

基于多致灾因子相似的热带气旋检索方法研究： 以风暴潮-海浪灾害预评估为例

栗 健^{1,2}, 方伟华^{1,2}, 张晓宁^{1,2}, 曹诗嘉^{1,2}, 杨幸美³, 刘 行^{4,5}, 孙 京^{4,5}

(1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 民政部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学 数学科学学院, 北京 100875; 4. 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266003; 5. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 热带气旋引起的风暴潮-海浪灾害成灾频率高、致灾强度大, 对我国沿海地区造成的人员和经济损失惨重。预评估阶段需要在灾前对研究区可能造成的损失等进行快速的综合判定。从历史热带气旋中检索出与目标热带气旋位置及各种致灾因子强度相似的热带气旋是快速、准确地预评估风暴潮-海浪灾害的重要方法。面向风暴潮-海浪灾害预评估, 提出了一种基于多致灾因子的相似热带气旋检索方法。用于相似检索的致灾因子数据包括: 从中国气象局西北太平洋热带气旋最佳路径数据集中提取并经处理得到的 1949~2013 年影响湛江市的 112 场热带气旋的路径中心点位置、中心气压、最大风速、最大风速半径及移动速度数据, 112 场热带气旋的模拟风场、风暴潮及海浪数据。首先, 利用相似离度方法对热带气旋进行路径相似性检索; 其次, 利用最优相似系数方法计算中心气压、最大风速半径、最大风速、移动速度、风场、风暴潮及海浪强度指标的相似系数进行一次检索; 然后, 根据风场、风暴潮及海浪模拟数据的获取情况, 分别基于路径-强度及风场-风暴潮-海浪综合相似性指标进行二次检索; 最终给出历史热带气旋的综合相似排序。以 2013 年尤特热带气旋为例, 利用上述方法检索了与其最为相似的 5 场历史热带气旋。该方法综合考虑了热带气旋路径及多种致灾因子的相似, 兼顾了检索的速度及质量, 是进行快速、准确的风暴潮-海浪灾害预评估的重要基础。

关键词: 热带气旋; 相似性; 路径-强度; 风暴潮-海浪; 损失预评估

中图分类号: P457.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)08-0049-12
doi: 10.11759/hyhx20151104001

热带气旋灾害是影响人类最为严重的自然灾害之一。评估热带气旋灾害的损失, 一般分为三个阶段进行, 分别是灾前预评估、灾中应急评估和灾后综合评估。预评估的目的是在灾前对研究区可能造成的损失等进行快速的综合判定, 以便在灾前采用最经济、有效的方法消除或减少灾害所带来的损失后果, 为灾害预防及应急决策提供支持^[1]。预评估阶段的特点有: (1) 预评估期间热带气旋尚未登陆, 因此评估方法必须充分考虑热带气旋路径-强度预报结果可能具有很大不确定性、路径-强度预报不断更新等; (2) 热带风暴潮数值计算结果的更新一般在时间上要落后于路径-强度预报, 因此经常不能及时获取风暴潮带来的沿岸淹没以及海浪数值模拟结果; (3) 预评估阶段影响的沿海区域有较大的不确定性, 其社会经济价值总量及脆弱性程度可能有较大的差异。

热带气旋灾害预评估的主要方法之一是利用回

归方法建立损失与致灾因子之间的经验公式, 根据实时及预报的致灾因子得出损失^[2-3]。但该方法对灾情数据数量及质量要求较高, 否则难以建立很好的灾损关系, 且得到的拟合关系存在区域局限性。另一种预评估方法是根据实际及预报路径, 采用相似路径对比方法, 找出与目标热带气旋路径相似的案例, 判定目标热带气旋大致的灾害强度, 并进一步结合历史案例损失情况, 对当前灾害损失进行大致判定。热带气旋的移动路径是各种影响热带气旋移动的物

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2016-01-27

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201305020)

[Foundation: Public science and technology research funds projects of ocean, No. 201305020]

作者简介: 栗健(1989-), 男, 黑龙江牡丹江人, 博士研究生, 主要从事台风灾害风险评估研究, 电话: 010-58805461, E-mail: jian.li@mail.bnu.edu.cn; 方伟华, 通信作者, 教授, 主要从事自然灾害风险评估研究, 电话: 010-58805461, E-mail: weihua.fang@bnu.edu.cn

理因子综合作用的结果^[4]。热带气旋的移动路径相似,在一定程度上反映了影响热带气旋移动的多个因子综合作用等效^[5]。相似热带气旋检索方法主要是利用距离及形状来反映路径位置的相似程度,例如海明距离、欧式距离和相似离度^[6]等。在路径预报中相似离度的方法稍好于其他方法^[7],相似离度方法定义了值系数和形系数,通过求和来计算相似程度,为热带气旋路径相似检索提供了理论支持。刘勇等^[4]对相似离度在热带气旋相似路径检索中的应用进行了实践,提出基于相似离度的热带气旋路径相似检索算法,能给气象员提供有利的预报信息。邹亮等^[8]、王远飞等^[9]基于 GIS(Geographic Information System)引入缓冲区半径来度量相似性,并预测热带气旋路径。

然而目前热带气旋相似性检索未考虑造成灾害损失的主要致灾因子的相似,仅仅是关于移动路径点位置的检索,利用检索出的相似热带气旋为目标热带气旋的走势提供预报信息。热带气旋造成的损失是多个致灾因子共同作用的结果,因此,在热带气旋灾情预评估阶段,除了移动路径外,对致灾因子的相似检索也至关重要。热带气旋的直接及次生致灾因子包括大风、降水、风暴潮、海浪、洪水及滑坡泥石流等^[10]。热带气旋的破坏力取决于其强度、风、雨、风暴潮及海浪等因素,其引起的大风、降水、登陆时台风的强度(中心最低气压和中心附近最大风速)以及登陆前 12 h 及 6 h 内的移速与人员伤亡、农田受淹、房屋倒损和直接经济损失具有显著的正相关^[11];热带气旋引起的风暴潮及灾害性海浪会导致港口、码头、堤坝、船只及养殖设施等遭受毁损,堤坝被冲垮后,海水漫滩使得沿岸房屋、农田、养殖等受淹而发生灾害^[12-13]。因此,在进行热带气旋相似检索时需充分考虑多种致灾因子的相似性。在风暴潮-海浪灾害预评估实践中,考虑到风场、风暴潮及海浪模拟相对于路径-强度预报结果(路径中心点位置、中心气压、最大风速及计算得到的最大风速半径、移动速度)的滞后性,在进行致灾因子相似检索时应分别计算路径-强度和风场-风暴潮-海浪的相似程度,以兼顾风暴潮-海浪灾害预评估的实时性和准确性。

