

# 北部湾潮波数值研究

赵昌<sup>1,2,3</sup>, 吕新刚<sup>1,2\*</sup>, 乔方利<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 利用普林斯顿海洋模式(POM08)建立了北部湾及其临近海区潮汐潮流数值模式, 模拟了  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $M_2$  和  $S_2$  这 4 个主要分潮, 分析了模拟的潮汐和潮流分布特征, 从潮波能量的角度讨论了琼州海峡对北部湾潮波系统的影响, 并给出北部湾潮能的耗散情况。研究表明, 北部湾是典型的全日潮海区,  $K_1$  和  $O_1$  分潮在南部湾口形成半个旋转潮波系统, 无潮点位于越南顺安附近岸边。琼州海峡中的欧拉潮汐余流为西向流, 潮余流造成的水通量约为  $0.034 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 余流出海峡西口后, 先折向北, 然后转向南流出湾外。研究海区中两个强潮流区分别位于琼州海峡和海南岛的西侧, 同时这也是两个潮能的高耗散区。北部湾的潮能自南部湾口由外海传入, 通过西口涌入琼州海峡, 到达海峡东口时日潮波的能量已基本耗散殆尽, 在海峡内耗散的 4 个分潮的潮能约为 3.33 GW, 相当于北部湾潮能耗散量的 35% 左右。数值试验表明, 琼州海峡作为潮能耗散的重要海区, 其存在对于北部湾潮波系统的形成具有较大影响。计算了底边界潮能耗散, 结果表明在北部湾和琼州海峡, 底边界耗散的潮能分别占该海区总耗散的 83% 和 80%。

**关键词:** 潮汐, 潮流, 北部湾, 数值模拟, 琼州海峡, 潮能

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2010)04-0001-11

## 1 引言

北部湾位于南海西北部, 通过南部湾口及东侧的琼州海峡与南海联通, 是一个半封闭的浅海湾。湾内平均水深约 40 m, 地形总体上自湾顶向南倾斜, 在湾外大约 200 m 等深线附近地形陡降, 进入深水海盆。北部湾内潮运动剧烈, 潮波特征明显不同于外海。在潮汐、季风、外海环流等多重因素影响下, 湾内环流系统比较复杂, 目前对其认识还远远不够<sup>[1]</sup>。潮汐潮流作为基本的海水运动形式, 是首先需要搞清的问题之一。

20 世纪 60 年代, 借助于两次中越合作海洋综合调查, 人们对北部湾潮汐潮流的概况形成了初步

认识; 80 年代, 数值研究逐渐出现。李树华<sup>[2]</sup> 较早对北部湾的主要分潮做出数值模拟, 讨论了惯性项和水平摩擦对在潮波计算中的作用。Liu 和 Ye<sup>[3]</sup> 利用简化模型模拟了北部湾  $K_1$  和  $M_2$  分潮。周滕和方国洪<sup>[4]</sup> 提出一个二维长波方程的差分格式, 将其运用于北部湾潮汐潮流的算例; 朱耀华和方国洪<sup>[5]</sup> 设计了一种二维三维嵌套的海洋数值模式, 也将其应用在北部湾潮波的模拟。这两项工作的侧重点是数值方法的探讨, 并非潮运动规律的研究。曹德明和方国洪<sup>[6]</sup> 利用二维数值模式给出了北部湾  $m_1$  和  $M_2$  分潮潮汐、潮流、潮能通量、余水位和余流的分布; 刘爱菊和张廷延<sup>[7]</sup> 得到的  $K_1$  和  $O_1$  分潮等振幅线自湾口无潮点开始呈舌状北伸, 北部湾南部的大

收稿日期: 2010-01-18; 修订日期: 2010-05-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40806016); 我国近海海洋综合调查与评价专项“海洋可再生能源开发与利用前景评价”(908-02-05-01); 我国近海海洋综合调查与评价专项“我国近海海洋可再生能源调查与研究成果集成”(908-ZC-I-21)。

作者简介: 赵昌(1981—), 男, 山东省曹县人, 博士研究生, 从事海洋潮汐潮流数值模拟研究。E-mail: zhaoc@fio.org.cn

\* 通信作者: 吕新刚, 博士。E-mail: lxxg@fio.org.cn, gary.lxxg@gmail.com

片海域振幅微弱,这与前人结果迥异。90年代后期以来,三维研究逐渐出现<sup>[8-11]</sup>,以更高分辨率模拟了北部湾的主要分潮,潮流的垂直结构也得到一定程度的刻画。此外,还有不少针对南海潮波的研究,北部湾仅作为研究海区的一部分出现,不再回顾。

经上述研究,人们对北部湾潮汐潮流的基本特征已有所了解,但在一些问题上的分歧依然存在。如:全日分潮( $K_1$ 和 $O_1$ )在湾口越南顺安(Thuan An)附近是否有完整的旋转潮波系统存在,无潮点在岸边还是远离海岸?琼州海峡对北部湾潮波系统有何影响,海峡内的余流水体通量有多大?潮波能量在北部湾的耗散情况,等。另外,多数已有数值研究的计算域设置得较小,多把琼州海峡直接作为计算区的开边界给出,这样不但无法给出海峡的流况,而且当计算区太小时,计算结果会过多依赖人为指定的边界条件。本文采用最新版的普林斯顿海洋模式(POM08),建立起覆盖北部湾、琼州海峡及周边海域的高分辨率潮汐潮流数值模型,力图较全面地给出该海域正压潮汐潮流的结构特征,并探讨琼州海峡对湾内潮波系统的作用。事实上,潮流不仅能够产生余流,潮运动造成的混合对三维斜压环流的影响或许更为重要<sup>[12]</sup>。本文作为我们北部湾环流研究的先期工作,还将为下一步三维斜压研究提供潮动力学基础。

## 2 数值模式的建立

POM(Princeton Ocean Model)是20世纪70年代发展起来的一个基于原始方程的三维海洋模式<sup>[13]</sup>,经众多海洋学者的不断改进和完善,被广泛用于多种海洋动力学研究领域,目前发展到08版本。主要特点有:垂向采用地形跟随的 $\sigma$ 坐标,垂向混合系数由内嵌的湍流闭合模型求解,时间积分在水平方向为显格式,垂向为隐格式,采用了内、外模式分离技术,等。

