

大鹏液化天然气接收站冷排水对附近海域 温度场影响的数值模拟

杨青云¹, 刘晓东^{1,2}, 唐俊逸¹, 赵振业^{1,2}

(1. 深圳市深港产学研环保工程技术股份有限公司, 广东 深圳 518057;

2. 深圳海岸与大气研究重点实验室, 广东 深圳 518057)

摘 要:液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)在接收和气化的过程中,需要使用海水提供热能,导致 LNG 接收站向海洋中排放大量温度相对较低的海水,引起一定范围内海水温度异常变化,而温度是海洋生态系统的重要影响因素,直接影响海洋生物生长和繁殖过程。利用 ECOMSED(Estuaries and Coastal Ocean Model With Sediment Module)三维水环境数学模型对大鹏 LNG 接收站附近海域进行数值模拟,得到接收站附近海域温度场分布情况,并将温降区域划为包含 $-5\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-4\sim-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-3\sim-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域,结果表明:表底层温降区域的面积在 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内逐渐增大,在 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域内面积最大,并且底层温降区域的面积明显大于表层。

关键词:大鹏湾;液化天然气接收站;冷排水;数值模拟;温降

中图分类号:X83

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2017)04-0020-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682. 2017.04.003

大鹏湾以及集水区位于深圳市的东南部,集水区内陆地及海洋资源丰富,拥有多样的海洋动植物、红树林生境及珊瑚群落,被深圳政府称为黄金海岸^[1]。大鹏液化天然气项目位于大鹏新区大鹏街道下沙秤头角,在液化天然气接收和气化过程中,需要使用海水提供热能,导致 LNG 接收站向海洋中排放大量温度相对较低的海水,引起一定范围内海水温度异常变化,而温度作为重要的理化指标,直接影响海洋生物生长和繁殖过程,是海洋生态系统的重要影响因素。大鹏湾是个半封闭海湾^[2],自然环境十分脆弱,很大程度上受海湾半封闭性、海流弱、海水交换率低和更新周期长等因素的制约^[3],水环境一旦受到影响,便很难在短时间内恢复。

为此本文通过分析大鹏 LNG 接收站冷排水温度、水量和排放时序等相关资料,运用 ECOM 三维水环境数学模型对大鹏湾海域进行数值模拟,计算大鹏液化天然气接收站冷排水的输运、扩散行为,得到海水温度场温降分布情况,分析接收站冷排水对附近海域海水温度的影响程度。

1 水动力模型的构建

1998 年,为缓解我国东南沿海地区能源短缺的现状,国务院批准进口液化天然气在广东先行试点,确定广东大鹏液化天然气项目为我国首个引进 LNG 试点项目。大鹏液化天然气项目于 1999 年底正式立项,2003-12 LNG 接收站工程正式开工,2006-05 首船 LNG 抵达接收站,该项目占地约 40 hm^2 ,库区终端设施包括了 4 个 16 万 m^3 的 LNG 大型储罐,48.4 万 m^3 LNG 货船停泊卸料码头(1 号泊位 $8.0\sim 21.7\text{ 万 m}^3$,2 号泊位主力船型 14.7 万 m^3 ,兼顾 $3.0\sim 26.7\text{ 万 m}^3$),槽车灌装站,LNG 气化装置,天然气计量站,自动中央控制

收稿日期:2017-07-13

资助项目:深圳市规划和国土委员会(市海洋局)专项资金资助项目——大鹏液化天然气接收站冷排水对东部近海生态系统的影响研究

作者简介:杨青云(1990-),女,硕士,主要从事海洋数值模拟方面研究. E-mail: yangqy6@163.com

(李 燕 编辑)

系统及其他配套装置等。大鹏 LNG 接收站地理位置及模型的模拟范围如图 1 所示。

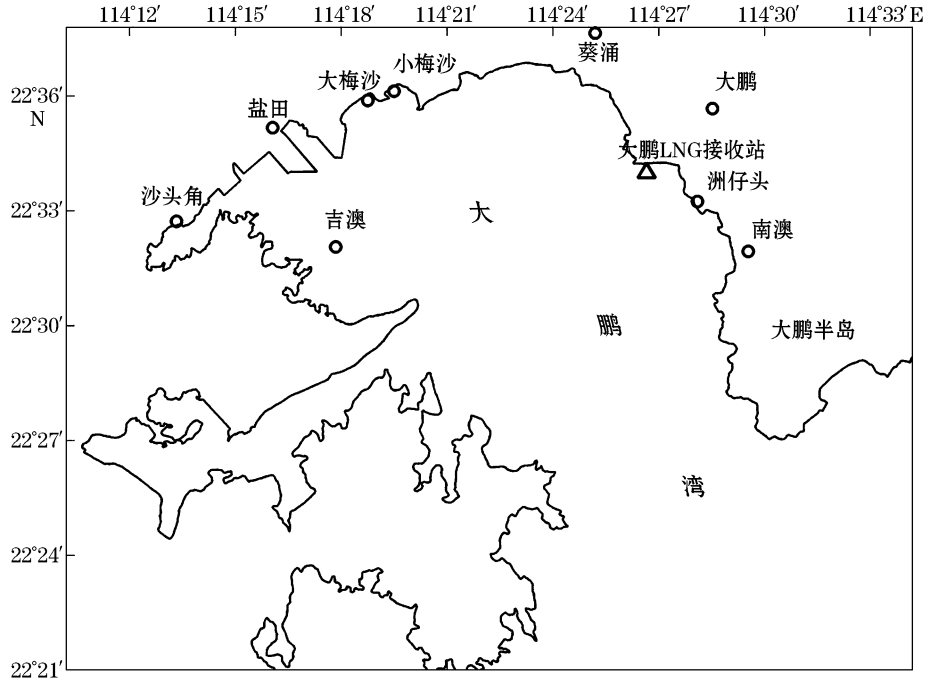


图 1 大鹏 LNG 接收站地理位置及模拟范围

Fig.1 The geographical location of the Dapeng LNG receiving station and the area of the model covered

