



开敞式粉砂淤泥质航道维护技术

刘姝娜, 韦真广, 杜冰茹
(交通运输部广州打捞局, 广东 广州 510610)

摘要: 开敞式粉砂淤泥质航道常年淤积, 如何在维护方案优化中考虑淤积特性的影响, 兼顾通航安全性与疏浚工程经济性, 是业界关注的热点问题。采用实测资料分析与数值模拟相结合, 针对某开敞式粉砂淤泥质航道建立考虑波流耦合的泥沙数学模型, 对比多种维护疏浚方案年回淤量, 评估不同疏浚指标对航道回淤量的敏感性。结果表明, 开敞式粉砂淤泥质航道疏浚宽度的增加可有效减小年回淤量。研究成果可为开敞式粉砂淤泥质航道的维护方案优化提供参考。

关键词: 开敞式航道; 维护性疏浚; 粉砂淤泥质; 波流耦合泥沙模型

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0145-08

Maintenance technology for open silty silt channel

LIU Shuna, WEI Zhenguang, DU Bingru

(Guangzhou Salvage Bureau of the Ministry of Transport, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The open silty silt channel is silted all the year long. How to balance navigational safety and the economic feasibility of dredging projects while considering the influence of sedimentation characteristics has become a focal point of concern in the industry. Based on the analysis of measured data and numerical simulation, this paper establishes a mathematical sediment model considering the coupling of wave and current for an open silty silt channel, and compares the annual re-sedimentation rates of various maintenance dredging schemes to evaluate the sensitivity of these rates to different dredging indexes. The results show that the increase of dredging width of open silty silt channel can effectively reduce the annual re-sediment. The research results can provide reference for the optimization of the maintenance scheme of the open silty silt channel.

Keywords: open channel; maintenance dredging; silty silt; wave-current coupled sediment model

开敞式粉砂淤泥质航道常年需要维护, 维护量大, 维护成本高。海岸带航道淤积受潮汐、潮流及波浪等多种动力因素综合作用, 泥沙运动机制极其复杂。国内外学者进行了大量的研究, 并对淤泥质海岸和粉砂质海岸航槽回淤提出了经验公式^[1-3]。对于淤泥质和砂质海岸港池航道泥沙回淤问题, 目前国内已研究得比较成熟, 可通过有效的工程措施解决回淤问题; 粉砂质海岸航道泥沙回淤问题也取得了突破性进展^[4-7]。许国辉等^[8]剖析粉砂淤泥质海岸的泥沙运动特征以及在粉砂淤泥质海岸建设开敞式航道的泥沙淤积方式, 主

要包括悬移质、推移质、表层层移质、泥沙流滑、航道侧面土体滑坡淤积 5 种; 白洪炉^[9]提出关于淤泥粉砂质海岸航道维护性疏浚的分段备淤深度建议; 张华等^[10]探讨不同季节满足设计通航标准的航道水深, 进而提出深水航道分季节的变水深维护方案。

本研究基于湛江市徐闻县海安湾海安航道维护疏浚项目, 通过一周年逐月地形测量成果, 分析航道淤积特性和冲淤分布规律, 提出多个维护疏浚方案。建立波流耦合泥沙模型, 并根据水文测验和实测航道回淤情况对模型进行验证和率定,

收稿日期: 2023-11-23

作者简介: 刘姝娜 (1977—), 女, 高级工程师, 从事水运工程研究与基本建设工作。

模拟不同方案下航道年回淤情况。对不同方案回淤量进行对比,推荐最优方案。

1 工程概况

1.1 航道尺寸

海安航道包括海安客运港和海安新港 2 条航道,基本为南北走向,分别起于海安客运港和海安新港的港池出口位置,止于琼州海峡中部与海南省的交界处,长分别为 18、20 km。航道尺寸为 $5.1\text{ m}\times 180\text{ m}\times 600\text{ m}$ (水深 $\times$ 宽度 $\times$ 转弯半径),达到双向通航 1 000 吨级杂货船(兼顾客滚船)标准,航道通航底高程 -4.5 m (理论最低潮面为基准面),航道设计底高程 -4.9 m 。航道疏浚边坡东侧 1:10、西侧 1:12。海安航道位置见图 1。2 条航道淤积规律基本一致,重点分析客运港航道。



