



渤海金州湾围海造陆区潮流场数值模拟研究

马宏伟, 张静, 倪金, 郇恒飞

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 金州湾沿岸海洋工程的建设, 将不可避免地对周围海域水动力环境、生态环境等产生影响。通过二维水动力数值模拟, 对金州湾围海造陆区潮流场进行模拟计算, 同时对机场人工岛接岸工程在不同开口情况下对潮流场的影响及侵蚀淤积情况进行预测研究。结果表明: 金州湾潮流特征整体表现为较强的往复性, 海流主流向为偏 NE-SW 向, 其中偏 NE 向为涨潮流向, 偏 SW 向为落潮流向, 潮流最大可能流速在 23.2~100.9 cm/s 之间。当接陆堤坝在开口 50 m、200 m 时, 流态变化明显区域主要集中在开口区附近水域, 开口通道及其附近流速明显增加, 而北段接陆堤坝的东侧水域流速呈减小趋势。当开口宽度从 50 m 拓宽到 200 m, 淤积区的平均淤积强度从 0.06 m/a 增加到 0.14 m/a。

关键词: 潮流; 数值模拟; 水动力; 流速; 淤积; 金州湾

Numerical simulation of tidal current field in the reclamation area of Jinzhou Bay, Bohai Sea

MA Hong-wei, ZHANG Jing, NI Jin, HUAN Heng-fei

Shenyang Centre of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The construction projects along the coast of Jinzhou Bay will inevitably affect the surrounding marine hydrodynamic environment and ecological environment. The paper simulates and calculates the tidal current field in the reclamation area of Jinzhou Bay by 2D hydrodynamic numerical simulation, and predicts the impact of airport artificial island shore connection project on the tidal current field and erosion siltation under different conditions. The results show that the tidal current is generally characterized by strong reciprocation, and the main flow direction of ocean current is NE-SW, with NE for flood tide and SW for ebb tide. The maximum possible flow velocity is 23.2–100.9 cm/s. When the opening width of land connection dam is 50 m and 200 m, the areas with obvious flow pattern changes are concentrated in the waters near the opening. The flow velocity in the opening channel and vicinity increases significantly, while that in the eastern waters of the northern land connection dam tends to decrease. When the opening width is expanded from 50 m to 200 m, the average siltation intensity in the siltation area increases from 0.06 m/a to 0.14 m/a.

Key words: tidal current; numerical simulation; hydrodynamic force; flow velocity; siltation; Jinzhou Bay

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2024-04-07. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“黄海海岸带东段生态修复区综合地质调查”(DD20230461).

作者简介: 马宏伟 (1983—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事水工环地质调查研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//19174303@qq.com

通信作者: 张静 (1982—), 女, 博士, 正高级工程师, 从事水工环地质调查研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//maius1222@163.com

引用格式: 马宏伟, 张静, 倪金, 郇恒飞. 渤海金州湾围海造陆区潮流场数值模拟研究[J]. 地质与资源, 2025, 34(1): 94-102.

Ma H W, Zhang J, Ni J, Huan H F. Numerical simulation of tidal current field in the reclamation area of Jinzhou Bay, Bohai Sea [J]. Geology and Resources, 2025, 34(1): 94-102.

0 引言

金州湾位于大连市金州区西部的渤海水域,湾口两个岬角地理坐标分别为 $39^{\circ}03'30''N$ 、 $121^{\circ}22'25''E$ 和 $39^{\circ}11'42''N$ 、 $121^{\circ}34'50''E$ 。海湾呈椭圆形,湾口朝向西北,水深自东向西逐渐递增至 10 m。海湾面积为 342 km^2 ,滩涂面积为 17 km^2 ,礁岛面积 4.2 km^2 。该湾为砂砾质基岩海岸上的一个原生湾,岸线长 $65.7 \text{ km}^{[1-2]}$ 。金州湾的潮汐性质皆为非正规半日潮。每天两次涨、落潮流,潮流强度一强一弱,周期也具有一定差异。

金州湾岸线曲折,小湾比比皆是,为港口的建设提供了良好的自然基础条件。其沿岸海洋工程的建设,将不可避免地对周围海域水动力环境、生态环境等产生影响。本研究区围海造陆工程为大连海上机场人工岛(图 1),总面积为 21 km^2 ,平面布置为矩形,宽 3.4 km,长 6.4 km。机场物流区布置在机场人工岛西南侧海岸^[3-4],接岸工程前期作为项目的施工通道,位于金州湾湾底,甘井子区大连湾街道拉树房村西北侧。通道总长 4 138.3 m,顶宽 100 m,护岸为斜坡式结构。通道南侧为 1:2.5 坡面,用 200~300 kg 大块石护面;通道北侧为 1:1.5 坡面,用 1~1.5 t 大块石护面。为了合理地开发利用海洋资源和空间,科学地保护海洋环境,需对该海域的水动力状况有进一步了解^[5]。



图 1 金州湾地理位置及测点布置图

Fig. 1 Geographic location of Jinzhou Bay and layout of observation points

A、B、C、D—定点海流观测站(固定海洋潮流观测站)

前人对金州湾原始海域潮流场进行了数值模拟^[6],围海造陆工程施工后的潮流场变化并无进一步

研究。本文在实测资料分析的基础上,对金州湾东部近岸围海造陆区海域的潮流场变化进行数值模拟,并对接岸工程开口宽度对潮流场的影响进行数值模拟,以为制定接岸工程后续施工规划提供科学依据。

