

# 气压扰动时空特征参数对港湾共振的影响

孙秋艺, 牛小静\*

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:**为研究运动大气扰动的时空特征要素对港湾共振的影响,本文以简化的气压扰动和海岸港湾物理模型为对象,探究气压扰动在不同运动方向、登陆点位置和作用时长情境下的港内波动分布规律。研究表明:气压扰动在接近沿岸运动时港内水体响应最剧烈;随着运动方向与海岸线夹角绝对值增大,波动总体呈减弱趋势;气压扰动向岸运动比离岸运动更能够引起更加显著的波动;当气压扰动登陆先于掠过港湾时刻,更易在港湾内产生更强烈的波动;中长历时气压扰动引起的港内波动比短历时气压扰动更具有威胁性。研究结论可以为港湾共振预警系统建立提供理论依据。

**关键词:**港湾共振;气压扰动;时空特征参数;气象海啸

**中图分类号:**P731.2;U652.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-3682(2021)03-0178-09

**doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2021.03.002

**引用格式:**SUN Q Y, NIU X J. Impact of moving atmospheric pressure disturbances on harbor resonance[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(3): 178-186. 孙秋艺, 牛小静. 气压扰动时空特征参数对港湾共振的影响[J]. 海岸工程, 2021, 40(3): 178-186.

2021年4月30日,一场罕见的强烈风暴突袭中国江浙沪地区,强风夹带着冰雹从北向南先后掠过江苏各市,在南通一带达到鼎盛<sup>[1]</sup>。强对流天气系统在次日午后逐渐移出中国大陆,跨越东海洋面后到达日本九州西岸,在长崎湾内引发了剧烈的水位振荡。事实上,这并非长崎湾首次受强对流天气影响而发生巨幅水体波动,在1979年、2009年和2019年长崎湾均发生过类似的港湾共振灾害<sup>[2-3]</sup>。

港湾共振是当外海波动频率与港湾固有频率接近时,半封闭海湾中发生的剧烈水体波动响应<sup>[4]</sup>,发生时可能会对近海地区造成较大危害。学界对这一现象的关注由来已久,部分研究重点考察港湾固有频率和平面形状、水深等物理特性的关系<sup>[5]</sup>,通过理论分析和数值模拟的方法评估港湾共振模态<sup>[6-10]</sup>,对工程上港湾平面规划布局设计有指导性意义。但工程措施总是滞后于灾害事故发生,缺乏避险灵活性。另一部分研究致力于分析港湾共振激发因素,从本质上了解外部能量通过水波媒介在局地汇聚的全过程,尝试建立港湾共振预警系统。港湾共振灾害统计分析表明,有较大一部分事件发生在雷暴、飚线等强对流天气时<sup>[11-13]</sup>,这其实也是气象海啸致灾的一种表现。Rabinovich 和 Monserrat 在研究由气象要素诱发港湾共振问题时认为,气压扰动起到相当重要的关键作用<sup>[14]</sup>。气压扰动持续作用在海面上生成周期波浪,将能量从气象系统转移至水体,历史上发生过的多起破坏性灾害与这种机制有关。除了长崎湾,克罗地亚的 Vela Luka 湾<sup>[15]</sup>、荷兰鹿特丹港区<sup>[16]</sup>、西班牙 Ciutadella 港<sup>[17]</sup>和中国山东龙口港<sup>[18]</sup>也发生过类似的气压扰动诱发港湾共振。虽然相关研究大多结合实际案例分析,但是缺乏普遍性的机理研究,很难为建立预警系统提供宏观性建议。

气压扰动作用在海面上产生强迫波需满足一定条件,这些条件可能对诱发港湾共振的气压扰动特征有所限制。经典的 Proudman 共振理论表明,气压运动速度是一个重要的参数,其与当地波速接近时将产生较为显著的水波响应<sup>[19-20]</sup>,此外运动速度还会影响波动的二维形态和能量传递累积过程<sup>[21-22]</sup>。气压在近海沿

收稿日期:2021-06-06

资助项目:国家重点研发计划——滩涂资源承载力评估技术及保护红线划定(2018YFC0407504);国家自然科学基金——气象海啸的诱发机制及预报方法研究(51779125)

作者简介:孙秋艺(1997—),女,硕士研究生,主要从事气象海啸和港湾共振方面研究. E-mail: yzsunqy@163.com

\* 通信作者:牛小静(1981—),女,副教授,博士,主要从事海洋水动力学方面研究. E-mail: nxj@tsinghua.edu.cn

(王 燕 编辑)

岸行进时, Greenspan 共振理论则表明气压的特征尺度对波动发展同样重要<sup>[23-24]</sup>, 只有运动速度和特征尺度特定匹配时才会产生较大的边缘波。Sun 和 Niu 的研究表明, 边缘波极有可能是气压扰动诱发港湾共振的能量传递媒介, 扰动参数会通过改变边缘波的频率和振幅特征, 最终影响港湾共振的发展<sup>[25]</sup>。

现实生活中, 强对流天气在短时内的变化非常复杂, 例如气压以不同的运动路径掠过港湾、气压扰动登陆位置处于港湾邻近陆域或者具有长短不一的作用时长等。本文以简化的海岸港池和气压模型为研究对象, 通过数值实验研究运动气压扰动时空特征参数改变对港湾共振的影响规律, 总结湾内水波响应的基本变化特征, 以期最终能为构建有效的港湾共振预警系统提供依据。

