



# 岛群峡道港口工程开发动力地貌响应研究 ——以虾峙渔港工程为例

曾凡兴<sup>1</sup>, 黄钦洲<sup>2</sup>, 章卫胜<sup>1</sup>, 张金善<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 港口航道泥沙工程交通部重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 舟山市普陀区渔港建设管理有限公司, 浙江 舟山, 316100)

**摘要:** 峡道独特的地形和位置使得峡道内或峡道间存在水动力和泥沙运动、沉积作用、地形冲淤等相互作用。以虾峙岛渔港工程为例, 结合现场水文测验和实测地形资料, 分析海域动力泥沙环境和渔港工程实施后的海床泥沙沉积过程; 并通过潮流数学模型研究渔港防波堤工程实施前后的水流变化, 从动力机制上解释了海床冲淤变化的原因。从动力地貌学角度提出增加口门宽度, 恢复涨落潮动力的整治思路, 并通过泥沙数学模型预测了相应方案实施后的效果。研究可为类似岛群峡道港口工程开发提供借鉴。

**关键词:** 舟山群岛; 峡道; 动力地貌; 港口工程; 条帚门水道

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0073-08

## Morphodynamic behavior of strait channels in response to port engineering around island group: a case study of Xiazhi fishing port

ZENG Fan-xing<sup>1</sup>, HUANG Qin-zhou<sup>2</sup>, ZHANG Wei-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Jin-shan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of Ministry of Transport,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Zhoushan Putuo District Fishing Port Construction Management Co., Ltd., Zhoushan 316100, China)

**Abstract:** The unique topography and location of the strait channels makes the interaction of hydrodynamic and sediment transport, sedimentation, topographic erosion and deposition in or between the channels. Taking the Xiazhi fishing port project as an example, based on the field hydrological survey and the measured topographic data, the dynamic sediment environment and the evolution of seabed erosion and deposition after the implementation of fishing port project are analyzed. The influence to current of the breakwater project of the fishing port is studied through the mathematical model, and the reasons for the changes of seabed erosion and deposition are explained from the dynamic mechanism. From the perspective of dynamic geomorphology, the regulation idea of increasing the width of the gate and restoring the hydrodynamic intensity is put forward. The research can provide a reference for the development of port engineering in similar sea areas.

**Keywords:** Zhoushan Islands; strait channels; dynamic geomorphology; port engineering; Tiaozhoumen waterway

峡道是岛与岛、岛与陆、及陆与陆之间的沟通两端较大水体的水流通道<sup>[1]</sup>。与受径流影响的河口环境不同, 也不同于开敞水域和半封闭的海

湾环境, 峡道内水流受潮流作用的显著影响。受两侧地形的约束作用, 峡道内进出水体大多表现为往复流运动。峡道与一般意义上的潮汐汉道差

收稿日期: 2021-12-03

作者简介: 曾凡兴(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口、海岸与近海工程。

通讯作者: 张金善(1963—), 男, 博士生导师, 正高级工程师, 从事海岸工程研究。E-mail: jszhang@nhri.cn

异在于,其连接的是两片开阔海域,没有封闭的纳潮海湾或泻湖<sup>[2]</sup>。峡道独特的地形和位置使得峡道内或峡道间存在水动力和泥沙运动、沉积作用、地形冲淤等相互作用,称为“峡道效应”<sup>[3]</sup>。岛群环境下峡道的研究不同于一般的峡道或单一的峡道,其往往包含多个峡道,且峡道之间存在内在“效应”,其水流泥沙问题更为复杂。因此,岛群环境下峡道的水动力地貌研究是海岸动力地貌研究中的一个重要方面,具有较高的理论和应用价值。

浙江舟山群岛海域是我国著名的岛群海域,岛屿众多,岛屿之间峡道纵横分布。由于这些潮汐通道具有潮流强度适中、水深稳定、受外海波浪作用影响较小等特点,是适宜港口开发的优良水域。近几十年来,已经建成数十个港区,上百个大型和特大型泊位。在海岸带开发过程中,港口开发、滩涂匡围、航道整治等人类活动已经成为一种重要的影响因素,对河口海岸地区的水动力地貌环境均产生巨大影响<sup>[4]</sup>。

海岸带上的动力地貌研究主要是研究在波浪、潮汐、海流、风等动力因素作用下海底地形地貌的演变过程。在自然条件下,海岸动力因素、海岸地貌和沉积物的相互作用往往趋于一种动态平衡<sup>[5]</sup>。当受到人类活动影响或自然条件变化时,这种平衡将被打破,系统将通过自身调整向新的地貌均衡演化。蒋国俊、陈沈良等<sup>[6-8]</sup>分别对舟山群岛、崎岖列岛峡道的水文泥沙特性和沉积特征进行了深入的分析。卢惠泉等<sup>[9]</sup>对海坛海峡峡道动力地貌特征进行了分析研究。近几十年来,因港口建设的需要,我国的一些研究、设计单位及高等院校,从不同角度在浅海和峡道海区的水动力、泥沙、沉积、地貌以及数值模拟等方面开展了大量研究,但大多都是运用河道、河口或海岸的泥沙理论围绕具体工程问题进行研究或计算<sup>[10-11]</sup>,对于具体的地貌响应过程涉及较少。

