



印尼东加产业园码头及 航道工程测绘技术与实践

李雅琼, 江木春, 朱春春

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要: 针对海外大型港口及航道建设工程在陌生复杂地形水文环境下基础测绘数据匮乏、技术体系不完善等问题, 以印尼东加产业园码头及航道工程(含内河、海湾及海洋复合水域)为例, 开展系统性测绘技术研究与实践。该工程需解决热带雨林覆盖区无测绘基准、水下地形未知、潮汐与潮流特征复杂、底质分布不清等技术挑战。通过融合 GNSS(全球导航卫星系统)静态测量、多波束测深、侧扫声呐、潮位调和与分析、六点法潮流观测及联合粒度分析技术, 构建了涵盖平面与高程基准、水下地形、水文动力及底质特性的全要素测绘体系。提出的技术体系攻克了缺乏海外复杂水域测绘数据的难题, 实现热带雨林-海湾-海峡复合区域多要素协同测绘, 可为“一带一路”沿线类似港口工程提供标准化技术范式, 并推动智能化无人测绘装备在海外工程中的深化应用。

关键词: 测绘基准; 工程测量; 水文观测; 潮位观测; 潮流观测; 底质取样

中图分类号: U64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0019-08

Surveying technology and practice for terminal and waterway engineering in Tonga Industrial Park, Indonesia

LI Yaqiong, JIANG Muchun, ZHU Chunchun

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: To the lack of basic surveying and mapping data and incomplete technical system in unfamiliar and complex terrain and hydrological environments for large-scale overseas port and waterway construction projects, a systematic research and practice of surveying and mapping technology is carried out using the terminal and waterway project in Indonesia Tonga Industrial Park(including inland rivers, bays, and marine composite waters) as an example. This project needs to address technical challenges such as the lack of surveying benchmarks in tropical rainforest coverage areas, unknown underwater terrain, complex tidal and current characteristics, and unclear sediment distribution. By innovatively integrating GNSS (global navigation satellite system) static measurement, multibeam depth measurement, side scan sonar, tidal level harmonic analysis, six point tidal current observation, and joint granularity analysis technology, a comprehensive surveying system covering plane and elevation benchmarks, underwater terrain, hydrological dynamics, and sediment characteristics has been constructed. The technical system proposed in this study has overcome the problem of lack of surveying and mapping data in overseas complex waters, and achieved multi element collaborative surveying and mapping in the tropical rainforest bay strait composite area, which can provide a standardized technical paradigm for similar port projects along the “the Belt and Road”, and promote the deepening application of intelligent unmanned surveying and mapping equipment in overseas projects.

Keywords: surveying and mapping benchmark; engineering surveying; hydrological observation; tide level observation; tide observation; bottom sediment sampling

收稿日期: 2025-03-31 录用日期: 2025-04-27

作者简介: 李雅琼(1984—), 女, 高级工程师, 从事公路、桥梁、港口和航道等工程测量工作。

印尼东加煤化工产业园码头及航道工程位于印尼加里曼丹岛(Kalimantan), 作为世界第三大岛屿, 拥有丰富的自然资源和战略性的地理位置, 港口和航道建设对区域经济发展、资源运输及国际航运至关重要, 拟建深水码头及航道工程可作为印尼煤炭、木材和棕榈油出口的重要枢纽。项目位于东加里曼丹省巴西县东南部阿帕尔湾附近

河道及海域, 码头区及内河航道位于南部支流, 出海口位于阿帕尔湾, 通向望加锡海峡。项目计划在码头区内建设5万吨级煤炭出口、多用途和液体散货泊位4个, 并建设1条5万吨级的航道, 航道包括长度19.5 km的内河航道和长度34.6 km的沿海航道, 测量范围东经116° 11.9'—116° 39.9', 南纬2°01.6'—2°12.0', 见图1。

