

汇泉湾水动力环境观测和数值模拟研究*

郭景松^{1, 2, 3} 吴伦宇^{1, 3, 4} 乔方利^{1, 2, 3} 蔡爱民⁵ 唐闻洲⁵

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室 青岛 266237; 3. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室 青岛 266061; 4. 国家海洋环境预报中心 北京 100081; 5. 青岛国信汇泉湾管理有限公司 青岛 266071)

摘要 汇泉湾是青岛市最主要的海水浴场, 湾区浴场的沙滩沙质退化及细沙流失现象一直备受关注。本研究旨在研究上述现象的成因, 为汇泉湾生态环境保护和可持续发展提供科技支持。我们于 2015 年 1 月和 9 月在汇泉湾进行了水文、泥沙和悬浮物的综合观测, 并基于 FVCOM 建立了汇泉湾高分辨率的水动力模式, 模拟了汇泉湾及其临近海域的水动力环境。结果显示: 汇泉湾常年存在一顺时针(即反气旋)环流, 它有利于携带泥沙从湾的西侧进入而从东侧流出; 环流中心区流速弱, 泥沙不容易被带走, 沉积物粒径较小。汇泉湾海域沙滩沙质粗化且流失的原因主要为: 波致流引起的沿岸输沙将湾口西侧岩石剥蚀的较粗的细砂和粉砂搬运至浴场沙滩, 而较细的泥沙容易地从东侧流出湾区。

关键词 汇泉湾; 水动力环境; 数值模拟; FVCOM

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz 20171000262

汇泉湾位于青岛市南区的西部, 西起小青岛, 东至汇泉角。第一海水浴场位于湾内, 风浪小, 沙细而坡缓, 为优良的天然海滨浴场。浴场规模大, 设施完善, 满潮时沙滩面积达 2.4 万平方米, 是青岛最主要的海滨浴场。汇泉湾附近并无河流入海, 沙源非常贫乏, 湾中沙是有限的不可再生资源(于洪军等, 2003)。而且, 在波浪的作用下, 泥沙的颗粒逐渐变细, 细小的泥沙在海流的作用下被带至外海, 使湾内的泥沙愈来愈少(常德馥等, 1998)。随着青岛市经济社会发展水平不断提高, 以及青岛、汇泉湾作为知名旅游景区的辐射影响力不断增强, 对汇泉湾的泥沙沉积和输运状态、生态环境保护和海滩旅游资源的发展受到了人们更多关注, 为此, 许多学者从不同的角度进行了针对性的研究。

李春柱等(1992)从水动力学角度和工程观点出发, 概要地分析了汇泉湾的泥沙的动力平衡状态, 以及海滩恶化的原因。常瑞芳等(1992)根据青岛汇泉湾

内沙坝形态特征和动力条件的分析, 提出汇泉湾内沙坝的形成主要与外海传来的大涌浪有关。汇泉湾水深 3m 以内的地形, 主要由沙坝和凹槽组成, 沙坝上的泥沙主要由波浪将凹槽处的沙向海运移沉积而成。董贺平(2004)通过对青岛汇泉湾垂直剖面沉积构造的分析, 推测汇泉湾沙坝的形成有两种可能: 一是冰后期海平面相对上升淹没滩脊, 同时在波浪作用下, 水下沙坝向岸运动变成浅滩; 二是波浪、物源有利于水下沙坝的发育使之规模逐渐增大, 最终露出水面形成沙坝。王伟伟等(2007)对汇泉湾海水浴场表层沉积物粒度特征及输运趋势进行分析研究, 认为湾内由西向东的沿岸流驱动颗粒较细的泥沙顺海岸线向东运动, 而较粗颗粒留在了原地, 进而形成了由西北向东南, 沉积物类型由细砾、粗砂、中砂、细砂依次分布的特征。王潇潇等(2013)认为, 对于沙堤特征的空间变化成因, 除了沿岸流作用外, 在岬角地形背景下, 受到潮流和波浪破碎带的共同作用下, 粗颗粒沉积

* 青岛市战略性新兴产业培育计划项目, 14-9-1-8-hy 号; 中国科学院战略性科技先导专项(A 类)项目, XDA1102030103 号; 国家自然科学基金项目, 41206025 号; 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目, 2015P02 号。郭景松, 研究员, E-mail: gjings23@fio.org.cn

收稿日期: 2017-10-15, 收修改稿日期: 2017-11-05

物逐步聚集到高潮线附近, 而且在沿岸流作用下产生粒度纵向变化。蒋杨权等(2013)3 次考察了受台风影响的汇泉湾海滩形貌发生的巨大变化, 并对沙滩粒度特征进行对比分析。

有关入射波浪产生沿岸流的问题, 孙涛等(2002)研究了地形坡度、入射波浪波高、波向角不变的条件下产生的沿岸流, 认为当波浪入射角度达到 45° 时, 沿岸流速度最大。孙涛等(2004)进一步研究了近岸缓坡海域内单纯波浪以及波浪、潮流共同作用的结果, 发现在近岸海区一定范围内, 流动主要以近岸流为主, 其范围受到入射波浪的影响; 在波浪破碎区内, 潮流对污染物输移扩散的影响明显小于波浪变形、破碎形成近岸流的作用。唐军等(2007)的数值模拟结果表明, 在波浪以一定角度斜向近岸传播破碎产生的沿岸波致流中, 随着斜向入射波浪波高和沿岸底坡的增加, 污染物运动的速度明显加快, 波浪向近岸传播中破碎所产生的波致流场对污染物的输运与传输有重要影响。

基于 COHERENS-SED 水动力悬沙模型, 韩树宗等(2007)结合当地一般波浪条件, 模拟了青岛近海悬浮泥沙输运情况, 结果表明: 在波-流联合作用下, 近岸掀沙明显, 大潮期间该海域近岸悬沙浓度最高可达 50mg/L ; 东野大明等(2010)进行黄河三角洲的海流三维运动数值模拟, 研究结果显示波浪辐射应力的存在显著改变了水深小于 5m 的流场。Lu 等(2013)

数值结果显示, 20m 以浅波浪对泥沙的再悬浮及输运起核心作用。

虽然前人对该区域泥沙动力过程开展了不少研究, 但大部分基于定性分析, 有一些数值模拟结果但缺少同步的调查资料佐证。管理部门对水浴场沙滩细沙流失也采取了一些措施, 并取得一定的成效, 如拆除航海学校码头, 及近年来的海滩补沙。

