

# 莱州湾东部外航道回淤预测及影响因素

朱龙海<sup>1,2</sup>, 徐永臣<sup>3</sup>, 王楠<sup>3</sup>, 胡日军<sup>1,2</sup>, 姜胜辉<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 3. 青岛海大工程勘察设计开发院有限公司, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 为探讨外航道回淤特征, 采用二维波浪潮流泥沙数学模型, 模拟研究了莱州湾东部航道回淤情况并探讨了其影响因素, 以期对航道泥沙输运研究提供借鉴。研究表明, 正常天气下, 水流跨越航道, 流速减小、挟沙能力下降导致的悬沙落淤是航道淤积的主要原因, 但淤积量有限。大风浪是造成航道淤积的主要动力因素, 其淤积泥沙主要来源于海底侵蚀来沙, 河流来沙和沿岸输沙对航道淤积的贡献不大。从水深地形、泥沙来源、底质类型、水文动力条件等方面分析, 航道发生骤淤的可能性较小。

**关键词:** 莱州湾; 航道; 回淤; 影响因素

中图分类号: P76 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2015)06-0072-09

doi: 10.11759/hyxx20140711001

河口与海岸区域是人类重要的生存和发展场所, 动态变化剧烈而复杂。近年来, 在全球气候变化、海平面上升以及人类活动等因素的影响下, 河口与海岸演变机制成为多学科共同关注的重大问题<sup>[1]</sup>, 河口海岸泥沙运移是其中的重要课题之一。

河口海岸航道(水道或潮道)开挖后, 破坏了原有的输沙平衡, 航道会产生回淤。泥沙淤积是海岸港口航道工程所面临的主要问题, 直接关系到港口与航道的维护费用及运营安全<sup>[2]</sup>。河口海岸开挖航道引起的回淤是泥沙研究中的重要内容, 对航道建设意义重大。

自20世纪80年代开始, 国内外学者对航道回淤开展研究<sup>[3-4]</sup>。航道回淤一般多采用实测水深地形资料对比<sup>[5]</sup>、半经验半理论公式<sup>[6]</sup>以及现场观测和公式计算相结合的方法<sup>[7]</sup>。20世纪90年代以来, 泥沙物模和数模的发展为重大工程泥沙问题研究提供了新的手段<sup>[8]</sup>。数值模拟在海岸泥沙研究中呈现出许多特有的优势<sup>[9]</sup>, 并应用于航道的研究中。航道(河道、水道、潮道)的研究内容包括水道中次生流的影响<sup>[10]</sup>、潮汐通道水动力<sup>[11]</sup>、沉积物输运<sup>[12]</sup>和地貌动态变化模拟<sup>[13]</sup>、地层特征<sup>[14]</sup>、航道疏浚物运移路径<sup>[15]</sup>、河口水沙数值模拟<sup>[16]</sup>、沙坝-泻湖海岸拦门沙航道回淤<sup>[17]</sup>等。

泥沙回淤问题较为复杂, 在泥沙回淤机理上的认识并没有统一, 通常认为开挖航道的回淤泥沙分悬移质和推移质两部分<sup>[18]</sup>。但也有学者提出在风浪作用下, 引起粉砂质外航道淤积的泥沙有3部分, 即

上部主体水流的悬移质、临底高浓度水体中的流移质和底沙中的推移质<sup>[19]</sup>。

航道回淤主要受水动力(波浪和潮流等)、泥沙(包括泥沙组成、含沙量大小等)以及工程建设等因素的影响<sup>[20]</sup>。同时, 航道治理工程也会引起水流、泥沙场的改变<sup>[21]</sup>。陈一梅<sup>[18]</sup>和马进荣<sup>[22]</sup>分别提出了适用于沙质海岸航道回淤计算公式。

本文根据现场调查资料, 采用二维波浪潮流泥沙数学模型研究了莱州湾东部外航道的泥沙回淤情况, 分析了航道回淤的时空变化特征, 探讨了航道回淤机制。研究成果可为航道建设、维护及泥沙输运研究提供借鉴。

## 1 研究区概况

研究区位于山东半岛西北、渤海南部莱州湾东岸(图1)。莱州湾湾口西起现代黄河新入海口, 东迄岬岬岛高角, 湾口宽96 km, 海湾面积6 966 km<sup>2</sup>, 湾内水深一般小于10 m, 最大水深18 m。莱州湾东部为砂质海岸, 西部为现代黄河三角洲, 湾顶为粉砂淤泥质海岸。莱州湾自西向东分布有黄河、小清河、潍河等十几条河流<sup>[23]</sup>。

莱州湾具有大陆性气候特征, 冬季寒冷, 夏季

收稿日期: 2014-07-11; 修回日期: 2014-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41106039)

作者简介: 朱龙海(1979-), 男, 汉族, 浙江金华人, 高级工程师, 博士, 主要从事海岸动力与地貌研究, 电话: 0532-66781882, E-mail: zhulonghai@163.com

炎热。1959年1月~1980年12月,莱州市气象站统计资料显示,年平均气温 12.4℃,年平均降水量 640.3 mm,年平均雾日数 8.9 d。常风向为北北东(NNE),次常风向为南南西(SSW),频率分别为 13.15%和 11.79%;强风向为 NNE 和北西(NW),最大风速 23 m/s,瞬时最大风速可达 34 m/s;次强风向为南西(SW),最大风速 20 m/s。多年平均 8 级大风日数 20.8 d。1961~1981 年,龙口港验潮统计资料显示,莱州湾东岸多年平均潮差 0.91 m,最大潮差 2.87 m。1964~1982 年,龙口波浪观测统计资料显示,多年平均波高为 0.9 m,最大波高 5.6 m。常浪向和强浪向均为北东(NE),出现频率为 14%,次常浪向为 NNE,频率为 9%<sup>[24]</sup>。

