

· 综合 ·



伶仃洋港口航道泥沙问题研究^{*}

李孟国, 韩志远, 许婷, 李文丹

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑技术国家工程实验室,
工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 伶仃洋是华南具有重要航运功能的河口湾, 在其东西两岸分布着广州港南沙港区、深圳港西部港区、中山港等重要港口, 伶仃航道和铜鼓航道是广州港和深圳港的重要出海通道。伶仃洋港口航道的主要问题是泥沙淤积问题。基于现场实测资料分析、卫星遥感分析、泥沙水槽试验、港池淤泥密度测量与分析等手段, 对伶仃洋港口航道的泥沙问题进行综合分析和研究, 包括泥沙运动动力条件特征、泥沙来源与运移形式、悬沙和底质特征、港口航道泥沙淤积特征及机理、泥沙水力特性试验、浮泥及适航水深利用等, 并根据伶仃洋港口航道泥沙特点提出南沙港区港口航道维护对策。

关键词: 伶仃洋; 港口航道; 泥沙来源; 泥沙淤积; 适航水深

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0001-08

Study on sediment problems of harbors and channels in Lingdingyang Bay

LI Meng-guo, HAN Zhi-yuan, XU Ting, LI Wen-dan

(Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Key Laboratory of Engineering Sediment of the Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Lingdingyang Bay is an important estuary bay in South China with important shipping functions, and there are important ports such as Nansha Port of Guangzhou Port, Western harbors of Shenzhen Port and Zhongshan Port on its east and west shores, and Lingding Channel and Tonggu Channel are important sea accesses for Guangzhou Port and Shenzhen Port. The major problem of harbors and channels in Lingdingyang Bay is sediment siltation. Based on the analysis of insitu data, remote sensing analysis, flume test, and measurement and analysis of silt density, we carry out a comprehensive analysis and study on sediment problems of harbors and channels in Lingdingyang Bay, including dynamic condition features for sediment movement, sediment sources and transport forms, characteristics of suspended load and bedload, sediment siltation features and mechanism of harbors and channels, hydraulic characteristic test of sediment, and fluid mud and nautical depth utilization. Maintenance countermeasures of harbors and channels are proposed based on the siltation characteristics of Lingdingyang Bay.

Keywords: Lingdingyang Bay; harbor and channel; sediment source; sediment siltation; nautical depth

伶仃洋是典型复杂的喇叭型河口湾(图1), 走向接近NNW—SSE方向, 湾顶在虎门, 宽约4 km, 湾口在澳门至大濠岛之间, 宽约30 km, 纵向长约72 km, 水域面积约为2 110 km²。伶仃洋

西北方向有虎门、蕉门、洪奇沥和横门4个口门下泄径流和泥沙, 外海有陆架水入侵, 地貌上呈“三滩两槽”格局, 东西方向和南北方向动力条件及洪季和枯季动力条件均存在明显差异。

收稿日期: 2021-01-03

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402605)

