

# 大规模填海工程对钦州湾水动力环境的影响\*

## Impacts of Hydrodynamic Environment Caused by Large-scale Reclamation in Qinzhou Bay

董德信<sup>1</sup>,李谊纯<sup>2</sup>,陈宪云<sup>1</sup>,陈波<sup>1</sup>,张荣灿<sup>2</sup>

DONG De-xin<sup>1</sup>,LI Yi-chun<sup>2</sup>,CHEN Xian-yun<sup>1</sup>,CHEN Bo<sup>1</sup>,ZHANG Rong-can<sup>2</sup>

(1. 广西科学院 广西近海海洋环境科学重点实验室,广西南宁 530007;2. 广西北部湾海洋研究中心,广西南宁 530007)

(1. Guangxi Key Laboratory of Costal Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center, Nanning, Guangxi, 530007, China)

**摘要:**【目的】研究钦州湾大规模填海工程导致的水动力环境变化。【方法】构建一个平面二维潮流数学模型,并利用2007年与2009年实测水文资料对模型进行验证,模型较好地模拟了钦州湾的潮流运动规律。进一步计算分析了2008~2012年钦州湾大规模填海建设前后水动力变化状况。【结果】结果显示:钦州湾东航道、金鼓江航道浚深导致航道内流速减小,最大减小量约0.145m/s;三墩公路建设导致其西侧流速明显缩小,最大减小量约0.224m/s,而其东侧流速显著增大,增量最大达0.322m/s。【结论】大规模填海工程导致钦州湾2012年水体体积比2008年缩小约2.21%;钦州湾水交换能力变弱,海水半交换周期最大增加0.56d。

**关键词:**钦州湾 潮流模型 水动力变化 水交换能力

**中图分类号:**P731 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)04-0357-08

**Abstract:** 【Objective】The changes of hydrodynamic environment of Qinzhou bay caused by large-scale reclamation were studied. 【Methods】A two-dimensional current mathematical model is set up and validated by the measured hydrological data of 2007 and 2009. This model reveals better to simulate the current movement of Qinzhou Bay. Furthermore, the hydrodynamic changes are calculated and analyzed after large-scale reclamation from 2008 to 2012 in Qinzhou Bay. 【Results】The current speed in east waterway of Qinzhou Bay and Jingu River has decreased, which is caused by dredging, and the maximum decrement is about 0.145m/s. The construction of Sandun Road has led to obviously decreasing the current speed of its west side, and the maximum decrement is about 0.224m/s, but at its east side, current speed significantly increases, and the maximum increment is up to 0.322m/s. 【Conclusion】In 2012, the water volume of Qinzhou Bay has reduced 2.21% compared with that in 2008 caused by large-scale reclamation. Seawater exchange capacity has also been weakened, and the maximum seawater half-exchange cycle has increased 0.56d.

**Key words:** Qinzhou Bay, tidal current model, hydrodynamic change, water exchange capacity

收稿日期:2014-01-25

修回日期:2014-03-06

作者简介:董德信(1980-),男,助理研究员,主要从事河口海岸物质运输研究。

\* 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻1355007-13),广西科学院基本科研业务费项目(11YJ24HY01,12YJ25HY08);广西科学院科技创新项目(2010HY001)资助。

【研究意义】钦州湾位于广西北部湾沿岸湾顶的中部,由内湾(茅尾海)、外湾(钦州湾)以及连接两湾的潮汐通道构成,中间狭窄,两端宽阔,东、西、北三面为低山丘陵所环绕,北面有钦江与茅岭江注入,南面

与北部湾相通,是一个半封闭的天然海湾。钦州湾口门宽 29km,纵深 39km,海湾面积 380km<sup>2</sup>,其中滩涂面积达 200km<sup>2</sup>。

近年来,依湾而建的钦州港依托优越的港口资源及区位优势,发展十分迅速,钦州保税港区、大榄坪工业园区、中马钦州产业园区相继建成或开工建设,一大批以石化、能源、造纸、粮油加工、冶金等为首的重大临海工业项目陆续建成投产。因大量项目建设而填海,截止 2012 年钦州湾已填海约 22km<sup>2</sup>[1],其岸线已发生较大改变(见图 1(a))。根据钦州市城市总体规划,2008~2025 年计划围填海面积约 79km<sup>2</sup>。项目建设大量利用岸线和围填海域,极大地改变了钦州湾海域的自然属性。**【前人研究进展】**目前,针对钦州湾水动力环境的研究已有不少成果发表,陈波[2]、邱绍芳[3]等人利用实测潮流资料对钦州湾的潮流特征进行了分析,鲍献文等[4]、蒋磊明等[5]对钦州湾的潮流进行了数值模拟,游慕贤等[6]、孙永根等[7]对钦州湾保税港区填海工程前后的潮流场、冲淤环境进行了计算分析。**【本研究切入点】**但将钦州湾近 5 年左右大规模围填海工程建设作为一个整体来考虑,研究其对钦州湾水动力环境的影响,这方面的研究成果尚未见报道。**【拟解决的关键科学问题】**鉴于此,本文收集整理了 2008~2012 年钦州湾地形、岸线与水文资料,并通过构建一个二维平面潮流数学模型,探讨钦州湾整体围填海工程建设前后的水动力环境变化状况,获得几点有意义的结果。

## 1 钦州湾平面二维潮流数学模型简介

为分析大型围填海工程建设对钦州湾潮流场的影响,首先构建一个平面二维潮流数学模型,利用实测资料验证后,再对潮流场进行分析计算。

### 1.1 控制方程组

平面二维潮流数学模型的控制方程组为

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u \cdot d) + \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot d) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + fv +$$

$$A_H \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} (\tau_x^s - \tau_x^b), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - fu +$$

$$A_H \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} (\tau_y^s - \tau_y^b), \quad (3)$$

式(1)为连续方程,式(2)~式(3)为  $x$ 、 $y$  方向上的动量方程; $d = h + \eta$  为总水深, $\eta$  为潮位, $h$  为水深; $t$  为时间; $u$ 、 $v$  为垂线平均流速分别在  $x$ 、 $y$  方向

