

钦州湾三维潮流数值模拟^{*}

The Numerical Value Simulation of the Three Dimensional Tide of the Qinzhou Bay

鲍献文¹ 陈波² 侍茂崇¹ 邱绍芳³
Bao Xianwen¹ Chen Bo² Shi Maochong¹ Qiu Shaofang³

(1. 中国海洋大学 山东青岛 266003; 2. 广西科学院 南宁市星湖路 32号 530022;
3. 广西红树林中心 广西北海 536000)

(1. Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266003, China;

2. Guangxi Academy of Sciences, 32 Xinghulu, Nanning, Guangxi,

530022, China; 3. Guangxi Mangrove Research Center, Beihai, Guangxi, 536000, China)

摘要 采用潮流控制方程和湍流封闭方程构建完整的三维浅海潮波定解方程组,通过建立钦州湾三维潮流数值模型来重现计算钦州湾的潮位和潮流变化状况。模拟结果与同步进行的岸边潮位及海上潮流的观测值校验结果表明,实测潮位资料与对应时间的计算结果吻合良好,潮位变化为1d中出现1次高潮和1次低潮,1个月内出现2次大潮和2次小潮,大潮潮流约4.0m,小潮潮流约1.0m。实测潮流与对应时间的计算结果十分接近,最大流发生时刻、转流时间以及潮流性质与计算结果相差不大,潮流速度和潮流方向也与计算结果较为一致。模拟计算结果真实地反映钦州湾的潮位变化和潮流运动状况。

关键词 三维潮流模型 潮位 潮流 数值计算

中图法分类号 P731.21

Abstract To meet the transportation need of the pollutant which comes from the project developmeu for the constructive engineering of the Qinzhou Bay power plant, the compete three dimensional fined solution equation group of the shallow sea tide, which consists of the tide control equation and obturate of turbulence equation, was adopted to calculate the tide level and the tide way of the Qinzhou Bay. The results, compared with the simultaneously measured value of the bank tide level and the tide at sea, show that, the practical measured data coincide very well with the calculations at the comesponding time, and, the change of the tide is that the high tide and the low tide each occurs onœ in a day, besides, the neap tide and the spring tide each occurs twice within one month, moreover, the spring tide is about 4.0 m and the neap tide is 1.0 m. The practical measured data of the tide are quite close to the calculations. The moment that the biggest tide appears, the change time and the quality of the tide are not far from the calculations. The velocity and the direction of the tide are also rather consistent with the calculations. The calculated results, which actually report the change of the tide level and the movement of the tide of the Qinzhou Bay, provide scientific basis for project development.

Key words three dimension tide model, tide level, tide way, numerical value calculation

钦州湾位于广西沿岸的中段,属于溺谷型海湾,该湾由内湾(茅尾海)和外湾(钦州湾)两部分构成。钦州湾呈哑铃状,中间狭窄,两端开阔,东、西、北三面为陆地环绕,南面与北部湾相通。湾内岛屿众多,港汊交错,海岸曲折,具有丰富的港口开发价值。近年利用该

湾的天然条件建设多个万吨级泊位和一批工业基地,如电厂、钢厂、储油码头等。因此,港湾水动力场的改变直接关系到这些工程项目污染物输送。本文通过建立钦州湾三维潮流数值模型来重现港湾潮位和潮流变化状况,了解湾内环流运动与污染物输送关系,为钦州湾内工程开发提供科学依据。

2004-04-12 收稿, 2004-07-22 修回。

^{*}国家自然科学基金(40066001)和广西自然科学基金(桂科配0135012)资助项目。

1 三维潮流数值模型及计算方法

潮流模型数值计算是研究海水运动和入海污染物随潮输移及扩散的基础。

1.1 潮流控制方程

钦州湾是一个较小的浅海湾. 为了在垂直有较好的分辨率, 垂向采用坐标变换, 经过坐标变换, 潮流模式的控制方程组可写为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - f v D + \\ gD \frac{\partial \eta}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (2A_M D \frac{\partial u}{\partial x}) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} [A_M D (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + f u D + \\ gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (2A_M D \frac{\partial v}{\partial y}) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} [A_M D (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})], \end{aligned} \quad (3)$$