数值模式区域包括了北部湾、琼州海峡和部分外海区域(图1)。水平分辨率为 $2' \times 2'$ ,垂向等分为6层,外模式时间步长为6s,底摩擦系数全场采用0.0013。模式由东、南两开边界输入的潮位驱动:

$$\zeta = \sum_i A_i \cos(\omega_i t - g_i), \quad (1)$$

式中, $i$ 取1~4,代表 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $M_2$ 和 $S_2$ 分潮。调和常数(振幅 $A$ 和迟角 $g$ )参考Fang等人<sup>[14]</sup>的大区

域计算结果经调整得到; $\omega$ 为潮汐角频率。模式由静止海洋启动,在获得足够稳定的潮波后,继续积分1个月,利用最小二乘法调和与分析求得潮汐潮流的调和常数,进而计算潮流椭圆要素和潮余流。利用“准调和与分析方法”<sup>[15]</sup>,在做出与天文情况有关的振幅和迟角订正之后,就可以进行潮汐潮流的预报。

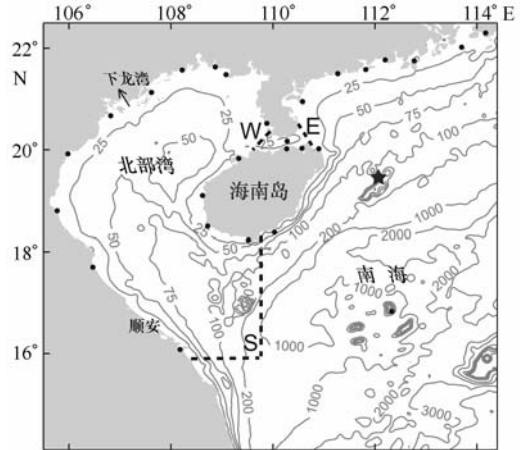


图1 数值模式区域和水深(m)

●代表验潮站位置,★代表测流点,粗虚线代表南(S)、西(W)、东(E)3条断面

模式水深在NGDC一分地形数据(ETOPO1)基础上经插值得到,在琼州海峡及附近区域,水深取自海图的精细数据。收集了位于海南岛以东的单站测流资料用于模拟潮流的验证(图1)。该点位于 $19^{\circ}26'12''N, 112^{\circ}06'31''E$ ,测流仪器是美国RDI公司生产的300K声学多普勒剖面测流仪(ADCP),观测时段为2007年7月29日至8月2日。

## 3 潮汐潮流特征

### 3.1 模拟结果检验

为了检验潮汐计算结果,我们收集了27个沿岸验潮站的调和常数,计算了模拟与实测调和常数的差异(见表1)。与实测值相比, $K_1$ 、 $O_1$ 、 $M_2$ 和 $S_2$ 分潮振幅的绝均差分别为3.0、2.1、5.0和3.0cm,迟角绝均差分别为 $3.7^{\circ}$ 、 $5.5^{\circ}$ 、 $10.4^{\circ}$ 和 $10.9^{\circ}$ ,均在可以接受的误差范围之内。要说明是,半日分潮在一些验潮站模拟误差偏大,但误差较大的站大多位于广东沿岸,而不是在北部湾内。湾内多数站模拟误差是可以接受的。半日潮所占整体潮波比重很小,也非研究重点,不会对分析造成大的影响。

表 1 潮汐调和常数的模拟值与观测的对比

纬度(N)	经度(E)	K <sub>1</sub>		O <sub>1</sub>		M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>	
		$\Delta g/(\text{°})$	$\Delta H/\text{cm}$	$\Delta g/(\text{°})$	$\Delta H/\text{m}$	$\Delta g/(\text{°})$	$\Delta H/\text{cm}$	$\Delta g/(\text{°})$	$\Delta H/\text{cm}$
18°48'	105°46'	12.4	-2.2	-5.8	-1.4	9.8	-0.2	8.7	-0.8
19°55'	105°59'	1.7	-11.7	17.1	-5.3	17.4	8.2	-22.4	1.8
17°42'	106°28'	3.0	-0.6	-4.6	3.7	-14.3	3.9	-14.9	-0.6
20°40'	106°49'	1.8	-6.5	1.9	2.1	-26.3	2.5	0.9	2.8
21°08'	107°37'	8.2	1.8	11.9	0.9	5.3	2.0	-44.7	-2.0
16°05'	108°11'	0.6	3.1	-1.1	1.9	-8.4	-1.4	14.4	1.5
21°34'	108°13'	5.3	-1.5	6.3	-8.1	8.9	0.2	-5.4	-6.3
19°06'	108°37'	2.2	-1.8	3.6	-0.4	10.1	0.3	7.8	-0.5
18°30'	108°43'	-5.7	-1.6	-2.6	-0.8	2.2	-3.6	-8.4	-0.1
21°38'	108°52'	-1.0	6.4	1.2	-4.6	0.7	2.1	2.8	-8.0
21°29'	109°05'	4.2	0.8	4.5	-0.2	13.4	0.6	-0.1	-3.7
19°50'	109°20'	8.3	1.2	14.1	2.0	16.1	0.7	11.4	-2.8
18°14'	109°31'	2.3	1.6	0.9	0.8	3.0	-1.6	-1.4	1.3
20°31'	109°53'	-1.5	-0.9	-1.4	-0.2	23.7	-0.7	6.2	-1.6
18°23'	110°02'	-1.5	2.6	9.3	5.2	-8.3	2.2	2.5	0.3
20°01'	110°16'	-5.9	-2.8	-1.2	-3.2	12.3	7.9	10.8	-2.0
20°10'	110°17'	-13.1	-5.2	-6.3	-5.7	13.6	8.9	9.9	-1.1
20°02'	110°34'	-3.7	-2.4	-3.4	-0.5	-17.3	13.6	32.1	3.5
20°57'	110°35'	-2.5	2.7	-4.5	-0.7	-5.6	8.1	-10.9	7.3
20°01'	110°54'	-0.3	0.9	7.1	0.0	4.2	17.5	3.6	8.3
21°30'	111°16'	0.8	3.4	-1.9	-0.2	-0.2	18.9	-3.0	10.2
21°35'	111°49'	-1.8	1.9	-3.2	-2.0	-2.4	2.0	-7.8	3.5
21°46'	112°12'	-0.5	4.6	-1.6	0.1	3.4	14.3	-6.0	4.6
16°50'	112°20'	0.6	0.8	-4.9	1.7	-14.5	0.3	-19.4	-0.3
21°45'	112°46'	7.8	8.6	9.6	3.0	22.7	8.6	14.9	-1.1
22°01'	113°42'	-0.9	1.0	6.3	-1.0	15.3	-3.5	-10.0	-3.5
22°18'	114°10'	-3.3	1.5	12.4	2.0	-0.4	1.6	-15.3	-1.9
绝均差		3.7	3.0	5.5	2.1	10.4	5.0	10.9	3.0