上的分量; $g$  为重力加速度; $\rho$  为海水密度;柯氏力参数  $f = 2\omega \sin \Phi$ ,其中  $\omega$  是地球自转角速度, $\Phi$  是当地纬度; $A_H$  为水流水平扩散系数,按 Smagorinsky 方法计算; $\tau_x^s$ 、 $\tau_y^s$  是风应力分别在直角坐标系  $x$ 、 $y$  方向上的分量; $\tau_x^b$ 、 $\tau_y^b$  是水流引起的床面切应力分别在  $x$ 、 $y$  方向上的分量。

表面风应力由下式给出

$$\tau_x^s = \rho \zeta W^2 \cos \psi, \tau_y^s = \rho \zeta W^2 \sin \psi,$$

式中, $\zeta$  是风应力经验系数; $W$  是风速; $\psi$  是  $x$  正方向与风向的夹角。

底部切应力由下式给出

$$\tau_x^b = \rho \frac{g u}{C_z d} (u^2 + v^2)^{1/2}, \tau_y^b = \rho \frac{g v}{C_z d} (u^2 + v^2)^{1/2},$$

式中, $C_z$  为谢才系数, $C_z = \frac{1}{n} (h + \eta)^{1/6}$ , $n$  为曼宁系数,取 0.025。

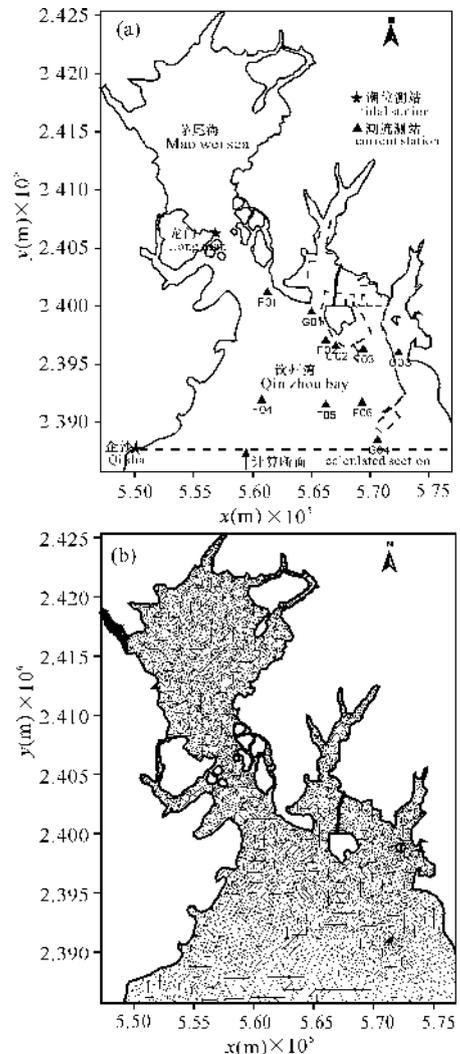


图 1 水文观测点位置(a)与计算区域局部网格剖分(b)

Fig. 1 Location of hydrological station (a) and part of simulation domain mesh (b)

模型固定边界按法向流速为零处理。模型开边界包括外海边界和径流开边界,外海开边界由潮位控制,径流开边界由流量控制。采用干湿判断法处理动边界。

控制方程组的数值求解采用有限体积法,其基本思想是将微分守恒律在某一个控制体上积分,得到守恒律的积分形式,再对其离散求解。有限体积法吸收、继承了有限差分与有限元法的众多优点,在控制体内又严格满足物理守恒律,因而获得比较广泛的应用,其数值求解过程可参考文献[7~10]。

### 1.2 计算区域

模型计算区域以及水文观测点布置如图 1(a)所示(虚线为 2012 年岸线),其中龙门、企沙为 2 个验潮站,F01~F06 为国家海洋局第一海洋研究所 2007 年 1~2 月大、小潮 6 个潮流站<sup>[11]</sup>,G01~G04 为广西科学院 2009 年 11 月中潮 4 个潮流站。模型地形数据采用海军航保部 2008 年、2012 年版钦州湾海图以及 2012 年局部调查数据。水深及潮位均统一至当地平均海平面,坐标系统采用北京 54 坐标系。钦州湾海域岸线曲折,岛屿星罗棋布,采用非结构三角形网格可以较好地贴合自然岸线,计算区域网格剖分见图 1(b)。

模型外海开边界的潮位过程由北部湾大范围潮波模型给出,并通过局部调整使其与验证资料一致。模型北部顶端茅尾海的钦江以及茅岭江开边界由流量控制,钦江流量取多年平均径流量  $37\text{m}^3/\text{s}$ ,茅岭江流量取  $51\text{m}^3/\text{s}$ <sup>[12]</sup>。

### 1.3 模型验证

利用图 1(a)所示的潮位、潮流实测资料,对模型进行验证。图 2、图 3 给出了 2 个潮位站(龙门、企沙)2009 年 11 月 15d 实测水位过程与计算值的比较情况。从图中可以看出,计算的潮位过程与实测资料吻合较好,高低潮时间的相位差不超过 0.5 h,除龙门潮位站中潮向小潮过渡阶段潮位有一定偏差外,其余时段的潮位偏差较小。

选取 F01、F04、F06、G02、G03 共 5 个潮流站进行流速验证,图 4~图 11 分别给出了模型流速计算结果与实测资料的比较情况。由图可见,小潮期间,除 F01、F04 站在涨、落急时刻附近流速与实测稍有偏差外,其余时段各站点计算流速与实测资料基本吻合,流向验证较好;大潮期间,F01、F04 流速、流向验证较好,F06 站落急时刻附近流速与实测流速有一定偏差,但流向基本一致;中潮期间,除 G03 站涨急时刻附近流速比实际偏

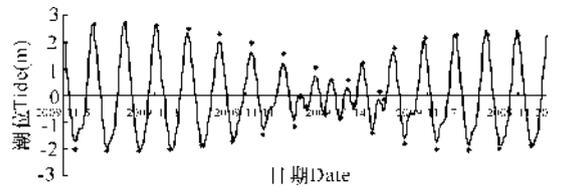


图 2 龙门潮位过程验证

Fig. 2 Validation of tidal process at station Longmen  
◆:实测;—:计算。◆:Measured;—:Calculated.

