

气旋引发渤海异常增水特征研究

傅赐福¹, 于福江^{1,2}, 吴少华^{1,2}, 董剑希^{1,2}

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

摘 要: 分析了渤海两次由不同强度气旋引发的异常增水过程, 分析结果表明: 当气旋强度强, 影响时间长, 则存在若干周期的异常震荡增水, 位于湾底的潮位站各周期最大增水呈现“跳绳”形态; 反之则可能在一个周期内, 异常增水波便消散。建立渤海异常增水模型, 推导增水波传播速度, 即为开尔文波的形式。两次过程增水理论与实际传播时间平均误差为 1.0 h 和 0.75 h, 说明渤海异常增水波传播符合开尔文波特征。根据气旋强度和辽东湾各站的风暴潮情况, 按照各站间的理论传播时间特征可以有效解决和提高此类风暴潮过程的漏报错报情况。

关键词: 气旋; 异常增水; 开尔文波; 渤海

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)01-0037-07

1 引言

风暴潮是我国频发的重大海洋灾害, 其造成的经济损失从上世纪 90 年代后已有明显增加的趋势, 风暴潮的预报及研究是海洋防灾减灾的重要方向^[1]。经过国内外众多学者几十年的研究揭示了风暴潮发生的主要机理和规律, 由于剧烈的大气扰动, 如强风和气压骤变导致的风暴潮, 此类过程由于具有明显的天气特征, 通过气象要素的预报、预报经验及数值模拟可以较好完成^[2-3]。然而在长期的预报实践中, 由于气旋(台风、温带气旋)过境后, 在无风或离岸风的气象条件下, 我国渤海、黄海、东海沿岸出现过多次异常增水过程, 有些过程的最大异常增水甚至超过气旋引起的主震增水, 出现叠加天文高潮导致沿岸潮位站超过警戒潮位的情况, 由此酿成风暴潮灾害, 引起巨大损失^[4-5]。诸如此类异常增水过程由于没有具备明显征兆, 因此存在较大预报难度。

通常而言, 在气旋(台风、温带气旋)影响沿海时, 由气旋引起的风暴潮会使沿岸不同位置的潮位

站出现明显风暴增水或者明显减水, 当气旋远离开沿岸时, 由于海水受到重力的作用, 增水、减水会在重力作用下以波的形式在沿岸传播。当气旋强度强、尺度大时, 这种波动的振幅较大且时间较长, 在传播过程中受到沿岸摩擦的作用, 振幅逐渐减小直至消失; 而当气旋强度不强、尺度较小时, 这种波动振幅一般不会太大, 且存在的时间较短, 可能在一个传播周期内这种波动就消失了。

国内许多学者对于此类风暴潮做过相应的研究, 杨金湘等^[6]利用 EMD 方法(Empirical Mode Decomposition, 经验模态分解)分析了风暴潮增水并解释东海由热带气旋引发的异常增水, 杨晓君等^[7]针对一次温带气旋引发的渤海异常增水进行深入分析, 易笑园等^[8]分析了天津塘沽由于离岸风引发的二次增水过程, 王培涛等^[9]利用数值模式对渤海黄海温带风暴潮开展了数值预报实验。而本文将重点分析两次气旋引发渤海沿海各潮位站异常增水, 进而建立异常增水传播模型并推导其传播速度, 对其传播时间开展验证及总结, 以期为此类风暴潮预报提供参考。

收稿日期: 2017-07-13; 修回日期: 2017-08-23。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401503)。

作者简介: 傅赐福(1983-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事风暴潮预报及相关研究。E-mail: fucf@nmefc.cn