1.1 控制方程

本文采用 ECOMSED 三维水环境数学模型对大鹏湾海域进行模拟,在三维水动力模型的基础上,利用热量守恒模型计算热量的传递,热量守恒方程见式(1)和式(2):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{H} + T_s S; \quad (1)$$

$$F_T = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (2)$$

式中, T 为热力学温度; u, v, w 为 x, y, z 方向的流速; D_h, D_v 为水平向和垂直向的扩散系数; $\bar{H}$ 为大气热交换; S 为源项。

在水面 ($z = \eta$) 和水底 ($z = -d$), 上述方程转化为式(3)和(4):

$$D_h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_n}{\rho_0 c_p} + T_p \bar{P} - T_e \bar{E}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

式中, Q_n 为表面净热量通量; c_p 为水体比热, 取 $4.217 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

1.2 计算区域与网格划分

本文以大鹏湾 LNG 项目为例,通过数值模型开展对大鹏湾海域的数值模拟,根据研究区域的模拟重点及地形的复杂情况,以及海图数字化得到的水深及岸线文件,使用 Delft-3d 软件进行曲线贴体网格的绘制工作,模型的网格划分如图 2 所示,网格的范围西到香港的吉澳,东至惠州大亚湾,南至 20 m 等深线分布区域,

模型采用一套能与海湾岸线吻合良好且分辨率较高的正交曲线坐标网格,网格的总数为 15 359 个,水平方向剖分为 215×145 个网格(东西向 $\times$ 南北向),大鹏湾顶部网格的平面空间分辨率为 $160 \text{ m} \times 170 \text{ m}$,到外海最大的网格步长为 $200 \text{ m} \times 400 \text{ m}$,本研究结合大鹏湾海域的实际水深在垂向上等距划分为 5 个 Sigma 层,即由上至下各层所占的水深比例均为 0.2,能够较好地拟合大鹏湾的地形,模型的模拟范围及水深分布如图 3 所示。

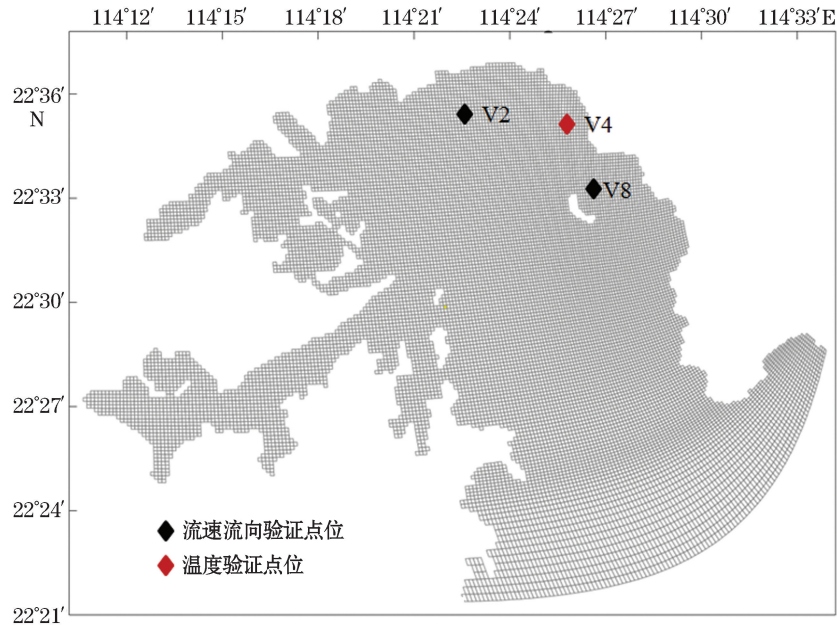


图 2 大鹏湾水动力模型网格划分示意图

Fig.2 Grid partition schematic diagram of the hydrodynamic model of the Dapeng Bay