图 1 海安航道位置

1.2 历年回淤情况及原因分析

1.2.1 历年回淤情况

海安客运港航道整治工程于 2002 年完工。2015 年 1 月进行了航道升级后的第 1 次维护性疏浚,不考虑备淤时,挖槽深度为 5.1 m ,2015 年航道回淤量为 13.3 万 m^3 ,平均回淤强度为 20.2 cm/a ;2016 年 1 月进行了第 2 次维护性疏浚,考虑备淤 0.4 m ,挖槽深度 5.5 m ,2016 年回淤量为 14.3 万 m^3 ,平均回淤强度为 21.8 cm/a ;2016 年 12 月进行了第 3 次维护性疏浚,考虑备淤 0.4 m ,挖槽深度 5.5 m ,2017 年回淤量为 33.1 万 m^3 ,平均回淤强度 57 cm/a 。

1.2.2 回淤成因分析

航道淤积的泥沙来源主要是工程海域周边浅滩区域的泥沙侵蚀。大部分的泥沙来自海安湾西

侧的浅滩,由于该海域潮流特性是涨潮东向流比落潮西向流大,海安湾西侧浅滩在涨潮东向流的较强动力下可以运移到海安湾并落淤到航道内,整体泥沙的输移方向是自西向东。另外一部分的泥沙来源于海安湾浅滩的侵蚀。

海安湾及海安湾西侧角尾湾的泥沙主要为黏土质粉砂,其在波浪破碎带内表现活跃,容易受波浪扰动掀起,在流的作用下移动,再以絮凝团的方式落淤,周而复始。客运港航道约有 1.7 km 航段两侧浅滩水深仅为 1.5 m ,见图 2。按缓坡破碎系数 0.6 考虑,设计低水位下破碎波高为 1.27 m 。通过浅水风浪计算得到,在 7 级风以上,波浪有效波高可达破碎波高,可见客运港航道两侧浅滩基本处于波浪破碎区。河床面泥沙极易在波浪扰动下掀起,并随东西向的涨落潮流移动,当经过航道时,由于水深变深,流速变小,水流挟沙力变弱,悬移质形式泥沙部分落淤至航道内,推移质形式泥沙基本全部落淤至航道边坡,再慢慢推移至航道内。

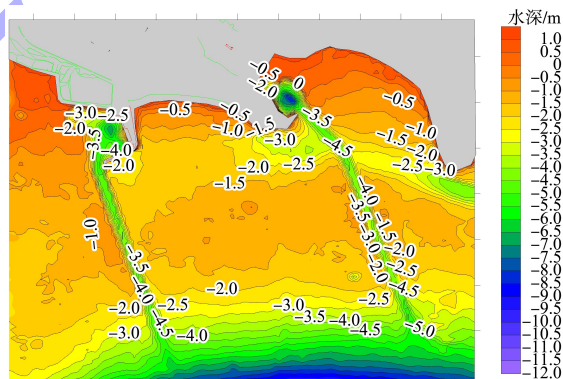


图 2 2013 年 3 月海安湾海床水深分布

2 潮流及泥沙特征

2.1 潮流特征

工程海域受琼州海峡东西两向不同类型的潮波作用,大小潮潮期呈现复杂流场特征:小潮为半日潮,大潮为全日潮,东流平均流速均大于西流平均流速,最大可达 0.84 m/s 。客运港航道中下段中心流矢量见图 3。由图可见,潮流流向与航道夹角基本大于 60° ,这也是航道回淤严重的原因之一。

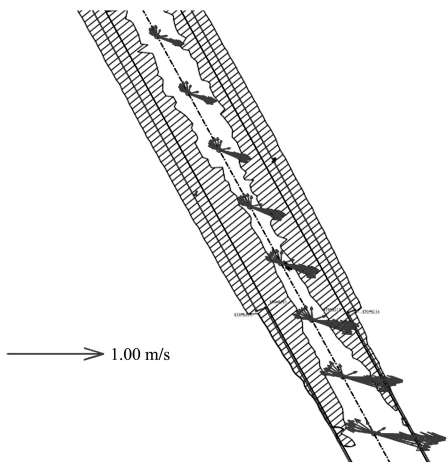


图 3 客运港航道中下段航道中心流矢量

2.2 泥沙特性

工程海域平均含沙量在 $0.017 \sim 0.267 \text{ kg/m}^3$ 。悬沙颗粒中值粒径均在 0.011 mm 以内。底质主要为黏土质粉砂。各样品中占比最多的组分为粉砂质, 比例为 $45.3\% \sim 67.8\%$; 其次为黏土质, 比例为 $22.1\% \sim 47.5\%$; 最少组分为砂质, 比例为 $0.9\% \sim 29.1\%$ 。

3 航道实测回淤分析

3.1 平面冲淤分布

根据 2016-12-15—2017-12-21 的 11 次地形测量结果, 绘制年航道冲淤变化图, 见图 4。可见航道回淤主要集中在航道边坡坡脚区域, 由航道两侧向中心发展, 逐步缩减可通航水域。从航道沿程看, 回淤主要集中在中段。