对定点海流观测时间序列利用 Butterworth 滤波器带通滤波,保留周期介于 12 和 26 h 之间的信号,与模拟值比较(见图 2)。潮流的东( $U$ )、北( $V$ )分量振幅相当,为半日周期的旋转流。流速的量值模拟较好,南北速度分量的位相比实测略有超前,整体模拟效果可以接受。

### 3.2 潮汐

全日分潮在湾口越南顺安附近岸边形成无潮点,迟角沿逆时针方向增大。在无潮点处开始,振幅向湾内递增,在湾顶处可达 90 cm 以上。K<sub>1</sub>和 O<sub>1</sub>分

潮在北部湾的分布态势类似,区别是:湾内 O<sub>1</sub>分潮的振幅略大于 K<sub>1</sub>分潮;O<sub>1</sub>分潮无潮点比 K<sub>1</sub>分潮偏南约 1/4 个纬度;K<sub>1</sub>分潮的无潮点恰在岸边,而 O<sub>1</sub>分潮的无潮点没有完全体现(或者说更偏向陆地一侧)。关于全日分潮该无潮点的位置,目前认识并不统一。一些数值结果显示,无潮点远离海岸<sup>[2,8,16]</sup>,但更多研究倾向于认为该无潮点位于岸边<sup>[3,4,9-11,14]</sup>,因而只有半个旋转潮波系统出现。陈长霖等<sup>[17]</sup>得到的 K<sub>1</sub>无潮点在海上,而 O<sub>1</sub>无潮点在岸上。孙洪亮和黄卫民<sup>[10]</sup>的数值模拟结果在无潮

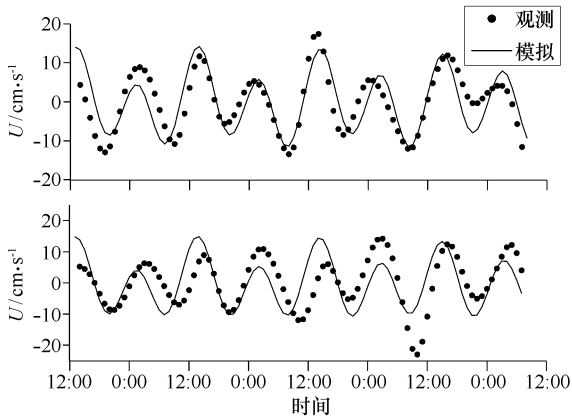


图2 表层流速的观测与模拟结果对比

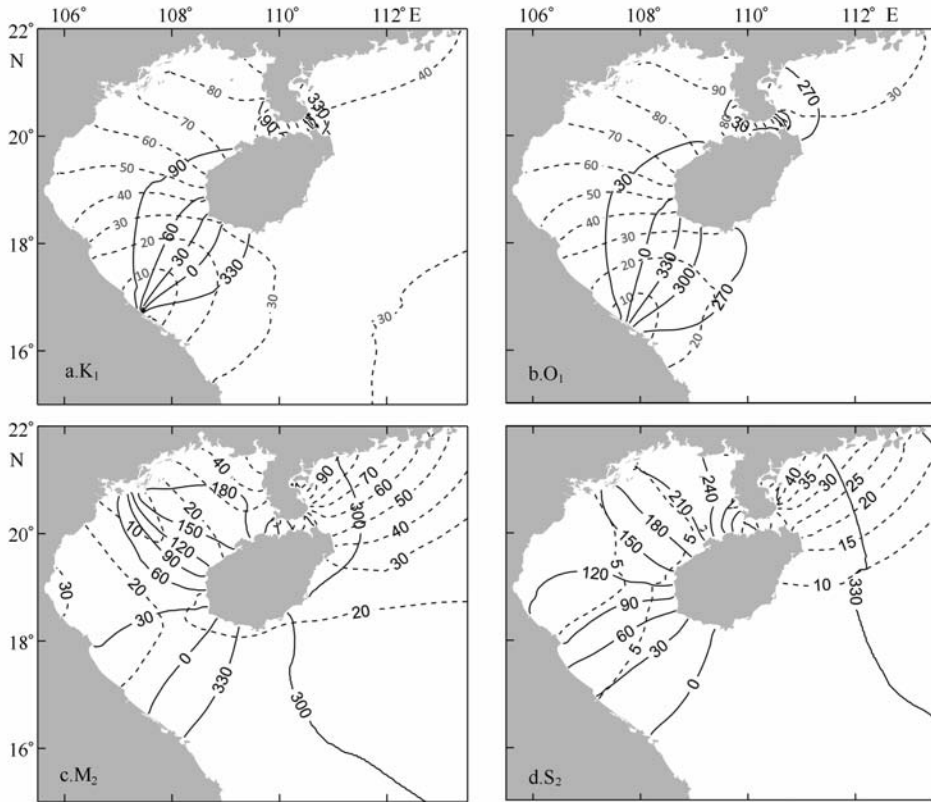


图3 模拟的4个分潮潮汐同潮图  
实线: 潮角(°), 东八区; 虚线: 振幅(cm)

根据模拟结果, 计算了振幅比  $(A_{K_1} + A_{O_1})/A_{M_2}$ , 依此判断潮汐类型<sup>[15]</sup>。图4表明, 北部湾是典型的全日潮海区, 其北半部为正规全日潮, 除  $K_1$  或  $O_1$  分潮无潮点附近的局部海域外, 湾内其他海域为不正规全日潮区。雷州半岛以东为不正规半日潮海区。