莱州港位于莱州湾东岸,由于受现有航道等级的限制,船舶只能减载、候潮进港,现有航道已不能满足这些泊位的通航要求。2012 年 5 月,对莱州港航道按照 5 万吨级要求进行了开挖,开挖后航道宽 220 m,底高程-14.8 m(当地理论最低潮面),全长 26.40 km。

## 2 数学模型

采用丹麦水力学研究所开发的 Mike 21 二维潮流波浪泥沙数学模型进行计算<sup>[25]</sup>,该模型可用于模拟河流、湖泊、河口、海湾、海岸及海洋的水流、波浪、泥沙场等, Mike21 为工程应用、海岸及规划提供完备、有效的设计条件和参数,在丹麦、埃及、澳洲、泰国、中国等许多国家和地区得到了成功应用。

### 2.1 计算域和网格设置

所建立的海域数学模型计算域范围如图 1 所示,即为图中 A(辽宁登沙河)、B(山东鸡鸣岛)两点以及岸线围成的北黄海及渤海海域。坐标范围为 37°04'14.22"~40°58'08.25"N, 117°29'33.27"~122°41'36.62"E。采用非结构三角形网格剖分计算域,模拟区域内由 15 659 个节点和 26 885 个三角单元组成,最小空间步长 25 m。

### 2.2 水深和岸线

水深和岸界选取中国人民解放军海军航海保证部制作的 1:100 万海图(10011 号), 15 万(11370 号、11570 号、11710 号、11770、1840 号、1910 号)海图以及近期莱州港航道水深地形测量资料。

### 2.3 边界条件

开边界条件引用辽宁登沙河(A 点)、山东鸡鸣岛

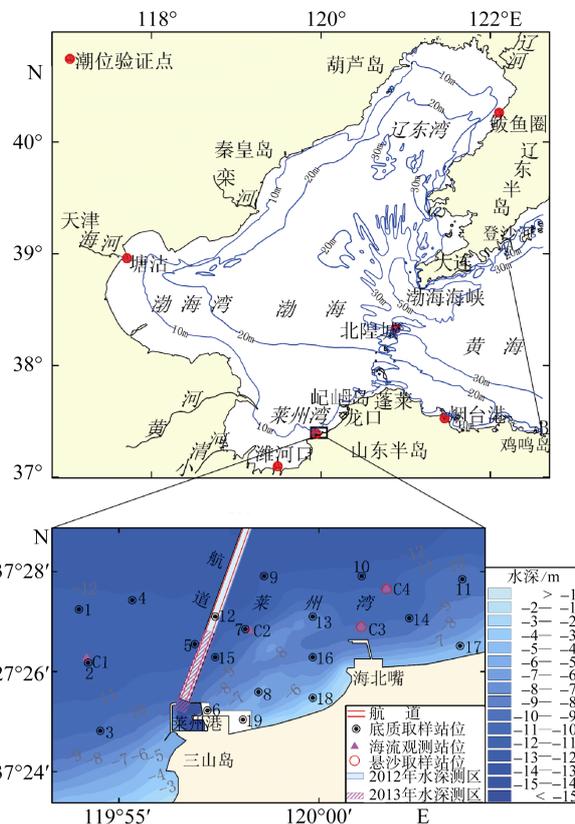


图 1 研究区位置、模拟区域及测站布置图

Fig.1 The location of the study area, the model domain and the location of the observation points

(B 点)多年潮位观测资料调和求得 M2、S2、K1 和 O1 四个分潮的调和常数,按公式(1)输入计算;以大海域和工程周边岸线作为闭边界。

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^4 f_i H_i \cos[\sigma_i t - g_i + (v_0 + u)_i] \quad \text{公式(1)}$$

其中:  $\sigma_i$  是第  $i$  个分潮(取 M2、S2、O1 和 K1 四分潮)的角速度;  $H_i$  和  $g_i$  分别为分潮的振幅和迟角;  $f_i$ 、 $(v_0 + u)_i$  为天文变量。

### 2.4 其他参数

曼宁系数取值 45~58  $m^{1/3}/s$ , 涡粘系数取 0.28  $m^2/s$ , 泥沙干容重取 1 600  $kg/m^3$ 。采用龚国仁<sup>[26]</sup>公式,选取表层沉积物中值粒径  $d_{50}$ , 分别计算每个站位的泥沙起动临界切应力,然后插值到每个网格节点,泥沙起动剪应力取值为 0.70~2.0  $N/m^2$ 。

## 3 结果和分析

### 3.1 水深地形和表层沉积物特征

#### 3.1.1 水深地形特征

研究区水深为 0~12 m; -5 m 以浅海域平均坡度

在 7‰~12‰, -5~-10 m 水深的海域平均坡度在 2‰~4‰, -10 m 以深海域平均坡度在 1‰~2‰。莱州港东北侧约 2.6 km 存在面积约 0.6 km<sup>2</sup> 的浅滩; 莱州港西侧海域等深线与海岸线基本平行。莱州港港池和航道内水深约-14.8 m。水深地形如图 1 所示。

