

# 1909号台风“利奇马”引发渤海湾风暴潮特征及 无人机灾害调查

傅赐福<sup>1</sup>, 李涛<sup>1,2</sup>, 刘仕潮<sup>1</sup>, 高义<sup>1</sup>, 董剑希<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 在分析台风“利奇马”在渤海湾引发的风暴潮特征后认为: 台风“利奇马”在进入山东半岛后路径出现的明显西折并长时间徘徊少动导致渤海湾持续8级以上东北风, 是引发重大风暴潮灾害的原因。为了定量描述沿岸灾害, 开展了东营市新户镇沿岸无人机灾害调查航拍, 基于高分辨率影像对比分析统计, 航拍区域内74%的沿海岸堤和16%的养殖鱼塘损毁严重。

**关键词:** “利奇马”; 风暴潮; 渤海湾; 无人机航拍; 灾害调查

**中图分类号:** P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)05-0017-07

## 1 引言

风暴潮是指由于强烈的大气扰动, 如风暴或气压骤变导致的海平面异常升高或降低的现象<sup>[1]</sup>。在我国, 由热带气旋引发的风暴潮灾害十分频繁, 对沿海地区的社会经济产生重大不利影响<sup>[2]</sup>。以2019年为例, 我国各类海洋灾害共造成直接经济损失117.03亿元, 死亡(含失踪)22人, 其中, 风暴潮灾害造成直接经济损失116.38亿元, 占总直接经济损失的99%。从单次海洋灾害来看, 造成直接经济损失最严重的是1909号台风“利奇马”风暴潮灾害, 直接经济损失102.88亿元<sup>[3]</sup>。由此可见, 重大、特大风暴潮过程往往会造成巨大的经济损失和人员伤亡, 因此, 做好重大、特大风暴潮过程的预警及减灾工作意义重大。

渤海位于中纬度地区, 包括辽东湾、渤海湾和莱州湾, 地形总体呈东北—西南走向, 平均水深约18 m, 历史上曾多次发生风暴潮灾害<sup>[4]</sup>。渤海湾风暴潮的发生频率最高且灾害强度最大, 1909号台风“利奇马”在渤海湾引发的风暴潮就是一个典型案

例。国内不少学者对1909号台风“利奇马”开展了分析研究, 王丽娟等<sup>[5]</sup>利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和浙江省常规气象站的观测数据分析了1909号台风“利奇马”影响浙江期间的大风分布特征及其成因; 王毅等<sup>[6]</sup>利用浮标资料对台风“利奇马”影响期间浙江沿海风浪特征及其关系进行了分析, 并与欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)的模式预报与实况进行了对比, 基于模式预报分析了海浪的空间结构。另外, 无人机遥感调查作为近些年的新技术被广泛应用于国土、农业和气象研究等方面, 它具有以下独特优势: (1)操作简单, 飞行准备时间短, 飞行高度低; (2)对调查区的环境条件要求较低, 购置费用和维护成本较低; (3)可获取超高分辨率数字影像及定位数据, 产品精度高。国内学者利用无人机技术开展了诸多研究, 高伟等<sup>[7]</sup>通过无人机和滩面高程监测等技术方法, 获取了1909号台风“利奇

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-03-15。

基金项目: 澳门科学技术发展基金(0080/2018/A2)。

作者简介: 傅赐福(1983-), 男, 副研究员, 主要从事风暴潮预警及研究。E-mail: fucf@nmefc.cn

通讯作者: 李涛(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事风暴潮预警及研究。E-mail: litao@nmefc.cn

马”过境山东省海阳市前后的海滩监测数据,分析了台风前后海滩整体形态和剖面冲淤的变化,探讨了海滩演化对台风的响应规律。在利用无人机遥感和航拍开展风暴潮灾害调查方面,国内不少学者也取得了丰富的成果。王衍等<sup>[8]</sup>以1409号台风“威马逊”登陆后对海南文昌翁田和铺前的海岸带破坏情况调查监测过程为依据,介绍了无人机遥感的组成和优势,以及无人机遥感数据的获取和处理的监测过程;孙玉超等<sup>[9]</sup>利用无人机遥感获取台风“苏力”登陆点附近的高分辨率遥感影像,提取了研究区域典型风暴潮承灾体的灾害损失信息并对其进行统计分析;贾宁等<sup>[10]</sup>利用高分辨率遥感图像,综合采用查找淹没痕迹、查找漂浮物聚集位置和现场询问3种方法,确定了台风“玛莉亚”引发的风暴潮漫滩范围。