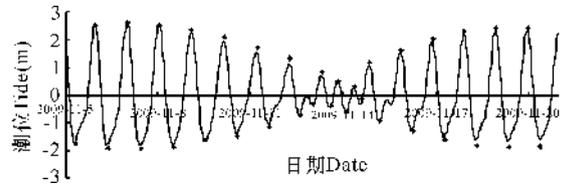


图 3 企沙潮位过程验证

Fig. 3 Validation of tidal process at station Qisha  
◆:实测;—:计算。◆:Measured;—:Calculated.

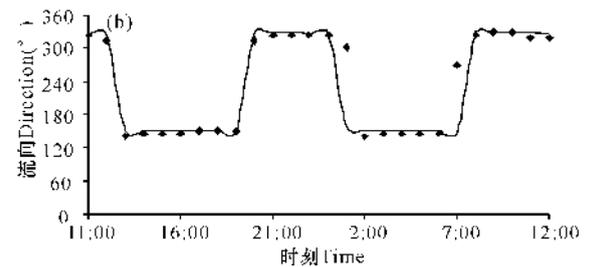
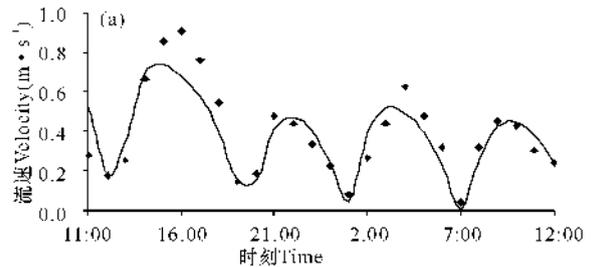


图 4 F01 流速、流向验证(小潮)

Fig. 4 Validation of current process at station F01 (neap)  
◆:实测;—:计算。◆:Measured;—:Calculated.

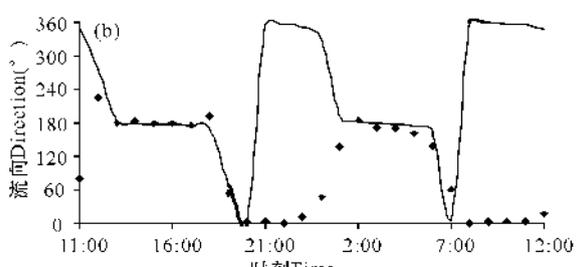
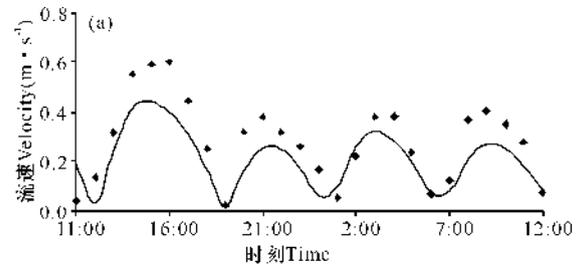


图 5 F04 流速、流向验证(小潮)

Fig. 5 Validation of current process at station F04 (neap)  
◆:实测;—:计算。◆:Measured;—:Calculated.

小外,其余时段各站点计算流速与实测资料基本吻合较好。总体来看,计算结果与实际流速过程的形态基本一致,这表明建立的二维潮流模型较好地再现了钦州湾海域潮流传播过程。

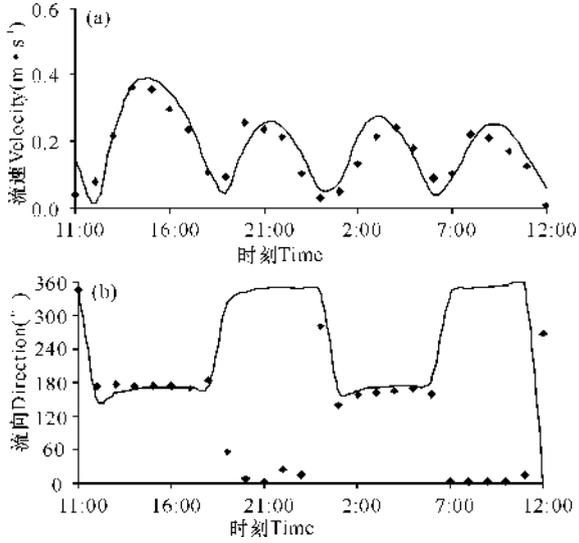


图6 F06 流速、流向验证(小潮)

Fig. 6 Validation of current process at station F06 (neap)

◆:实测; —:计算。◆:Measured; —:Calculated.

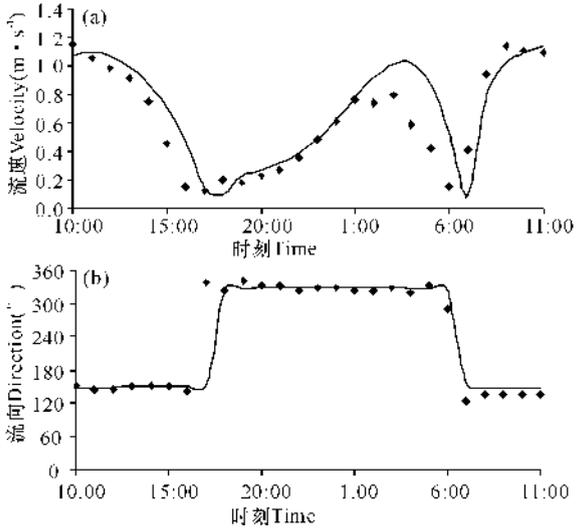


图7 F01 流速、流向验证(大潮)

Fig. 7 Validation of current process at station F01 (spring tide)

(spring tide)

◆:实测; —:计算。◆:Measured; —:Calculated.

