

Prediction of the Influence of the Thermal Drainage Discharged by the Power Plant on the Marine Environment in Red Bay

Aizhen Liu, Ying Wang, Yuxin Zhu, Xin Xu, Mingchang Li

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T, Tianjin

Email: 147491256@qq.com, ruozhu1106@163.com, 55450526@qq.com, 562611006@qq.com, 252254889@qq.com

Received: Feb. 6th, 2018; accepted: Mar. 6th, 2018; published: Mar. 13th, 2018

Abstract

Based on the hydrological observations of the Red Bay in summer and winter, the characteristics of the Red Bay current were analysed and used as a verifying data of the mathematical model. A mathematical model of two-dimensional ocean current based on triangular mesh is established. The model uses the prediction result of the South China Sea regional circulation as the boundary condition, and the numerical simulation and verification of the sea current are carried out in the Red Bay. The results show that the calculated results of the model agree with the measured data. The seasonality of the current is quite different in summer and winter. This area is mainly affected by monsoon, and there is a distinct monsoon circulation, which is consistent with the basic characteristics of the South China Sea current. Based on the above hydrodynamic model, a mathematical model of thermal drainage is established, and the thermal drainage in summer and winter is predicted, and the environmental impact on the sea area is analysed.

Keywords

Red Bay, Numerical Simulation, Ocean Current, Thermal Discharge

红海湾内电厂温排水对海洋环境的影响预测

刘爱珍, 王莹, 朱宇新, 徐鑫, 李明昌

交通运输部天津水运工程科学研究院, 水路交通环境保护技术实验室, 天津

Email: 147491256@qq.com, ruozhu1106@163.com, 55450526@qq.com, 562611006@qq.com, 252254889@qq.com

收稿日期: 2018年2月6日; 录用日期: 2018年3月6日; 发布日期: 2018年3月13日

摘要

以红海湾夏季和冬季的水文观测为基础,分析红海湾的海流特征,并将其作为数学模型的验证资料。建立基于三角形网格的二维海流数学模型,采用南海区域环流预测结果作为边界条件,对红海湾进行了海流数值模拟,并对模型进行验证。研究表明,模型计算结果与实测结果一致,夏季和冬季海流季节性差异较大,此区域主要受季风影响,存在较明显的季风环流,与南海海流的基本特征一致。在以上水动力模型的基础上建立温排水数学模型,进行夏季和冬季的温排水预测,分析其对海域产生的环境影响。

关键词

红海湾, 数值模拟, 海流, 温排水

1. 引言

红海湾是位于我国南海北部的一个半封闭的海湾,地处汕尾市东部,东临碣石湾,西依大亚湾,三面环海。随着近年红海湾内众多工程的建设,有必要摸清湾内的动力特征。

南海的环流复杂[1],风场与沿岸地形所形成的强风应力旋度可能是其主要的驱动机制[2]。粤东沿岸流的流向随季风的转换而改变,在冬季,粤东沿岸流流向 SW,夏季,粤东沿岸流流向 NE[3]。

针对以上特点,于 2015 年在红海湾海域进行了冬、夏季全潮水文测验[4],并采用数学模型进行了模拟分析。

2. 红海湾水文观测及分析

红海湾海域于 2015 年夏、冬季分别进行过一次全潮测验,观测站位相同,图 1~4 分别为夏季大、小潮和冬季大、小潮的潮流矢量图。观测结果表明:

1) 红海湾的潮波并不是单纯的驻波或者前进波,而是介于驻波与前进波之间,兼有驻波与前进波的特征,为不规则半日潮流主导的海区。

2) 湾内潮差小,潮流弱,流态复杂。

3) 夏季中潮和小潮期间红海湾西岸的海流由东北向流向湾内,东岸的海流东南向流向湾外,中部的海流以 ENE 向为主,外侧的海流沿等深线向东,整个海湾呈现顺时针旋转特征。大潮期间整个海湾西岸海流由西南向流出湾外,其他方位的海流比较混杂,不是很一致,总体来看,整个观测区域呈现逆时针旋转特征。

4) 冬季海湾外部的海流都是沿着等深线从东向西流。中潮和小潮期间,海湾内的海流为西岸东北向流入湾内,东岸东南向流向湾外,海湾内的海流呈现顺时针旋转特征。大潮期间,海湾内的海流为西岸西南向流向湾外,东岸西北向流向湾内,海湾内的海流呈现逆时针旋转特征。

3. 数值模拟方法

海流计算采用 Mike 系列软件中的二维水动力模块(MIKE21 FM 模块) [5]。该软件由丹麦水工所开发,可以应用于海洋、海岸、河口区域的二、三维水动力计算。FM 模块采用三角形网格,在处理潮流动边界、负责工程建筑物边界方面具有强大的功能,在国内外许多工程项目研究中得到了广泛应用。

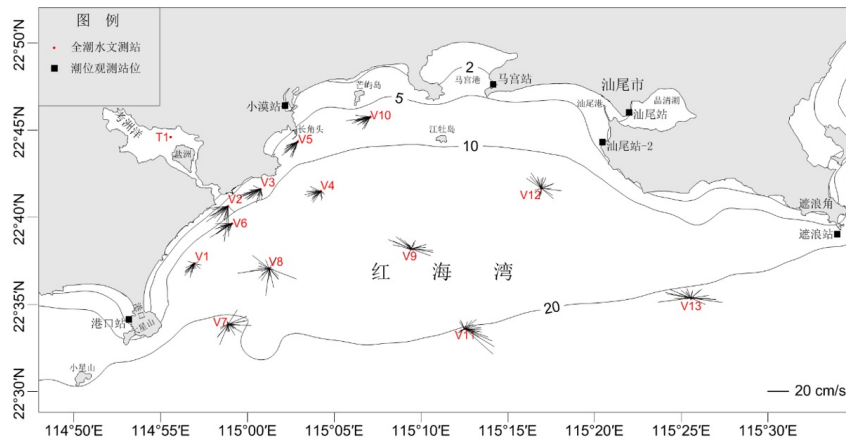


Figure 1. Perpendicular average sea current vector graph during spring tide in summer
图 1. 夏季大潮期垂线平均海流平面分布矢量图

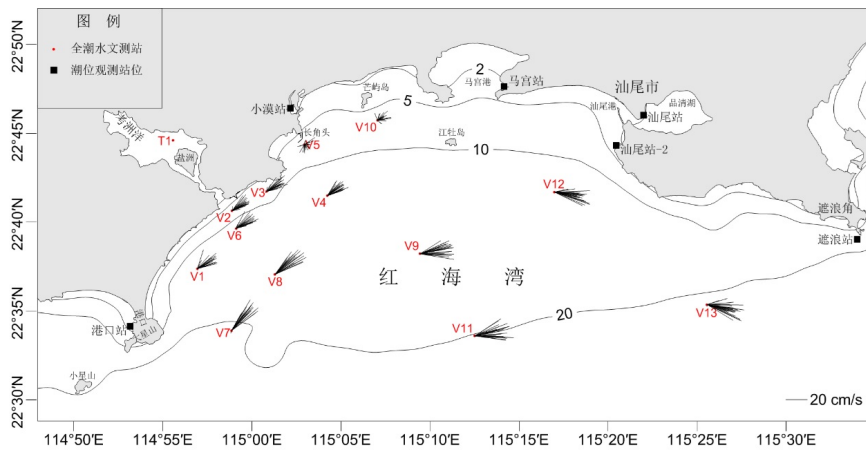


Figure 2. Perpendicular average sea current vector graph during neap tide in summer
图 2. 夏季小潮期垂线平均海流平面分布矢量图

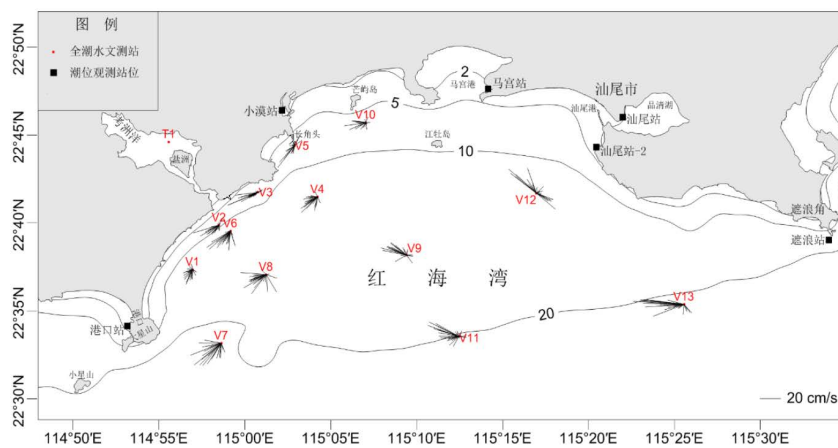


Figure 3. Perpendicular average sea current vector graph during spring tide in winter
图 3. 冬季大潮期垂线平均海流平面分布矢量图