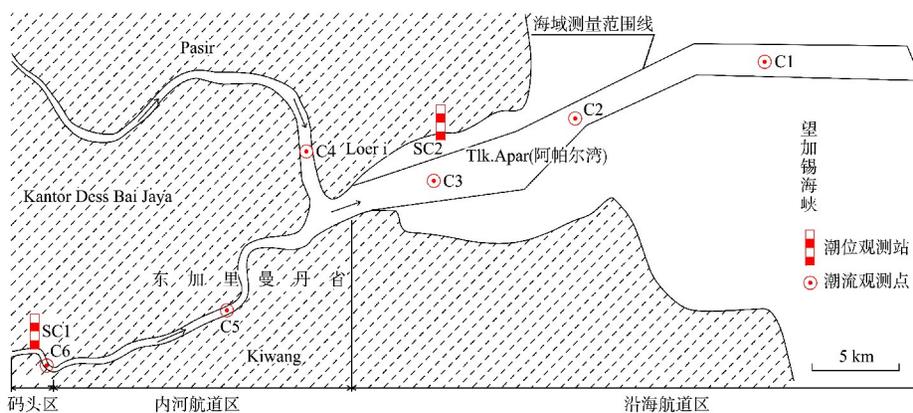


图1 印尼东加产业园码头及航道工程位置

Fig. 1 Location of Indonesia Tonga Industrial Park Terminal and waterway project

印尼东加产业园区域属于典型的热带雨林气候, 植被茂盛, 大部分为原始森林, 河流密布, 人口稀少, 交通不便, 测绘成果匮乏, 测区附近无相关测绘基础成果。河流、阿帕尔湾与望加锡海峡等地形及水文环境复杂, 港口航道工程测量与水文测量面临诸多技术挑战。本文结合现场工作实践, 通过对海外陌生区域大型港口及航道测量技术进行分析和总结, 重点对测绘基准建立、水下地形测量、潮位观测与分析、潮流观测与分析和底质取样与分析等测绘技术进行总结, 为类似复杂地形水文条件的海外大型港口航道建设提供重要技术参考。

阶段, 当地测绘成果处于空白状态, 为了保障在项目的建设不同阶段基准统一, 需建立完整统一的测绘基准。基准设计与相关参数选择还需考虑与印尼当地国家测绘基准参数一致, 避免后期项目审批等情况。实际作业中需根据测区条件和精度要求等, 平面基准基于参考椭球体和大地球体模型(如WGS84、CGCS2000), 通过全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)定位技术建立, 高程基准基于平均海平面或区域性水准面建立。

1 工程测量

1.1 测绘基准的建立

测绘基准是所有项目建设的基础, 主要包括平面基准和高程基准。由于园区处于开发的初始

1.1.1 平面控制基准

将测量范围导入奥维地图, 根据码头区、内河航道区和沿海航道区位置制定控制点布设方案, 平面控制点与高程控制点共用点位, 依据奥维地图可以清晰了解当地村庄、道路、河流和森林等基本情况, 确立初步布设方案, 并在现场进行优化调整, 确认最佳方案, 基本原则是控制点布设

在村庄、道路与河流、海岸交汇处,有利于埋设、保存和联测,间距及角度需满足规范要求,共布设了5个D级GNSS控制点,见图2。其中D1位于码头区内;D2、D3位于内河航道区内,且D3位于河流出海口附近;D4、D5位于阿帕尔湾河流出海口两侧,在D4附近设置水尺SC2。静态定位数据采集采用5台GNSS同步观测,共观测2个时段,每个时段不少于60 min。

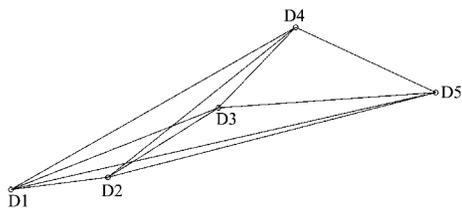


图2 GNSS控制网布设

Fig. 2 GNSS control network layout

平面控制系统采用WGS84 UTM Zone 50N坐标系相关投影参数(与印尼当地坐标系一致),横轴墨卡托投影,其椭球体WGS84,长半轴为6 378 137 m,扁率倒数为298.257 223 563,中央子午线东经117°,纬度原点0°(赤道),假东偏移500 km,假北偏移10 000 km为参数进行投影得到基础坐标,UTM投影的尺度比为0.999 6,相对精度不能满足施工需要,需进行改化,以D1投影坐标点为约束原点,以最长边D1~D5投影方向为约束方向,尺度比为1,进行第二次约束平差。控制网长度变形满足相关测量规范要求(通常 ≤ 2.5 cm/km)。