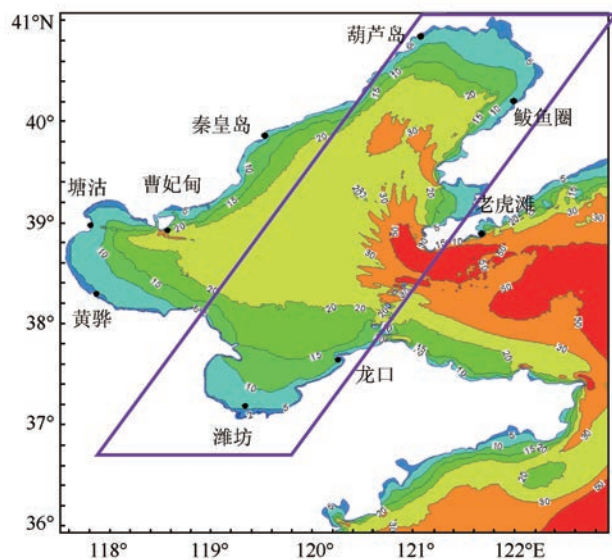


图1 渤海水深及文中涉及潮位站分布

2 气旋引发异常增水个例

2.1 “20080822”温带气旋致异常增水过程

2008年8月21—22日,受孤立出海气旋影响,渤海海面出现了7级左右的偏东和东北风,天津塘沽站分别于22日06时和18时(北京时,下同)测到456 cm和506 cm的高潮位(渤海水深及文中涉及潮位站分布见图1),而且后一次的高潮位超过前一次。对于此次风暴潮过程中06时的高潮位,预报部门都作了准确的预报,但随着渤海海面转为西北风,考虑到是离岸风,而对18时的高潮位再度超过警戒潮位的情况估计不足。