针对1909号台风“利奇马”,众多学者仅对其开展了风、浪特征研究,对其北上影响渤海产生的严重风暴潮却少有提及。另外,上述学者主要利用无人机开展台风登陆对海岸带的影响,在灾害调查方面主要利用高分辨率遥感影像,而利用无人机开展灾害调查定量统计的却很少。本文在借鉴上述研究成果的基础上,以1909号台风“利奇马”在渤海湾引发的风暴潮特征为切入点,充分利用无人机航拍技术开展渤海湾南岸的山东省东营市新户镇沿岸风暴潮灾害调查,定量分析此次风暴潮对于东营市近岸堤防和海水养殖区的破坏程度。

## 2 台风“利奇马”引发的渤海湾风暴潮特征分析

### 2.1 台风“利奇马”引发渤海湾风暴潮及灾害情况

2019年8月10日01时45分(北京时,下同)前后,超强台风“利奇马”在浙江省温岭市城南镇沿海首次登陆,登陆时中心附近最大风力16级;登陆后,台风“利奇马”继续北上,11日12时前后,台风“利奇马”穿过江苏进入黄海海域,并于11日20时50分前后在山东省青岛市黄岛区沿海第二次登陆,登陆时中心附近最大风力9级。台风“利奇马”的路径及文中所涉及站点分布见图1。

受“利奇马”台风风暴潮和近岸浪的共同影响,福建以北—辽宁8个省市沿海共有22个潮位站实

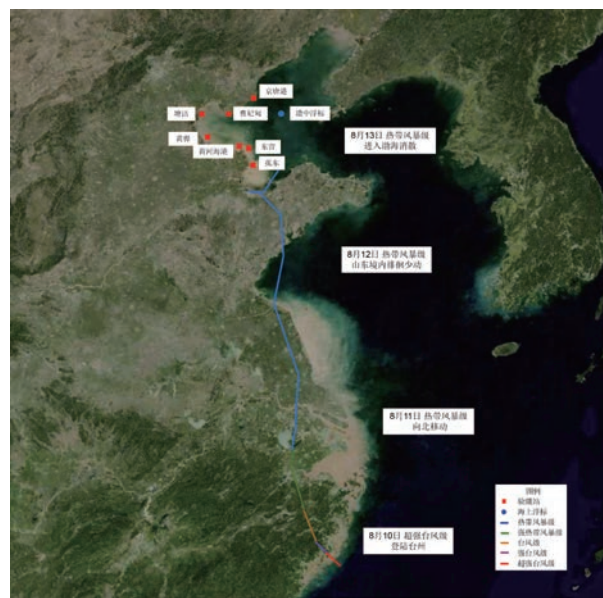


图1 1909号台风“利奇马”路径及涉及站点分布

测最大风暴增水超过1 m,5个潮位站实测最大风暴增水超过2 m,最大增水出现在浙江省海门潮位站(3.12 m)。渤海湾是此次风暴潮过程的重灾区,6个潮位站最大增水均超过1 m,最大增水出现在河北黄骅潮位站(2.33 m),其中河北京唐港、曹妃甸、黄骅和山东黄河海港等4个潮位站实测最高潮位达到当地红色警戒潮位。渤海湾各站潮位曲线见图2。

台风“利奇马”共造成以上8省市直接经济损失合计102.88亿元,其中,台风登陆地浙江省的直接经济损失76.22亿元<sup>[3]</sup>。受台风北上影响的渤海湾(包括河北唐山市、沧州市、天津市、山东滨州市和东营市)直接经济损失22.22亿元,其中,位于渤海湾南岸的山东滨州和东营两市的直接经济损失达19.91亿元<sup>[11]</sup>,占此次渤海湾风暴潮灾害直接损失的89.6%,可见,渤海湾南岸为此次风暴潮灾害的重灾区。

### 2.2 “利奇马”引发渤海湾风暴潮特征分析

首先,分析台风“利奇马”影响期间的气象状况和渤海湾各站风暴潮情况,图3为渤海湾各浮标和沿岸站风力时间序列。综合图1的台风路径、图2的各站潮位曲线和图3各站风力时间序列分析,结果如下:

11日凌晨—上午,台风“利奇马”在江苏南部境



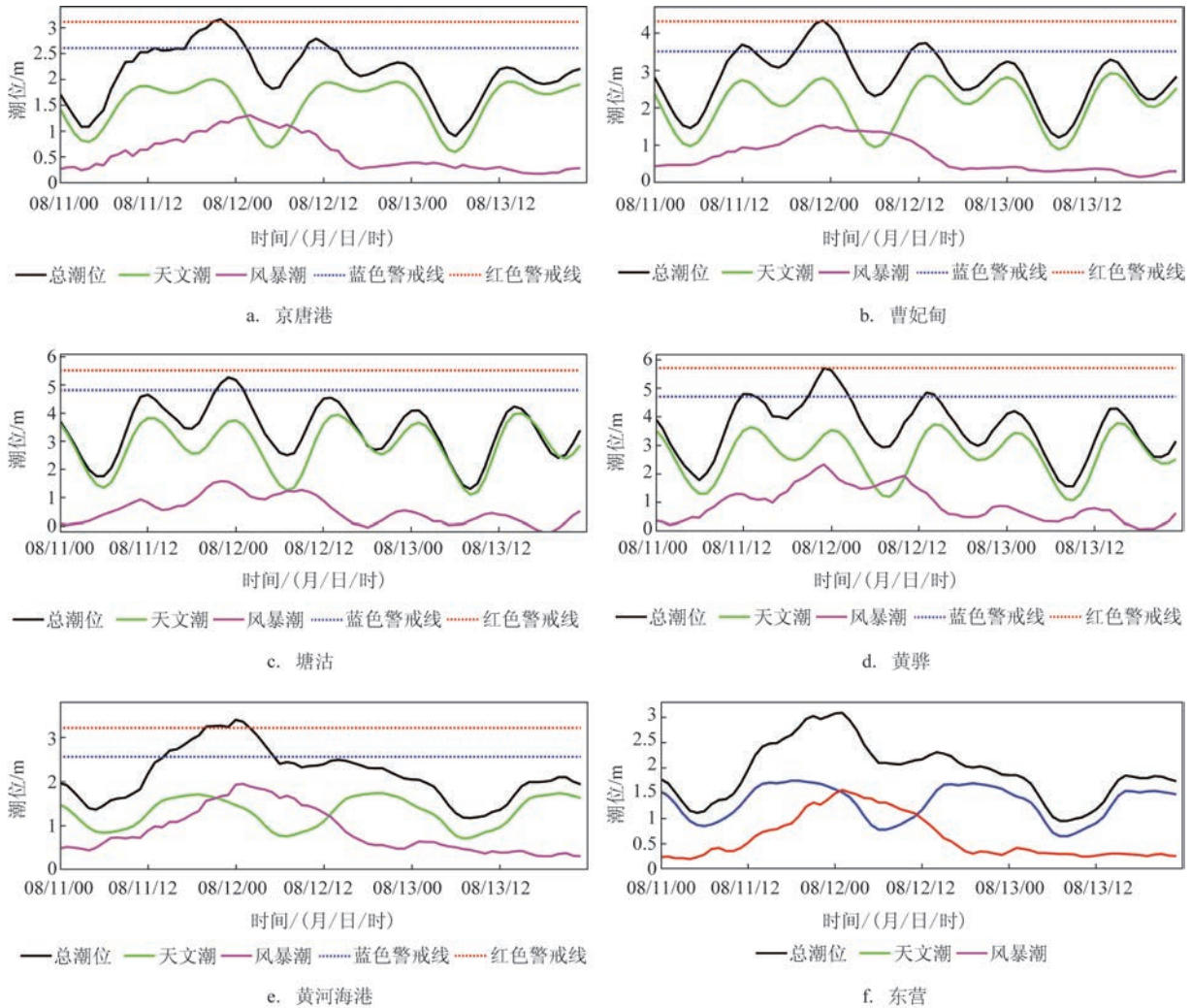


图2 1909号台风“利奇马”影响期间渤海湾各站潮位曲线和超警戒情况

内北上,受其外围环流的影响,渤海湾各站观测到7级左右的东-东北风和0.2~0.6 m的风暴增水;此时段各站处于当日天文低潮,各站总潮位未超过警戒值。

11日中午—傍晚,台风“利奇马”北上进入黄海,受到台风外围持续影响,渤海湾各站风力不断增强,普遍观测到7—8级的东北风和0.5~1.2 m的风暴增水;此时段各站处于当日天文高潮,各站总潮位先后接近或超过当地蓝色警戒值,总体上各站潮位呈现明显上升趋势。

