

大亚湾玻沙山岬角动力特征及温排水输运分析

倪培桐^{1,2,3}, 陈卓英^{1,2,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510630; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510630;
3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510630)

摘要: 近岸地貌单元形成的复杂动力结构对于物质输运及工程方案布置有重要意义。本文建立了大亚湾玻沙山水域温排水数学模型, 对大亚湾平海电厂冷却水输移扩散进行模拟计算, 对比分析了南排与北排、南取与北取、深排与浅排等布置形式在本工程中的适宜性。结果表明: 电厂防波堤、湖头角及玻沙山岬角对烟囱湾的屏蔽作用是南排北取方案废热窝积的原因, 且使管排深排方案的取水温升比明渠浅排高 0.21℃; 规划碧甲港在地貌上形成了电厂区域的双峡口单元, 动力上形成两个双向射流结构, 加剧了南排方案热水窝积, 而对北排方案带来取水温升降低 0.2~0.3℃的效益; 取排水工程布置方案选择宜考虑工程区岸线远期规划调整趋势。

关键词: 岬角动力过程; 取排水口布置; 岸线规划; 温排水数学模型; 温排水输运

中图分类号: TV148.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0150-08

Analysis on dynamic characteristics and transportation of cooling water of Boshashan headland in Dayawan Bay

NI Peitong^{1,2,3}, CHEN Zhuoying^{1,2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510630, China;

2. Hydrodynamic Research Key Lab of Guangdong Province, Guangzhou 510630, China;

3. State-province Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510630, China)

Abstract: The complex dynamic structure formed by the nearshore topography is of great significance to the water transport and the layout of the project. In this paper, the mathematic model was established to simulate the transportation of cooling water and the layout of the cooling water drainage port in Dayawan Bay. We also compared and analyzed the suitability of different arrangements such as south arrangement and north arrangement, south water intake and north water intake, deep arrangement and shallow arrangement. The results show that the shielding effect of the breakwater, the headland of the Hutoujiao and the Boshashan headland on the Yancongwan bay is the reason for the waste heat accumulating in the first scheme, and the temperature rise of the drainage scheme is 0.21℃ higher than that of the open channel. Bijia Port form two mouth topography and the two jet structure, which increase thermal pollution area in the first scheme, and is beneficial to the second scheme with temperature decrease of 0.2~0.3℃, and the coastline long-term planning in project zone area should take into account the drainage project layout.

Key words: Headland dynamic process; layout of the cooling water drainage port; coastline planning; transportation of cooling water; transportation of cooling water

滨海直流火、核电厂采用海水作为冷却水源, 其排出的废热, 一方面影响海洋环境, 另一方面会进入取水口, 降低电厂冷却效率。对于电厂取排水工程而言, 温排水的输运预测是滨海火核电厂设计过程中的重要专题, 通过研究海区动力结构及温排水在

海区的扩散规律, 可优化取、排水口工程布置方案^[1-5]。电厂建成投产将带动区域的经济的发展, 而就近布置的工业往往占用电厂附近岸线及水域, 改变了岸线形态。当岸线调整的范围过大时, 将引起工程附近小尺度水动力结构的变化, 违背电厂取、排

收稿日期: 2017-04-05; 修回日期: 2017-05-23

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2016-12)

作者简介: 倪培桐(1971-), 男, 山东泰安人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 环境水力学、河口水力学。

水口工程平面布置的设计原则,可能影响电厂的取、排水工程正常运行,造成不必要的经济损失,因此区域岸线远景规划是取、排水口工程布置的一个重要影响因素。

基岩岬角是典型的滨海地貌单元,由于具有良好的地质条件、航运条件,基岩岬角多成为大型滨海工程(如港口、火/核电厂)的优选厂址。岬角与潮流作用下往往形成复杂的动力结构,影响水体的输运过程。

广东平海电厂选址于大亚湾玻沙山岬角,于2011年建成投产,到目前为止运行良好。结合温排水专题成果^[6],本文详述了方案比选过程,分析取、

排水口工程平面布置的原则,为类似电厂取、排水口设计及海洋环境管理提供决策参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域

大亚湾位于粤东珠江口以东海域,湾内中部沿南北方向排列着众多岛屿(即中央列岛)。以列岛为界,将大亚湾大致分成两部分,分别称为东、西大亚湾,研究区域位于东大亚湾湾口,湾内水下地形由北向南逐渐变深,湾口处水深可达20 m以上,工程附近水域离岸2 km处水深约4~8 m(图1)。玻沙山南侧、港口附近是海龟自然保护区。