## 2 大型围填海工程建设前后流场分布变化

图 12(a)、图 13(a)分别给出了以 2008 年地形岸线为基础的钦州湾局部涨、落急时刻流场。由图 12(a)、图 13(a)可见,钦州湾潮流呈现典型往复流特征:涨潮时刻,湾内潮流以北向为主,在深槽、航道则基本顺着航道走向,涨潮流汇至青菜头以北的龙门水道后,受地形影响,潮流主流方向转为西北向,进入茅

尾海后除局部因地形影响而发生偏转外,其余大部分海域流向以北向为主。落潮流运动形态与涨潮流相反,潮流从茅尾海沿着主流方向经龙门水道,再顺着 3 条航道流出湾外。比较这 2 幅图还可看出,深槽、航道附近的流速相对较大,落潮流速明显大于涨潮流速。

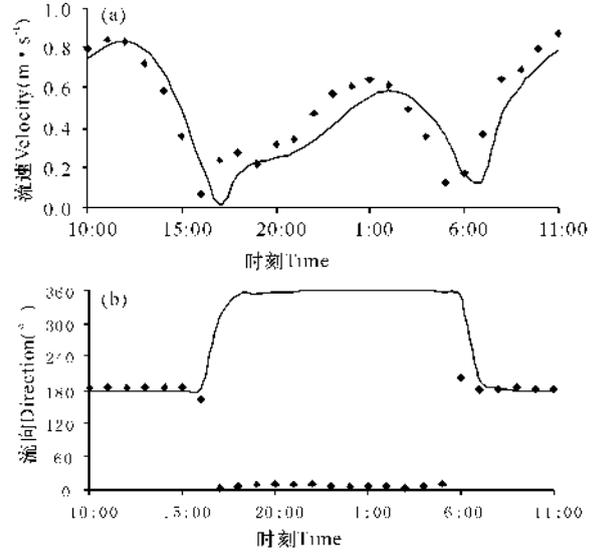


图8 F04 流速、流向验证(大潮)

Fig. 8 Validation of current process at station F04 (spring tide)

◆:实测; —:计算。◆:Measured; —:Calculated.

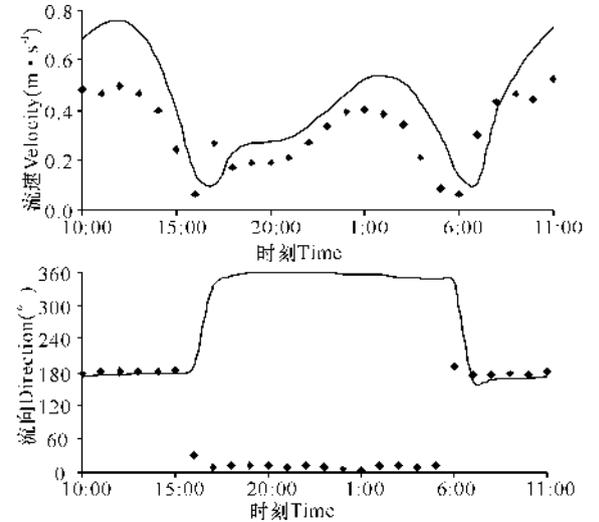


图9 F06 流速、流向验证(大潮)

Fig. 9 Validation of current process at station F06 (spring tide)

◆:实测; —:计算。◆:Measured; —:Calculated.

图 12(b)、图 13(b)分别为钦州湾 2012 年地形岸线的局部涨、落急流场,与图 12(a)、图 13(a)比较可知,由于三墩公路以及其它填海项目的建设,三墩公路两侧附近海域局部流场发生了明显改变:进出鹿耳环江海域的潮流因三墩公路隔离作用流向发生转向,

又因其束窄作用导致公路东侧流速增大。

为定量分析比较围填海工程建设前后的潮流场变化情况,在钦州湾工程区域附近海域布设 18 个特征点,其空间分布如图 14 所示。

下面从涨急、落急时刻特征点的流速、流向变化方面,计算分析围填海工程建设对钦州湾潮流场造成的影响。表 1 为特征点在围填海工程建设前后(2008~2012 年)涨急、落急时刻的流速变化情况,表 2 为其流向改变情况。

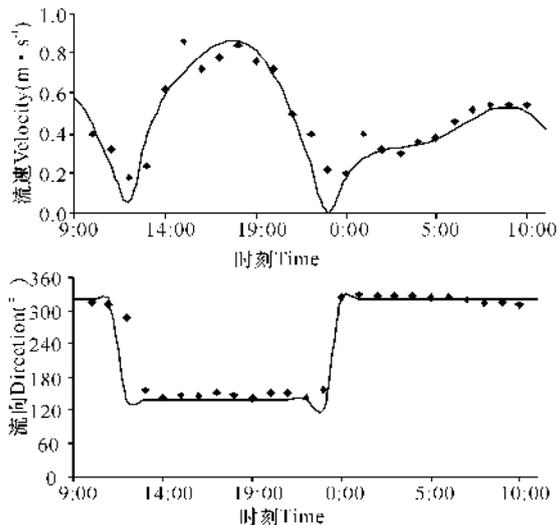


图 10 G02 流速、流向验证(中潮)

Fig. 10 Validation of current process at station G02 (middle tide)

◆: 实测; —: 计算。◆: Measured; —: Calculated.

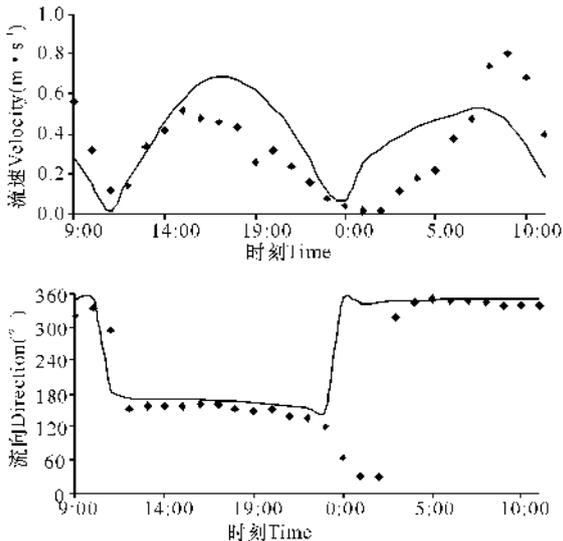


图 11 G03 流速、流向验证(中潮)

Fig. 11 Validation of current process at station G03 (middle tide)

◆: 实测; —: 计算。◆: Measured; —: Calculated.