11日夜间—12日清晨,台风“利奇马”二次登陆山东青岛后往北偏西方向移动至莱州湾底,渤海湾开始受到台风本体的影响,各站均观测到此次过程的最大风速和最大增水,包括8—10级的东北风和

1.1~2.3 m的风暴增水;此时段各站处于当日天文高潮,各站总潮位先后接近或超过当地红色警戒值,达到了此次过程的潮位最高值。

12日上午—中午,台风“利奇马”在莱州湾底徘徊,移速变慢,渤海湾各站风向由东北转为东-东南,观测风力减弱到6级左右,各站观测到0.8~1.8 m的风暴增水且呈现震荡向下的趋势;此时段各站处于当日天文高潮,各站总潮位先后接近或超过当地蓝色警戒值,总体上各站潮位呈现明显下降趋势。

12日下午—13日清晨,台风“利奇马”在莱州湾底徘徊少动,强度逐渐减弱,渤海湾各站观测风力逐渐减弱到6级以下,除了位于台风北侧的渤中浮标依然维持东南风,其他各站的风向转为东北;各

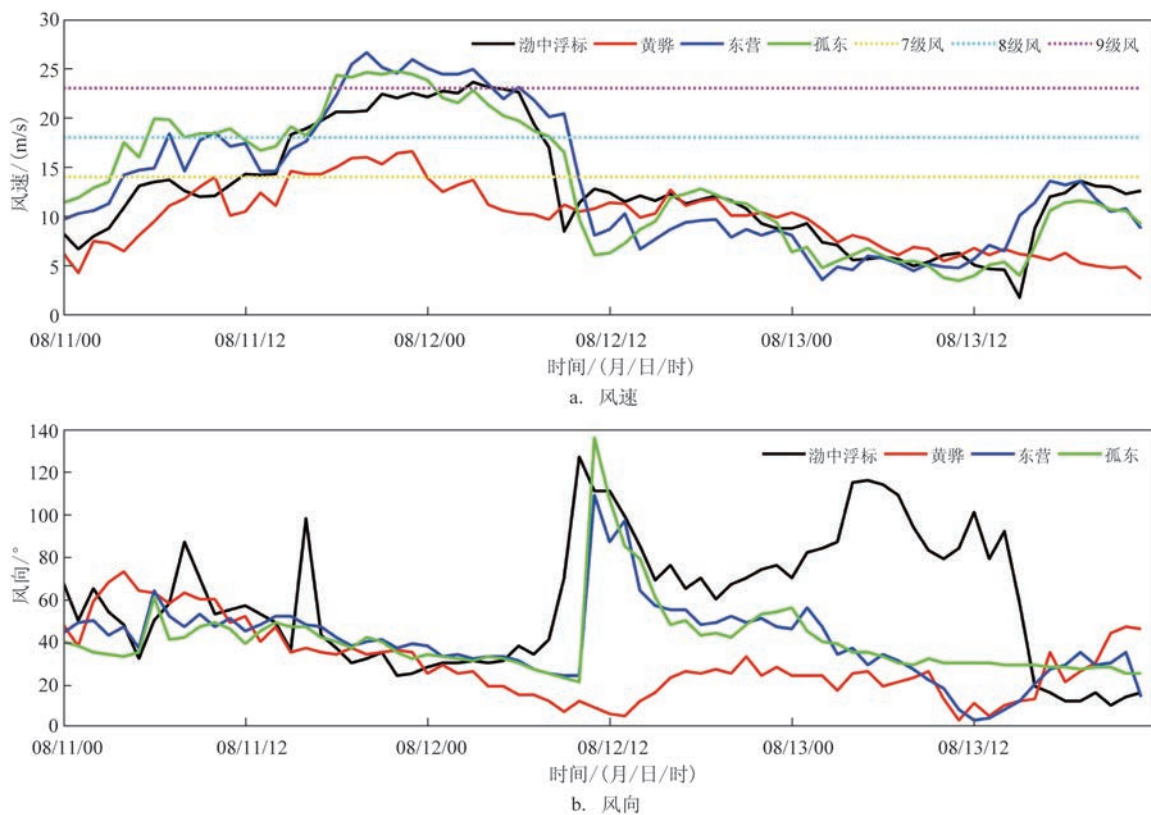


图3 1909台风“利奇马”影响期间渤海湾浮标和沿岸站风力时间序列

站观测到0.4~1.0 m的风暴增水,增水呈现明显余震特征,各站总潮位未超过警戒值且呈继续下降趋势。

13日白天,台风“利奇马”减弱为热带低压,受其残余环流的影响,各站依然观测到5—6级的东北风,风暴增水基本小于0.5 m且呈现震荡减小的趋势;各站总潮位基本恢复正常,此次台风过程的影响基本结束。