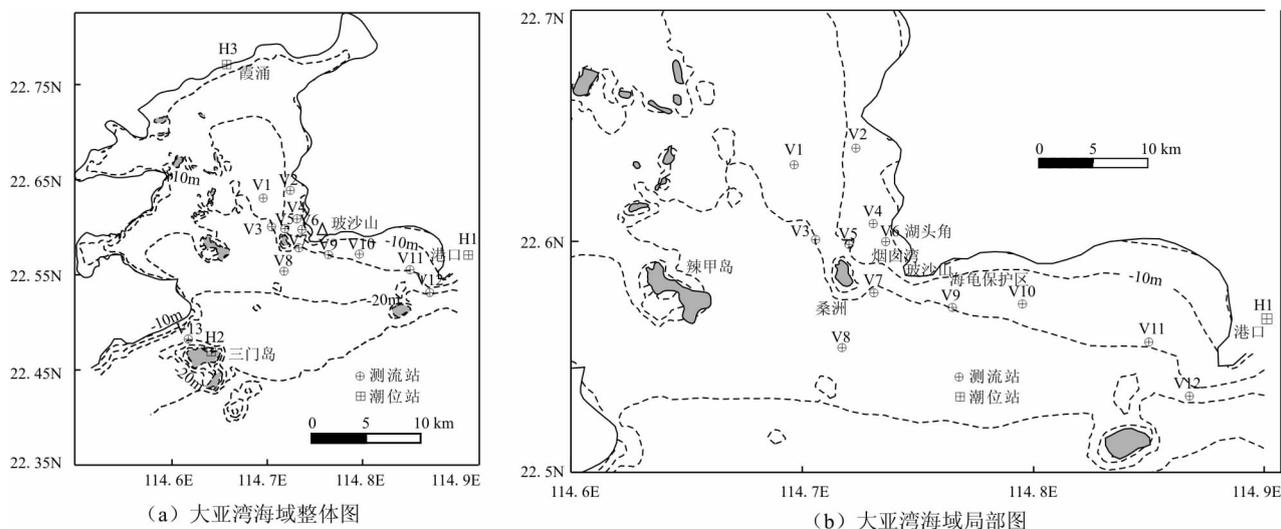


图1 大亚湾海区地形图

研究海域的潮汐属于不规则半日混合潮,潮汐性质 F_1 在 1.71~2.03 之间。西涌、三门岛和港口站的最高潮位为:78~87 cm(珠基,下同);最低潮位为:-145~-141 cm,海域潮差呈现北高南低的分布特点。海区的潮流性质基本上为不正规半日潮流,主要分潮流中以 M_2 半日分潮流为主, S_2 、 O_1 、 K_1 、 M_4 和 MS_4 的量值彼此大体相当。主要分潮流的椭圆长半轴方向与等深线走向基本一致,潮流主要为略带旋转的往复流。

1.2 基础资料

水文数据采用中国科学院南海海洋研究所2005年7月观测资料^[7],共布设了3个潮位测站、13个测流站(图1)。测流期间港口站实测大潮潮差为1.1 m,小潮潮差为0.64 m,属于中等偏小的潮型。

海区水下地形图采用海图,工程近区水下地形图采用实测的地形图。

1.3 工程方案

电厂排、取水口布置共3类方案(图2)。南排北取方案(方案1):引水明渠与厂区的北面岸线平行,长约680 m,渠底高程为-8.0 m,明渠引水口位于厂区西北角,引水口至港池开挖一条60 m宽的深槽(底高程-8.0 m)。排水系统采用6条3.8 m×3.8 m涵管的管排方式,排水出口管底高程为-4.0 m。排水出口位于厂区南端,左、右两侧分别设置有导流堤和港池的防波堤。方案1有两种排水口布置方案:岸边近排(方案1A)和管道远排(方案1B,距离方案1A排水口约800 m。)

方案2(北排南取):引水明渠布置在厂区南侧,与岸线平行,取水口设置在方案1排水口位置,尺寸与方案1A相同。排水口布置在厂区北侧,位于方案1取水口的位置,排水口设置有一导流堤,排水口底宽60 m,底标高-4.0 m。

方案3(北排北取)采用明渠取水、排水,取、排

水口均位于电厂北侧。

电厂所在区域为碧甲港区,港区规划岸线布置见图2。

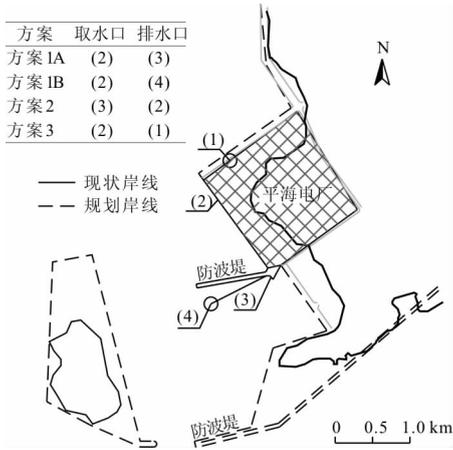


图2 工程布置方案图

1.4 数学模型

在取、排水口工程方案比选问题的研究中一般采用数学模型和物理模型的方法,平面数学模型以其速度快、经济便宜一直为电厂取、排水工程比选研究所采用。

1.4.1 控制方程 在笛卡尔坐标系下,平面二维温排水数学模型控制方程如下:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + fv + \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - \frac{g}{C^2} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} u + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - fu + \frac{\tau_{sy}}{\rho H} - \frac{g}{C^2} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} v + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{KT}{\rho C_p H} + \frac{1}{H} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(H E_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H E_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) \quad (4)$$