湛江市为粤西地区最大的城市,也是我国的重要港口城市之一,位于西北太平洋和南海的西北岸,是受热带气旋影响较为严重的地区之一。海洋局“海洋灾情快速评估和综合研判系统研发与应用示范”项目中,选择广东省湛江市为示范区开展海洋灾害损失预评估试点研究。为此,本文旨在提出一种面向

风暴潮-海浪灾害预评估的基于多致灾因子的热带气旋路径及强度相似检索方法,并以影响湛江市的 2013 年尤特热带气旋为目标热带气旋为例进行示范评估。首先,基于影响湛江的历史热带气旋路径数据,利用相似离度方法对热带气旋进行路径相似性检索,保证相似热带气旋与目标热带气旋在影响范围上的相似性;其次,基于路径-强度及模拟风场、风暴潮、海浪数据,利用最优相似系数方法计算各致灾强度指标的相似系数,分别基于路径-强度及风场-风暴潮-海浪综合相似性指标进行二次检索,保证相似热带气旋与目标热带气旋在致灾强度上的相似性,最终给出历史热带气旋的综合相似排序,以期对目标热带气旋的风暴潮-海浪灾情做出合理的预评估。

1 数据

1.1 西北太平洋历史热带气旋最佳路径

本文主要采用中国气象局热带气旋最佳路径数据集^[14],内容包括西北太平洋 1949~2014 年的所有热带气旋,共计 2 233 场。该数据每隔 6 h 一个记录,详细记录该时刻热带气旋的信息,主要包括热带气旋编号、中心点经纬度、中心点时间(年、月、日、时)、中心气压(P_0)、最大风速(S_{MW})。另外,根据每 6 h 中心点的经纬度,本文还计算出了每 6 h 的热带气旋前移速度(V_t);最大风速半径(R_{MW})由中心气压与最大风速半径拟合关系得到(公式(1))。从该数据中提取出 1949~2013 年影响湛江市的 112 场热带气旋作为本文的历史相似检索样本。

$$R_{MW} = 18.04 \ln(1010 - P_0) + 110.22, R^2 = 0.8512 \quad (1)$$

1.2 湛江历史热带气旋模拟风场

本文利用参数风场进行热带气旋风场模拟。基于 1949~2013 年影响湛江市的历史热带气旋路径-强度数据,利用参数风场模型计算 3 s 极大风速风场(图 1)^[15]。

主要步骤为:(1)选用 Georgiou 梯度风场模型、Ishihara 边界层模型、ESDU 阵风因子模型,并进行地形修正及地表粗糙度修正;(2)为了对参数风场模型精度进行验证,模拟了典型热带气旋期间每个气象站点的风速时间序列,并将模拟的日极大风速与站点实测的日极大风速进行对比,总模拟效果 $R^2=0.8225$,达到了较高的精度^[15-16];(3)对上述 112 场热带气旋,以 30 min 为间隔模拟每场热带气旋的瞬时风场,空间网格大小为 30" (约 1 km)。

1.3 湛江历史热带气旋风暴潮数值模拟结果

本文利用 ADCIRC (Advanced Circulation Model) 海洋环流模式^[17]进行影响湛江市的历史风暴潮模拟(图 2)。所用输出结果为热带气旋引起的增水与天文潮叠加后的总水位, 时间分辨率为 30 min。为更精确地模拟关心区域的风暴潮并提高运算速度, 采用大小区域网格嵌套的办法(海浪模拟相同)。大区选取的计算区域为 $105.5^{\circ}\sim 121.2^{\circ}\text{E}$, $3.3^{\circ}\sim 26.4^{\circ}\text{N}$; 子区选取的计算区域为 $105.5^{\circ}\sim 116.5^{\circ}\text{E}$, $14.7^{\circ}\sim 23.1^{\circ}\text{N}$ 。同时采用分辨率渐变的方式对不同区域网格不同地段的分辨率进行了设置。在大区模型中, 湛江附近区域岸线分辨率为 $0.07^{\circ}\sim 0.1^{\circ}$, 约为 0.7~1 km, 以外的地区分辨率则为 1~2 km。整个大区域包含 9 331 个三角形网格节点, 18 068 个三角形。在子区域模型中, 湛江港关键区(湛江港岛屿岸线)分辨率为 0.003° , 约为 400 m; 湛江港海域附近岸线为 $0.003^{\circ}\sim 0.01^{\circ}$, 约为 0.4~1 km; 开边界分辨率设置为 $0.1^{\circ}\sim 0.3^{\circ}$, 约为 10~30 km。整个子区域包含 41 153 个三角形网格节点, 79 889 个三角形。水深数据来自于海军航保部购买的海图, 分辨率为 3"的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 高程数据(其中, 我国使用的 1985 国家高程基准比 SRTM 数据使用的 EGM96 大地水准面高出 35.7 cm^[18], 因此, 在使用数据时将 SRTM 高程数据减去 35.7 cm 作为模型所使用的高程数据)以及 ETOPO1(1-Minute Gridded Global Relief Data Collection)数据。其中 SRTM 数据仅取陆上数据, 港区附近取海图数据, 港区外取 ETOPO1 数据。两张海图分别对应海陵水道至抱虎角、湛江港港区; 4 组地形数据的分辨率虽然不同, 但是将所有点融合到一起的结果是互相匹配的。

本文共计算了 1949~2013 年 112 场经过湛江附近的热带气旋, 为了验证模式模拟结果, 利用历史上 8 场对湛江造成巨大影响的热带气旋在湛江站的实测增水与模拟值对比。其中 1963~1980 年的 5 场热带气旋实测增水数据来自于陈奕德等^[19], 199615 实测增水数据来自于张文静等^[20], 2014 年的 2 场来自于国家海洋局南海预报中心。验证结果如表 1 所示。

绝对标准误差为 47 cm, 相对标准误差为 22%。从对比结果看, 绝大多数情况下用模型模拟的最大增水结果比较好, 但在某些情况下模型结果会有较大误差, 这可能主要与使用的 R_{MW} 的经验模型^[21]有关。在经验模型中, R_{MW} 被完全视为 P_0 的函数, 而在实际情况下, 虽然统计结果表明 R_{MW} 随 P_0 降低而缩小, 但针对特定的热带气旋来说, 可能会有较大的偏差。

表 1 8 场历史热带气旋实测与模拟最大增水对比

Tab. 1 Comparison between the observation and simulation of maximum storm-surge values for eight historical tropical cyclones

热带气旋 编号	增水(cm)		绝对误差 (cm)	相对误差 (%)
	实测	模拟		
196311	266	251	15	6
196508	240	350	110	46
197220	215	242	27	13
197406	242	221	21	9
198007	484	462	22	5
199615	150	210	60	40
201409	256	262	6	2
201415	435	422	13	3