### 1 物理问题分析和模型简化

气压扰动诱发港湾共振这一问题在实际生活中相当复杂, 研究中模型采用具有较高应用率的代表性海岸、港池和气压简化形式, 尝试实现对诱发机制最为本质性的刻画和描述。其中, 气压扰动高斯气压分布形式, 通过调节参数控制其平面形态与关注的中小尺度强对流天气事件较高匹配, 具体表达式见式(1)和式(2)。研究时仅需提供运动速度  $U$ 、特征尺度  $R_m$ 、运动方向  $\theta$  和登陆点位置  $y_d$ , 即可表征气压扰动的空间运动形式。气压扰动的计算式为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - Ut \sin \theta \\ y - Ut \cos \theta \end{bmatrix}, \tag{1}$$

$$P(x_1, y_1, t) = \Delta P \exp\{-[(x_1/\alpha)^2 + (y_1 - y_d)^2]/R_m^2\}, \tag{2}$$

式中:  $x$  和  $y$  为坐标系参数,  $x_1$  和  $y_1$  为气压任意方向运动时旋转坐标系参数;  $t$  为时间;  $P$  为任意位置气压偏离标准值大小;  $\Delta P$  为气压扰动中心的最大偏离值, 研究中假定  $\Delta P$  恒为 1 hPa, 静止状态下引起水面抬升为  $\eta_r = \Delta P/\rho g = 0.01$  m;  $\alpha$  为气压扰动长短轴比, 假设  $\alpha$  恒为 3, 用以描述与飑线或冷锋等较为相近的扁长形气压扰动。本研究中还规定,  $\theta < 0$  表征向岸运动情景,  $\theta > 0$  表征气压扰动离岸运动情景。气压扰动登陆点  $y_d$  指其中心跨越海岸的空间位置, 沿运动方向  $y_d < 0$  表征气压扰动在港池上游登陆, 即气压扰动登陆先于掠过港池;  $y_d > 0$  表征在港池下游登陆, 即气压扰动登陆后于掠过港池。对于沿岸运动时, 作用时间为 1/2 总时长时经过的位置定义为登陆点。研究假定气压扰动在登陆前历时 1 h。

采用斜坡海岸和常水深细长港池的组合地形(图 1), 这种典型组合形式在大多数研究近海水动力变化的模型中均有运用。近海陆架为顺直岸线的斜坡地形, 港池中心线垂直于岸线, 并在港池口门开设外开设入港深槽连通内外水深, 港池布置细节如图 2 所示。实际上, 在后续的研究中, 我们只需要港湾的固有频率作为参数指标在分析中起作用, 而和港湾的平面形状和水深变化并无必要关联。

