

黄河三角洲区域的波流相互作用数值分析

张敬¹, 杨利利¹, 谷学准², 梁丙臣¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266520)

摘要: 将三维水动力-生态模式 COHERENS 与第三代波浪模式 SWAN 结合起来, 采用该耦合模式数值计算了黄河三角洲的波浪特征波高与特征周期情况, 从而探讨水流和波动水位对波浪特征波高和特征周期计算结果的影响。总的说来特征波高、特征周期、流速的计算结果与观测值吻合得较好, 说明了 COHERENS 模式和 SWAN 模式相结合而成的波流耦合模式能够较好地计算黄河三角洲地区的流场与浪场情况。研究这些动力因素的机制和时空变化规律, 对于研究海岸、河口的泥沙运动, 海岸侵蚀的机理, 合理开发利用自然资源, 防止海洋灾害具有十分重大的意义。

关键词: COHERENS 模式; SWAN 模式; 黄河三角洲; 波流耦合

中图分类号: P731.22; P722.4; O242 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2010)09-0064-06

黄河三角洲属于典型的浅海区域, 波流相互作用显著。因此有很多有关波流相互作用的研究且考虑波流耦合的数值模式也相应地发展起来。杨联贵等^[1]考虑了均匀剪切流场中强非线性界面, 揭示了波浪之间的非线性相互作用和界面波解之间的非线性相互作用; Yin 等^[2]利用二维水动力与波浪耦合模式讨论了波流相互作用对床面剪切应力的影响; Lin 等^[3]耦合了波浪模型和二维水动力模型并讨论了波浪沿水深方向均匀分布的辐射应力对波高、水位的影响, 这些研究在很大程度上改善了海岸、河口地区流场与浪场计算的精度。作者将三维水动力生态模型 COHERENS 模式引入 Donelan^[4]提出的波浪依赖的拖曳力系数理论, 同时在底部边界层考虑 Davis 等^[5]所提出的波流相互作用模式来考虑波浪对流场的影响^[6,7], 同时又将水动力所得出的水位、水流场提供给第三代海浪产生模型 SWAN 模式, 使得波浪模式中考虑了流场因素。耦合计算实现的方式考虑到波浪与潮流周期存在量级差, 采用目前比较可行的方式: 首先因为潮流周期比波浪周期大得多, 因此在计算波浪时可将某一时间段内的流场、水位场看作恒定值, 将水动力模式输出的流场、水位场作为波浪场的输入, 其次由于波浪的周期较小, 因此不关心波浪运动的瞬时变化而只考虑波浪场的作用, 这样波浪模式将在流场、水位场影响下计算所得的波浪相关参数输出给流场计算模式。本文探讨与分析波流联合作用对波浪与水流计算的影响, 比较了在不同风速情况下波流耦合的效应, 以及水流和水位场对波浪的影响。

1 波、流数值模式设置

首先, 本文以渤海及北黄海地形数据为第一依托海域, 分别采用时空均匀的风速为 10, 20 m/s 的东北风以及大气模式 MM_5 产生的以小时为分辨率的风场数据作为驱动风场, 模拟水流与波浪, 然后, 再将位于渤海西侧的黄河三角洲滨海海域作为第二依托区域, 模拟该海域的波浪、水流场, 第二依托海域的地形为图 1。在第一海域波、流分别计算, 不考虑耦合影响, 正压模式时间步长取 30 s, 斜压模式采用 300 s 时间步长, SWAN 计算时间步长为 600 s。水动力模式的水位与水流初始条件都取 0。在正式模拟之前先模拟 3 d 的流场, 然后与波浪模式耦合, 以期获得稳定解。4 个主要分潮 K_1 , O_1 , M_2 , S_2 用以提供开边界条件。在第二海域, 采用嵌入第一海域嵌套的方法, 为第二海域提供了波浪与水流的开边界条件。