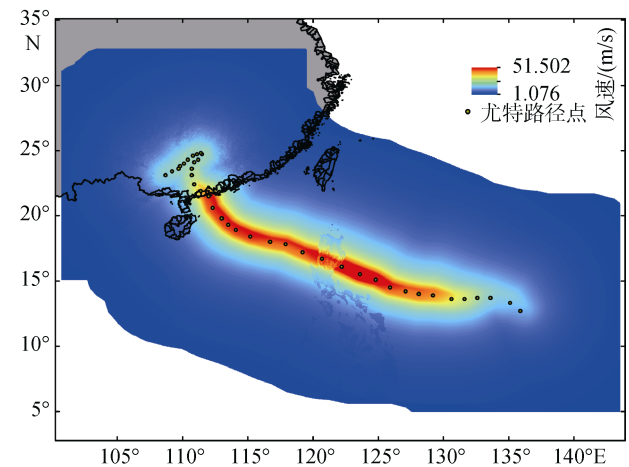


图 1 201311 号热带气旋尤特 3 s 极大风速过程最大风场
Fig. 1 Footprint of the surface peak gust (3s) wind speed of the tropical cyclone Utor

1.4 湛江历史热带气旋海浪数值模拟结果

本文利用 SWAN^[22]模型模拟影响湛江市的历史海浪, 总共模拟 112 场热带气旋, 输出变量为有效波高(图 3)、平均周期和波向。利用输出热带气旋过程中每 1 h 的有效波高来构建海浪危险性指标。大区选取的计算区域为 $15^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$, $110.5^{\circ}\sim 118.5^{\circ}\text{E}$, 空间步长为 $0.083^{\circ}\times 0.083^{\circ}$; 子区选取的计算区域为 $21^{\circ}\sim 21.2^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 110.5^{\circ}\text{E}$, 空间步长为 $0.003^{\circ}\times 0.003^{\circ}$ 。水深数据与风暴潮使用数据相同, 实际模拟时, 在原海图水深的基础上加上当地的平均海平面及不同的设计水位, 以反映比较真实的海浪变化。

本文模型参数设置与宗芳伊等^[23]相同。宗芳伊等使用 SWAN 模式非结构三角网格对嵊泗列岛浪场模拟结果进行了验证。使用的实测数据为 Alec Electronics Co Ltd 仪器公司的 alec 波浪仪在嵊泗附近海域于

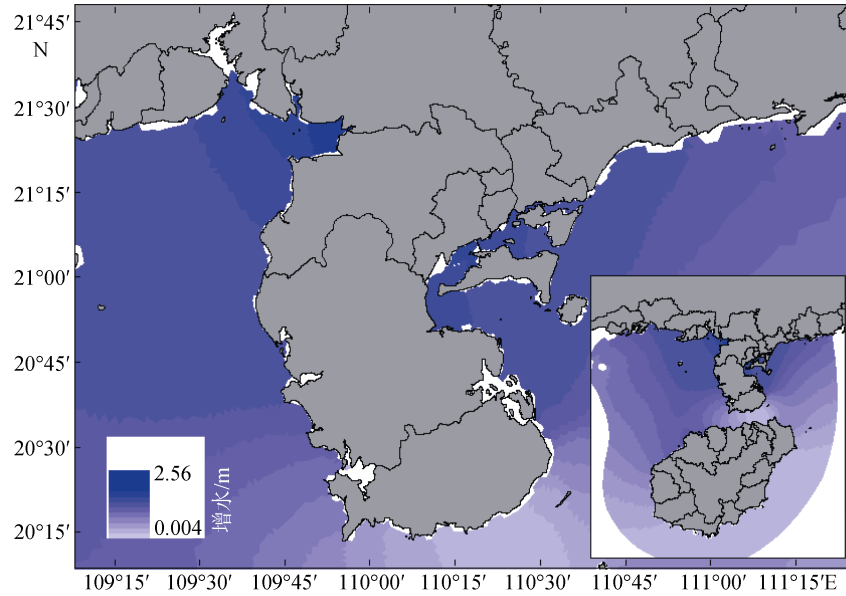


图2 201311号热带气旋尤特模拟最大增水图

Fig. 2 Maximum simulated storm surge of Utor

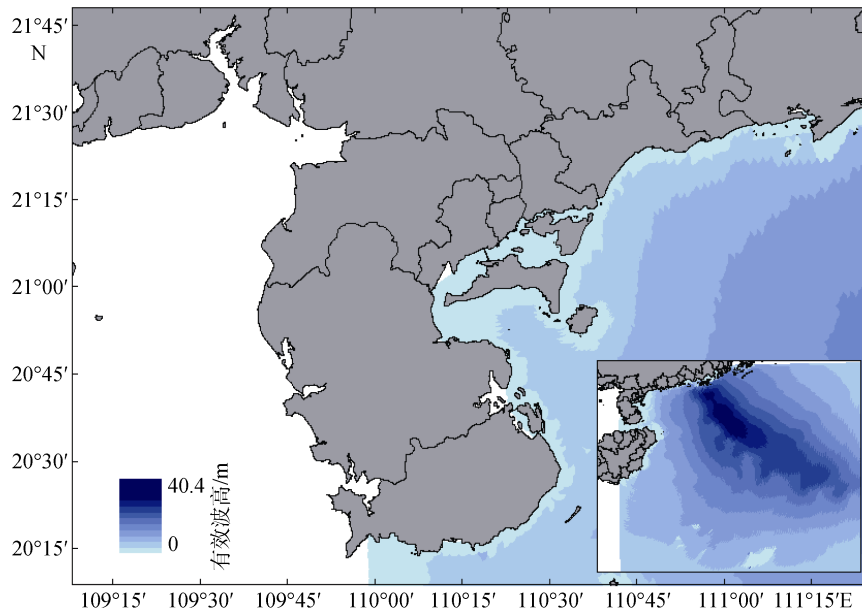


图3 201311号热带气旋尤特模拟最大有效波高图

Fig. 3 Maximum simulated significant wave height of Utor

2012年4月份实际测量的原始数据,数据真实可信。通过有效波高观测值和模拟值对比分析,发现非结构网格能够较好地反映海域波浪的变化情况,并且局部加密的非结构三角网格得到的平均绝对误差和均方根误差最小。

1.5 湛江市历史热带气旋海洋灾害损失

本文所用历史热带气旋海洋灾害损失数据由1989~2013年《中国海洋灾害公报》^[24]直接经济损

失数据整理得到,其中影响湛江市的历史热带气旋灾害共13条。为使得不同年份的直接经济损失数据具有可比性,对不同年份的直接经济损失按照物价水平、人口和承灾体进行折算归一化至2000年(表2)。