从天气过程和增水来看(见图2、3),从8月21日上午开始,孤立气旋位于黄淮地区并向东移动,

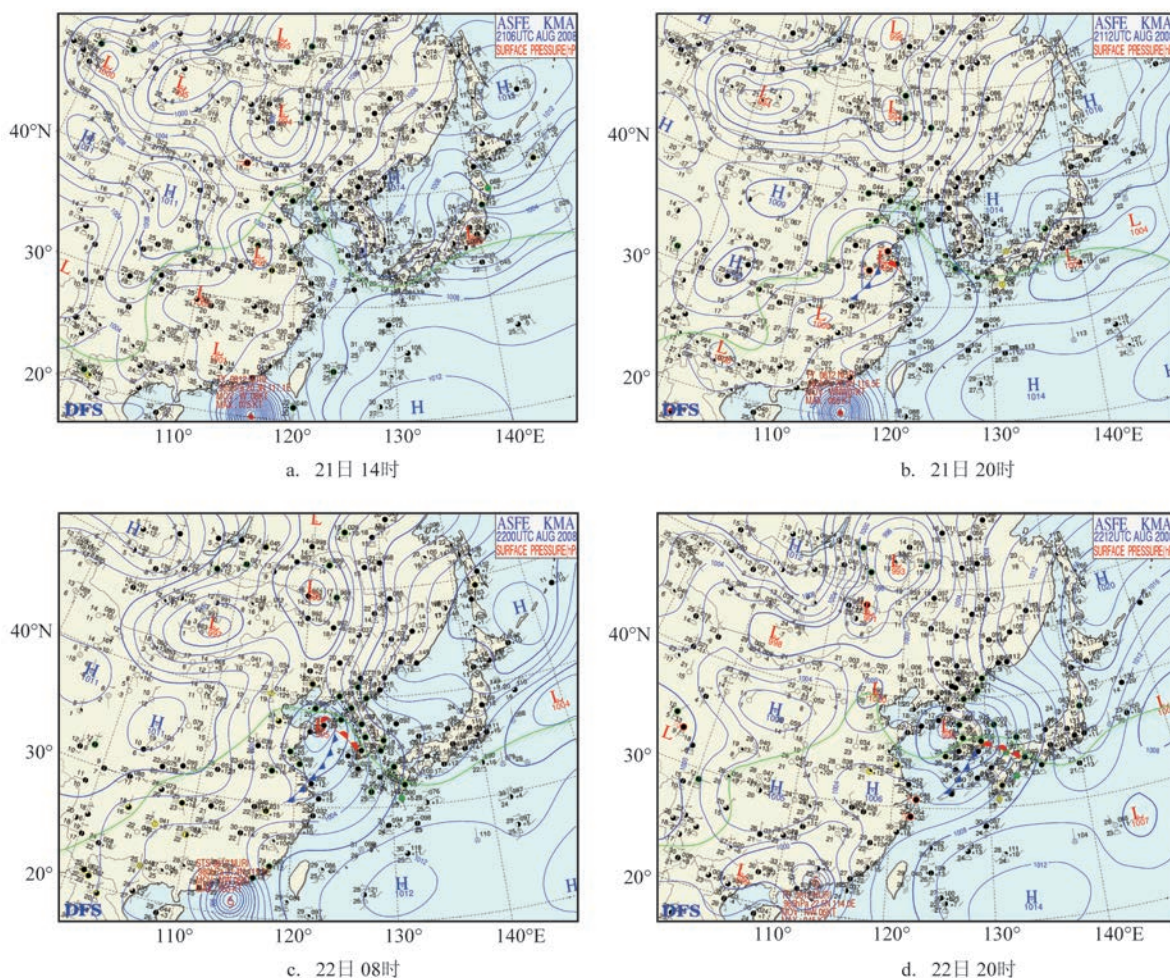


图2 21日和22日东亚地面天气图(资料来自KMA)

渤海持续受偏东风影响,渤海沿海各潮位站均出现持续震荡增水;22日凌晨到上午,孤立气旋已移动至成山头附近并继续向偏东移动,渤海各潮位站均出现受气旋主体影响产生约50 cm的增水;22日中午到23日凌晨,气旋移动至韩国境内,渤海转受西北风且风力大幅减弱,秦皇岛潮位站在22日中午前

后出现最大增水,由于增水失去风力的维持激发增水波并向南传播,从22日中午到夜间前后的一个传播周期,秦皇岛、曹妃甸、塘沽、黄骅和龙口潮位站先后出现了过程最大增水,而由气旋风圈尺度不大,激发的异常增水仅维持了一个传播周期便消散。