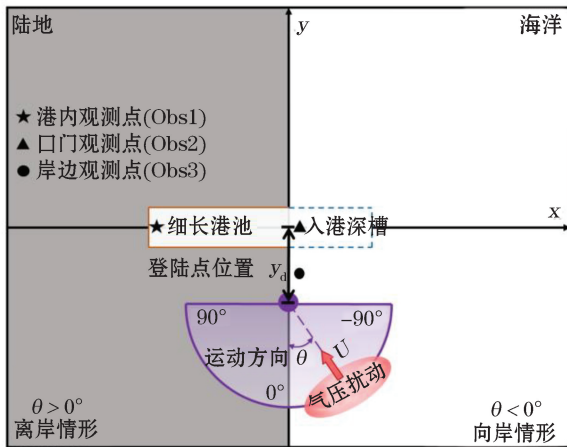


图 1 简化物理模型形式示意图

Fig.1 Simplification of the idealized physical model

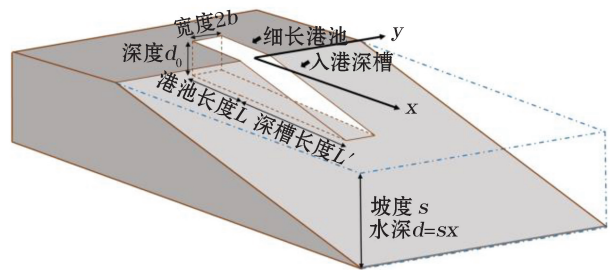


图 2 港池模型细节示意图

Fig.2 Details of the harbor model

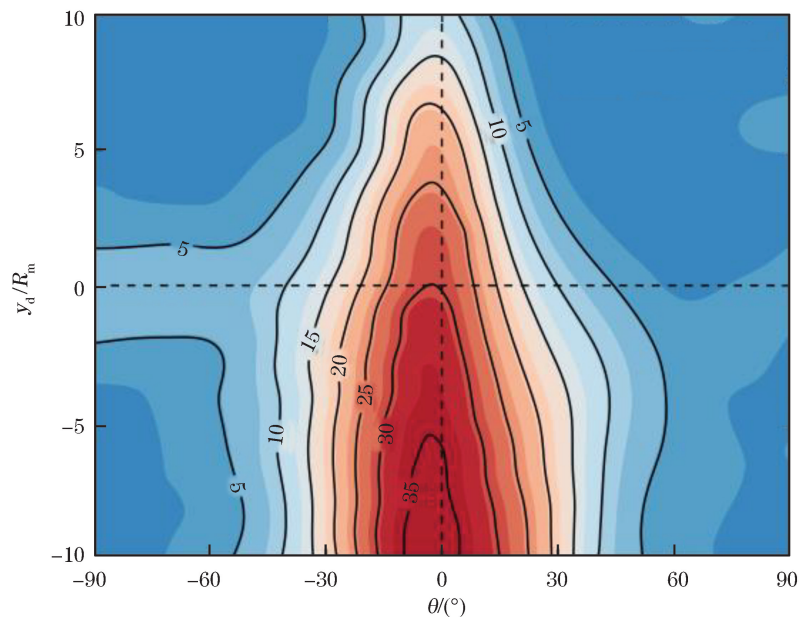
本研究关注气压扰动的时空特征参数改变对港湾共振的影响,首先讨论不同运动方向、登陆点位置下港内水波响应的分布规律,随后探究不同时长条件下响应分布的变化差异。数值实验方面,采用 Delft3D-FLOW 模型,控制方程为基于浅水假定和 Boussinesq 假定的分层三维海洋动力学方程组;数值求解方面,采用经典的 ADI (Alternating Direction Implicit) 方法<sup>[26]</sup>。Delft3D-FLOW 模型被广泛应用于河口和近岸的水动力过程模拟。

## 2 气压扰动空间参数对港湾共振的影响

研究表明<sup>[25]</sup>气压扰动通过边缘波机制激发港湾共振需同时满足 2 个条件:一是气压扰动能激发显著稳定的边缘波,二是波动频率和港湾固有频率接近。这 2 个限定条件在气压扰动空间特征参数改变时同样适用,运动方向和登陆点位置将控制经过港池口门的沿岸边缘波列特征,从而影响港内共振发展程度。物理模型参数的选取参考前人研究<sup>[25]</sup>,如港池长度  $L=1\ 000\ \text{m}$ ,宽度  $2b=100\ \text{m}$ ,水深  $d_0=5\ \text{m}$ ,海岸坡度  $s=1/100$ 。标准算例中,气压扰动为运动速度  $U=11\ \text{m/s}$ ,特征尺度  $R_m=3\ \text{km}$ ,运动方向范围  $\theta=-90^\circ\sim 90^\circ$ ,登陆位置范围  $y_d=-10R_m\sim 10R_m$ 。在 Sun 和 Niu<sup>[25]</sup>的研究中已经验证,该情境下气压扰动可以在港湾内激发较为剧烈的共振。

统计全部算例中港内观测点 Obs1 处的波动响应过程最大值  $\eta_m$  随运动方向  $\theta$  和登陆点位置  $y_d$  的变化,总体上,气压扰动在港池上游登陆比在下游登陆能够引起更加强烈的港内波动,气压扰动向岸运动比离岸运动能够引起更加显著的波动。气压扰动在接近沿岸运动时港内波动响应最激烈,随着运动方向与海岸线夹角增大,波动总体呈减弱趋势。

港内波动响应大小主要受外海沿岸边缘波列发展状态控制。由图 3 可见,当  $y_d/R_m < 0$  时,表示气压扰动登陆先于掠过港湾时刻,港内最大波动响应的等值线几乎平行,并在  $0^\circ$  两侧大致对称分布,这表明气压扰动位于港池上游不同位置处跨越岸线时,理想状态下能量损耗较小时应有相似的港内响应变化规律。当  $y_d/R_m > 0$  时,表示气压扰动登陆后于掠过港湾时刻,等值线同样对称分布,但距离港池一定距离后相交,这表明危险登陆点距离的范围有限制,登陆点最远距离与气压扰动的运动速度和作用在水面上的时长有关。沿着气压扰动的发展路径,气压在下游足够远外登陆时,对港内波动的作用几乎不存在,而当气压扰动斜向接近港池时,这一临界距离会显著变小(图 3)。



注:等值线表征港内最大波动响应

图 3 港内最大波动响应  $\eta_m$  随运动方向  $\theta$  和登陆点位置  $y_d$  的变化

Fig.3 Changes of the maximal fluctuation response  $\eta_m$  inside the harbor with the moving direction  $\theta$  and the landing point position  $y_d$

当  $y_d/R_m=0$  时,可以观察港内波动响应的典型分布(图 4)。运动方向对港内最大波动响应影响的结果表明,当气压扰动接近沿岸运动时,港内相对波动最为剧烈,最大波幅可以超过  $30\eta_r$ 。若考虑港内最大波动响应大于 20 为危险情景,危险运动方向为  $-20^\circ\sim 14^\circ$ ,此时港内和口门的波幅比值始终接近 4,这表明外部扰动激发了相同港池共振模态,如图 4b 所示。港内最大波动响应在运动方向  $\theta=-4^\circ$  时出现极大值,即在接近沿岸的向岸运动情形时出现最危险情景。在与海岸线夹角绝对值  $|\theta|$  相同的情况下,气压扰动向岸运动通常比离岸运动能引起更大的波动响应,这与波动成长过程以及浅化效应、海岸反射有关。