归一化方法为,首先基于2014年《中国统计年鉴》^[25]的人均地区生产总值和指数、分地区年末人口和地区生产总值(Gross Regional Product, GRP)和

指数数据, 构建通货膨胀因子(100/GDP 平减指数)、人口因子(2000 年省人口/当年省人口)及 GRP 因子(2000 年省人均 GRP/当年人均 GRP)分别作为物价水

平、人口和承灾体归一化指标; 其次将直接经济损失与各归一化因子相乘, 即得到归一化至 2000 年的直接经济损失。

表 2 1989~2013 年 13 场影响湛江市的热带气旋直接经济损失数据(归一化至 2000 年)

Tab. 2 Direct economic loss caused by 13 tropical cyclones in Zhanjiang during 1989–2013 (Normalized to the year 2000)

热带气旋编号	热带气旋名称	通货膨胀因子	人口因子	GRP 因子	直接经济损失(亿元)	
					归一化前	归一化后
199515	SIBYL	1.0801	1.2583	1.5667	13.2200	28.1510
199516	TED	1.0801	1.0870	1.3427	0.2000	0.3153
200107	YUTU	0.9799	0.9896	0.9196	0.8000	0.7134
200217	VONGFONG	0.9742	0.9801	0.8454	0.9400	0.7588
200309	IMBUDO	0.9497	0.9642	0.7157	21.5400	14.1322
200315	DUJUAN	0.9497	0.9642	0.7157	22.8700	14.9876
200608	PRAPIROON	0.8230	0.9153	0.4503	77.0570	26.2397
200916	KOPPU	0.7087	0.8531	0.3230	24.0320	4.6921
201003	CHANTHU	0.6627	0.8277	0.2847	30.6200	4.7819
201121	NESAT	0.6129	0.8227	0.2507	31.0600	3.9569
201207	DOKSURI	0.5985	0.8157	0.2354	0.0120	0.0014
201209	VICENTE	0.5985	0.8157	0.2354	4.2946	0.4851
201214	KAI-TAK	0.5985	0.8157	0.2354	18.2335	2.0055

2 方法

2.1 评估目标空间范围选择

为提高相似检索算法的效率, 在进行相似路径检索时首先要确定可能对评估目标造成影响的历史热带气旋集合, 集合外的热带气旋不参与相似检索。根据邓睿^[26]构建的 10 级风圈模型, 统计得到 1949~2014 年西北太平洋近 95%(94.7%)的热带气旋路径点 10 级风圈半径在 200 km 以下, 因此本文以 200 km 作为热带气旋的最大影响范围。

若评估目标为目标热带气旋所造成的总损失, 则以登陆点在目标热带气旋预报登陆点 200 km 范围内的历史热带气旋作为相似检索对象; 若评估目标为目标热带气旋对某个县造成的损失, 则需要确定一个基准点作为热带气旋登陆参考点(Central Reference Point, CREF), CREF 一般选择位于研究区光滑后的海岸线的中间位置, 并根据沿海海岸线及岛屿分布情况进行适当调整^[27], 以登陆点在该县 CREF 200 km 范围内的历史热带气旋作为相似检索对象; 若评估目标为目标热带气旋对某个地区(市)造成的损失, 则以地区(市)内所有沿海县历史热带气旋样本的并集作为相似检索对象, 图 4 为湛江市的历史相似检索热带气旋, 共计 112 场。

2.2 相似路径时空范围界定

热带气旋自洋面生成到登陆后衰减, 其生命史往往可以持续几天, 但是对其引起的风暴潮-海浪灾害而言, 靠近海岸的路径点才是成灾的关键路径, 所以全路径完整的情况下, 往往将登陆前后一定范围内的路径点作为目标路径。针对风暴潮-海浪灾害, 本文采用登陆点以前 350 km 和登陆点以后 100 km 范围内的路径作为相似检索路径, 如图 5 所示为尤特的历史热带气旋相似检索路径。

2.3 考虑路径中心点位置的相似检索

相似检索的第一步是根据目标热带气旋检索范围内路径中心点经纬度坐标, 检索出与目标热带气旋位置相似的前 10 场历史热带气旋, 相似系数以 S_{XY} 表示。路径空间相似检索通过计算两场热带气旋路径的相似离度来完成, 相似离度计算方法如下^[6]。

两条曲线纵向上的差异可以分为数值上的差异和形状上的差异^[4]。假设有热带气旋路径 i 和 j , 分别有 n 个路径点。纵向数值差异表示两条路径在各个路径点对应的纵线上的绝对高度差值的总体平均, 值越小表示两条曲线越接近, 其计算公式为

$$D_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |y_{ik} - y_{jk}| \quad (2)$$

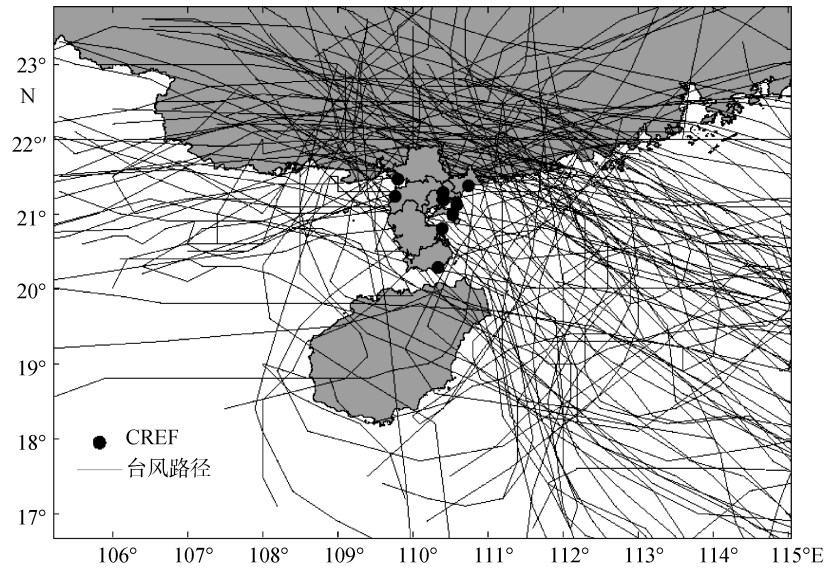


图 4 用于湛江市风暴潮-海浪损失预评估的历史(1949~2013 年)热带气旋集合

Fig. 4 Historical tropical cyclones used for rapid potential loss assessment of storm surge and wave disasters in Zhanjiang City (1949–2013)