在黄河三角洲海域, 风场采用位于 $118^{\circ}49'23.59''$ E, $38^{\circ}11'46.15''$ N 处的 1999 年 11 月 24~27 日期间的每小时实测风速。此外, 该位置在同一时期还观测了流速、流向以及特征波高与特征周期, 本节将首先利用这些流速、流向以及波浪参数资料进行模拟结果验证, 从而保证后面进行波流耦合各

收稿日期: 2009-01-30; 修回日期: 2010-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(50809065); 山东省自然科学基金(Q2007E05)

作者简介: 张敬(1983-), 女, 山东聊城人, 博士生, 主要从事海岸、河口区水动力研究, 电话: 13964229034, E-mail: zhangjing01107@163.com; 梁丙臣, 通信作者, E-mail: liangbingchen6@yahoo.com.cn

个因素影响的分析时,能够保证其前提是正确的。本文探讨波、流的相互作用影响,主要是针对在第二海域的水流与波浪相互作用情况进行研究、分析。数值试验的设置简介如下:

在第一海域波、流分别计算,不考虑耦合。4个主要分潮 K_1 , O_1 , M_2 , S_2 用以提供开边界条件。采用嵌入第一海域的方法为第二海域提供了波浪与水流的开边界条件。试验模式采用引入辐射应力、波浪依赖的表面风应力以及波浪影响下的底部剪切应力的 COHERENS 模式与波浪模式 SWAN 相结合。

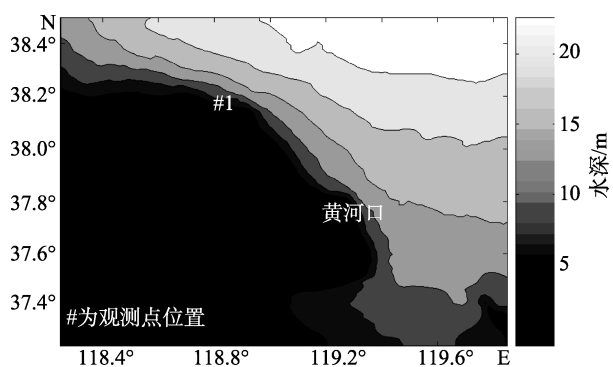


图 1 2000 年黄河三角洲水深地形图

Fig. 1 The topography of the Yellow River Delta in 2000

2 结果验证及均匀风场情况下的波流相互作用影响分析

2.1 流速、流向以及特征波高、特征周期验证

作者首先分别计算了具有波、流耦合情况和不具有波、流耦合情况下的流速、流向以及波浪特征波高与特征周期,图 2 为流速、流向的验证结果,从该图中可知流速、流向计算结果都与观测结果比较吻合。特征波高、特征周期的验证图 3 显示了波浪的计算结果也比较理想,现有的差异可能来自于风场是利用一点的观测资料代替整个三角洲海域风场资料、观测仪器的误差以及模拟计算网格点与观测点不重合等因素所造成的。比较有无耦合效应两种情况可见具有耦合效应的情况大大改善了波高和周期“高值”的计算结果,这一点可参考该图中模拟期间的前 6 h 以及 25~30 h 时间段,在该时间段内,考虑波、流耦合效应的波高与周期都比没有考虑耦合效应的情况增加明显,且更为接近观测结果。因此,波流耦合效应大大改善了较强波浪条件下的波浪计算结果,工程项目的计算波浪应该考虑到波流耦合

效应能够产生更强的波浪条件,因此考虑波流耦合的波浪计算尤为重要。为更好地说明波流耦合效应对不同风速以及不同水深的反应,本文根据该海域的强风向东北风分别设计了 10, 20 m/s 以及西南风为 10 m/s 3 种不同风速条件下的数值模型试验。

