

浙江东部海域沉船海难海浪灾害性特征分析

陈剑桥^{1,2,3}, 韩博^{1,3*}, 杨清华^{1,3}, 林法玲², 陈金瑞²

(1. 中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519082; 2. 福建省海洋预报台, 福建 福州 350003; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析数据, 分析了2015—2021年发生在浙江东部海域9起沉船海难事故的海浪灾害性特征。结果表明: 沉船海难事故的发生往往伴随着波高或波陡的增大, 使得船舶的纵摇和垂荡加剧。海难发生时波高比12 h前增大0.5 m以上, 或是海难发生3 h以内波面坡度达到峰值。沉船海难还伴随着风浪向与航向的夹角、风浪向与涌浪向的夹角约为 $60^{\circ}\sim 100^{\circ}$, 即船向与某一种浪向接近垂直, 使得船舶横摇剧烈。此外, 结合一个代表性沉船事故个例进行过程总结, 分析了较陡的波面坡度、较大的风浪向和涌浪向夹角产生的原因。

关键词: 沉船; 海浪; 波面坡度; 风浪向; 涌浪向

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)01-0028-11

1 引言

在海上或海岸能引起灾害损失的海浪叫灾害性海浪, 它是影响海洋开发、威胁沿岸人民生命财产安全的重要因素。1949—1982年, 仅被我国交通管理部门和海军救助的船只就达6 295艘(不包括渔民自救的渔船), 其中约1 500艘船的海难事故是由狂风巨浪引起的^[1]。《中国海洋灾害公报》数据表明, 2011—2020年, 由台风、冷空气、气旋引起的灾害性海浪造成我国232人死亡(含失踪), 直接经济损失近2亿元, 海浪灾害共损毁船只1 669艘^[2]。

近年来, 随着海洋渔业经济的发展, 渔船数量不断增加, 2020年年末我国渔船总数为56.33万艘^[3]。从人类和经济的角度看, 每一艘船的沉没都是一场巨大的灾难。为应对多发的海上事故, 增强船舶的操控性, 世界海事组织(International Maritime Organization, IMO)提出了船舶操控性标准^[4]。船舶操控性研究主要借助运动数学模型开展, 并逐渐发展为六自由度的运动方程^[5]。为减少

计算量和计算难度, HAMAMOTO等^[6]对运动方程进行了简化, 聚焦为水平面的操纵运动、横向的横摇运动和纵向的纵摇和升沉(垂荡)运动。基于Korvin-Kroukovskiy切片理论的仿真研究, 可以结合海洋环境信息数据来探究船舶的耐波性, 获得船舶运动的传递函数和船舶纵摇、垂荡、横摇有义值曲线^[7]。

船舶在不断运动的海浪中航行是复杂而危险的。达到一定高度的波浪、波陡较大的波浪、多波相互交叉形成的三角浪、快速成长的波浪都会对海上船只构成极大威胁。巨大而高的波浪, 或是波峰很陡峭的波浪, 能够将船直接掀翻^[8]。虽然不少船舶在巨浪狂涛中发生事故, 但是TOFFOLI等^[9]对全球船舶海难的研究表明, 在一些翻船案例中, 波高不是非常大, 但伴随了风浪方向和涌浪方向接近垂直的情况。魏永亮等^[10]利用SAR(Synthetic Aperture Radar)卫星遥感数据和海浪模式, 联合分析了《中国海洋灾害公报》中的沉船事故, 并发现很多事故中的风浪和涌浪的夹角超过 45° 。OLAGNON

收稿日期: 2021-09-23; 修回日期: 2022-05-13。

基金项目: 广东省自然资源厅广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(粤自然资合[2022]18号); 国家重点研发计划重点专项(2016YFC1401104, 2018YFC1407005, 2020YFA0608804)。

作者简介: 陈剑桥(1985-), 男, 高级工程师, 硕士在读, 主要从事海洋观测预警研究工作。E-mail: xiguli520@163.com

*通信作者: 韩博(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海洋大气边界层研究。E-mail: hanbo5@mail.sysu.edu.cn

等^[11]的研究表明,快速成长的海浪有可能使得船舶来不及调整航向或者失去控制,是导致海难事故发生的原因之一。

在前人的研究中,不少沉船事故的发生时间只明确到日期^[10-11]。随着《中华人民共和国政府信息公开条例》的实施,越来越多的政府信息依法公开,其中包括海事部门的水上安全事故调查报告^[12]。这些调查报告公开的海难事故发生时间明确到了时刻。本文基于浙江海事局公开的沉船海难调查报告、海难海域周边海浪实况观测资料和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的海浪再分析数据,分析了海难发生的灾害性海浪特征,尽可能地总结经验教训,为船只的海上航行和安全作业提供建议。

2 资料和处理方法

2.1 资料数据

本文下载了浙江省水上安全事故调查报告^[12]并进行分析。在2015年以来(截止2022年2月)的94起水上安全事故中,船只碰撞(或触碰)事故61起,沉没(或自沉)事故19起,其他事故(含触礁、火灾、人员落水等)14起。调查报告详细阐述了每起事故的船舶信息、事故经过和原因过失分析,事故经过的描述明确到了时刻。我们选取了8起客观原因主要为气象海况的沉船事故,事故发生位置见图1的“+”;同时,还获取了1起该区域因气象海况引起的渔船沉没事故^[13],发生位置见图1的“*”。本文围绕这9起沉船事故开展分析。

为每起沉船事故找到代表性的实况观测资料是极其困难的,而格点化的再分析数据可以提供高参考性的标准化数据。本文基于ECMWF第五代全球天气与气候再分析数据(ERA5)中的海面气象和海浪数据^[14]开展研究。该数据集的时间分辨率为1 h;海平面气压、地面2 m气温、海面10 m风数据的分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$;有效波高(风浪和涌浪的混合)、平均跨零波周期、风浪浪高和浪向、第一涌浪分区涌高和涌向、波面坡度(wave surface slope)等波浪数据的分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