虾峙岛渔港位于舟山群岛南部的条帚门水道,岛屿、峡道相间,水流和泥沙运动复杂。本文以虾峙渔港工程为例,首先通过工程海域潮流数学

模型结合实测水文资料对研究海域现状和工程实施以后的潮流场进行了数值计算,研究渔港工程实施以后动力条件的变化;在此基础上,结合现场实测地形资料,分析渔港工程实施后的动力地貌响应过程。该研究可加深对峡道动力与地形演变认识,并且可为舟山群岛峡道地区深水岸线和深水航道资源的开发利用提供科学依据。

## 1 研究区域概况

舟山群岛南部水域较大的岛屿有虾峙岛、桃花岛、登步岛、六横岛等构成舟山群岛东南部东北—西南走向的岛链。岛屿之间的水道由东北向西南分别为福利门水道、清滋门水道、虾峙门水道、条帚门水道和牛鼻山—佛渡水道。这五大水道为北仑港水域涨落潮主要通道。其中佛渡水道紧靠穿山半岛,北接北仑区的螺头水道,南连虾峙水道、条帚门水道和牛鼻山水道。虾峙一级渔港位于舟山市普陀区虾峙岛的西南面条帚门水道,见图1。

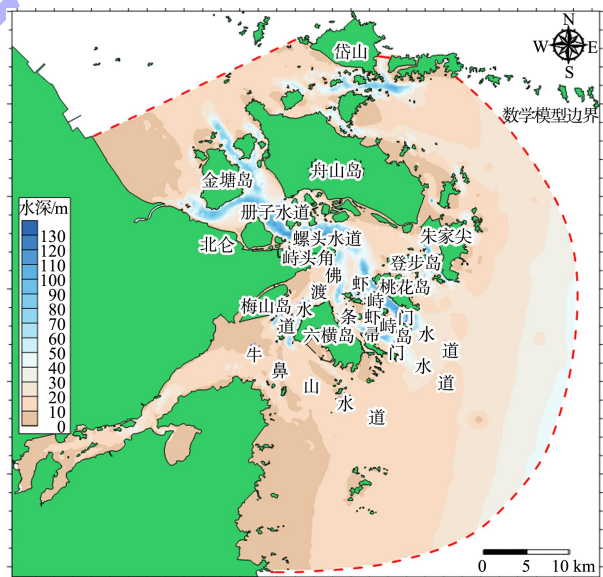


图1 舟山群岛南部水域形势

条帚门水道两侧的岛屿岸线为基岩岸线和人工岸线,岩基屹立,抗冲性强,海岸基本没有冲刷现象发生。2003—2007年间在长山岛和虾峙本岛之间建成约480 m长的防波堤,口门宽度60 m,口门处设计底高程-4.0 m(1985国家高程基面),

施工完成时实际底高程约为-2.0 m。虾峙渔港由虾峙本岛、长山岛所围成的水域和岸线组成, 水域紧邻条帚门水道。在防波堤掩护区建有渔业码头。建港初期地形满足水深条件, 不需要地形开挖。随后由于掩护区泥沙淤积, 2013 年 1 月在现场开挖航道, 航道底高程为-5.5 m, 2016 年后基本淤平, 见图 2。

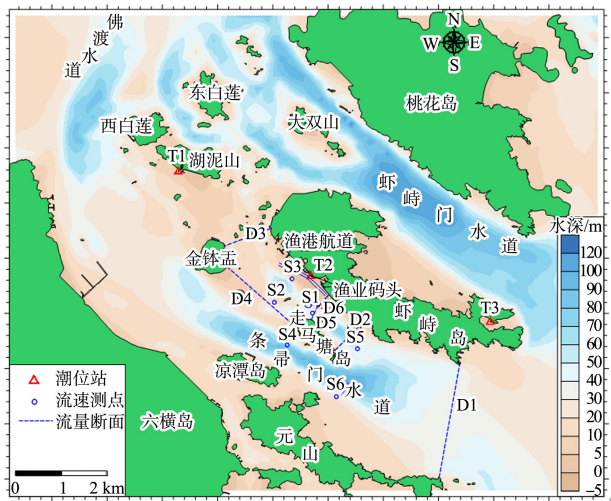


图 2 虾峙岛局部海域水深及实测流速站位分布

2 动力泥沙环境

舟山群岛海域潮汐来自于东中国海前进潮波。根据 2016 年 6 月 16 日—7 月 2 日半个月的现场潮位资料统计( 站位见图 1), 海域平均潮差 2.06~2.78 m, 平均涨潮历时 5 h 46 min~5 h 51 min, 平均落潮历时 6 h 30 min~6 h 47 min。