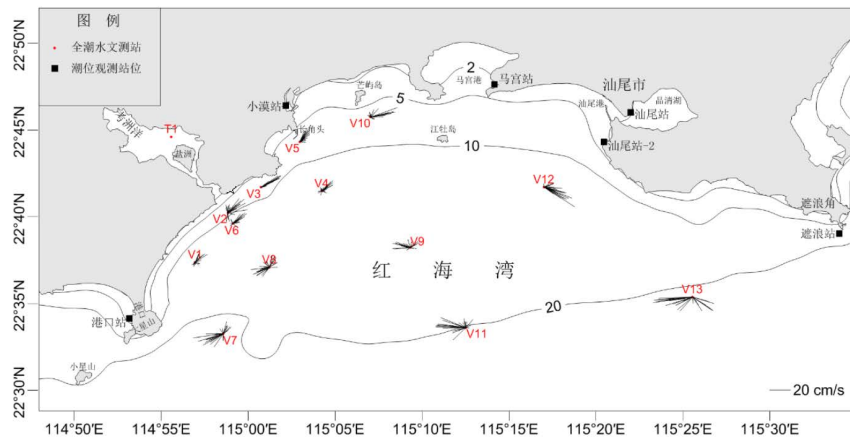


Figure 4. Perpendicular average sea current vector graph during neap tide in winter
图 4. 冬季小潮期垂线平均海流平面分布矢量图

3.1. 控制方程

连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (3.1)$$

运动方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} \\ & = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} \\ & = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3.3)$$

温度输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(h\bar{T}) + \frac{\partial h\bar{u}\bar{T}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{T}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(hD \frac{\partial \bar{T}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hD \frac{\partial \bar{T}}{\partial y}\right) + h\hat{H} + hT_s S \quad (3.4)$$

式中:

t 为时间, x, y 为笛卡尔坐标; η 为水位, d 为静水深, $h = \eta + d$ 为总水深; u 和 v 为 x 和 y 方向的水深平均速度; f 为柯氏力参数, Ω 为旋转角速度, ϕ 为地理纬度; g 为重力加速度; ρ 为水的密度, $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ 为底部应力, $\tau_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$ 为水面风应力, ρ_0 为参考水密度; p_a 为大气压力, \bar{u}_w 水面上空 10 m 处风速; S 为源汇项。

3.2. 模型设置及参数的选取

1) 模型设置

模型计算范围约为 81 km*66 km, 模型计算范围及水深情况见图 5, 计算网格见图 6, 区域内有 51978 个结点, 这些结点将计算区域分成 26653 个互不重合的三角形单元。空间步长最小为 20 m, 最大空间步

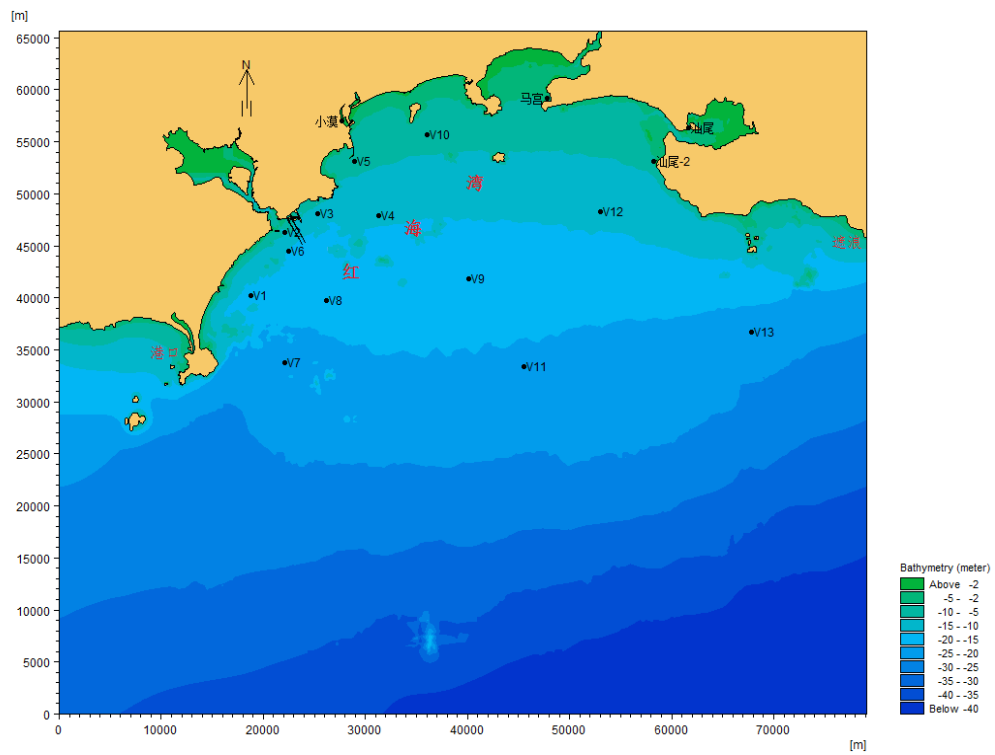


Figure 5. Calculation range and verifying point position
图 5. 数模计算范围及验证点位置图

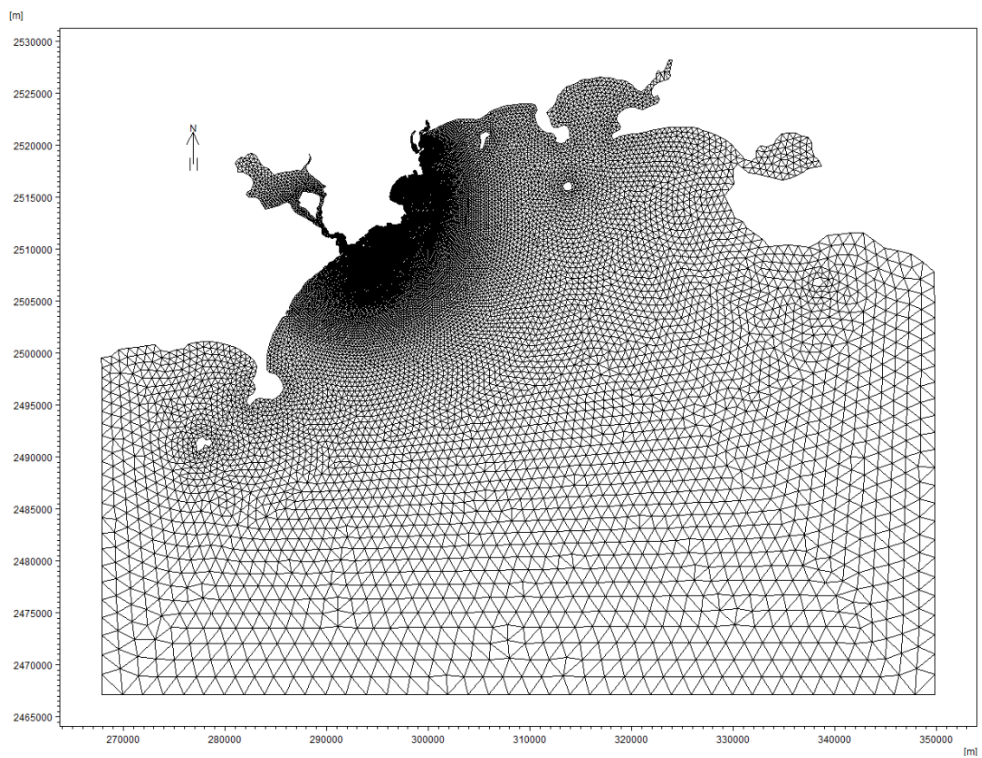


Figure 6. Model computing grid
图 6. 模型计算网格

长约 2 km, 计算时间步长从 0.01~20 s 自动调节。计算范围内的水深及岸线采用中国航海图书出版社出版发行的海图“田尾角至大昆山”。

2) 开边界设置

本研究开边界由南海区域环流预测结果提取得到[6]。因红海湾内流态复杂, 除潮差影响因素外, 还受到环流、局部地形引起的沿岸流等影响, 因此只考虑潮流动力的模型不符合本海域的动力特征。而南海区域环流预测模型充分考虑了季风、温度、盐度等综合因素的作用, 以此作为开边界可以较准确的模拟红海湾海域内的海流。