分析前,用东海海域的1个定点浮标和7个漂流浮标在相应时间段内的再分析数据进行检验评

估。定点浮标资料来自福建省海洋与渔业局和福建省气象局共建、共享的“海峡1号”大浮标(直径10 m),风向、风速的观测高度为10 m,风和波浪观测数据的时间分辨率为1 h,检验时段为2021年2—4月。漂流浮标数据下载自日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)官网^[15],主要包括有效波高和平均波周期两个海表波浪要素,检验时段为2018年1月—2021年5月。定点浮标位置和漂流浮标路径见图1。

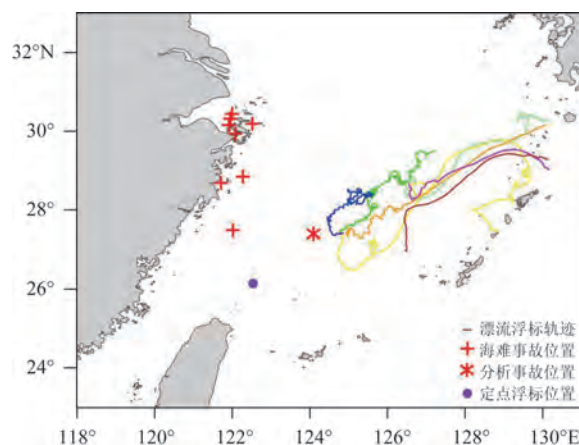


图1 沉船海难发生位置、定点浮标位置和漂流浮标漂流轨迹

Fig.1 The locations of the shipwreck, the position of the mooring buoy and the tracks of the drifting buoy

2.2 处理方法

在检验评估再分析数据并利用其分析海难发生时的波浪特征时,取其与浮标位置或沉船海难位置最近的格点。

再分析数据中关于波陡的变量是波面坡度,该参数可以由二维波谱统计得出,即计算海面均方根斜率(Mean square slope of waves)。波面坡度可以理解为与风浪和涌浪混合的平均坡度相关的变量,坡度值越大,波浪越陡^[14]。在本文代表性个例分析中,参考世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)发布的《海浪分析与预报指南》中的方法,换算得到比波面坡度更常见的波陡^[16]。波陡换算公式如下:

$$\xi = \frac{2\pi H_{1/3}}{g T_z^2}$$

式中: $H_{1/3}$ 为有效波高; T_z 为平均跨零波周期; g 为重力加速度。

3 再分析数据检验评估

由定点浮标实测数据和ERA5再分析风速、风向散点图可知(见图2),再分析资料结果与浮标实测值非常接近,能很好地反映周边海域海面风的情况。统计表明(图略),ERA5风速略小于浮标实测风速,平均偏低0.55 m/s,风速较大时ERA5结果的偏低情况更明显;ERA5风向与实测风向的平均绝对偏差为15.32°。

由定点浮标和漂流浮标实测数据以及ERA5再分析波浪数据的散点图可知(见图3),ERA5再分析资料与定点浮标和漂流浮标实测数据非常接近,能很好地反映周边海域海况。统计表明,与定点浮标实测数据相比,ERA5的有效波高平均偏低0.17 m,风速较大时ERA5的偏低情况更明显,ERA5的平均波周期偏小0.14 s。与漂流浮标实测数据相比,ERA5的有效波高平均偏低0.02 m。由于漂流浮标观测到的为有效波周期,数据分辨率为1 s,而ERA5再分析数据中没有有效波周期,因此采用平均波周期和谱峰周期进行检验。由图3d可知,漂流浮标的有效波周期介于ERA5再分析数据的平均波周期和谱峰周期之间,符合波浪周期统计特征。

总之,ERA5再分析资料在东海海域具有很好的适用性,描述的风和波浪状态都与浮标观测结果非常接近,可以作为海难事故的分析资料。

4 浙江东部沉船海难统计分析

4.1 沉船时有效波高及波陡

根据沉船事故信息,提取对应时间的有效波高和波面坡度进行联合分析,结果见表1。综合分析表1中的相关信息,可以总结出3个特征。特征一:船舶总吨越重(船长相对较长),事故发生时有效波高越大(见表1中1—5号和8号海难事件),沉船总重和有效波高相对应。特征二:沉船的发生一般伴随着波高的增大,如表1中1号、2号和5—9号海难事件的波高较12 h前增大0.5 m及以上。特征三:7个海难事件发生时,距离波面坡度变化峰值时间在4 h及以内,特别是,在不符合特征一的6号、7号海难事件和不符合特征二的3号、4号海难事件中,3个事件均发生在波面坡度变化的峰值时刻,另一个距离峰值时间为3 h。这表明波浪或波面坡度增大且达到一定程度,是引起沉船海难发生的重要原因。

船舶在海上航行的过程中,受波高和波陡的影响,会产生纵摇和垂荡。纵摇和垂荡的幅度主要与波高、波长、船长、船重、船速等因素有关。对同一船舶而言,波高越高,波陡越陡,越容易发生沉船事故。从表1的9个海难事件中均可以看到波高或波陡发生变化,船舶在沉没前发生了剧烈的纵摇和垂荡。