式中: u 、 v 分别为 X 、 Y 方向的流速分量; $H = h_0 + \eta$, 其中 h_0 为基准面以下的水深, η 为水位; ε 为涡动粘性系数; f 为科氏力系数; T 为温升; K 为水面综合散热系数; C_p 为水体的等压比热; E_x 、 E_y 为湍流热扩散系数; τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为 X 、 Y 方向的风应力分量。

1.4.2 初始边值条件及计算方法 初始条件流速、水位、温升取值为0。开边界给定潮位过程线。在

电厂排、取水口,给定排、取水流量和温升。

采用建立在三角形单元网格上的破开算子有限元法进行离散求解,采用自编程序,模型已经成功地应用到三百门电厂、海门电厂、惠来等多个电厂冷却水工程问题的研究中^[8-10]。

1.5 模型建立与验证

根据实测海流的流向及大小,模型东边界包括港口在内,西边界在西涌湾附近。南边界定在厂址以南约37 km之处,北面包括整个大亚湾水域。模型范围可满足流场模拟及温排放计算的要求,即电厂温排水的热量尽可能不被潮流直接带出开边界,以尽量保证热量的累积效应与原体相似,使计算结果不受开边界的影响。模型开边界上水位的确定均根据附近潮位站实测资料,经反复调试后使各主要验证点的潮位和流速满足模型计算要求。模型糙率取值为 $n = 0.02$, 离散系数 E 取值为 $5 \text{ m}^2/\text{s}$, 水面综合散热系数约取值为 $47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

验证过程详见文献[6],部分测站流速及流向的模型验证结果见图3,三门岛、港口和霞涌3个测站潮位的模型验证结果见图4。结果表明小、大两种潮型的计算潮位过程线与原型曲线都基本吻合,少数潮时模型与原体有些偏离,但幅度不大,对整个流场不会产生大的影响。计算区域内整体流势与原体实测潮流符合良好,表明本模型能较好地反映原体潮流运动特征,模型计算流场与原体流场基本相似。研究区域的涨落潮流以往复流为主,涨潮流自外海以西北向进入湾内,落潮流则相反,烟囱湾受玻璃沙山和湖头角的屏蔽作用为低流速区,其典型流场形态见图5。

2 结果与讨论

2.1 温排水扩散输运分析

(1) 南排北取方案1的两个方案仅是排水口位置和形式不同。方案1A排水口就位于该区东北角防波堤与陆地边界交角处。排水明渠出口动量小,排水口排出的温水主要靠潮流动力输运和扩散。涨潮时,温排水沿防波堤前行向北推移,在潮流作用下北上热水进入港池,使港池产生热量累积,直至取水口,影响取水水温,同时大量热水向烟囱湾这一弱潮流区扩散并窝积。落潮时,随涨潮流北上热水部分经主流通道退出湾外,部分回归港区。

由于烟囱湾是低流速区,从排水口排出的热水在落潮流的作用下,于湾内缓慢输运扩散,并沿玻璃沙山角退出湾外。从等升温线图上看(图6),由于电

厂防波堤的修建,不仅扩大了烟囱湾的弱潮流区,而且形成新的弱潮区,方案 1A 小潮时取水温升为 1.24~2.51℃,全潮平均为 1.88℃,表明南排北取排水口布置方案不能有效地利用潮流通道向远处输送热水。

方案 1B 排水口虽然用涵管向外引 800 m,但排水口仍然处于弱潮流区,温排水只能在排水口四周扩散,受潮流通道水流挤压,热水仍然在烟囱湾内窝积,导致该水域温升升高,虽然高温区因排放口位置的移动而有所变化,等温线形状也相应变化,但总体热影响改善不大。方案 1B 取水温升比方案 1A 高

0.21℃,这是因为温排水经潮流通道向北进入港池,使港池温度升高。方案 1B 虽然对烟囱湾环境热影响有所减轻,取水温升却有所升高,两者比较,方案 1B 并非最优方案。

(2)北排南取方案(方案 2)排水口位于厂区北部,排水口外水面宽阔,有利于温水进入主流区,从而减轻近区的热量累积。电厂温排水呈扇面的形态扩散输运,温度场随涨落潮流变窄或变宽,但幅度不大。涨潮时,排水口排出的温水随潮流北上,0.5℃等超温线可以到达云头角以北约 2 km 处;落潮时,从厂址以北回落的二次温水及排水口排放出的温水