### 3.1.2 表层沉积物特征

研究区表层沉积物类型包括砾砂、砂、粉砂

质砂、砂质粉砂、粉砂、黏土质粉砂等(表 1), 其中以砂和粉砂质砂为主。表层沉积物粒径由岸向海逐渐变细, 中值粒径为 0.027 mm~1.349 mm。砾(>2 mm)含量为 0.1%~33.3%, 砂(0.063~2 mm)含量为 4.2%~94.3%, 粉砂(0.004~0.063 mm)含量为 0.4%~91.5%, 黏土(<0.004 mm)含量为 1.2%~10.2%。

表 1 表层沉积物粒度参数

Tab.1 The grain size parameters of the surface sediment

站位	各粒级组成(%)				中值粒径 (mm)	定名
	砾(>2 mm)	砂(0.063~2 mm)	粉砂(0.004~0.063 mm)	黏土(<0.004 mm)		
1		89.4	7.42	3.18	0.091	砂
2		91.1	6.16	2.64	0.093	砂
3	1.1	89.8	6.37	2.73	0.122	砂
4		85.6	10.08	4.32	0.089	粉砂质砂
5		76.9	16.17	6.93	0.088	粉砂质砂
6		90.3	6.79	2.91	0.094	砂
7		82	12.6	5.4	0.091	粉砂质砂
8		94.3	3.99	1.71	0.096	砂
9		5.1	84.7	10.2	0.036	黏土质粉砂
10		4.3	87.9	7.8	0.028	黏土质粉砂
11		4.2	91.5	4.3	0.043	粉砂
12		4.8	86.5	8.6	0.027	黏土质粉砂
13	33.3	63.2	0.4	3	1.349	砾砂
14	12.1	78.5	8.2	1.2	0.234	砾砂
15	0.1	28.1	62.3	9.5	0.038	砂质粉砂
16	4.2	93.6	0.5	1.7	0.716	砂
17	5.2	91.5	2	1.3	0.325	砂
18		63	32.2	4.8	0.096	粉砂质砂
19	0.1	82.9	12.7	4.3	0.265	粉砂质砂

## 3.2 模型检验

### 3.2.1 潮位验证

利用烟台港、北隍城、鲅鱼圈、塘沽、潍河口和莱州港等 6 个潮位站历史潮位观测资料, 得到各分潮的调和常数, 与模拟值进行比较, 结果表明: 各分潮的振幅误差为 0.3~6.9 cm, 迟角误差除个别大于 10°外, 一般均小于 10°(表 2)。模拟得到各分潮的调和常数结果是基本合理的。

### 3.2.2 潮流验证

首先对国家海洋局北海预报中心于 2007 年 7 月 14 日 7: 00~7 月 15 日 8: 00 的 2 个站位(图 1 中 C3、C4)潮流观测资料进行验证。在此基础上, 对中国海洋大学于 2006 年 6 月 27 日 14: 00~6 月 28 日 14: 00

的 2 个站位(图 1 中 C1、C2)潮流观测资料进行验证。潮流验证曲线如图 2 所示。结果表明, 对应观测点上潮流模拟值与实测值基本吻合。

### 3.2.3 悬浮泥沙验证

将悬浮泥沙模拟结果与国家海洋局北海预报中心于 2007 年 7 月 14 日 7: 00~7 月 14 日 17: 00 的 2 个站位(C3、C4)悬浮泥沙观测资料进行对比(图 3), 结果表明: 悬浮泥沙浓度模拟值与实测值基本吻合。同时, 根据 1986~2004 年不同时期 Landsat TM/ETM+影像悬浮泥沙浓度反演显示, 正常天气条件下, 涨潮和落潮期间, 莱州湾东部近岸海域悬浮泥沙浓度一般在 20~100 mg/L<sup>[27]</sup>, 与模拟值均在一个数量级范围内, 说明悬浮泥沙模拟结果基本合理。

表 2 各潮位站分潮调和常数模拟值与实测值的比较

Tab.2 Comparison between the simulated sub-tidal amplitudes/phases and observed ones at the tide sites

潮位站	振幅(cm)								迟角(°)							
	实测值				模拟值				实测值				模拟值			
	M2	S2	K1	O1	M2	S2	K1	O1	M2	S2	K1	O1	M2	S2	K1	O1
烟台港	75.0	19.0	16.4	8.4	74.7	20.9	19.9	11.3	288	348	299	229	294	350	287	217
北隍城	60.4	18.4	6.0	3.7	56.3	17.1	3.2	2.6	301	1	21	7	304	1	15	13
鲅鱼圈	113.1	31.3	29.2	30.4	119.2	33.8	35.8	30.7	122	183	96	44	132	195	79	30
塘沽	119.9	37.7	36.6	29.1	121.8	37.3	43.5	29.4	89	168	146	106	96	171	145	93
潍河口	57.8	22.3	18.0	17.1	63.2	24.9	21.2	21.9	354	79	215	133	3	83	208	128
莱州港	44.5	20.0	16.9	17.9	43.0	16.8	25.6	19.2	332	53	200	131	341	58	191	128