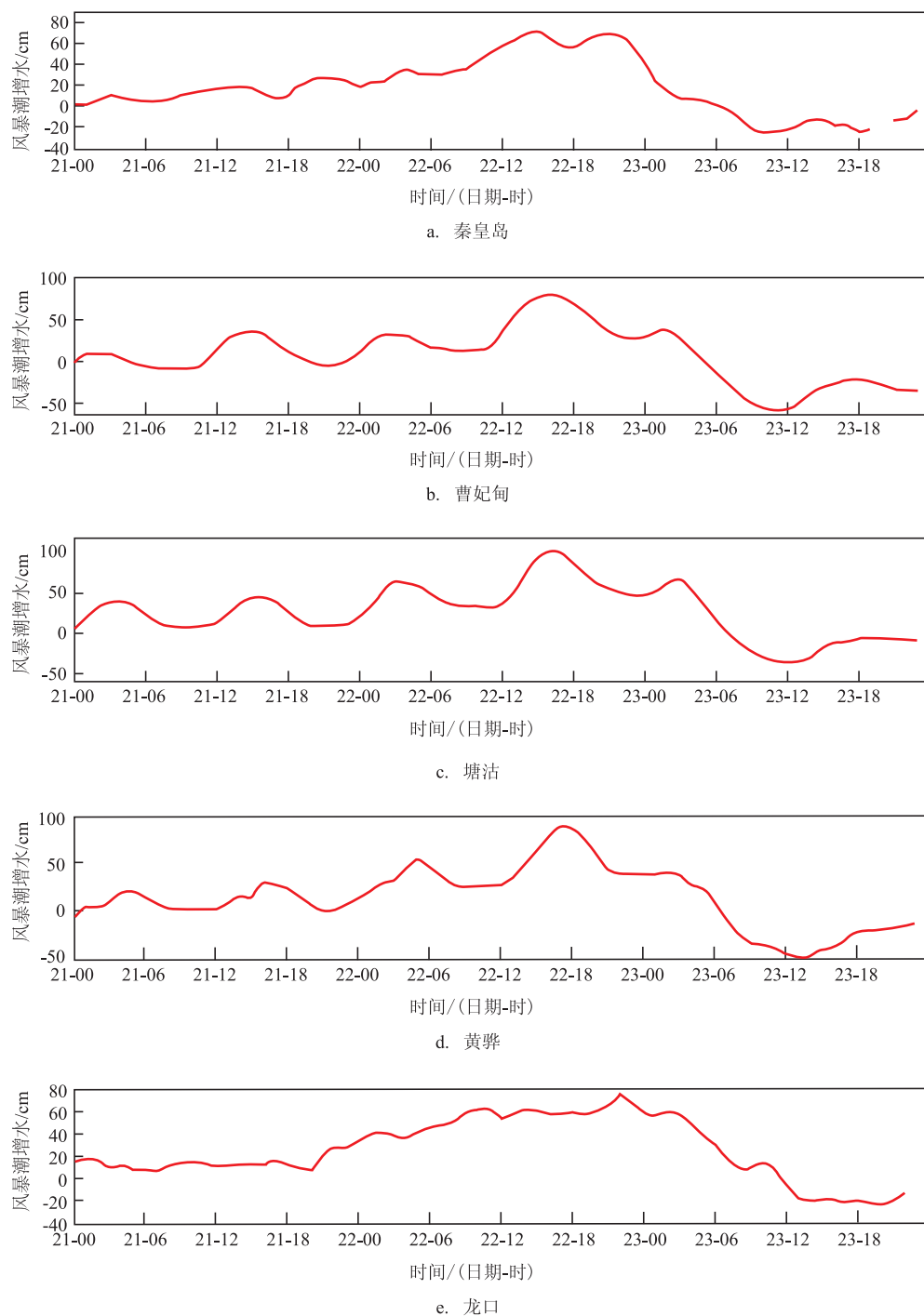


图3 5个潮位站过程增水实测值曲线

2.2 “20160901”温带气旋致异常增水过程

2016年9月1—4日,受热带气旋“狮子山”变性为温带气旋的影响,辽东湾、渤海湾、莱州湾先后出现了震荡增水,上述岸段各潮位站最大增水普遍达到50~100 cm。8月30—31日,受到气旋“狮子山”影响,渤海、黄海以西北风为主,风力达8级,渤海各潮位站均出现较大幅度的减水;9月1日,温带气旋“狮子山”位于我国东北境内,渤海转受西南风作用,渤海各潮位站增水由负转正;9月2—4日,温带气旋“狮子山”消散,渤海无明显天气系统且风力较弱,而此时受到激发异常增水波影响,渤海各潮位站先后出现半日潮周期的震荡增水(以渤海湾、莱州湾各站为代表),共经历了3 d(6个半日潮周期),此增水波才消散。

从天气过程和增水来看(见图4、5),从8月30日—31日夜间,由于“狮子山”不断靠近我国东北,渤海各潮位站出现明显减水,海水由渤海海峡流出;1日,气旋位于我国东北,受到持续西南风作用,渤海各潮位站出现震荡增水,1日上午,老虎滩开始出现最大增水,也是从老虎滩开始,这增水波沿着渤海逆时针传播至龙口站,到2日上午,龙口站出现最大增水,也就是从老虎滩到龙口站的一个传播周期,各站出现了过程最大增水,直到4日夜间,此增水波才减弱消散,可以说影响的时间很长。