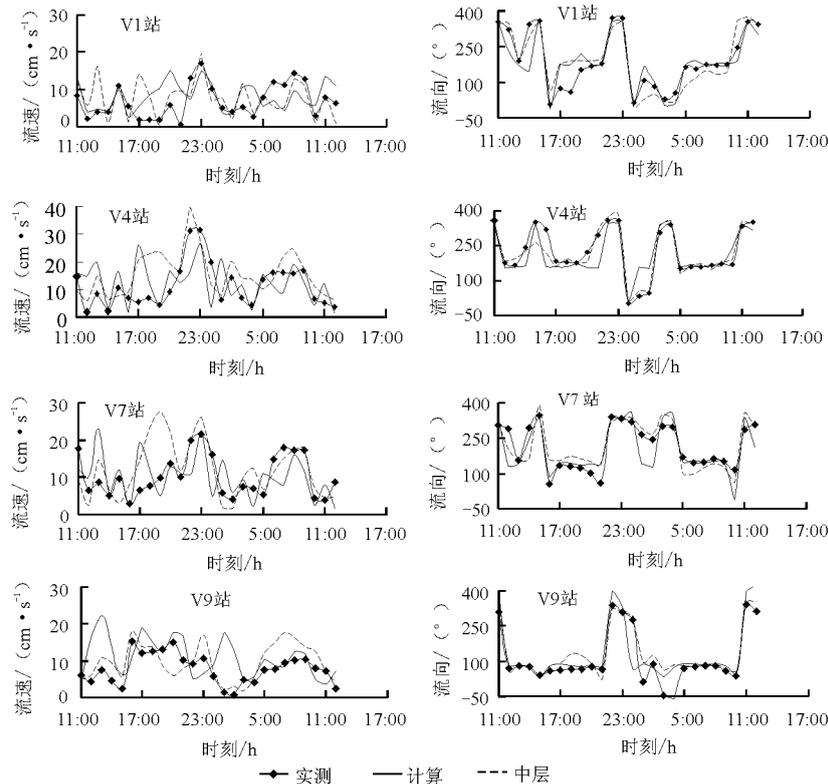


图 3 部分测站流速及流向模型验证结果

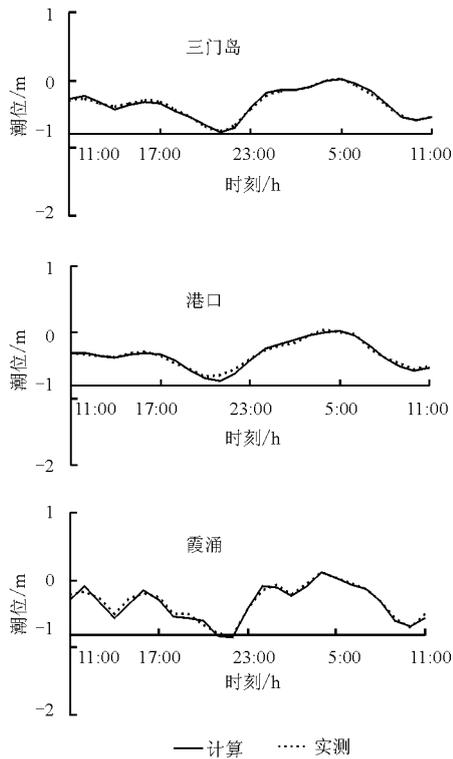


图 4 3 个测站潮位模型验证结果

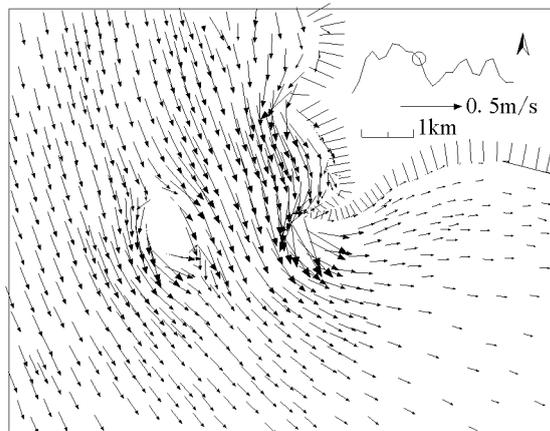
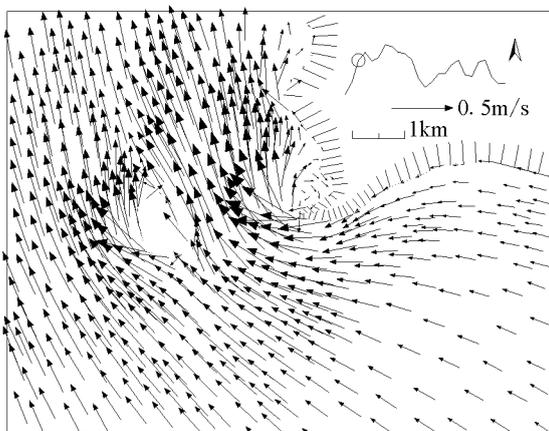


图 5 典型涨急、落急流场

随落潮流向南输送,部分水温受防波堤的作用,在防波堤以北回流作用下进入港池。流经烟囱湾后,温水随潮流(主流偏向桑洲岛)继续往南流出大亚湾口,向东南方向扩散。 1°C 以上影响面积小潮时约 35.56 km^2 ,大潮时面积约 29.42 km^2 。小潮温升面积大于大潮,这与潮流强弱的作用有关。总的看来,温水基本能随潮扩散,不存在明显的温水窝积现象。同时取水温升过程线相对比较平坦,大潮涨幅稍小于小潮,符合潮流作用下的温排水运动规律。大潮时取水温升为 $0.65\sim 1.61^{\circ}\text{C}$,全潮平均为 1.11°C 。小潮时取水口温升为 $1.31\sim 1.68^{\circ}\text{C}$,全潮平均为 1.52°C 。