式中, D 为水深, $D = H + \eta$; f 为科氏力系数, A_M 为水平方向湍粘性系数; K_M 为垂直方向湍粘滞系数, 将通过 MY 2.5 阶湍流封闭模型计算获得; ω 为坐标变换后产生的一个垂向速度. 三维笛卡尔直角坐标系中的垂向速度 w 与 σ 坐标系中的速度场有如下关系:

$$\begin{aligned} \omega = w - u(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x}) - v(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y}) - \\ (\sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t}). \end{aligned} \quad (4)$$

为了更为真实地反映潮流垂直结构, 模式将采用近年来应用效果很好的湍流封闭模型计算垂直湍粘滞系数. 湍流封闭方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 D}{\partial \sigma} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \\ & \frac{2Dq^2}{A_1} + \frac{\partial}{\partial x} (DA_H \frac{\partial q^2}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (DA_H \frac{\partial q^2}{\partial y}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 l D}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right) + \\ & \frac{E_1 K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{IE_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \frac{Dq^3}{B_1} W + \\ & \frac{\partial}{\partial x} (DA_H \frac{\partial q^2 l}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (DA_H \frac{\partial q^2 l}{\partial y}), \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $q^2/2$ 为湍流动能; l 为湍流宏观尺度.

1.2 边界条件

(I) 自由表面边界条件:

$$\rho_0 \frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = (\tau_{ax}, \tau_{ay}), \quad \sigma \rightarrow 0, \quad (7)$$

对于纯天文潮, 风应力 $\tau_a^{\omega} = 0$;

(II) 在近海底处边界条件:

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = C_z (u^2 + v^2)^{1/2} (u, v) \sigma = -1, \quad (8)$$

式中, $C_z = \max\left(\frac{\kappa^2}{l_n^2(z/z_0)}, 0.0025\right)$, (9)

其中, κ 是卡门常数, $\kappa = 0.4$; z_0 是海底粗糙度, 在潮流模拟中 z_0 可取为 0.0020. 01 m; z 是离海底最近网格与海底的距离.

(III) 垂直边界条件:

$$\omega(0) = \omega(-1) = 0, \quad (10)$$

(IV) 岸边界条件:

$$V_n^{\omega}(x, y, \sigma, t) = 0. \quad (11)$$

式中, n^{ω} 为岸线外法线方向.

(V) 在开边界上给定潮位值:

$$\eta = a \cos\left(\frac{2\pi}{T_{M_2}} t - \theta\right). \quad (12)$$

由方程(1)(12) 构成了完整的三维浅海潮波定解方程组.

1.3 模型差分及计算过程

根据《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规范》(JTJ/T233-98), 拟采用垂直坐标变换法、分裂算子法进行模式数值计算. 数值模式在选用当前国际广泛使用的美国普林斯顿大学的河口, 陆架和海洋模式 (ECOM) 的基础上, 发展一个钦州湾三维潮流数值模型作为研究区域水域的基本动力学模型. 该模型除在近岸、河口有良好的三维分辨率外, 并引进 MY 2.5 阶湍流封闭方程计算湍粘性系数, 从而避免因人为确定该系数所带来数值模式的缺陷.

1.3.1 差分过程

对(1)(6) 式进行差分离散, 水平方向采用交错网格("C" 网格), 垂直采用等 σ 分层. 时间步长采用算子分裂技术, 先将动量方程(2)、(3) 进行3步分裂, 再将分裂的方程进行空间离散. 在离散后的代数方程中, 水平扩散项中的流量通量 Du , Dv , 以及科氏力中的速度取 n 时刻的值. 最后进行连续方程(1) 和湍流封闭模型(5), (6) 的离散, 在湍流封闭模型的离散方程中, 对流项中的流量通量用 $n+1$ 时刻的值, 其它没有时间指标的变量全部为 n 时刻的值.