从各潮位站的异常增水形态来看,相比于开阔海域的老虎滩和龙口潮位站,位于渤海湾、莱州湾湾底的曹妃甸、塘沽、黄骅和潍坊潮位站增水的半日潮周期性更强,最大增水幅度更大。以塘沽潮位站为例,8月31日出现超过50 cm的减水,在1日转为增水,且出现半日潮周期的增水并于2日凌晨出现87 cm的最大增水,如果把每一个周期的增水极值连接起来,可知1日凌晨出现第一个增水极值,2日凌晨(第三个周期)达到过程最大,而后每个周期增水极值越来越小,形成“跳绳形态”。

3 异常增水模型及传播时间验证

3.1 异常增水模型

渤海属于半封闭内海,沿岸平均垂直水深约

20 m(见图1),垂直水深与水平尺度的比 $D/L \leq 1$,属于超浅海范畴。根据超浅海理论,运动方程和连续方程的零级模式结论:以水位坡度变大的水平压强梯度力与湍粘性力和科氏力平衡,受到科氏力作用,海水向其右侧移动,此时海水的流动,也就是异常增水波即为前进长波—开尔文波形式逆时针流动。根据沿岸开尔文波理论,假设向垂直海岸为 x 方向,向平行海岸为 y 方向,那么垂直平均的连续方程和动量方程依次为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{H} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (3)$$

由于垂直海岸为刚壁条件,则 $u=0$,则上述3个方程简化为:

$$\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{H} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (4)$$

$$fv = g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (6)$$

将式(4)对 y 求导,并将式(6)代入可得到:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = gH \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (7)$$

由此得出开尔文波的传播速度: $c = \sqrt{gH}$,也就是重力波的形式,可以看出开尔文波传播速度只与海面深度有关。假设开尔文波在渤海传播路径上的平均水深为20 m,则传播速度 $c \approx 50$ km/h。图5是葫芦岛到龙口站岸段开尔文波传播示意,也就是图1中紫色框。当受到增、减水主震阶段海水的堆积,风力减弱、风向转变后在辽东湾湾顶激发开尔文波沿着渤海西岸南下传播,可达龙口附近,当激发的开尔文波能量较大时,此过程会形成逆反馈,渤海南岸之前传播的海水受到重力作用反复震荡,直至在摩擦力作用下能量消散,异常增水波消散。