(3)北排北取方案(方案3)排、取水口位于厂区北部。电厂温排水扩散形态及随潮变化过程与方案2类似,等温升线呈扇状的形态变化扩散运输。

由于方案3排水口位置较方案2偏东,温水更容易在岸边累积,小潮期间平均取水温升比方案2高 0.88°C ,升幅达 51% ,表明存在取水短路现象。

2.2 讨论

华南沿海广泛存在小尺度地貌动力结构^[11],大亚湾核电区域岬角引起的动力结构与温排水运输相关性明显^[12]。方案1管道深排较明渠浅排取水温升效果差与近岸小尺度地貌动力结构及其输作用有关。本项目附近区域地貌形态复杂,从 0.5°C 温升线分布形态看,空间尺度 $103\sim 104\text{ m}$ 范围内的地貌动力结构对本项目取排水工程方案比选的影响较大,这些地貌单元有玻沙山岬角、电厂防波堤、烟囱湾弧形海岸、桑洲岛等。玻沙山岬角与湖头角之间的烟囱湾是天然形成的低流速区,电厂及防波堤伸出海岸近 1.8 km ,其效应相当于使湖头角向海突

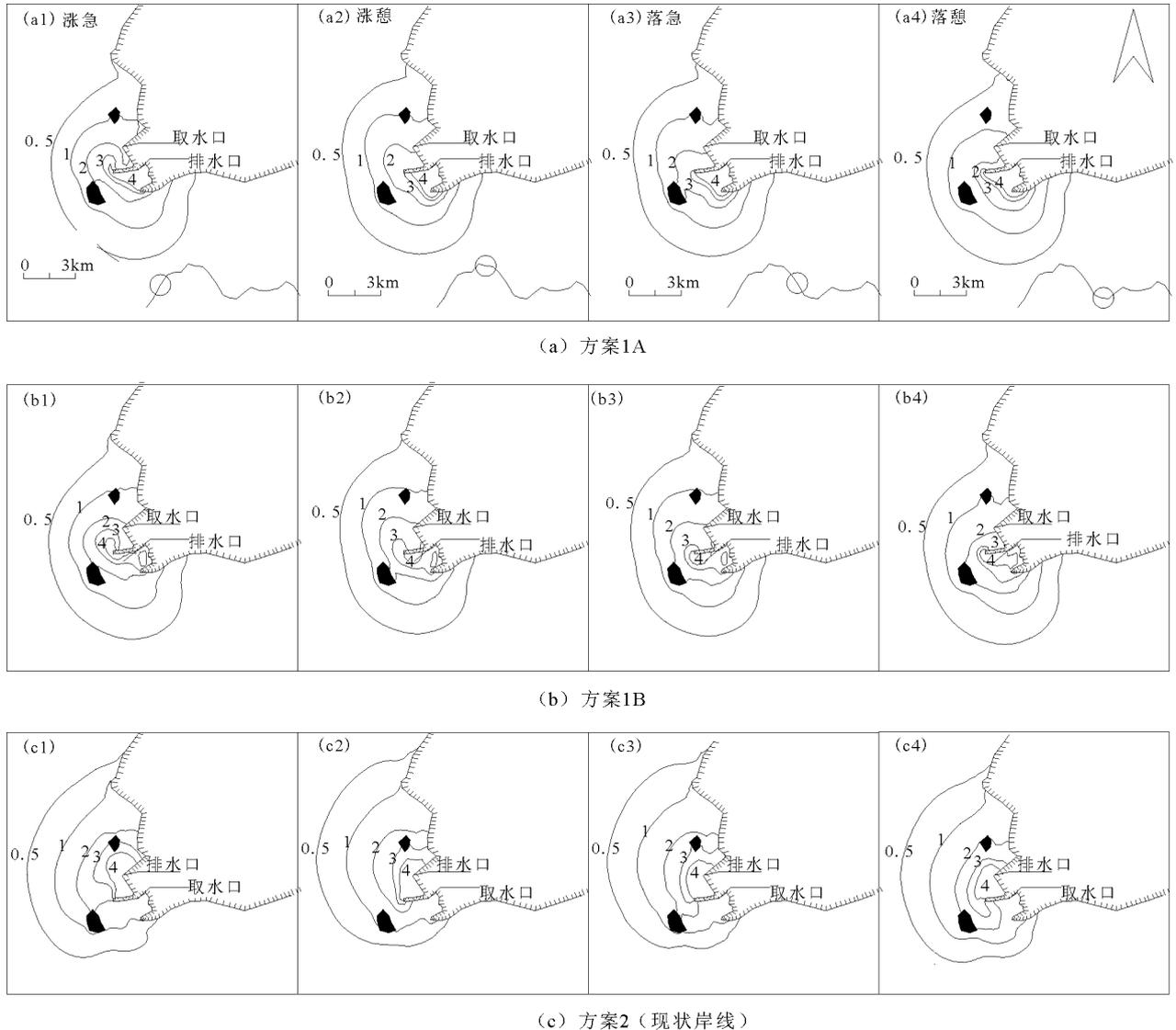


图6 不同取排水方案等温升线(单位: $^{\circ}\text{C}$)