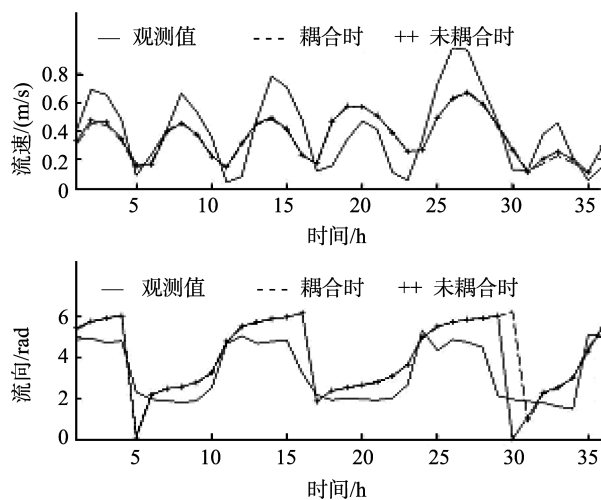


图 2 流速与流向验证时程曲线

Fig. 2 Time series of verification for velocity and direction

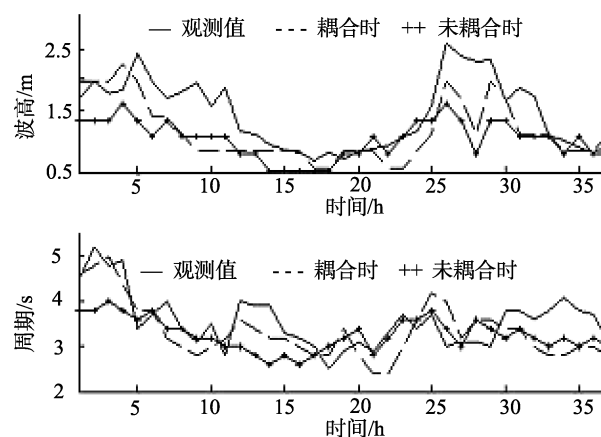


图 3 特征波高与特征周期验证时程曲线

Fig. 3 Time series of verification for significant wave height and period

2.2 均匀风场情况下的波、流相互作用

分别比较了在不同风速情况下波流耦合效应的影响。图 4, 图 5 分别是东北风风速为 10 m/s, 20 m/s 情况下的特征波高和特征周期计算结果时程图。这两幅图形都分别给出了水深为 2.3, 7.0, 22.5 m 计算结果,根据这些图形可知,风速为 10 m/s 的情况下,波、流耦合仅对水深为 2.3 m 的波高和周期影响较为明显,其中考虑耦合效应的波高波动幅度增加,使

得波动的“波峰”值超过没有考虑耦合效应的波高计算结果，而周期虽呈现有大有小的波动变化，不过总体来说考虑耦合效应的周期计算结果有明显减小的趋势。当水深达到 7.0 m 或更深时，耦合效应对波高几乎没有影响，但周期仍有明显减小的趋势。当风速进一步增加到 20 m/s 时，在各个水深(2.3, 7.0, 22.5 m)处，耦合效应无论对波高还是对周期都有明显的作用，使得 2.3 m 水深处的波高计算值的波动幅度增加非常明显，增加值甚至达到 0.5 m，接近没有

考虑耦合效应的 0.3 倍，而该处的耦合作用影响下的波浪周期则增减相间，而且仍存在减小的趋势。与 10 m/s 的风速不同，20 m/s 风速情况下的耦合效应也明显增加了在 7 m 以及更深的 22.5 m 处的波高波动幅度，只是增加程度较浅水区有所减小。可见 20 m/s 的风速能够产生受海底影响较大的波浪。此外，就耦合作用对波浪周期的影响而言，随着水深的增加，耦合作用仍如在浅水区一样，同样使得周期减小，只是使得周期计算结果的波动幅度呈逐渐减小趋