1 数值模型

1.1 数值计算方法

二维数值计算采用 ADI 法,该方法的网格剖分、差分格式及算法已被录入《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》。本研究选用正交曲线坐标系下的平面二维潮流数学模型,进行天然状况下的流场模拟计算及工程建设引起的流场变化的模拟分析。微分方程离散时,时间采用前差分格式,空间采用交错网格的中心差分格式。一个时间步长分成两步进行,前半步隐式计算 ξ 方向流速分量及潮位,显式计算 η 方向流速分量;后半步隐式计算 η 方向流速分量及潮位,显式计算 ξ 方向流速分量。该方法理论成熟、计算效率高、稳定性好,在工程数值模拟计算中得到了广泛应用^[7-8]。

1.2 模型的建立

1.2.1 计算范围确定及网格划分

为了准确模拟出金州湾水域的水流特征,本研究建立了覆盖整个渤海湾水域的大范围平面二维数学模型^[9-11]。模型东开边界取在威海市附近,模型计算域范围约 $421 \text{ km} \times 452 \text{ km}$,计算单元面积 $101\,943 \text{ km}^2$,计算网格数为 431×341 ,空间步长介于 47~2 577 m。

相对于上述模型范围,网格若要很好满足研究区填海工程以及接陆堤坝等尺度,需要很长的计算时间和大量存贮空间,因此,采用嵌套技术建立工程区局部模型。局部模型覆盖了渤海湾东侧半封闭海湾,包括金州湾、普兰店港等海域。西开边界长约 47.8 km,距离工程区最近约 29.3 km,计算网格数 403×407 ,空间步长介于 25~463 m,工程区网格步长介于 25~40 m。

1.2.2 动边界处理

工程海域有大片浅滩在高潮位时淹没,低潮位时出露。计算过程中要求正确反映潮滩的干湿特征,需要采用适当的动边界处理技术。

动边界处理方法有多种^[12-19],本研究中采用冻结法,根据节点水深判断是否露滩。当水深小于某一控制水深时,节点潮位“冻结”不变,要进行下一时刻计算前,被冻结的节点水深由周边节点水深修正,如水深大

于控制水深则参于计算. 为避免水量和动量的过分“冻结”引起失真, 动边界控制水深采用 5 cm.

1.2.3 糙率选取

糙率是潮流计算的主要参数之一, 反映了潮流运动过程中的阻力特性, 糙率选取正确与否对计算结果有直接影响. 糙率在潮流计算中是一个综合参数, 与床面泥沙特性、水深及地形形态都有一定的关系. 本研究中根据经验^[13]选用以下公式计算:

$$n = n_0 + n'/H$$

式中, n_0 为基础糙率, 经验证计算取 0.010~0.012; n'/H 为糙率修正项, n' 取 0.013. 当水深 $H < 1.0$ m 时, n 个别点最大值取 0.032; $H \geq 1.0$ m, 按上式计算值修正^[19].

1.2.4 其他参数

紊动黏性系数, 该参数取值在一定范围内均可以获得良好结果^[5, 19], 与网格步长及当地潮流特性有关, 采用 Smagorinsky 公式计算, 使其随网格尺度及水流动力强弱自动调整, 避免紊动扩散项过大引起流场失真, 又能增强模型稳定性. 模型主要计算参数见表 1.

表 1 数值模型参数表

Table 1 Parameters of numerical model

参数名称	整体模型	局部模型
网格单元数	431×341	403×407
空间步长/m	47~2577	25~463
时间步长/s	20	15
动边界控制水深/m	0.05	
糙率	$n = n_0 + n'/H$	
涡动扩散系数	$0.1\Delta x\Delta y\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}$	

2 模型验证

本研究采用定点海流观测(流速、流向及悬浮泥沙)的工作手段, 共布设 6 个测流垂线和 2 个潮位测验站, 用于验证模型的数据选用 2013 年 6 月 8—9 日大潮实测水文资料.

2.1 潮位验证

计算和实测潮位过程的高、低潮位及过程线相位均符合良好, 高、低潮位出现时刻计算与实测基本一致(图 2). 从一个潮周期内的最高潮位和最低潮位计算与实测偏差统计分析结果(表 2)可见, 极值潮位偏差

最大不超过 0.05 m, 说明极值潮位的模拟较好, 潮位过程模拟精度符合相关规程要求.

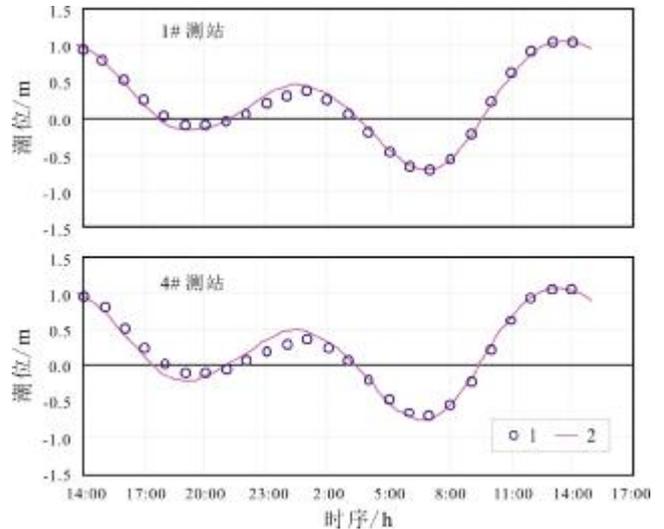


图 2 计算潮位与实测潮位过程对比

Fig. 2 Comparison between calculated and measured tide levels

1—实测值(measured value); 2—计算结果(calculation result)

表 2 极值潮位模拟偏差统计

Table 2 Simulation deviation statistics of extreme tide level

测站	潮位	实测	计算	偏差
1#	最高/m	1.06	1.06	0.00
	最低/m	-0.70	-0.72	-0.02
	潮差/m	1.76	1.78	0.02
4#	最高/m	1.12	1.07	-0.05
	最低/m	-0.73	-0.76	-0.03
	潮差/m	1.85	1.83	-0.02

验证计算表明, 数学模型模拟的金州湾海域潮波传播过程与实测基本一致. 表明数学模型采用的边界控制条件是合适的; 海湾地形的概化基本正确, 能够反映海域内潮波传递和潮波变形.