本研究旨在通过现场的观测, 并利用新近发展的、适合高分辨率模拟的浪-潮-流-泥沙耦合模式 FVCOM(Finite-Volume Community Ocean Model)模拟汇泉湾水动力环境, 为沙滩沙质退化问题进一步治理提供动力学依据。

1 现场观测

1.1 流的观测

我们分别于 2015 年 1 月和 9 月在汇泉湾进行了水文、泥沙和悬浮物的综合观测。其中, 设有 3 个同步观测测站(见图 1), 进行冬、夏 2 个季节的大、小潮周日 25 小时连续观测。沿汇泉湾湾口断面进行了周日声学多普勒海流仪(ADCP)走航观测, 每 1 小时往返一次, 共计 25 次。

利用准调和分析方法从测流资料分离出潮流和余流, 其中余流见图 2。总体而言, 各站的余流, 除靠近鲁迅公园岸边的 C2 的表层外, 无论是冬季或夏季, 小潮期或大潮期, 其方向变化不大。具体说来: 靠近

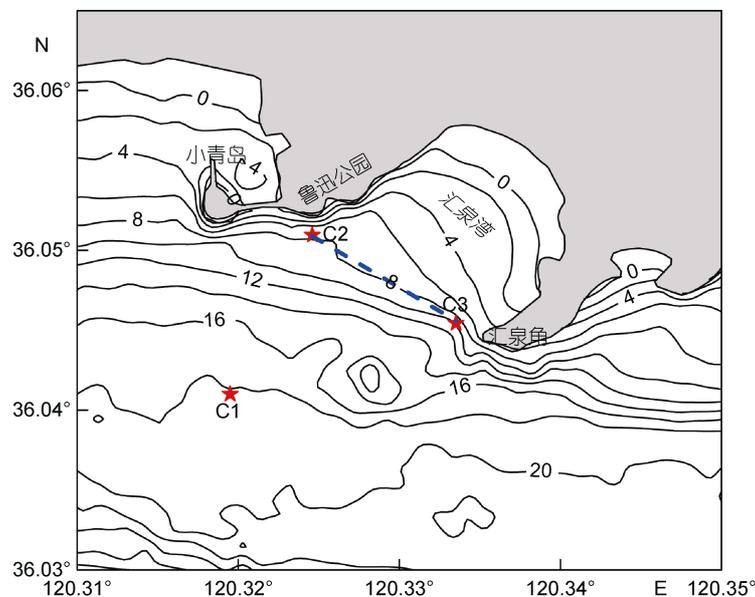


图 1 汇泉湾及其紧邻海域的地形(图中等值为水深)、海流观测站(C1,C2 和 C3)和观测线(C2 与 C3 之间)

Fig.1 The topography (contour in the figure is water depth), current observation stations (C1, C2, and C3) and the observation lines (between C2 and C3) in Huiquan Bay and its immediate vicinity

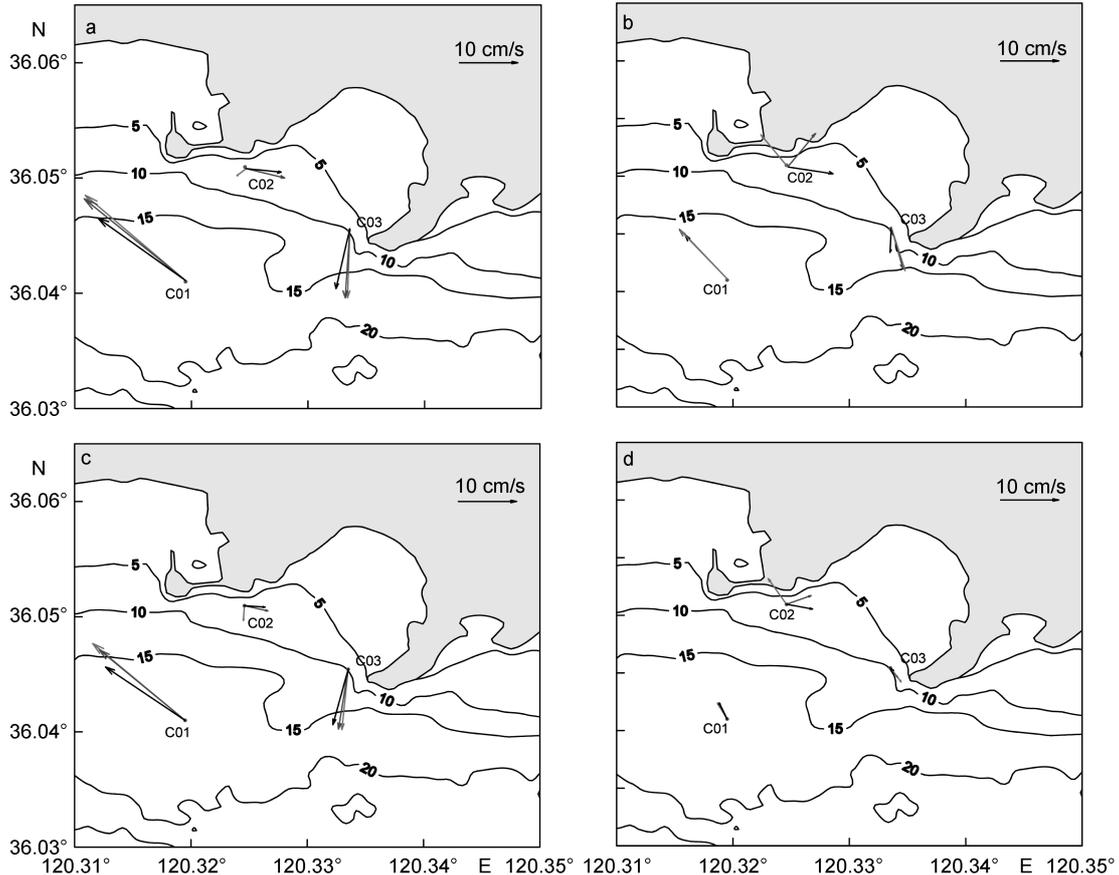


图2 各站余流矢量图

Fig.2 The residual flow vectors at each station: summer spring tide period (a) and neap tide period (b); winter spring tide period (c) and neap tide period (d). Pink, blue, and black represent the surface layer, the middle layer ($0.4H$), and the bottom layer, respectively
注: a: 夏季大潮期; b: 夏季小潮期; c: 冬季大潮期; d: 冬季小潮期。粉色、蓝色和黑色分别为表层、中层($0.4H$)和底层