根据 2016 年 6 月现场 6 个测点大、小潮流速、流向资料统计( 站位见图 2), 海域潮流为规则半日潮。海域潮流运动形式以往复流为主; 主通道内的流速较大, 实测大潮垂线最大流速为 1.82~1.97 m/s, 大潮涨落潮平均流速为 0.68~1.11 m/s; 浅滩流速较小, 大潮垂线最大流速为 0.73~0.79 m/s, 涨落潮平均流速为 0.15~0.45 m/s。测区大部分测点涨落潮流速基本相当; 各垂线大潮涨潮流历时 5 h 4 min~5 h 51 min, 落潮流历时 6 h 28 min~7 h 16 min; 落潮历时长于涨潮历时。

测验期间海域大潮平均含沙量 0.09~0.16 kg/m<sup>3</sup>, 小潮平均含沙量 0.05~0.09 kg/m<sup>3</sup>。悬移质主要由粉砂和黏粒组成, 中值粒径 0.010~0.013 mm。舟

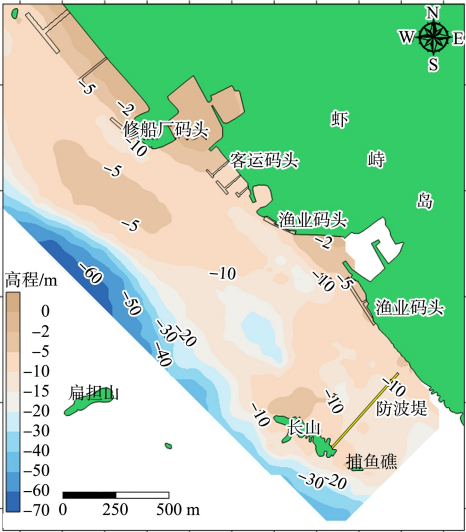
山群岛海域含沙量具有明显区域和季节变化, 冬季普遍高于夏季<sup>[12]</sup>。2016 年 10 月在虾峙渔港附近进行了为期 1 个月的含沙量表层取样, 换算垂线平均含沙量值为 0.22~0.25 kg/m<sup>3</sup>。

水域浅水区底质类型主要由粉质黏土和黏土组成, 测点中值粒径基本在 0.008~0.015 mm, 与悬沙粒径接近; 主通道内深水区以卵石为主, 粒径较粗, 体现峡道底质的横向分选。

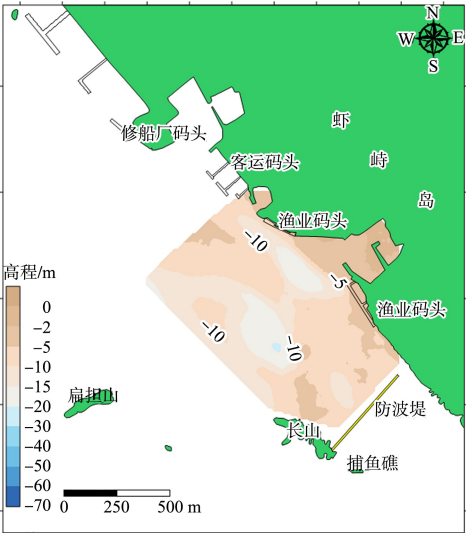
3 海床冲淤演变

根据防波堤局部 2001、2007、2011、2016 年现场实测地形资料分析工程实施引起的海床冲淤变化, 见图 3。2001 年 2 月资料显示, 长山岛北侧、内港池口门附近共存在 3 个深槽: 局部高程均达到-27~-25 m, 低于周边浅滩 20 m 左右。船厂码头附近地形高程为-16.0 m 左右, 应为港池开挖所致。周边浅滩地形在-4.5~6.0 m。防波堤于 2003 年开始建设, 2007 年建成, 之后 3 个深槽产生明显的淤积。2007 年 5 月地形资料显示, 长山岛北侧深槽地形在-21 m 左右、内港池口门附近深槽地形高程在-20 m 左右, 防波堤内侧地形抬升至-11.0 m; 周边浅滩地形在-5.0~-3.5 m。对比可以看出, 2001—2007 年渔业码头之间内港池口门外侧淤积 2.0~7.4 m、走马塘岛北侧深槽的边滩附近淤积 2.0~8.3 m, 而防波堤内侧区域淤积 2.0~9.0 m。2011 年 4 月资料显示, 长山岛北侧深槽地形淤积至-10m、内港池口门附近深槽地形高程在-8.6m, 防波堤内侧地形抬升至-3.0 m; 周边浅滩地形在-2.7~-1.5 m。对比可以看出, 2007—2011 年渔业码头之间内港池口门外侧淤积 2.0~10.8 m; 走马塘岛北侧深槽的边滩附近最大淤积 2.0~13.7 m; 而防波堤内侧区域最大淤积 2.0~7.6 m。周边区域淤积速度基本在 0.4~1.2 m/a。2016 年 6 月地形测量资料显示, 长山岛北侧深槽地形淤积至-5 m 左右、内港池口门附近深槽地形高程在-1.9 m 左右, 防波堤内侧地形抬升至-0.5 m 左右; 整个深槽基本淤平, 与周边浅滩连成一片。内港池口门至船厂码头之间水域地形在-2.0~