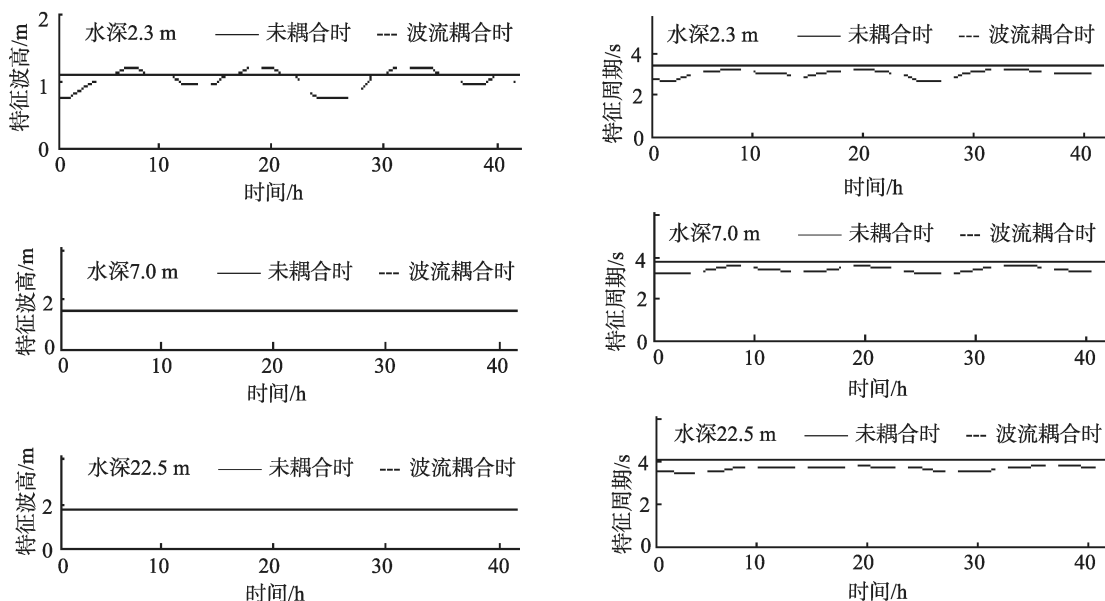


图 4 东北风风速为 10 m/s 的特征波高、周期计算结果

Fig. 4 Time series of significant wave height and period with northeast wind speed of 10m/s

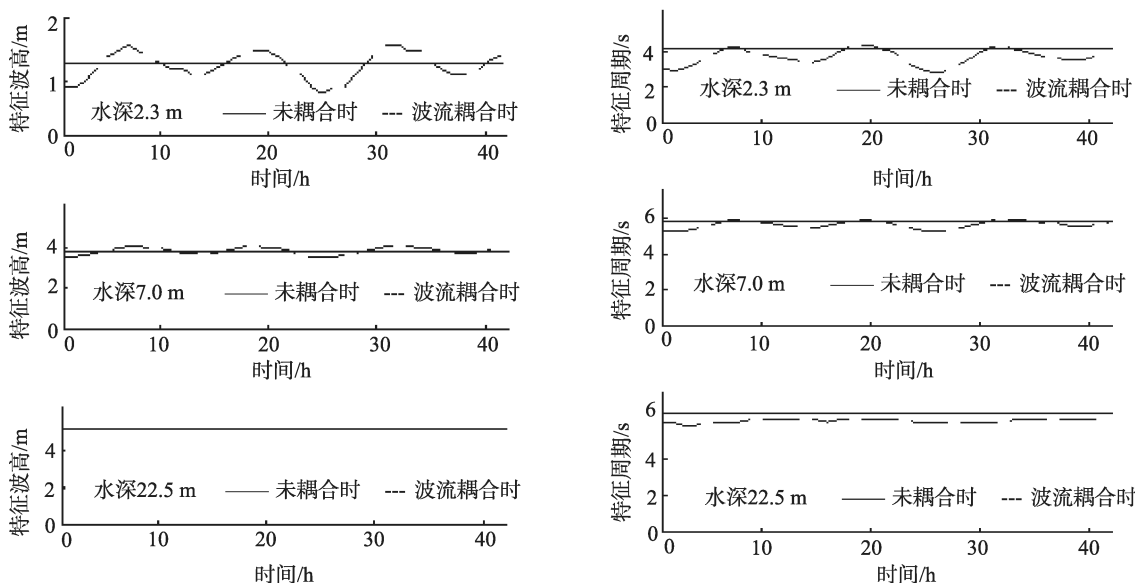


图 5 东北风风速为 20m/s 的特征波高、周期计算结果

Fig. 5 Time series of significant wave height and period with northeast wind speed of 20m/s