3) 温度模型参数设置

本次模型研究依据厂址周边的汕尾气象站夏季 7 月和冬季 12 月的实际测量气温、湿度、风速、风向、降雨、蒸发等资料进行计算。

4. 水动力模型验证计算及结果分析

4.1. 模型验证

为了验证海流模型的合理性, 采用 2015 年 7 月与 2015 年 12 月水文观测资料对模型潮位、流速、流向进行了验证。共有 13 个潮流站(图 5 中 V1~V13)和 4 个潮位站(图 5 中小漠、汕尾-2、汕尾、马官)。限于篇幅, 在红海湾内选取一个代表点, 图 7、图 8 为夏季和冬季实测潮位与计算结果的比较, 图 9、图 10 分别为夏季大、小潮和冬季大、小潮代表站位的流速、流向实测与计算结果的比较。可见, 模型计算潮位与实测潮位拟合较好, 流速、流向在连续的变化过程中与实测值比较接近, 流态合理, 模型计算结果与实际测量的变化趋势基本一致, 本研究所建立的海流模型较全面的反映了红海湾海域的流动情况。

4.2. 模拟结果与分析

图 11~14 为夏季大、小潮期间涨急与落急流场。夏季大潮涨急时刻, 涨潮流自红海湾东侧向西进入湾内, 顺岸线逐渐向西, 最后由西侧向西流出红海湾, 计算的流场与实测的流向基本一致。夏季大潮落急时刻, 落潮流则由红海湾西南侧进入湾内, 在湾东部沿东岸线方向流出红海湾, 湾东部的流速大于西部, 计算的流场与实测主流方向基本相符。从流速值分布看, 夏季大、小潮期间红海湾流速分布相同: 湾外的流速均大于湾内, 湾内东部流速略大于西部, 计算的结果与实测值分布趋势也是一致的; 夏季小潮期, 涨急时刻流场表现为涨潮流从红海湾西侧进入, 在湾内顺岸线逐渐向东, 最后从东侧向东流出红海湾; 落急时流向与涨急时相同。流速分布亦相同: 湾外流速大于湾内流速, 湾内西部流动弱于东部。计算的流场和实测流速分布表现为较一致的趋势。

图 15~18 为冬季大、小潮期间涨急与落急流场。大潮期间, 海湾内的海流由东岸西北向流向湾内, 西岸西南向流向湾外, 海湾内的海流呈现逆时针旋转特征。小潮期间, 海湾内的海流由西岸东北向流入湾内, 东岸东南向流向湾外, 海湾内的海流呈现顺时针旋转特征。

从以上夏季和冬季的计算结果来看, 模拟计算所给出的红海湾流场与实测海流分布规律一致, 本模型的计算方法是合理可行的。

5. 温排水数值模拟及其对环境的影响分析

5.1. 预测方案介绍

红海湾内广东太平岭核电项目拟建设 2 台百万千瓦级核电机组, 循环水系统采用直流供水系统, 以厂址周围海水作为冷却水源, 循环冷却水量为 130 m³/s, 取排水温升 7.83°C。工程取水工程及排放口位置见图 19。