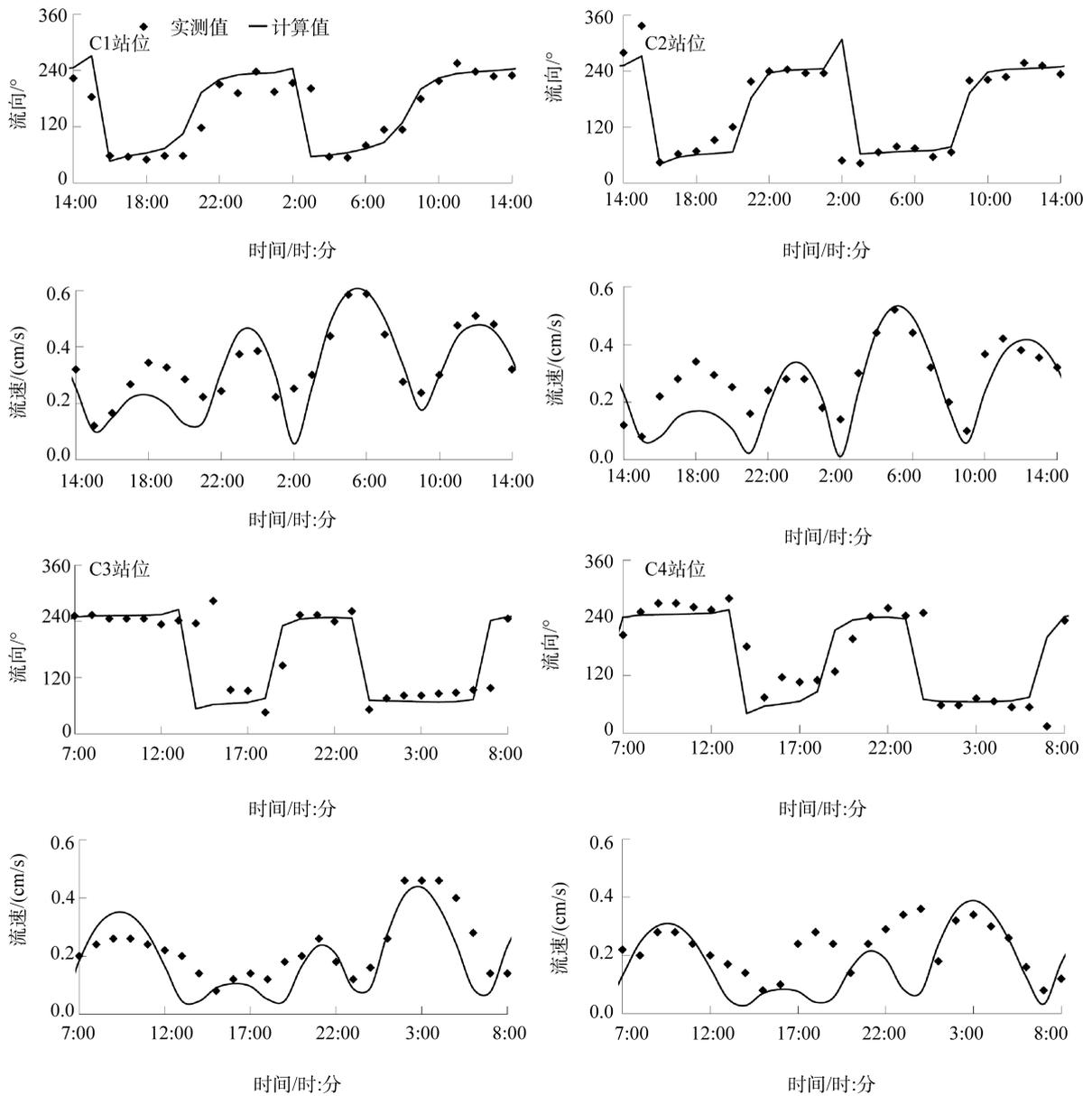


图 2 潮流模拟值与实测值比较

Fig.2 Comparisons between the simulated and measured tidal current velocities

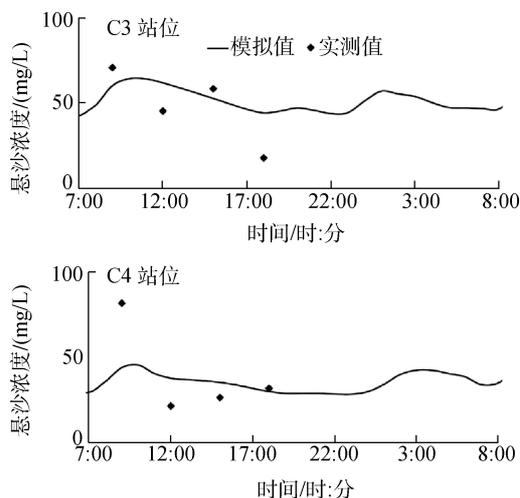


图3 悬浮泥沙浓度模拟值与实测值比较图

Fig.3 Comparisons between the simulated and measured suspended sediment

### 3.2.4 冲淤验证

天津海事局海测大队于2012年5~6月沿莱州港航道中心线两侧各500 m进行了1:1000水深地形测量,中诚国际海洋工程勘察设计有限公司于2013年5月沿莱州港航道中心线两侧各500 m进行了1:2000的水深地形测量。将模拟得到的航道回淤量与2012~2013年的实测回淤量进行对比,结果表明,距离莱州港口门400 m处航道内回淤量最大,往两侧回淤量逐渐减小,从回淤厚度和趋势上看,模拟值与实测值基本吻合(图4)。

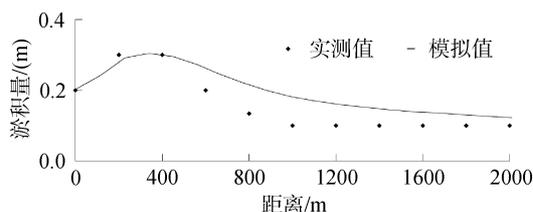


图4 航道回淤厚度模拟值与实测值比较

Fig.4 Comparisons between the simulated and measured deposition thickness of channel