1.3.2 计算过程

(I) 由科氏力项、对流项和水平扩散项构成的第一步动量分裂方程, 显式计算得到 $u^{n+1/3}$, $v^{n+1/3}$ 的值.

(II) 由垂直扩散项构成的第二步动量分裂方程

为 1 个三对角方程, 隐式求解及 $u^{n+2/3}, v^{n+2/3}$.

(III) 将由水平水位梯度项构成的第三步动量分裂方程代入连续方程中, 采用半隐差分方法组成自由表面的五对角方程组, 然后用迭代求解自由表面 η^{n+1} .

(IV) 用第三步动量分裂方程, 求解完全流速 u^{n+1}, v^{n+1} .

(V) 将第一步动量分裂方程中的对流通量, 科氏力中的速度因子变换成第(4)步所得的 u^{n+1}, v^{n+1} 的值, 重新计算 $u^{n+1/3}, v^{n+1/3}$.

(VD) 重复第(II)(V)步, 利用连续方程求解 ω^{n+1} .

1.3.3 计算域及网格设置

为了将边界误差减小到最大限度, 计算域边界扩大到东至大庙墩, 西至企沙外海, 北至茅尾海. 包括了钦州湾广大海域.

数值模式将采用空间高分辨率, 数值模式空间分辨率为 $0.2'$, 计算网格为 81×81 .

模式计算的水深以 2000 年新海图(海图号为 16781)为基础, 结合钦州湾近年来海岸开发现状, 确定计算域的边界. 计算域水深由海图摘取. 计算域和计算网格图见图 1.

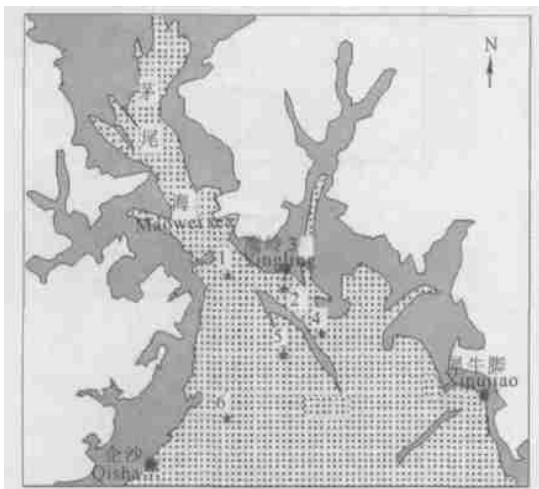


图 1 钦州湾模式计算网格

Fig. 1 The calculation lattice figure of the model of the Qinzhou Bay

☆观测站; ●水位站. ☆Observation station; ●Water level station.

1.3.4 开边界输入

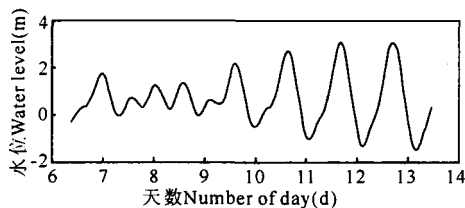
潮流模式的开边界条件主要根据企沙和犀牛脚 2 个验潮站的全日分潮 (K_1, O_1) 和半日分潮 (M_2, S_2) 4 个分潮的调和常数, 参考以往北部湾和广西近海的等潮图, 将调和常数插值到计算海域的开边界网格上, 采用潮汐预报水位作为开边界的水位, 驱动潮流数值模式.