作者简介: 李孟国(1964—), 男, 博士, 研究员, 从事海岸河口水动力泥沙研究。

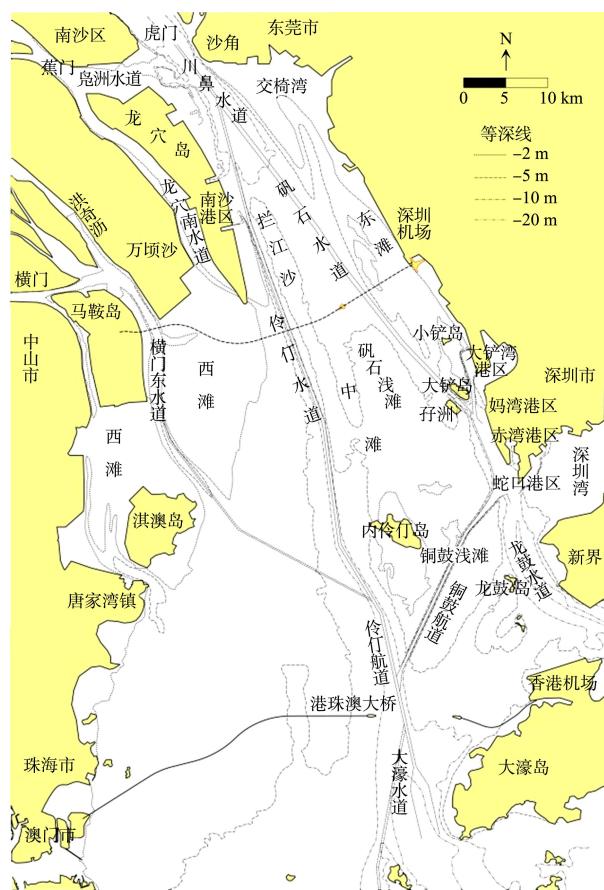


图 1 伶仃洋

伶仃洋周边有深圳、东莞、广州、中山、珠海市以及香港和澳门等经济发达地区，地理位置十分重要。伶仃洋航运发达，是我国乃至世界沿海航线最密集、船舶密度最大的水域之一。珠江河口 7 个主要海港中有 5 个分布在伶仃洋东西两岸，即广州港南沙港区、深圳港西部港区、中山港、九州港和澳门港，伶仃洋是广州港和深圳港西部港区等港口的必经出海通道。伶仃航道和铜鼓航道是伶仃洋的主要航道，伶仃航道是广州港出海航道，是基于伶仃水道开挖而成的，铜鼓航道是深圳西部港区的出海航道，人工开挖而成。伶仃航道和铜鼓航道目前都是 10 万吨级航道。

伶仃洋港口航道的主要问题是泥沙淤积问题^[1]。众多学者对不同的工程(铜鼓航道^[2-5]、西滩围垦^[6]、大铲湾港区^[7]、伶仃航道^[8-11]、西滩建港^[12]、港珠澳大桥^[13]等)开展了泥沙研究,但目前未见针对伶仃洋港口航道泥沙问题的系统、综合的分析。

和研究。

本文基于现场实测资料分析、卫星遥感分析、泥沙水槽试验等手段,对伶仃洋港口航道的泥沙问题进行综合分析和研究,包括水动力条件特征、泥沙来源与运移形式、悬沙和底质特征、港口航道泥沙淤积特征及机理、淤积泥沙水力特性、浮泥及适航水深利用等,并根据伶仃洋港口航道泥沙淤积特点提出港口航道的维护对策。

1 水动力条件特征

伶仃洋西北方向有虎门、蕉门、洪奇沥和横门4个口门下泄径流和泥沙，外海有陆架水入侵，地貌上呈“三滩两槽”格局百年以上，其中“三滩”指西滩、中滩和东滩，“两槽”指伶仃水道和矾石水道(图1)，伶仃水道和矾石水道也称西槽和东槽，伶仃水道是伶仃洋的主干水道，也是最敏感的部位，伶仃洋横向动量平衡线的平衡点的连线与伶仃水道位置相符。

伶仃洋是以潮汐作用为主的潮控型河口湾，伶仃水道是潮流和径流的主通道，矾石水道受控于潮流。伶仃洋的潮汐为不正规半日混合潮，潮高和潮时存在着严重的日潮不等现象，平均潮差小于2 m，属于弱潮型。伶仃洋的潮流属于不正规半日混合潮流类型。

伶仃洋河口湾存在3大动力区域特征：西部横门、洪奇沥和蕉门等径流作用为主的径流动力特征；北部和中部虎门潮汐通道动力特征；南部与东南部的高盐陆架水入侵控制的动力特征。

伶仃洋径流、潮流与高盐陆架水是控制泥沙运动的主要控制因素，径流、潮流、盐淡水混合及风浪作用下引起泥沙不断运移。

2 伶仃洋泥沙来源与运移形式

伶仃洋泥沙来源主要是虎门、蕉门、横门和洪奇沥4个口门(东四门)的径流输沙,外海来沙甚少,与径流输沙相比只占1%。径流输沙以悬移质为主。

伶仃洋东四门多年平均来水来沙量见表 1^[14]。由表 1 可见,东四门多年平均注入伶仃洋的径流总量为 1 742 亿 m³/a, 输沙量为 3 389 万 t/a; 虎门吞吐潮量最大, 涨潮量占 4 个口门的 80.48%, 落潮量占 63.05%, 属于潮流优势型; 虎门的输沙量占 4 个口门总输沙量的 19.4%, 其他 3 个口门占