### 3.3 潮流

计算了4个分潮的潮流椭圆要素, 为节省篇幅,

点附近的3个验潮站误差均较小, 他们据此认为第二种观点更合理。方国洪<sup>①</sup>曾结合英国海军部潮汐表刊载的越南沿岸3个站的迟角资料对该无潮点的位置展开讨论, 考虑到资料的精确性, 他认为仅从3个站的数据难以给出结论。笔者认为, 在顺安附近做加密观测是解决该问题的可行办法。综合目前研究, 该无潮点靠近岸边的可能性较大。

北部湾  $M_2$  分潮在湾口没有旋转波系统形成, 在下龙湾一带具有形成无潮点的趋势。潮振幅从下龙湾向东北和西南两个方向逐渐增大, 在湾顶的东北角达 50 cm。  $S_2$  分潮很弱, 湾内振幅都不超过 10 cm。

仅以  $O_1$  和  $M_2$  分潮为例予以说明(见图5)。

全日潮流存在两个强流区, 分别位于海南岛西侧和琼州海峡东口。海南岛西侧的  $O_1$  分潮流振幅最大为 60~65 cm/s, 利用

$$V_{\max} = V_{M_2} + V_{S_2} + 1.68V_{K_1} + 1.46V_{O_1} \quad (\text{正规日潮}) \quad (2)$$

计算的最大可能潮流  $V_{\max}$  约 200 cm/s, 海南岛西侧

① 方国洪. 关于中国近海潮汐潮流分布的若干有待进一步研究的问题. 第一届潮汐与海平面学术讨论会论文集, 1986: 12—20.

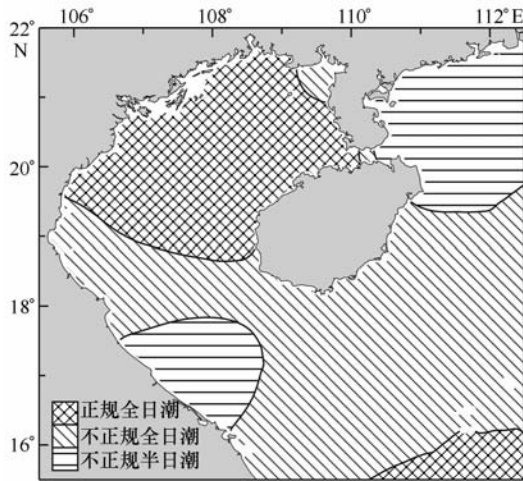
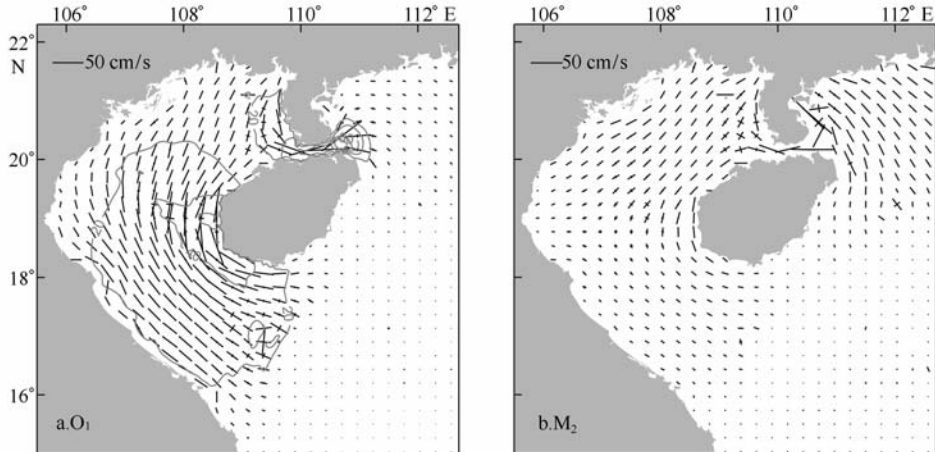


图4 模拟的潮汐类型分布

强流区的位置与 Lü 等<sup>[12]</sup>报道的潮(混合)致上升流区一致。式(2)中  $V_{M_2}$ ,  $V_{S_2}$ ,  $V_{O_1}$ ,  $V_{K_1}$  分别为 4 个分潮的潮流振幅。文献[10]模拟的琼州海峡内  $O_1$  分潮流振幅最大为 40 cm/s, 而 Hu 等<sup>[18]</sup>给出的数值为 80 cm/s, 本文的结果是 100 cm/s, 该量值仍有待观测证实。由于海峡很窄, 要得到合理的模拟结果, 应采用更精细的分辨率, 对海峡内水深和岸线做出准确刻画。  $K_1$  分潮流的分布态势与  $O_1$  类似。在北部湾海区(不包括琼州海峡),  $M_2$  和  $S_2$  分潮流最大仅分别为 20 和 5 cm/s。

全日分潮的潮流椭圆长轴方向基本上与岸线平行, 在琼州海峡内呈东西向分布。在琼州海峡西侧的喇叭状湾口以及海南岛西侧的强潮流区,  $K_1$  和  $O_1$  分潮流表现出一定的旋转性, 在其他海区以往复流为主。

图5 模拟的  $O_1$  和  $M_2$  分潮潮流椭圆长短轴分布(表层)

对潮流做调和分析得到了剩余的欧拉余流, 其中包含了 4 个分潮的综合效应。我们还直接对潮流做多周期平均求取余流, 两种方法得到的结果非常一致。北部湾的潮致欧拉余流有 3 个显著特点(见图 6)。

第一, 北部湾内的潮余流总体上表现为一个大的逆时针流动, 由琼州海峡西口进入北部湾后先折向北, 尔后沿北部湾中部流向西南, 最后贴越南沿岸流出湾口。这种分布特征与文献[10—11]的研究吻合, 但与 Manh 和 Yanagi<sup>[9]</sup>的结果差别较大。

其次, 琼州海峡的欧拉潮余流为西向流, 造成的海峡水通量(余通量)亦为西向, 约为  $0.034 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。余通量计算方法是选取  $110.333^\circ \text{E}$  断面, 对稳定后的潮流所造成的水体通量做长时间平