湾外的 C1 站位余流方向为偏 NW 向; 靠近鲁迅公园岸边的 C2 的余流, 除表层外均为东向流, 大致沿岸线流入湾内; 靠近汇泉角的 C3 站余流为向南流出, 流向与 10 m 等深线存在明显的交角。由此可见, 汇泉湾及其紧邻海域常年存在一个与地形密切关联的较稳定环流系统。

从图 2 可以看出: 位于湾外的 C1 站在大潮期余流流速最大, 从表层到底层为: 冬季时 34.6—27.6cm/s, 垂向平均 32.4cm/s; 夏季时 18.3—22.6cm/s, 垂向平均 21.4cm/s。在小潮期 C1 站余流明显减小, 冬季时 5.6—4.5cm/s, 垂向平均 5.2cm/s; 夏季时 10.4—12.4cm/s, 垂向平均 11.6cm/s。大潮期冬季和夏季湾外区的余流大小相当, 小潮期的余流明显变小, 尤其冬季变化更大。这表明外区环流被潮余流支配, 而季风驱动的 Ekman 流也有重要的影响。靠近鲁迅公园的 C2 站余流, 除近表层(表层和 $0.2H$, H 为水深)外流向较稳定, 沿岸线进入湾内, 流速大约 6—10cm/s,

夏季略大于冬季, 小潮期和略大于大潮期。靠近汇泉角的 C3 站, 海水从汇泉湾向南流出。大潮期的余流为南向, 流速冬季约 18cm/s, 夏季约 12cm/s; 小潮期的余流为东南向, 流速冬季约 4cm/s, 夏季约 7cm/s。

图 3 展示了汇泉湾湾口断面余流。从余流矢量可以看出, 从测线西北端的北向流开始, 沿顺时针方向逐步改变, 至测线东南端变为南向流。

1.2 风和浪的统计结果

依据青岛气象台 31 年(1971—2001)风场观测资料, 得到各风向平均出现频率和逐月平均风速, 其结果如下。秋、冬季盛行 N-NW 向风, 年平均风速为 5.2m/s。其中冬季 NNW 向的风频率最大, 达到 19%; 其次是 N 向, 频率为 15%; NE、ENE 向风最少, 频率只有 1%; 秋季盛行 N 向风, 频率为 15%; 其次为 NNW 向, 频率为 13%; NE 向风最少, 频率为 1%。春、夏季盛行 SE 向风。其中春季盛行 SE 向风, 频率为 16%; 其次为 ESE 向, 频率为 16%。NE、ENE、WSW

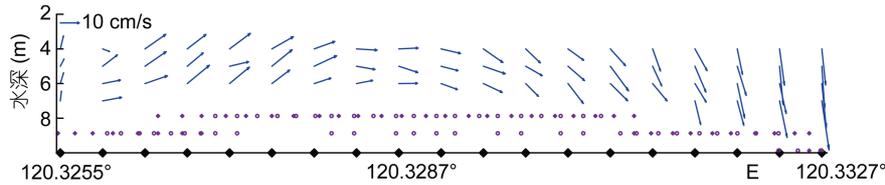


图3 汇泉湾湾口 C2 至 C3 断面余流(紫色点是观测断面的海底位置)

Fig.3 The residual currents at sections C2 to C3 of Huiquan Bay (The purple point is the seabed position of the observation section)

向风最少, 频率只有 1%; 夏季也盛行 SE 向风, 频率为 22%; 其次是 ESE 向和 SSE 向, 频率分别为 16% 和 15%。而 NNE-ENE, WSW-W 这 5 个方向风最少, 频率仅为 1%。各季节平均风速变化不大, 逐月平均风速为: 4 月份平均风速最大, 为 5.8m/s, 其次是 12 月和 3 月份, 为 5.5m/s; 8、9 两月平均风速最小, 为 4.5m/s, 其次是 6 月份, 为 4.8m/s。

小麦岛海洋观测站位于汇泉角以东约 10km, 两处均朝南面向开阔的黄海海域, 其波浪特征可以认为基本一致。在这里, 我们利用小麦岛站 31 年 (1971—2001) 波浪观测资料得到如下的统计结果: 风浪、涌浪出现频率分别为 37% 和 63%, 以涌浪为主。风浪主要集中在 E-SW 向和 WNW-NNW 向, 其中以

NW 向居多, 频率为 10%; 其次为 E 向和 ESE 向, 频率分别为 8% 和 7%; 其余各向风浪很少。涌浪大部分出现在 E-SW 向, 并集中于 ESE、SE 和 SSE 三个方向; 尤以 SE 向高达 26%。

青岛市南区海域波浪受气候和天气影响, 各向波浪具有不同的统计特征。受台风影响, 较强的浪分布在 E-SSW 方向; 最大波浪出现在 SE 方向, $H_{1/10}$ 和 $H_{1/100}$ 波高分别为 5.1m 和 6.8m。由于受地形的掩护, 偏北的浪小得多, NNE-WSW 方向的 $H_{1/10}$ 和 $H_{1/100}$ 均不超过 2.0m。小麦岛波浪受气候和天气影响, 各月具有不同的统计特征。受台风影响 7、8、9 月波浪最强, 其他各月较弱; 受台风影响, 较强的浪分布在偏东南方向; 由于受地形的掩护, 偏北的浪较小。浪玫瑰图见图 4。

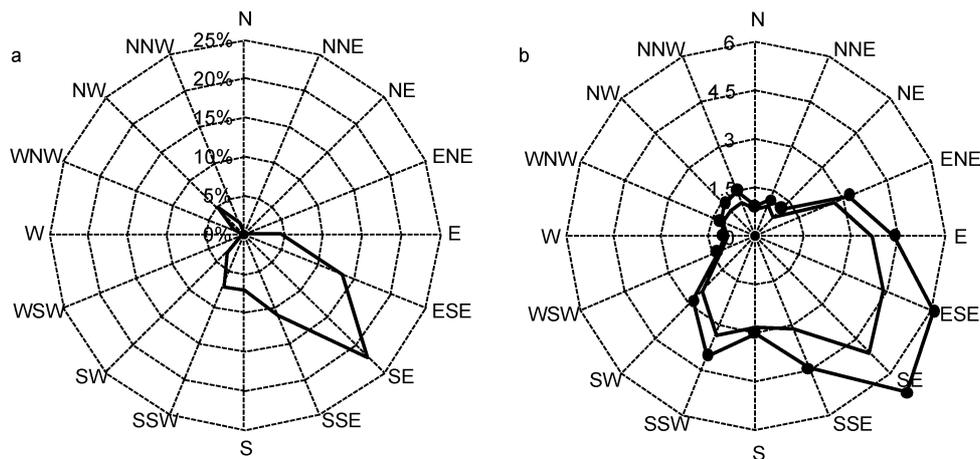


图4 小麦岛海洋站波向玫瑰图(a)和波高玫瑰图(b)(标注点者为 $H_{1/100}$, 未标注点者为 $H_{1/10}$)