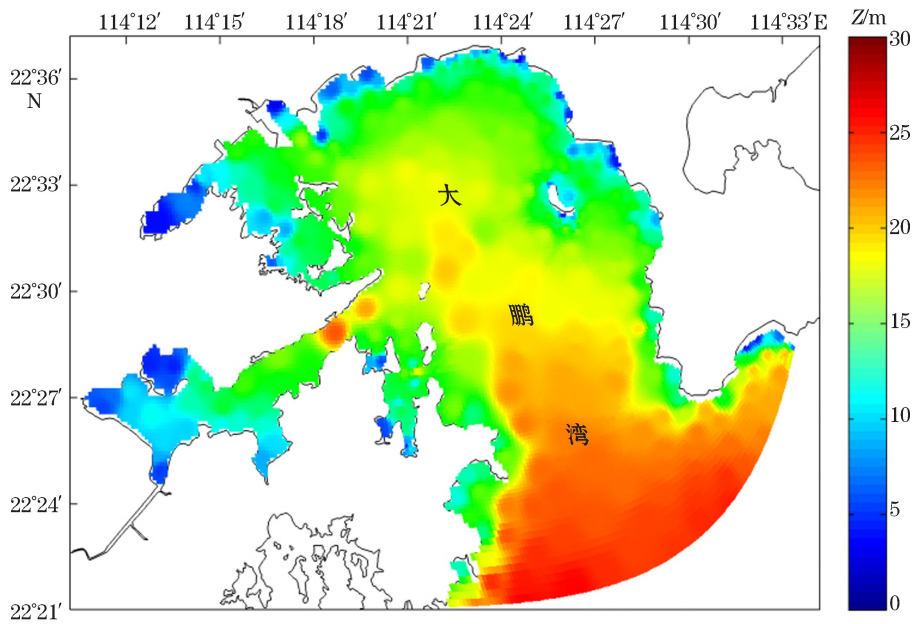


图 3 大鹏湾水动力模型网格计算范围及水深分布

Fig.3 Calculation range of the hydrodynamic model grid and the water depth of the Dapeng Bay

1.3 水动力模型的设置

本文中水动力模型外模和内模的时间步长分别设为 10 和 30 s,由于流场具有能量耗散的特性,计算区域内的流场和水位场只在积分初始时段会对计算结果产生影响,其后时段的分布则取决于边界条件,所以为了计算的精确度,水动力计算时,要对模型进行预热计算,预热时间为模拟时段的前一个月。根据冷排水对周围水温的影响程度,选取影响冷排水较为不利的水文条件,因此本文选择夏季时期作为典型水文条件进行模拟。

模型的外海边界采用美国俄勒冈州立大学开发的 OTIS(OSU Tidal Data Inversion Software)全球潮汐同化数据^[4],以 8 个分潮($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$)的潮汐数据驱动水动力模型。模型中的外海温盐边界条件及初场采用全球同化的 SODA 数据^[5],其空间分辨率 0.25° ,时间分辨率为 1 个月,而太阳短波辐射、云量、海表温度、湿度、大气压等气象条件则采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)发布的气象数据(空间分辨率 0.5° ,时间分辨率为 6 h)^[6]。由于整个计算区域与所使用的气象数据空间分辨相比较少,在计算中气象边界条件在整个计算域保持空间一致,但会随时间进行变化。

2 水动力模型的验证及模拟结果分析

2.1 水动力模型的验证

模型的验证即为模拟值和实测值之间的比较结果,本文对模型的模拟效果主要从潮位、流速、流向和温度四个方面进行验证,潮位验证数据采用 2008-05-26—28(农历四月廿二至四月廿四,小潮期)大鹏湾(盐田港)潮汐表^[7],流速、流向验证的站点为 V2 和 V8,温度验证的站点为 V4,温度和流的实测数据均为逐时监测,监测时间为 2008-05-21,2008-05-26 和 2008-05-28,验证结果见下文。

潮位模拟验证结果(图 4)显示,模型的模拟值和实测值较为吻合,潮位的平均误差为 0.01 m,潮汐表预测值和模拟值的相关性系数为 0.95。

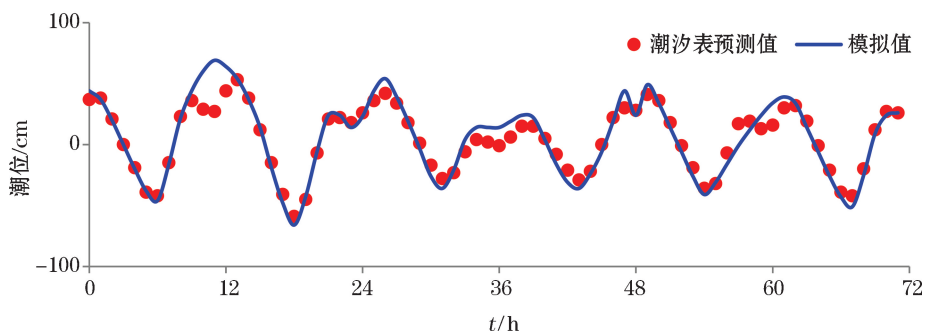


图 4 潮位模拟验证图

Fig.4 Diagram of the water level verification

2008-05 大鹏湾 V4 站点表、底层温度的模拟值与实测值的比较结果如图 5 所示,可以看到,2008-05 模拟的温度变化趋势与实测较为吻合。

本研究主要对 V2 和 V8 两个站点大、小潮的流速、流向的实测值和模拟值进行了比较,结果如图 6 和图 7 所示,由于本文研究区域水深较浅,所以只进行垂向平均流速的验证,2 个站点平均流速和流向的验证结果显示,模型所模拟的变化过程与实测的结果基本一致,只有在转流时才会出现一定的偏差。