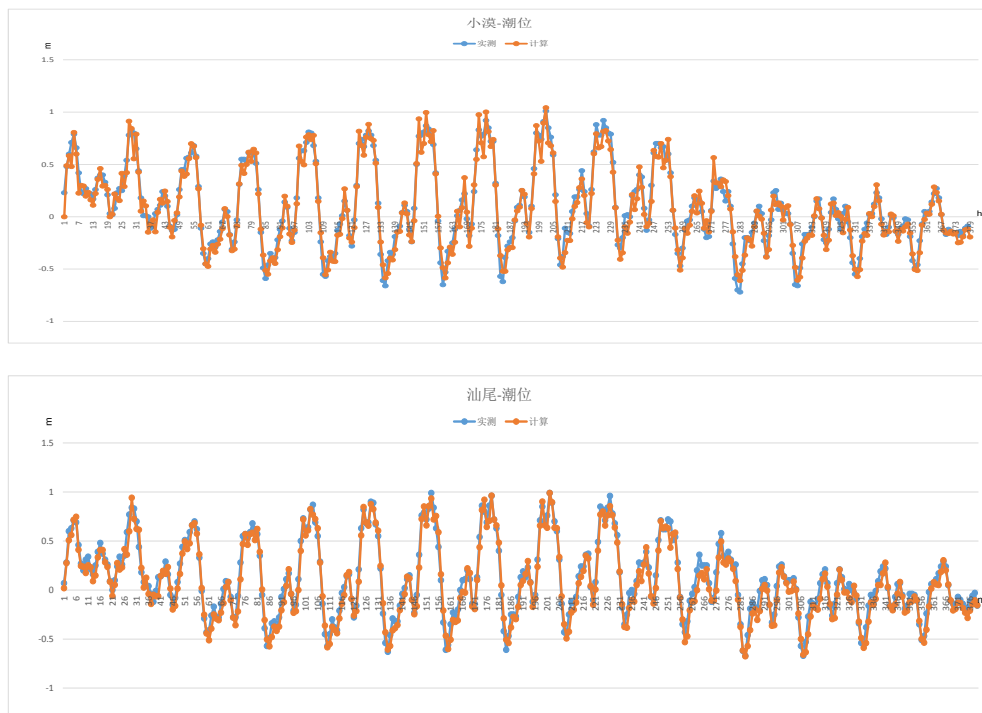


Figure 7. Verification curve of tidal level in summer
图 7. 夏季潮位验证曲线

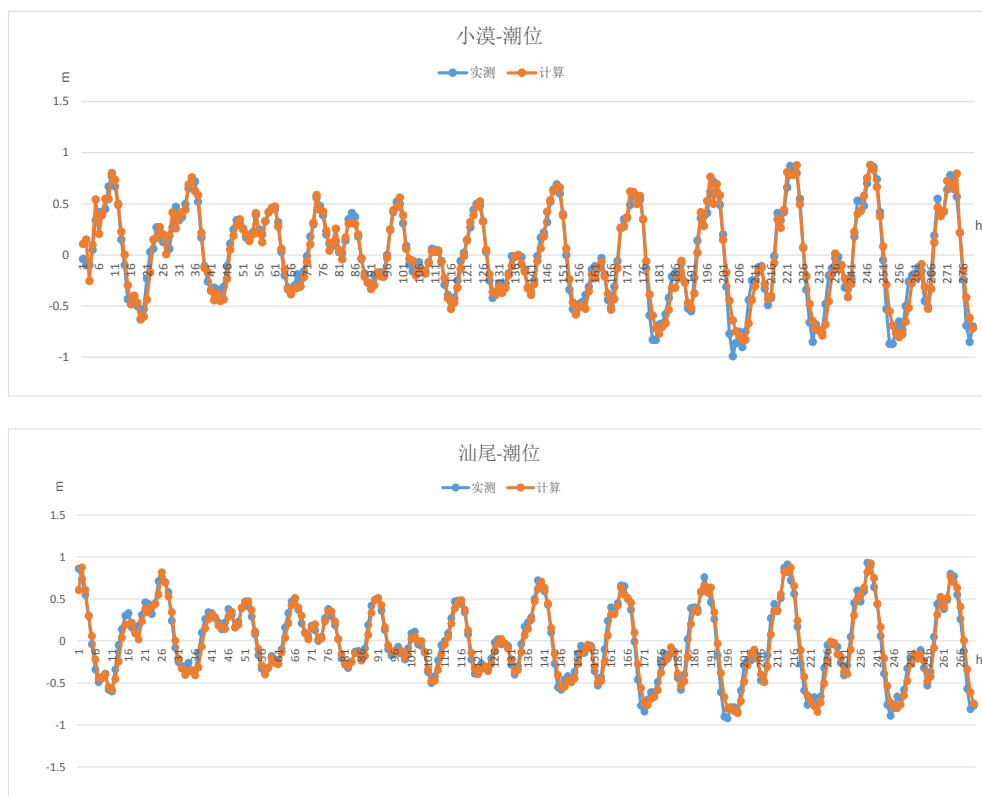


Figure 8. Verification curve of tidal level in winter
图 8. 冬季潮位验证曲线

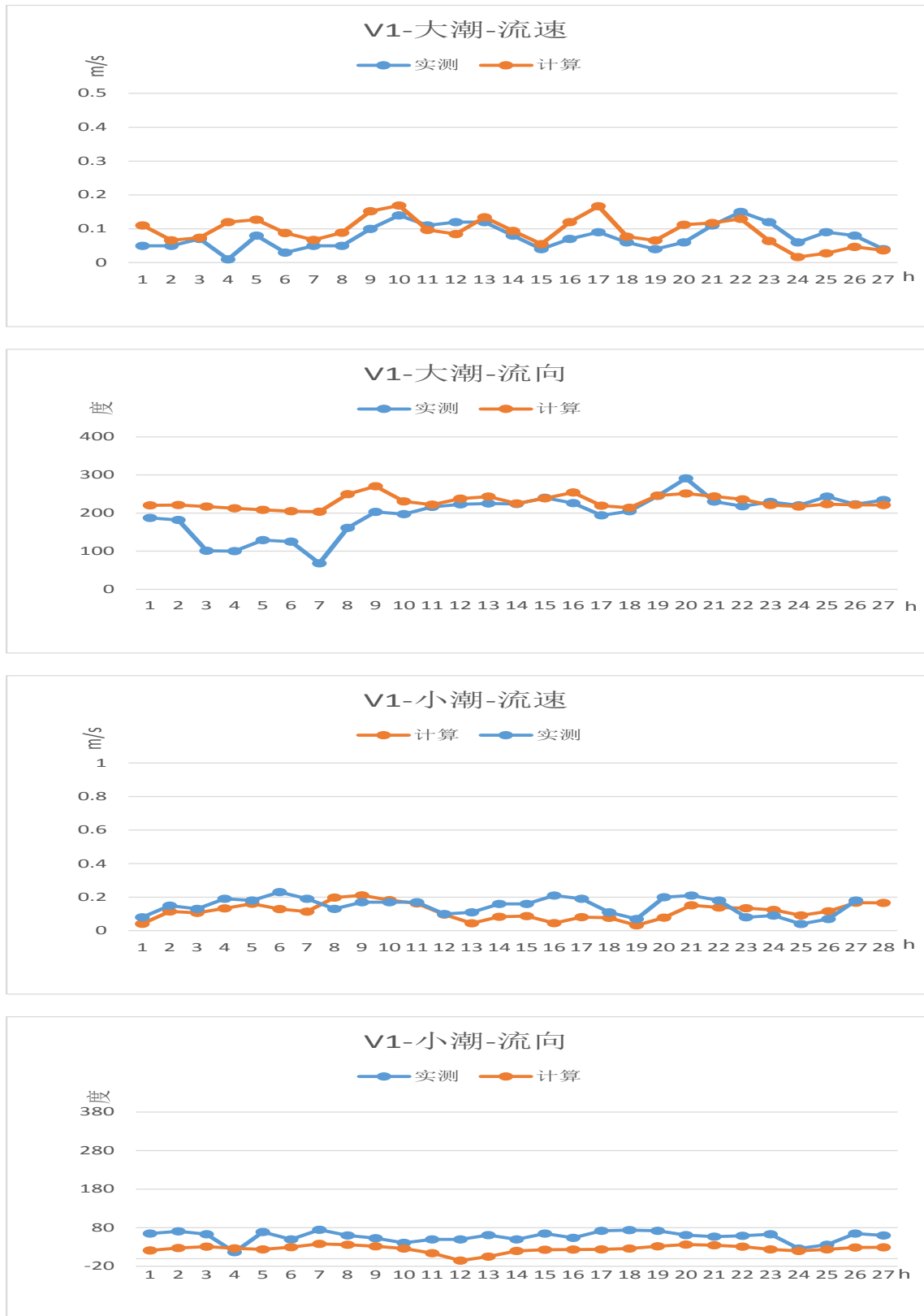


Figure 9. Verification curve of flow velocity and flow direction in summer
 图 9. 夏季流速、流向验证曲线

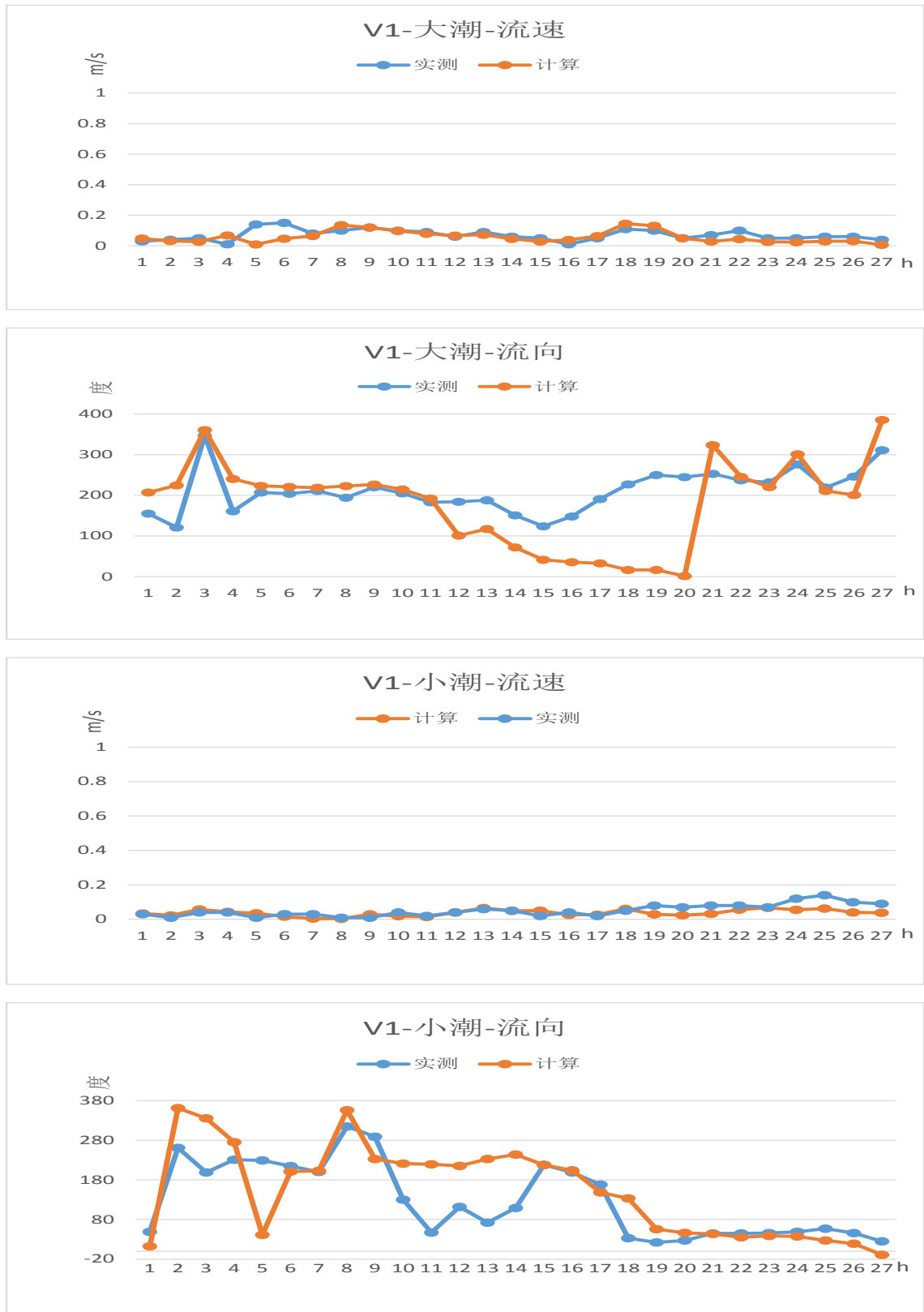


Figure 10. Verification curve of flow velocity and flow direction in winter
图 10. 冬季流速、流向验证曲线