表1 温升面积与取水温升统计

序号	方案	碧甲港 远景规划	潮型	潮平均温升面积/km ²					取水温升/°C		
				>4°C	>3°C	>2°C	>1°C	>0.5°C	最大	最小	平均
1	1A	不考虑	大	1.31	1.97	6.46	25.08	57.90	2.22	1.32	1.67
2	1A	不考虑	小	1.60	2.39	8.05	29.60	63.78	2.51	1.24	1.88
3	1A	考虑	小	2.52	3.37	11.21	32.62	63.18	3.04	1.65	2.32
4	1B	不考虑	小	1.16	2.53	9.54	29.39	64.64	2.81	1.63	2.09
7	2	不考虑	大	0.87	2.23	7.42	29.42	63.53	1.61	0.65	1.11
10	2	不考虑	小	1.20	3.04	11.09	35.56	69.73	1.68	1.31	1.52
11	2	考虑	大	1.04	2.82	10.36	28.65	62.99	1.03	0.64	0.81
12	2	考虑	小	1.19	3.01	15.07	30.01	60.89	1.38	1.14	1.25
13	3	不考虑	小	1.80	3.44	12.12	34.97	64.71	3.40	1.85	2.40

出长度增大,增强了湖头角和玻沙山对烟囱湾的屏蔽作用。事实上海岸岬角地形有独特的动力过程和特征^[13-15],涨急时,烟囱湾、电厂港区出现两个顺时针的回流(图7(a)),不仅使烟囱湾的低流速区特征更加明显,也使防波堤以北的港池区形成新的低流速区,这两个低流速区是温排水的涡积区。方案1B虽然采用管道深排,但由于桑洲岛与电厂防波堤距离仅仅1.1 km,同时受限于航道及锚地功能,管道长度仅800 m。温排水输运形态显示,在烟囱湾、电厂港区的回流区作用下,方案1B无法有效地形成热水通道与冷水通道,其与方案1A相比,投资大,但产生的效益小。

碧甲港的远景规划主要体现在自玻沙山末端开始修建防波堤以及桑洲岛的围填工程,桑洲岛与玻沙山之间仅留500 m作为碧甲港的航道(图2)。电厂防波堤、碧甲港防波堤分别与桑洲岛形成峡口地形,宽度分别为950 m、500 m,在潮流作用下在两个峡口分别形成双向射流体(图8)。相比电厂防波堤,碧甲港的防波堤使桑洲岛东侧潮流通道缩窄3/4

以上,在动力特征上表现为过潮量大大减少,烟囱湾弱潮区大幅扩大,流场强度进一步大幅减弱,防波堤卡口处流速则明显加大,流速的不均匀分布使烟囱湾内及电厂港池在涨落潮时段均发生大范围回流,在温排水输运效应上表现为不利于温排水向外海扩散,烟囱湾、碧甲港和电厂港区成为电厂温排水热量累积区,唯一的优点是温排水进入海龟保护区的量减少,有利于珍稀动物海龟的保护。

对方案1而言,碧甲港的修建严重削弱了桑洲岛以东潮流通道的过流能力,致使温排水交换能力减低(图9(a)),加大了港内、烟囱湾的热量累积效应,4°C以上温升面积达到2.5 km²,环境水温升高,从而使取水温升升高。对于方案2,下泄温水减少,从而减轻烟囱湾热量累积,取水口近区水温降低,从而降低取水温升。从温升线图上看(图9(b)),温升等值线北移且变宽,向西伸长,这是因为碧甲港修建后,使碧甲港防波堤与电厂防波堤之间的大面积水域几乎成为死水区,严重削弱了桑洲岛以东潮流通道的过流能力,温水向外输运能力大大降低,相

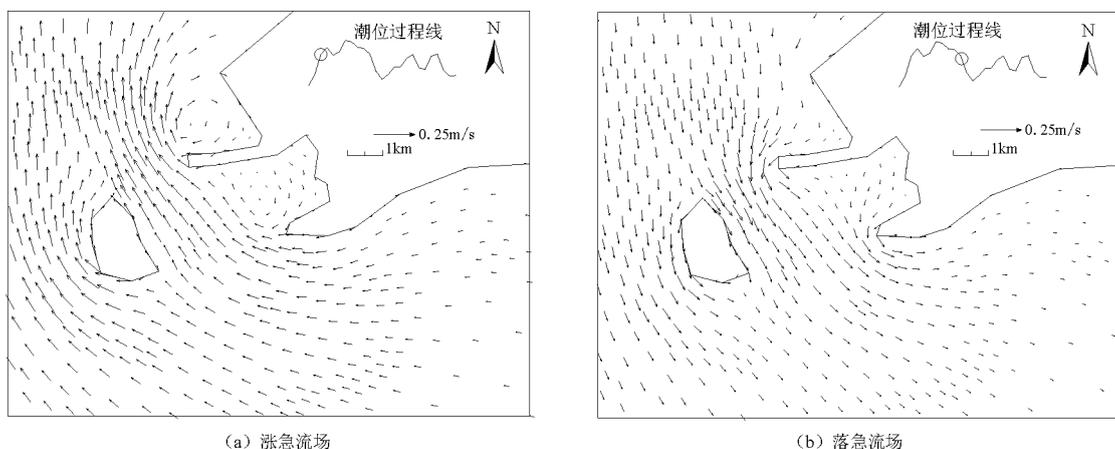
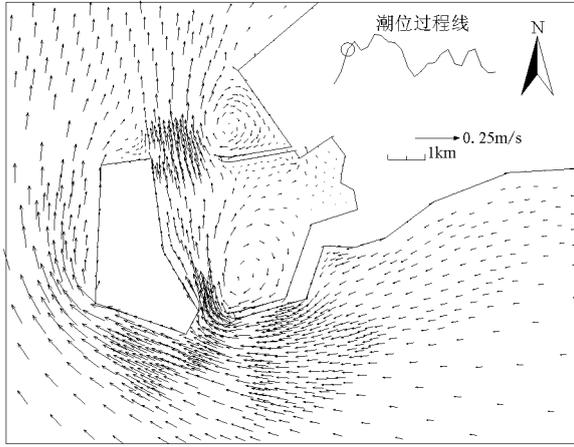