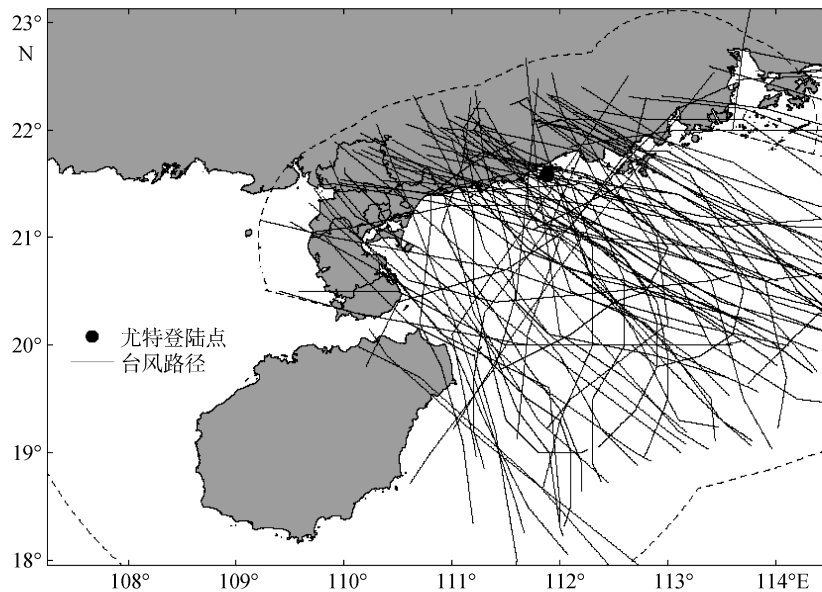


图 5 影响湛江市的尤特风暴潮-海浪损失预评估的历史(1949~2013 年)热带气旋相似路径时空范围

Fig. 5 Spatial and temporal range of historical tropical cyclones (1949–2013) that affected Zhanjiang City, used for storm surge and wave disaster rapid potential loss assessment caused by Utor

其中 M 表示两条曲线与纵线共同相交的次数, 即路径点个数, y_{ik} 和 y_{jk} 分别为路径 i 和 j 在第 k 条纵线上的高度值。 D_{ij} 为两样本的海明距离, 它反映了两样本数值上的差异程度。

两条曲线的相似除了考虑它们在对应点数值上较为相似外, 还应该考虑两条曲线形状上的相似。路径 i 和路径 j 在纵向上的形状差异即为两个样本距平的海明距离, 它是离散程度的反映, 值越小说明两

条曲线形状越相似。其计算公式为

$$S_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |(y_{ik} - y_{jk}) - E_{ij}| \quad (3)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (y_{ik} - y_{jk}) \quad (4)$$

其中 E_{ij} 为两样本对应点差值的平均值, S_{ij} 反映两样本对应点差值与差值均值的离散程度, 即形状上的差异。相似离度可以综合判断两条曲线数值相似和

形状相似的程度^[6], 定义为

$$C_{ij} = \frac{1}{2}(D_{ij} + S_{ij}) \quad (5)$$

相似离度 C_{ij} 为 D_{ij} 和 S_{ij} 的简单平均, 值越小两样本越相似。

理论上, 需要计算两条路径横、纵两个方向的相似离度, 然后综合判断它们的相似性。但是从自然坐标系的角度看, 如果能够按照一定的规则确定目标热带气旋和被检索热带气旋路径曲线的特殊位置点, 只需在一个方向计算相似离度。对于目标热带气旋上的每个路径点, 其对应的特殊位置点为被检索热带气旋路径点中与其距离最近的点, 对应路径点之间的距离作为偏差的绝对值。偏差的方向以目标热带气旋控制点为原点的自然坐标系来计算: 以该控制点到下一个路径点的方向为 y 轴、法向为 x 轴, 被检索热带气旋对应控制点若位于该坐标系的一、二象限, 则偏差为负值, 反之为正。

2.4 考虑路径-强度特征指标的相似检索

根据预报路径气象特征指标进行的相似检索, 主要对 P_0 、 S_{MW} 、 R_{MW} 和 V_t 4 个指标进行检索。致灾因子强度相似性检索方法可采用以“距离”为核心的相似量, 如海明距离、相似离度等, 但它们在样本平均值相同时将无法进行相似判断; 还可采用以相似系数或相关系数同某种“值”系数的积构成的具有“形、值”综合相似判别能力的综合相似量, 但由于相似系数、相关系数本身存在的不足, 导致综合相似量有时也无法进行正确的相似选择。而最优相似系数较好的解决了上述问题^[28]。根据两场热带气旋对应路径点的指标值计算最优相似系数, 分别以 S_{P_0} 、 $S_{S_{MW}}$ 、 $S_{R_{MW}}$ 和 S_{V_t} 表示, 从而确定其相似程度。最优相似系数计算方法如下:

最优相似系数由形系数和值系数构成。以 F 表示最优相似系数 B 的“形”系数, 其表达式为

$$F_{ij} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^m |(x_{ik} - \bar{x}_i) - (x_{jk} - \bar{x}_j)|}{\sum_{k=1}^m (|x_{ik} - \bar{x}_i| + |x_{jk} - \bar{x}_j|)} \quad (6)$$

其中 x 代表因子的数值, m 为路径点个数, i, j 为两个样本, F_{ij} 的值域为 $[0, 1]$, 当其为 1 时两样本位相、振幅最相似, 即完全相等。当 F_{ij} 为 0 时, 为不相似。

“值”系数 V_{ij} 定义为

$$V_{ij} = e^{-D_{ij}} \quad (7)$$

$$D_{ij} = \frac{|\bar{x}_i - \bar{x}_j|}{\sum_{k=1}^m (|x_{ik} - \bar{x}_i| + |x_{jk} - \bar{x}_j|) / m} \quad (8)$$

其中 V_{ij} 的值域为 $(0, 1]$, 当其为 1 时两样本平均值相等, V_{ij} 越小, 两样本平均值差异越大。

综合考虑形与值的影响, 最优相似系数取形、值系数的平均, 则 B_{ij} 为

$$B_{ij} = \frac{1}{2}(F_{ij} + V_{ij}) \quad (9)$$

B_{ij} 的值域为 $[0, 1]$, 当其为 1 时两样本完全重合。

2.5 考虑风暴潮-海浪特征指标的相似检索

风场、风暴潮、海浪模拟数据均为面状数据, 需要构建合理的致灾强度指标作为相似检索的指标。 E_{IK} (integrated kinetic energy) 与大风、风暴潮及海浪造成的损失具有较强的相关性^[29]。利用每 30 min 的 3 s 极大风速瞬时风场数据中风速大于 8 级大风 (17.2 m/s) 的网格风速值计算每个 30 min 路径点的 E_{IK} 值, 作为风场的特征指标 (一般认为 8 级以上大风可造成损失), E_{IK} 的计算方法为

$$E_{IK} = \int_V \frac{1}{2} \rho U^2 dV \quad (10)$$

其中积分范围 V 为某时刻路径点周围 8° 的方形范围, 厚度为 1 m, 网格大小为 1 km; ρ 为空气密度, 取默认值为 1 kg/m^3 ; U 为 1 km 网格的风速值。