## 3.3 模型预测结果

### 3.3.1 流场和剪应力分布

无风条件下,涨急时,潮流自北东向南西流动;落急时,潮流自南西向北东流动。无风情况下,航道两侧海域流速一般在0.4~0.6 m/s,剪应力在0.8~1.5 N/m<sup>2</sup>;航道内流速一般在0.3~0.4 m/s,剪应力在0.5~0.8 N/m<sup>2</sup>(图5a、图5b)。

采用Mike21波浪和潮流耦合模型计算浪-流共同作用下的切应力。结果表明:在8级NNE和NW向大风(风速19 m/s)形成的波浪作用下,流速明显增加,航道两侧海域流速一般在0.7~0.9 m/s、剪应力在2.5~5 N/m<sup>2</sup>,航道内流速一般在0.5~0.7 m/s、剪应力在1.5~2.5 N/m<sup>2</sup>(图5c、图5d)。

### 3.3.2 冲淤分布

无风条件下,莱州港周围海域淤积速率一般在0.5~2.0 cm/a;莱州港西防波堤北侧处于侵蚀状态,侵蚀速率一般在1~20 cm/a,最大可达26 cm/a。航道内淤积速率一般在1~2 cm/a(图6a)。

根据龙口1964~1982年波浪观测资料统计结果,输入模型模拟波流共同作用下冲淤状况。结果表明,波流共同作用下,莱州港周围海域淤积速率一般在2~5 cm/a;莱州港西防波堤北侧堤头外处于侵蚀状态,侵蚀速率一般在1~40 cm/a,最大可达45 cm/a。航道内淤积速率沿航道里程总体呈先增后减的趋势,距离莱州港口门400 m处航道内淤积速率最大,为36 cm/a;往两侧逐渐变小,淤积速率一般在5~30 cm/a(图6b)。

## 4 讨论

### 4.1 影响因素分析

#### 4.1.1 泥沙来源

莱州湾西岸和南岸主要有黄河、小清河等十几条较大河流<sup>[23]</sup>。黄河为季节性多泥沙河流,年平均来沙量达6.33亿吨,占莱州湾河流入海泥沙量的99.75%,其他河流仅占0.25%。近70%黄河入海泥沙沉积在近河口10~15 km范围的水下三角洲内<sup>[28]</sup>,其他地区沉积速率一般在0.5~0.1 mm/a<sup>[29]</sup>。

莱州湾东岸刁龙嘴与龙口之间主要有王河等河流(图7),均为山溪性雨源河流,输沙总量约41.17~62.38万吨<sup>[30]</sup>。其中,以王河和界河为主。由于水库拦沙和小流域综合治理,向海输沙大大减少<sup>[24]</sup>。

莱州港航道距离黄河三角洲现行河口约77 km,黄河入海泥沙造成莱州港航道淤积量约0.5~0.1 mm/a;莱州湾东岸河流入海泥沙量少,对莱州港航道淤积的贡献较小。