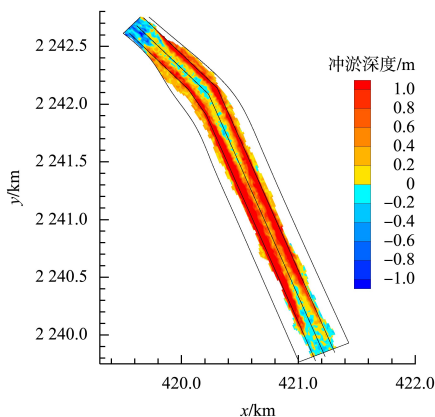
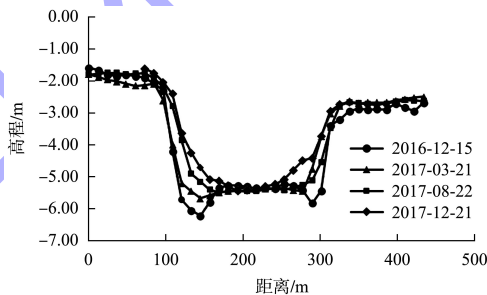


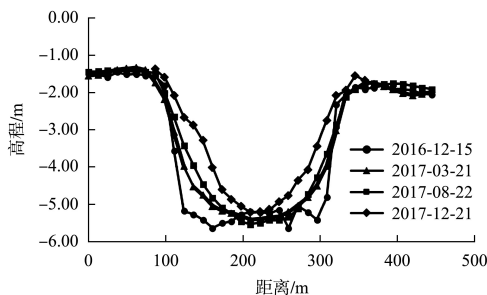
图 4 客运港航道年冲淤分布

3.2 横断面分析

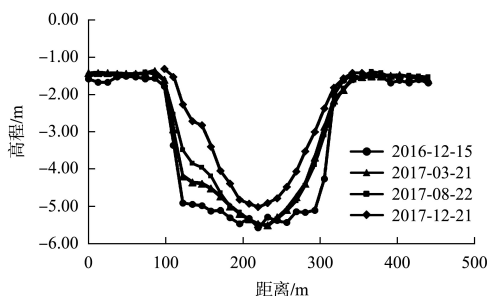
沿客运港航道布设断面, 间隔 50 m , 其中 $80^\#$ 断面代表距离航道北端点 800 m 断面。图 5 为淤积相对严重的中段典型断面。由图可知, 航道回淤刚开始主要集中在坡脚, 逐步堆积后淤至航道中间。在风浪作用下, 航道两侧浅滩泥沙被扰动后随东西向水流横越航道, 挟沙力下降, 泥沙以悬移质和推移质形式落淤航道; 当风浪作用强烈时, 海床土体将发生从局部液化到全面液化的失稳破坏, 泥沙发生流滑, 受水流拖曳力的作用被带入航道中淤积。尤其在航道两侧边坡上的泥沙, 发生液化失稳破坏之后, 在重力作用下沿坡流滑至航道中间, 大量淤积下来。航道边坡泥沙不断流滑进入航道, 导致边坡外边缘不断向外拓展, 同时边坡坡度被消缓。



a) $80^\#$



b) $100^\#$



c) $120^\#$

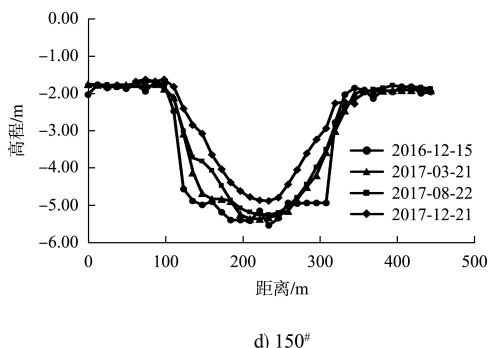
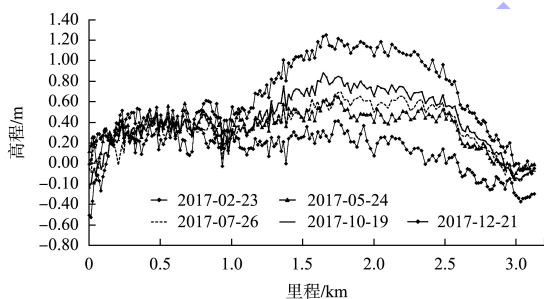


图5 客运港航道中段淤积典型断面

3.3 纵断面分布

客运港航道断面平均高程变化见图6, 2017年淤积量累积过程见图7。由图6、7可知, 客运港航道1.2~2.6 km航段范围回淤较大, 该航段3—8月回淤速率较小, 9—次年2月回淤速率较大; 据调查, 2017年9月24—25日受热带低气压影响和2017年10月14—16日受台风“卡努”影响, 航道出现骤淤, 12—次年3月寒潮频繁, 出现大风天概率较大, 泥沙相对活跃, 淤积相对严重。