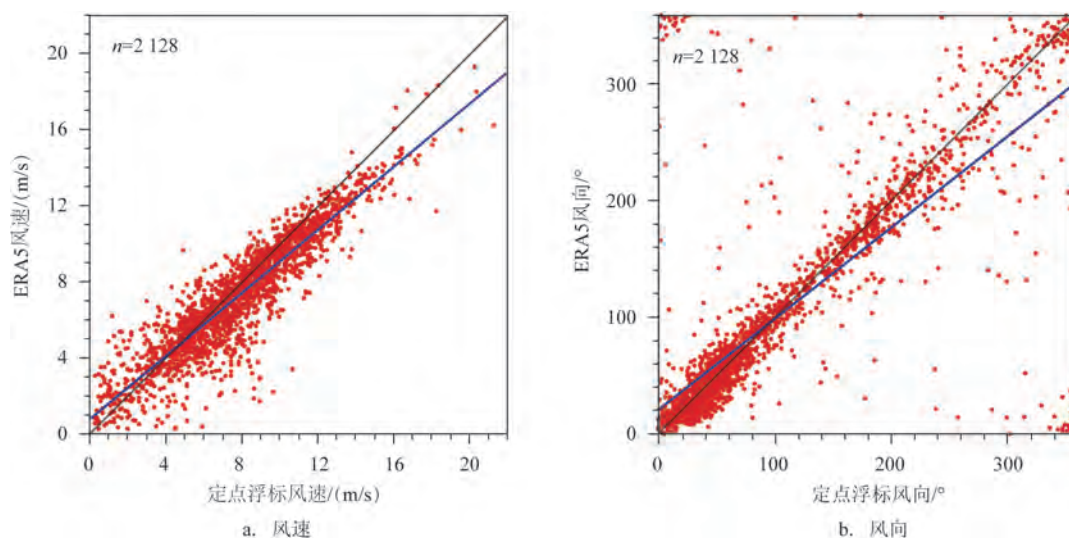


图2 定点浮标实测风和ERA5再分析风散点图

Fig.2 The scatter plot of the wind measured by the mooring buoy and the ERA5 reanalysis

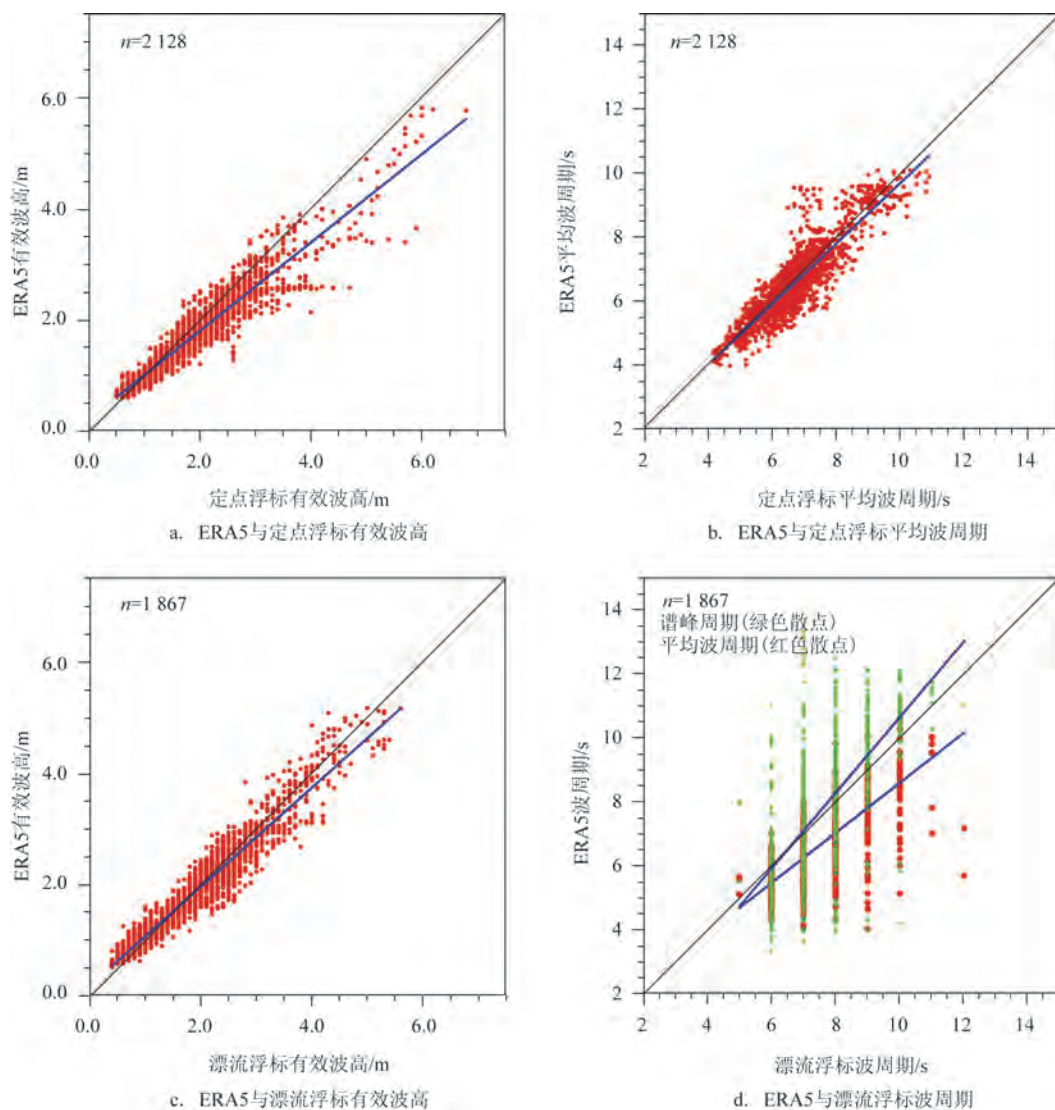


图3 定点浮标实测、漂流浮标实测和ERA5再分析波浪散点图

Fig.3 Wave scatter plots of mooring buoy, drift buoys measurement and ERA5 re-analysis

从表1还可以发现,8个沉船海难发生在21时(北京时,下同)一次日08时,另一个在16时。夜间一凌晨多为休息时间和船舶驾驶的易疲劳期,相比白天视野也更差。天气系统的变化会引起海浪的增大,大多也预示着更差的能见度。因此,操作人员视野变差和注意力降低也是值得关注的导致海难发生的主观性原因。