80.6%。东四门洪季输入进伶仃洋的径流量和泥沙量占全年输入总量的 80% 和 90%^[15]。

在伶仃洋运动的泥沙是径流输沙和床面淤积泥沙在水动力作用下的再悬浮和再搬运, 其在径流、潮流、盐淡水混合及风浪作用下以悬移质(悬沙)运动为主。

表 1 伶仃洋东四门多年平均潮量、径流量及输沙量

口门名称	涨潮量/亿 m ³	落潮量/亿 m ³	径流量/亿 m ³	径流来沙量/万 t	山潮比	径流含沙量/(kg·m ⁻³)
虎门	2 288	2 891	603	658	0.264	0.109
蕉门	325	890	565	1 289	1.740	0.228
洪奇沥	97	306	209	517	2.160	0.247
横门	133	498	365	925	2.750	0.253
总计	2 843	4 585	1 742	3 389	-	-

3 伶仃洋悬沙和底质特征

3.1 悬沙分布和悬沙粒径

3.1.1 实测含沙量特征

根据 1991、1992、1999、2007、2013、2016 和 2017 年的实测含沙量结果, 伶仃航道沿程平均含沙量的分布由川鼻水道(虎门)向外呈逐渐减小规律, 涨、落平均含沙量均在 0.01~0.17 kg/m³, 靠近南沙港区的平均含沙量在 0.04~0.17 kg/m³, 多年平均值为 0.09 kg/m³。南沙港区南侧西滩的平均含沙量约为 0.2 kg/m³。

伶仃洋年平均含沙量一般为 0.1~0.2 kg/m³, 伶仃航道年平均含沙量在 0.08~0.13 kg/m³。

伶仃洋的悬沙运动随着潮汐运动呈周期性变化, 从表层到底层含沙量逐渐增加, 含沙量的峰值与流速的峰值不同步(有 2~3 h 的滞后), 高含沙量区主要分布在东四门附近, 洪季内伶仃岛西北侧存在含沙量高值中心(最大浑浊带)。

伶仃洋水体含沙量具有深槽小、浅滩大、西部高、东部低、洪季浑、枯季清等主要分布特点, 有明显的季节变化。

3.1.2 实测悬沙粒径

2016 年 6 月水文测验期间 7 个测站大、中、小潮的悬沙中值粒径统计结果表明, 工程水域大潮悬沙中值粒径在 5.8~6.4 μm, 中潮悬沙平均粒径在 5.6~5.9 μm, 小潮悬沙平均粒径在 5.4~5.7 μm,

大中小潮平均值为 5.8 μm, 悬沙的物质主要成分为黏土质粉砂和粉砂质黏土。

2017 年 9 月水文全潮测验期间 8 个测站大潮悬沙粒度统计结果表明: 工程水域大潮悬沙粒径在 5.9~8.8 μm, 平均值为 7.2 μm, 黏土平均含量约为 32.4%, 悬沙物质成分为黏土质粉砂和粉砂质黏土。

根据多年实测资料统计, 悬沙中值粒径为 6.0 μm 左右, 成分为黏土质粉砂和粉砂质黏土。

3.1.3 含沙量遥感分析

本研究搜集了 2016—2017 年期间伶仃洋水域 16 幅不同潮况的高分一号(GF-1)影像, 并采用卫星过境时内伶仃岛至港珠澳大桥沉管基槽水域的同步巡测含沙量对反演模型进行率定, 得到 GF-1 影像的含沙量反演公式^[16-19]:

$$\ln S = 10.695 \times \text{Band3} / \text{Band2} - 4.3945 \quad (1)$$

式中: S 为含沙量 (mg/L); Band2、Band3 分别为第 2、3 波段的灰度值。

遥感卫片分析结果表明, 内伶仃岛以北水域的含沙量分布整体呈浅滩高、深槽低的分布特点, 西滩水域为含沙量最高区域, 其最大表层含沙量在 0.5 kg/m³ 以上; 内伶仃岛北侧矾石浅滩和东滩含沙量也稍高, 含沙量多在 0.05~0.1 kg/m³; 伶仃水道、矾石水道含沙量整体较低, 表层含沙量多在 0.05 kg/m³ 以下。

3.2 底质特征

据 1991、1999、2007、2011 和 2017 年多次底质取样分析, 除浅滩上个别点位外, 底质中值粒径一般均小于 $30 \mu\text{m}$, 主要在 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间(图 2), 黏土百分含量在 19.3%~42%, 平均值为 33.7%; 分选系数在 1.6~2.4, 平均值为 1.8, 属分选差的沉积。伶仃洋海域表层沉积物以黏土质粉砂为主, 其次为砂质粉砂。根据《港口与航道水文规范》^[20]的规定, 伶仃洋具有淤泥质海岸的性质, 泥沙运动以悬沙运移为主, 港口航道泥沙淤积为悬沙淤积。