注: 里程由港口起算。

图6 客运港航道断面平均高程变化

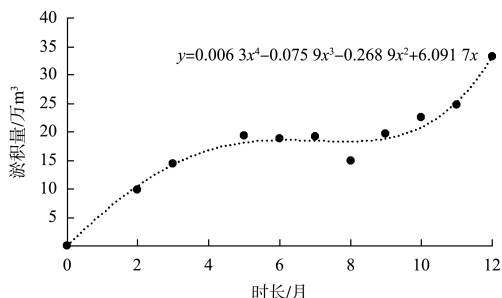


图7 客运港航道2017年淤积量累积过程

4 维护疏浚方案

维护方案设计原则为: 1) 不改变航道走向和航道尺度, 对不满足航道通航水深的浅段进行疏浚; 2) 可对航道分段、分区域取不小于原设计0.4 m的备淤深度, 保证全年满足5.1 m通航水深要求; 3) 优化航道疏浚断面设计, 减少回淤量。本研究在现状方案(备淤0.4 m、挖槽深度5.1 m、边坡1:8)的基础上提出3种维护方案。

4.1 维护方案1(航道加宽疏浚)

航道回淤特点为坡脚淤积较严重, 淤积到一定程度再进占航道。考虑航道备淤深度不变, 以航道边线为基准, 航道疏浚范围富余加宽25 m, 拓宽备淤维持0.4 m不变, 使得维护疏浚周期内泥沙淤积后, -4.5 m等深线推移不到航道边线内。以2019年3月地形测图(疏浚后)作为参照, 绘制不同维护方案下疏浚范围和水深较现状方案对比图。图8为维护方案1较现状方案疏浚水深对比。

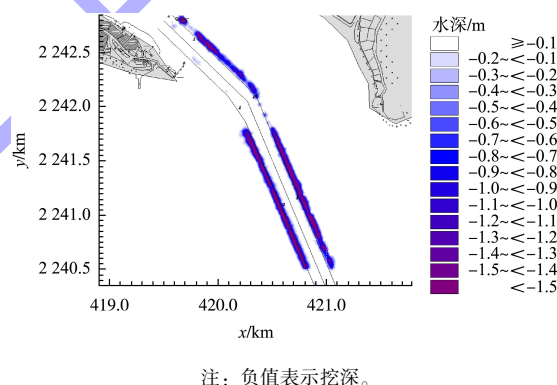


图8 维护方案1较现状方案疏浚水深对比

4.2 维护方案2(备淤加深疏浚)

根据历年维护情况, 2016年1月按备淤0.4 m维护疏浚后, 2016年11月仍需要疏浚, 维护周期不足1 a。为研究加大备淤深度对延长维护周期和泥沙回淤量的影响, 本方案考虑航道疏浚平面范围不变, 航道整体备淤深度增大至1.5 m, 使得维护疏浚周期1 a内, 泥沙淤积后航道内的水深仍能满足通航水深的要求。挖槽深度6.6 m, 挖槽底高程-6.0 m。图9为维护方案2较现状方案疏浚水深对比。

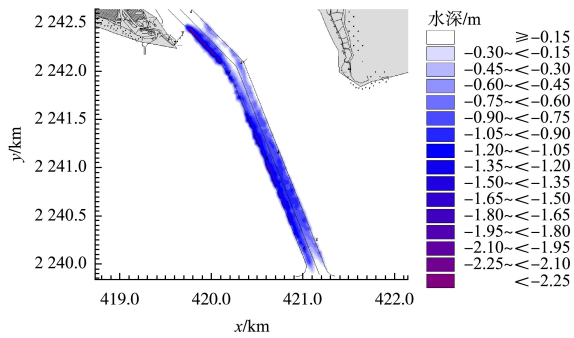


图 9 维护方案 2 较现状方案疏浚水深对比

4.3 维护方案 3(航道局部备淤加深疏浚)

根据航道回淤特性,航道淤积泥沙从坡脚往航道边线推进,考虑航道疏浚平面范围不变,航道边线一定范围内的备淤深度加大至 1.5 m,其余区域的备淤深度不变,淤积泥沙先落淤于航道边线凹槽中,使得维护疏浚周期 1 a 内泥沙淤积后的航道底高程仍满足 4.5 m 通航水深的要求。开挖