4.2 沉船时航向、风浪向和涌浪向

根据沉船事故信息,提取对应时间的风浪及第一涌浪分区的涌浪数据进行联合分析,结果见表2。从表中风浪高和第一涌浪高的对比情况看,7个海难

事件的风浪高于涌浪,两个事件(2号和8号)的涌浪高于风浪。综合分析风浪向与航向、涌浪向之间的夹角可知,5个事件的风浪向与涌浪向夹角在 $63^{\circ} \sim 88^{\circ}$,1个事件(4号)是倾斜的逆浪(158°),3个事件(5号、6号、8号)的风浪向与涌浪向的夹角为 21° 及以下,但其航向和风浪向的夹角却在 $59^{\circ} \sim 102^{\circ}$ 。这表明风浪向与航向、涌浪向之间的夹角在 $60^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 时,即它们之间接近垂直,是沉船海难发生的重要原因。

船舶在海上航行时,当船向与波浪向有夹角或者波浪本身有不同波向成分时,船体会产生横摇。黄松兴等^[17]基于计算流体动力学方法和流体体积法

表 1 沉船海难基本信息和对应的再分析有效波高、波面坡度

Tab.1 Basic information of shipwrecks and corresponding re-analyzed significant wave height and wave surface slope

序号	时间 (年/月/日/时)	纬度 /°N	经度 /°E	船舶总吨 /t	船长 /m	有效 波高/m	12 h 前有效 波高/m	波面坡度	离坡度变化 峰值时间/h
1	2020/12/30/16	30.15	121.89	2 813	96	4.9	1.8	0.021	3
2	2019/9/5/21	30.18	122.48	2 373	83	3.2	2.7	0.014	12+
3	2018/1/27/08	27.5	121.99	1 095	71	2.6	2.6	0.014	0
4	2018/1/9/01	30.31	121.92	1 047	51	2.2	2.0	0.013	3
5	2017/5/2/21	29.93	122.05	992	68	2.1	1.1	0.012	4
6	2020/2/17/02	30.43	121.97	499	53	2.9	1.7	0.015	0
7	2021/3/2/08	27.41	124.03	105	27	3.8	1.9	0.021	0
8	2018/9/12/07	28.85	122.24	4	10	1.7	1.2	0.008	12+
9	2016/2/25/02	28.69	121.69	—	—	3.6	2.7	0.017	4

注：“—”表示缺少准确的信息，“+”表示以上。

表 2 沉船海难信息和对应的再分析风浪、涌浪数据

Tab.2 Shipwreck information and corresponding re-analysis wind wave and swell data

序号	时间 (年/月/日/时)	航向 /°	风浪高 /m	风浪向 /°	第一涌浪高 /m	第一涌浪向 /°	风浪向与涌浪向 夹角/°	风浪向与航向 夹角/°
1	2020/12/30/16	走锚	4.5	342	1.7	49	67	0
2	2019/9/5/21	300	2.0	147	2.5	223	76	133
3	2018/1/27/08	0	2.2	61	1.4	349	72	61
4	2018/1/9/01	抛锚	1.7	328	1.2	170	158	0
5	2017/5/2/21	209	1.6	114	1.4	132	18	95
6	2020/2/17/02	280	2.5	339	1.2	331	8	59
7	2021/3/2/08	0	3.5	356	1.4	84	88	4
8	2018/9/12/07	180	0.6	78	1.2	99	21	102
9	2016/2/25/02	抛锚	2.9	30	2.2	93	63	0

注：当船舶出现走锚或抛锚情况时，默认航向与风浪向一致。

造波技术建立了方形波浪的数值模拟研究,结果表明,同等条件下,在双向波(迎着船头和右弦 90°)和单向波(右弦 45°)中航行时,船舶的纵摇和垂荡幅值相差不大,但双向波中船舶的横摇运动明显增加,即横向波浪使得船舶的横摇更剧烈。因此,风浪向与航向的夹角、风浪向与涌浪向的夹角增大到接近 90° ,产生的横摇容易导致船舶翻沉。

5 代表性沉船海难个例分析

7号沉船海难发生时,有效波高超过 3.5 m ,处于波面坡度变化的峰值,风浪向和第一涌浪向夹角接近 90° ,该事件具有很好的代表性,因此以该事件作为代表性个例进行分析。2021年3月2日08时,广东省深圳市联成远洋渔业有限公司的远洋渔船“深联成707”在途径浙江省温州市东部海域时(见

图1中“*”位置)遇险翻船并沉没,船上的10名船员5人获救,5人失踪^[13]。

5.1 天气和海况背景

分析事故发生时的天气和海况背景,有助于了解海难发生时的总体情况,以及海难的时空区位特征与周边环境的关联性。从天气背景再分析场可以看出(见图4),2021年3月1日20时,大陆冷高压前锋到达东海中北部,接近事故海域,长江口外海气压梯度较大,偏北风速度达12 m/s以上;东海南部—台湾海峡尚未受到冷高压影响,气压梯度和风速较小。2日08时,大陆冷高压已经南压至台湾海峡,整个东海海域气压梯度较大,有大范围的偏北大风。

从图5可知,2021年3月1日20时,东海大部主要受从西北太平洋西传的、谱峰周期大于10 s的涌浪影响,浪高2 m左右。2日08时,东海大部已经受从北往南的、谱峰周期为7~8 s的风浪影响,浪高超过3.5 m,事故海域在波浪高值区的中部,海况恶劣。