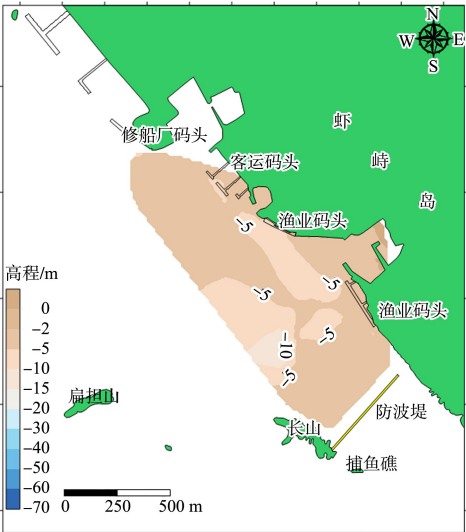
-1.4 m，防波堤内侧浅滩淤积至-0.2 m。



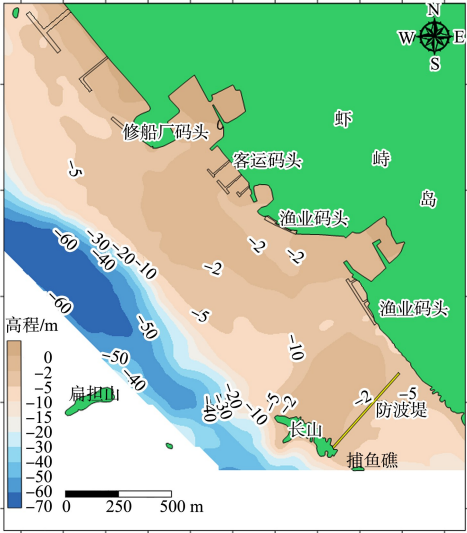
a) 2001年



b) 2007年



c) 2011年



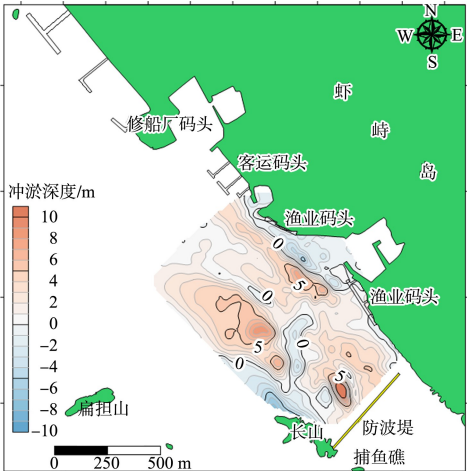
d) 2016年

图 3 不同年份地形对比

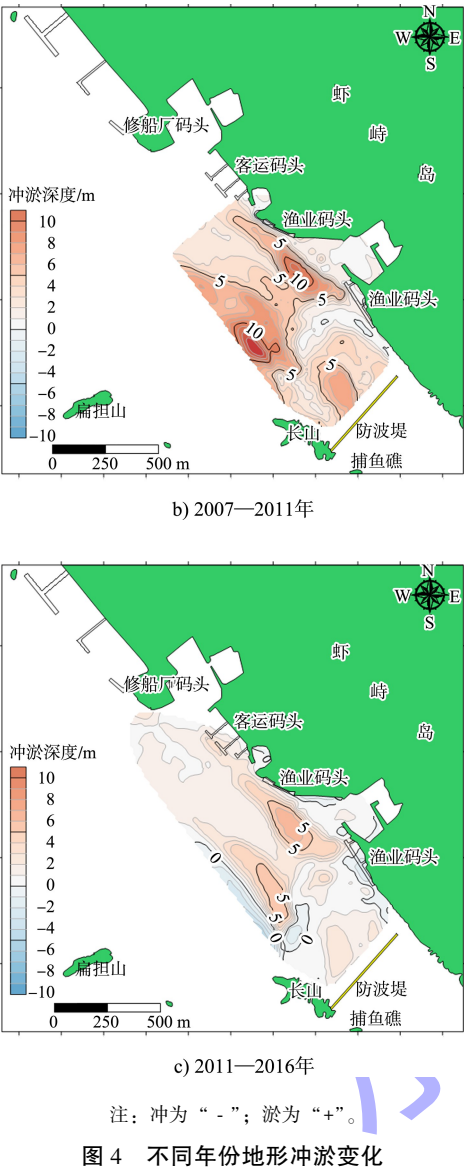
表 1 和图 4 为根据资料对比得到的地形淤积速率比较。可以看出，防波堤建成的前 5 a(2007—2011 年)为地形调整的主要回淤期，深槽淤积速率为 1.9~3.4 m/a，浅滩淤积速率为 0.4~0.9 m/a；深槽淤积速率大于浅滩。在建成后 5~10 a(2011—2016 年)淤积有所缓和，深槽淤积速率为 1.1~1.3 m/a，浅滩淤积速率为 0.1~0.3 m/a。