后的航槽边有一凹槽,整体开挖断面呈“山”形。航道边线航道挖槽深度 6.6 m,底高程取-6.0 m。图 10 为维护方案 3 较现状方案疏浚水深对比。

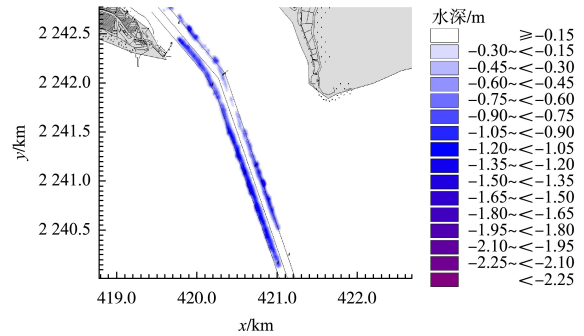


图 10 维护方案 3 较现状方案疏浚水深对比

4.4 维护方案对比

各维护方案疏浚参数对比见表 1,维护方案 1 和 3 的首次疏浚量较现状方案增加 22.8 万~25.0 万 m³,维护方案 2 的首次疏浚量较现状方案增加 66.1 万 m³。

表 1 各维护方案疏浚参数对比

方案	挖槽底高程/m	局部加宽、加深情况	较现状方案增加净疏浚量/万 m ³
现状方案	-4.9	无	-
维护方案 1	-4.9	回淤严重段航道西边线外扩 30 m,东边线外扩 35 m	22.8
维护方案 2	-6.0	无	66.1
维护方案 3	-4.9	回淤严重段航道西边线以内 40 m、东边线以内 35 m 加深至-6.0 m	25.0

5 波流耦合模型

5.1 模型建立

泥沙输移过程用对流-扩散方程,波浪模型采用波浪能谱守恒方程。采用 2 层模型嵌套建立二维波流耦合泥沙模型,大模型为琼州海峡模型,小模型为工程海域模型,计算网格采用非结构三角网格,模型地形为琼州海峡 2012 海图和海安湾 2013 年测图及航道 2019 年测图概化而成。航道附近网格大小约 10 m。模型范围、地形、网格分别见图 11~13。

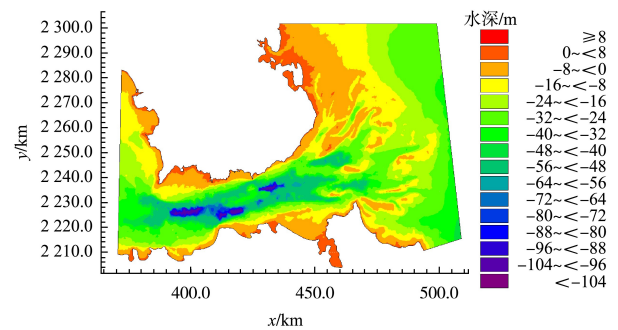


图 12 琼州海峡地形分布(平均海平面基准面)

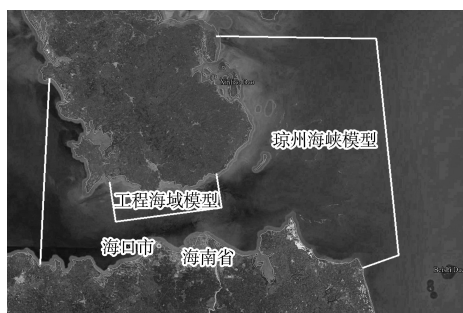


图 11 二维嵌套模型范围

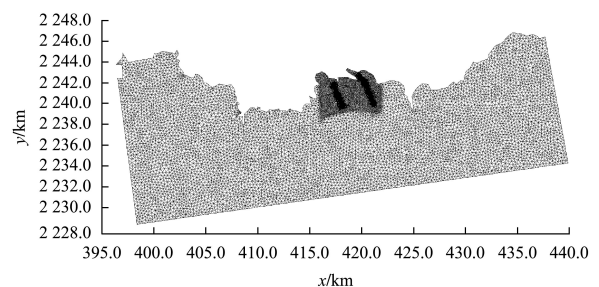


图 13 模型网格

泥沙模型采用 2 个组分, 底质采用 2 个活动层, 考虑絮凝沉速。潮流模型中考虑波浪破碎引起的辐射应力的影响。

琼州海峡波浪模型应用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 波浪资料作为开边界, 应用 ECMWF 风资料计算琼州海峡海域一整年的波浪。工程海域波浪模型模拟一整年的波浪过程, 并计算波浪辐射应力场, 为潮流泥沙模型输入波浪场和波浪辐射应力场。琼州海峡潮流模型边界提取全球潮汐模型一周年的潮位过程。