势。总体来说，耦合效应使得波高计算呈现大小变化的波动情况，且明显增加水深较浅处的波高“高值”的计算结果，减小了水深较深处的波浪周期，这一点说明水深较浅处，波动的水位通过改变水深从而对波高起着非常重要的作用，而水深较深处，波动水位的影响减小，但水流的存在总体来说却仍使得波浪周期小于没有考虑水流情况下的周期，只是周期大小波动的幅度随着水深的增加而减小。

图 6 分别是只考虑水流和只考虑波动水位波浪特征波高与周期计算结果。图 6 中显示水深 2.3 m 时波动水位使得波高不再为常值，而是呈现出增减相间的波动情况，这与图 7 的水位增减刚好对应。比较这两个图形可以发现，当水位增加时，相应的特

征波高也比不考虑水位情况有所增加。当水深增加到 7 m 以上时，水位的波动对波高的影响减小，但仍使得波浪周期呈现波动变化且总体来说有所减小。水流对周期影响也是如此，水流的存在使得周期不再保持常值不变，而是成为大小相间的波动情况，但是水流对波高影响却相对较小，只是在 2.3 m 水深的 5~10h 时间段内有很微弱的减小。可是，水流对周期的影响明显，使得周期在任何水深情况下都减小，只是周期的计算值变化幅度随水深的增加而逐步变小，甚至保持为常值不变。

图 8 是西南风风速为 10 m/s 情况下的考虑波、流耦合作用和没有考虑耦合作用的特征波高和特征周期计算结果，图 9 为只考虑水流、波动水位和没有

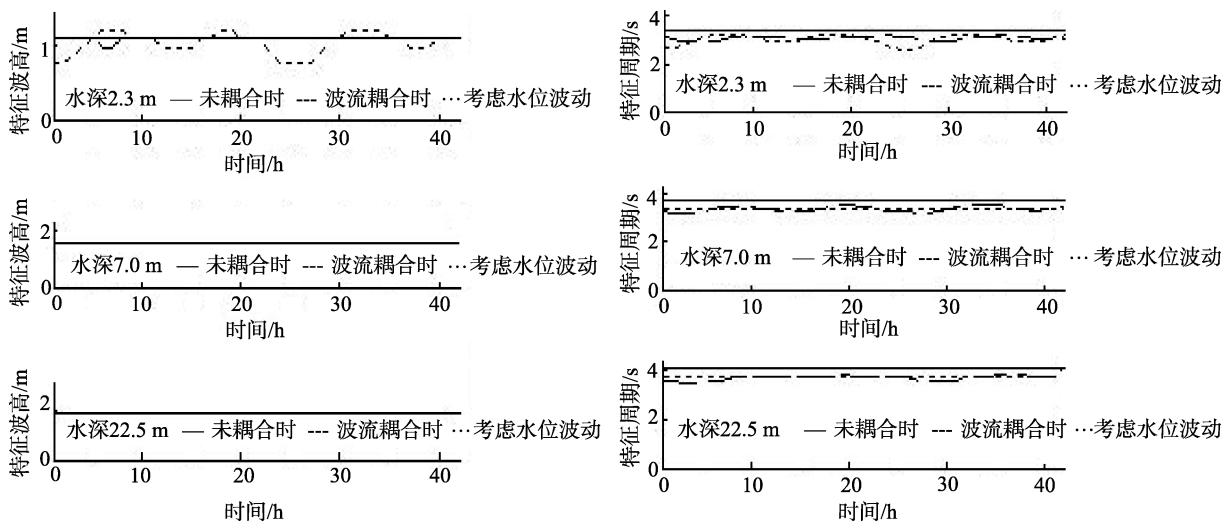


图 6 东北风风速为 10 m/s 的特征波高、特征周期计算结果

Fig. 6 Time series of significant wave height and period with northeast wind speed of 10m/s