下面,我们分析台风“利奇马”引发渤海湾重大风暴潮的成因。历史上,影响渤海的台风路径主要分3种类型(见图4):

类型一:台风在我国东部沿海近海北上进入黄海,登陆辽东半岛东部或朝鲜半岛沿海(例如1009号台风“梅花”和1105号台风“米雷”)。在该类型台风的影响下,渤海湾沿岸主要受台风外围影响,最大风暴增水在1.2 m左右,风暴增水普遍不大且维持时间短(12~18 h),不易形成风暴潮灾害。

类型二:台风在我国东部沿海登陆后北上,在

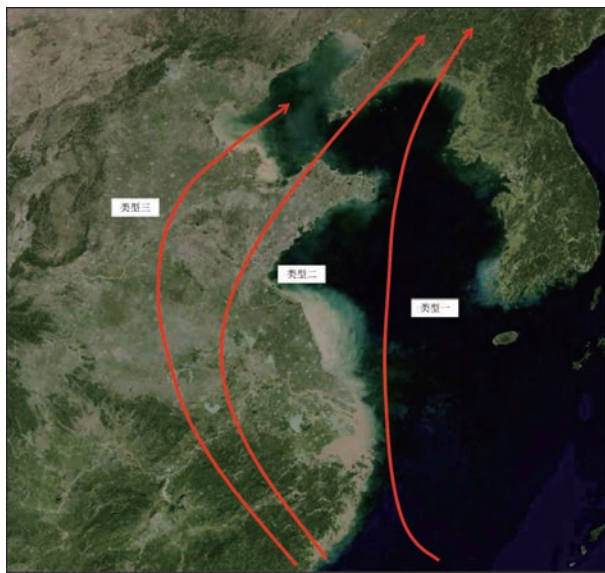


图4 影响渤海常见的3种台风路径示意图

山东半岛以较快速度转向东北方向移动,而后登陆辽东半岛(例如8509号台风“玛美”和9216号台风“宝莉”)。该类型台风移速较快,渤海湾沿岸主要



受台风本体和外围的共同影响,最大风暴增水在1.8 m左右,风暴增水较大但维持时间较短(12~24 h),易形成风暴潮灾害;

类型三:台风在我国东部沿海登陆后深入内陆北上,而后从渤海湾和莱州湾沿岸进入渤海(例如9711号台风“温妮”和1210号台风“达维”)。该类型台风在进入渤海之前移速较慢,渤海湾沿岸先后受台风外围和本体影响,最大风暴增水在2.4 m左右,风暴增水大且维持时间较长(18~30 h),极易形成重大风暴潮灾害。

很显然,台风“利奇马”路径整体与类型二相似,两者在台风进入山东前路径几乎一致,但在台风进入山东后却存在明显区别。类型二台风在山东半岛以较快移速(25~30 km/h)向东北方向移动并进入辽东半岛,未进入渤海,而台风“利奇马”在8月11日21时二次登陆青岛—13日08时从莱州湾附近减弱为热带低压,即在进入山东半岛后有一段时间明显西折并在莱州湾底徘徊近30 h(移动速度约5 km/h),这是以上3种常见台风路径类型所不具有的移速特征。这造成了11日—13日上午时间段内,渤海海峡的风向基本保持偏东—东南风,也就意味着受到台风“利奇马”外围和本体影响,从黄海进入渤海的风暴潮在这个时间段无法流回黄海;而在台风“利奇马”最靠近渤海湾的12日凌晨前后出现了本次过程的极值,即各站出现了9级以上的东北风和1.3~2.3 m的最大风暴增水。因此,我们可以看到,渤海湾各站在11日—13日上午这个时间段的风暴增水呈现出初震(11日白天,风暴增水0.2~1.2 m)、主震(11日夜间—12日上午,风暴增水1.0~2.3 m)和余震(12日中午—13日上午,风暴增水0.2~1.0 m)的完整特征。各站过程风暴增水超过1 m的持续时间普遍超过18 h,其中,位于渤海湾西南岸的黄骅潮位站的持续时间更是达到28 h。由于渤海湾的天文潮为不正规半日潮,这种风暴潮强度叠加天文高潮会使总潮位超过红色警戒值,从而引发严重的风暴潮灾害。