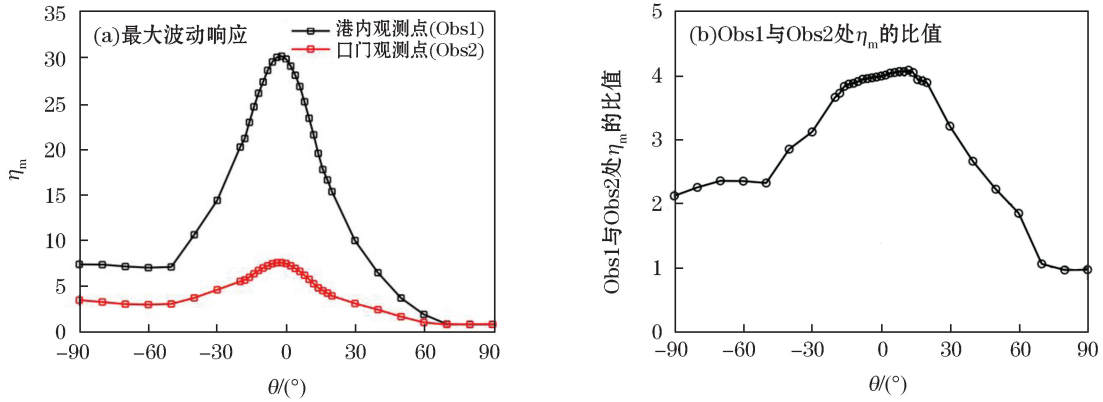


图 4  $y_d/R_m=0$  时不同观测点的最大波动响应分布

Fig.4 The maximal fluctuation responses at different observation points when  $y_d/R_m=0$

选取具有代表性的典型运动方向算例进行分析,可以进一步了解气象系统和水面波动的相互作用,如  $0^\circ$ (气压扰动沿岸运动)、 $\pm 20^\circ$ (气压扰动斜向运动靠近海岸)和  $\pm 90^\circ$ (气压扰动垂直于岸运动)。图 5 和图 6 分别反映了气压扰动沿岸运动时外海波动分布和不同观测点处的水面波动过程,该情境下,跟随沿着海岸线运动的气压扰动后方产生了一系列显著的边缘波,平行于岸传播经过港口口门后,港内水面由平静开始逐渐发展到激烈的波动状态。共振成长稳定后,港内波动响应超过 30,最终达到了十分危险的程度。

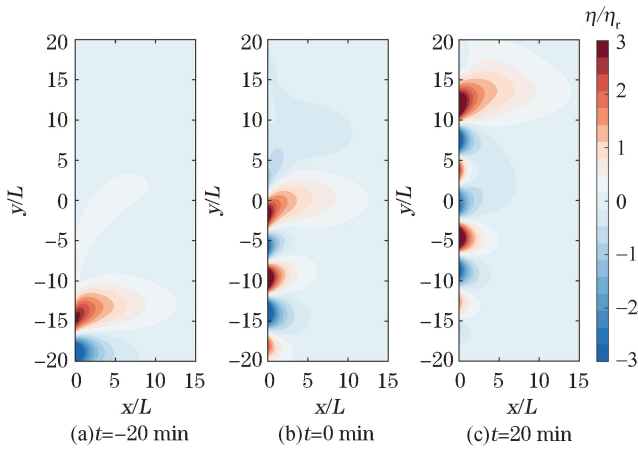


图 5  $\theta=0^\circ$  时外海波动分布

Fig.5 The distribution of water fluctuations outside the harbor when  $\theta=0^\circ$

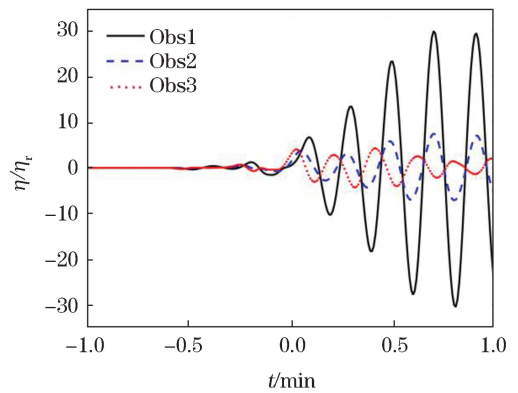


图 6  $\theta=0^\circ$  时不同观测点出水面波动过程

Fig.6 Water fluctuation processes at different observation points when  $\theta=0^\circ$

气压扰动垂向靠近海岸的运动,即  $\theta=90^\circ$  和  $\theta=-90^\circ$  时外海波动分布和不同观测点处的水面波动过程,如图 7~图 10 所示。这 2 种情况下,受到气压扰动形态影响初始的水面波形是单峰的椭圆形强迫波包,此时港内波动响应均不剧烈, $\theta=-90^\circ$  时港内波动响应的最大值接近 7,  $\theta=90^\circ$  时港内波动响应的最大值仅