2 验证结果分析

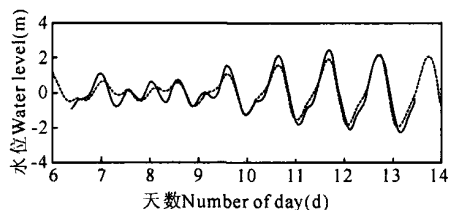
为了验证数值模型的计算结果, 2003 年 7 月 8 日 ~ 8 月 6 日期间在钦州湾内布设连续观测站 6 个, 编号 1 # ~ 6 #, 在鹰岭(取水口附近海域)、企沙、犀牛脚设临时验潮站 3 个. 连续站观测于小、中、大潮期进行, 连续观测时间为 26 h; 临时验潮站观测时间最长为 1 个月, 最短为 7 d. 站位布设见图 1 所示. 根据连续观测资料和验潮资料, 分别验证计算潮位和计算潮流.

2.1 潮位验证

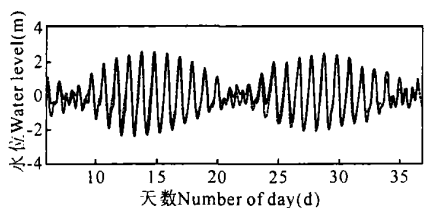
由于项目只进行了企沙、犀牛脚和鹰岭 3 个水位点的观测, 企沙和犀牛脚二站的水位经调和和分析后用于数值模式所需的开边界条件. 实际用于模式的验证只有鹰岭水位站. 从图 2 的鹰岭 1 个月实测资料与对应时间模式的结果看出, 实线部分的实测资料和点线的模式输出结果吻合良好. 1 d 中出现 1 次高潮, 1 次低潮. 潮汐表现出日潮性质, 同时曲线也清晰表现出日不等现象, 1 个月内的出现 2 次大潮和 2 次小潮. 大潮的潮差约 4.0 m, 而小潮潮差约 1.0 m. 从鹰岭水位验证结果表明, 数值模式较好地反映的钦州湾真实的潮位变化.



(a)



(b)



(c)

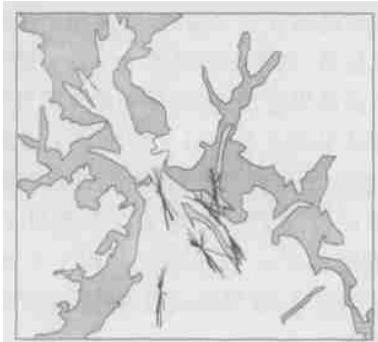
图 2 钦州湾实测水位与计算水位比较

Fig. 2 Comparison of the measured water level, and the calculation of the Qinzhou Bay

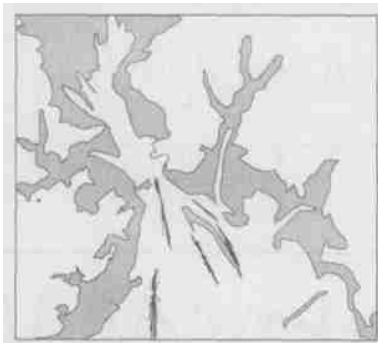
(a)企沙; (b)犀牛脚; (c)鹰岭; —: 观测水位; ···: 模拟水位. (a)Qisha; (b)Xiniu Jiao; (c)Yingling; —: The measured water level; ···: The calculated water level.

2.2 潮流验证

实测的潮流连续站位共有6个. 因受模式网格的限制, 金鼓江内的1个测流站无法用于模式的结果对比. 其它5个站点的结果在图3和图4给出. 图3是反映大潮时的表层潮流流矢量. 图4反映小潮时潮流矢量的变化. 从图4中看出计算潮流与实测潮流十分接近最大流发生时刻. 转流时间及潮流性质与实测资料相比相差不大, 说明潮流场模拟重现度良好. 从图4中也看到两者存在某些差异, 造成这种差异的原因有两个方面: 一方面, 因为计算潮流只能反映计算网格点上的流速, 与实际测流点空间位置不完全一致. 空间位置的偏差将造成误差; 另一方面, 实测资料包含了风、温盐等动力过程, 而模式仅考虑了潮汐过程.