表 1 地形淤积比较

区域	年度	初始地形/m	淤积速率/( $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ )
深槽	2001—2007	-27.0~-25.0	1.9~2.3
	2007—2011	-21.0~-11.0	1.9~3.4
	2011—2016	-10.0~-8.6	1.1~1.3
其它水域	2001—2007	-7.0~-3.8	0.2~0.3
	2007—2011	-5.5~-3.5	0.4~0.9
	2011—2016	-3.5~-1.5	0.1~0.3



a) 2001—2007年

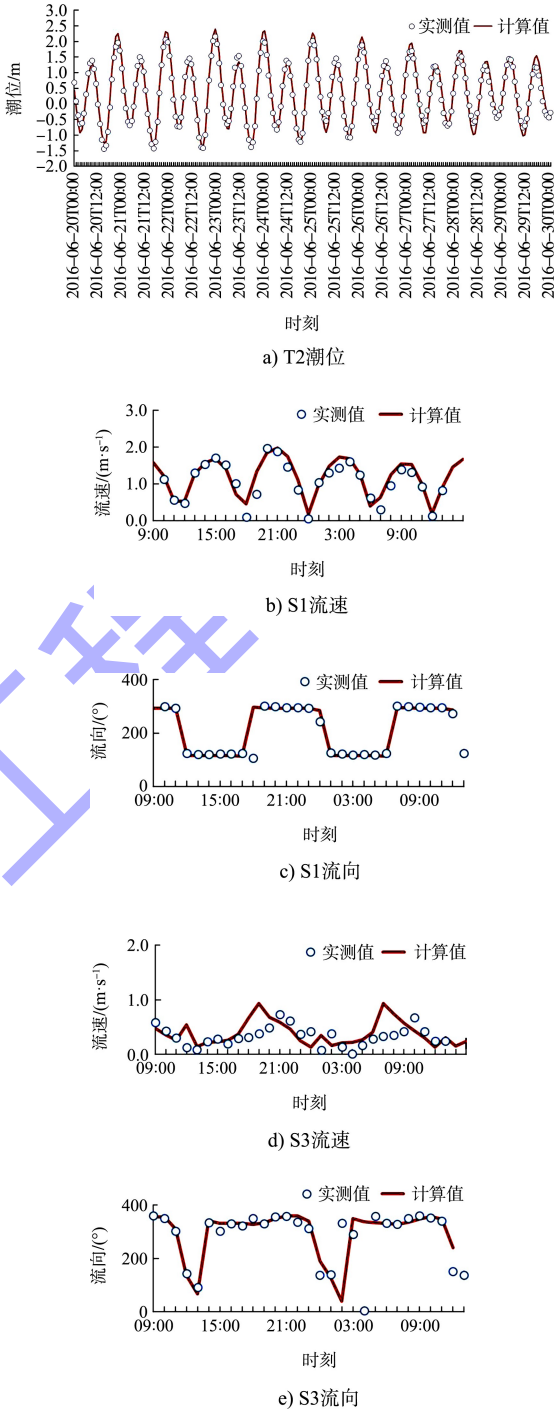


4 渔港工程动力影响分析

4.1 平面二维潮流数学模型

采用丹麦 DHI 公司 Mike21 的水流模块 (FM)<sup>[13]</sup> 在杭州湾大范围潮流数学模型基础上建立工程海域局部潮流数学模型(图 1)。模型采用精细网格模拟岸线和工程边界, 局部网格尺度为 10 m, 网格单元数 15.7 万个, 节点数 8.1 万个。

在 2016 年 6 月下旬进行了现场水文测验, 包括 3 个临时潮位站连续 15 d 潮位测量, 具体站位见图 2。采用 6 条垂线大、小潮流速流向和含沙量资料对潮流数学模型进行了验证, 部分站位验证过程见图 5, 更多的验证情况可参见文献[14]。可以看出数学模型的验证结果良好。



4.2 断面流量影响

在数学模型中设置了 6 条断面(D1~D6), 其中 D1 位于条帚门南口元山岛和虾峙岛之间, D2 位于走马塘岛和虾峙岛之间, D3 位于金钵孟岛和虾峙岛之间, D4 位于金钵孟岛和走马塘岛之间, D5 位于走马塘岛和长山岛之间, D6 位于长山岛和虾峙岛之间, 断面位置见图 2, 断面宽度见表 2。