图7 电厂防波堤修建后局部流动结构

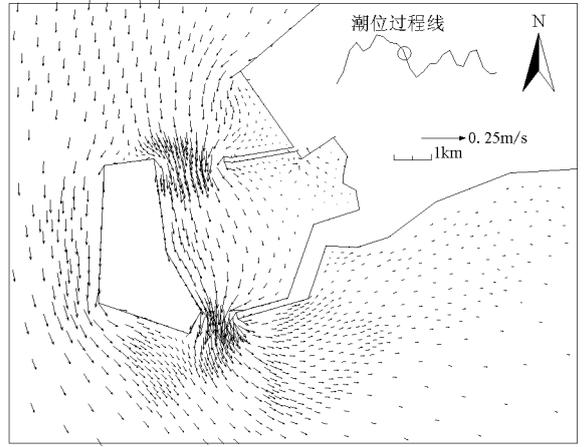
当部分热量在排水口近区滞留,迫使温水向西输运扩散。由于经碧甲港外输热量减小,热影响区域上移,烟囱湾内水体与外来水体(包括温排水)交换能力明显减弱,故湾内热量累积效应有所减弱,湾内取水口附近水域水体温升有所降低。修建碧甲港后,小潮时取水温升为 1.14 ~ 1.38℃,全潮平均为

1.25℃。对比发现,碧甲港的实施将给电厂带来取水温升降低 0.2 ~ 0.3℃的效益。

综合考虑环境和取水温升的影响,从电厂效益、环境影响、海龟自然保护区的角度来看,北排南取方案优于南排北取方案,碧甲港修建后同样是北排南取方案优于南排北取方案。

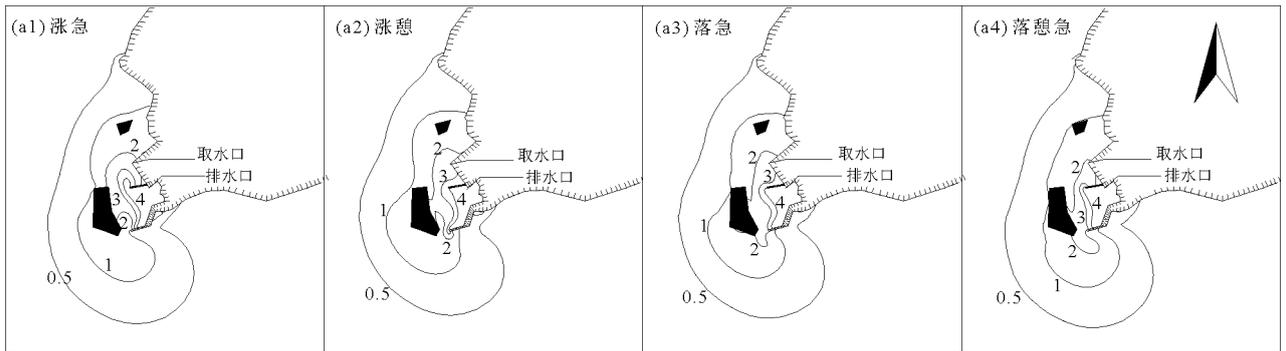


(a) 涨急流场

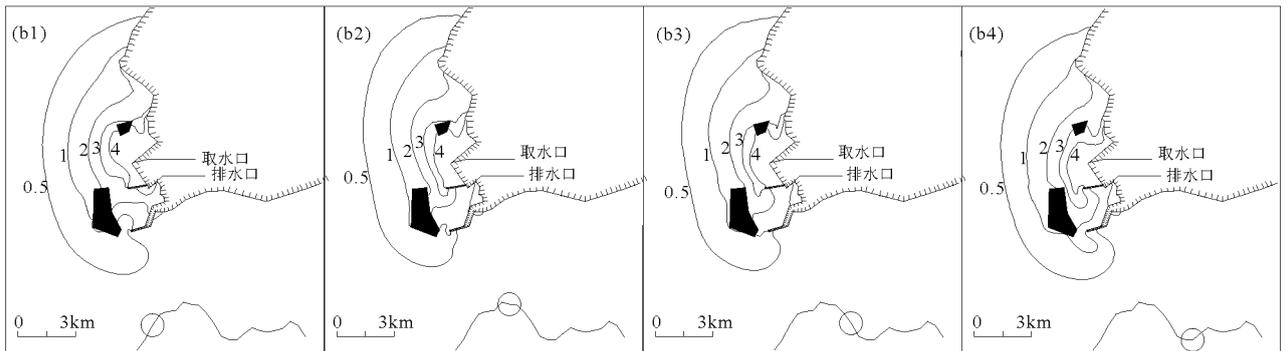


(b) 落急流场

图8 规划碧甲港实施后的流态



方案1A(规划岸线)