为 1。垂直于岸传播的单个波包不能形成能量累积,在反射叠加后波动开始衰减,相比于沿岸运动的威胁性小很多。

比较向岸运动和沿岸运动两种情况还可以发现,向岸运动的港内波动持续时间更长,且有较强的先导波动。气压扰动在海面上作用时,除了受控于气压变化范围内的强迫波,还会由于频散效应分离出自由波。自由波在变化的水深中传播速度与气压扰动的运动速度逐渐有差异,最终脱离初始强迫波包,其中水深变浅一侧的自由波传播速度逐渐快于跟随气压扰动移动的强迫波包速度形成先导波动。而在离岸运动时,气压扰动初始作用在港池上有限的水域面上,然后逐渐离开目标区域。这使得港池附近水体接受的共振能量传递较少,最终港内的水面波动变化也非常平缓,几乎不体现港池局部地形的放大效应。

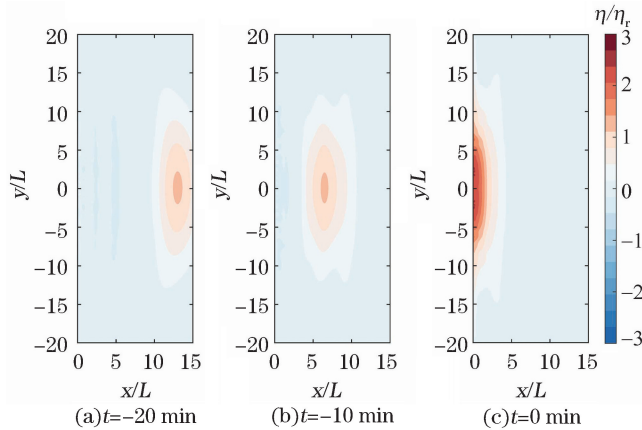


图 7  $\theta = -90^\circ$  时外海波动分布

Fig.7 The distribution of water fluctuations outside the harbor when  $\theta = -90^\circ$

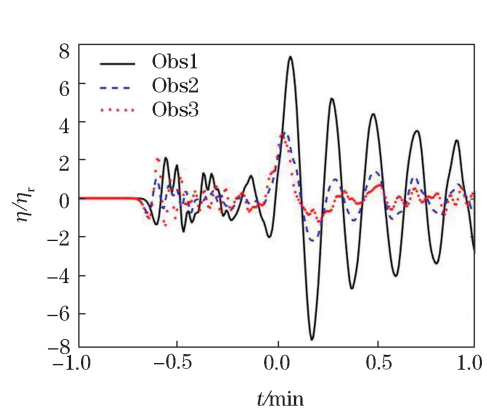


图 8  $\theta = -90^\circ$  时不同观测点出水面波动过程

Fig.8 Water fluctuation processes at different observation points when  $\theta = -90^\circ$

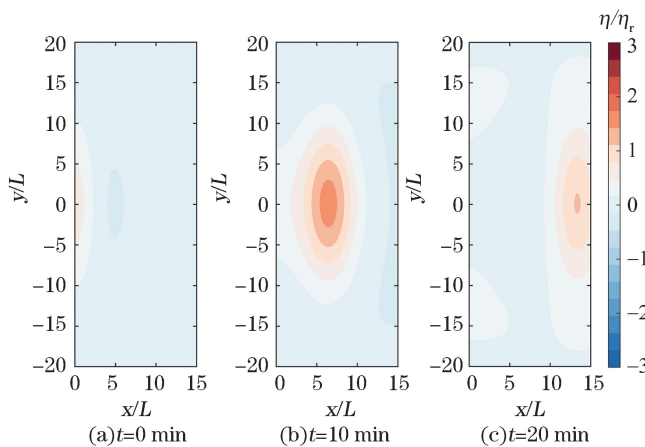


图 9  $\theta = 90^\circ$  时外海波动分布

Fig.9 The distribution of water fluctuations outside the harbor when  $\theta = 90^\circ$

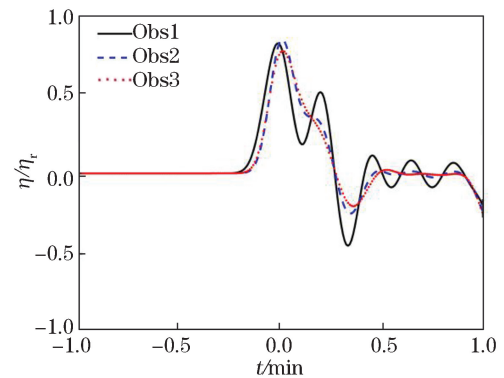


图 10  $\theta = 90^\circ$  时不同观测点出水面波动过程

Fig.10 Water fluctuation processes at different observation points when  $\theta = 90^\circ$

气压扰动斜向靠近海岸运动,即  $\theta = 20^\circ$  和  $\theta = -20^\circ$  时外海波动分布和不同观测点处的水面波动过程如图 11~图 14 所示。此时,气压扰动的效应可以看作垂向分量和沿岸分量的叠加,且沿岸分量诱发的边缘波列起主导作用,垂向分量激发的强迫波包使得边缘波列的首波形态发生变形。不同观测点处的水面波动过程结果表明,气压扰动的运动方向会影响边缘波列的长度,与岸线的夹角  $\theta$  越大,沿岸边缘波列的长度越短。