1.1.2 高程控制基准

沿海地区可通过一定周期验潮建立高程基准,至少1个天文潮周期(如朔望月),需结合潮汐观测、数据分析和基准传递技术,确保高程基准的可靠性和精度。项目高程基准基于在D4附近阿帕尔湾设置潮位观测站SC2(图1),通过34 d潮位观测及调和分析的结果,计算出当地平均海平面(mean sea level,MSL),作为高程基准起算面。

潮位观测站SC2设置在河流出海口水流的影响区域外,潮位观测及分析内容见第2章。采用水准测量将SC2与D4进行高程联测,得到D4当地平均海平面MSL基准面的高程,其他控制点采用GNSS静态测量方式,进行曲面拟合模型,建立高程异常曲面,并利用EGM 2008大地水准面模型和静态观测获取其他各控制点的GNSS拟合高程。

1.2 水下地形测量

码头及航道(包括内河航道及沿海航道)水深测量目的是保障通航安全,确保航道水深满足船舶吃水需求,避免搁浅或触礁。项目水域无地形图可参考,障碍物分布情况也未知,针对这种情况,采用GNSS-RTK定位,多波束测深和侧扫声呐扫测相结合的技术,浅水区及盲区测深仪进行补充测量。多波束高效获取高分辨率水底地形数据,覆盖范围广且精度达厘米级,适用于航道疏浚区及码头前沿水域大范围测量;侧扫声呐可识别沉船、礁石等障碍物,为航道疏浚提供目标定位。成果经水位校正,消除潮汐对水深数据的影响。数据经处理后生成三维数字高程模型(digital elevation model,DEM),直观展示航道纵断面、横断面形态和水下障碍物等情况。

2 水文观测

2.1 潮位观测及分析

2.1.1 潮位观测

设潮位观测站2处(SC1和SC2)。SC1位于河道内码头处,SC2位于阿帕尔湾D4附近,采用自动观测潮位计进行潮位观测,潮位观测每10 min进行1组数据采集,每组采集10个数据并取其平均值,共进行34 d的潮位观测。SC2潮位过程曲线见图3。

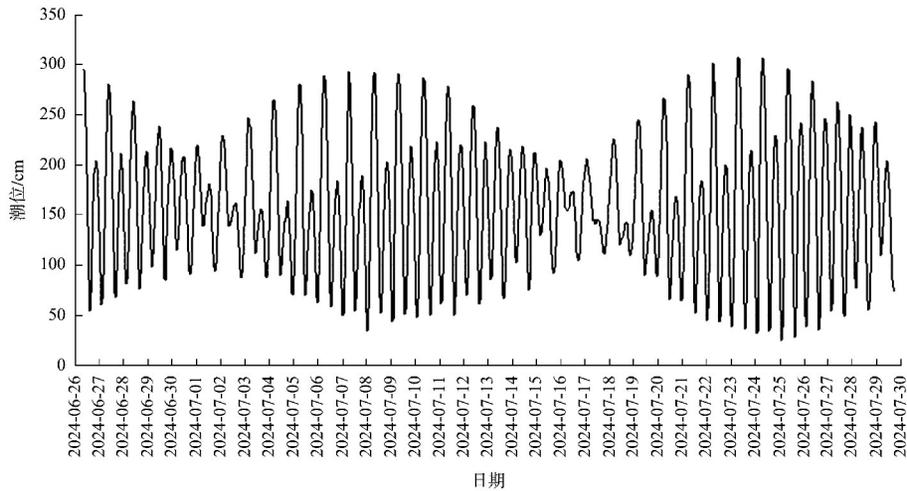


图3 阿帕尔湾 SC2 潮位过程曲线

Fig.3 Process curve of SC2 tide level in Apar Bay

2.1.2 潮位分析

潮位分析包括潮汐调和常数分析和潮型类别判别等。调和分析把潮汐分解成不同频率的分量，每个分量对应不同的天文因素，包括每个分量的振幅和迟角。依据 SC2 潮位观测站连续 34 d 实测潮位资料，通过最小二乘法对逐时潮位数据进行调和分析，采用 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 Q_1 、 P_1 、 M_6 、 M_{S4} 及 M_4 共 11 个分潮，计算主要分潮调和常数。潮汐调和常数见表 1^[1-2]。

表 1 调和常数
Tab.1 Harmonic constant

分潮	振幅/cm	迟角/(°)
M_2	68.90	157.37
S_2	49.43	239.01
N_2	7.51	146.25
K_2	6.72	262.01
K_1	23.06	262.17
O_1	18.58	257.71
P_1	19.21	303.17
Q_1	3.28	260.53
M_4	4.74	139.99
M_{S4}	5.30	215.49
M_6	0.50	168.24