由实时-预报的路径及强度数据得到每个 30 min 路径点的瞬时风场并计算出 E_{IK} 及其最优相似系数, 以 S_{wind} 表示。

风暴潮、海浪的影响强度及范围都与其致灾强度有较强相关, 每个路径点的风暴潮/海浪特征指标计算公式为

$$I_{TW} = \sum_{i=1}^N S_{S_i} \quad (11)$$

其中 S_{S_i} 代表当前路径点所处时刻每个网格点的风浪有效波高或风暴潮增水值, 计算风暴潮特征值表时, N 为陆地网格数, 计算海浪特征指标时, N 为所有模拟网格数。

由目标热带气旋风暴潮及海浪的模拟数据, 则可以进一步计算风暴潮及海浪特征指标的最优相似系数, 分别以 S_{tide} 和 S_{wave} 表示。

2.6 多指标相似性综合方法

2.6.1 综合相似性指标构建

热带气旋移动路径的相似程度以相似离度表示,

热带气旋各强度特征的相似程度以最优相似系数表示。致灾强度综合的相似性排序通过构建综合相似性指标来实现, 综合相似性指标计算方法为

$$I_{ij} = \sum_{k=1}^n \lambda_k B_k \tag{12}$$

其中 I 为综合相似系数, B 为最优相似系数, n 为所选强度指标的个数, λ 为各相似系数的权重。

2.6.2 相似系数权重确定

相似系数权重确定采用参数调节方法, 权重的取值范围为 0.05~0.7, 取值间隔为 0.01, 各组权重之和为 1, 从各权重值的组合中确定一组权重, 使得综合相似系数的排序与实际灾情相似排序最为一致。不同热带气旋的影响范围不同, 由影响范围造成的灾情差异可由路径的相似离度衡量, 因此利用相似离度对实际灾情的相似程度进行了修正, 构建的实际灾情相似指标为

$$I_{\text{loss}} = \left(1 - \frac{|L_i - L_j|}{\max(|L_i - L_j|)} \right) S_{XY}, \quad i \neq j \tag{13}$$

其中 I_{loss} 为实际灾情相似指标, L_i 、 L_j 为热带气旋 i 、 j 的直接经济损失。

利用秩相关系数表示综合相似系数排序与灾情相似排序的一致性, 秩相关系数计算方法为

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \tag{14}$$

式中 r_s 为秩相关系数, n 为数据个数, d_i 为两组变量的

次序差值。综合相似系数权重确定及验证结果见表 3, 综合相似系数权重结果见表 4。

表 3 综合相似系数权重确定及验证秩相关系数表
Tab. 3 Calibration and validation of similarity coefficient weights based on multiple parameters using rank correlation

	权重确定	秩相关系数
	秩相关系数	均值
路径-强度特征指标	0.85	0.43
风场-风暴-海浪特征指标	0.70	0.41

表 4 综合相似系数权重表
Tab. 4 Similarity coefficient weights based on multiple parameters

相似系数	权重
S_{RMW}	0.14
S_{SMW}	0.14
S_{p_0}	0.62
S_{Vt}	0.10
S_{wind}	0.28
S_{wave}	0.05
S_{tide}	0.67

3 相似热带气旋检索案例

以 201311 号热带气旋尤特为目标热带气旋, 首先进行路径相似检索, 得到与其路径最为相似的前 10 场热带气旋(图 6)。利用强度指标进行二次检索, 相应的单指标相似系数结果见表 5。以路径-强度及

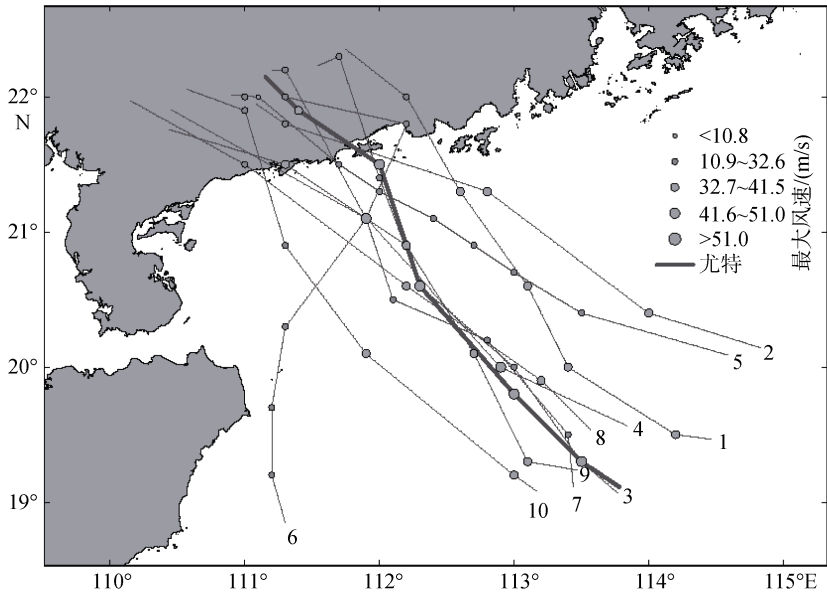


图 6 以尤特为目标热带气旋的前 10 场路径相似热带气旋
Fig. 6 Top 10 tropical cyclones with tracks substantially similar to Utor

表 5 以尤特为目标热带气旋的单指标相似系数表

Tab. 5 Similarity indices of 10 tropical cyclones based on a single parameter of Utor

热带气旋编号	S_{XY}	S_{RMW}	S_{SMW}	S_{p_0}	S_{V_t}	S_{wind}	S_{wave}	S_{tide}
198522	0.9363	0.6388	0.6827	0.5741	0.6578	0.6391	0.8189	0.6186
199303	0.9321	0.7240	0.7274	0.6980	0.4018	0.7671	0.7556	0.7063
199327	0.9181	0.6295	0.7188	0.6346	0.6266	0.7078	0.6810	0.5661
200309	0.9116	0.6263	0.7086	0.7198	0.2072	0.7678	0.6733	0.6339
196724	0.9060	0.3956	0.3573	0.2958	0.5520	0.3080	0.6311	0.6621
200008	0.9049	0.3080	0.2570	0.2274	0.4045	0.2428	0.8524	0.5350
198010	0.9040	0.2891	0.3083	0.2071	0.1688	0.1827	0.7565	0.6505
197525	0.9008	0.5134	0.5295	0.5114	0.5454	0.5360	0.6635	0.4247
200608	0.8971	0.4541	0.4780	0.4329	0.5580	0.4898	0.7943	0.5700
197208	0.8933	0.6358	0.7718	0.4973	0.6705	0.5842	0.7286	0.5679