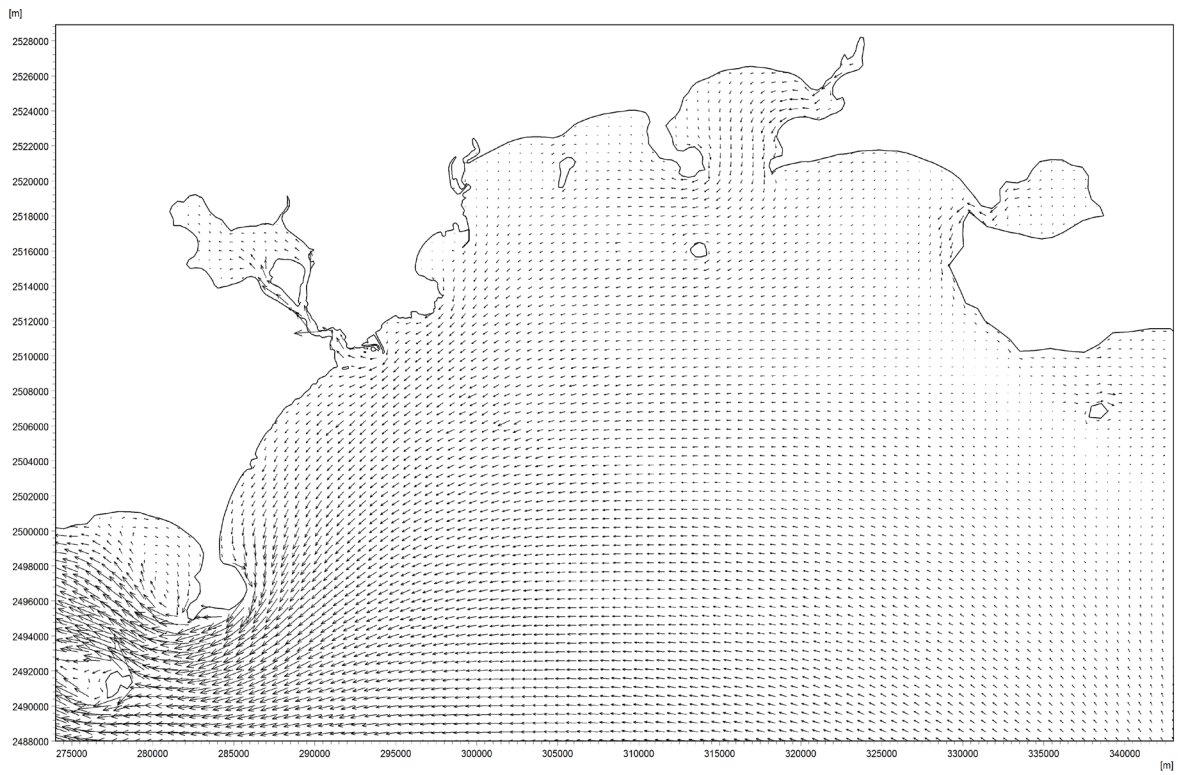


Figure 11. Velocity vector of flood tide at spring tide in summer

图 11. 夏季大潮涨潮流场图

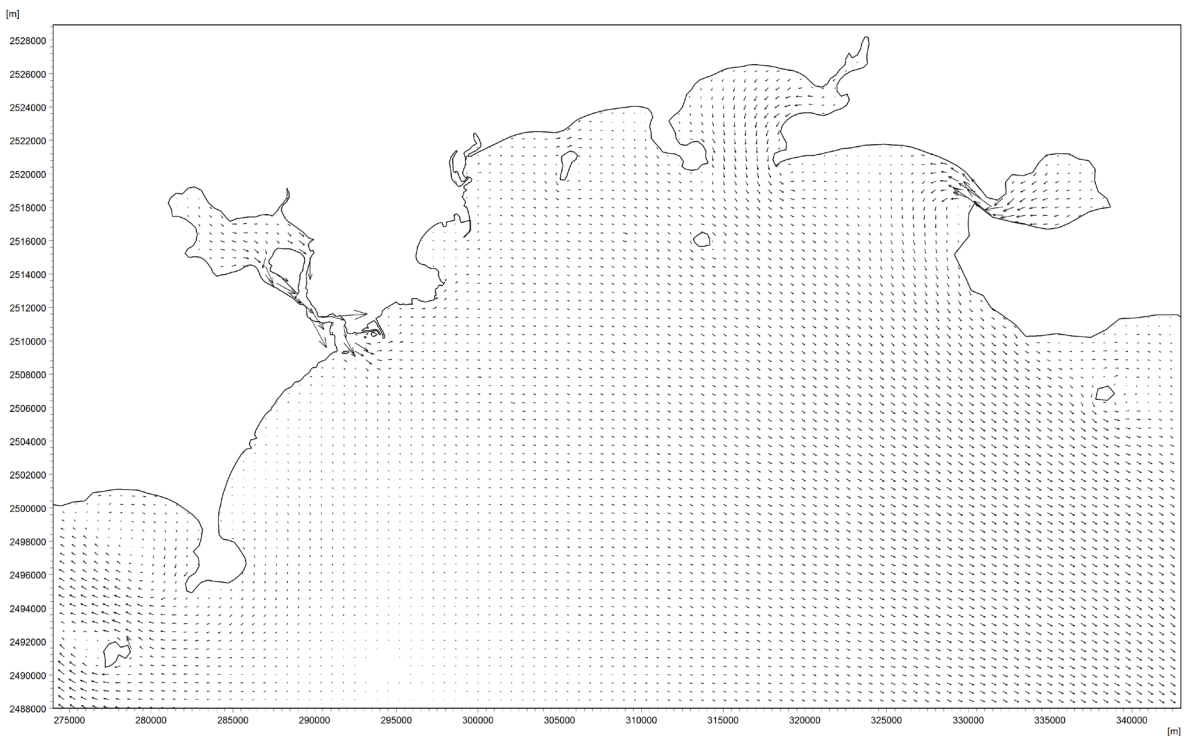


Figure 12. Velocity vector of ebb tide at spring tide in summer

图 12. 夏季大潮落潮流场图

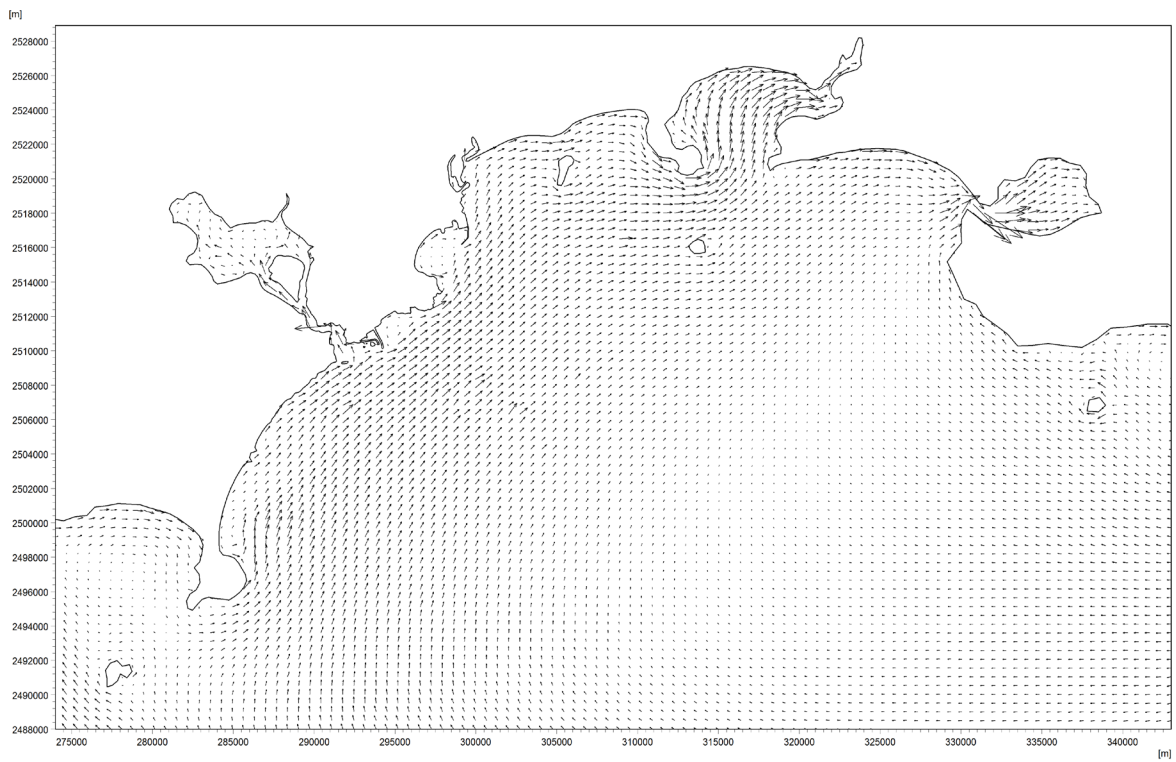


Figure 13. Velocity vector of flood tide at neap tide in summer
图 13. 夏季小潮涨潮流场图



Figure 14. Velocity vector of ebb tide at neap tide in summer
图 14. 夏季小潮涨潮流场图

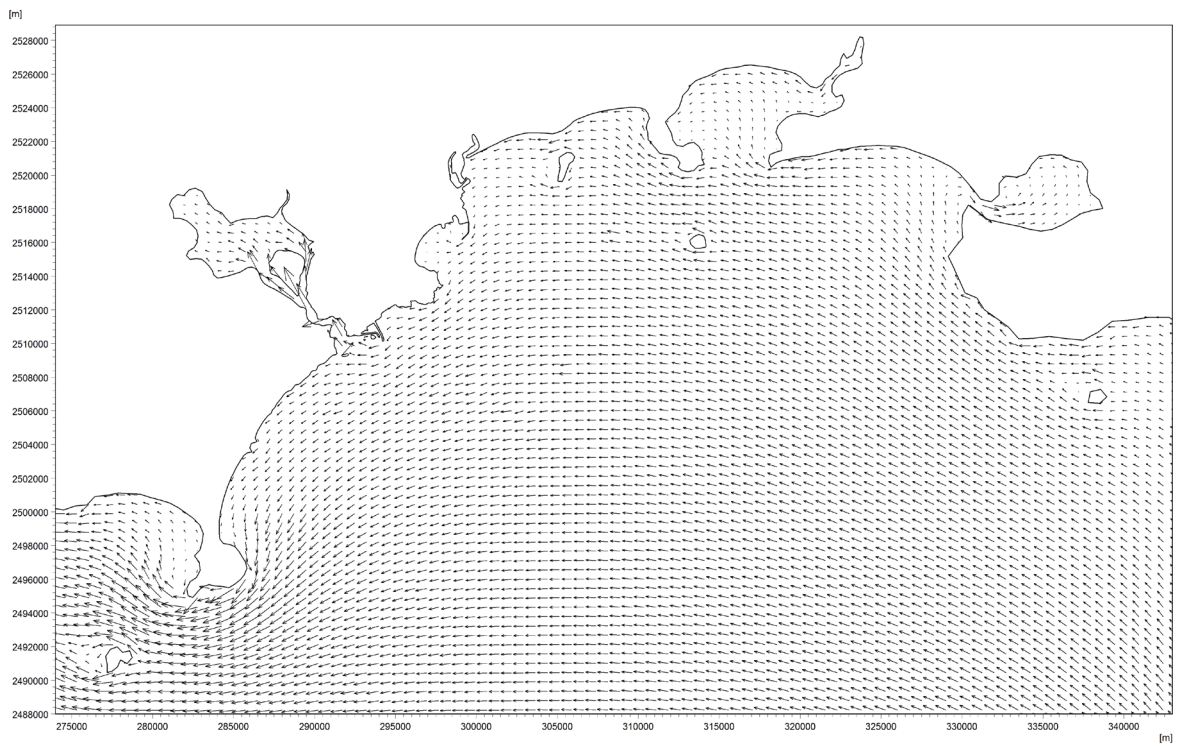


Figure 15. Velocity vector of flood tide at spring tide in winter
图 15. 冬季大潮涨潮流场图