(a)

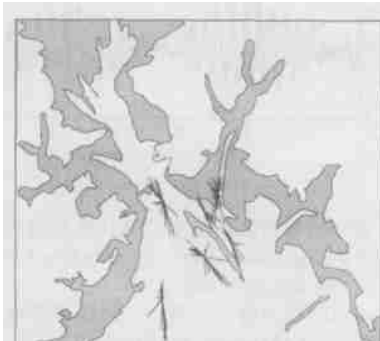


(b)

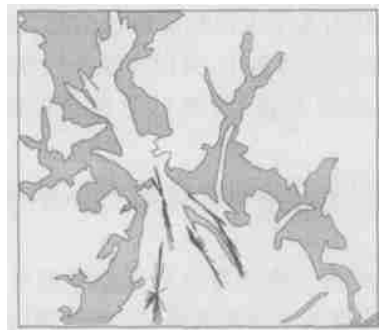
图3 大潮期间实测结果与模式结果对比

Fig 3 Comparison of the measured (up) and the models results during the spring tide

(a)实测结果; (b)模式结果. (a)The measured; (b)The models.



(a)



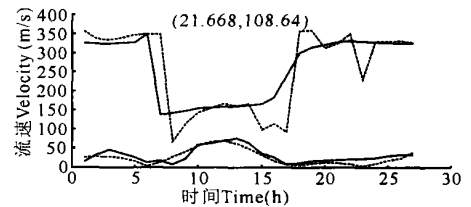
(b)

图4 小潮期间实测结果与模式结果对比

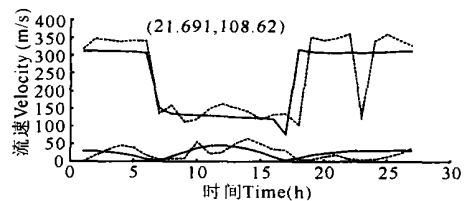
Fig 4 Comparison of the measured (up) and the models results during the neap tide

—: 实测结果; —: 模式结果. —: The measured; —: The models results.

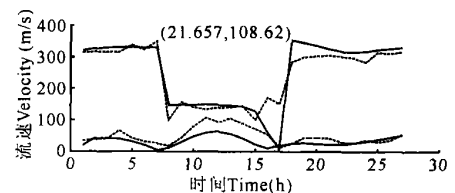
图5是2#、4#和5#观测点的实测潮流和模式计算结果的流速流向图的比较, 三站实测潮流的流向与计算潮流的流向吻合较好, 实测潮流流速的变化趋势与计算流速的变化趋势一致, 但流速略小于实测结果. 通过流速流向图的比较表明, 钦州湾的潮流模式计算结果是可信的, 模拟结果能较好地体现钦州湾海域的潮汐潮流特征.



(a)



(b)



(c)

图5 2#(a)、4#(b)、5#(c)站的实测与计算流速流向

Fig 5 The measured velocity and direction of the tide compared with the calculations at the station of 2#(a), 4#(b), 5#(c)

—: 实测流速流向; —: 计算流速流向. —: The measured; —: The calculation.

(下转第384页 Continue on page 384)

殖、生长,大面积覆盖造礁珊瑚,在礁坪的靠岸侧和潮间带,以囊藻(*Valonia*)和网膜藻(*Hydroclathus*)为主,而在礁坪和珊瑚生长带上部则以马尾藻(*Sargassum*)占优势。据王国忠等的调查结果^[4],这些褐藻在春季开始繁衍,在礁岩上和海底的覆盖率可高达80%~90%,局部地带的马尾藻茂密生长,船只难以通过。由于礁区的褐藻快速繁殖,占领了水体空间,使珊瑚群体吸收不到日光能源和养料,而大量白化。然而,随着夏季来临,珊瑚礁区的褐藻被西南海浪一扫而光,造礁珊瑚又开始恢复生机。涠洲岛珊瑚礁区褐藻的周期性快速繁殖,稠密生长无疑给珊瑚生长、发育造成相当大的负面影响。

参考文献

- 1 王丽荣,赵焕庭.珊瑚礁生态学的一般特点.生态原杂志,2001,20(6):4145.
- 2 齐文同.六射珊瑚.北京:科学出版社,1989.500.
- 3 李永适.消失中的台湾珊瑚礁.台湾:台湾大地地理出版社,1999.4171.
- 4 王国忠.南海珊瑚礁区沉积学.北京:海洋出版社,2001,24-43,7386.
- 5 Milliman J D. Marine Carbonate. Springer-velag Amsterdam, 1974. 375.
- 6 方力行.珊瑚学.台湾:台湾教育部大学联合出版社,1989.