尽管气压扰动斜向靠近海岸与沿岸运动算例有类似的水面波动发展过程,共振也能持续较长时间,但是最终的港内最大相对波幅显然不如沿岸运动算例危险。

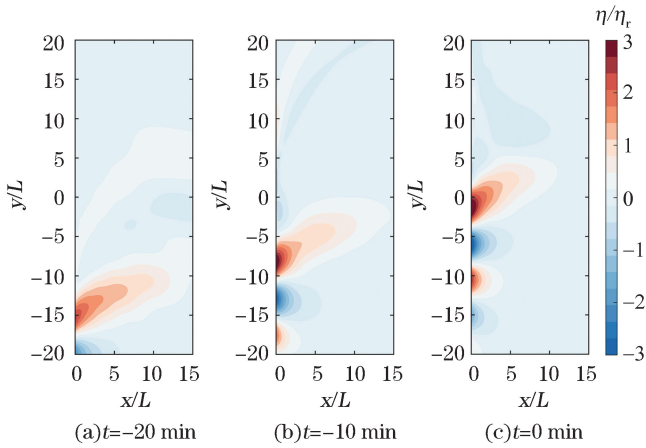


图 11  $\theta = -20^\circ$  时外海波动分布

Fig.11 The distribution of water fluctuations outside the harbor when  $\theta = -20^\circ$

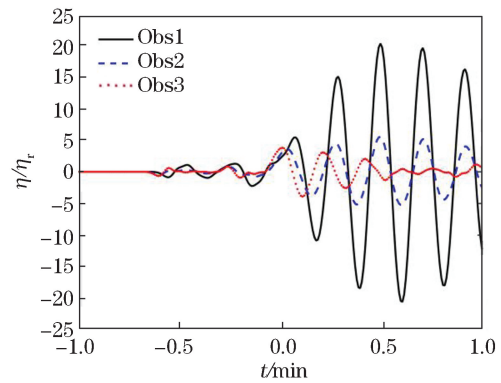


图 12  $\theta = -20^\circ$  时不同观测点出水面波动过程

Fig.12 Water fluctuation processes at different observation points when  $\theta = -20^\circ$

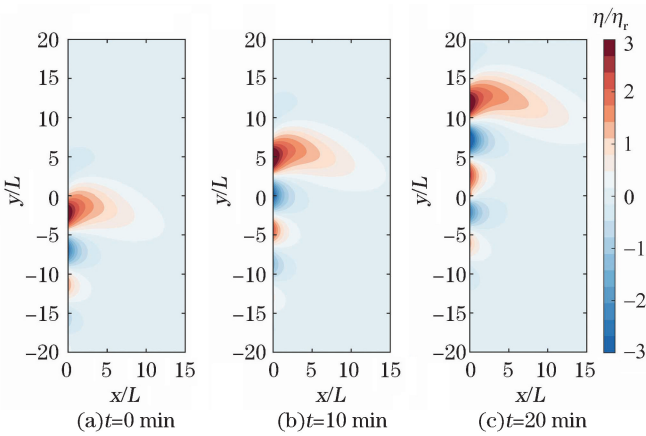


图 13  $\theta = 20^\circ$  时外海波动分布

Fig.13 The distribution of water fluctuations outside the harbor when  $\theta = 20^\circ$

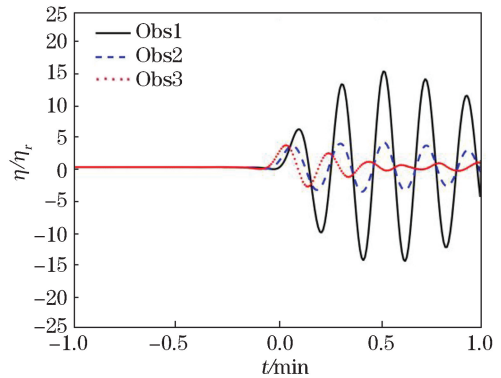


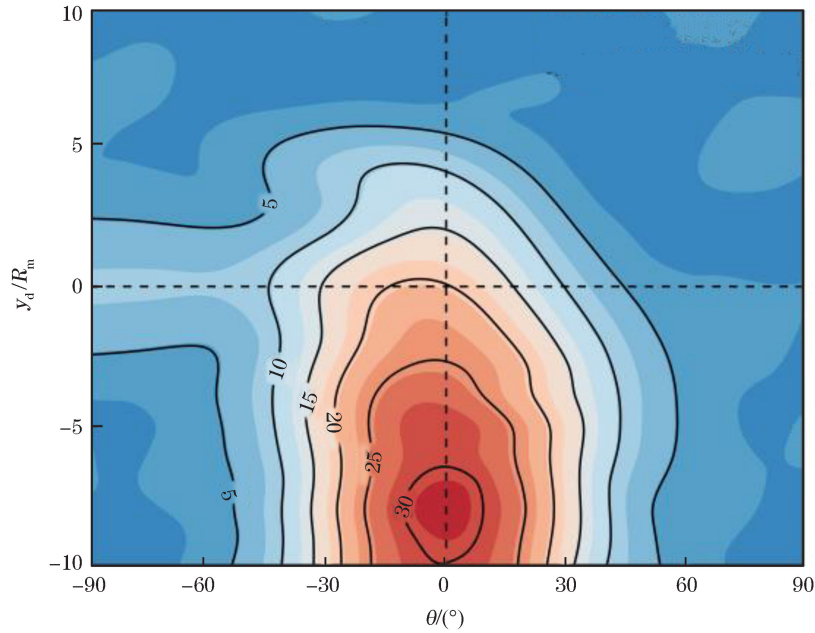
图 14  $\theta = 20^\circ$  时不同观测点出水面波动过程