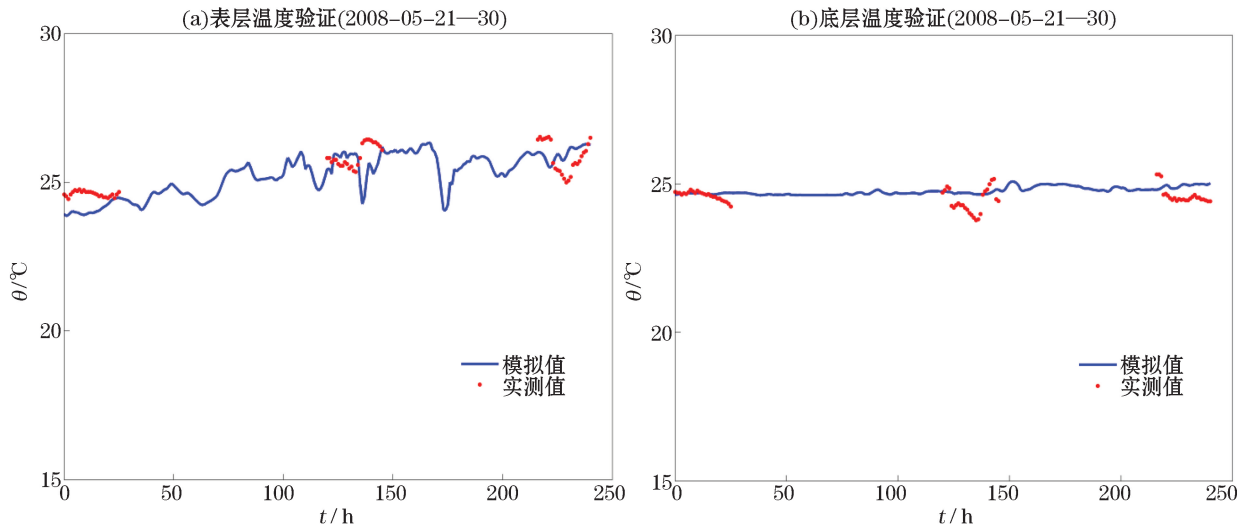


图5 大鹏湾 V4 站点表底层温度模拟值与实测值比较

Fig.5 Comparison between simulated and measured values of the surface and the bottom temperature at station V4 in the Dapeng Bay

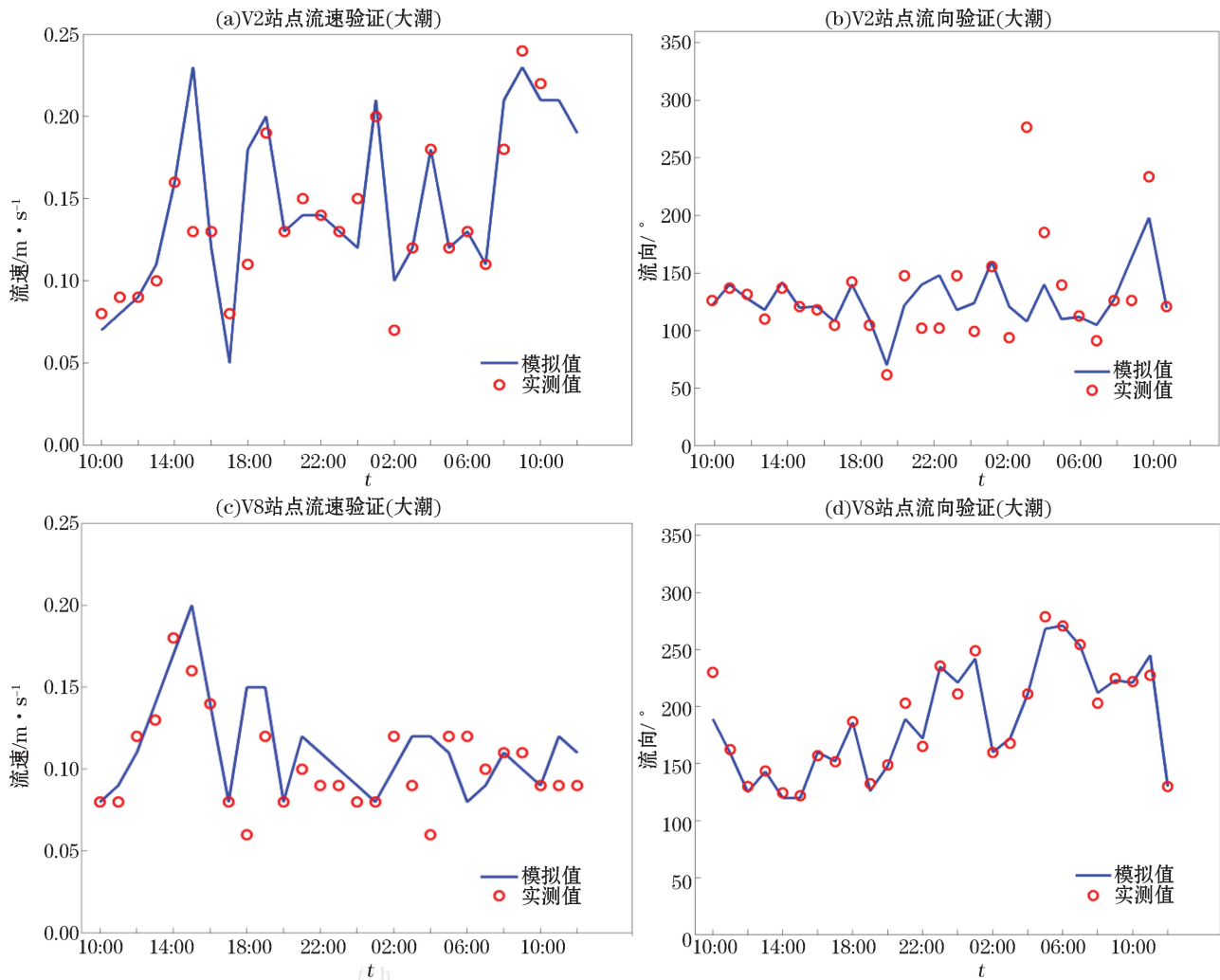


图6 大鹏湾 V2, V8 站点大潮流速流向模拟值与实测值比较(2008-05-21)