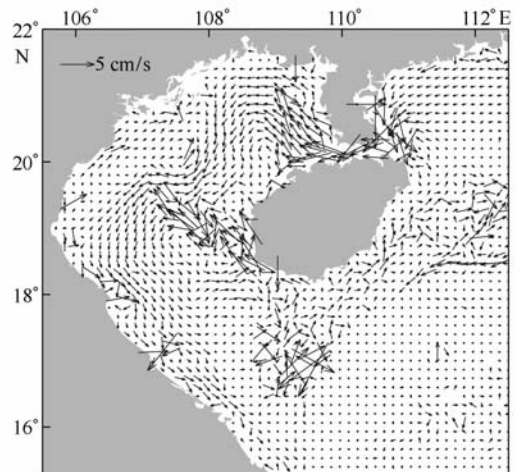


图6 模拟的潮致欧拉余流(表层)

均。该求法得到的余通量会随时间的增长趋于常数,约 100 d 后变化就非常小了(图略)。余通量与欧拉余流不同,不等同于欧拉余流与水深的乘积。陈波等<sup>[19]</sup>据实测资料计算了弱风条件下的琼州海峡冬季水体通量,其结果为  $0.055 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ;考虑到其结果中还包含了风、密度流等效应,因此,尽管本文  $2'$  的网格对于琼州海峡来讲较为粗糙,仍可认为两份结果具有可比性。最近,陈长霖等<sup>[17]</sup>模拟得到的海峡潮余流水通量为  $0.066 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。关于琼州海峡的水交换,有人认为在夏季持续西南风的作用下,海峡水可以自西向东流动<sup>[20]</sup>,不过较新的研究多认为琼州海峡的水交换终年是自东向西的,Shi 等<sup>[21]</sup>还从潮余流角度对该现象做出解释。

第三,强余流发生在琼州海峡和海南岛西侧。

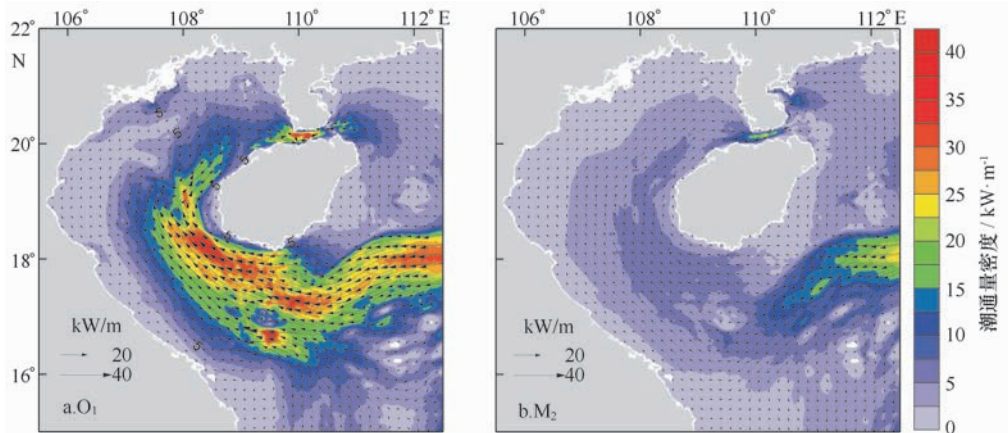


图7 模拟的潮能通量密度(色彩表示量值大小)

图7清楚地表明,北部湾的潮能是从南海通过南部湾口传入的。无论全日潮还是半日潮,当潮能从南海传到海南岛东南部时,均分为两支:主要分支涌入北部湾,较弱的一支北上至广东沿岸和琼州海峡东口。全日潮能进入北部湾后,潮能通量的主轴靠近海南岛一侧,在向湾顶传播过程中,又有一支进入琼州海峡,另一支向西南方向折回。全日分潮进入琼州海峡后,在海峡东口附近与西传潮波相遇;而  $M_2$  分潮的能量则完全自西向东通过了海峡。下面两节将对海峡内的能量耗散进一步讨论。

#### 4.2 琼州海峡对北部湾潮波的影响

琼州海峡是北部湾与南海水交换的重要通道。如前文所述,海峡内的余流强烈。有研究表明<sup>[21]</sup>,海峡内的平均流无论冬夏皆为西向,夏季流速可达  $10 \sim 30 \text{ cm/s}$ 。不难想象,海峡对北部湾(至少湾北

湾内大部海区的潮余流只有  $1 \sim 3 \text{ cm/s}$ ,琼州海峡最大约为  $10 \sim 15 \text{ cm/s}$ ,海南岛西岸有一西北向余流,在  $19^\circ 30' \text{ N}$  附近与西南向余流汇合,流速最大约  $8 \text{ cm/s}$ ;中、底层余流场与表层的大致相似,但流速减小。

## 4 潮波能量

### 4.1 潮能通量

图7给出了  $O_1$  和  $M_2$  分潮的能通量密度,即

$$\vec{\Phi} = \frac{\rho g H}{T} \int_0^T \zeta \vec{V}_A dt, \quad (3)$$

式中,  $T$  是潮周期;  $\vec{V}_A$  代表垂向平均的潮流矢量;  $\zeta$  是潮位;  $T, \rho$  和  $H$  分别是潮周期、海水密度和水深。

部)的环流和水体环境具有潜在的影响。李树华<sup>[2]</sup>较早研究了琼州海峡对北部湾潮波的作用,认为海峡的存在对占优的全日分潮潮波系统没有多大影响;而俎婷婷等<sup>[11]</sup>意见相左,其数值结果显示当海峡封闭时,则全日潮在湾口的无潮点北移,潮振幅降低。

本文通过海峡封闭数值试验,从能量角度探讨琼州海峡对北部湾潮波的影响。我们注意到琼州海峡虽然南北宽度较窄,但它具有一定长度(东西约  $80 \text{ km}$ ),海峡东、西部的潮能通量的分布态势截然不同。因此,数值试验封堵海峡的不同方式,有可能产生不同结果。我们设计了两个数值试验,分别封堵海峡的西口(称“ExpW”)和东口(称“ExpE”),原数值模拟称为控制试验。

图8给出控制试验和两个敏感性试验在琼州海

峡局部放大的潮能传播图(以  $O_1$  为例)。图 8a 表明,自西口传入的全日潮能通过海峡内大部海区。若封堵海峡西口(图 8b),则自北部湾传入海峡的潮能无法继续向下游“倾泻”,势必造成能量在湾内堆积;若封堵海峡东口(图 8c),由于东口本来就是潮能“零”区,故不难想象,封堵与否对北部湾内的潮能