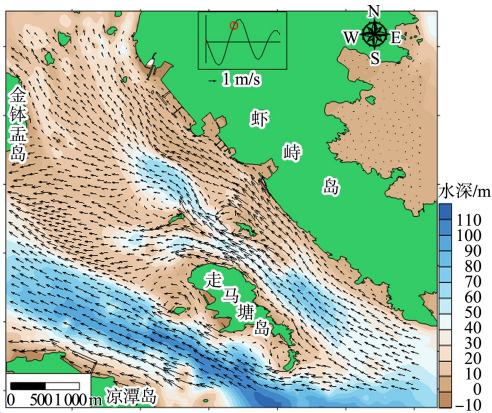
表 2 主要断面涨落潮进出流量变化

断面	宽度/m	涨潮流量/ $10^8\text{ m}^3$		变化率/%	落潮流量/ $10^8\text{ m}^3$		变化率/%
		工程前	工程后		工程前	工程前后	
D1	4 148	15. 61	15. 29	-2. 06	23. 00	22. 79	-0. 88
D2	1 253	5. 25	4. 51	-14. 08	5. 64	5. 11	-9. 40
D3	1 742	3. 17	2. 91	-7. 92	4. 18	4. 21	0. 64
D4	3 120	2. 89	2. 46	-14. 93	2. 12	1. 64	-22. 76
D5	525	4. 20	4. 44	5. 76	4. 85	5. 06	4. 34
D6	540	1. 04	0. 05	-95. 27	0. 77	0. 02	-97. 35

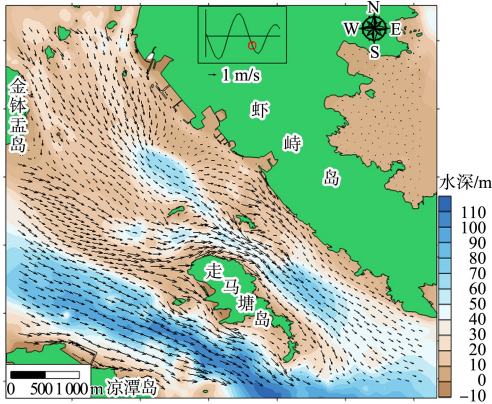
根据数学模型计算，条帚门水道落潮流量大于涨潮流量。渔港工程建成以后，条帚门水道进口断面(D1)大潮涨落潮流量减小幅度在 0. 88%~2. 06%，走马塘岛东侧断面(D2)大潮涨落潮流量减小幅度在 9. 40%~14. 08%，减幅明显。受其影响，走马塘岛东、西侧水道潮量交换(D4)也明显减弱。D3 由于涨潮流量减小，在其它水道潮汐影响下，落潮流量略有增加。长山岛西侧 D5 则因为工程建设流量增加 4. 34%~5. 76%，东侧断面则因为防波堤建设流量减小 95%以上。

4.3 流场及水动力影响

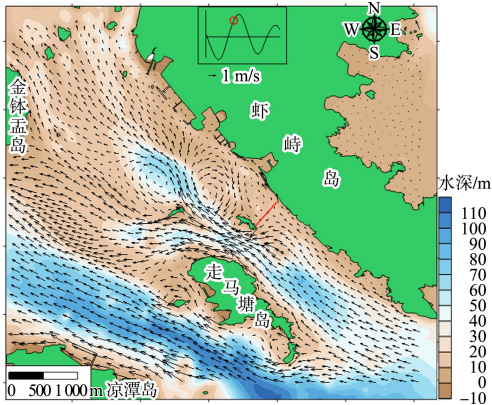
虾峙渔港附近海域岛屿、汉道交错，深槽和边滩相间，涨落潮水流较为复杂。涨潮时，涨潮流沿外口进入条帚门水道后，被走马塘岛分为东西两支，其中西支为条帚门水道的主通道，东支进入走马塘岛与虾峙岛之间的通道。东支主流通过长山岛西侧深槽，一部分绕过扁担山进入条帚门主通道；另一部分则和长山岛东侧浅滩水域涨潮流一起沿虾峙岛向北运动。落潮时，水流流路相反，虾峙岛和金钵孟岛之间的落潮流由北口进入通道，与金钵孟岛西侧部分落潮流汇合后一同进入走马塘岛东侧通道，向东南海域运动。虾峙渔港工程实施以后，由于防波堤建设使得长山岛东侧断面缩窄，长山岛西侧剩余通道内水流明显增强。一部分涨潮流在防波堤后侧形成顺时针涨潮回流及稍小尺度的逆时针回流，大部分涨潮流则沿虾峙岛岸线继续向北运动。落潮时，渔港防波堤北侧落潮流较弱，南侧在主深槽边缘形成逆时针落潮回流(图 6)。



a) 工程前涨急



b) 工程前落急



c) 工程后涨急

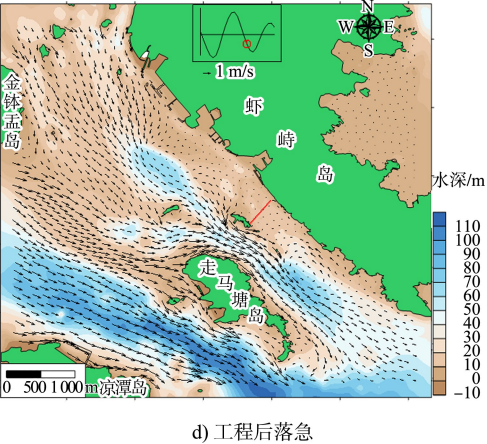


图 6 虾峙渔港工程建设前、后涨落急流场

从渔港工程实施后附近海域平均流速变化(图 7)可以看出, 渔港工程实施以后, 防波堤两侧约 3.0 km 范围涨落潮流速减小明显, 局部减幅可达 0.90~1.20 m/s。长山岛东侧深槽流速增加, 长山岛局部最大增幅在 0.30~0.80 m/s 之间; 流速增加区域涨潮时位于工程西北方, 落潮时偏西南向。