综上所述,台风“利奇马”在进入山东半岛后路径出现的明显西折和在莱州湾底30 h的徘徊少动导致渤海海峡持续东—东南风和渤海湾8级以上东北风,是引发此次渤海湾重大风暴潮灾害的原因。

### 3 无人机灾害调查

上节阐述和分析了台风“利奇马”在渤海湾沿海产生的风暴潮情况、灾害损失和特征,表明渤海湾南岸的风暴增水和灾害损失最大,因此,客观准确掌握渤海湾南岸风暴潮灾害情况显得十分重要。本节将阐述运用无人机航拍技术开展山东东营市沿岸灾害调查及统计。

#### 3.1 无人机航拍的基础准备

国内不少学者对无人机航拍系统做了详细的介绍<sup>[7-10]</sup>。在东营市海洋发展和渔业局与东营市海洋预报台的前期摸底和大力配合下,本文选取了东营市河口区新户镇沿岸作为此次无人机航拍灾害调查的研究区域。东营市河口区新户镇沿岸为粉砂淤泥质海岸,沿岸以海水养殖为主,鱼虾养殖塘外围建有斜坡式海堤,海堤外立面用石块砌成。

本次无人机航拍任务使用1套固定翼无人机、1套RTK设备和1套地面站。固定翼无人机选用手抛起飞的ZW-FM-180A0,搭配SONY a6000相机和H32 GPS测绘仪,主要用于获取正射影像。航拍地点是东营市河口区新户镇沿海养殖鱼塘,航拍时间是2019年8月14日,航拍面积约33.3 km<sup>2</sup>;航拍范围的东南西北经纬度分别为(118°20'23.45"E, 38°6'51.44"N)、(118°29'11.10"E, 38°6'55.24"N)、(118°28'42.93"E, 38°4'40.60"N)和(118°20'16.73"E, 38°5'10.71"N);起飞重量和任务载荷分别为7 kg和1 kg,测控半径为7 km,抗风能力为4级;拍摄有效像素2 400万,正射影像分辨率为0.1 m。同时,获取台风“利奇马”登陆前东营市河口区新户镇的高分卫星影像(GF-2卫星影像,分辨率0.8 m,影像时间为2019年6月22日),用于无人机航拍的对比分析。

#### 3.2 航拍影像分析及堤防损毁统计

基于上述工作,共启动两个无人机架次开展了东营市河口区新户镇沿海航拍,获得正射影像、高清视频和空中全景等高清影像和视频资料后,开展航拍影像对比分析和专题图制作,同时开展现场风暴潮灾害调查。

受台风“利奇马”影响,东营河口区沿海多条养殖鱼塘道路损毁,靠人力和汽车的现场调查受到客观条件的极大约束,从这方面来说,无人机航拍灾害调查有着明显优势,现场灾害调查和无人机航拍灾害调查可以做到优势互补。从现场灾害调查来看(见图5a),养殖鱼塘外围海堤受到风暴潮的冲击损毁严重,高近2 m的海堤几乎被夷为平地,海堤外立面的绝大部分砌石块散落在海堤附近,内部的夯土也被风暴潮冲刷到海里。此外,通过受灾前的高

分辨率卫星影像和受灾后的无人机航拍正射影像的对比,可以更加清晰地掌握沿海养殖鱼塘和堤防损毁情况。养殖鱼塘外围海堤被风暴潮几乎完全冲垮(见图6),无法保护临近的养殖鱼塘;养殖鱼塘内的海水颜色由受灾前的绿色变成受灾后的黄褐色,这显然是风暴潮冲垮海堤后将海水的泥沙输送到养殖鱼塘内。