潮汐类型有半日潮、全日潮和混合潮这 3 种主要类型。半日潮 1 d 有 2 次高潮和 2 次低潮，而且 2 次高潮的高度接近，2 次低潮也接近，周期约为 12 h 25 min^[3-4]。全日潮是 1 d 只有 1 次高潮和 1 次低潮，或者是 2 次高潮和低潮但其中 1 次不明显，周期约为 24 h 50 min。混合潮是介于两者之

间，有时候 2 次高潮和低潮，但高度差异较大，或者有时候变成 1 次。计算主要分量的振幅比值，传统的 Formzahl 数使用 4 个主要分潮，潮汐类型判别见式(1)，潮汐类型判别标准见表 2^[5]。

$$F = (K_1 + O_1) / (M_2 + S_2) \quad (1)$$

式中： F 为潮型数； K_1 、 O_1 为全日分潮振幅； M_2 、 S_2 为半日分潮振幅。

表 2 潮汐类型判别标准

Tab.2 Tide type discrimination criteria

数值范围	属性名称
$F < 0.25$	半日潮(半日分潮主导)
$0.25 \leq F \leq 3.0$	混合潮(日分潮与半日分潮均显著)
$F > 3.0$	全日潮(日分潮主导)

经计算求得阿帕尔湾 F 值为 0.35，经分析判别，其潮汐类型属混合潮（日分潮与半日分潮均显著）。

2.1.3 潮汐特征值统计

潮汐特征值的统计分析是码头及航道工程等领域的重要研究内容，主要用于预测潮汐规律、评估极端潮位风险和优化港口设计等，基于统计的潮差和极端潮位，确定码头高程和防波堤高度，利用调和和分析优化船舶进出港时间窗口等，潮汐特征值为沿海及受潮汐影响的内河港口航道建设提供科学依据。潮汐特征值主要包括：最高天文潮、最低天文潮、平均大潮高潮位、平均大潮低潮位、平均高潮位、平均低潮位、平均海平面、最大潮差、最小潮差、平均潮差、平均涨潮历时、平均落潮历时等。根据潮位观测报表和潮汐调和常数，可统计分析出阿帕尔湾潮汐特征值，见表 3^[6-7]。

表 3 潮汐特征值

Tab. 3 Tidal characteristic values

实测最高潮位/cm	最高潮位出现时刻	实测最低潮位/cm	最低潮位出现时刻	实测平均高潮位/cm	实测平均低潮位/cm	平均潮差/cm	最大潮差/cm	最大潮差出现时刻	
310	2024-07-23 T07:20:00	23	2024-07-25 T02:20:00	230	72	158	280	2024-07-24T07:50:00 至 2024-07-24T14:30:00	
最小潮差/cm	最小潮差出现时刻	平均涨潮历时	平均落潮历时	平均海平面/cm	最低天文潮位/cm	最高天文潮位/cm	大潮高潮位/cm	大潮平均高潮位/cm	大潮平均低潮位/cm
5	2024-07-17T10:00:00 至 2024-07-17T11:50:00	6 h 25 min	5 h 59 min	159	-28	346	326	297	38

2.2 潮流观测及含沙量取样分析

潮流观测及含沙量取样分析是港口工程、航道维护及环境评估中的重要环节,其目的是掌握水动力条件和泥沙运动规律,为通航安全、防淤治理、港口规划等提供科学依据,需要综合潮流和含沙量数据,建立泥沙输运模型。潮流观测及含沙量取样同步进行,并同步潮位观测^[8]。在项目水域共布设 6 个进行潮流观测及含沙量取样分析点位,见图 1 中 C1~C6,其中 C1 位于望加锡海峡, C2、C3 位于阿帕尔湾内, C4 位于河口北侧支汊, C5 位于内河航道中间, C6 位于码头区内,分别代表着不同水域的潮流特征及含沙量情况。共进行 2 个潮次(大潮、小潮)的观测和取样,主要包括流速、流向观测及水体含沙量取样等。