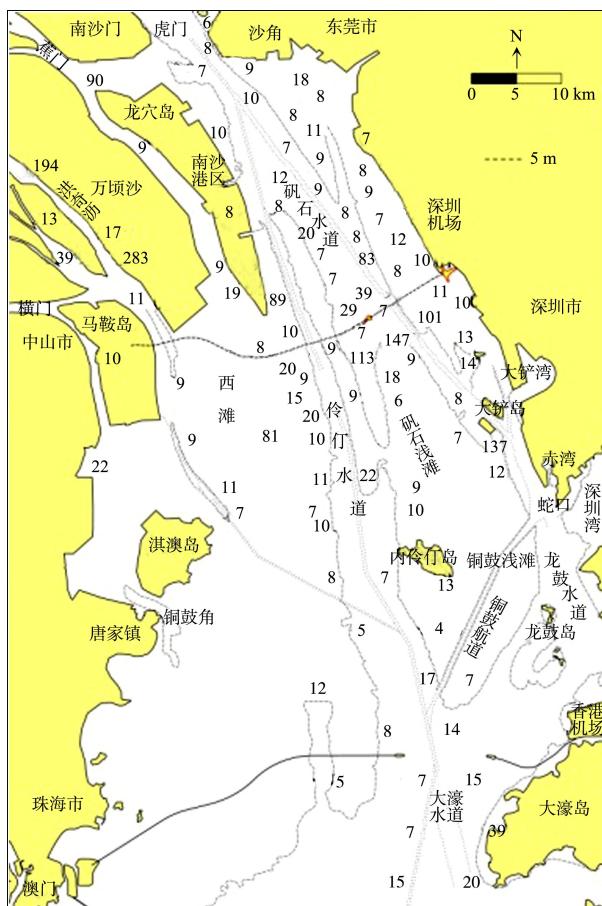


图 2 伶仃洋底质中值粒径分布 (单位: μm)

4 伶仃洋港口航道淤积特征与淤积机理

4.1 港口航道淤积特征

伶仃洋港口航道都需要进行人工开挖, 开挖后均存在泥沙淤积问题, 须经疏浚维持正常水深。南沙港区港池淤强 1 m/a 左右。广州港出海航道一期工程(1996—2000 年)航道水深疏浚至 -11.5 m , 二

期工程(2004—2006 年)航道水深疏浚至 -13.0 m , 三期工程(2006—2012 年)航道浚深至 -17 m , 航道淤积量分别为 240 万、293 万和 587 万 m^3 , 平均淤强分别为 0.38、0.45 和 0.47 m/a, 广州港出海航道淤强对水深变化不敏感。铜鼓航道 2007 年 12 月投入使用, 至 2009 年 6 月, 其主槽累积淤积 646 万 m^3 , 平均淤强 0.93 m/a, 其中航道中段平均淤强 0.53 m/a, 航道北段平均淤强 1.5 m/a。中山港航道 1984 年疏浚至 -4 m , 半年时间淤平; 九州港航道 1985 年疏浚至 -8 m , 一年半时间淤平; 深圳蛇口港 1981 年疏浚后, 第 1 年淤积速率 0.48 m/a(港池)和 0.36 m/a(航道); 赤湾港 1983 年疏浚后, 淤积速率为 0.30~0.60 m/a(港池)和 0.27 m/a(航道)^[21]。泥沙淤积均为悬沙淤积。

伶仃洋港口航道已有历史资料表明, 伶仃洋港口航道大风骤淤不明显, 没发生过大风骤淤碍航现象。

伶仃洋港口航道大风骤淤不明显可从港珠澳大桥试挖槽的测量资料中得以说明。2009 年桥区试挖基槽的试挖槽选择在桥隧人工岛西岛东侧海床平均高程 -9.5 m 的水域, 槽底宽 21 m, 槽底长 100 m, 槽型为东西走向, 挖深至底高程 -21 m , 基槽从 2009 年 2 月竣工观测以来一直到 10 月 13 日的监测结果表明, 其间经历了 2 次热带风暴袭击后, 基槽内并没有出现明显回淤现象^[22]。