从表 1 可以看出,涨急时刻,位于钦州湾东航道内的 2#、4#、18# 特征点,东、西航道交汇处的 1# 特征点以及金鼓江航道内的 6#、7# 特征点,由于航

道疏浚与扩建,水深增大,导致 2012 年流速小于 2008 年流速,其中 1#、4# 特征点流速相对变化率超过 10%,其流速差值最大为 0.093m/s;3# 特征点尽管也位于航道内,但可能因为保税港区的建设,造成 2012 年流速稍大于 2008 年流速。14#、16# 特征点原位于潮沟附近,因已建成的保税港区以及三墩公路阻挡作用,2012 年流速明显小于 2008 年流速,其流速差值最大可达 0.14m/s,流速相对变化率超过 45%。15#、17# 特征点位于三墩公路东侧,由于地形的束窄作用,流速较 2008 年明显增大,流速差值最大约 0.12m/s,流速相对变化率超过 40%。5# 特征点位于三墩作业区码头东南侧,由于码头的阻挡作用,导致流速比 2008 年有一定减小。除此之外,分别位于钦州湾中航道以及西航道内的 8#、10#、12#

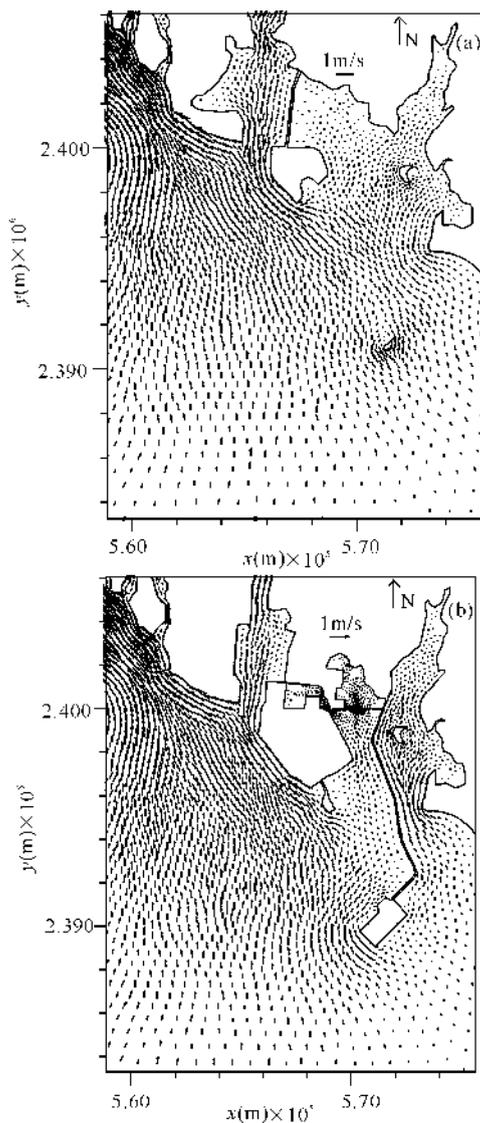


图 12 钦州湾 2008 年(a)与 2012 年(b)局部涨急流场

Fig. 12 Current field of Qinzhou Bay at flood in 2008 (a) and 2012 (b)

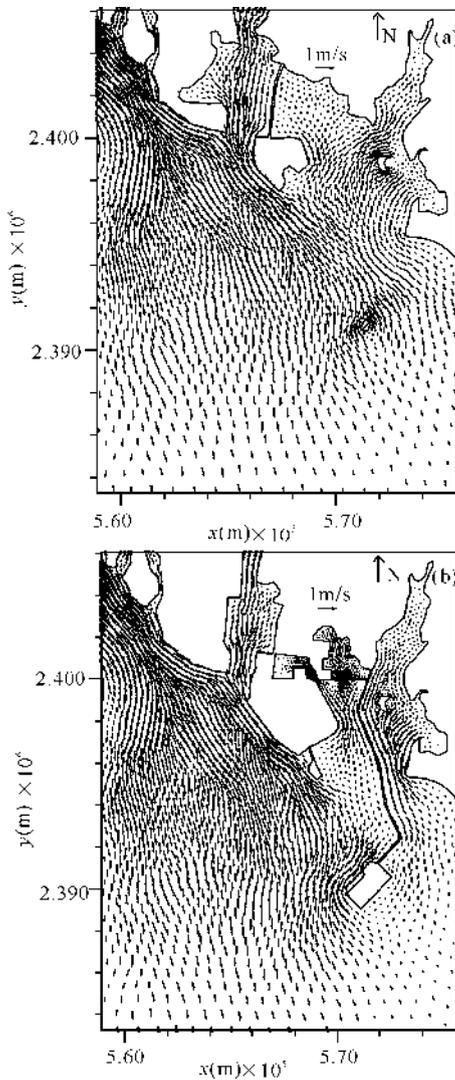


图 13 钦州湾 2008 年(a)与 2012 年(b)局部落急流场  
Fig. 13 Current field of Qinzhou Bay at ebb in 2008 (a) and 2012 (b)

表 1 钦州湾围填海建设工程前后特征点流速变化情况 (2008~2012 年)

Table 1 Current speed changes of feature point in Qinzhou Bay after reclamation from 2008 to 2012