Fig.14 Water fluctuation processes at different observation points when  $\theta = 20^\circ$

### 3 气压扰动时间特征参数对港湾共振的影响

气压扰动时间特征参数同样对港湾共振产生重要作用。一般而言,气压扰动历时越短,能够产生的沿岸边缘波列越短,港湾共振的发展程度也相应会被减弱。这表明在现实生活中一场能量相同、但历时较短的强对流天气,其对近海港湾的威胁程度小于中长历时强对流天气。

实际上,气压扰动的作用时长主要影响运动方向与海岸线夹角较小的相关算例,当 $|\theta| = 0^\circ \sim 20^\circ$ 时波动响应明显减弱,当 $|\theta| = 30^\circ \sim 90^\circ$ 时前后差异不大(图 15)。这表明只有气压扰动在产生水面波动的沿岸边缘波分量起主导作用时,作用时长的效果才能体现。夹角较大、垂向分量起主导作用时,垂直于岸传播的单个波包不能产生在港内持续能量传递和累积,因此港内波动响应与气压扰动的作用时长几乎无关。



注:等值线表征港内最大波动响应

图 15 港内最大波动响应  $\eta_m$  随运动方向  $\theta$  和登陆点位置  $y_d$  的变化(历时 0.5 h)

Fig.15 Changes of the maximal fluctuation response  $\eta_m$  inside the harbor with the moving direction  $\theta$  and the landing point position  $y_d$  (Duration: 0.5 h)

## 4 结 论

基于简化物理模型研究运动气压扰动的时空特征参数对港湾共振的影响,考察气压扰动在不同运动方向、登陆点位置和作用时长情境下的港内波动分布规律,对近海港湾的防灾减灾制度优化和恶劣天气应急抢险管理存在较大意义。研究的主要结论如下:

①总体上,气压扰动在港池上游登陆比在下游登陆能够引起更加强烈的港内波动,气压扰动向岸运动比离岸运动能够引起更加显著的波动。气压扰动在接近沿岸运动时港内波动响应最剧烈,随着运动方向与海岸线夹角增大,波动总体呈减弱趋势。

②中长历时气压扰动引起的港内波动比短历时更具有威胁性,气压扰动的作用时长主要影响运动方向与海岸线夹角较小的相关算例,需要对此情景加强防范力度。

结果表明,在气象诱发港湾共振的预警预报工作中,不仅需要重点关注本地区的强对流天气系统的发展过程,也需要加强对周边邻近海域气旋或雷暴等强对流天气事件的进展程度监测,尤其需对中长历时强对流天气事件加强关注。未来在近海防灾减灾工作中,可以根据本研究结论建立不同等级的应急响应制度,实现海岸带智慧化管理和建设。

### 参考文献 (References):

- [1] XU S. Hails and large-scaled thunderstorms appeared in Nantong, Jiangsu with the maximum wind force of 14[EB/OL]. (2021-05-01) [2021-05-01]. <http://www.chinanews.com/sh/2021/05-01/9468674.shtml>. 徐珊珊. 江苏南通现冰雹和大范围雷暴大风 最大风力 14 级 [EB/OL]. (2021-05-01) [2021-05-01]. <http://www.chinanews.com/sh/2021/05-01/9468674.shtml>.
- [2] HIBIYA T, KAJIURA K. Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1982, 38(3): 172-182.