2.2 流速流向验证

研究区除了 1# 测站带有一定旋转性, 其余各垂线主要表现为往复流, 无论流速过程还是流向过程计算与实测均吻合较好(图 3).

2013 年 6 月的水文测验垂线数量及站位分布能够为工程海域水流模拟提供较好验证控制, 且从模型验证结果来看, 计算潮位、流速、流向与实测过程吻合

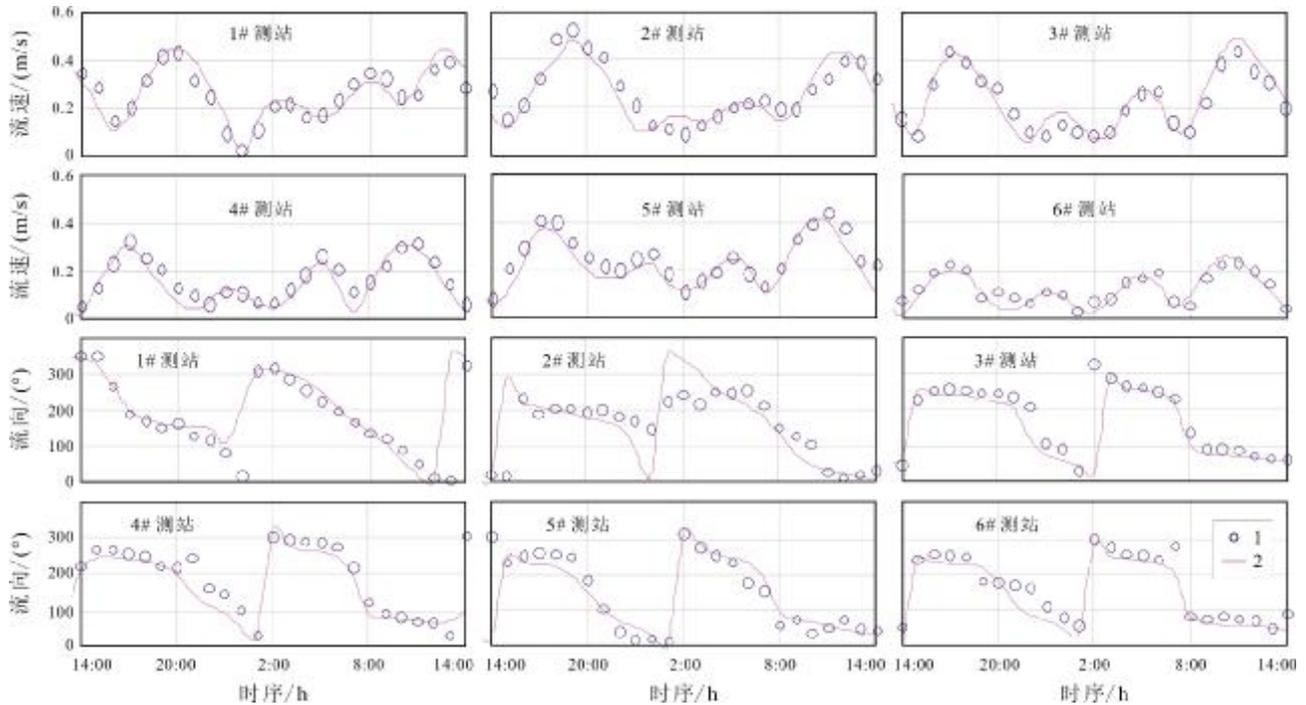


图 3 流速、流向计算与实测过程对比

Fig. 3 Comparison between calculated and measured velocities and flow directions

1—实测值(measured value); 2—计算结果(calculation result)

程度较好. 说明模型采用的控制边界条件是正确的, 模型确定的水流阻力参数是合理的, 模型能够较好复演金州湾海域天然流场. 故采用 2013 年 6 月实测大潮作为典型潮型, 来进行本次工程方案的计算研究.

3 结果分析

3.1 工程海域流场特征

辽东湾内涨潮流自西南流向东北进入金州湾内, 湾内潮流以往复流为主. 涨潮期, 进入金州湾内涨潮流向湾顶行进, 潮流主流向为西南指向东北. 涨潮流在机场人工岛西南护岸的东南端附近分流, 西股涨潮流绕过机场人工岛后与潮流主流一起继续向东北方向行进, 最后在鹿岛后方陆域岸线附近分流, 北股流向普兰店港, 南股则东偏进入机场人工岛—接陆堤坝—岸线围成的半封闭水域内, 该水域口门宽度仅 1.971 km. 半封闭水域内涨潮流与岸线走向平顺. 落潮流基本按照原涨潮流路返回(图 4).

对金州湾整体而言, 海流表现为较强的往复性, 海流主流向为偏 NE-SW 向, 其中偏 NE 向为涨潮流向, 偏 SW 向为落潮流向.

涨潮平均流速大于落潮平均流速. 金州湾南部海域涨、落潮平均流速等值线分布与陆域岸线走向大体一致, 除了接近湾口水域流速相对较大, 平均流速可超过 0.20 m/s, 其余水域平均流速基本不超过 0.20 m/s. 接陆堤坝西侧水域为弱流区, 涨、落潮平均流速基本不超过 0.05 m/s. 机场人工岛东北部的半封闭水域内动力相对较强, 口门处涨、落潮平均流速均可超过 0.30 m/s; 向半封闭水域内侧流速逐渐减小, 到达接陆堤坝东侧水域, 涨、落潮平均流速介于 0.05~0.10 m/s (图 5).