莱州港航道回淤物质分析表明,淤积物为淤泥质粉砂,饱和、流塑状态,说明本航道回淤主要以悬沙回淤为主。回淤泥沙主要来自航道两侧海底,近岸砂质沉积物的来源很少。

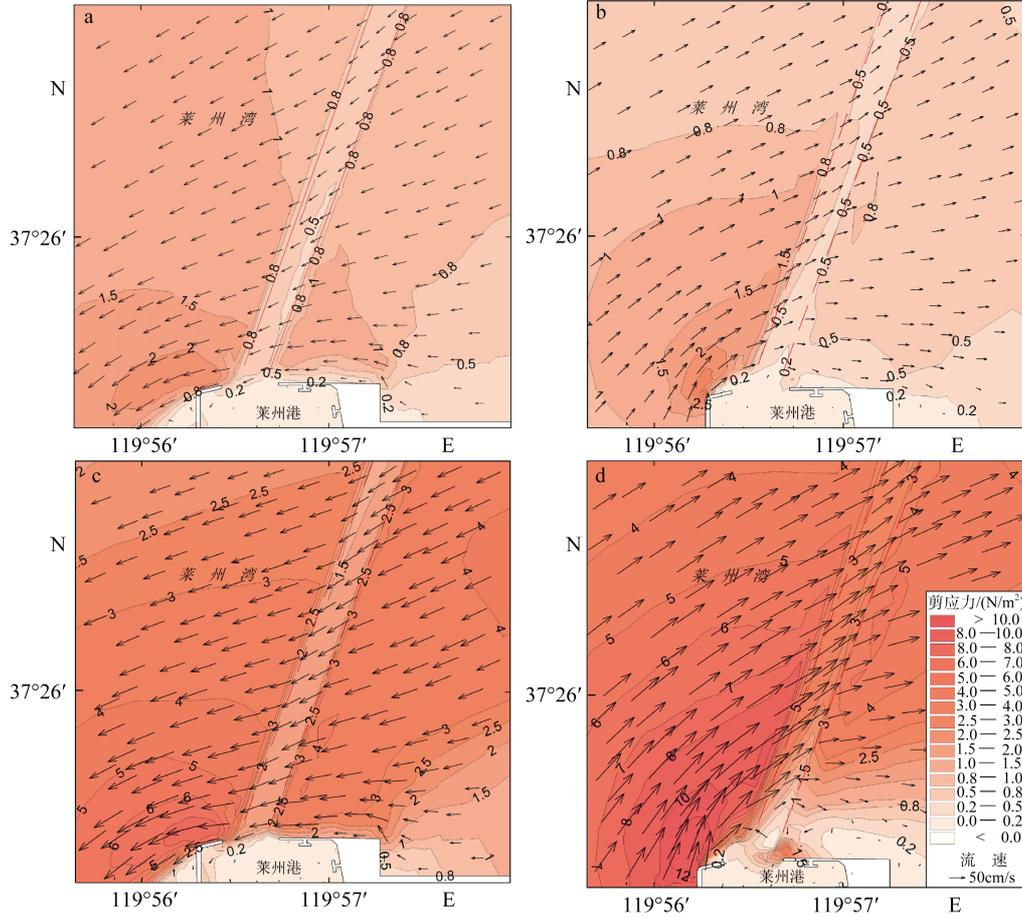


图 5 潮流场和剪应力分布图

Fig.5 Distribution of tidal current and shear stress

a: 无风, 涨急; b: 无风, 落急; c: 8 级 NNE 向大风形成的波浪, 涨急; d: 8 级 NW 向大风形成的波浪, 落急

a: No wind, flood tide; b: No wind, ebb tide; c: Waves under the 8 gale winds of direction NNE, flood tide; d: Waves under the 8 gale winds of direction NW, ebb tide

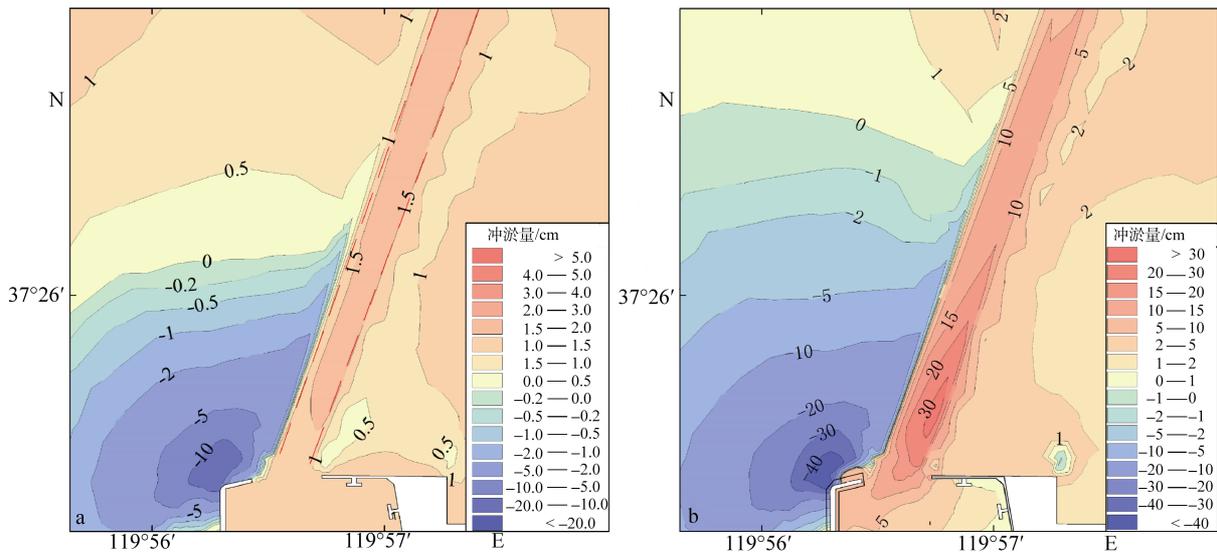


图 6 年冲淤分布图

Fig.6 Distribution of deposition and erosion

a: 潮流作用; b: 波流共同作用

a: Tidal current action; b: Tidal currents and waves action

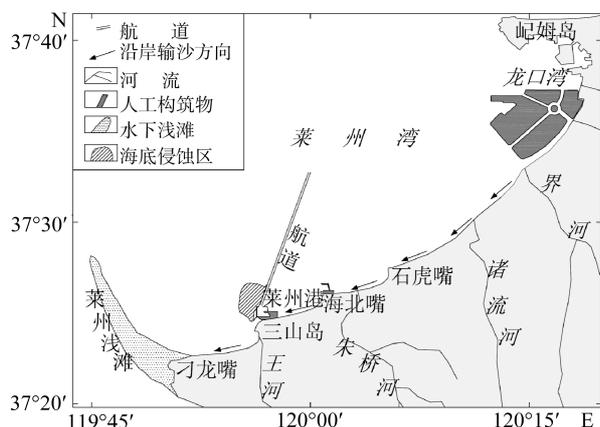


图7 莱州湾东岸泥沙运移趋势分布图

Fig.7 The transport trends of sediment in the east coast of the Laizhou Bay

#### 4.1.2 海洋动力

潮流是泥沙运输的主要动力,该海区潮流以往复流为主,主流向为东北-西南向,潮流流速一般在0.3~0.6 cm/s。航道开挖后,增加了水深,单宽流量略有增加,但流速却减小<sup>[31]</sup>。在正常天气条件下,航道呈相对缓慢淤积状态。