对无人机航拍正射影像的养殖鱼塘和堤防损毁情况进行分析统计(见图5b):本次航拍的堤防全

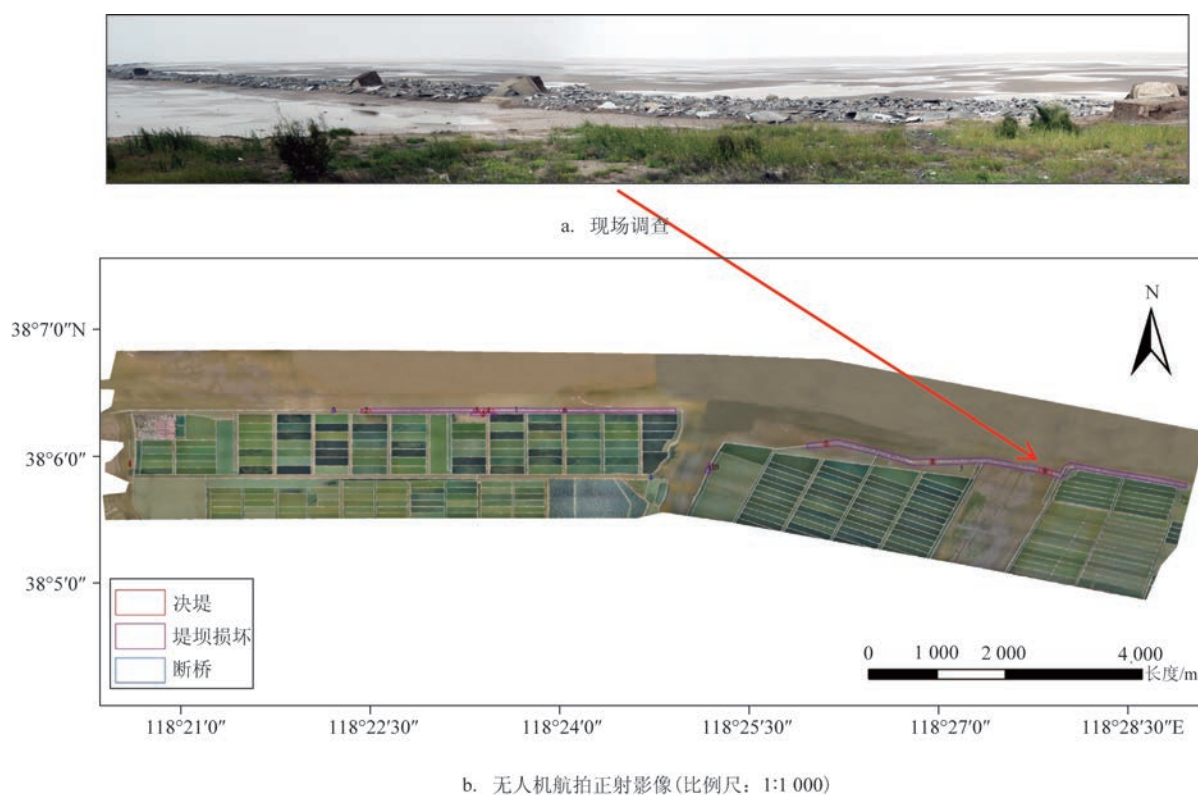


图5 东营市河口区新户镇沿岸养殖鱼塘和外围堤防毁损图像

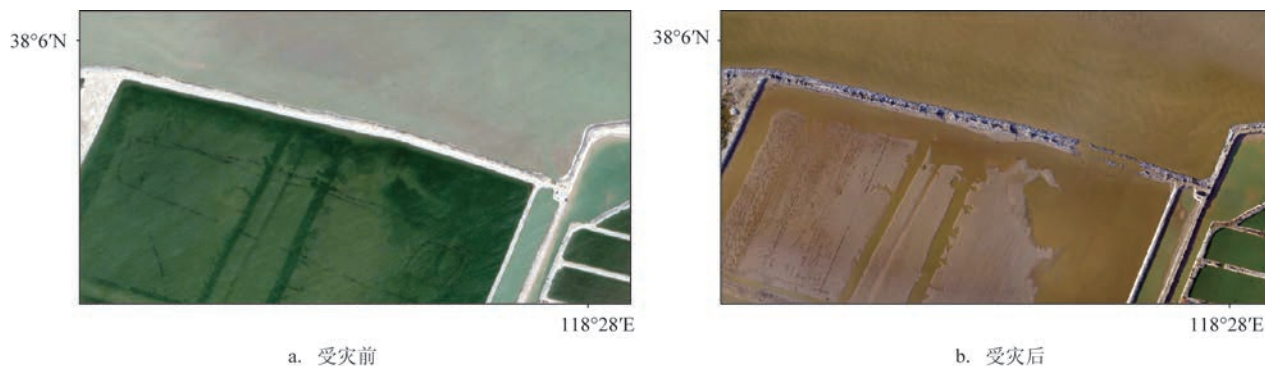


图6 东营河口区新户镇沿岸养殖鱼塘和外围堤防高清卫星影像对比

长 15.8 km,共发现决堤 10 处,严重损毁 6 处,断桥 1 处,经统计损毁约 11.7 km,约占航拍堤防的 74%;本次航拍面积约 33.3 km<sup>2</sup>,其中,养殖鱼塘面积约 20.7 km<sup>2</sup>,损毁养殖鱼塘面积 3.3 km<sup>2</sup>,约占养殖鱼塘面积的 16%。