编号 No.	涨急 Flood				落急 Ebb			
	2008 ( $m \cdot s^{-1}$ )	2012 ( $m \cdot s^{-1}$ )	差值 Difference ( $m \cdot s^{-1}$ )	相对变化率 Relative change rate (%)	2008 ( $m \cdot s^{-1}$ )	2012 ( $m \cdot s^{-1}$ )	差值 Difference ( $m \cdot s^{-1}$ )	相对变化率 Relative change rate (%)
1#	0.677	0.584	-0.093	13.8	0.845	0.700	-0.145	17.1
2#	0.469	0.448	-0.022	4.6	0.634	0.582	-0.052	8.2
3#	0.351	0.399	0.048	13.7	0.627	0.640	0.013	2.1
4#	0.319	0.229	-0.090	28.3	0.508	0.389	-0.119	23.4
5#	0.236	0.139	-0.097	41.0	0.328	0.126	-0.202	61.5
6#	0.310	0.288	-0.022	7.1	0.463	0.451	-0.012	2.6
7#	0.371	0.355	-0.016	4.2	0.484	0.453	-0.031	6.4
8#	0.448	0.433	-0.015	3.3	0.619	0.618	-0.001	0.2
9#	0.464	0.441	-0.023	5.0	0.688	0.636	-0.052	7.6
10#	0.380	0.376	-0.004	0.9	0.572	0.579	0.006	1.1
11#	0.383	0.377	-0.006	1.6	0.596	0.560	-0.036	6.1
12#	0.332	0.365	0.033	9.9	0.537	0.548	0.011	2.0
13#	0.339	0.338	-0.002	0.5	0.555	0.550	-0.005	0.9
14#	0.255	0.116	-0.139	54.5	0.337	0.250	-0.087	25.7
15#	0.171	0.253	0.082	47.9	0.264	0.398	0.133	50.4
16#	0.253	0.132	-0.121	47.9	0.410	0.186	-0.224	54.6
17#	0.269	0.387	0.119	44.2	0.280	0.603	0.322	115.0
18#	0.284	0.277	-0.008	2.8	0.445	0.471	0.026	5.8

与 9#、11#、13# 特征点离工程建设区域稍远, 所处地形改变不大, 因而流速变化相对较小, 相对变化率均不超过 10%。

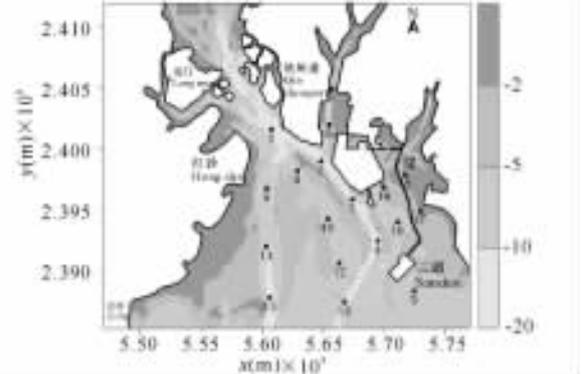


图 14 钦州湾海域特征点分布(背景为 2012 年水下地形, 单位 m)

Fig. 14 Distribution of feature point in Qinzhou Bay (background of underwater topography in 2012)

从表 1 还可看出, 落急时刻各个特征点流速变化情况与涨急时刻类似。1#、2#、4#~7#、14# 以及 16# 特征点 2012 年流速小于 2008 年流速, 其中以 16# 特征点的流速改变量相对较大, 达 0.224m/s, 相对变化率超过 50%; 同时 4#、14# 特征点的流速相对变化率均超过 20%。5# 特征点的流速变化值也较大, 达到 0.2m/s, 相对变化率超过 60%。15#、17# 特征点因三墩公路的束窄作用, 2012 年流速较 2008 年明显增大, 相对变化率均超过 50%, 以 17# 特征点流速改变量最为显著, 流速增大了 0.322m/s, 是未建三墩公路前的 2 倍之多。除此之

表 2 钦州湾围填海建设工程前后特征点流向变化情况(2008~2012年)

Table 2 Current direction changes of feature point in Qinzhou Bay after reclamation from 2008 to 2012

编号 No.	涨急 Flood				落急 Ebb			
	2008 (°)	2012 (°)	差值 Difference (°)	相对变化率 Relative change rate (%)	2008 (°)	2012 (°)	差值 Difference (°)	相对变化率 Relative change rate (%)
1#	330.6	326.1	-4.5	1.4	149.8	145.8	-4.0	2.7
2#	325.3	325.1	-0.2	0.1	143.1	143.5	0.3	0.2
3#	326.1	321.8	-4.3	1.3	148.1	137.7	-10.4	7.0
4#	353.8	353.0	-0.8	0.2	168.0	175.7	7.7	4.6
5#	341.4	328.4	-13.0	3.8	162.9	181.2	18.4	11.3
6#	358.6	352.0	-6.6	1.8	181.4	189.6	8.2	4.5
7#	357.2	357.0	-0.2	0.1	183.5	186.3	2.8	1.5
8#	327.0	328.6	1.7	0.5	145.8	146.3	0.5	0.4
9#	6.8	6.8	0.0	0.1	188.3	188.8	0.5	0.2
10#	343.7	344.4	0.8	0.2	160.8	161.2	0.4	0.3
11#	0.9	1.6	0.7	81.7	177.4	179.0	1.5	0.9
12#	356.1	359.0	2.9	0.8	174.0	178.2	4.1	2.4
13#	0.1	0.1	0.0	0.0	172.0	170.6	-1.4	0.8
14#	333.4	337.0	3.6	1.1	163.4	212.6	49.2	30.1
15#	353.5	347.3	-6.2	1.8	205.4	171.3	-34.1	16.6
16#	330.0	352.4	22.5	6.8	147.5	159.7	12.3	8.3
17#	312.6	327.9	15.3	4.9	140.4	158.5	18.1	12.9
18#	2.1	4.0	1.9	91.4	180.0	188.8	8.8	4.9

外,其余远离围填海工程建设区域的特征点流速变化不大。

从流向的变化情况(表 2)看,因围填海工程建设,部分特征点工程前后的流向也发生了改变。涨急时刻,除 5#、16#、17# 特征点的 2012 年流向较 2008 年偏转角度大于 10° 小于 30° 外,其余特征点流向变化均小于 10°, 流态改变较小。落急时刻,5#、14#~17# 特征点流向变化偏转角度超过 10°, 其中又以三墩公路两侧附近特征点 14#~17# 特征点流向变化较大,最大偏转角度达 49.2°(南偏西);除此之外,其余特征点的偏转角度不超过 10°, 流向与 2008 年基本保持一致。