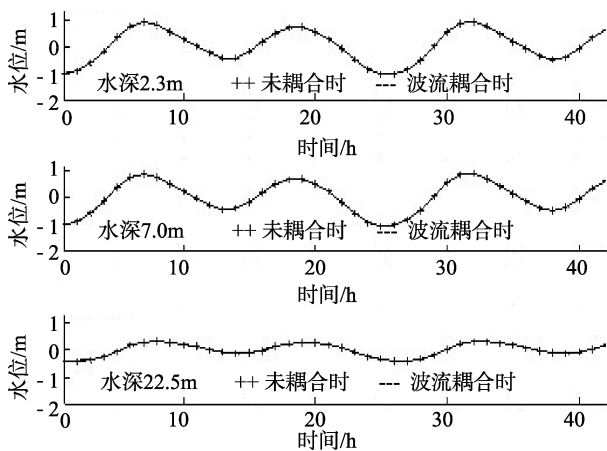


图 7 东北风风速为 10 m/s 情况下的水位波动计算结果

Fig. 7 Time series of water level fluctuation with northeast wind speed of 10 m/s

考虑任何两者影响的特征波高和特征周期计算结果。比较图 9 与图 7 可见水深 2.3 m 处波高波动的增减变化与水位波动的增减变化也刚好对应，也是水位增加时波高增加。再比较图 8 与图 9 可见，波高的波动在两图中表现相似，这也说明波高的改变主要受控于波动的水位。水流对波高的影响与东北风情况一样，也是影响很小，不过水流对周期的影响与东北风情况刚好相反，比较图 6 与图 9 可知水流影响下的周期计算结果波动(虚线所示)增减区间刚好相反。

为更好地展示说明水流和水位场对波浪的影响，本文给出了在 10 m/s 的东北风作用下，分别单独考虑水流和水位影响下与没有考虑这两种影响的波浪特征波高和特征周期差异分布图(均为考虑水流或周期

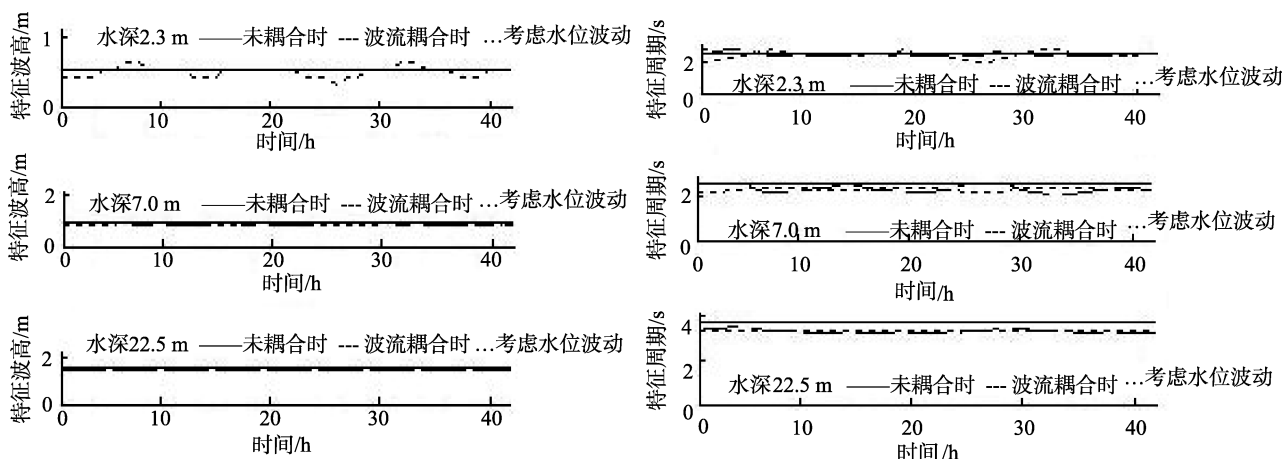


图 8 西南风风速为 10m/s 的特征波高、周期计算结果

Fig. 8 Time series of significant wave height and period with southwest wind speed of 10m/s