传播来讲影响有限。计算了两个敏感性试验与控制试验的能通量差值,以验证上述分析:ExpW 则造成北部湾内能通量密度的大范围增长(图 9a),而 ExpE 带来的能通量变化仅限于东口附近的局部海区(图 9b)。封堵西口使得潮能无法进入海峡,造成北部湾内潮能的耗散量增加。

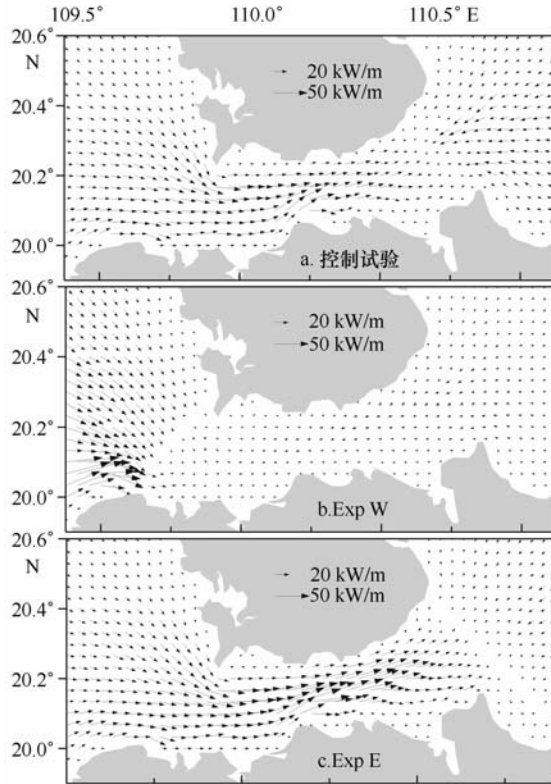


图 8 3个试验  $O_1$  分潮的潮能通量密度分布

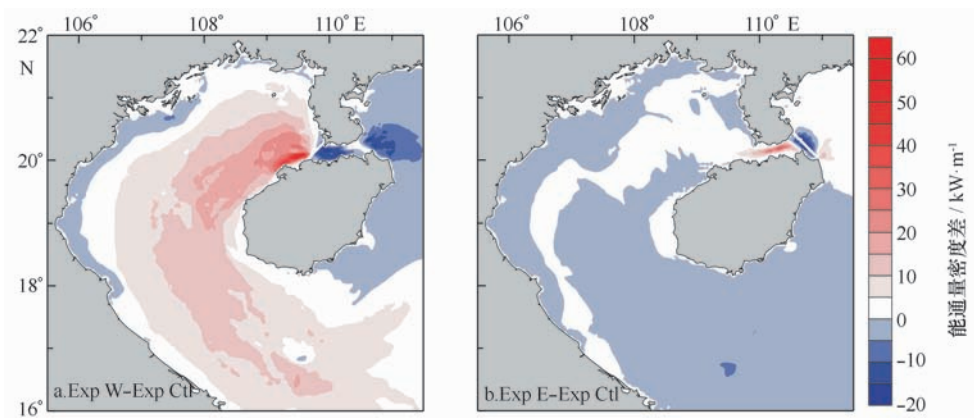


图 9 封闭琼州海峡西、东口的试验与控制试验(Exp Ctl)之间的能通量密度之差( $K_1$ 分潮)

a. 封堵西口, b. 封堵东口

数值试验得到的潮汐同潮图也与上述分析相符。在 ExpW 中,潮汐振幅和迟角的分布形态发生了明显改变(图 10a)。南部湾口的  $O_1$  无潮点消失,湾内中北部(约  $18.5^\circ\text{N}$  以北)的潮汐振幅大幅降低,湾顶降幅达 25 cm;而在湾口区域,由于无潮点的消失,振幅有所增加。北部湾的全日分潮主要由南口传入兼受琼州海峡影响(见图 3),从南部湾口传入的入射波与反射波叠加,形成较为明显的驻波,湾口为波节,湾顶形成波腹<sup>[22]</sup>。控制试验得到

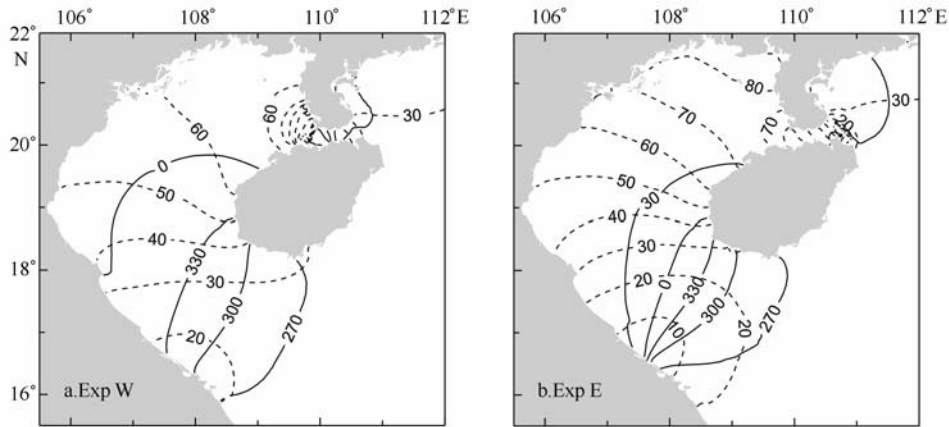


图 10 封闭海峡试验得到的  $O_1$  分潮同潮图

a. 封闭西口, b. 封闭东口

以上试验研究表明,尽管琼州海峡很窄、且北部湾的潮汐主要是南部湾口输入的能量所维系,但琼州海峡作为能量的重要耗散区,其存在对湾内的潮汐系统还是具有较大影响。下面我们将量化给出潮能耗散结果(表 2、表 3)。

### 4.3 潮能耗散

表 2 给出了各试验 4 个分潮通过 3 条断面的潮能通量。断面 S 和 W 取进湾通量为正,断面 E 为流入海峡通量为正。

表 2 通过各断面潮能通量(GW)

断面	$K_1$	$O_1$	$M_2$	$S_2$	正值通量方向
S	4.41	5.21	1.40	0.20	向北,向西
W	-0.54	-0.80	-0.37	-0.02	向西
E	0.90	0.69	-0.03	0.04	向西