3.2 泥沙冲淤现状分析

本研究采用 2 年一遇波浪与潮流、泥沙组合下的水动力作用为条件, 同时考虑悬沙和底沙对地形的影响, 分析计算工程周围地形冲淤情况. 与填海前相比, 在新机场正北角的滩面有所冲刷, 冲刷幅度在 0.15 m 左右; 在新机场与陆域之间的通道水域也有所冲刷, 冲刷幅度在 0.2 m 左右, 最大冲刷为 0.4 m. 在新机场南护岸外侧附近水域是淤积的, 淤积幅度在 0.06~0.2 m, 最大淤积厚度为 0.4 m; 人工岛北侧的近岸水域有一定量的淤积, 淤积幅度为 0.06~0.10 m(图 6).

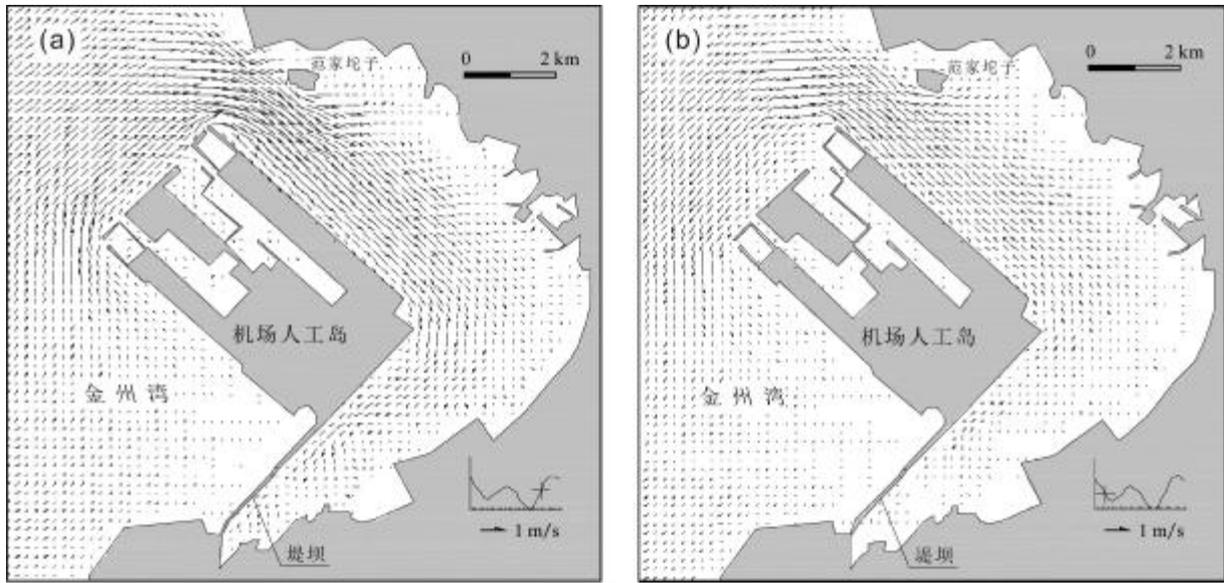


图4 现状工况条件下的工程海域涨、落急流态示意图

Fig. 4 Sketches of maximum flood tide and ebb tide in the project area under current working condition
a—涨急(maximum flood tide); b—落急(maximum ebb tide)

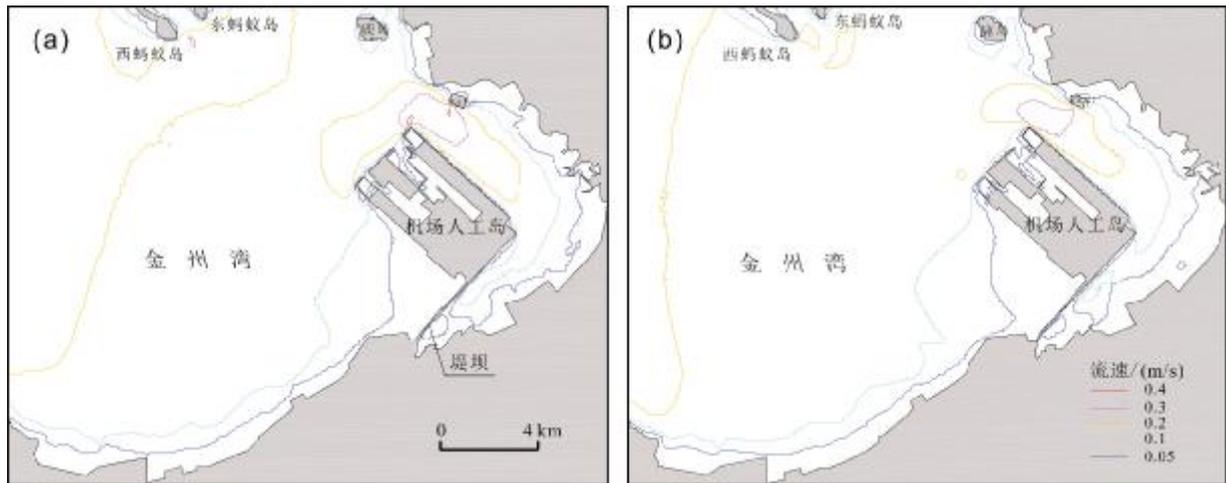


图5 现状工况条件下金州湾海域涨、落半潮平均流速等值线图

Fig. 5 Isogram of average flow velocity of rising and falling half tides under current working condition
a—涨半潮(rising half tide); b—落半潮(falling half tide)