- [3] KENJI T. Inundation by meteotsunami in Nagasaki urban area on March 21, 2019[J]. *Journal of Natural Disaster*, 2020, 38(4): 433-447. 田中健路. 2019年3月21日に長崎市で発生した潮位副振動(あびき)による浸水被害について[J]. *自然災害科学*, 2020, 38(4): 433-447.
- [4] WANG G, GAO J L, WANG P T, et al. Review on harbor resonance[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(11): 1-13. 王岗, 高俊亮, 王培涛, 等. 港湾共振研究综述[J]. *海洋学报*, 2017, 39(11): 1-13.
- [5] RABINOVICH A B. Seiches and harbor oscillations[M]//KIM Y C. *Handbook of coastal and ocean engineering*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009: 193-236.
- [6] BELLOTTI G, BRIGANTI R, BELTRAMI G M. The combined role of bay and shelf modes in tsunami amplification along the coast[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117: C08027-1-C08027-13. DOI: 10.1029/2012JC008061.
- [7] BELLOTTI G. A modal decomposition method for the analysis of long waves amplification at coastal areas[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 157: 103632-7-103632-14.
- [8] ZHENG J H, DONG W K, XU L H, et al. Water-wave resonance within a rectangular harbor and its extensional shapes[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2014, 31(2): 254-258. 郑金海, 董文凯, 徐龙辉, 等. 矩形及其扩展形状港湾内的水波共振[J]. *计算力学学报*, 2014, 31(2): 254-258.
- [9] WANG G, ZHENG J H, XU L H, et al. An analytical solution for oscillations within an elliptical harbor[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(4): 252-256. 王岗, 郑金海, 徐龙辉, 等. 椭圆形港湾内水波共振的解析解[J]. *工程力学*, 2014, 31(4): 252-256.
- [10] ZHANG C, WU S X, WANG G, et al. Oscillations within a regular hexagon harbor and its extensional shapes[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015, 32(3): 372-377. 张弛, 吴善翔, 王岗, 等. 正六边形及其扩展形状港湾内的水波共振[J]. *计算力学学报*, 2015, 32(3): 372-377.
- [11] CAO C H, GUO K C, LI K P, et al. Synoptic analyses for the formation of large-amplitude seiche in the main harbors along the coasts of the Bohai Sea and the Huanghai Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2001, 23(5): 24-32. 曹丛华, 郭可彩, 李坤平, 等. 渤海、黄海沿岸主要港湾大振幅假潮成因的天气学分析[J]. *海洋学报*, 2001, 23(5): 24-32.
- [12] LI K P, CHEN Z S. Basic characteristics of seiches in the major coastal embayments of Bohai and Yellow Seas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(2): 128-138. 李坤平, 陈则实. 渤海、黄海沿岸主要港湾假潮的基本特征[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(2): 128-138.
- [13] XIA Z W, LIN S Y, WANG Y X, et al. Seiches at the coastal stations along the north coast of South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(1): 8-14. 夏综万, 林少奕, 王永信, 等. 南海北部沿岸海洋站的假潮[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(1): 8-14.
- [14] RABINOVICH A B, MONSERRAT S. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands; descriptive and statistical analysis[J]. *Natural Hazards*, 1996, 13(1): 55-90.
- [15] ORLIĆ M, BELUŠIĆ D, JANEKOVIĆ I, et al. Fresh evidence relating the great Adriatic surge of 21 June 1978 to mesoscale atmospheric forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115: C06011-1-C06011-19. DOI: 10.1029/2009JC005777.
- [16] DE JONG M P C, HOLTHUIJSEN L H, BATTJES J A. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C4): 3117-1-3117-14. DOI: 10.1029/2002JC001422.
- [17] JANSÁ A, MONSERRAT S, GOMIS D. The rissaga of 15 June 2006 in Ciutadella (Menorca), a meteorological tsunami[J]. *Advances in Geosciences*, 2007, 12(12): 1-4.
- [18] WANG Z J. The numerical modelling of seiches of large amplitude in Longkou Bay[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2000(3): 7-13. 王钟楮. 龙口湾大振幅假潮形成的数值模拟[J]. *黄渤海海洋*, 2000(3): 7-13.
- [19] PROUDMAN J. The effects on the sea of changes in atmospheric pressure[J]. *Geophysical Journal International*, 1929, 2(Suppl.4): 197-209.
- [20] VILIBIĆ I. Numerical simulations of the Proudman resonance[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(4/5): 574-581.
- [21] NIU X J, ZHOU H J. Wave pattern induced by a moving atmospheric pressure disturbance[J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 52: 37-42.
- [22] NIU X J, CHEN Y X. Energy accumulation during the growth of forced wave induced by a moving atmospheric pressure disturbance[J]. *Coastal Engineering Journal*, 2020, 62(1): 23-34.
- [23] GREENSPAN H P. The generation of edge waves by moving pressure distributions[J]. *Journal of Fluid Mechanics Digital Archive*, 1956, 1(6): 574-592.
- [24] NIU X J. Conditions for the occurrence of notable edge waves due to atmospheric disturbances[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102255-1-102255-11. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102255.
- [25] SUN Q Y, NIU X J. Harbor resonance triggered by atmospherically driven edge waves[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 224: 108735-1-



108735-7.

- [26] DE GOEDE E D. Historical overview of 2D and 3D hydrodynamic modelling of shallow water flows in the Netherlands[J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70: 521-539.

## Impact of Moving Atmospheric Pressure Disturbances on Harbor Resonance

SUN Qiu-yi, NIU Xiao-jing

(*State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** In order to understand the influence of the temporal and spatial variations of moving atmospheric pressure disturbances on the harbor resonance, the distributions of water fluctuations inside the harbor under the case of the atmospheric pressure disturbances with different moving direction, landing point location and action duration are studied by using a simplified atmospheric pressure disturbance and coastal harbor physical model. The results indicate that the water inside the harbor responds strongest when the air pressure disturbance moves near the shore, while with the increasing in absolute value of the angle between the moving direction of the air pressure disturbance and the coastline the water fluctuation in the harbor tends to decrease as a whole. The landward movement of the air pressure disturbance can induce more significant water fluctuation than its seaward movement. When the air pressure disturbance lands before its passing through the harbor more intense fluctuations can be easily induced inside the harbor. The air pressure disturbances with a medium long duration can induce more threatening fluctuations in the harbor than those with a short duration. The conclusions of the study may provide a theoretical basis for establishing a harbor resonance early warning system.

**Key words:** harbor resonance; atmospheric pressure disturbance; spatial and temporal characteristics; meteorological tsunami

**Received:** June 6, 2021