6164.

- 7 夏华永,古万才.广西沿海海洋站观测海水温度的统计分析.海洋通报,2000,19(4):1521.
- 8 Zou Renlin, Zhang Yuanliang, Xie Yongkang. An Ecological study of Reef corals around Weizhou Island. In: Xu Gongzhao and Brian Morton, eds. Proceedings on Marine Biology of South China Sea. Beijing: China Ocean Press 1988. 201211.
- 9 黄金森.北部湾涠洲岛珊瑚海岸沉积.热带地貌,1997,8(2):12.
- 10 广西海洋开发保护管理委员会编.广西海岛资源综合调查报告.南宁:广西科学技术出版社,1996.177221,232240.
- 11 叶维强,黎广钊,等.北部湾涠洲岛珊瑚礁海岸及第四纪地质特征.海洋科学,1988(6):1317.
- 12 梁文,黎广钊.涠洲岛珊瑚礁分布特征与环境保护的初步研究.环境科学研究,2002,15(6):57.
- 13 夏华永,李树华,等.北部湾三维风流及密度流模拟.海洋学报,2001,23(6):1123.
- 14 邱绍芳.涠洲岛附近海域水质和底质环境的分析与评价.广西科学院学报,1999,15(4):170173.
- 15 韦蔓新,赖廷和,何本茂.涠洲岛水域生物理化环境特征及其相互关系.海洋科学,2003,27(2):6771.
- 16 Shepard F P. Submarine Geology. 3rd ed. New York: Harper Row, 1973. 517.

(责任编辑:黎贞崇)

(上接第378页 Continue from page 378)

模拟计算结果表明,计算域的潮波带有驻波性质,最大流发生在半潮面附近,在高、低潮时发生转流,该海域的潮流为往复流,转流时间较短。与文献[1]报道的结果基本一致。

3 结束语

从模式计算结果看,钦州湾拟建电厂附近海域的潮位变化、潮流分布以及余流状况具有如下特征。

(I)从拟建电厂附近海域的实测水位与计算水位过程曲线看,观测期间的水位完成从小潮→大潮→小潮的整个过程,其差值变化逐渐减少。潮汐属于不正规的全日潮,日潮差最大可达4.0m以上,水交换条件较好。涨潮历时大于落潮历时,与广西沿海的潮汐变化规律一致。

(II)潮流分布无论在小潮或大潮期间,潮流均表现为往复流,涨潮时流向大致为东北向,落潮时,流向相反。落潮潮流大于涨潮潮流,涨急潮流约比落急潮流小10~15cm/s。从流位涨至高于平均海面约1h。

所不同的是,大潮最大流速比小潮最大流速大1/3,最大值可达76cm/s。

(III)潮汐余流的分布状况,除岬角附近海域外,钦州湾潮汐余流一般均小于5cm/s。其中间水道余流普遍比东西两沿岸海域大。钦州湾中部较大余流其方向一般为南向或东南方向,这与历年实测结果^[4]和本次实测结果较为一致。在鹰岭附近海域潮汐余流存在很弱的北向现象,与文献[3]的研究结果吻合。

参考文献

- 1 李树华.钦州湾潮汐和潮流数值模拟.海洋通报,1996,5(4):3134.
- 2 陈波.广西沿岸余流特征的初步分析.海洋通报,1987,6(1):1113.
- 3 邱绍芳,侍茂崇,陈波.钦州湾潮流特征分析.海洋通报,2003,22(3):914.

(责任编辑:黎贞崇)