3.2 传播时间验证

上述两次异常增水过程的增水传播时间是否

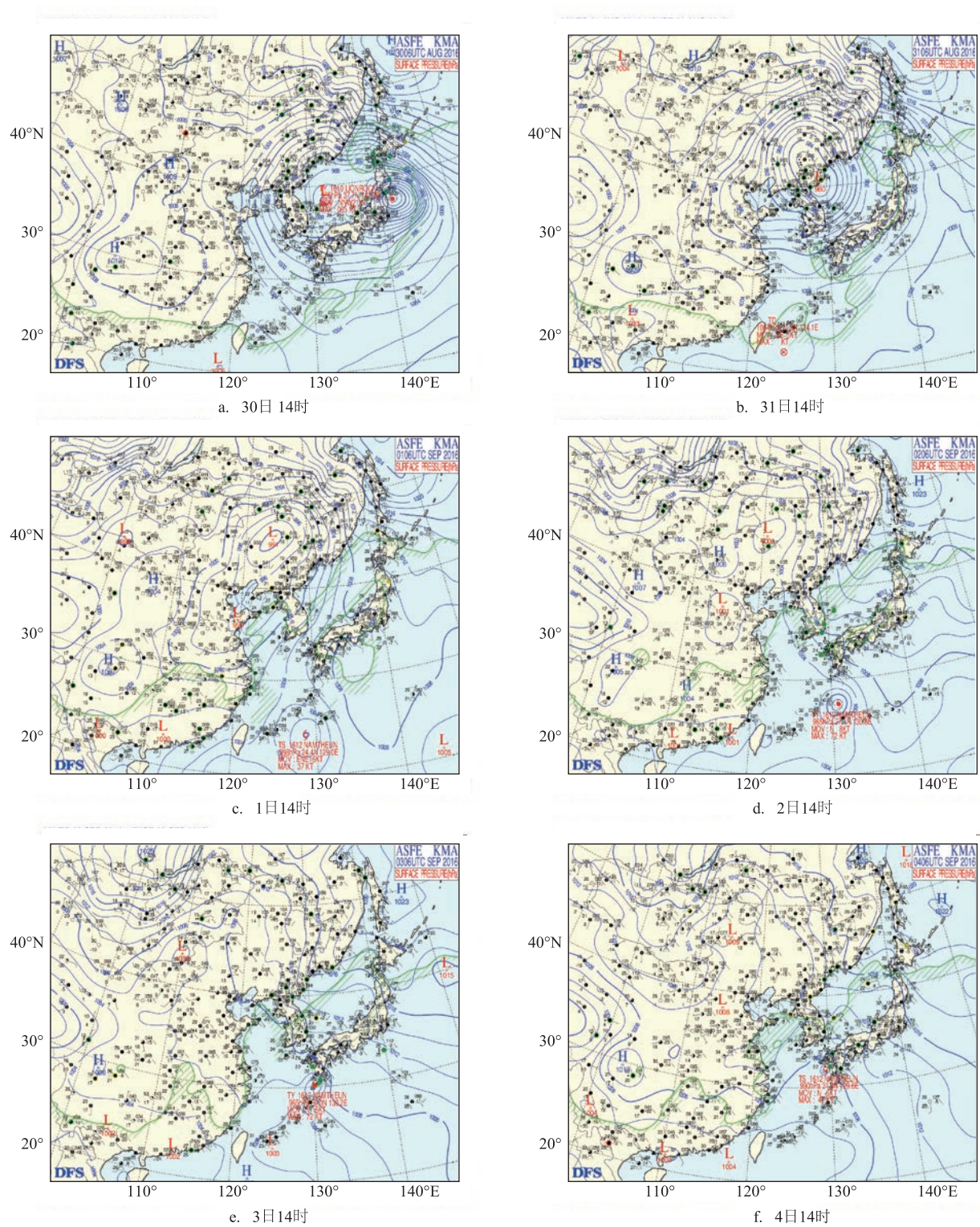


图4 6 d内东亚地面天气图(资料来自KMA)