### 3 大型填海工程对钦州湾水体交换能力的影响

近岸海域水交换问题是海洋环境科学研究的一个基本命题,在当前海洋环境污染日趋严峻的背景下,摸清当地海域的海水交换能力显得尤为重要。目前,水交换研究中常用的方法有箱式模型、质点跟踪模型、随机游动模型、对流扩散模型以及滞留时间模型等,各种研究方法基于不同的研究背景获得了不少成果。

表征水体交换能力的常用指标是水体的半交换周期,即研究区域内水体交换一半时所需的时间。计

算钦州湾海水半交换周期时,采用匡国瑞<sup>[13,14]</sup>介绍的海水交换率法,并由港湾零维水质模型的解析解,得到海水半交换周期计算公式如下

$$T_{1/2} = 0.693V / (\gamma Q_E), \quad (4)$$

式中,  $T_{1/2}$  为半交换周期,  $V$  为港湾水体体积,  $\gamma$  为湾内水对湾外海水的交换率,  $Q_E$  为落潮时流出港湾的水量。

由于基于水质模型给出的海水交换率  $\gamma$  计算方法较为复杂,因此采用曾刚<sup>[15]</sup>提出的一种简化方法,即海水平均交换率法,计算公式为

$$\gamma = Q_J / V,$$

式中,  $Q_J$  表示一个潮周期内通过某个断面的净通量。

首先,计算钦州湾围填海工程建设前后湾内水体体积的变化情况,采用的断面如图 1(a)所示,计算涉及的岸线、水深数据与潮流模型所用数据一致。以当地平均海平面为基准,2008 年钦州湾的水体体积约为  $1.588289 \times 10^9 \text{ m}^3$ ; 2012 年,由于金鼓江两岸、保税港区以及三墩公路等围填海工程建设,钦州湾的水体体积缩减至  $1.553127 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 较 2008 年减小约  $3.51622 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 减少量占钦州湾原水体总体积约 2.21%。

其次,利用前述钦州湾平面二维潮流模型,分别统计钦州湾 2008~2012 年典型大潮、中潮以及小潮一个潮周期内通过图 1(a)所示断面的涨潮通量  $Q_F$ 、

落潮通量  $Q_E$  以及净通量  $Q_J$ , 结果见表 3。

从表 4 可以看出, 2008 年钦州湾大潮的海水半交换周期  $T_{1/2}$  为 5.23d, 2012 年延长至 5.79d, 海水交换一半所需时间增加了 0.56d, 这表明海水的交换能力变弱了; 2008 年中潮的  $T_{1/2}$  为 6.36d, 增长至 2012 年的 6.91d, 增加了 0.55d; 2008 年小潮的海水半交换周期  $T_{1/2}$  为 17.29, 小潮时钦州湾潮流为半日潮, 因此若以 d 为单位表示, 2008 年小潮  $T_{1/2}$  为 8.64d, 2012 年时  $T_{1/2}$  增长至 18.29, 即 9.15d, 增加了 0.50d。从上述计算结果可知, 由于钦州湾大规模围填海建设, 钦州湾不同潮时的海水交换能力已开始减弱, 随着钦州湾入海污染物逐年增加, 海水交换能力变差将对钦州湾的水质环境产生不良影响。

表 3 典型潮周期内涨、落潮通量与净通量变化情况 (2008~2012 年) (单位:  $\times 10^9 \text{ m}^3$ )

Table 3 Changes of flood flux, ebb flux and net flux at a typical tidal cycle from 2008 to 2012 (unit:  $\times 10^9 \text{ m}^3$ )

年份 Year	大潮 Spring tide			中潮 Middle tide			小潮 Neap		
	$Q_E$	$Q_F$	$Q_J$	$Q_E$	$Q_F$	$Q_J$	$Q_E$	$Q_F$	$Q_J$
2008	1.732	1.539	0.193	1.476	1.290	0.186	0.580	0.406	0.174
2012	1.675	1.503	0.172	1.429	1.260	0.169	0.556	0.401	0.162

由式(4)计算钦州湾 2008~2012 年不同潮时的海水半交换周期  $T_{1/2}$ , 结果如表 4 所示。

表 4 不同潮时海水半交换周期变化情况 (2008~2012 年)

Table 4 Changes of seawater haef-exchange cycle at different tidal phases from 2008 to 2012

年份 Year	大潮 Spring tide (d)	中潮 Middle tide (d)	小潮 Neap (0.5d)
2008	5.23	6.36	17.29
2012	5.79	6.91	18.29

本次计算基于冬季一个月的潮流数值模拟结果, 钦州湾不同季节的潮差变化较大, 其它季节的水动力环境变化情况有待于进一步研究。

## 4 结论

通过构建一个平面二维潮流模型, 利用不同年份的实测资料对模型进行验证, 进而计算分析钦州湾 2008~2012 年因大规模围填海建设引起的水动力变化情况, 获得以下几点认识:

(1) 钦州湾东航道以及金鼓江深使得航道内流速有所减小, 最大减小量约 0.145m/s, 短期内将可能引起航道回淤。三墩公路的阻隔作用, 导致位于三墩公路西侧、原鹿耳环江出水潮沟附近的流速明显缩小, 减小量可达 0.224m/s; 而在三墩公路东侧, 因地