5.2 风和浪及波陡时间序列

从事故海域海面10 m风速和有效波高(风浪和涌浪的混合浪)的变化情况看(见图6),从3月1日

20时开始,风、浪迅速增大,在海难发生的2日08时前后达到最大值,海况突变性较大。具体来看,10 m风速从1日18时的3.1 m/s增大至2日06时的14.9 m/s(蒲福风力7级),2日08时风速达14.3 m/s,接近风速最大值。有效波高从1日21时的1.9 m增大到2日08时的3.8 m,接近有效波高最大值。从文中第3部分浮标实测资料的检验情况看,再分析结果会对浪高较低时的预报偏高,浪高较高时的预报偏低,因此现场的实际海况比ERA5再分析结果的变化更为剧烈。TOFFOLI等^[9]的研究表明,80%的船舶事故发生前后,波浪参数的变化较大。因此,本次海况的突变且变化至最恶劣的状态,可能是海难发生的重要原因。

从图6中波面坡度的时间序列看,受天气系统影响,事故海域的波面坡度从3月1日20时起逐渐增大,事故发生时波面坡度最大。因此,较高且接近峰值的波面坡度,也是船舶翻沉的重要原因。

基于ERA5的有效波高和平均跨零波周期,计算了事故海域的波陡时间序列(见图6)。随着风、浪的不断增大,波陡随之增加。与波面坡度相比,波陡在3月2日02时已经达到峰值,08时虽然略有降低,但是也接近最陡状态;而波面坡度在2日02时达到一个小峰值,但不是最大值。由于翻船沉没

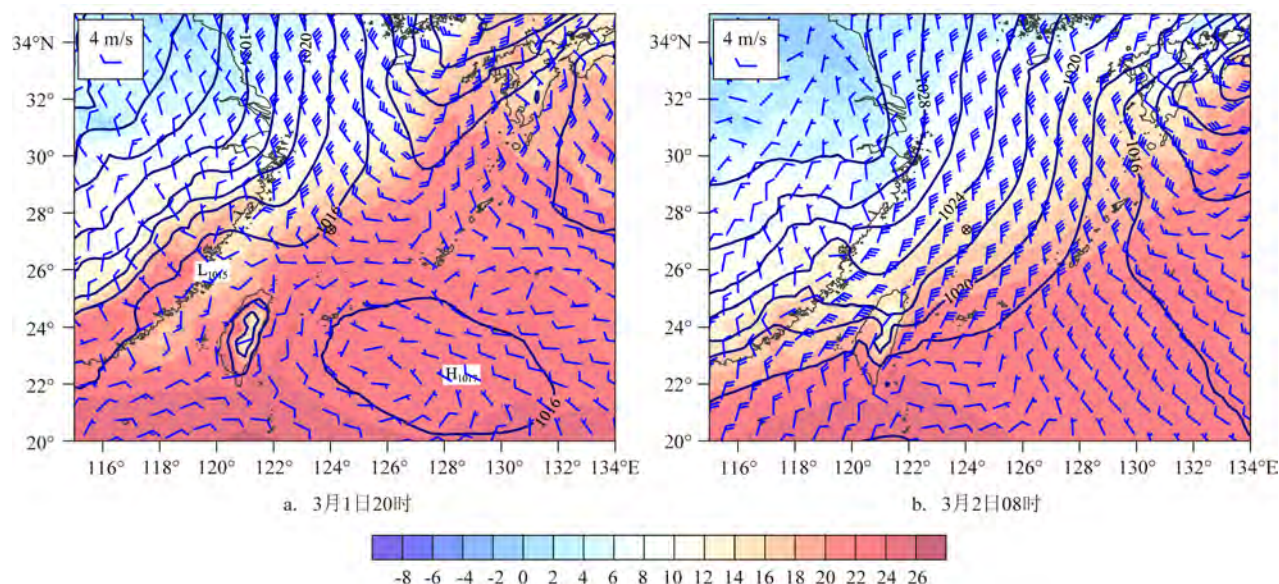


图4 地面2 m气温(填色,单位:℃)、海平面气压(黑粗线,单位:hPa)、海面风(风羽,单位:m/s)再分析大图

Fig.4 Large-scale view of air temperature at 2 m above the ground (color shaded, unit:℃), sea level pressure (black thick line, unit:hPa), and sea surface wind (wind barb, unit:m/s) reanalysis

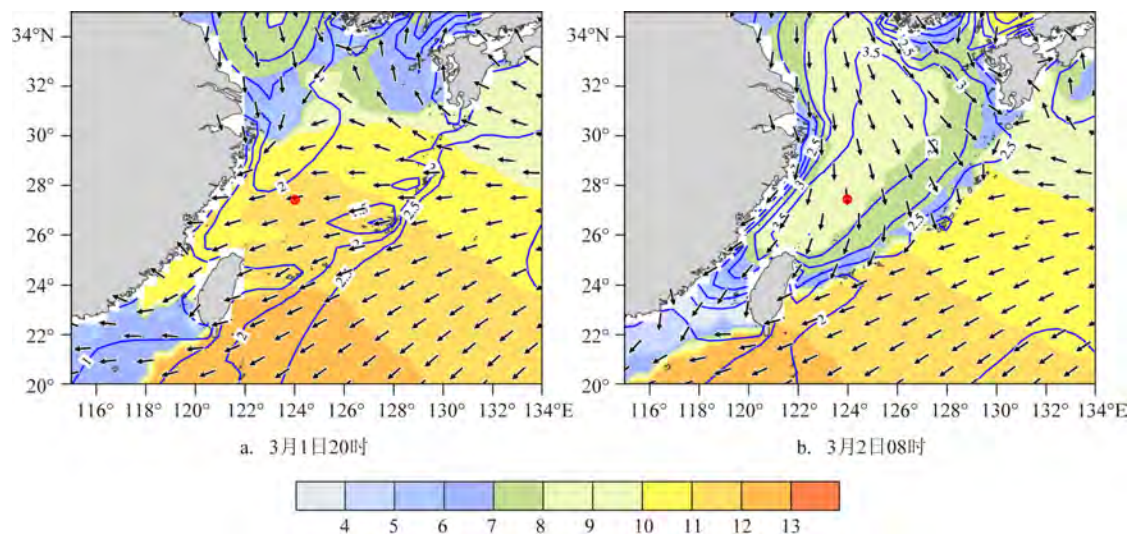


图5 谱峰周期(填色,单位:s)、有效波高(单位:m)和平均波向再分析大图

Fig.5 Large-scale view of spectral peak wave period (color shaded, unit:s), significant wave height (unit:m) and average wave direction reanalysis