4.2 港口航道淤积机理

伶仃洋港口航道泥沙淤积主要控制因素是泥沙来源、径流、潮流动力和高盐陆架水, 港口航道泥沙淤积机理如下。

1) 伶仃洋的外部泥沙来源主要是径流输沙, 径流携带高浓度泥沙直接进入港池航道, 造成港池航道泥沙淤积。

2) 挟沙水体跨越航道或进入港池, 由于水深加大, 流速降低, 水体挟沙能力下降, 造成泥沙沉降落淤。

3) 落淤在浅滩上的泥沙受波浪水流的作用,

达到其起动条件后会再次悬浮起来, 被涨落潮流带入港池航道造成淤积。

4) 悬浮的黏性细颗粒泥沙在盐水中由于物理化学作用会产生网状絮凝团, 即泥沙絮凝成团的絮凝现象, 由于粒径增大, 沉降速度大大加快, 造成淤积。伶仃洋泥沙絮凝现象显著。

5) 涉水工程造成港口航道淤积。①上游纳潮河道及伶仃洋围垦等人类活动造成港口航道淤积。上游河道及伶仃洋的围垦会减少伶仃洋纳潮量, 从而潮流动力减弱, 水体挟沙力降低, 悬沙落淤, 造成淤积。②内伶仃岛以北的采砂活动造成港池航道淤积。伶仃洋内的采砂活动持续时间长、采砂量巨大, 逐渐破坏了伶仃洋北部区域的“三滩两槽”地貌形态, 对水下地形及滩槽水流变化都产生了较大的影响, 采砂活动引起的悬沙扩散对港口航道产生了直接的回淤影响, 港口航道回淤量增加 1%~20%。采砂活动间接影响可能会造成伶仃航道、矾石水道和南沙港区的不稳定。③港珠澳大桥、深中通道等大型涉水工程造成港口航道淤积。港珠澳大桥、深中通道等大型涉水工程, 其桥墩和人工岛对附近港口航道水动力泥沙环境造成影响, 从而使港口航道产生淤积。

5 泥沙水力特性水槽试验

5.1 试验设备

采用环形水槽对伶仃航道悬沙淤积物泥样(中值粒径 6 μm)进行水力特性(起动流速、不淤流速和动水沉速)试验。

环形水槽是目前进行泥沙水力特性试验的较理想设备。其特点是: 无流入口和流出口的影响, 水槽内各断面的水流状态相同, 即环形水槽相当于各断面水流状态相同的无限长的水槽; 不需回水装置和消能设施, 不破坏泥沙的絮凝状态, 亦即泥沙能在与现场条件相似的絮凝状态下沉降、起动和输移; 操作简便, 试验水深、水体含沙量、含盐度、水流速度可方便地进行调节。

5.2 试验条件

1) 试验水深均采用 50 cm, 为水槽的最大水深。

2) 水温是影响泥沙运动的重要因素之一。试验均在通常气温下进行, 本次试验实测水温在 20~23 $^{\circ}\text{C}$ 。

3) 含盐度是细颗粒泥沙发生絮凝的因素。根据现场实测资料确定试验水体含盐度为 24‰。

4) 含沙浓度是沉降速度受其影响的因素之一, 试验水体含沙浓度在 0.2~0.6 kg/m³。

5) 现场采集的伶仃洋航道淤积泥沙, 经粒度分析其中值粒径 $d_{50}=6 \mu\text{m}$, 级配曲线见图 3。各粒级比为: 细砂占 3.98%, 极细砂占 8.36%, 粉砂占 43.89%, 黏土占 43.77%, 属黏土质粉砂。

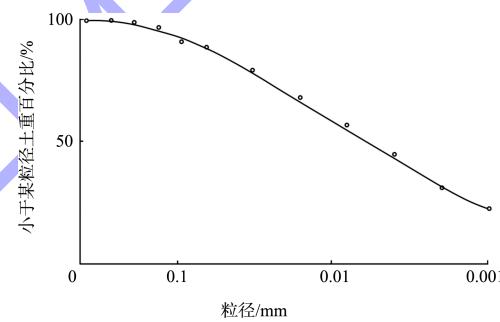


图 3 试验砂样级配曲线

5.3 试验结果

1) 起动流速和不淤流速。泥沙少量起动流速为 0.20 m/s, 中值粒径泥沙起动流速为 0.40 m/s, 全粒级沙起动流速为 0.57 m/s, 不淤流速为 0.53 m/s。

2) 动水沉降速度。泥沙颗粒在水流条件下的沉速称为动水沉速。在含盐度 24‰ 时, 不同含沙量和水流流速条件下的泥沙沉降速度试验结果见表 2, 沉速与水流速度的关系见图 4。