风场-风暴潮-海浪强度综合相似性指标进行二次检索的结果如表 6 和表 7 所示。根据两组致灾强度指标检索出的前 5 场热带气旋一致,但顺序略有不同。因此实际应用时,在未获得风场、风暴潮及海浪模拟数据的情况下,可采用路径-强度指标代替风场-风暴潮-海浪强度指标进行相似检索。

表 6 以尤特为目标热带气旋的路径-强度综合相似系数二次检索排序表

Tab. 6 Similarity indices of five tropical cyclones based on the track-intensity parameters of Utor

相似排序	热带气旋编号	热带气旋名称	I
1	199303	KORYN	0.6938
2	199327	IRA	0.6632
3	200309	IMBUDO	0.6584
4	197208	ORA	0.6401
5	198522	TESS	0.6339

表 7 以尤特为目标热带气旋的风场-风暴潮-海浪综合相似系数二次检索排序表

Tab. 7 Similarity indices of five tropical cyclones based on the windfield-storm surge-wave parameters of Utor

相似排序	热带气旋编号	热带气旋名称	I
1	199303	KORYN	0.7336
2	200309	IMBUDO	0.6898
3	198522	TESS	0.6388
4	199327	IRA	0.6297
5	197208	ORA	0.5841

4 结论及讨论

本文提出了一种基于实时-预报和历史热带气旋路径位置、强度、风场、风暴潮及海浪特征指标的

热带气旋相似检索方法,得到的主要结论如下:

1) 从热带气旋预报初期至登陆阶段,可以根据计算得到的路径-中心点位置相似系数、路径-强度特征指标相似系数、风场-风暴潮-海浪特征指标相似系数进行两次检索得到历史热带气旋相似排序,这是风暴潮-海浪灾害预评估的重要基础,基于此排序结合历史热带气旋灾情,可以在灾前的不同阶段对目标热带气旋可能造成的损失进行快速预评估;

2) 本方法既注重热带气旋路径的空间相似,也考虑到大风、风暴潮及海浪等主要致灾因子对于灾情的影响,根据模拟风场、风暴潮及海浪数据的获取情况,给出了两种进行二次检索的致灾强度指标组合,兼顾了预评估的实时性与准确性。

未来研究中,为提高预评估精度,可在以下方面改进:

1) 在利用本方法得到的相似排序来进行风暴潮-海浪灾害预评估时,由于需要利用不同年代相似热带气旋的损失数据,因此需要考虑不同年代承灾体脆弱性的变化;本文确定综合相似系数权重时,仅使用了 1989~2013 年湛江的 13 场热带气旋灾害的损失数据,需要更多的灾害损失数据改进权重系数。

2) 相似检索算法需要多种输入数据,包括实时-预报路径数据、模拟风场、风暴潮及海浪数据,提高模拟数据的质量将提高预评估结果的准确性。

参考文献:

- [1] 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, (2): 135-141.
Liu Shaojun, Zhang Jinghong, He Zhengwei, et al. Application of improved matter-element extension model

- to typhoon disaster pre-assessment[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, (2): 135-141.
- [2] 赵飞, 廖永丰, 张妮娜, 等. 登陆中国台风灾害损失预评估模型研究[J]. 灾害学, 2011, 26(2): 81-85.
Zhao Fei, Liao Yongfeng, Zhang Nina, et al. A pre-evaluation model for typhoon disasters in China [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(2): 81-85.
- [3] 于小龙, 潘伟然, 张国荣, 等. 福建省台风灾害直接经济损失预评估模型[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, 50(6): 1047-1052.
Yu Xiaolong, Pan Weiran, Zhang Guorong, et al. The pre-evaluation model of typhoon disaster losses on Fujian province [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2011, 50(6): 1047-1052.
- [4] 刘勇, 吴必文, 王东勇. 一种台风路径相似检索的算法研究[J]. 气象, 2006, 32(7): 18-24.
Liu Yong, Wu Biwen, Wang Dongyong. Algorithm study on similarity retrieval of typhoon tracks[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(7): 18-24.
- [5] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Chen Lianshou, Ding Yihui. An Introduction to West Pacific Typhoons [M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [6] 李开乐. 相似离度及其使用技术[J]. 气象学报, 1986, 44(2): 174-183.
Li Kaile. A new similarity parameter and its application [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1986, 44(2): 174-183.
- [7] 鲁小琴, 余晖, 赵兵科. 热带气旋环境场相似检索方法的对比分析[J]. 气象, 2013, 39(12): 1609-1615.
Lu Xiaoqin, Yu Hui, Zhao Bingke. Study on similarity retrieval method for ambient field of tropical cyclones[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(12): 1609-1615.
- [8] 邹亮, 任爱珠, 徐峰, 等. 基于 GIS 空间分析的台风路径预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2036-2040.
Zou Liang, Ren Aizhu, Xu Feng, et al. Typhoon track forecasting based on GIS spatial analyses[J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2008, 48(12): 2036-2040.
- [9] 王远飞, 陆涛, 朱海燕, 等. 基于 GIS 的热带气旋相似路径检索系统研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(5): 124-125.
Wang Yuanfei, Lu Tao, Zhu Haiyan, et al. GIS-based tropical cyclone similar path query and analysis[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(5): 124-125.
- [10] 梁必骐, 梁经萍, 温之平. 中国台风灾害及其影响的研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 1: 84-91.
Liang Biqu, Liang Jingping, Wen Zhiping. Study of typhoon disasters and its affects in China[J]. Journal of Natural Disasters, 1995, 1: 84-91.
- [11] 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.
Chen Peiyan, Yang Yuhua, Lei Xiaotu, et al. Cause analysis and preliminary hazard estimate of typhoon disaster in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(1): 64-73.
- [12] 石先武, 谭骏, 国志兴, 等. 风暴潮灾害风险评估研究综述[J]. 地球科学进展, 2013, 28(8): 866-874.
Shi Xianwu, Tan Jun, Guo Zhixing, et al. A review of risk assessment of storm surge disaster[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(8): 866-874.
- [13] 许富祥, 韦锋余, 邢闯. 090415 渤海黄海北部灾害性海浪风暴潮过程灾情成因分析及灾后反思[J]. 海洋预报, 2009, 26(3): 38-44.
Xu Fuxiang, Wei Fengyu, Xing Chuang. Cause analysis and rethinking after the disaster of storm surge disaster in northern Yellow Sea and Bohai Sea of 090415[J]. Marine Forecasts, 2009, 26(3): 38-44.
- [14] Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [15] 林伟. 海南岛台风大风危险性分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2014.
Lin Wei. Typhoon wind hazard analysis of Hainan Island[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2014.
- [16] 吴小宁, 方伟华, 林伟, 等. 海南橡胶树热带气旋风灾易损性评估[J]. 热带地理, 2015, 35(3): 315-323.
Wu Xiaoning, Fang Weihua, Lin Wei, et al. Empirical curves of rubber tree fragility to tropical cyclone wind in Hainan[J]. Tropical Geography, 2015, 35(3): 315-323.
- [17] Luettich R A, Birkhahn R H, Westerink J J. Application of ADCIRC-2DDI to Masonboro Inlet, North Carolina: A brief numerical modeling study[R]. Chapel Hill: University of North Carolina, 1991.
- [18] 郭海荣, 焦文海, 杨元喜. 1985 国家高程基准与全球似大地水准面之间的系统差及其分布规律[J]. 测绘学报, 2004, 33(2): 100-104.
Guo Hairong, Jiao Wenhui, Yang Yuanxi. The systematic difference and its distribution between the 1985 national height datum and the global quasigeoid[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(2): 100-104.
- [19] 陈奕德, 董兆俊, 蒋国荣, 等. 湛江港风暴增水特征分析[J]. 海洋预报, 2002, 19(3): 44-52.
Chen Yide, Dong Zhaojun, Jiang guorong, et al. Characteristic analysis of Zhanjiang Harbor's storm surge[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(3): 44-52.
- [20] 张文静, 朱首贤, 黄韦民. 卫星遥感资料在湛江港风暴潮漫滩计算中的应用[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2009, 10(5): 501-506.
Zhang Wenjing, Zhu Shouxian, Huang Weigen. Appli-