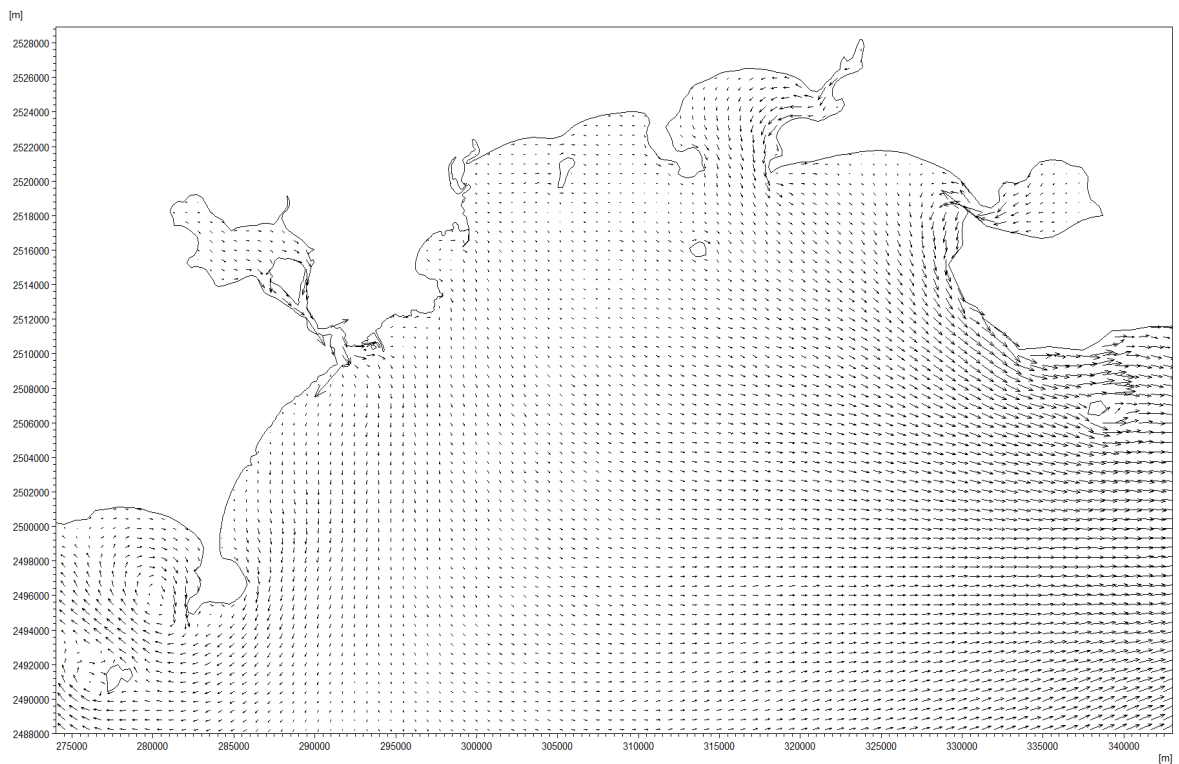


Figure 16. Velocity vector of ebb tide at spring tide in winter
图 16. 冬季大潮落潮流场图

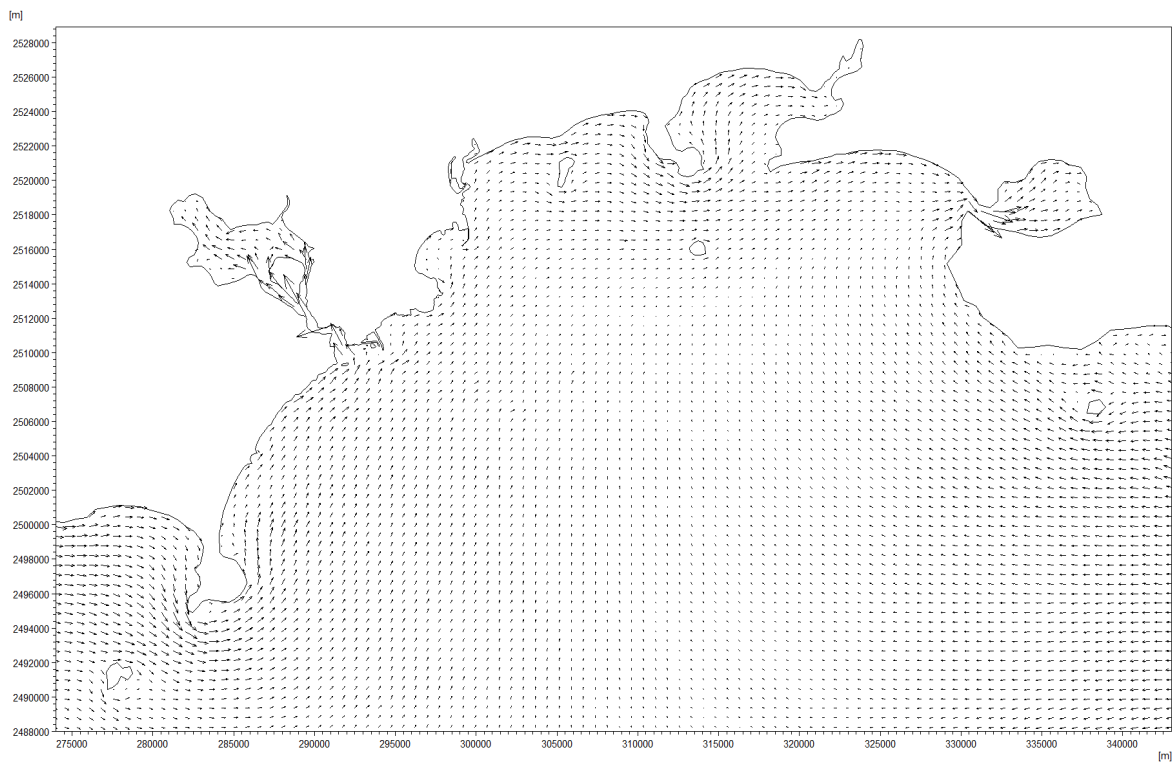


Figure 17. Velocity vector of flood tide at neap tide in winter
图 17. 冬季小潮涨潮流场图

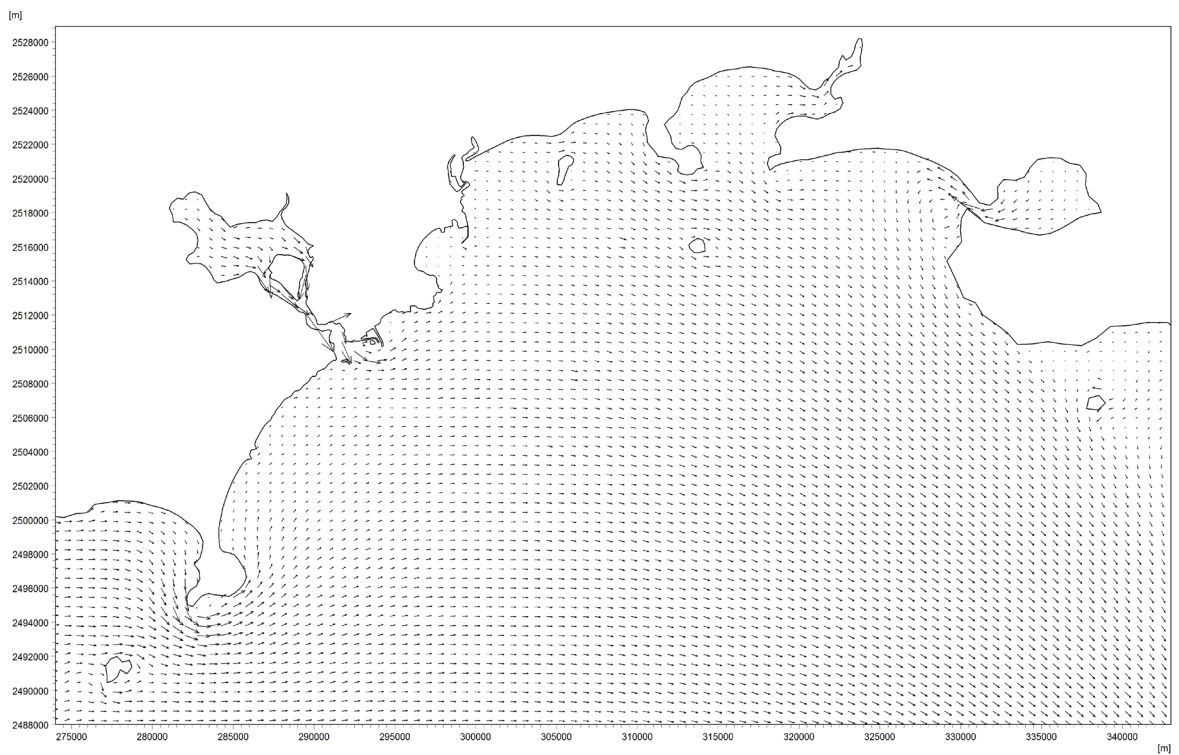


Figure 18. Velocity vector of ebb tide at neap tide in winter
图 18. 冬季小潮落潮流场图

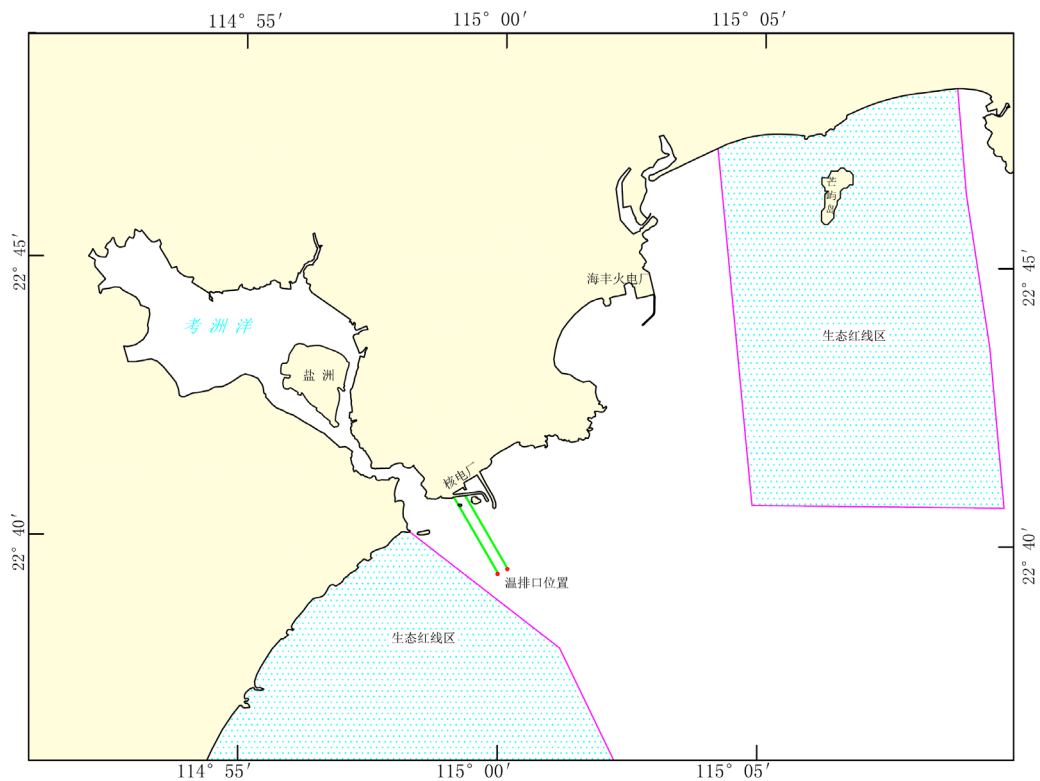


Figure 19. Geographical location of warm discharge and sensitive target map
图 19. 温排口地理位置和敏感目标图

太平岭核电站址东北方向约 7 km 为华润海丰电厂厂址，近期建设 2 台百万千瓦机组，冷却水量为 $72\text{m}^3/\text{s}$ ，取排水温升 7.5°C 。