风浪掀沙主要为航道周边滩面的泥沙被风浪掀起随潮流移至航道内。根据龙口波浪观测站统计资料,波高小于0.5 m的频率占71%,波高小于3 m的频率占98%,波高在3~5 m的频率占1%<sup>[24]</sup>。按照5 m的波高计算,破波水深约为6.4 m,航道两侧海底水深大于9 m,不会发生波浪破碎。根据6级、8级、10级和12级大风浪作用下的冲淤模拟结果(图8),一次大风浪作用下航道回淤厚度约23 cm,不会发生一次大风骤淤碍航的情况。同时,与无风条件下航道淤积速率1~2 cm/a相比,大风浪是造成航道淤积的主要动力因素。大风浪条件下含沙量可达正常海况下的20倍<sup>[32]</sup>。航道回淤最强的时刻发生在风后1 d左右,港池随时间推移而逐渐降低<sup>[33]</sup>。

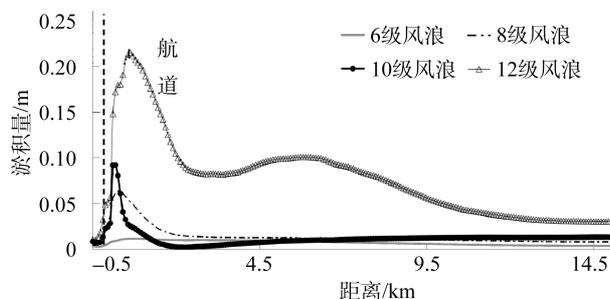


图8 各级大风浪作用航道沿程淤积厚度图

Fig.8 The siltation thickness along the channel under different large waves

#### 4.1.3 人类活动

由于水库建闸和小流域综合治理,莱州湾东岸河流入海泥沙较少。同时,围海、护岸等近岸工程建设,对海岸起保护作用,侵蚀泥沙减小。另外,近年来,近岸港口码头建设如海北嘴、三山岛修建了防波堤、码头等,防波堤堤头最大水深约9 m,大于破波水深,阻挡了近岸泥沙向外航道输送。

#### 4.1.4 航道尺度

航道淤积量与航道深度和宽度有关<sup>[29]</sup>。航道的回淤量随开挖深度的增加而增大。然而随着航道的拓宽,断面平均回淤强度降低,但回淤总方量仍然增加<sup>[34]</sup>。

#### 4.2 航道冲淤演化机制

研究区的泥沙运动受海底地形、泥沙来源、潮流、波浪、人类活动等多种因素的共同影响,是一个复杂的动力地貌过程。正常天气条件下,航道回淤机理为含悬浮泥沙的水流跨越航道,流速减小,挟沙能力降低而造成悬浮泥沙落淤,形成航道淤积。大风浪作用下,航道的淤积机理为大风引起的强浪掀起海底泥沙,随潮流进入航道内落淤。

大风浪造成航道回淤量可达到正常天气下相同时间的几倍、十几甚至几十倍。航道淤积泥沙主要来源于莱州港西侧防波堤堤头外侧海底侵蚀来砂;由于受到水库建闸、防波堤阻挡等因素影响,河流来沙和沿岸输沙对航道回淤的贡献不大。由于航道两侧海底水深大于波浪破波深度,本航道发生骤淤的可能性较小。

### 5 结论

1) 采用波流共同作用下二维泥沙数学模型研究了莱州湾东部外航道的回淤情况。模型检验结果表明,潮位、潮流、悬浮泥沙、航道回淤量模拟值与实测值基本吻合。

2) 正常天气条件下,航道内流速明显小于航道两侧的流速,航道内和两侧流速分别为0.3~0.4 m/s和0.4~0.6 m/s;8级大浪作用下,航道内和两侧流速分别为0.5~0.7 m/s和0.7~0.9 m/s。无风条件下航道回淤量1~2 cm/a,远小于大风浪条件下航道回淤量5~30 cm/a。

3) 航道回淤主要影响因素包括泥沙来源、潮流、波浪以及人类活动等。正常天气下,水流跨越航道,流速减小、挟沙能力下降导致的悬沙落淤是航道淤积的主要原因,但淤积量有限。大风浪是造成航道淤

积的主要动力因素,其淤积泥沙主要来源于海底侵蚀来沙,河流来沙和沿岸输沙对航道淤积的贡献不大。从水深地形、泥沙来源、底质类型、水文动力条件等方面分析,航道发生骤淤的可能性较小。