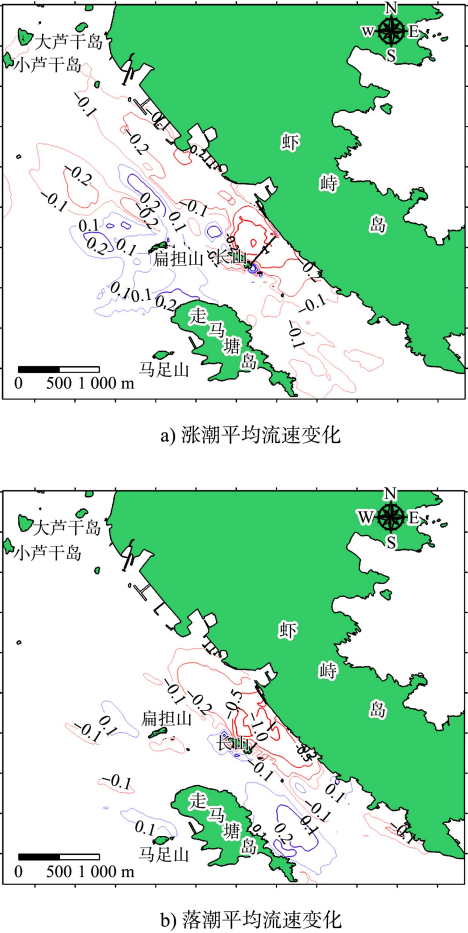


图 7 虾峙渔港大潮涨、落潮平均流速变化 (单位: m/s)

5 整治方案与整治效果

5.1 地形冲淤模型复演

在潮流数学模型基础上, 利用丹麦 DHI 公司 Mike 21MT 模块<sup>[13]</sup>建立海域泥沙输运数学模型, 其范围与潮流数学模型相同。利用数学模型对防波堤工程引起的地形冲淤变化进行复演。根据 2011、2016 年地形得出平均每年的地形冲淤分布, 以此作为实测资料对模型的地形冲淤进行验证, 数学模型计算结果和实际地形结果见图 8。可以看出, 整个防波堤内部淤积明显, 其中最大淤强 1.25 m/a 左右, 模拟结果与实测结果比较接近。