通过南部湾口断面的进湾潮能通量中,  $K_1$  和

的潮流的确在半潮面时出现最大流速(图略),证实了其驻波性质。ExpW 试验表明,封闭海峡西口带来的反射减弱了驻波性质,对湾内潮波结构产生较大影响,即在湾口原波节处振幅增大,湾内大部海区振幅明显降低。在试验 ExpE 中,尽管潮振幅整体上略有降低(最大降幅 11 cm),但同潮图则基本保持了控制试验的分布态势。上面给出的是针对占优的全日潮的分析,琼州海峡对北部湾半日潮的影响较全日潮要小一些。

$O_1$  分潮占了 4 个分潮传入总能量的 86%。Fang 等<sup>[14]</sup> 给出的进湾潮能通量分别为 4.48, 5.56, 1.05, 0.12 GW, 本文与之大致相符。在海峡的西口断面, 4 个分潮的潮能全都由北部湾进入琼州海峡;在海峡东口断面,除了  $M_2$  分潮有微弱潮能从海峡传出外,其他 3 个分潮潮能均由外海传入海峡。我们同时计算了在两个海区内耗散的潮能(见表 3)。琼州海峡面积仅相当于北部湾的 2%,但耗散于其中的潮能达到 3.33 GW,相当于北部湾内的潮能耗散量的 35%,表明了琼州海峡的存在对北部湾潮汐系统的潜在影响。

依据 Taylor<sup>[23]</sup> 经典的底边界层潮能耗散公式

$$d_e = C\rho \langle u_b^3 \rangle \quad (4)$$

计算了北部湾的底边界潮能耗散。式中,  $C$  为底摩擦系数,  $u_b$  为底层海流速,  $\rho$  为海水密度,  $\langle \rangle$  代表取时间平均。  $d_e$  为单位面积上的底边界潮能耗散, 对其在某海区取面积积分可以得到该海区的底边界潮能耗散。



表3 各海区潮能耗散(GW)\*

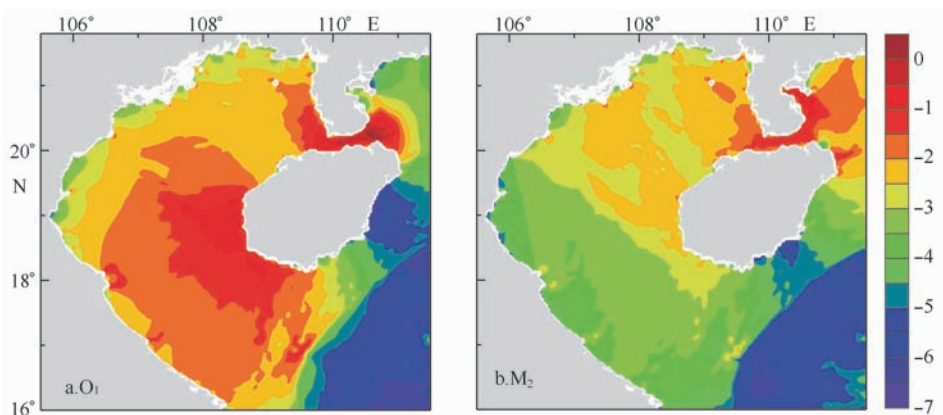
海区	耗散	$K_1$	$O_1$	$M_2$	$S_2$	总和
琼州海峡	总耗散	1.44	1.49	0.34	0.06	3.33
	底边界耗散	1.17	1.33	0.16	0.005	2.67
北部湾	总耗散	3.87	4.41	1.03	0.18	9.49
	底边界耗散	3.35	4.10	0.38	0.008	7.83

\* 琼州海峡和北部湾分别定义为 W 断面与 E 断面之间及 S 断面与 W 断面之间的区域。

对  $d_c$  在北部湾内和琼州海峡分别积分,结果列于表3。在北部湾, $K_1$ ,  $O_1$ ,  $M_2$  和  $S_2$  分潮底摩擦耗散的潮能分别占该分潮潮能耗散的 86%, 92%, 37% 和 5%, 4 个分潮底边界耗散之和占总耗散的 83%; 在琼州海峡,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $M_2$  和  $S_2$  底边界潮能耗散分别占该分潮潮能耗散的 81%, 89%, 47% 和 8%, 4 个分潮的底边界耗散之和占全部耗散的 80%;  $S_2$  分潮底摩擦耗散的潮能很小, 也可能与分潮较弱计算误差偏大有关。除去底边界耗散, 在北部湾和琼州海

峡分别有 1.66 GW 和 0.66 GW 的潮能以其他形式耗散在海区内。

图 11 是底边界潮能耗散取常用对数后的水平分布。在北部湾,  $O_1$  潮能的底边界耗散比  $M_2$  分潮要大 1~2 个量级。 $K_1$  分潮的情形与  $O_1$  非常类似(图略)。在琼州海峡达到耗散的最大值, 次大值发生在海南岛的西部, 这种分布形态与潮流速度的分布吻合。

图 11 模拟的潮能底边界耗散( $\log_{10} d_c$ )

## 5 结语

建立了覆盖北部湾、琼州海峡及其周边海域的三维潮汐潮流细网格模式, 探讨了北部湾海区的正压潮汐潮流特征, 模拟给出了  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $M_2$  和  $S_2$  这 4 个主要分潮的同潮图、潮流椭圆、欧拉余流、潮能通量、潮汐性质等信息, 并结合敏感性数值实验, 研究了琼州海峡对于北部湾潮波系统的影响, 分析了潮能在北部湾和琼州海峡的耗散情况。主要结论如下:

(1) 北部湾是典型的全日潮海区, 驻波性质明显。 $K_1$  和  $O_1$  分潮在海湾南口的越南顺安附近, 紧靠

岸边形成一个无潮点。全日分潮振幅在湾顶达 90 cm 以上,  $O_1$  分潮略强于  $K_1$  分潮。强潮流发生在琼州海峡和海南岛西侧, 这两处海区同时也是潮能耗散最强烈的海区。琼州海峡的潮汐余流为西向流, 造成的水体通量约  $0.034 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 余流出海峡西口后, 首先折向北, 尔后转向南, 最后贴越南沿岸流出湾外。