形的束窄作用, 导致麻蓝头岛以南至急水门附近海域流速显著增大, 最大增量约 0.322m/s, 该区域将逐渐形成新的潮流通道。

(2) 大规模填海工程建设导致钦州湾可容纳的水体体积明显缩小, 2012 年钦州湾水体体积较 2008 年减小约 2.21%。

(3) 大规模填海工程建设导致钦州湾的水交换能力变弱, 海水半交换周期时间延长, 最大延长时间达 0.56d, 对水质恶化趋势的影响不容乐观。

## 参考文献:

- [1] 广西壮族自治区海洋局. 广西壮族自治区 2012 年海洋环境质量公报 [EB/OL]. [2014-03-05]. <http://www.gxoa.gov.cn/NewsView.aspx?id=5364>. The Oceanic Administration of Guangxi Province. 2012 marine environment quality bulletin of Guangxi Province [EB/OL]. [2014-03-05]. <http://www.gxoa.gov.cn/NewsView.aspx?id=5364>.
- [2] 陈波, 侍茂崇, 邱绍芳. 广西主要港湾余流特征及其对物质运输的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 2003, 1: 13-20. Chen B, Shi M C, Qiu S F. Characteristics of residual currents and their influence on the material transportation in five main bays of Guangxi coast [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003, 1: 13-20.
- [3] 邱绍芳, 侍茂崇, 陈波. 钦州湾潮流特征分析 [J]. 海洋通报, 2003, 22(3): 9-14. Qiu S F, Shi M C, Chen B. Analysis of tidal current characteristics in Qinzhou Bay [J]. Marine Science Bulletin, 2003, 22(3): 9-14.
- [4] 鲍献文, 陈波, 侍茂崇, 等. 钦州湾三维潮流数值模拟 [J]. 广西科学, 2004, 11(4): 375-378, 384. Bao X W, Chen B, Shi M C, et al. The numerical simulation of the three dimensional tide of Qinzhou Bay [J]. Guangxi Sciences, 2004, 11(4): 375-378, 384.
- [5] 蒋磊明, 陈波, 邱绍芳, 等. 钦州湾潮流模拟及其纳潮量和水交换周期计算 [J]. 广西科学, 2009, 16(2): 193-195. Jiang L M, Chen B, Qiu S F, et al. Calculation of tidal prism and water exchange period and simulation of current in Qinzhou Bay [J]. Guangxi Sciences, 2009, 16(2): 193-195.
- [6] 游慕贤, 游立新. 钦州湾围滩工程前后潮流场的数值模拟 [J]. 水道港口, 2009, 30(6): 394-401. You M X, You L X. Numerical simulation of tidal current field before and after engineering project in Qinzhou Bay [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2009, 30(6): 394-401.

(下转第 369 页 Continue on page 369)

- [M]. Beijing: China Ocean Press, 1992.
- [2] 国家海洋局第一海洋研究所. 广西钦州茅尾海综合整治数值模拟综合评价报告[R]. 青岛: 国家海洋局, 2010.  
The First Marine Research Institute of the State Oceanic Administration. The numerical simulation and comprehensive evaluation report of Maowei Hai comprehensive improvement, Qinzhou, Guangxi[R]. Qingdao: The State Oceanic Administration, 2010.
- [3] 广西科学院. 防城港市入海污染物排放总量控制研究与规划报告[R]. 南宁: 广西科学院, 2013.  
Guangxi Academy of Sciences. The report of sea pollutant total amount control research and planning in Fangchenggang City[R]. Nanning: Guangxi Academy of Sciences, 2013.
- [4] 广西壮族自治区海洋局, 国家海洋局第三海洋研究所. 广西壮族自治区海洋主体功能区规划研究报告[R]. 南宁: 广西壮族自治区海洋局, 2012.  
Oceanic Administration of Guangxi Zhuang Autonomous region, The Third marine Institute of the State Oceanic Administration. The report of ocean development planning study of the Guangxi Zhuang autonomous region [R]. Nanning: Oceanic Administration of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 2012.
- [5] 防城港市统计局. 防城港市统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.  
Bureau of Statistics of Fangchenggang. The Statistical Yearbook of Fangchenggang 2010 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.
- [6] 国家海洋信息中心. 广西海洋主体功能区规划专题研究报告[R]. 天津: 国家海洋局, 2011.  
National Marine Information Center. The report of planning research Guangxi marine main body function area [R]. Tianjin: The State Oceanic Administration, 2011.
- [7] 防城港市统计局. 防城港市统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.  
Bureau of statistics of Fangchenggang. The Statistical Yearbook of Fangchenggang 2011 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011.
- [8] 陆海生, 陈波. 海洋产业发展对广西近海水质环境的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(7): 1322-1326.  
Lu H S, Chen B. Effects of the development of marine industry on offshore environment in Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(7): 1322-1326.

(责任编辑: 竺利波)

(上接第 364 页 Continue from page 364)

- [7] Chen C, Liu H, Beardsley R C. An unstructured, finite-volume, three - dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20: 159-186.
- [8] Chen C, Cowles G, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM User Manual, SMAST/UMASSD Technical Report-04-0601 [S]. 2004: 183.
- [9] 谭维炎. 计算浅水动力学——有限体积法的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
Tan W Y. Calculation of shallow water dynamics: the application of finite volume method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [10] 胡四一, 谭维炎. 无结构网格上二维浅水流动的数值模拟[J]. 水科学进展, 1995, 6(1): 1-9.  
Hu S Y, Tan W Y. Numerical modeling of two-dimensional shallow water flow on unstructured grids [J]. Advances in Water Science, 1995, 6(1): 1-9.
- [11] 国家海洋局第一海洋研究所. 钦州恒新镍业镍铁项目一期工程海域使用论证报告书[R]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2007.  
The First Institute of Oceanography, SOA. The demonstration report of Qinzhou Hengxin nickel and ferro-nickel project phase I Sea area use [R]. Qindao: The First Institute of Oceanography, SOA, 2007.
- [12] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第十四分册(重要河口)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998.  
Editorial Committee of Chinese Bay Record. The fourteenth volume of Chinese bay record (important estuaries) [M]. Beijing: China Ocean Press, 1998.
- [13] 匡国瑞. 海湾水交换的研究——海水交换率的计算方法[J]. 海洋环境科学, 1986, 5(3): 45-48.  
Kuang G R. Research on bay water exchange: calculation method of water exchange rate [J]. Marine Environmental Science, 1986, 5(3): 45-48.
- [14] 匡国瑞, 杨殿荣, 喻祖祥, 等. 海湾水交换的研究——乳山东湾环境容量初步探讨[J]. 海洋环境科学, 1987, 6(1): 13-23.  
Kuang G R, Yang D R, Yu Z X, et al. Research on bay water exchange: preliminary study on environmental capacity in the east Rushan Bay [J]. Marine Environmental Science, 1987, 6(1): 13-23.
- [15] 曾刚. 厦门港水交换的初步计算[J]. 海洋通报, 1984, 3(5): 7-11.  
Zeng G. Preliminary computation of the seawater exchange in Xiamen Harbor [J]. Marine Science Bulletin, 1984, 3(5): 7-11.

(责任编辑: 陈小玲)