Fig.4 The rose diagrams of wave directions (a) and wave height (b) in Xiaomai Island (marker is $H_{1/100}$, unmarked is $H_{1/10}$)

1.3 底质类型及分布特征

表层沉积物样品的粒度分析结果表明(图 5), 汇泉湾及邻近海区共有黏土质粉砂、粉砂、细砂、中粗砂和砾石等五种类型的沉积物, 其分布明显呈“湾中细, 湾外粗”的特征, 而在湾口东西两侧近岸沉积物的分布还表现出“西侧较粗, 东侧稍细”的差异。具体地说, 汇泉湾中部的大片区域(10m 等深线以内), 底

质以颗粒相对较细的黏土质粉砂为主; 在横向上底质由细变粗的特征明显, 也即由湾中向湾外, 依次出现较粗的粉砂、细砂, 至湾外 20m 等深线附近转为更粗的砾石; 在纵向上, 底质则呈现出由粗变细又转粗的特征: 大致沿 10m 等深线, 由湾外西侧近岸分布的中粗砂, 向东逐渐过渡为较细的粉砂, 至湾东部岬角附近又出现稍粗的细砂。

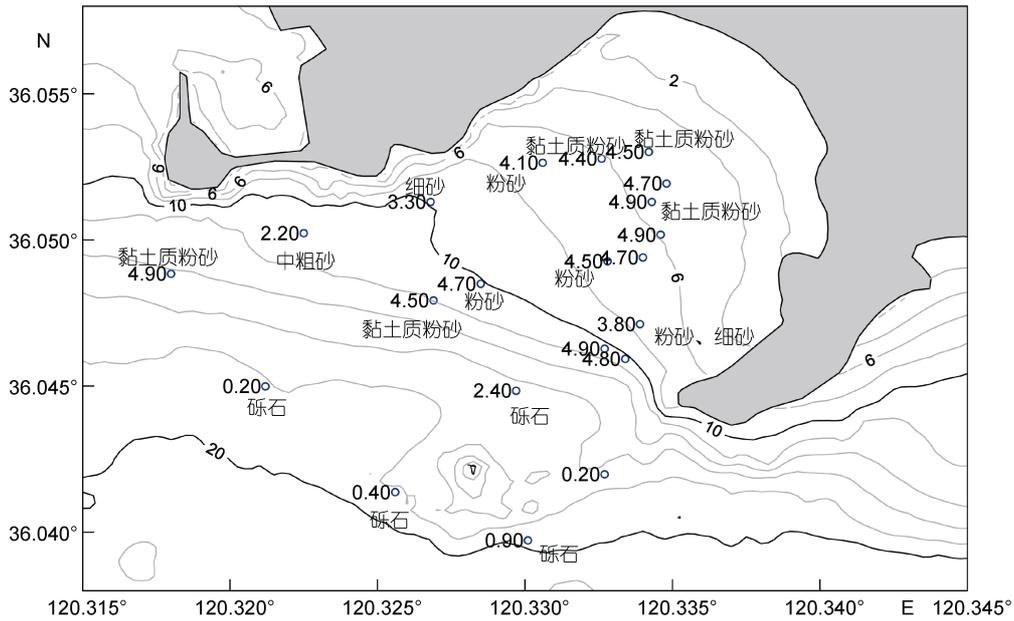


图5 汇泉湾 21 个站位表层沉积物类型及平均粒径(单位: ϕ , 等值线为水深)
Fig.5 Type and size of the sediment at 21 sites in Huiquan Bay (contour : water depth)

以上对汇泉湾海域两个航次水文观测结果表明: 冬季和夏季汇泉湾口和湾外的余流方向都比较稳定, 在湾外余流为西北向(310° — 330°); 湾的西北口为东向, 东南口为南向。三站的余流构成一个顺时针环流系统。在湾外余流流速比较大, 大潮期达到 20—35cm/s; 小潮期约 5—12cm/s。湾的西北口 5—9cm/s, 湾的东南口 4—18cm/s。历史资料的统计分析表明: 研究海域秋冬季盛行 NNW 向风, 春、夏盛行 SE 向风。波浪受气候、天气和地形的影响, 各向波浪具有不同的统计特征。受台风等大风过程影响, 较强的浪分布在 E-SSW 方向, 最大波浪出现在 SE 方向; 由于受地形的掩护, 海浪风区短, 冬季偏北风产生的浪比夏季小得多。

2 水动力数值模拟

本项工作采用最新的 FVCOM(Finite-Volume Community Ocean Mode, V3.2)三维数值模式模拟汇泉湾的水动力-泥沙分布。FVCOM 是无结构网格、有限体积、三维原始方程的海洋模式(Chen *et al*, 2003)。水平方向上是三角网格, 而在垂向方向上采用的是 σ 坐标。有限体积的方法(FVM)既有有限元方法(FEM)几何拓扑结构上的灵活性, 又有限差分方法(FDM)在数值离散上相对简单的特点。流和温、盐利用积分形式的方程计算。FVCOM 现在已经开发出并行计算模块, 可适用不同需求的模型。FVCOM3.0 版

本开始增加了浪、流和泥沙输运耦合模块, 引入了波浪辐射应力来计算波致流(Wu *et al*, 2011), 其中用到的波浪模式由第三代海浪模型 SWAN 改造得来, 其中保留了 SWAN 所有的物理过程, 只是在数值计算方法上与之有所不同(Qi *et al*, 2009)。

为尽量消除边界对计算的影响, 我们将模拟区域扩展到了整个青岛外海, 计算域面积约 934km²。为了充分考虑沿岸地形对研究细部流场、波浪等的影响, 本计算工作垂向分 10 层, 在开边界网格分辨率为 1.5km, 研究海域网格分辨率则加密到了 20m, 网格的节点数为 16826, 三角网格数为 31830。网格设置如图 6a 和 6b 所示。水深采用青岛近海海图数据, 汇泉湾采用本单位测得的较高分辨率(50m)的观测数据, 原始水深点见图 6c。