4 预测研究

本研究以现状工况为基础,设计在接岸堤坝的中部开口,开口通道宽度分别为50 m(工况F1)、200 m(工况F2),论证接岸堤坝开通道后周边海域潮流动力、泥沙冲淤的变化情况。

4.1 工程建设对水动力条件的影响

4.1.1 接陆堤坝开口50 m

接陆堤坝开口50 m后,连通了堤坝两侧海域。涨急时刻,堤坝西侧涨潮流通过开口通道进入东侧水域,

与堤坝东侧半封闭水域内涨潮流汇聚后,会在通道南侧附近形成一个顺时针回流区,之后继续向湾内行进。落急时刻,落潮流基本沿原涨潮流路返回,半封闭水域顶部的落潮流一部分会通过开口通道进入堤坝西侧水域,另外一部分仍沿岸线流向半封闭水域口门区。与现状工况相比,接陆堤坝开口50 m后,流态变化明显区域主要集中在开口区附近水域,其余水域流态无明显变化。堤坝西侧水域流矢量不同程度增加,机场人工岛东北侧半封闭水域内的流矢量呈减小趋势。涨潮

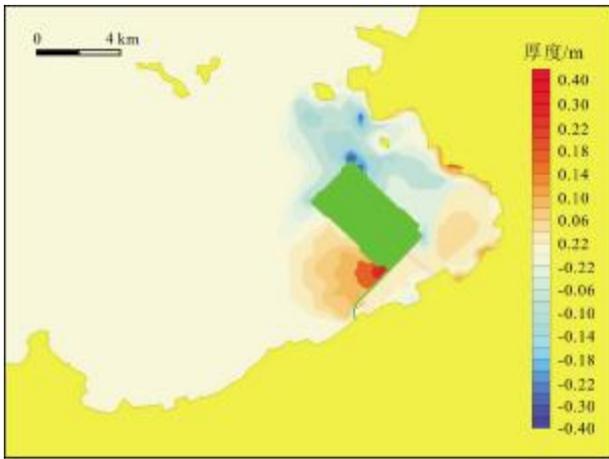


图 6 新机场填海前后的地形冲淤变化

Fig. 6 Changes of topographic erosion and siltation before and after reclamation of the new airport

期,受开口通道涨潮流顶推作用,口门东侧水域的涨潮流不同程度向东偏转.

与现状工况相比,接陆堤坝开口 50 m 引起的流速变化限于工程区附近(图 7). 开口通道及其附近流速明显增加,北段堤坝的东侧水域流速则呈减小趋势,另外涨潮期在机场人工岛东北侧半封闭水域的口门区流速有所减小. 涨半潮时,开口通道及其两侧水域,涨潮平均流速分别增加 0.15 m/s、0.03 m/s,等值线带长分别为 383 m、944 m,对应范围分别为 0.035 km²、0.24 km².

北段堤坝的东侧水域平均流速减小 0.03 m/s,等值线面积约为 1.01 km²,流速减小幅度不超过 0.10 m/s. 另外在半封闭水域的口门区出现流速减小 0.03 m/s 的区域,面积约 0.32 km². 落半潮时,流速变化特征与涨半潮相同,开口通道及其两侧水域落潮平均流速分别增加 0.15 m/s、0.03 m/s,等值线面积分别为 0.026 km²、0.30 km². 北段堤坝的东侧流速减小 0.03 m/s,等值线面积约 1.05 km².

4.1.2 接陆堤坝开口 200 m

与接岸堤坝开口 50 m 引起的变化相比,接陆堤坝开口 200 m 引起的流态变化幅度大于堤坝开口 50 m 的方案. 接陆堤坝开口 200 m 后,涨急时刻,堤坝西侧涨潮流通过开口通道进入东侧水域后,开口处流速较大,水流向四周发散,在口门两侧均形成一个回流区. 其中南股涨潮流向南流向近岸,北股则向北行进,在机场人工岛东南护岸的北段附近,与半封闭水域内涨潮流汇聚. 落潮时刻,半封闭水域内落潮流在机场人工岛东南护岸北角点附近分流,南股沿岸线通过开口通道后流向外海,北股则沿岸线向半封闭水域口门方向行进.