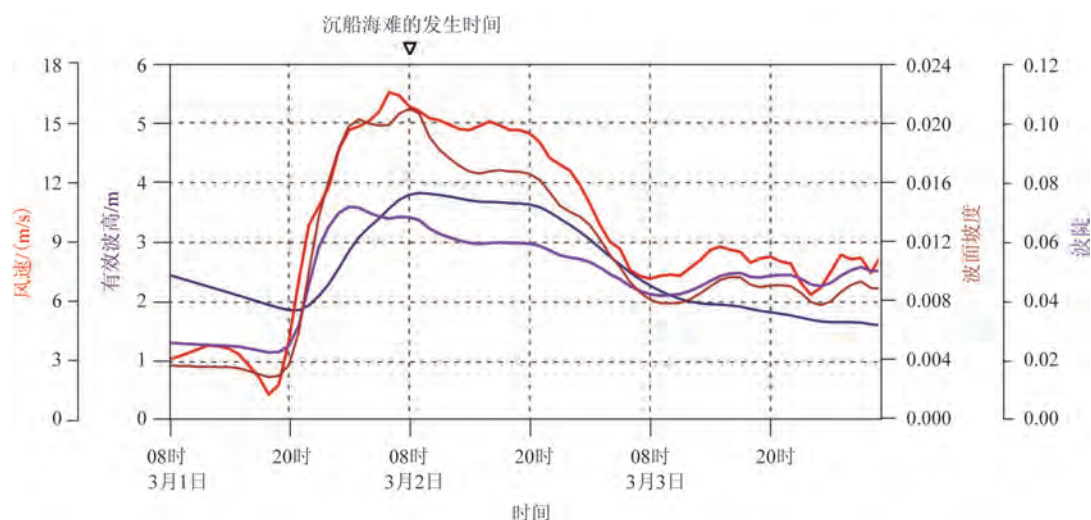


图6 海难发生海域海面风速、有效波高、波面坡度和波陡时间序列

Fig.6 Time series of sea surface wind speed, significant wave height, wave surface slope and wave steepness in the sea area where the shipwreck occurs

事故发生在08时前后,因此可以初步认为波面坡度对波的陡度的描述可能更接近真实情况。

5.3 风浪向和涌浪向交角情况

从该海域风浪矢量变化情况看(见图7),3月1日20时—2日08时南向波浪持续增大,是海浪受南下高压引起的北大风作用的结果。需要特别注意的是,2日08时—3日20时均能够看到西向的涌浪,由5.1节已知,该涌浪由西北太平洋向西传播

(见图5a)。该站的海浪时间序列说明涌浪持续时间较长,也就是说,在海难发生时,渔船受到猛烈的南向浪剧烈颠簸的同时,也受到西向浪的剧烈拍打。因此,在2日08时前后,“深联成707”受到两股方向垂直的浪的影响,横摇可能很剧烈。

综上分析可知,“深联成707”在夜间—早晨的航行中,遇到突变的天气系统,风浪突然增大,波陡不断增加,同时受到两股垂直的波浪影响,船舶发生剧烈的纵摇、垂荡和横摇,在海况最恶劣的时候,

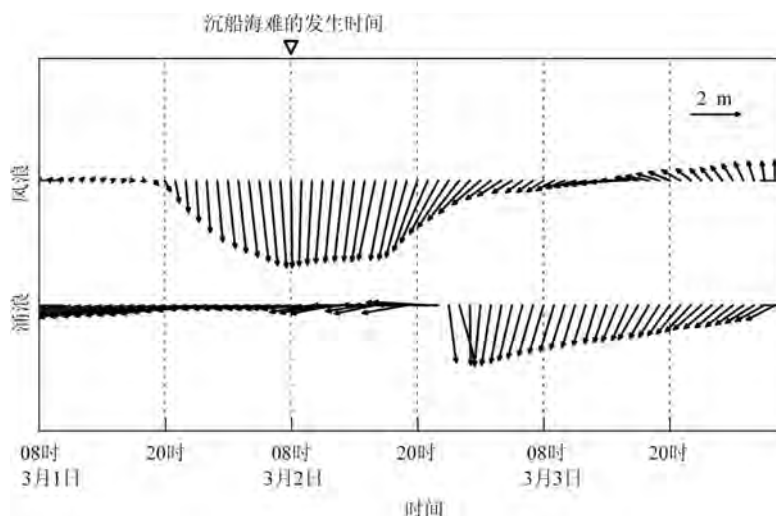


图7 沉船海难发生海域风浪矢量和第一涌浪分区涌浪矢量的时间序列

Fig.7 Time series of wind wave vector and swell vector of the first swell zone in the sea area where the shipwreck occurs

船舶发生翻沉。

6 结果与讨论

经验表明,在大风浪中应合理地操纵船舶来降低波浪对船舶的弯矩和剪力,应使船首与波浪的夹角位于 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间^[18-19]。本文收集的沉船事件中,3个船只的航向与浪向夹角超过 59° ,这涉及到船舶营运管理和操作经验的主观问题。前人的统计研究表明^[9-10],风浪向和涌浪向夹角在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 或以上时,沉船事故的发生概率大大增加。本文基于详细的沉船事故信息与再分析数据的联合分析表明,风浪向和涌浪向夹角在 $60^{\circ}\sim 100^{\circ}$ (即接近垂直)是沉船事故发生的重要客观原因。