5.2 模型参数率定和验证

模型验证包括潮位、潮流、悬沙含沙量、地形验证, 验证过程见图 14。地形验证选取 2016-12-15 和 2017-12-21 的实测地形数据。提取模型计算结果航道沿程每个断面的平均回淤厚度, 绘制航道沿程平均回淤分布曲线, 并与实测结果对比。见图 15。从潮位、潮流、含沙量及地形验证结果可看出模型结果总体上基本反映了工程海域的河床演变基本稳定平衡的实际情况, 模型计算结果与实测冲淤分布基本相符, 计算误差满足规范要求。

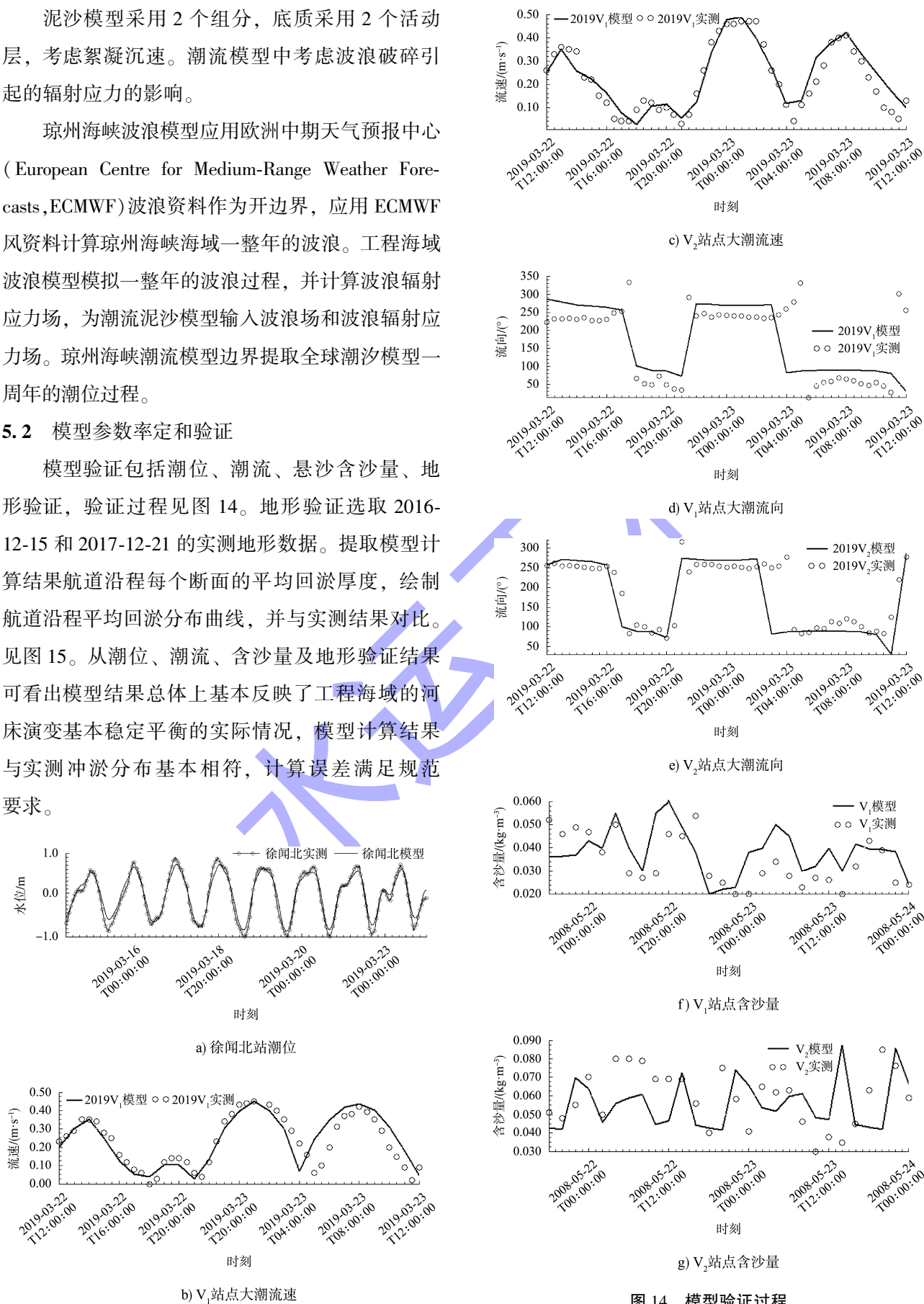


图 14 模型验证过程

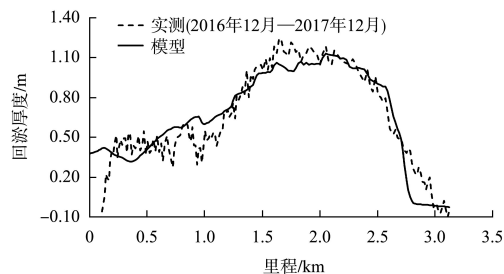
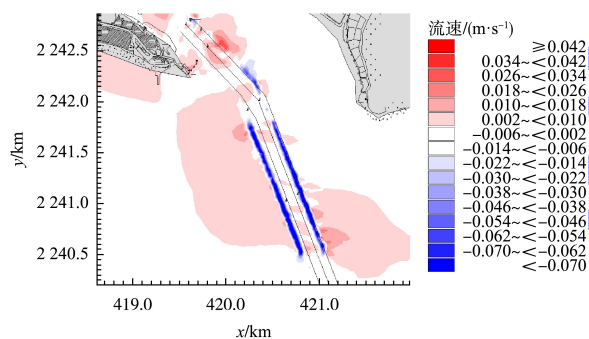


图 15 客运港航道沿程断面平均回淤厚度分布

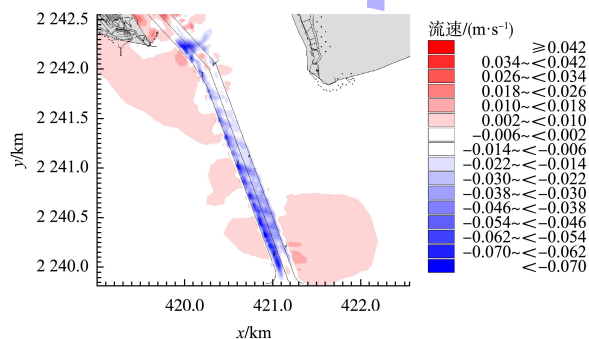
5.3 模型计算结果