Fig.6 Comparison between simulated and measured values of the velocity and direction of the spring tide at the stations in the Dapeng Bay(2008-05-21)

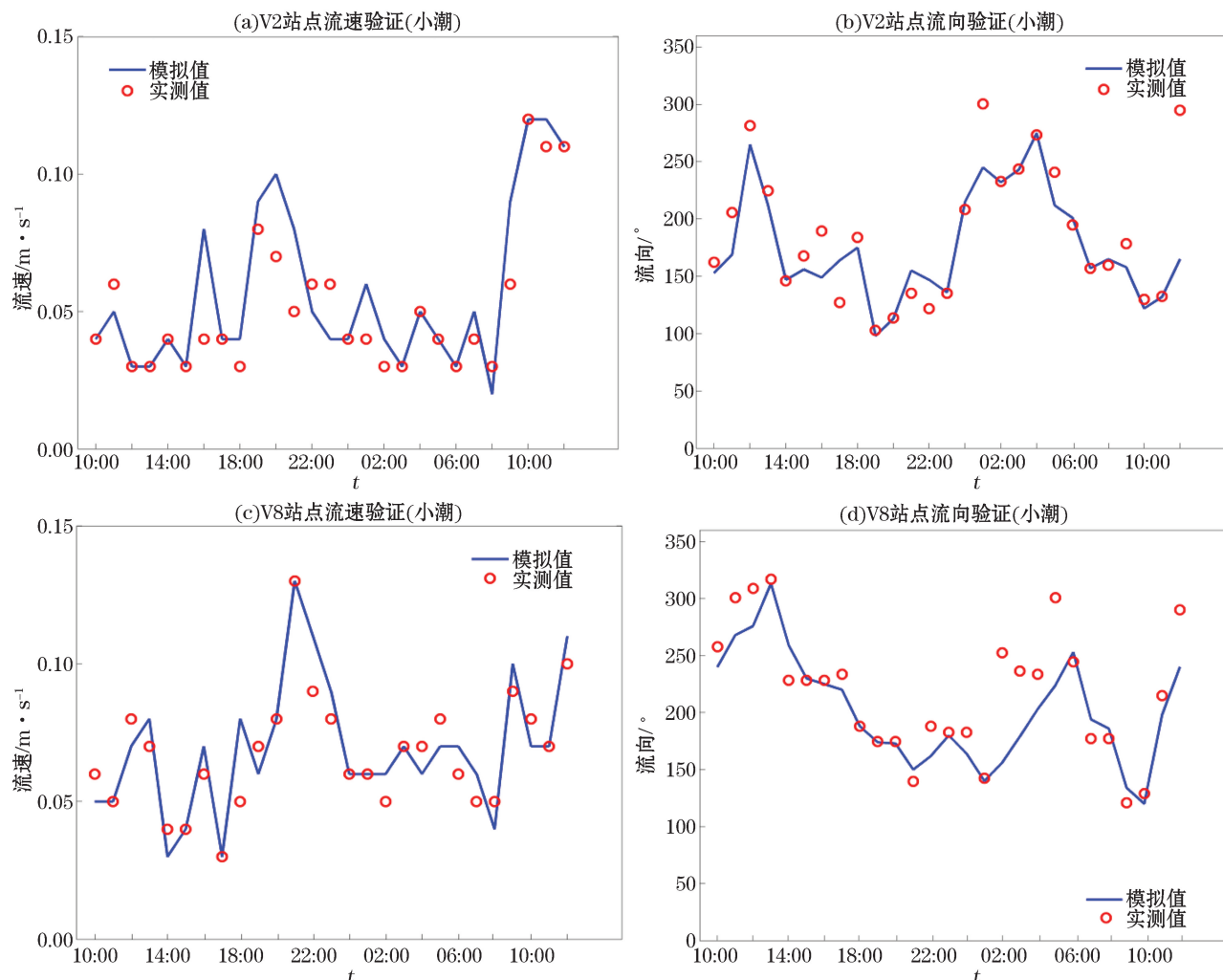


图 7 大鹏湾 V2,V8 站点小潮流速、流向模拟值与实测值比较(2008-05-28)

Fig.7 Comparison between simulated and measured values of the velocity and direction of the neap tide at the stations in the Dapeng Bay(2008-05-28)

误差分析的结果表明,2 个站点大、小潮的流速 60% 以上的相对误差都低于流速的 10%,V2 站点大、小潮流速的标准偏差分别是 0.03 和 0.05 m/s,V8 站点大、小潮流速的标准偏差分别是 0.03 和 0.02 m/s,2 个站点大、小潮的流向 87% 以上的平均误差低于 60°。

2.2 模拟结果分析

大鹏湾无大型河流注入,流场主要由风和潮汐所控制^[8],大鹏湾 5 月份大潮期和小潮期表底层的涨落潮流场如图 8 所示。从计算结果可以看出,涨潮时海水呈向湾内流动的趋势,落潮时海水向湾外流动,表层流速明显大于底层流速;无论是涨潮还是落潮,湾顶部的流速较小,越靠近湾口流速越大,最大流速多出现在湾口附近海域,湾外海域涨潮以偏 NE 向为主,落潮以偏 SW 向为主,整个流场的变化呈往复流特征,流场情况符合大鹏湾的流动态势,即模型的水动力模拟效果较为满意。