与现状工况相比,接陆堤坝开口 200 m 引起的涨、落半潮平均流速变化特征与开口 50 m 引起的变化相同,但流速变化幅度明显增加(图 8). 涨半潮时,开

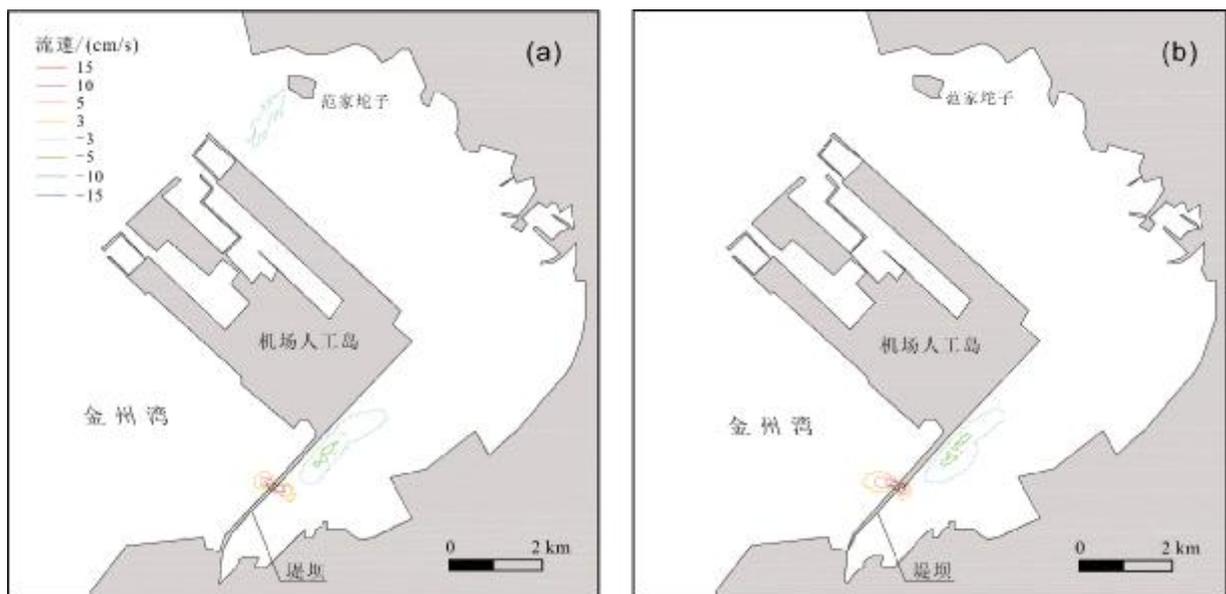


图 7 工况 F1 相对于现状工况的涨、落潮平均流速变化等值线分布

Fig. 7 Isogram of average flow velocity changes of rising and falling tides in working condition F1 relative to current situation
a—涨半潮(rising half tide); b—落半潮(falling half tide)

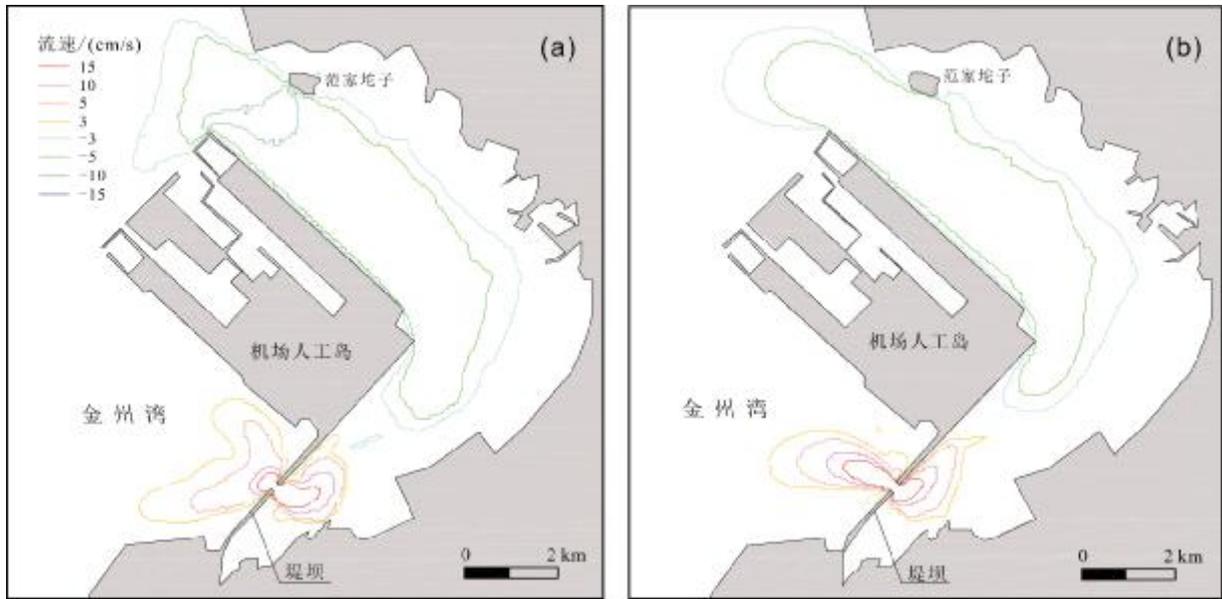


图8 工况 F2 相对于现状工况的涨、落潮平均流速变化等值线分布

Fig. 8 Isogram of average flow velocity changes of rising and falling tides in working condition F2 relative to current situation
a—涨半潮(rising half-tide); b—落半潮(falling half-tide)

口通道及其两侧水域,涨潮平均流速分别增加 0.15 m/s、0.03 m/s,等值线范围分别为 0.50 km²、5.88 km²。机场人工岛东北侧的半封闭水域内,平均流速分别减小 0.03 m/s、0.05 m/s,等值线从口门区向内延伸到机场人工岛东南护岸中部水域,面积分别为 25.12 km²、17.94 km²。另外在口门区局部水域平均流速减小幅度可超过 0.10 m/s。落半潮时,开口通道及其两侧水域,落潮平均流速分别增加 0.15 m/s、0.03 m/s,等值线面积分别为 0.63 km²、4.65 km²。机场人工岛东北侧的半封闭水域内,平均流速分别减小 0.03 m/s、0.05 m/s,等值线面积分别为 24.29 km²、16.52 km²,口门处流速减小幅度不超过 0.10 m/s。

4.2 泥沙冲淤模拟预测

本研究由泥沙数学模型预测工程区附近的年冲淤强度,仅单纯考虑潮流动力下的冲淤情况,并未考虑波浪作用下引起的沿岸输沙变形。预测结果表明,堤坝开通后,通道内及其附近水域会发生程度不等的冲刷,机场人工岛东北侧的半封闭水域内泥沙呈淤积状态。冲刷和淤积强度与堤坝开口通道宽度密切相关(图 9、10)。