2.1 潮流和潮致余流模拟

在潮汐潮流模拟中, 开边界考虑了 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 四大分潮, 采用美国俄勒冈大学全球潮汐反演模型 TPXO8.0 的结果。初始条件采用冷启动, 即水位和流速值都为 0, 为保证模型启动达到平衡或准平衡状态, 模拟计算都比观测时间提前了 10 天。利用 T_tide 对模拟的三个月的数据进行调和, 得到各个网格点的调和常数, 然后采用小麦岛和大港的潮位资料进行验证。从利用 1997 年一年观测资料的调和结果来看, 振幅的误差一般不超过 2cm, 迟角的误差不超过 2° , 说明该模型对该海域的潮汐模拟有较好

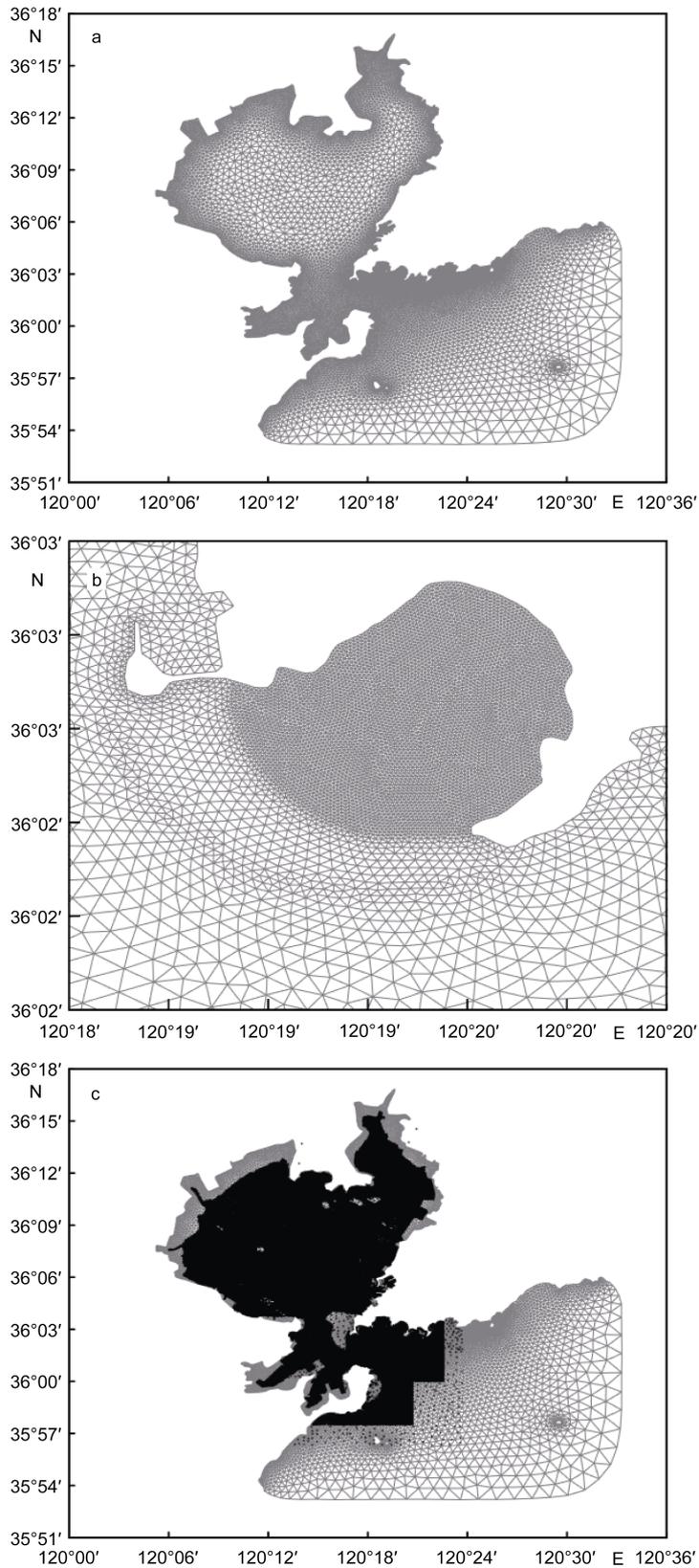


图 6 计算区域网格(a)、汇泉湾附近计算网格(b)设置及模式采用的原始水深(c)

Fig.6 The regional grid (a), the computation grid (b), and original water depth (c) used for the computation near Huiquan Bay. The red dots are the places where the original depths are used for computation

注: 红点为模式采用原始水深位置。

的效果。

模拟结果表明汇泉湾的潮流在涨潮阶段为顺时针旋转, 而落潮阶段为逆时针旋转。具体来说, 涨潮时, 湾外潮流为自东南向西北运动, 湾内靠近沙滩处潮流为自西北向东南运动, 落潮时则相反。图 7a 给出了潮致余流的计算结果。从图中可以看出潮致余流以湾口中部为中心形成一个顺时针的环流, 量值较大, 为 20—30cm/s。图 7b 是沿湾口断面数值计算结果, 与 25h 走航观测得到余流(图 3)比较是一致的。

靠近沙滩水域较小, 大部分为西向流, 量值只有几厘米每秒。

2.2 波浪及波致流

前面的分析结果已表明, 影响青岛的主浪向为 SE 向(概率占 26%), 特别在夏季的七八月份, 达 40% 以上; $H_{1/100}$ 波高最大为 6.8m, 由于受地形的影响, 偏北的浪小得多。因此, 波浪的计算以夏季的 SE 向波浪为算例, 设定开边界有效波高为 2.5m, 周期 6.5s(根据小麦岛海洋站统计, 相当于两年一遇), 然