波流耦合悬沙模型中考虑风生流、波生流及波浪掀沙的作用，同时考虑地形对流的影响。模型计算 2016-12-10—2017-06-14 潮流波浪泥沙过程，模型加速因子为 2，反演全年回淤过程。

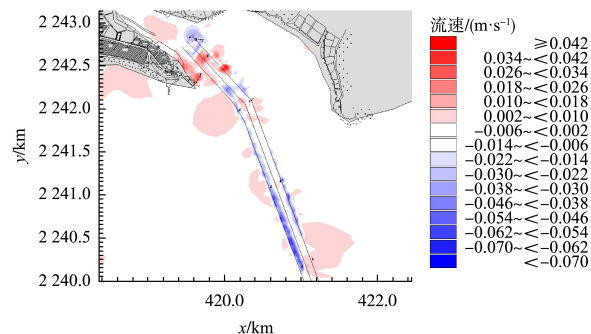
图 16 为 3 个维护方案与现状方案的流速对比。可见，维护方案 1 在航道边线外拓宽范围内流速明显减小；维护方案 2 备淤加深，航道内总体流速减小；维护方案 3 在航道边线凹槽内流速也明显减小。



a) 维护方案1



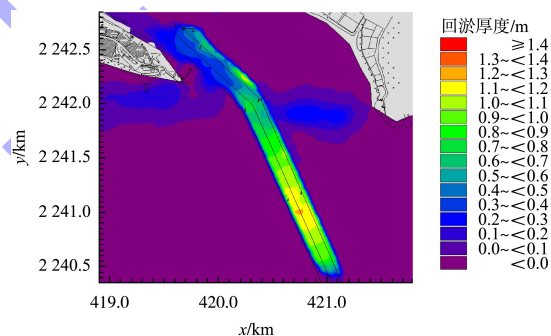
b) 维护方案2



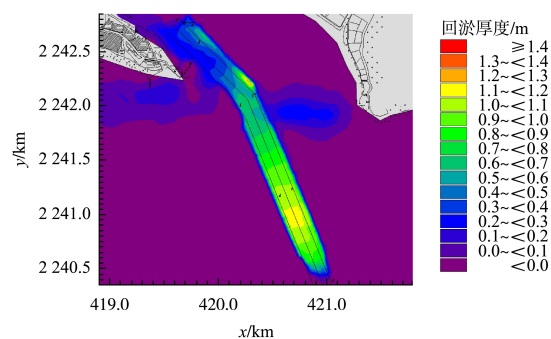
c) 维护方案3

图 16 各方案涨急东向流速与现状方案对比

图 17 为各方案航道年回淤厚度分布。可见，维护方案 1 较现状方案淤积严重航段的淤积厚度稍有减小；维护方案 2 较现状方案回淤厚度总体增加，但增加幅度小于 0.2 m；维护方案 3 在航道边线加深的凹槽内回淤厚度稍有增加。