接陆堤坝开口 50 m 后,开口通道和附近水域的冲刷幅度可超过 2 m。淤积区主要集中在机场人工岛东

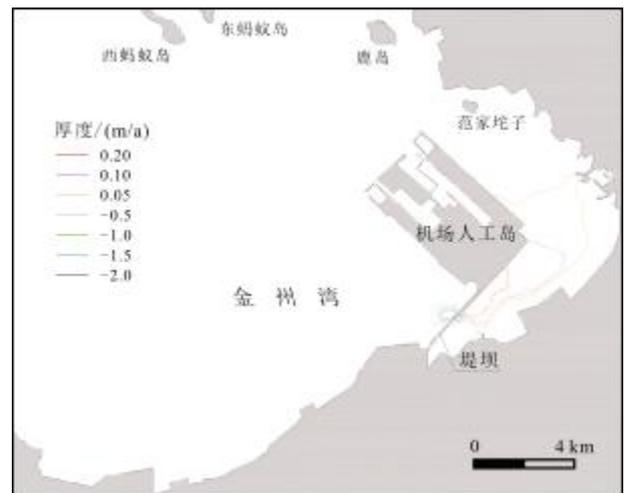


图9 工况 F1 实施后工程区附近年淤积厚度与现状相比分布情况

Fig. 9 Distribution of annual siltation thickness near the project area after working condition F1 compared with current situation
南护岸的东侧水域,局部区域淤积强度超过 0.20 m/a。统计出整个淤积区平均淤积强度约 0.06 m/a。

当堤坝开口宽度扩宽到 200 m 后,冲刷区和淤积区的范围和幅度都进一步扩大。在半封闭水域内,泥沙淤积较大的区域集中在机场人工岛东角点附近水域,淤积强度超过 0.20 m/a。统计出整个淤积区平均淤

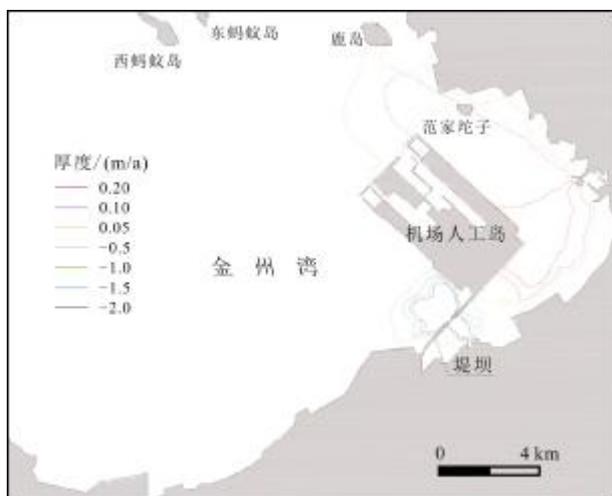


图 10 工况 F2 实施后工程区附近年淤积厚度与现状相比分布情况

Fig. 10 Distribution of annual siltation thickness near the project area after working condition F2 compared with current situation

积强度约 0.14 m/a.

5 结语

通过潮位、流速、流向实测值与模型计算结果对比分析,验证了采用 ADI 法建立的金州湾二维潮流模型和泥沙冲淤模型具有可靠性.

金州湾海流主要表现为往复性,主流向为 NE-SW,涨潮为 NE 向,落潮为 SW 向.填海区东侧存在泥沙净输入,产生淤积,西侧受侵蚀.

通过模型对接陆堤坝开口后的水动力及泥沙冲淤变化进行了模拟.堤坝开口后,连通了堤坝东、西两侧水域,且附近流速明显增加,开口越大流速增加幅度越大,从而促进两水域之间的水体交换.开通通道附近水域表现为冲刷,而半封闭水域内泥沙呈淤积态势.随开口通道拓宽,开口通道附近冲刷强度和范围不同程度增加.本文计算结果结合水环境影响研究^[20],可为大连海上机场施工通道布置的进一步改进提供依据.

参考文献(References):

- [1]符文侠,何宝林,刘伟.辽东半岛沿海第四纪地层特征及其分布[J].海洋通报,1992,11(4):58-64.
Fu W X, He B L, Liu W. Characteristics and distribution of quaternary strata along coast of Liaodong Peninsula[J]. Marine Science Bulletin, 1992, 11(4): 58-64.
- [2]中国海湾志编纂委员会.中国海湾志:第二分册(辽东半岛西部和

辽宁省西部海湾)[M].北京:海洋出版社,1997.

The Compilation Committee of Bays in China. Bays in China: Part 2 [M]. Beijing: China Ocean Press, 1997. (in Chinese)