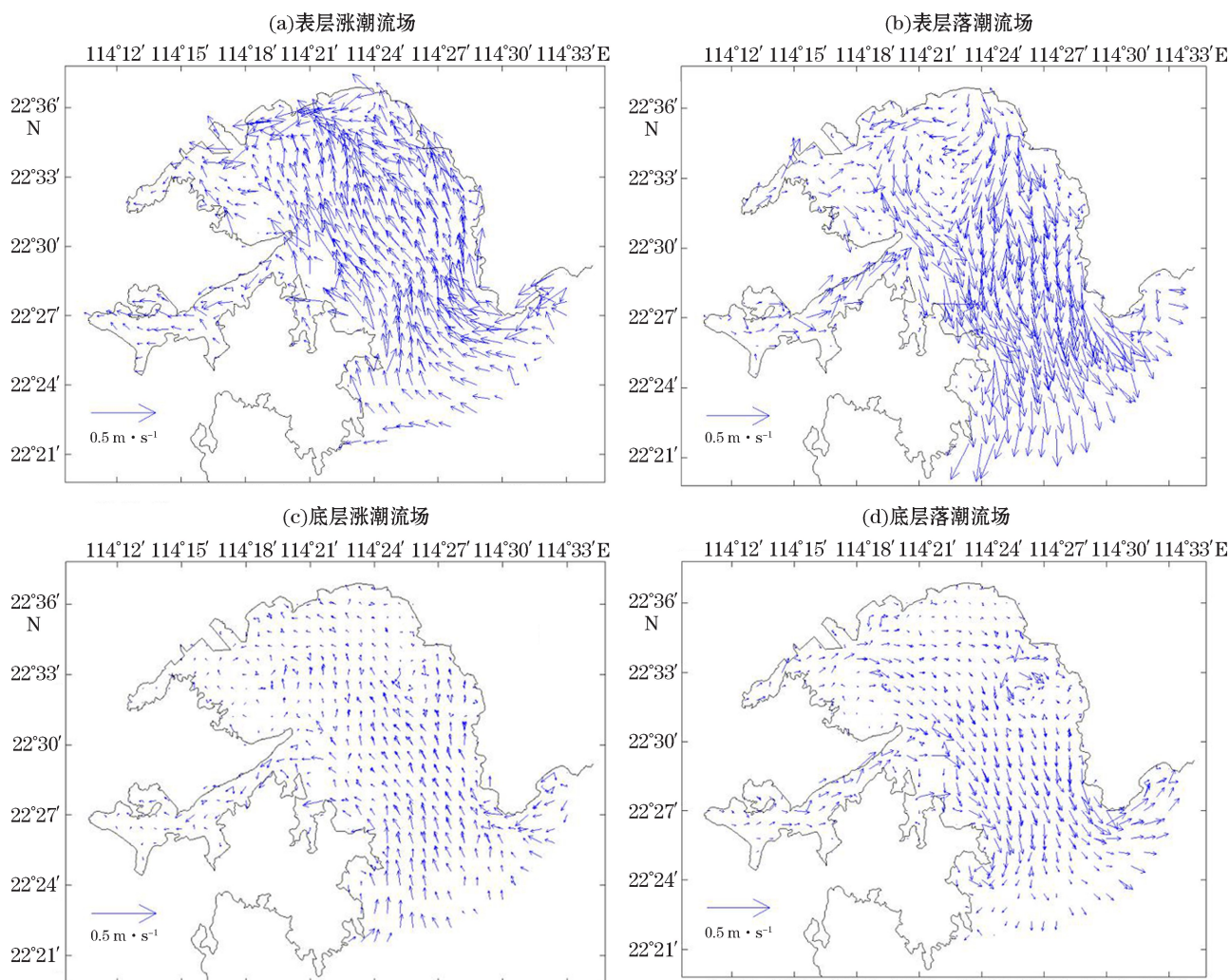


图 8 大鹏湾表底层涨落潮流场(模拟结果)

Fig.8 The surface and the bottom current fields during the flood and the ebb tides in the Dapeng Bay

3 冷排水温度场模拟结果分析

3.1 模型的设置

结合率定验证后的大鹏湾海域水动力模型,对大鹏 LNG 接收站冷排水温度场进行模拟。在上述水动力模型的基础上,将大鹏湾 LNG 接收站冷排水的排放以入海河流的方式作为模型的初始条件进行模拟,根据温排水、冷排水的相关资料文献^[9-13]和对接收站的实际测量,将大鹏湾 LNG 冷排水的排水量取为 44 940 m³/h,即为 12.5 m³/s,相对于周围海水,冷排水的温降取为 -5℃,模型涉及的温度扩散系数通过实测水温资料进行率定与验证,根据大鹏湾 LNG 接收站排水口的地理位置对应其网格坐标,将冷排水的排放量平均分布于对应的 4 个边界网格,模型模拟的时间为夏季时期,其中冷启和热启的时间各为 1 个月,本次模拟主要分析大小潮底层水温温降的分布特征,模型其他条件的设置同上述水动力模型。

3.2 模型结果与分析

根据对大鹏湾 LNG 接收站附近海域的数值模拟,得出温降分布图,并将温降区域划为包含 $-5\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-4\sim-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-3\sim-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域,估算出夏季大鹏 LNG 接收站不同梯度温降冷排水的影响面积如表 1 所示,无论是在大潮时期还是在小潮时期,表底层温降区域的面积在 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内逐渐增大,在 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域内面积最大,并且底层温降区域的面积明显大于表层。