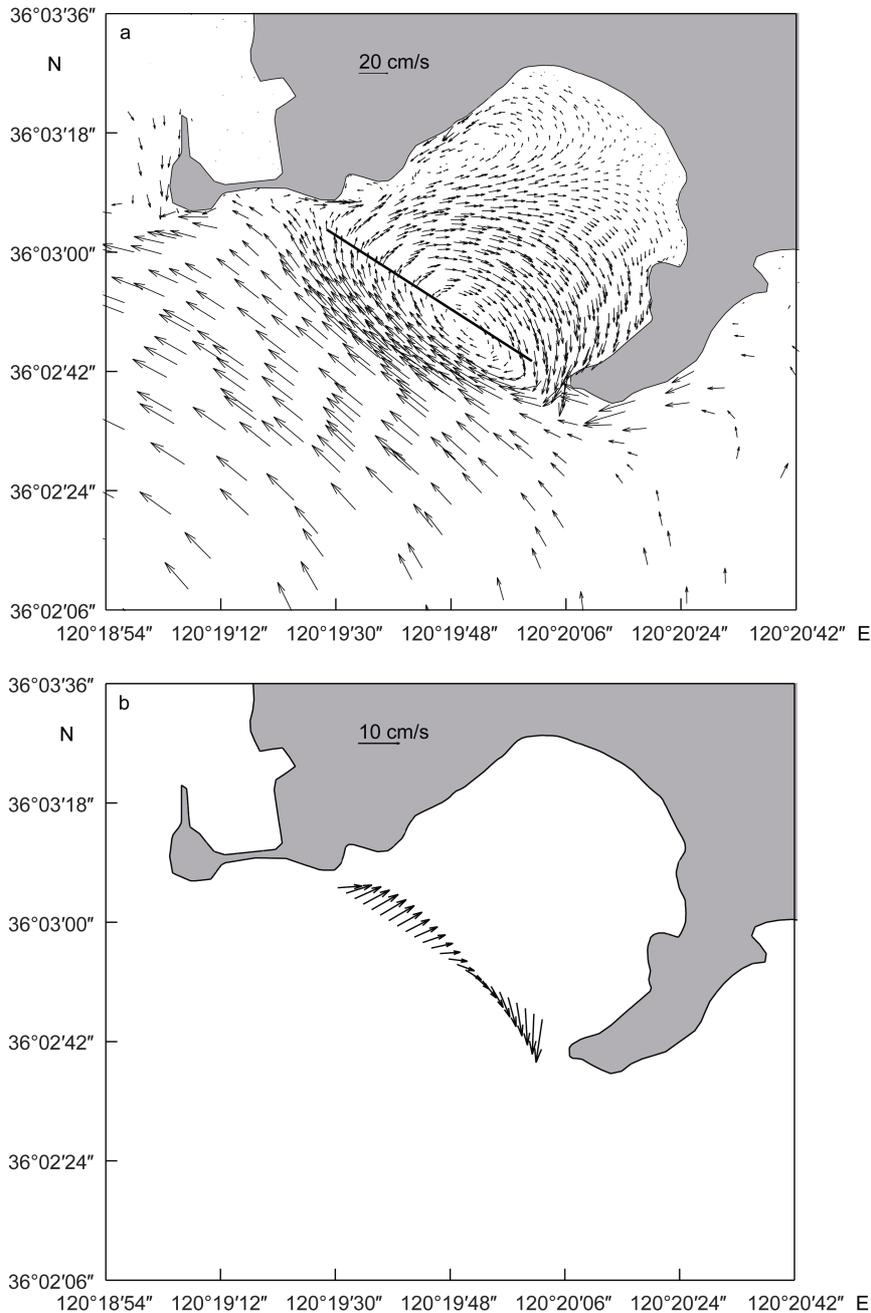


图 7 模型计算的垂向平均潮致余流: 汇泉湾及湾外区(a)及湾口断面(b)

Fig.7 The vertical mean tide-induced residuals that modeled: Huiquan Bay and the outer area (a) and the bay mouth section (b)

后计算波浪经过折、绕射在汇泉湾形成的波浪场。从图 8 可以看出, 在外海东南向波浪的作用下, 汇泉湾西部的波浪要大于东部, 西部岸线附近有效波高 1m 左右,

东部只有 0.4m 左右。图 9 给出了 2 年一遇 SE 波浪作用下青岛近海波致流的垂向平均流场, 可以看出青岛沿岸的波致流为自东向西, 流速在 20cm/s 左右。

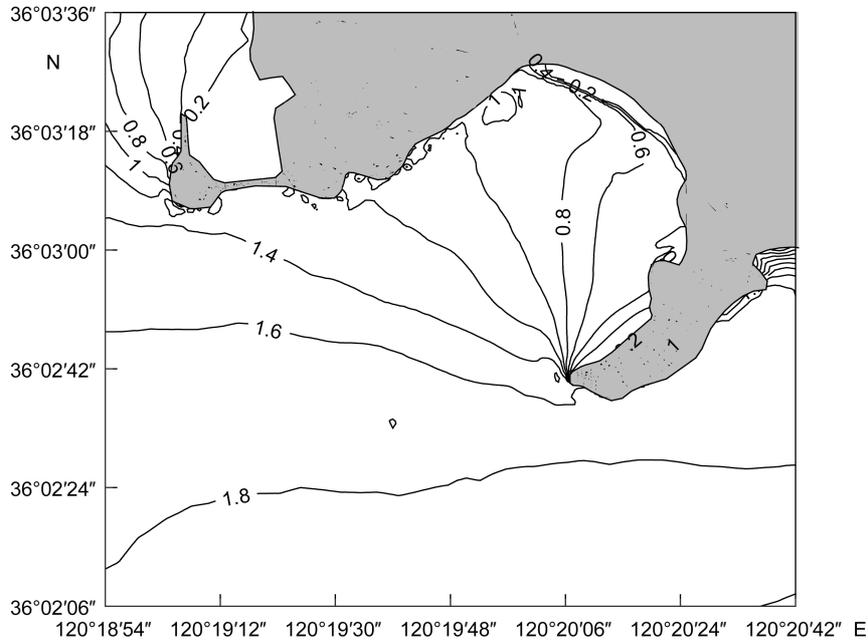


图 8 汇泉湾 2 年一遇 SE 向有效波高场(单位: 米)

Fig.8 The SE wave field occurred every two years in Huiquan Bay (contour: wave height)