5.2. 夏季温升计算结果与影响分析

图 20 为夏季全潮最大温升包络线图，表 1 为夏季温升最大影响分布。由图表可见，广东太平岭电厂温排水主要沿东北-西南方向扩散，温升范围主要围绕排水口附近的水域分布，夏季温排水造成的温升超过 1°C 的面积最大约为 77.6 ha，对生态红线区域内造成的最大温升为 0.91°C ，夏季 1°C 最大温升包络位于近岸海域三类环境功能区内，未进入考洲洋和生态红线区。

海丰火电厂温排水主要沿岸边呈南-北向扩散，影响范围主要位于排放口附近的水域，夏季温排水造成的温升超过 1°C 的面积最大约为 335.2 ha，温升超过 1°C 的范围对生态红线区域内造成的最大温升为 0.76°C ，夏季 1°C 最大温升包络位于近岸海域三类环境功能区内，未进入考洲洋和生态红线区。

5.3. 冬季温升计算结果与影响分析

图 21 为冬季温排水全潮最大温升范围包络线图，表 2 为冬季温升最大影响分布。由图表可见，广东太平岭电厂温排水扩散规律与夏季类似，主要沿东北-西南方向扩散，冬季温排水造成的温升超过 2°C 的面积最大约为 27.0ha，对生态红线区域内造成的最大温升为 1.61°C 。冬季温升超过 3°C 的面积最大约为 1.4ha，超过 4°C 的面积最大约为 0.4 ha。冬季 2°C 最大温升包络位于近岸海域三类环境功能区内，未进入考洲洋和生态红线区。