表 1 表底层最大温降包络线的覆盖面积

Table 1 The coverage area of the maximum temperature drop envelopes at the surface and the bottom in the study area

潮 时	温降	温降区域面积/ $\times 10^{-3}\text{ km}^2$				
		$< -4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$< -3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$< -2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$< -1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
夏季大潮	表层	0.011	0.132	0.230	1.108	3.647
	底层	0.072	11.264	55.916	340.021	2 195.830
夏季小潮	表层	0.012	0.128	0.276	1.235	5.207
	底层	0.248	8.684	43.746	251.172	1 590.394

3.2.1 大鹏湾大、小潮时刻底部温降分布图

大、小潮时期,大鹏 LNG 接收站冷排水造成附近海域底层温降分布情况如图 9 和图 10 所示:根据水动力模型模拟的大鹏湾流场结果来看,由于大鹏湾 LNG 接收站排水口方式采取直排方式,冷排水的温降取为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此在近排水口海域存在温降为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水体。冷排水进入受纳水体后,温差导致的浮力效应驱使其主要在水体下层运移,因此底层海水受冷排水的影响较大。底层的温降以接收站为中心开始扩散,因此排水口附件海域存在温降为 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水体,由于大潮时期海水流动性较强,底层 $-5\sim-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温降包络线的范围比较小, $-3\sim-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温降包络线比 $-5\sim-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温降范围更大, $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内温降包络线的范围依次增大, $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温降包络线的范围最大,随后冷排水温度趋向于周围海水温度。

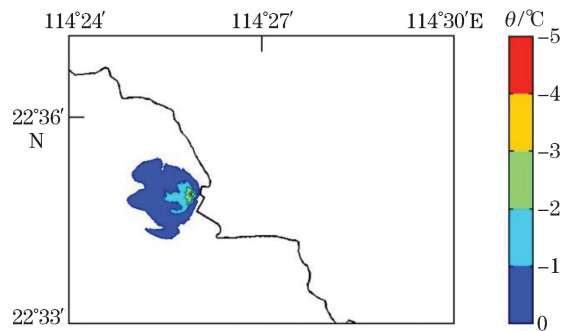


图 9 夏季大潮时刻底部温降分布
Fig.9 Distribution of the bottom temperature drop during the spring tide in summer

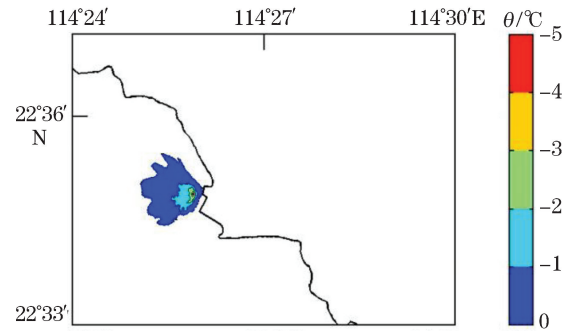


图 10 夏季小潮时刻底部温降分布
Fig.10 Distribution of the bottom temperature drop during the neap tide in summer

3.2.2 大、小潮时期的温降分布对比分析

通过大小潮时期底部温降分布的对比分析可得,小潮时期相对于大潮时期,一方面由于小潮潮位较低,受纳冷排水的海水体积也相对较小,另一方面由于小潮时期的海水流速比大潮时的流速缓慢,使得潮水对冷排水的混合和影响相对较小,小潮时期海水表层 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温降包络线包含的范围大于大潮时期同一时刻的范围,这一现象在表层表现较为显著。由于大潮时期底层的潮流明显大于小潮时期,因此海水底层大潮时

期温降区域的范围大于小潮时期。

根据冷排水的温降包络线的区域面积对比分析得出:

1) 表层冷排水扩散总面积: 小潮时期 > 大潮时期, 小潮冷排水影响总面积大于大潮时期, 但是彼此之间相差不大。分析其原因在于相对于大潮, 小潮时期的水位比大潮低, 受纳冷排水的海水体积也相对小; 小潮时期的海水流速比大潮时的流速缓慢, 使潮水对冷排水的混合和影响相对较小。相对于整个温降区域面积来说, $-2 \sim 0$ °C 温降水域面积相对较大, 小于 -4 °C 温降水域面积最小。

2) 底层冷排水扩散总面积: 大潮时期 > 小潮时期, 分析其原因在于, 大潮时期底部流速大于小潮时期的底部流速, 因此大潮冷排水的扩散面积也相应大于小潮时期。温降区域面积同表层, $-1 \sim 0$ °C 温降水域面积相对较大。

4 结 论

本文通过 ECOMSED 三维水环境数学模型对大鹏湾海域进行数值模拟, 在模型率定和验证的基础上, 结合资料收集和实测数据, 对夏季大鹏湾液化天然气接收站冷排水温度场进行模拟, 分析大、小潮时期底层水温的温降分布特征。从夏季大鹏 LNG 接收站附近海域大小潮底层温降分布图以及表底层不同温降包络线的区域面积可以得出:

1) 大鹏 LNG 接收站附近海域表层和底层的冷排水扩散面积大多数分布在 $-2 \sim 0$ °C 范围内;

2) 无论在大潮时期还是在小潮时期, 底层存在小范围的温降水体, 而表层总体的温降水域面积微乎其微;