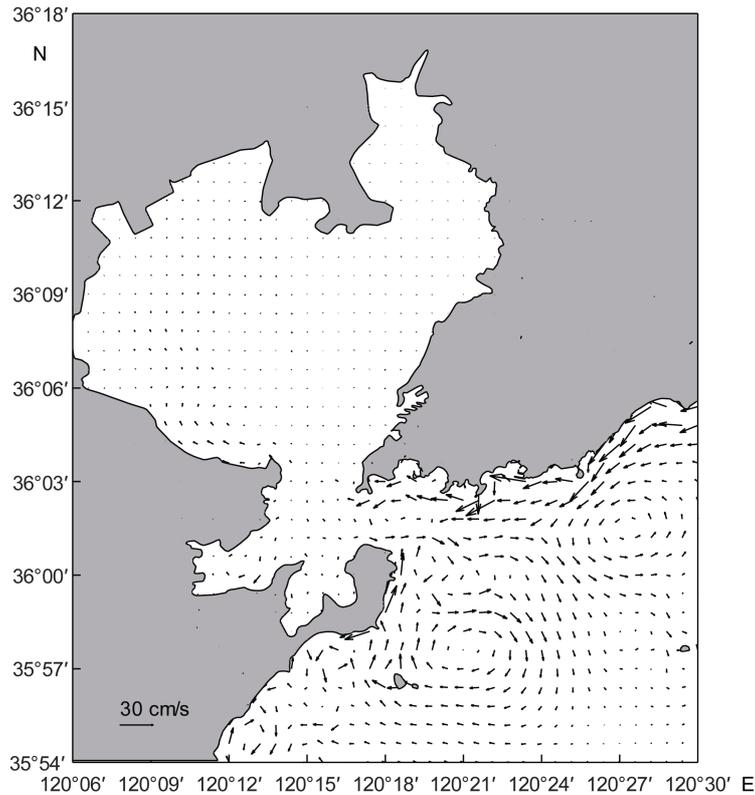


图 9 青岛近海 2 年一遇 SE 向波浪场作用下的波致流

Fig.9 Wave-induced flow under the action of the SE wave field occurred every two years in Qingdao offshore

图 10 给出了汇泉湾附近的波致流。从图中可以看出, 表层流要大于底层流, 表层流在汇泉湾形成了顺时针的环流, 湾口流向朝西北, 湾底沿着岸线朝东南。在湾内, 波致流沿岸流动形成的沿岸流的流速可达 20cm/s 左右; 海湾中部流最小, 流速只有几厘米每秒。底层的流速在湾口与表层形态不同, 而在湾内与表层基本一致, 都是沿东南向流。

以上模拟计算表明: 潮致余流和波致流形成的汇泉湾环流都是顺时针的环流, 但两者也存在以下两处差异, 值得注意。(1) 汇泉湾潮致余流的环流中心位于湾口, 波致流的环流中心位于湾口内侧。图 5 表明汇泉湾中部的大片区域, 底质以颗粒相对较细的黏土质粉砂为主。由此可见黏土质粉砂大致分布在波致流之环流中心区。显然, 这是因环流中心区流小,

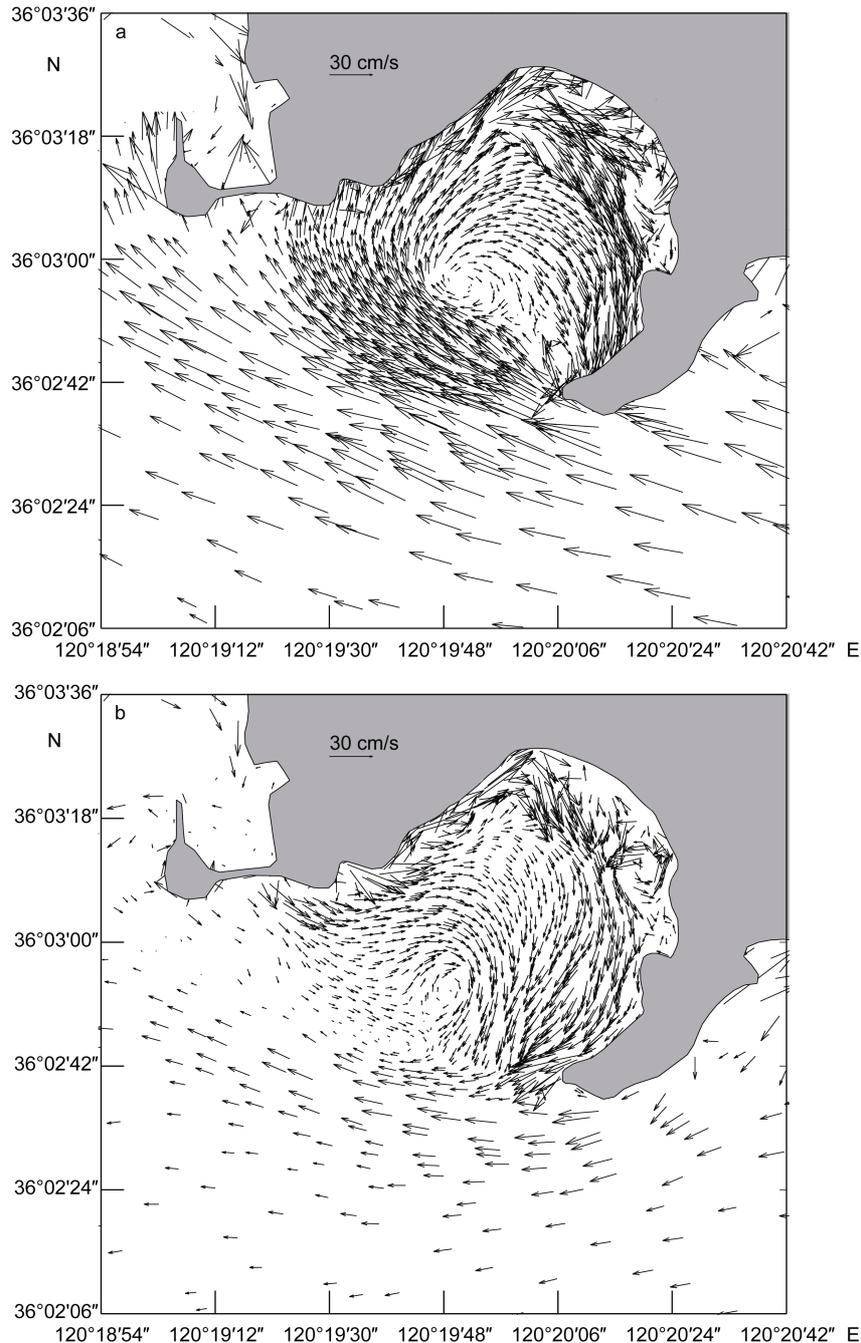


图 10 汇泉湾 2 年一遇 SE 向波浪场作用下的表层(a)和底层(b)波致流

Fig.10 Wave-induced currents at the surface (a) and bottom (b) under the influence of SE wave field occurred every two years in Huiquan Bay

泥沙不容易被带走的缘故。(2)在湾顶的潮间带,潮致余流为西北向,而波致沿岸流为东南向。从湾顶区的底质来看,沙堤的沉积物从西向东逐步由粗变细(王潇潇等,2013),凹槽从西向东逐步变浅(常瑞芳等,1992)。由此可见,潮间带波致余流流路径与凹槽和沙坝走向一致,波浪产生的波致沿岸流因该对于海滩泥沙输运起主导作用。