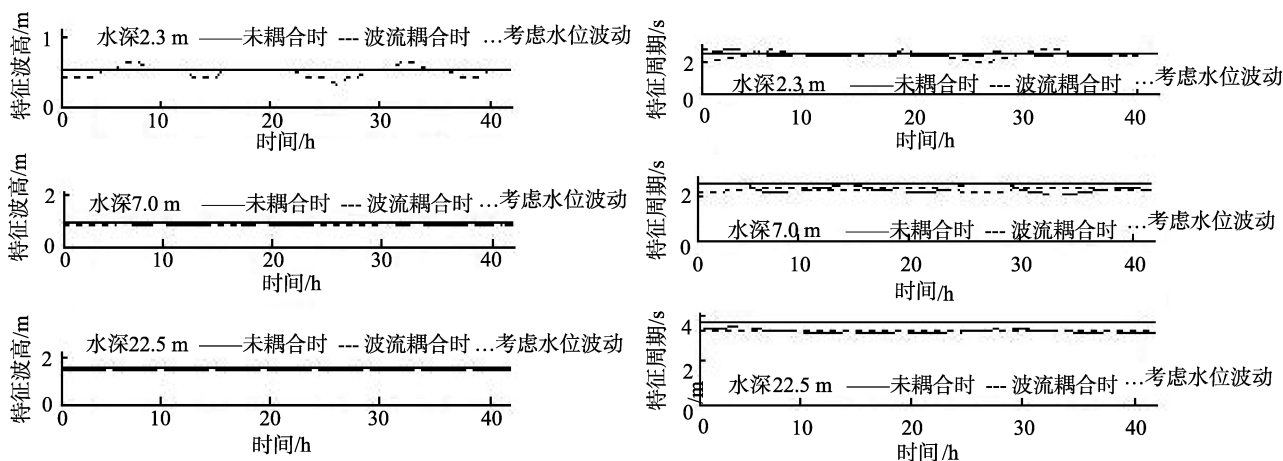


图 9 西南风风速为 10 m/s 的特征波高、周期计算结果

Fig. 9 Time series of significant wave height and period with southwest wind speed of 10 m/s

影响的特征波高、特征周期减去没有考虑这两种因素的结果)。图 10 至图 11 分别展示了分别只考虑水位和水流情况的特征波高差异分布图。图 12 为与以上两图(图 10 至图 11)为同一时刻所对应的流场分布和水位波动图。图 10 显示在该时刻水位波动使得三角洲沿岸北部和东部的近岸海域的特征波高增幅明显,尤其是在东北角近岸海域增幅超过 0.15 m。但是,在离岸较深的海域大部分区域特征波高都没有变化,只是在东部边界和北部边界附近有小部分海域特征波高值有所增加,这可能是由于 SWAN 模型边界处理不很理想的影响所造成的。图 11 则显示除边界附近、三角洲西南海湾内(北纬 37.6°)以及其他海岸附近等海域特征波高增加外,其余海域都为减小区域。部分区域波高增加的原因笔者认为是由于受边界影响或近岸复杂地形使得 SWAN 的绕射功能不强所引

起的。特征周期则仅在三角洲西南海湾内(北纬 37.6°)有小部分海域增加外,其余海域均小于没有考虑水流情况。这是由于在东北风作用下该海域受三角洲突出沙嘴的掩护使得波浪不能更好地传播到该海域所致。从图 12 流场分布和水位波动分布可以得出在水深较浅的区域水位变化为增加时,该区域也表现为波高增加区域。

3 结论

本文从黄河三角洲的数值结果研究发现,通过 COHERENS 模型与第三代波浪模式 SWAN 的相结合计算所得的特征波高、特征周期、流速与实测结果较为吻合,说明该模式能够产生较为理想的结果。通过该模式数值分析可见变化的水流场和水位场的存在明显改变了波浪场的特性,在浅水区增加了特征