3) 同一潮时, 同一区域, 底层冷排水扩散总面积总大于表层, 扩散趋势相同。

参考文献 (References):

- [1] HUANG X P, HUANG L M. Hydraulic characteristics of Dapeng Bay and its ecological and environmental effects[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(5): 47-54. 黄小平, 黄良民. 大鹏湾水动力特征及其生态环境效应[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(5): 47-54.
- [2] HUANG L M, QIAN H L, LI J R. Study on the relation between chlorophyll a and the environment in Dapeng Bay red current area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(2): 197-205. 黄良民, 钱宏林, 李锦蓉. 大鹏湾赤潮多发区的叶绿素 a 分布与环境关系初探[J]. 海洋与潮沼, 1994, 25(2): 197-205.
- [3] XIA Z. Dapeng Bay sea geology environment integrated evaluation[J]. Sea Geology Development, 2002, 18(10): 1-5. 夏真. 大鹏湾海洋地质环境综合评价[J]. 海洋地质动态, 2002, 18(10): 1-5.
- [4] OTIS DATA[EB/OL]. [2017-03-01]. <http://www.coas.oregonstate.edu/research/po/research/tide/>.
- [5] SODA DATA[EB/OL]. [2017-03-01]. <http://dsrs.atmos.umd.edu/DATA/SODA.1.4.0/>.
- [6] NCEP DATA[EB/OL]. [2017-03-01]. <http://www.ncep.noaa.gov/>.
- [7] National Marine Information Center. Tidal table of Dapeng Bay (Yantian Port) [EB/OL]. [2017-03-01] <http://ocean.cnss.com.cn/>. 国家海洋信息中心. 大鹏湾(盐田港)潮汐表[EB/OL]. [2017-03-01] <http://ocean.cnss.com.cn/>.
- [8] LI S W, LI H Y, XIA J X. Analysis of water environment capacity of Dapeng Bay based on Delft 3D model[J]. Environmental Science Research, 2005(5): 91-95. 栗苏文, 李红艳, 夏建新. 基于 Delft 3D 模型的大鹏湾水环境容量分析[J]. 环境科学研究, 2005(5): 91-95.
- [9] ZHANG M Z, ZHU S. LNG receiving V cold drainage movement three-dimensional numerical simulation[J]. People's Pearl, 2015(5): 25-28. 张明珠, 朱嵩. LNG 接收站冷排水运动三维数值模拟研究[J]. 人民珠江, 2015(5): 25-28.
- [10] WEI X L. Coastal LNG project cycle cold drainage program optimization research[D]. Qingdao: China Ocean University, 2015. 魏秀兰. 滨海 LNG 工程循环冷排水口方案优化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [11] WU S Q, ZHOU J, WU X F. Prediction and analysis of cold drainage effect of liquefied natural gas receiving V in drainage engineering [J]. Hydro-Science and Engineering, 2007(3): 38-43. 吴时强, 周杰, 吴修锋. 液化天然气接收站取排水工程冷排水影响预测与分析[J]. 水利水运工程学报, 2007(3): 38-43.
- [12] ZHANG B B, ZHOU J, JI P. Study on numerical simulation of temperature drainage in coastal power plant[J]. Journal of China Institu-

- te of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(4): 402-409. 张贝贝, 周静, 纪平. 滨海电厂温排水数值模拟研究现状[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(4): 402-409.
- [13] ZHANG J Z. Study on the influence of cold drainage and residual chlorine emission on marine life in LNG receiving V[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2013(17): 64. 张继周. LNG 接收站工程冷排水及余氯排放对海洋生物的影响研究[J]. 科技创新与应用, 2013(17): 64.

Numerical Simulation of the Influence of Cold Drainage From the Dapeng Liquefied Natural Gas Receiving Station on Seawater Temperature Field in the Nearby Sea Area

YANG Qing-yun¹, LIU Xiao-dong^{1,2}, TANG Jun-yi¹, ZHAO Zhen-ye^{1,2}

(1. Shenzhen-Hongkong Institution of Industry, Education & Research Environmental Technique Co., Ltd, Shenzhen 518057, China;

2. Shenzhen Key Laboratory for Coastal and Atmospheric Research, Shenzhen 518057, China)

Abstract: In the process of receiving and gasifying, the liquefied natural gas (LNG) needs to use seawater to provide heat energy, which leads to the LNG receiving station to discharge large amount of seawater with relatively lower temperature into the ocean and then causes abnormal changes in temperature of the sea water in a certain rang. Temperature is an important factor influencing the marine ecosystem and can directly affect the growth and reproduction processes of marine organisms. A numerical simulation is carried out for the seawater nearby the Dapeng LNG receiving station by using ECOMSED mathematical model of three-dimensional water environment, obtaining the distributions of seawater temperature in the sea area nearby the receiving station. The temperature drop area can be subdivided into five regions, which are $-5 \sim -4$ °C, $-4 \sim -3$ °C, $-3 \sim -2$ °C, $-2 \sim -1$ °C and $-1 \sim 0$ °C, respectively. At the surface and the bottom, the area of the temperature drop region increases gradually in the range of $-5 \sim 0$ °C, reaching the maximum in the range of $-1 \sim 0$ °C and being obviously larger at the bottom than at the surface.

Key words: Dapeng Bay; liquefied natural gas receiving station; cold drainage; numerical simulation; temperature drop

Received: July 13, 2017