3 结论和建议

青岛近海波浪受气候和天气影响,各月具有不同的统计特征。受台风影响7—9月波浪最强,其他各月较弱;受台风影响,较强的浪偏东南方向;由于受地形的掩护,偏北的浪较小。模式计算结果表明,夏季当有效波高为2.5m的东南向波浪传入湾区时,产生的波致流沿岸流的流速可达20cm/s左右;海湾中部流最小,流速只有几厘米每秒。水文、泥沙的观测和模式计算结果表明:汇泉湾存在一顺时针环流(即反气旋式环流),强流环携带泥沙从汇泉湾的西侧进入而从东侧流出,湾口环流受潮致余流和浪致流的共同作用,环流带泥沙粒径较大;环流中心区流小,泥沙不容易被带走,沙质较细。环流由潮致余流和波致余流叠加而成,其中波致流构成的环流路径与汇泉湾底质类型及分布特征存在高度的一致性,即波致流将汇泉湾西侧的岩石剥蚀的较粗的细砂和粉砂搬运至浴场沙滩。在汇泉湾湾顶的潮间带段,波浪破碎造成的掀沙作用塑造了潮间带的凹槽和沙坝,而波致沿岸流把原本较细的泥沙掀起,并从东侧带出湾区。基于波浪在潮间带变形、破碎产生掀沙作用和波致沿岸流对于海滩泥沙流失起了主导作用,为保护沙滩,建议:(1)潮间带泥砂层具有良好的板结,因此需尽可能禁止与挖、掀泥砂层有关的活动,如海滩挖沙-堆沙造型等;(2)目前采用的“补沙方法”是可行的,有利于保护自然风貌。但补沙的粒径不宜太细;一次补沙量不宜太多,以避免沙滩坡度过大。

参 考 文 献

韩树宗,赵瑾,2007.定常径流条件下环胶州湾河流来沙数

- 值模拟.中国水运(学术版),7(6):93—95
- 于洪军,徐兴永,李萍等,2003.青岛市浮山湾、汇泉湾、崂山湾海滩与海底沉积环境分析.海岸工程,22(3):12—18
- 王伟伟,庄丽华,阎军等,2007.青岛市汇泉湾海水浴场表层沉积物粒度特征及输运趋势.中国石油大学学报(自然科学版),31(3):13—17
- 王潇潇,周旻玥,韦龙明等,2013.青岛汇泉湾海滩地貌与沉积物变化特征探讨.桂林理工大学学报,33(2):266—272
- 东野大明,武国相,梁丙臣,2010.垂向变化的波浪辐射应力影响下流场数值研究.海岸工程,29(3):1—10
- 孙涛,陶建华,2004.波浪作用下缓坡近岸海域沿岸流分布影响因素分析.水动力学研究与进展:A辑,19(4):558—564
- 孙涛,韩光,陶建华,2002.波生沿岸流数值模拟研究及其实验验证.水利学报,33(11):1—7
- 李春柱,徐宏明,侯国本,1992.青岛汇泉湾浴场部分海滩侵蚀及治理的初步探讨.海岸工程,11(1):26—31
- 唐军,沈永明,邱大洪,2007.近岸波浪破碎区污染物运动的数值模拟.中国工程科学,9(12):63—68
- 常瑞芳,刘镭,范元炳,1992.波浪对青岛汇泉湾潮间沙坝的塑造作用.青岛海洋大学学报,22(4):61—70
- 常德馥,赵炳来,1998.汇泉湾改造的几点建议.海岸工程,17(1):56—58
- 董贺平,2004.青岛海滩沉积构造及其底形特征.海洋地质动态,20(12):5—8
- 蒋杨权,王然,韦龙明等,2013.青岛汇泉湾海滩粒度变化原因分析及保护建议.南方国土资源,(10):38—40
- Chen C, Liu H, Beardsley R C, 2003. An unstructured, finite-volume, three dimensional, primitive equation ocean model: Application to coastal ocean and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20: 159—186
- Lu J, Qiao F L, Wang X H *et al*, 2013. Modeling the Yellow River sediment flux and its deposition patterns under climatological conditions. *Ocean Dynamics*, 63(6): 709—722, doi: 10.1007/s10236-013-0626-0
- Qi J H, Chen C S, Beardsley R C *et al*, 2009. An unstructured-grid finite-volume surface wave model (FVCOM-SWAVE): Implementation, validations and applications. *Ocean Modelling*, 28(1—3): 153—166, doi: 10.1016/j.ocemod.2009.01.007
- Wu L Y, Chen C S, Guo P F *et al*, 2011. A FVCOM-based unstructured grid wave, current, sediment transport model, I. Model description and validation. *Journal of Ocean University of China*, 10(1): 1—8, doi: 10.1007/s11802-011-1788-3

THE HYDRODYNAMIC CONDITIONS AND NUMERICAL MODELING OF THE HUIQUAN BAY

GUO Jing-Song^{1,2,3}, WU Lun-Yu^{1,3,4}, QIAO Fang-Li^{1,2,3}, CAI Ai-Min⁵, TANG Wen-Zhou⁵

(1. *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*; 3. *Key Laboratory of Marine Sciences and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 4. *National Marine Environmental Forecasting Center, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China*; 5. *Qingdao Guoxin Huiquan Bay Management Co., Ltd., Qingdao 266071, China*)

Abstract Huiquan Bay is one of the most important beaches of Qingdao. However, the beach degeneration and sand erosion have raised the high attention of scientists. We aim to study the cause of the problem, find the solution, and provide a technical assistant to the ecological environment protection and sustainable development of the bay. A comprehensive survey in terms of hydrodynamics and sediment was conducted in January and September 2015 in the bay. A high-resolution current-wave-coupled model was developed based on the FVCOM (Finite-Volume Community Ocean Model). The survey and the numerical model result analysis shows the following. There is a strong clockwise (anti-cyclonic) circulation that brings mud and sand into the bay in the west and out of the bay in the east. The diameter of the sediment with the circulation current is large. The current in the center of the anti-cyclonic circulation is weak and are unable to carry on sediment. The main reason of the beach degeneration and erosion in the Huiquan Bay is due to an along-coast sand transportation caused by wave and wave-induced current, by which the sands are moved from the bay in the west to the swimming beach, and the finer mud and sand are moved out of the bay at the east corner of the bay.

Key words the Huiqian Bay; hydrodynamics environment; numerical modeling; FVCOM