- [3]钱程,秦涛,李林川,等.大兴安岭北段东坡扎兰屯地区高位砂砾石层研究及其地质意义[J].地质与资源,2016,25(5):424-435.
Qian C, Qin T, Li L C, et al. Study on the highstand sand-gravel layers in Zalantun area, northern Daxinganling Mountains: Geological implication[J]. Geology and Resources, 2016, 25(5): 424-435.
- [4]王方旗,胡光海,吴永亭,等.渤海金州湾海域声学浅地层剖面及其解释[J].海洋科学进展,2013,31(1):128-137.
Wang F Q, Hu G H, Wu Y T, et al. Acoustic subbottom profile and their interpretations in the Jinzhou Bay of the Bohai Sea[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1): 128-137.
- [5]刘伟峰,孙英兰,陈时俊,等.胶南东部近岸海域实测海流分析及潮流场数值模拟[J].海洋科学,2008,32(8):9-12.
Liu W F, Sun Y L, Chen S J, et al. Analysis of observed tidal current and numerical model of tidal current in the offshore area of eastern Jiaonan[J]. Marine Sciences, 2008, 32(8): 9-12.
- [6]韩康,张存智,张砚峰,等.大连湾及附近海域潮流场数值模拟[J].海洋通报,1994,13(4):20-25.
Han K, Zhang C Z, Zhang Y F, et al. Numerical computation of tidal current field in Dalian Bay and neighbouring water area [J]. Marine Science Bulletin, 1994, 13(4): 20-25.
- [7]Lardner R W, Belen M S, Cekirge H M. Finite difference model for tidal flows in the Arabian Gulf [J]. Computers & Mathematics with Applications, 1982, 8(6): 425-444.
- [8]Chau K W, Jin H S, Sin Y S. A finite difference model of two-dimensional tidal flow in Tolo Harbor, Hong Kong [J]. Applied Mathematical Modelling, 1996, 20(4): 321-328.
- [9]王志力,陆永军,耿艳芬.基于非结构网格有限体积分法的二维高精度物质输运模拟[J].水科学进展,2008,19(4):531-536.
Wang Z L, Lu Y J, Geng Y F. High resolution two-dimensional numerical model of scalar transport based on unstructured grid finite volume method [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 531-536.
- [10]赖锡军,曲卓杰,周杰,等.非结构网格上的三维浅水流动数值模型[J].水科学进展,2006,17(5):693-699.
Lai X J, Qu Z J, Zhou J, et al. 3-D hydrodynamic model for shallow water on unstructured grids [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 693-699.
- [11]Wang J H, Shen Y M, Guo Y K. Seasonal circulation and influence factors of the Bohai Sea: A numerical study based on Lagrangian particle tracking method [J]. Ocean Dynamics, 2010, 60(6): 1581-1596.
- [12]祝丽丽,孙志林,黄赛花,等.钱塘江河口弯道潮流场的数值模拟 [J].浙江大学学报(理学版),2007,34(3):351-356.
Zhu L L, Sun Z L, Huang S H, et al. Numerical simulation of tidal

- flow field in the Qiantang Estuary bends [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2007, 34(3): 351–356.
- [13] 温生辉, 陈季良. 厦门附近海域潮流场的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1996, 18(2): 15–25.
- Wen S H, Chen J L. Numerical simulation of tidal current field in the waters near Xiamen [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1996, 18(2): 15–25. (in Chinese)
- [14] 陈满春. 厦门湾潮流场的数值模拟[J]. *海洋通报*, 1997, 16(3): 13–20.
- Chen M C. Numerical computation of tides and tidal currents in the Xiamen Bay [J]. *Marine Science Bulletin*, 1997, 16(3): 13–20.
- [15] 杨晨, 刘颖, 路宽. 泉州湾潮流场的数值模拟研究[J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(3): 117–120.
- Yang C, Liu Y, Lu K. Numerical study of tidal current field in the Quanzhou Bay [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2017, 36(3): 117–120.
- [16] 李国杰, 胡建平. 湛江东海岛近岸潮流场数值模拟[J]. *水道港口*, 2007, 28(5): 325–330.
- Li G J, Hu J P. Numerical simulation of tidal current fields near Donghai Island of Zhanjiang Bay [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2007, 28(5): 325–330.
- [17] 孙昭晨, 梁书秀, 沈永明, 等. 三维海洋紊流模型对杭州湾附近潮流场数值模拟[J]. *大连理工大学学报*, 2000, 40(5): 609–612.
- Sun Z C, Liang S X, Shen Y M, et al. Numerical simulation of tidal flow near Hangzhou Bay with three dimensional ocean circulation model [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, 40(5): 609–612.
- [18] 王卫远, 杨娟, 何倩倩, 等. 苏北沿海大丰海域潮流场数值模拟计算[J]. *人民长江*, 2012, 43(19): 79–81, 89.
- Wang W Y, Yang J, He Q Q, et al. Numerical simulation of tidal current field of Dafeng Sea area in North Jiangsu Province [J]. *Yangtze River*, 2012, 43(19): 79–81, 89.
- [19] 韩康, 吴冠, 张存智. 普兰店湾潮流场数值模拟[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(1): 42–46.
- Han K, Wu G, Zhang C Z. Numerical modeling of tidal current field in Pulandian Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(1): 42–46.
- [20] 犹爽, 张宁川. 大连海上机场施工通道开口宽度对水环境影响的数值研究[J]. *水道港口*, 2014, 35(1): 19–25.
- You S, Zhang N C. Numerical analysis on impact of water environment by construction access with different opening-size of Dalian offshore airport [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2014, 35(1): 19–25.
- [31] 韩振哲. 小兴安岭东南段早中生代花岗岩类时空演化特征与多金属成矿[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- Han Z Z. Characteristics of temporal and spatial evolution and polymetallic mineralization of Early Mesozoic granites in southeastern Xiaoxing'an Mountains [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [32] 王泉, 表尚虎, 李喜明, 等. 黑龙江省孙吴地区早侏罗世火山岩的识别及其地质意义[J]. *矿产与地质*, 2017, 31(2): 378–388.
- Wang Q, Biao S H, Li X M, et al. Identification of Early Jurassic volcanic rock and its geological significance in Sunwu district, Heilongjiang Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2017, 31(2): 378–388.
- [33] 尹志刚, 宫兆民, 王春生, 等. 小兴安岭平顶山一带早侏罗世花岗岩类年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(1): 107–125.
- Yin Z G, Gong Z M, Wang C S, et al. Chronological, geochemical characteristics and geological significance of Early Jurassic granites in Pingdingshan area of Lesser Xing'an Range [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(1): 107–125.

(上接第 10 页/Continued from Page 10)