## 参考文献:

- [1] 侯庆志, 陆永军, 王建, 等. 河口与海岸滩涂动力地貌过程研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 286-294.
- [2] 解鸣晓, 张玮, 黄志扬, 等. 淤泥质海岸泥沙运动及进港航道回淤强度数值研究[J]. 中国港湾建设, 2007, 4: 1-4.
- [3] Van-Rijin L C. Sedimentation of dredged channels by currents and waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1986, 112 (5): 541-559.
- [4] 罗肇森. 河口航道开挖后的回淤计算[J]. 泥沙研究, 1987, 2: 13-19.
- [5] 王金鹿, 张朝晖, 李建明, 等. 册子岛油库码头及航道回淤研究[J]. 中国港湾建设, 2011, 5: 10-15.
- [6] 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.
- [7] Ghosh L K, Prasad N, Joshi V B, et al. A study on siltation in access channel to a port[J]. Coastal Engineering, 2001, 43: 59-74.
- [8] 奚国仁. 长江口深水航道泥沙回淤问题的分析. 水运工程, 1999, 10: 36-39.
- [9] Winterwerp J C, Graaff R F, Groeneweg J, et al. Modeling of wave damping at Guyana mud coast[J]. Coastal Engineering, 2007, 54: 249-261.
- [10] Liu Chao, Luo Xian, Liu Xingnian, et al. Modeling depth-averaged velocity and bed shear stress in compound channels with emergent and submerged vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2013, 60: 148-159.
- [11] Vachtman D, Laronne J B. Hydraulic geometry of cohesive channels undergoing base level drop[J]. Geomorphology, 2013, 197: 76-84.
- [12] Fiechter J, Steffen K L, Mooers C N K, et al. Hydrodynamics and sediment transport in a southeast Florida tidal inlet[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 70: 297-306.
- [13] Davidson S L, Eaton B C. Modeling channel morphodynamic response to variations in large wood implications for stream rehabilitation in degraded watersheds Original Research Article[J]. Geomorphology, 2013, 202: 59-73.
- [14] Stow D A V, Hernández-Molina F J, Llave E, et al. The Cadiz Contourite Channel Sandy contourites, bedforms and dynamic current interaction[J]. Marine Geology, 2013, 343: 99-114.
- [15] Xie Rui, Wu Dean, Yan Yixin, et al. Fine silt particle pathline of dredging sediment in the Yangtze River deepwater navigation channel based on EFDC model[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(6): 760-772.
- [16] 雷文韬, 夏军强, 谈广鸣. 淤泥质河口水沙运动数学模型相关问题[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 197-204.
- [17] 左利钦, 季荣耀, 陆永军. 离岸沙坝-潟湖海岸拦门沙航道回淤——以渤海湾曹妃甸海域老龙沟拦门沙为例[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 87-95.
- [18] 陈一梅. 沙质海岸河口航道回淤计算方法及其应用[J]. 河海大学学报, 2000, 28(6): 82-86.
- [19] 曹祖德, 杨华, 侯志强. 粉沙质海岸的泥沙运动和航道淤积[J]. 水道港口, 2008(4): 247-252.
- [20] 闫军, 刘怀汉, 岳志远, 等. 心滩守护工程对航道冲淤特性影响的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2012, 27(5): 589-596.
- [21] 张田雷, 茅志昌, 刘蕾. 长江口深水航道治理工程对江亚南沙的冲淤效应研究[J]. 泥沙研究, 2013, 3: 38-41.
- [22] 马进荣, 徐相波, 刘信华. 沙质海岸外航道回淤计算方法及其检验[J]. 水利水运工程学报, 2011, 1: 66-70.
- [23] 中国海湾志编撰委员会. 中国海湾志(第三分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 1-2.
- [24] 曲绵旭, 王文海, 丰鉴章, 等. 龙口湾自然环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995: 24-66.
- [25] DHI water and environment. MIKE 21 使用手册[M]. 2003: 1-50.
- [26] 奚国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999, 6: 1-9.
- [27] 刘燕霞, 黄海军, 杨晓阳. 基于遥感反演的莱州湾悬沙分布及其沉积动力分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(6): 43-53.
- [28] Martin J M, Zhang J, Shi M C, et al. Actual flux of the

- Huanghe (Yellow River) sediment to the western Pacific Ocean[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1993, 31: 243-254.
- [29] 李国胜, 王海龙, 董超. 黄河入海泥沙输运及沉积过程的数值模拟. 地理学报, 2005, 60(5): 707-716.
- [30] 武桂秋, 三山岛地区泥沙问题的探讨[J]. 泥沙研究, 1989, 3: 97-102.
- [31] 曹祖德, 孔令双. 淤泥质海岸开敞航道的回淤计算[J]. 水道港口, 2004, 25(2): 59-62.
- [32] 吴修广, 韩海骞, 鑫赵, 等. 浙江苍南淤泥质潮滩开挖港池和航道的回淤分析[J]. 浙江水利科技, 2008, 3: 11-14.
- [33] 解鸣晓, 张玮, 张庭荣. 淤泥质海岸泥沙运动模拟及进港航道大风天回淤特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 262-272.
- [34] 莫思平, 辛文杰, 应强. 广州港深水出海航道伶仃航段回淤规律分析[J]. 水利水运工程学报, 2008, 1: 42-46.

## Siltation prediction and influencing factors of the outer channel in the eastern Laizhou bay

ZHU Long-hai<sup>1, 2</sup>, XU Yong-chen<sup>3</sup>, WANG Nan<sup>3</sup>, HU Ri-jun<sup>1, 2</sup>, JIANG Sheng-hui<sup>1, 2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Haida Engineering Survey and Design Institute Ltd, . Co., Qingdao 266100, China)

**Received:** Jul., 11, 2014

**Key words:** Laizhou Bay; channel; siltation; influencing factors

**Abstract:** To explore the characteristics of the outer channel siltation, we studied the siltation and influencing factors of the outer channel in the Laizhou Bay by using a 2-D mathematical modeling of sediment transport under the co-action of waves and tidal currents. The research results can provide a study reference for the sediment transport of channel. Under normal weather, the main cause for channel siltation is the silting of the suspended sediment resulted from the decrease in current speed and carrying capacity when the water flows across the channel. The Sediment thickness is limited under normal weather. The large waves are the major power causing factor of siltation of waterways. The sediment of channel is mainly from the erosion sediment of seabed. Rivers and coastal sediments contribute little to the deposition of the channel. Based on the analysis of the topography, sediment sources, sediment type, and hydrological conditions, sudden siltation is less likely to occur.

(本文编辑: 李晓燕)