方案2(规划岸线)

图9 规划碧甲港实施后的等温升线(单位:℃)

3 结论

本文建立了大亚湾玻沙山海域温排水数学模

型,从现状岸线、规划岸线等角度探讨了区域动力特征及其输运作用,并应用于平海电厂取排水工程方案比选。研究表明:

(1)大亚湾海域玻沙山岬角等局部地貌单元与潮流共同作用形成了复杂的动力结构,影响温排水的输运过程。人工岬角(电厂防波堤)加强了天然岬角(湖头角和玻沙山岬角)对烟囱湾的屏蔽作用,形成了稳定的低流速区及两个顺时针回流结构,并致使南排北取方案废热窝积及其管排方案取水温升高于明渠浅排方案。

(2)碧甲港规划形成了工程区域的双峡口地貌单元,动力上形成两个双向射流结构,加大了港内、烟囱湾的热量积累效应,使南排北取方案温排水交换能力减低、取水温升高,影响方案成立。碧甲港规划使北排南取方案下泄热水减少,减轻烟囱湾热量累积,并使取水温降低 $0.2 \sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 。

(3)近岸岬角地貌单元形成的复杂动力结构对于物质输运及工程方案布置有重要意义。取排水工程布置方案选择必须考虑工程附近区域岸线规划调整的空间尺度。

参考文献:

[1] 陈惠泉,岳钧堂,陈燕茹.我国电厂排取水口规划特点及其水力热力特性[J].水利学报,1993,24(10):1-11.
 [2] 岳钧堂.差位式理论及工程应用-感潮水域冷却水运动及工程布置研究[J].水利学报,1993,24(12):10-17.
 [3] 陈惠泉,许玉麟,贺益英.火、核电厂冷却水试验研究50年的进展和体验[J].中国水利水电科学研究院学报,2008,6(4):288-298.

[4] 纪平,秦晓,袁珏,等.冷却池近区湍射流与远区环流耦合计算模型[J].水利水电技术,2006,37(9):23-26.
 [5] 朱军政.强潮海湾温排水三维数值模拟[J].水力发电学报,2007,26(4):56-60.
 [6] 广东省水利水电科学研究院.广东平海电厂冷却水工程数学模型计算报告[R].2005.
 [7] 中国科学院南海海洋研究所.广东平海电厂夏季水文泥沙观测报告[R].2005.
 [8] 倪培桐,江洵.潮州三百门电厂冷却水排放的数值模拟研究[J].中国农村水利水电,2004(5):25-27.
 [9] 倪培桐,陈丕翔,黄健东.粤东陆丰海域温排水输运及取排水工程布置原则分析[J].水利水电技术,2016,47(10):129-133.
 [10] 广东省水利水电科学研究院.广东惠来电厂冷却水工程数学模型计算报告[R].2005.
 [11] 吴超羽.黄茅海河口小尺度动力结构及其沉积作用[J].中山大学学报(自然科学版),1995,34(2):86-94.
 [12] Wei Xing, Ni Peitong, Zhan Haigang. Monitoring cooling water discharge using Lagrangian coherent structures: A case study in Daya Bay, China[J].Marine Pollution Bulletin, 2013, 75(1-2): 105-113.
 [13] 陈凯麒,章本照.沿岸凸体对污水排放影响的数值模拟[J].水动力学研究与进展(A辑),1996,11(3):352-360.
 [14] 倪培桐,吴超羽,刘欢,等.“门”地貌单元的能量耗散和过程机制[J].热带海洋学报,2012,31(2):34-40.
 [15] 倪培桐,陈卓英.基于惯性耗散法的峡口岬角地形能耗分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(2):128-134.

(上接第149页)

[10] 何超,李萌,李婷婷,等.多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J].湖北大学学报(自然科学版),2016,38(2):172-178.
 [11] 朱少荣,刘佑荣,吴益平.层次分析法在滑坡区建筑适宜性评价中的应用[J].水文地质工程地质,2003,30(3):58-60.
 [12] 韩再生,冉伟彦,佟红兵,等.浅层地热能勘查评价[J].中国地质,2007,34(6):1115-1121.
 [13] 赵常青.大庆市龙凤区地热资源热储分布特征及资源

量评价[D].长春:吉林大学,2012.

[14] 刘彩波.西安市浅层地温能资源评价研究[D].西安:长安大学,2014.
 [15] 佚名.陕西省启动新一轮地下水超采区治理工作重新划定超采区和保护区[J].陕西农业科学,2016,62(4):5-5.
 [16] 吴佩林.我国城市节约用水的潜力与对策分析[J].山东理工大学学报(社会科学版),2005,21(6):38-42.