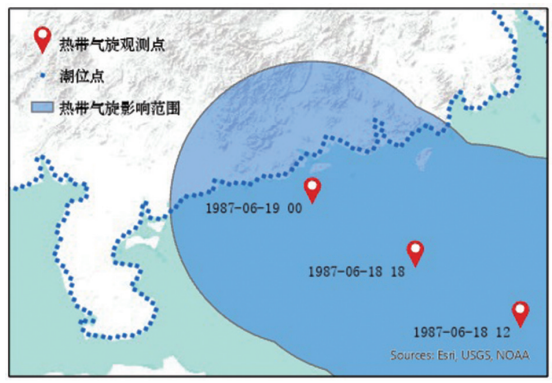


图5　热带气旋登陆时的潮位计算示意图

木、房屋，海水淹没码头、城镇、村庄的灾祸。

3.2　沿海台风风暴潮危险性分析

对于影响大陆的227个热带气旋，依次做上述的处理和计算，将每个潮位点的危险性指标累加起来。然后根据行政区将海岸线分段，再计算各段海岸线上的潮位点危险性指标的平均值，作为该海岸线的危险性综合指标。

根据综合指标，将海岸线按照自然断裂法（Natural Breaks）分为6个级别，依次从低到高。结果显示，从北到南，风暴潮危险性综合指标总体上呈现出递增的趋势，从浙江省开始，海岸线的危险性指标都大于17，属于4、5、6级别，并且呈现高低错落排列的格局。表2列出了危险性综合指标在30以上的沿海城市，共有11座城市，有5座城市来自广东省，并且其中的4座城市：湛江市、茂名市、江门市、阳江市排名前4位，危险性综合指标均在40以上；这4座城市在地理位置上也是彼此相邻的；广西有三座城市：北海市、防城港市、钦州市，危险性综合指标从高到低，并且也是地理位置彼此相邻。福建的福州市排名第8，危险性指标达35.2；浙江的台州市、温州市分别排名第9、第10位，这两座城市一北一南彼此相邻。总体上看，广东、广西两省受风暴潮的影响最大。

表2 风暴潮危险性综合指标大于30的城市

省份	城市	图上编号	危险性综合指标	指标排名
广东	湛江市	4	47.59	1
广东	茂名市	5	45.15	2
广东	江门市	7	44.73	3
广东	阳江市	6	44.54	4
广西	北海市	3	37.34	5
广东	珠海市	8	36.57	6
广西	防城港市	1	35.63	7
福建	福州市	9	35.20	8
浙江	台州市	11	35.12	9
广西	钦州市	2	33.28	10
浙江	温州市	10	31.07	11

4 结论与展望

热带气旋是一个复杂的自然现象，分析单个具体的热带气旋，可以采用数值模拟方法；分析众多的历史热带气旋，则需要用简化的方法。从GIS的角度看，热带气旋可以抽象为点、线、面对象，点是热带气旋的中心，线是热带气旋的移动路线，面是热带气旋的影响范围。从危险性的角度看，“面”是最重要的特征，其大小代表了热带气旋的影响级别。本文基于历史热带气旋的尺度资料，用球面线性内插和GIS技术生成了热带气旋的影响范围，对1980—2016年，登陆中国沿海地区的227个热带气旋进行了空间分析，得到了对应的影响范围与频次信息。从分析结果看，东南沿海的浙江、福建、广东、广西四省受热带气旋影响的范围大、频次高，其中福建、广东两省受影响最甚。论文也从风暴潮的角度分析了各海岸线的危险性，借助MIKE软件估算出了热带气旋登陆时的潮位，并提出一个计算风暴潮危险性的公式。从计算结果看，广东、广西两省的海岸线受风暴潮的影响最大。

本文的研究也存在不足之处，对热带气旋影响范围的建模不够精细，只考虑了某个风速的风圈半径；没有考虑风强度和降水因素[12]。所提出的热带气旋危险性指标，其适用性还需要在实践中检验。需要说明的是，危险性指标高，并不一定代表造成的损失大。虽然热带气旋的产生和登陆是不可避免的，但是人类可以做好防护工作，尽量减少损失。在后续的研究中，还需要进一步考察承灾体的防潮能力、易损性[11]，例如海堤建设、应急预案等，进一步从风险的角度分析热带气旋灾害。

参考文献

[1] 李纪生. 中国风暴潮概况及其预报[M]. 北京:中国科学技术出版社,1992

[2] Powell M D, Houston S H, Amat L R, et al. The Hrd Real-time Hurricane Wind Analysis System[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1998, 77: 53-64

[3] 陈洁,宋城城,李梦雅,等. 基于情景的浙江省玉环县台风风暴潮模拟与潜在危险性评估[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2016(3):125-135

[4] 何佩东,左军成,顾云碧,等. 普陀沿海风暴潮淹没危险性评估[J]. 海洋湖沼通报,2015(1): 1-8

[5] 刘少军,蔡大鑫,田光辉,等. 中国橡胶树种植区台风灾害危险性分区[J]. 广东农业科学,2020,47(9): 134-140

[6] 叶金玉,王舒凡,丁凤. 基于空间参数的中国沿海地区台风灾害暴露性分析[J]. 防灾科技学院学报,2019,21(1): 82-88

[7] 陈楷俊,陈艺仪,陈菁. 近30年粤东地区台风灾害风险评估与分析[J]. 水土保持研究,2019,26(3): 362-372

[8] 牛海燕,刘敏,陆敏,等. 中国沿海地区近20年台风灾害风险评价[J]. 地理科学,2011,31(6):126-130

[9] Lu X, Yu H, Yang X, et al. Estimating Tropical Cyclone Size in the Northwestern Pacific from Geostationary Satellite Infrared Images[J]. Remote Sensing,2017,9(7):728

[10] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J]. 自然灾害学报,2000,9(3):23-30

[11] 周小梅,杜清运,彭瑞. 浙江省台风灾害风险区域研究[J]. 地理空间信息,2018,16(8):12-14

[12] 周健,张宏建,王冰,等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性时空特征分析[J]. 地理空间信息,2021,19(10):40-43