符合推导后的异常增水传播速度?表1是“20080822”温带气旋过程秦皇岛至龙口各岸段内

理论与实测传播时间对比。从各岸段开尔文波实测的传播时间来看,平均误差为1 h,与理论传播时

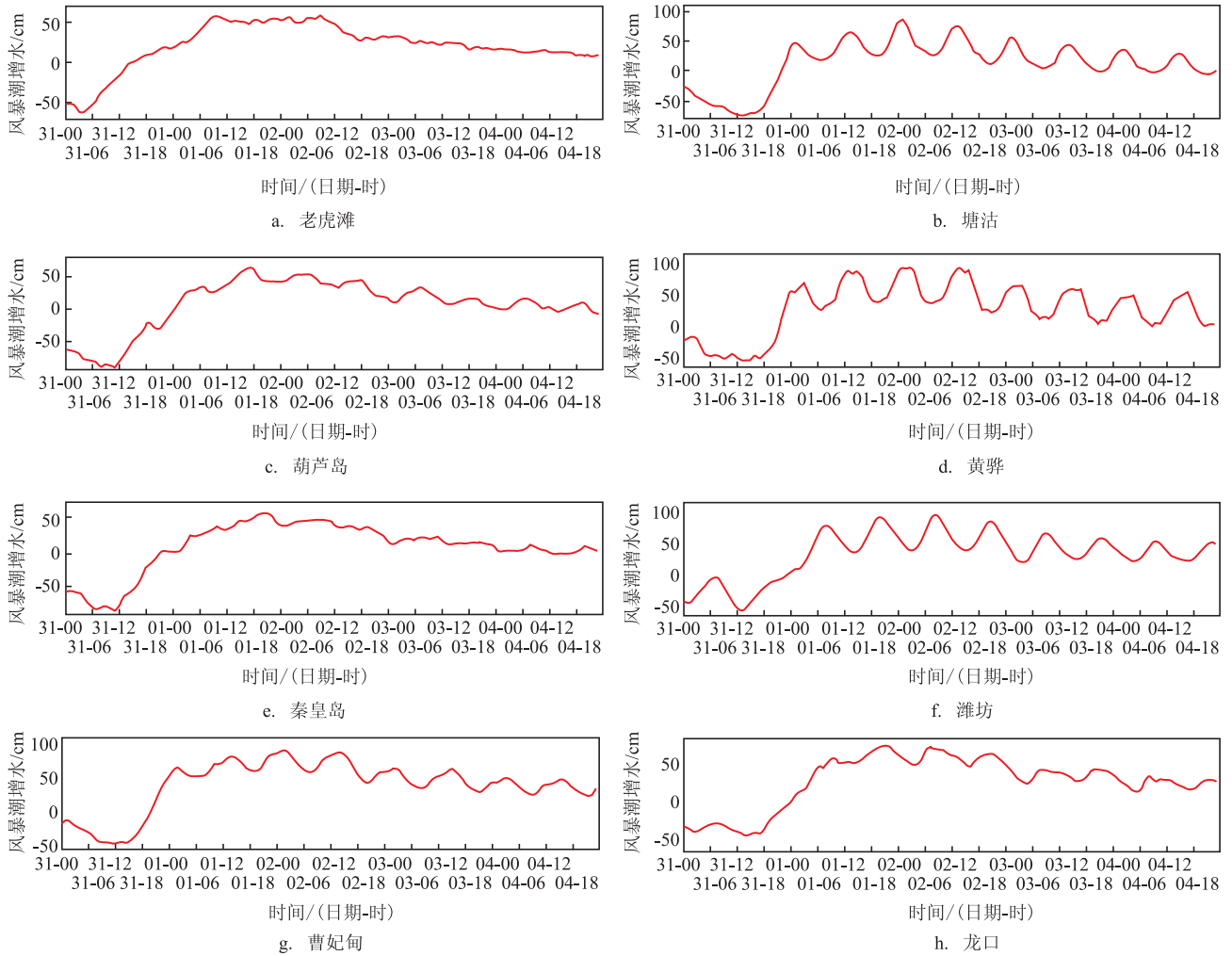


图5 8个潮位站过程增水曲线

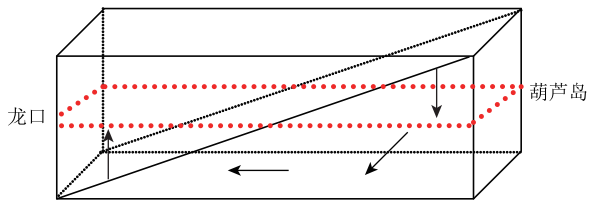


图6 渤海局部岸段开尔文波传播示意

表1 秦皇岛至龙口各岸段内理论与实测传播时间对比

岸段	理论传播 时间/h	实测传播 时间/h	平均误差 /h
秦皇岛-曹妃甸	3	2	1
曹妃甸-塘沽	2	1	1
塘沽-黄骅	2	1	1
黄骅-龙口	7	6	1
平均			1