- cation of satellite remote sensing data to storm surge flooding calculation[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 10(5): 501-506.
- [21] 江志辉, 华锋, 曲平. 一个新的热带气旋参数调整方案[J]. 海洋科学进展, 2008, 1: 1-7.
Jiang Zhihui, Hua Feng, Qu Ping. A new scheme for adjusting the tropical cyclone parameters[J]. Advances in Marine Science, 2008, 1: 1-7.
- [22] Booij N, Holthuijsen L H, Ris R C. The “SWAN” wave model for shallow water[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1996, 25(1): 668-676.
- [23] 宗芳伊, 魏来, 吴克俭. 基于 SWAN 模式的 2 种网格对崂山海域海浪模拟的比较研究[J]. 海洋湖沼通报, 2014, 4: 10-18.
Zong Fangyi, Wei Lai, Wu Kejian. Research on wave simulation comparisons of Shengsi waters based on two kinds of grids using SWAN wave model[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014, 4: 10-18.
- [24] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报[EB/OL]. [2015-02-25]. <http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/>.
State Oceanic Administration People's Republic of China. China marine disaster Bulletin[EB/OL]. [2015-02-25]. <http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/>.
- [25] 国家统计局. 中国统计年鉴[EB/OL]. [2015-07-07]. <http://tongji.cnki.net/kns55/navi/navidefault.aspx/>.
National Bureau of statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook [EB/OL]. [2015-07-07]. <http://tongji.cnki.net/kns55/navi/navidefault.aspx/>.
- [26] 邓睿. 多源遥感数据和 GIS 支持下的台风影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Deng Rui. Study on typhoon impact based on multi-source remote sensing data and GIS [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [27] 李颖, 方伟华, 林伟, 等. 可能最大风暴潮风险评估中各等级热带气旋设定方法[J]. 海洋科学, 2014, 38(4): 71-80.
Li Ying, Fang Weihua, Lin Wei, et al. Parameterization of synthetic tropical cyclones at various scales for probable maximum storm surge risk modeling[J]. Marine Sciences, 2014, 38(4): 71-80.
- [28] 罗阳, 赵伟. 相似性度量研究及最优相似系数[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2008 年年会天气预报准确率与公共气象服务分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2008: 373-392.
Luo Yang, Zhao Wei. Research on similarity measurement and best similarity coefficient[C]//Chinese Meteorological Society. Branch Field of Weather Forecast Accuracy and Public Meteorological Service, Annual Symposium of Chinese Meteorological Society in 2008. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2008: 373-392.
- [29] Powell M D, Reinhold T A. Tropical cyclone destructive potential by integrated kinetic energy[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88: 513-526.

Similar tropical cyclone retrieval method for rapid potential storm surge and wave disaster loss assessment based on multiple hazard indicators

LI Jian^{1, 2}, FANG Wei-hua^{1, 2}, ZHANG Xiao-ning^{1, 2}, CAO Shi-jia^{1, 2}, YANG Xing-mei³, LIU Xing^{4, 5}, SUN Jing^{4, 5}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs / Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. School of Mathematical Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. The Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 5. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Nov. 4, 2015

Key words: tropical cyclone; similarity; track and intensity; storm surge-wave; rapid potential loss assessment

Abstract: In coastal areas of China, storm surges and waves induced by tropical cyclones can cause a large number

of casualties and economic loss. Thus, it is extremely necessary to develop a method that can provide pre-event rapid loss assessment in a timely manner prior to the landing of a tropical cyclone. It is known that tropical cyclones with similar tracks, wind speeds, sizes, forward speeds, and directions flood nearly the same coastal locations and have significant wave heights and similar depths; hence, they cause similar disaster losses. In this study, a similar tropical cyclone retrieval method based on multiple hazard indicators is proposed to analyze pre-event storm surge and wave disaster. The method can use the location, central pressure, maximum wind speed, radius of maximum wind, and forward speed of a typhoon as the only input dataset or detailed simulated wind fields, storm surges, and waves as input. First, track similarity is measured via similarity deviation, considering only the locations of cyclone tracks. Second, a best-similarity coefficient is used to measure the similarity in central pressure, the radius of maximum wind, maximum wind speed, moving speed, wind field, storm surge, and wave intensity indices. A secondary retrieval is then conducted using an integrated wind field-storm surge-wave similarity coefficient when simulated wind field, storm surge, and wave data are available and an integrated track-intensity coefficient when they are not available. Finally, a similarity ranking of historical tropical cyclones is obtained using the integrated similarity coefficient. Taking Cyclone Utor, which hit the Zhanjiang area in 2013 as an example, five of the most similar historical tropical cyclones are retrieved from 112 historical tropical cyclone records. The method is flexible for rapid disaster-loss assessment because it provides a relatively satisfactory result using two scenarios of input dataset availability.

(本文编辑: 李晓燕)