表 2 含盐度 24‰ 时不同含沙量和水流流速条件下的动水沉速

含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动水沉速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)					
	0.0 m/s	0.1 m/s	0.2 m/s	0.3 m/s	0.4 m/s	0.5 m/s
0.2	0.053	0.046	0.041	0.036	0.026	0.015
0.4	0.063	0.058	0.052	0.048	0.039	0.019
0.6	0.073	0.066	0.063	0.058	0.046	0.025

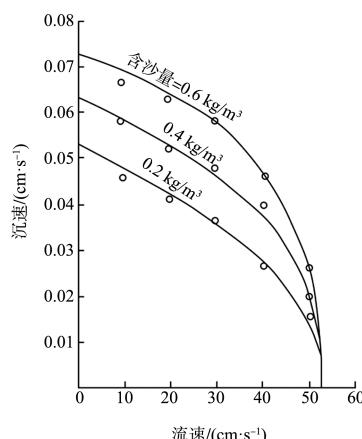


图 4 不同含沙量下的沉速与流速关系曲线

从表 2 和图 4 可见, 在含沙量一定的情况下, 流速越大, 沉速越小; 在流速一定的情况下, 含沙量越大, 沉速越大。

6 浮泥及适航水深利用

浮泥是具有一定流动性的高含沙量悬浮体, 是淤泥质河口、海岸地区特有的一种泥沙现象, 一般密度小于 1.25 t/m^3 的浮泥层可作为适航水深使用。适航水深是指当地理论最低潮面至适航淤泥密度界面之间的垂直距离^[23]。我国现行图载水深是以密度 $1.03 \sim 1.05 \text{ t/m}^3$ 标准为反射界面, 尚有一部分可供航行的小密度适航浮泥层未计入航深。由于适航浮泥层密度较小, 维护疏浚效率很低, 造成资源浪费。开展适航水深研究可以大大降低港池航道维护成本。

如前所述, 伶仃洋海床底质中值粒径一般小于 $30 \mu\text{m}$, 具有淤泥质海岸性质, 港池航道开挖后细颗粒泥沙淤积不可避免, 一般情况下会出现浮泥现象或浮泥淤积^[24], 而浮泥淤积为适航水深的应用提供了可能。

本文以广州港南沙港区为例开展了浮泥密度、厚度及适航水深研究。在南沙港区粮食及通用码头和南沙一、二、三期港池及相应的驳船码头泊位内共布置了 30 个淤泥密度测量站位, 在 2016 年 8 月 21 日、11 月 25 日采用荷兰 Rheotune 音叉密度计进行了 2 次密度测量。蔡南树等^[25]确定了南沙港区的适航密度值约为 1.26 t/m^3 , 依此标准, 对南

沙港区淤泥密度在 $1.05 \sim 1.26 \text{ t/m}^3$ 之间的适航浮泥厚度进行统计计算, 粮食及通用码头和南沙港区一、二、三期各码头作业区的适航浮泥厚度结果见图 5。

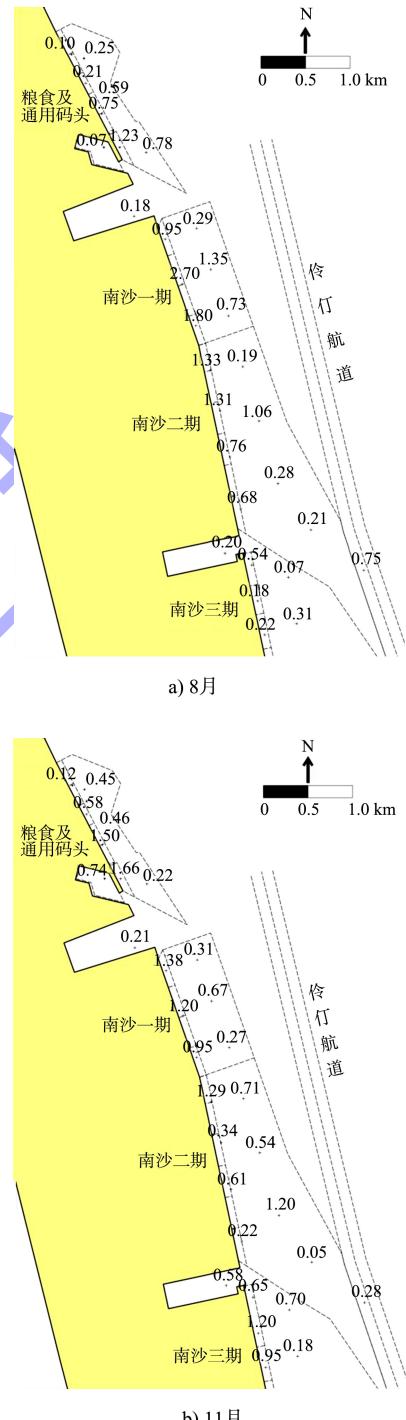


图 5 南沙港区 2016 年 8 月和 11 月
适航浮泥层厚度 (单位: m)