(2) 潮能通量的计算表明, 北部湾的潮波系统主要由通过南部湾口自南海传入的潮能所维系。在北部湾和琼州海峡内耗散的潮能分别为 9.49 GW 和 3.33 GW; 虽然海峡面积仅占北部湾的 2%, 其中的潮能耗散却相当于北部湾的 35%, 从这个角度不难

理解琼州海峡的存在对北部湾的潮波系统有着较大影响。潮波自西口进入琼州海峡,  $M_2$  分潮通过了海峡, 而全日潮波在海峡东口附近与西传的潮波交汇, 形成潮能通量的低值区。在封闭琼州海峡西口的数值试验中, 北部湾潮波的驻波性质减弱, 全日分潮的

潮能通量密度、潮汐同潮图均发生了明显改变; 而封闭海峡东口所带来的影响要小很多。

(3) 计算了潮能的底边界耗散。在北部湾和琼州海峡, 底边界潮能耗散分别占到总耗散的 83% 和 80%。

## 参考文献:

- [1] 李树华, 夏华永, 陈明剑. 广西近海水文及水动力环境研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 210.
- [2] 李树华. 北部湾潮波的数值模拟试验[J]. 热带海洋, 1986, 5(3): 7—14.
- [3] LIU X G, YE A L. Numerical investigation of the three-dimensional tidal current fields in the Gulf of Tonkin[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1988, 18(2): 8—16.
- [4] 周朦, 方国洪. 二维长波方程的一个无条件稳定有限差分格式[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(2): 164—172.
- [5] 朱耀华, 方国洪. 一种二维和三维嵌套海洋流体力学数值模式及其在北部湾潮汐和潮流数值模拟中的应用[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(2): 117—125.
- [6] 曹德明, 方国洪. 北部湾潮汐和潮流的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(2): 105—113.
- [7] 刘爱菊, 张延廷. 北部湾潮汐数值预报及其分析[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(6): 640—645.
- [8] 夏华永, 殷忠斌, 郭芝兰, 等. 北部湾三维潮流数值模拟[J]. 海洋学报, 1997, 19(2): 21—31.
- [9] MANH D, YANAGI T. A three-dimensional numerical model of tide and tidal current in the Gulf of Tongking[J]. La mer, 1997, 35: 15—22.
- [10] 孙洪亮, 黄卫民. 北部湾潮汐潮流的三维数值模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 1—8.
- [11] 姐婷婷. 北部湾环流及其机制的分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [12] LÜ X G, QIAO F L, WANG G S, et al. Upwelling off the west coast of Hainan Island in summer; its detection and mechanisms[J]. Geophysical Research Letters, 35, L02604, doi: 10.1029/2007GL032440.
- [13] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three dimensional coastal ocean circulation model [C]//HEAPS N S. Three Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Sciences, Vol 4. Washington: American Geophysical Union, 1987: 1—16.
- [14] FANG G H, KWOK Y K, YU K J, et al. Numerical simulation of principal tidal constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand[J]. Continental Shelf Research, 1999, 19: 845—869.
- [15] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 474.
- [16] 吴自库, 王丽娅, 吕咸青, 等. 北部湾潮汐的伴随同化数值模拟[J]. 海洋学报, 2003, 25(2): 128—135.
- [17] CHEN C L, LI P L, SHI M C, et al. Numerical study of the tides and residual currents in the Qiongzhou Strait[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(4): 931—942.
- [18] HU J Y, KAWAMURA H, TANG D L. Tidal front around the Hainan Island, northwest of the South China Sea[J]. Geophys Res, 108 (C11), 3342, doi: 10.1029/2003JC001883.
- [19] 陈波, 严金辉, 王道儒, 等. 琼州海峡冬季水量运输计算[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(3): 357—364.
- [20] 柯佩辉. 琼州海峡的海流和水交换的初步分析[J]. 热带海洋, 1983, 2(1): 42—46.
- [21] SHI M C, CHEN C S, XU Q C, et al. The Role of Qiongzhou Strait in the Seasonal Variation of the South China Sea Circulation[J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 32(1): 103—121.
- [22] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 136—137.
- [23] TAYLOR G I. Tidal friction in the Irish Sea[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1919, A220: 1—33.

# Numerical study of the tidal waves in the Gulf of Tonkin

ZHAO Chang<sup>1,2,3</sup>, LÜ Xin-gang<sup>1,2</sup>, QIAO Fang-li<sup>1,2</sup>

(1. *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling (MASNUM), State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 3. *Collage of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

**Abstract:** A high resolution numerical model for the tides and tidal currents in the Gulf of Tonkin (GT, also known as Beibu Gulf) and its adjacent waters is developed on the basis of Princeton Ocean Model (POM08), and is used to numerically simulate the four principal tidal constituents,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $M_2$  and  $S_2$ . The main tidal characteristics are presented in detail, followed by an analysis of the influences of Qiongzhou Strait (QzS) on the tidal wave system in the GT from the point of tidal energy dissipation. Diurnal tides are dominant in the GT. For either  $K_1$  or  $O_1$  constituent, there is a half rotary tidal system near the southern mouth of GT, with the amphidromic points located almost on the coast near Thuan An, Vietnam. The residual current is westward in the QzS, resulting in a water volume transport of 0.034 Sv; after flowing out of the western mouth of QzS, it first turns northward and then southward, forming a anti-clockwise curve in the GT. Strong tidal currents are found in two regions; the QzS and the waters off the west coast of Hainan Island, where the tidal energy dissipation rates are the highest in the modal domain. The tidal motion in the GT is maintained by the energy flux from the South China Sea through the southern mouth of the GT. Tidal energy fluxes into the QzS from the western mouth, and nearly all the energy of diurnal tides dissipates away within the strait. The energy dissipation of the four constituents amounts to 3.33 GW in the QzS, accounting for 35% of that consumed in the GT, though the area of QzS is only 2% of that of the GT. The Qiongzhou Strait, as an important area of energy dissipation, plays a significant role in the formation of the tidal waves in the GT. Calculation shows that the bottom boundary dissipation of tidal energy accounts for 83% and 80% of the total dissipation in the GT and QzS, respectively.

**Key words:** tide; tidal current; Gulf of Tonkin (Beibu Gulf); numerical simulation; Qiongzhou Strait; tidal energy