间基本吻合。

表2是“20160901”温带气旋过程老虎滩至龙口各岸段内理论与实测传播时间对比。从各岸段的

表2 老虎滩至龙口各岸段内理论与实测传播时间对比

岸段	理论传播 时间/h	实测传播 时间/h	平均误差 /h
老虎滩-鲅鱼圈	6	6	0
鲅鱼圈-葫芦岛	3	2	1
葫芦岛-秦皇岛	3	4	1
秦皇岛-曹妃甸	3	4	1
曹妃甸-塘沽	2	1	1
塘沽-黄骅	2	2	0
黄骅-潍坊	5	6	1
潍坊-龙口	2	1	1
平均			0.75

开尔文波实测传播时间来看,平均误差为0.75 h,也与理论传播时间基本吻合。

从这两次不同强度的气旋致异常增水过程产生的增水传播时间对比来看,说明属于超浅海范畴的渤海异常增水波传播符合开尔文波特征。

4 结论

(1) 本文详细描述了渤海两次由不同强度气旋引发的异常增水过程。当气旋强度强,影响时间长,则存在若干周期的异常震荡增水,位于湾底的潮位站各周期最大增水呈现“跳绳形态”,在传播过程中受到沿岸摩擦的作用,振幅逐渐减小直至消失;当气旋强度弱,影响时间短,则可能在一个周期内,异常增水波便消散;

(2) 建立渤海异常增水模型,推导增水波传播速度,即为开尔文波的形式。两次过程增水理论与实际传播时间平均误差为1 h和0.75 h,说明属于超浅海范畴的渤海异常增水波传播符合开尔文波特征;

(3) 在此类气旋引发异常增水的预报过程中,根据气旋强度和辽东湾各站的增水情况,按照各站间的理论传播时间特征开展风暴潮预报,可以有效解决和提高此类风暴潮过程的漏报错报情况。

参考文献:

- [1] 王喜年. 全球海洋的风暴潮灾害概况[J]. 海洋预报, 1993, 10(1): 30-36.
- [2] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 241.
- [3] 王喜年. 海洋灾害及预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 43-88.
- [4] 周玲, 高焕臣. 渤、黄海沿岸潮灾性质分析[J]. 海洋预报, 1993, 10(1): 37-39.
- [5] 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.
- [6] 杨金湘, 袁方超, 李郅明, 等. EMD方法在中国沿岸风暴潮增水分析中的应用[J]. 海洋通报, 2016, 35(2): 157-169.
- [7] 杨晓君, 何金海, 吕江津, 等. 对一次温带气旋引发渤海风暴潮过程的数值模拟[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(4): 61-65.
- [8] 易笑园, 李锡华, 王秀娟. 2004年9月15日天津沿海潮位二次超过警戒水位的成因分析[J]. 海洋通报, 2006, 25(3): 7-12.
- [9] 王培涛, 董剑希, 赵联大, 等. 黄渤海精细化温带风暴潮数值预报模式研究及应用[J]. 海洋预报, 2010, 27(4): 1-8.

Study on the characteristic of abnormal storm surge caused by cyclone in the Bohai sea

FU Ci-fu¹, YU Fu-jiang^{1,2}, WU Shao-hua^{1,2}, DONG Jian-xi^{1,2}

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

Abstract: Abnormal storm surge caused by two cyclones under different intensity was analyzed in the paper. The results showed that under high intensity and long-term influence of cyclone, there would be several cycles of abnormal storm surge, and the peak storm surge of tidal gauges which located at the bottom of the Bay in each cycle presented a “Jump rope” shape. The abnormal storm surge would bedisappeared in a cycle. The model of abnormal storm surge in the Bohai sea was established, and the wave propagation velocity was deduced, that was Kelvin wave form. The average errors of the two cyclone processes compared with the observations were 1.0 and 0.75 hour respectively, which indicated that the abnormal increase wave propagation characteristic accorded with Kelvin wave in the Bohai Sea. According to the cyclone intensity, the storm surge at Liaodong Bay tidal gauges and the theoretical propagation time between the tidal gauges, it could effectively solve and improve the storm surge forecasting.

Key words: cyclone; abnormal storm surge; Kelvin wave; Bohai sea