本文从精确到时刻的沉船海难发生时间中发现,海难主要发生在夜间和凌晨,因此在该时段相关部门应当加强船舶营运管理,并提醒开船人员加强警戒^[18-19]。有证船舶在设计建造时参照了相关规程,一般情况下不会发生沉船事故^[20]。本文收集的9个沉船海难事故的发生,都伴随了多个不利因素的叠加,例如较差的视野、增大的波高和波陡、航向和风浪向以及风浪向和涌浪向之间较大的夹角,都是船舶航行的危险因素。

从气候特征看,浙江东部海域的海流以黑潮支流为主,流向从南往北。结合代表性个例分析可知,当内陆高压出海时,北风明显增大。当北风与

自南往北的海流相互作用时,风应力更易引起波陡更大的波浪^[16]。代表性个例分析表明,东海海域受涌浪影响明显,其他文献也有类似结论,例如“海洋石油201”号等多艘铺管船在东海海域进行铺管施工时,受低频涌浪影响横摇运动强烈,严重影响了正常铺管作业^[21-22]。因此,船只在该海域航行时不仅容易遭遇更陡的波浪,而且容易受到风浪和涌浪的双重影响,当风浪方向和涌浪方向接近垂直时,可能引起船舶翻沉。

海洋气象预警服务人员和海上船舶工作人员应该对灾害性海浪特征予以重视。目前,渔船等海上作业单位对海洋气象预报产品的接收和使用还不够全面,海洋气象预报业务能力在综合观测监测和精细化预报等方面仍存在明显不足^[23-24]。例如,海事保障服务产品内容过于宽泛和模糊^[24],对传统的波高和波浪周期等预报要素的灾害警示性不足^[25]。随着海洋强国战略在我国的大力实施,海洋经济在整个国民经济中所占比重越来越重大,多次沉船海难的发生给社会敲响了警钟,海洋灾害应急管理体制、机制和保障体系亟待进一步完善、优化和强化^[15]。

7 结论

本文利用欧洲中期天气预报中心的再分析数据、东海的定点浮标数据、日本气象厅的漂流浮标

数据,结合浙江省海事局公开的详细的海难事故调查报告和收集到的1个渔船沉船海难事故,对9起沉船海难事故中海浪的灾害性特征进行了总结,并结合代表性个例进行了分析。主要结论如下:

(1) ERA5再分析资料在浙江东部海域具有很好的代表性,模拟波高较浮标观测值在高值段略偏低。

(2) 沉船海难事故的发生往往伴随着波高或波陡的增大,波高一般较12 h前增大0.5 m以上,波面坡度距离其变化的峰值在3 h以内。波高或波陡的增大会引起船舶的纵摇和垂摇加剧。

(3) 沉船海难事故的发生均伴随着风浪向与航向或风浪向与涌浪向的夹角约为 $60^{\circ}\sim 100^{\circ}$,即船与一种浪向接近垂直,这使得船舶横摇剧烈。

(4) 代表性个例分析表明,浙江东部海域由南往北的海流和由北往南的风,容易造成该海域波浪波陡增大;该海域还易受西北太平洋西传涌浪的影响,当风浪向和涌浪向接近垂直时,会对船舶航行构成很大威胁。

(5) 沉船海难普遍发生在深夜一早晨,该时段操作视野差,船员处于疲劳期。对比数据还表明,再分析数据中从二维谱提取的波面坡度,可能比常规换算的波陡更接近真实情况。

沉船海难的发生,既包括主观因素,也包括波高、波陡和浪向等客观因素,有时是两者叠加共同影响的结果。为减少类似海难事件的发生,有关部门需加强船舶营运监管,开展更精细化的观测预报,为海上作业和交通等提供更具针对性的预警服务。

本文的分析仅仅针对浙江东部海域的9个海难事件,虽有一定的代表性,但依然存在很多不足。此外,因为船舶摇摆周期与海浪周期相近而发生共振,或者遇到巨大孤立波等,都可能造成船舶倾覆,这些因素有待进一步探究。

参考文献:

- [1] 许富祥. 海浪预报知识讲座 第一讲 海浪及其危害[J]. 海洋预报, 2001, 18(1): 82-84.
XU F X. Lectures on wave forecasting, lecture 1, ocean waves and their hazards[J]. Marine Forecasts, 2001, 18(1): 82-84.
- [2] 中华人民共和国自然资源部. 数据/数据服务/海洋/公报公告: 中国海洋灾害公报[EB/OL]. [2021-09-10]. <http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgb/zghyzhgb/>.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Data/data services/ocean/bulletin: China marine disaster bulletin [EB/OL]. [2021-09-10]. <http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgb/zghyzhgb/>.
- [3] 中华人民共和国农业农村部. 2020年全国渔业经济统计公报[EB/OL]. (2021-07-28)[2021-09-10]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202107/t20210728_6372958.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. 2020 national fishery economic statistical bulletin[EB/OL]. (2021-07-28)[2021-09-10]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202107/t20210728_6372958.htm.
- [4] International Maritime Organization. Standards for ship manoeuvrability[S]. Resolution MSC.137(76). London: International Maritime Organization, 2002.
- [5] DE KAT J O, PAULLING J R. The simulation of ship motions and capsizing in severe seas[J]. Transaction-Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989, 97: 139-168.
- [6] HAMAMOTO M, KIM Y S. A new coordinate system and the equations describing manoeuvring motion of a ship in waves[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1993, 1993 (173): 209-220.
- [7] 苏绍娟, 兰蔚, 王天霖, 等. 海洋信息环境下船舶耐波性指标研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(5): 55-60.
SU S J, LAN W, WANG T L, et al. Ship seakeeping analysis based on ocean information environment[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(5): 55-60.
- [8] GUNSON J, LEHNER S. Extreme wave conditions from wave model hindcasts and from synthetic aperture radar images[J]. Gregersen, 2001.
- [9] TOFFOLI A, LEFÈVRE J M, BITNER-GREGERSEN E, et al. Towards the identification of warning criteria: analysis of a ship accident database[J]. Applied Ocean Research, 2005, 27(6): 281-291.
- [10] 魏永亮, 高志一, 唐泽艳, 等. 基于SAR波模式数据的沉船事故海浪要素分析[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 946-952.
WEI Y L, GAO Z Y, TANG Z Y, et al. Analysis of wave factors in shipwreck accidents based on SAR wave mode data[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(6): 946-952.
- [11] OLAGNON M, ISEGHEM S V. Some cases of observed rogue waves and an attempt to characterize their occurrence conditions [C]//Ifremer, Brest, Rogue Waves 2000. 2001: 105-116.
- [12] 中华人民共和国浙江海事局. 政府信息公开/法定主动公开内容/水上安全事故[EB/OL]. [2022-02-28]. <https://www.zj.msa.gov.cn/ZJ/zwgk/gkml/xzqz/?4468>.
Zhejiang Maritime Safety Bureau of the People's Republic of China. Government information disclosure / statutory active disclosure content/water safety accidents[EB/OL]. [2022-02-28]. <https://www.zj.msa.gov.cn/ZJ/zwgk/gkml/xzqz/?4468>.
- [13] 裴剑飞. 温州以东海域一艘远洋渔船翻扣 目前5人获救5人失踪[EB/OL]. [2022-02-28]. <https://www.bjnews.com.cn/detail/161468599115328.html>.