海丰火电厂温排水主要沿岸边呈南-北向扩散，冬季温排水造成的温升超过 2°C 的面积最大约为 455.9 ha，

Table 1. Thermal drainage discharge environmental impact analysis on water environment in summer
表 1. 夏季电厂温排水最大温升对水环境的影响

温升℃ 空间分布	不同温升最大可能影响面积(ha)			
	≥4.0℃	≥3.0℃	≥2.0℃	≥1.0℃
太平岭核电厂	--	--	6.2	77.6
海丰火电厂	1.4	12.9	170.4	335.2

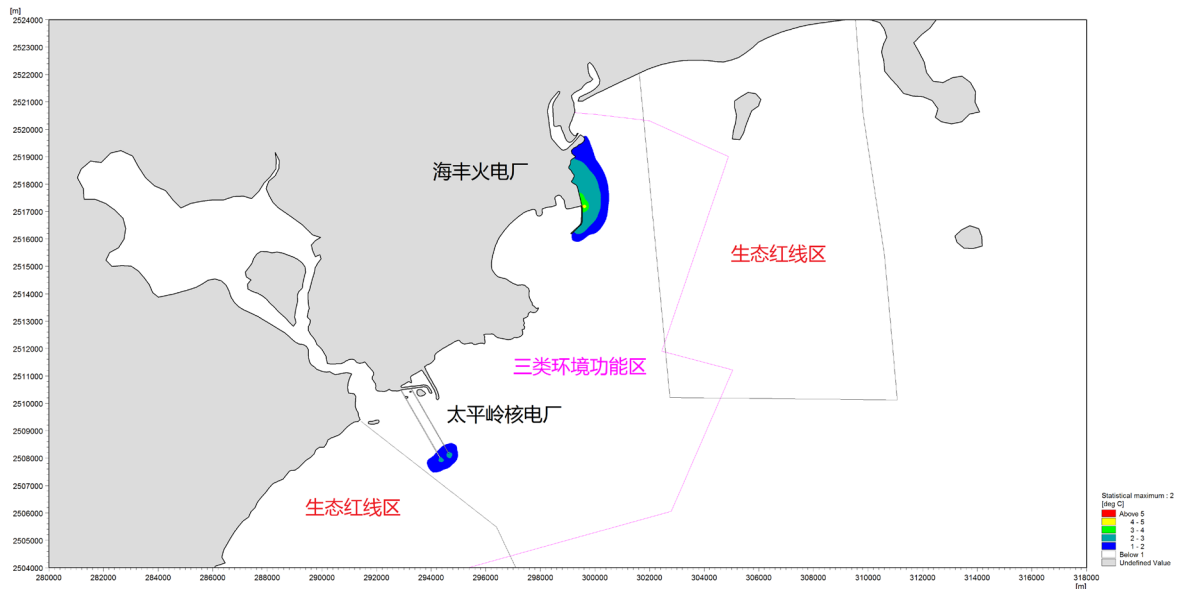


Figure 20. The influence range of the maximum temperature rise of the whole tide in summer
图 20. 夏季全潮最大温升包络影响范围

Table 2. Thermal drainage discharge environmental impact analysis on water environment in winter
表 2. 冬季电厂温排水最大温升对水环境的影响

温升℃ 空间分布	不同温升最大可能影响面积(ha)		
	≥4.0℃	≥3.0℃	≥2.0℃
太平岭核电厂	0.4	1.4	27.0
海丰火电厂	128.6	173.1	455.9

对生态红线区域内造成的最大温升为 1.95℃，冬季温升超过 3℃的面积最大约为 173.1 ha，超过 4℃的面积最大约为 128.6 ha。冬季 2℃最大温升包络位于近岸海域三类环境功能区区内，未进入考洲洋和生态红线区。

5.4. 温排水对海洋环境的影响

综上所述，红海湾内电厂温排水主要受风、海流等动力作用，在排水口附近海域输移扩散，形成一定区域的温升区域。温排水扩散区域及形态基本上与海流特征一致，太平岭电厂温升包络主要呈东北和西南向扩散特征，海丰电厂温升包络主要呈南北向顺岸扩散，向外海的扩散相对较弱。夏季 1℃和冬季 2℃最大温升包络位于近岸海域三类环境功能区区内，未进入考洲洋和生态红线区。

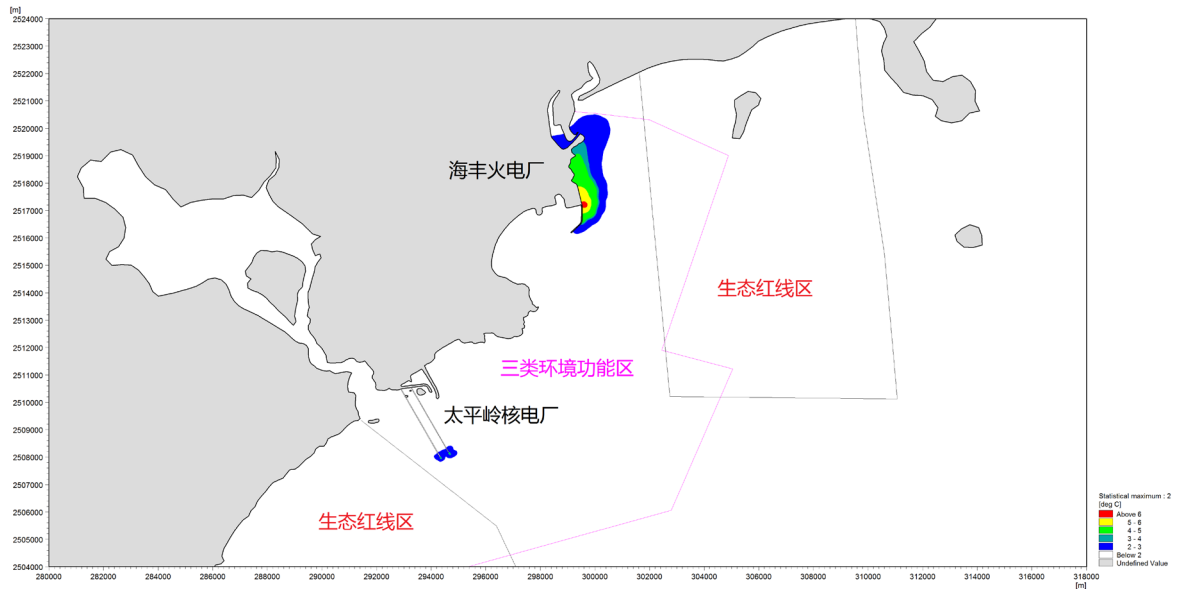


Figure 21. The influence range of the maximum temperature rise of the whole tide in winter
图 21. 冬季全潮最大温升包络影响范围

6. 结论

通过对红海湾的海流观测资料进行分析，并进行了红海湾二维海流与温排水数值模拟，主要得到以下结论：

1) 红海湾海流符合南海海域的总体特征：潮差小，潮流弱，流态复杂，季节差异性大。红海湾海流除潮差影响因素外，还受到环流、局部地形引起的沿岸流等影响。

2) 红海湾二维海流数值模拟开边界由南海区域环流预测结果提供是合理的。南海区域环流预测考虑了季风、温度、盐度等综合因素的作用，计算结果与实际测量结果一致。

3) 红海湾在夏季和冬季以及不同潮型情况下的流态差异较大，测量及计算应分别考虑不同季节(至少夏季和冬季)、不同潮型的情况。

4) 红海湾内电厂温排水主要受风、海流等动力作用，温排水扩散区域及形态基本上与海流特征一致。太平岭电厂温升包络主要呈东北和西南向扩散特征，海丰电厂温升包络主要呈南北向顺岸扩散，向外海的扩散相对较弱。夏季 1℃和冬季 2℃最大温升包络位于近岸海域三类环境功能区内，未进入考洲洋和生态红线区。

资金项目

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS160227, TKS160209)。

参考文献 (References)

- [1] 何琦, 魏泽勋, 王永刚. 南海北部陆架陆坡区海流观测研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 17-28.
- [2] 苏纪兰. 南海环流动力机制研究综述[J]. 海洋学报, 2005, 27(6): 1-8.
- [3] 黄企洲, 王文质, 李毓湘, 等. 南海海流和涡旋概况[J]. 地球科学进展, 1992, 7(5): 1-9.
- [4] 胡筱敏, 等. 广东太平岭核电厂一期工程四季典型全潮观测[Z]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2016.
- [5] MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. 2016.
- [6] 刘爱珍, 等. 中广核广东太平岭核电厂一期工程排水头部优化报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2017.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5485，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org