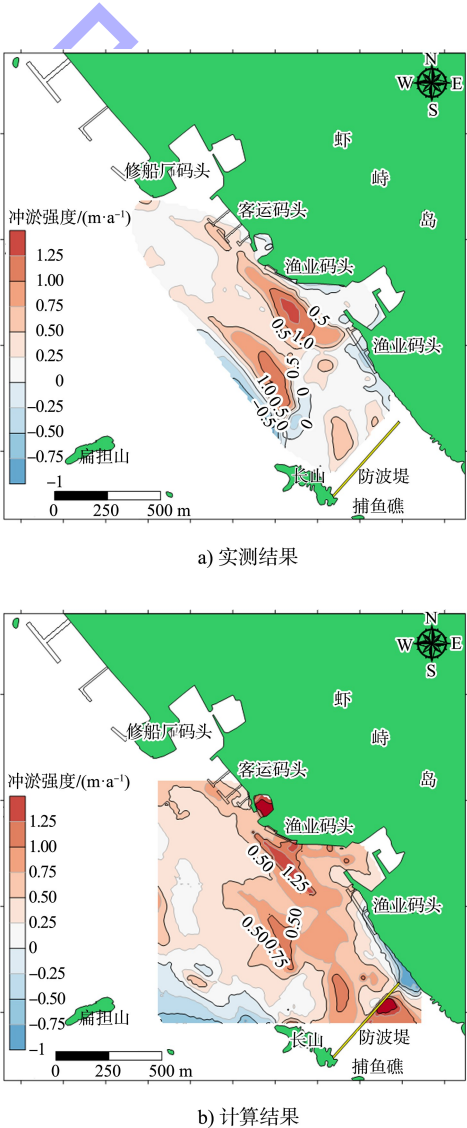


图 8 数学模型计算冲淤分布和实测结果对比

5.2 整治思路

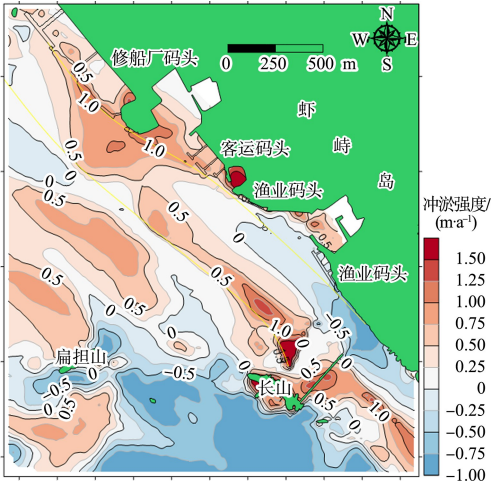
根据当地潮流、泥沙运动分析, 虾峙一级渔港

港池和航道淤积的泥沙来源为悬沙落淤。虾峙岛海域水流较强，水体含沙量较大；渔港防波堤建成以后，阻隔了涨落潮水流，减弱了潮流动力，尤其是涨潮时，在防波堤内侧形成涨潮回流，使得防波堤掩护区域成为悬沙淤积区。现有的 60 m 口门对于整个淤积区的改善影响较小。因此，减少淤积的整治思路首先是考虑扩大口门宽度，恢复涨落潮动力，并减小回流影响范围；同时，对口门通道局部地形进行清淤，增加口门断面的进出潮量。

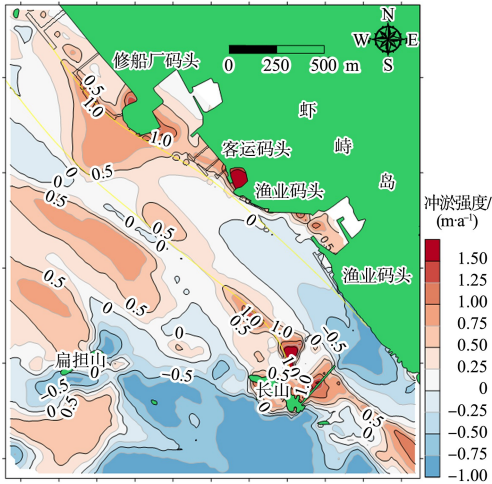
根据以上整治思路，提出以下 2 个整治方案：方案 1，拆除防波堤 130 m，使得口门宽度增至 190 m；方案 2，拆除防波堤 200 m，使得口门宽度增至 260 m。同时，清理航道和口门南侧浅滩约 400 m 范围至水深-6.0 m。

5.3 整治方案效果

图 9 为 2 种方案整治工程实施后局部地形冲淤变化。可以看出，整治方案 1 实施后，预留口门附近地形基本没有淤积，呈略有冲刷趋势；长山岛内侧开挖根部回淤强度在 1.5~2.0 m/a；防波堤掩护段航道淤积基本在 0.5~1.0 m/a，修船厂码头外侧水域地形淤积在 0.8~1.0 m/a。计算航道开挖区内年回淤总量为 29.3 万 m<sup>3</sup>，平均淤强 0.44 m/a。整治方案 2 最大回淤强度与方案 1 基本一致，但回淤区域面积缩小。计算航道开挖区内年回淤总量为 18.9 万 m<sup>3</sup>，平均淤强 0.28 m/a。可以看出，整治工程实施以后，海域的泥沙淤积相比现状有明显改善，且 200 m 开口方案效果更优。



a) 方案1



b) 方案2

图 9 整治方案实施后地形冲淤

6 结语

1) 虾峙一级渔港位于舟山群岛水域虾峙岛的西南面条帚门水道，属于典型的峡道水域，主槽流速强劲，浅滩流速较弱。防波堤建成以后，条帚门水道进口断面涨落潮流量有所减小，走马塘岛东侧断面涨落潮流量明显减小，同时走马塘岛东、西侧水道潮量交换也相应减弱。长山岛西侧通道内水流增强，防波堤两侧流速大幅减弱，并在防波堤北侧形成顺时针涨潮回流，南侧形成逆时针落潮回流。

2) 渔港工程实施以前，峡道海床基本冲淤平衡。工程建成以后，虾峙岛西侧近岸浅滩和渔港防波堤两侧浅滩区域产生明显的泥沙沉积。在工程实施后掩护区深槽回淤速率大于浅滩；回淤区在 5 a 内泥沙淤积速率较强，5~10 a 以后回淤速率明显减小，浅滩区域淤积趋于平衡。

3) 虾峙岛海域水流较强，水体含沙量较大；渔港防波堤建成以后，阻隔了涨落潮水流，减弱了潮流动力；防波堤内部的弱流环境使得水域成为泥沙淤积环境，防波堤两侧的涨落潮回流进一步加大了水体中的泥沙沉积。这是当地海床冲淤变化的动力原因，从动力地貌学角度，若要改变当地的沉积环境，需从增加渔港水域涨落潮动力，减小含沙水体中的泥沙淤积方面着手。提出的整改方案思路可为类似环境下的港口工程开发提供借鉴。

(下转第 198 页)