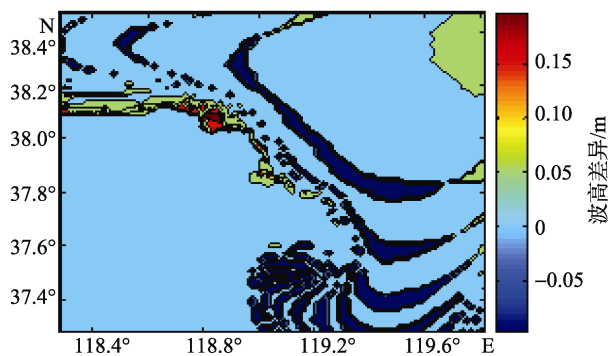


图 10 水位波动引起的特征波高差异分布

Fig. 10 Different significant wave height distribution induced by water level fluctuation

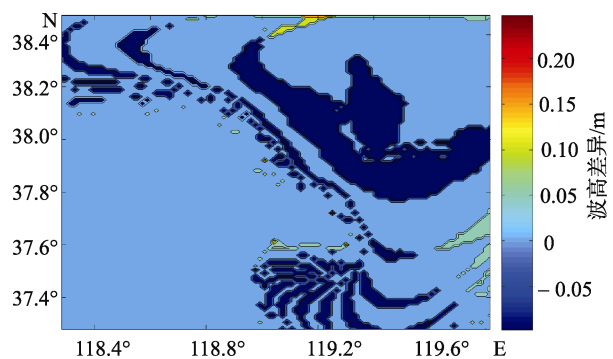


图 11 水流引起的特征波高差异分布图

Fig. 11 Different significant wave height distribution induced by water current

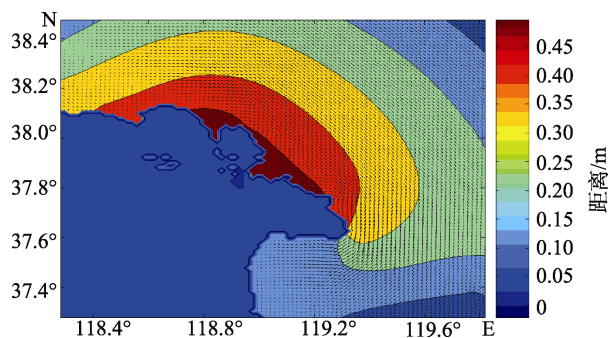


图 12 某时刻流场分布和自由水面与基准面距离图(与图 10~11 时刻一致)

Fig. 12 Current field and distribution of distance between surface level and base level (at the same time as fig 10~11)

波高“高值”的计算结果,在深水区减小了波浪特征周期的计算值。这说明了,浅水区主要受水深地形的影响,使得波动水位场的作用变得更加显著,总体上对波高“高值”的计算结果起到了明显的提升作用。深水区由于水深的增加而使得波动水位场的影响减弱,但此时流速场则主要影响了波周期,而对波高影响却不明显。

参考文献:

- [1] 杨联贵, 杨红丽, 宋金宝, 等. 剪切流中界面波的二阶 Stokes 波解[J]. *海洋科学*, 2008, 32(8): 58-63.
- [2] Yin Baoshu, Yang Dezhou, Lin Xiang, *et al.* Effects of wave-current interactions on bottom stress and currents[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2003, 15(5): 13-19.
- [3] Lin Xiang, Yin Baoshu, Hou Yijun, *et al.* The effects of radiation stress on wave heights and sea level in the interaction of coupled wave-tide-surge in the coastal area[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2003, 15(1): 97-102.
- [4] Donelan M A, Dobson F W, Smith S D, *et al.* On the dependence of sea surface roughness on wave development[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23: 2143-2149.
- [5] Davies A M, Lawrence J. Examining the influence of wind and wind wave turbulence on tidal currents, using a three-dimensional hydrodynamic model including wave-current interaction[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24: 2441-2460.
- [6] Liang Bingchen, Li Huajun, Dongyong Lee. Numerical study of wave effects on surface wind stress and surface mixing length by three-dimensional circulation modeling[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2006, 18(4): 397-404.
- [7] 李昌良, 梁丙臣, 谢媛媛. 荣喜近岸区波流耦合作用下的流场模拟[J]. *海洋科学*, 2009, 7: 99-106.

(下转第 101 页)