## 4 结论

(1)本文阐述了 1909 号台风“利奇马”在渤海引发的风暴潮和灾害损失,统计表明,渤海湾南岸为此次风暴潮灾害的重灾区。

(2)归纳总结了影响渤海的 3 种台风路径类型,详细分析了台风“利奇马”在渤海湾引发的风暴潮特征。分析表明,台风“利奇马”在进入山东半岛后路径出现的明显西折和在莱州湾底 30 h 的徘徊少动导致的渤海海峡持续长时间的东-东南风和渤海湾 8 级以上东北风,是引发此次重大风暴潮灾害的原因。

(3)选取受灾较重的东营市河口区新户镇沿岸作为无人机灾害调查航拍区域开展高分辨率影像对比分析,定量统计了航拍区域内堤防和养殖鱼塘灾害情况:本次航拍的堤防全长 15.8 km,损毁约 11.7 km,约占航拍堤防的 74%;本次航拍的养殖鱼

塘面积约 20.7 km<sup>2</sup>,损毁养殖鱼塘面积 3.3 km<sup>2</sup>,约占养殖鱼塘面积的 16%。

## 参考文献:

- [1] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1-10.
- [2] 于福江, 傅赐福, 郭洪琳, 等. 现代风暴潮预报技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 3-10.
- [3] 自然资源部. 2019 年中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2020-04-30). [http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430\\_2510979.html](http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510979.html).
- [4] 吴少华, 王喜年, 戴明瑞, 等. 渤海风暴潮概况及温带风暴潮数值模拟[J]. 海洋学报, 2002, 24(3): 28-34.
- [5] 王丽娟, 邓方俊, 史珩瑜, 等. 1909 号台风“利奇马”影响期间浙江大风分布特征及成因分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(6): 83-95.
- [6] 王毅, 涂小萍, 蒋璐璐, 等. 台风“利奇马”影响期间浙江沿海海浪特征分析[J]. 气象科学, 2020, 40(1): 97-105.
- [7] 高伟, 李萍, 高珊, 等. 台风“利奇马”对山东省海阳市海滩演化过程的影响[J]. 海洋学报, 2020, 42(11): 88-99.
- [8] 王衍, 洪海凌, 王同行, 等. 无人机遥感在台风灾害调查中的应用[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(12): 60-63.
- [9] 孙玉超, 曾纪胜, 杨帆, 等. 无人机遥感系统在风暴潮灾害损失评估中的应用初探[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(4): 56-60.
- [10] 贾宁, 陶荣幸, 石先武, 等. 风暴潮淹没范围确定方法与应用——以台风“玛莉亚”风暴潮为例[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(12): 8-10.
- [11] 自然资源部北海局. 自然资源部北海局发布《2019 年北海区海洋灾害公报》[EB/OL]. (2020-05-27). <http://ncs.mnr.gov.cn/n1/n127/n134/200527142944815111.html>.

## Characteristics of the storm surge and UAV disaster investigation caused by the typhoon Lekima (No.1909) in the Bohai Bay

FU Ci-fu<sup>1</sup>, LI Tao<sup>1,2</sup>, LIU Shi-chao<sup>1</sup>, GAO Yi<sup>1</sup>, DONG Jian-xi<sup>1,2</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081 China)

**Abstract:** This paper analyzes the characteristics of the storm surge caused by typhoon Lekima in the Bohai Bay and identifies the reasons for the severe storm surge disaster. It is found that typhoon Lekima turned westward obviously after entering Shandong Peninsula and lingered for a long time of period, which caused sustained northeast wind stronger than force 8 and the severe storm surge disaster. In order to quantitatively describe the coastal disaster, a unmanned aerial vehicle (UAV) disaster investigation was carried out along the coast of Xinhu Town, Dongying City. Based on the comparative analysis and statistics of the high-resolution images, it is found that 74% of coastal seawalls and 16% of mariculture area in the aerial area were seriously damaged.

**Key words:** Lekima; storm surge; Bohai Bay; UAV aerial photography; disaster investigation