从图 5 可知: 粮食及通用码头港池 2016 年 8 月适航浮泥厚度在 $0.10 \sim 1.23 \text{ m}$, 平均值为

0.56 m; 2016年11月适航浮泥层厚度在0.12~1.66 m, 平均值为0.71 m; 南沙一期港池2016年8月适航浮泥厚度在0.29~2.7 m, 平均值为1.3 m; 2016年11月适航浮泥层厚度在0.27~1.38 m, 平均值为0.8 m; 南沙二期港池2016年8月适航浮泥厚度在0.19~1.33 m, 平均值为0.8 m; 2016年11月适航浮泥层厚度在0.22~1.29 m, 平均值为0.7 m; 南沙三期港池2016年8月适航浮泥厚度在0.07~0.54 m, 平均值为0.26 m; 2016年11月适航浮泥层厚度在0.18~1.20 m, 平均值为0.73 m。

粮食及通用码头和南沙一、二期港池, 2015年8月—2016年8月期间基本没有大幅度的疏浚施工, 仅有局部应急疏浚; 2016年8—11月期间粮食码头和南沙一、二期港池维护疏浚时间也较短, 而三期港池内有持续的疏浚施工。因此, 2016年8月和11月密度测量结果基本反映了粮食码头和南沙一、二期港池的1年期回淤泥沙密度分布及适航浮泥厚度情况。

综上, 南沙港区回淤泥沙的上层以浮泥形式存在, 粮食及通用码头和南沙一、二期港池的浮泥平均厚度基本在0.1~2.7 m, 这部分浮泥可作为水深使用。

7 港口航道维护对策

伶仃洋港口航道泥沙淤积主要控制因素是泥沙来源和水流动力, 港口航道维护对策出发点应该是保持滩槽稳定和水沙平衡、减少沙源、维持潮流动力。径流沙源减少泥沙淤积肯定减少, 潮流动力不减弱, 则水体挟沙能力不降低, 淤积不会增加。据此, 港口航道防淤、减淤维护对策分析如下:

- 1) 确保伶仃洋“三滩两槽”格局, 对破坏“三滩两槽”地貌形态和稳定的采砂活动应该予以制止, 对已有采砂坑应予以恢复。
- 2) 确保伶仃洋上游河道和伶仃洋的纳潮容积不被侵占, 尽量避免围垦减小水域面积。
- 3) 通过定期疏浚, 保证港口航道正常水深。

4) 通过适当的整治措施, 减少河道来沙, 维护港口航道稳定。

- 5) 开发港口航道减淤新措施新技术。
- 6) 利用浮泥适航水深技术, 降低疏浚成本。
- 7) 定期水深测量和水文要素监测。
- 8) 对工程项目方案充分论证、不断优化。对于重大工程应该同步开展水沙数学模型和物理模型试验研究, 不断优化方案, 确保工程对伶仃洋“三滩两槽”地貌格局稳定、港口航道稳定及其淤积无负面影响或负面影响很小。

8 结论

- 1) 伶仃洋的泥沙来源主要为珠江口东四门径流输沙(以悬移质为主), 外海来沙甚少。
- 2) 伶仃洋径流、潮流与高盐陆架水是控制泥沙运动的主要因素, 波浪对泥沙的作用主要是使其再悬浮。泥沙运动以悬沙运移为主。
- 3) 伶仃洋港口航道淤积机理主要为挟沙水体进入港池航道后动力减弱落淤, 港口航道淤积主要为悬沙淤积。
- 4) 伶仃洋港口航道存在一定的泥沙淤积问题, 但大风骤淤现象不明显, 无骤淤碍航问题。
- 5) 伶仃洋悬沙中值粒径6 μm 左右, 物质成分为黏土质粉砂和粉砂质黏土; 床面表层泥沙的中值粒径主要在5~10 μm , 具有淤泥质海岸性质。
- 6) 泥沙水力特性水槽试验结果表明: 淤积泥沙少量起动流速为0.20 m/s, 中值粒径泥沙起动流速0.40 m/s, 全粒径级泥沙起动流速0.57 m/s; 悬浮泥沙不淤流速0.53 m/s; 在含沙量0.2 kg/m³、含盐度为24‰时, 静水沉速0.053 cm/s。
- 7) 伶仃洋港口航道存在浮泥现象及适航水深应用的可能。以南沙港区为例, 其港池回淤泥沙的上层以浮泥形式存在, 浮泥平均厚度基本在0.1~2.7 m, 可以作为适航水深开发使用。
- 8) 确保伶仃洋“三滩两槽”格局存在、确保伶仃洋上游河道和伶仃洋的纳潮容积不被侵占、利用浮泥适航水深技术降低疏浚成本等均可作为伶仃洋港口航道维护对策。