a) 现状方案



b) 维护方案1

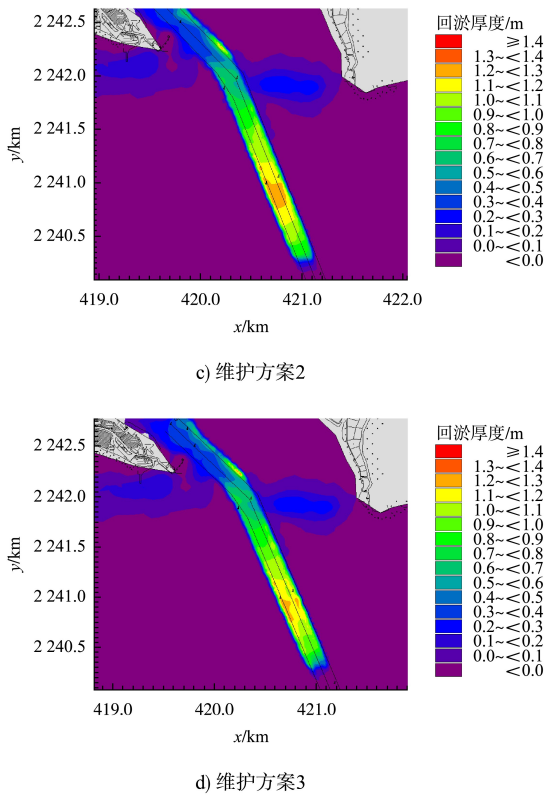


图 17 各方案航道年回淤厚度分布

各方案航道沿程断面平均回淤厚度分布曲线见图 18。可见，各方案较原方案沿程回淤厚度在 1.0~2.8 km 段增加相对明显，回淤厚度从小到大依次为维护方案 1、现状方案、维护方案 3 和维护方案 2。表 2 为各方案泥沙回淤量对比。

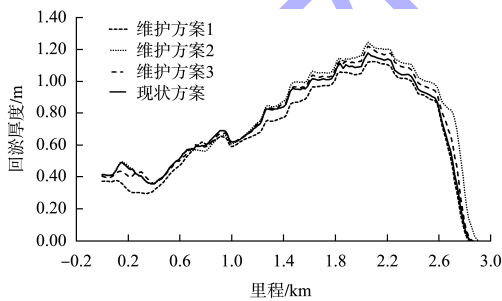


图 18 各方案沿程断面平均回淤厚度分布

表 2 各方案泥沙回淤量对比

方案	年平均淤强/m	淤积总量/ 万 m ³	淤强增量/ (m·a ⁻¹)	淤积总量 增量/万 m ³
现状方案	0.62	35.53	—	—
维护方案 1	0.58	33.10	-0.04	-2.43
维护方案 2	0.72	40.84	0.09	5.31
维护方案 3	0.66	37.47	0.04	1.94

维护方案 1 与现状方案对比，沿程平均回淤厚度最大减小约 0.1 m。全航道年平均淤厚较现状方案减小 0.04 m，回淤总量比现状方案减小 6.83%；维护方案 2 中间航道回淤明显增加，平均回淤厚度增量最大约 0.2 m。全航道年平均淤厚较现状方案增加 0.1 m，回淤总量较现状方案增加 15.0%；维护方案 3 沿程回淤厚度增量最大约 0.15 m。全航道年平均淤厚较现状方案增加 0.04 m，回淤总量增加 1.94 万 m³。回淤总量较现状方案增加 5.5%。

由以上计算结果可见，维护方案 1 对疏浚范围进行局部拓宽，泥沙堆积在坡脚，减缓进占航道时间，有利于延长维护周期，年泥沙回淤量有所减少；维护方案 2 较现状方案备淤深度增加 1.1 m，平均回淤厚度仅增加 0.1 m，可有效保证维护周期 1 a 内水深满足要求。

6 结语

- 1) 对航道进行拓宽可以有效降低航道的年回淤量；航道边坡对航道回淤存在影响，较缓的边坡可减小航道回淤。
- 2) 对于坡脚淤积较大的航道，在淤积航段边界向外适当拓宽，可有效减少回淤量，延长维护周期。但对于维护周期内水深是否可满足通航要求，需进行进一步观测或研究。
- 3) 通过加大备淤深度，在航道回淤增加幅度较小的情况下，可有效延长维护周期。
- 4) 研究具有一定的经济价值，可为开敞式粉砂淤泥质航道的维护方案提供参考价值。

参考文献：

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[2] 曹祖德, 焦桂英, 赵冲久. 粉沙质海岸泥沙运动和淤积分析计算[J]. 海洋工程, 2004, 22(1): 59-65.

[3] 刘家驹. 淤泥质、粉沙质及沙质海岸航道回淤统一计算方法[J]. 海洋工程, 2012, 30(1): 1-7.