- PEI J F. In the waters east of Wenzhou, an ocean-going fishing boat capsized; At present, five people have been rescued and five are missing[EB/OL]. [2022-02-28]. <https://www.bjnews.com.cn/detail/161468599115328.html>.
- [14] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present[EB/OL]. (2018-06-14) [2021-09-10]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
- [15] Japan Meteorological Agency. Ocean data buoy observations[EB/OL]. [2021-09-10]. https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/vessel_obs/data-report/html/buoy/buoy_e.php.
- [16] World Meteorological Organization. Guide to wave analysis and forecasting[M]. Geneva: World Meteorological Organization, 1998.
- [17] 黄松兴, 焦甲龙, 陈超核. 方形波浪中船舶运动特性及安全航行策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(8): 1473-1481.
- HUANG S X, JIAO J L, CHEN C H. Ship motion responses in cross wave and related safe navigation strategy[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(8): 1473-1481.
- [18] 王宁. 世界海难事故现状分析及应对措施[J]. 世界海运, 2010, 33(7): 70-71.
- WANG N. Analysis on world's shipwreck and countermeasures thereon[J]. World Shipping, 2010, 33(7): 70-71.
- [19] 赵月林, 夏国忠. 大型散货船在大风浪中的安全问题[J]. 世界海运, 2000(1): 20-21.
- ZHAO Y L, XIA G Z. Safety of large bulk carriers in high winds and waves[J]. World Shipping, 2000(1): 20-21.
- [20] 莫建. 波浪中船舶六自由度操纵运动数值仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- MO J. Numerical simulation of ship manoeuvring motion with six degrees of freedom in waves[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [21] 闫澍旺, 李嘉, 雷震名, 等. 涌浪环境中铺管船横摇机理及模型试验研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(4): 16-22, 46.
- YAN S W, LI J, LEI Z M, et al. Mechanism and model test research of pipelay vessel rolling affected by swells[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(4): 16-22, 46.
- [22] 张广磊, 刘旭平, 杨小龙, 等. 中国东海涌浪对浮托设计的影响[J]. 船海工程, 2017, 46(5): 42-45.
- ZHANG G L, LIU X P, YANG X L, et al. On floatover technology in swell wave environment of East China Sea[J]. Ship & Ocean Engineering, 2017, 46(5): 42-45.
- [23] 黄彬, 赵伟. 国家级海洋气象业务现状及发展趋势[J]. 气象科技进展, 2017, 7(4): 53-59.
- HUANG B, ZHAO W. Current status and development trend of national marine meteorological service[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2017, 7(4): 53-59.
- [24] 刘大刚, 吴彬贵, 解以扬, 等. 海事气象保障服务现状及发展趋势[J]. 中国航海, 2014, 37(1): 131-135.
- LIU D G, WU B G, XIE Y Y, et al. Present state and development trend of maritime meteorological support service[J]. Navigation of China, 2014, 37(1): 131-135.
- [25] 许琳琳. 我国海洋灾害应急管理体系研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- XU L L. Study on marine disaster emergency management system in China[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.

Analysis of the disastrous characteristics of waves for shipwrecks in the eastern waters of Zhejiang province

CHEN Jianqiao^{1,2,3}, HAN Bo^{1,3*}, YANG Qinghua^{1,3}, LIN Faling², CHEN Jinrui²

(1. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Fujian Marine Forecasts, Fuzhou 350003, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: Using the reanalysis data of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts, the disastrous characteristics of waves during nine shipwreck accidents that occurred in the eastern waters of Zhejiang Province from 2015 to 2021 are analyzed in this paper. The results show that the occurrence of shipwreck accidents is often accompanied by the increase of wave height or wave steepness, which intensifies the pitch and heave of the ship. The wave height increases by more than 0.5 m compared with 12 hours ago when the shipwreck occurs, or the wave surface slope reaches its peak within 3 hours after the occurrence of shipwreck. The shipwreck is also accompanied by an angle of about 60° to 100° between the course and the wind wave direction or between the

wind wave direction and the swell direction, that is, the ship direction is close to perpendicular to a certain wave direction, which causes the ship to roll violently. In addition, this paper also summarizes the process with a representative case of shipwreck accident, and analyzes the reasons for the steep wave surface slope, and large angle between wind wave direction and swell direction.

Key words: shipwreck; wave; wave surface slope; wind wave direction; swell direction