参考文献:

- [1] 李孟国, 韩志远, 李文丹, 等. 伶仃洋滩槽演变与水沙环境研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2019(5): 20-33.
- [2] 吴明阳. 铜鼓航道泥沙淤积问题研究[J]. 水道港口, 1995, 16(1): 29-32.
- [3] 林健, 杨树森. 伶仃洋铜鼓海区海床演变分析及铜鼓航道淤积量计算[J]. 水运工程, 1996(9): 31-37.
- [4] 康苏海, 杨树森, 吴明阳, 等. 铜鼓航道泥沙淤积研究[J]. 水道港口, 1997, 18(2): 38-42.
- [5] 吴明阳. 深圳港铜鼓航道选线分析[J]. 水道港口, 1998, 19(2): 37-41.
- [6] 吴明阳. 西滩围垦对伶仃航道影响的试验研究[J]. 水运工程, 1995(12): 29-34.
- [7] 吴明阳, 杨树森, 冯玉林. 珠江口大铲湾港区泥沙淤积问题研究[J]. 水道港口, 1996, 17(2): 25-29.
- [8] 曹祖德, 蔡嘉熙. 珠江口伶仃洋航道整治研究[J]. 水道港口, 1998, 19(1): 1-6.
- [9] 吴明阳, 杨树森, 冯玉林. 伶仃洋泥沙淤积模型试验研究[J]. 水道港口, 2001, 22(3): 118-121.
- [10] 李文丹. 广州港出海航道三期工程潮流数学模型研究[J]. 水道港口, 2008, 29(3): 179-184.
- [11] 李孟国, 韩西军, 杨树森, 等. 广州港南沙港区深水航道水沙问题研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2008, 23(3): 321-330.
- [12] 辛文杰. 伶仃洋西岸浅滩建港条件分析[J]. 水利水运工程学报, 2010(1): 9-15.
- [13] 李孟国, 辛文杰, 徐群, 等. 港珠澳大桥对珠江口伶仃洋水沙环境和港口航道的影响[J]. 水运工程, 2017(10): 67-72, 79.
- [14] 乐培九. 伶仃洋滩槽演变及其发展趋势[J]. 水道港口, 2001, 22(2): 73-79, 90.
- [15] 韩西军, 杨树森. 珠江口鸡抱沙附近地形冲淤演变研究[J]. 水道港口, 2008, 29(5): 328-332.
- [16] 韩志远, 李怀远, 许婷. 南沙港区水深维护工程标准化与现代化管理技术开发应用研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2017.
- [17] 许婷, 韩志远, 陈纯. 砾石水道航道工程河床演变研究[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2018.
- [18] 解鸣晓, 许婷, 韩志远. 深圳港西部港区出海航道二期工程波浪、潮流泥沙数学模型及岸滩稳定性研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2019.
- [19] 李孟国, 许婷, 解鸣晓, 等. 重大工程影响下伶仃洋港口航道维护对策[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2020.
- [20] 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, 2015.
- [21] 申其国, 谢凌峰, 解鸣晓, 等. 珠江三角洲河口湾航道整治研究[J]. 水道港口, 2019, 40(3): 286-292.
- [22] 辛文杰, 贾雨少, 何杰. 港珠澳大桥沉管隧道试挖槽回淤特征分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(2): 71-78.
- [23] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 淤泥质海港适航水深应用技术规范: JTJ/T 325—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [24] 梁荣江, 韩西军, 刘志东, 等. 珠海电厂港区适航水深研究与应用[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 343-346, 398.
- [25] 蔡南树, 庞启秀, 杨树森, 等. 广州港南沙港区港池适航水深综合论证研究[J]. 水道港口, 2009, 30(4): 253-256.

(本文编辑 郭雪珍)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。