2.2.1 潮流观测与分析

根据观测点的水深 H ,潮流观测层次分为表层(水面下 0.5 m)、0.2 H 、0.4 H 、0.6 H 、0.8 H 和底层(海底往上 0.5 m)共计 6 层,采用六点法进行观测。将声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler profiler, ADCP)装在专用支架上,然后采用 GNSS-RTK 进行导航定位,到达指定点位后,各站点同时开始,进行连续同步观测。在整点时分观测垂线各层流速、流向,大潮和小潮各观测 1 次,每测次连续观测 27 h,观测结束后,及时对观测成果进行整理计算和合理性检查,发现错漏及时补测或返测^[9]。

潮流统计计算包括各潮次各垂线分层的流速、流向统计表、潮位数据、垂线最大及平均流速、流向和垂线平均流速、流向等,分别绘制大潮和小潮的各点垂线平均流速矢量图,大潮垂线平均流速矢量见图 4,大潮和小潮各分析点位的最大流速见表 4。

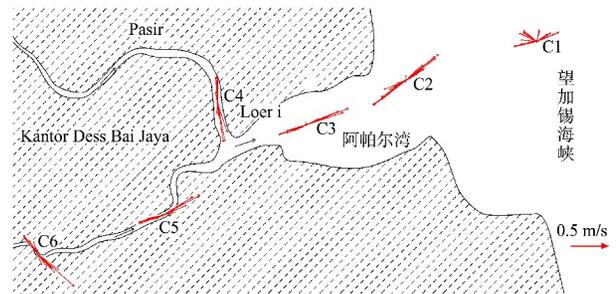


图 4 大潮垂线平均流速和流向
Fig. 4 Average flow velocity and direction of spring tide vertical line

表 4 各分析点位最大流速流向
Tab. 4 Maximum flow velocity and direction at each analysis point

潮次	过程	分析点位	流速/($m \cdot s^{-1}$)	流向/($^{\circ}$)	层次
大潮	涨潮	C1	0.54	263	表层
		C2	0.94	237	0.6 H
		C3	0.69	255	表层
		C4	0.62	0	表层
		C5	0.55	249	表层
		C6	0.51	312	表层
大潮	落潮	C1	0.57	68	表层
		C2	1.11	51	表层
		C3	1.11	71	表层
		C4	0.84	169	表层
		C5	1.02	62	表层
		C6	1.11	134	0.2 H
小潮	涨潮	C1	0.43	270	表层
		C2	0.69	232	0.6 H
		C3	0.48	245	0.2 H
	落潮	C4	0.43	1	表层
		C5	0.42	241	0.4 H
		C6	0.31	324	0.2 H
小潮	落潮	C1	0.42	52	表层
		C2	0.78	54	0.2 H
		C3	0.66	78	0.2 H
		C4	0.64	168	表层
		C5	0.67	68	表层
		C6	0.56	151	表层

根据大潮和小潮的成果进行分析，潮流具有如下特征：

1) 从流向上看，各测点潮流除了受河道和地形影响外，整体上具有明显往复流特征，其中望加锡海峡中 C1 距离海岸较远，受河流影响小，海流流向呈扇形变化，其他各点流向则均呈现往复流特征。

2) 从流速上看，C1 涨落潮最大流速均出现在表层，且最大流速基本相当，大潮流速整体上半比小潮偏大；C2~C6 位于河道内或受河流影响较大，涨落潮最大流速大多位于表层和 0.2H，落潮最大流速均明显大于涨潮最大流速，各测点大潮最大流速也明显大于小潮最大流速。

2.2.2 含沙量取样分析

含沙量取样与潮流观测同步进行，分别在大潮及小潮期间进行，分表、中、底 3 层取样 (0.2H、0.6H、0.8H)，根据水文观测要求，取样间隔为 2 h，每份水样不少于 500 ml，观测期间取样共计 504 份。

含沙量分析采用烘干过滤法，需经纯净水洗盐并剔除非泥沙杂质等，逐个采用高精度电子天平进行称重并记录，制作含沙量统计表，以 2024 年 7 月 21 日 12 时—2024 年 7 月 22 日 14 时 C1 大潮期为例，其含沙量统计结果见表 5^[10]。

表 5 C1 大潮含沙量统计

Tab. 5 Statistical results of C1 spring tide sediment concentration

时间	位置	含沙量/ (g·L ⁻¹)	时间	位置	含沙量/ (g·L ⁻¹)
2024-07-21 T12:00:00	表	9	2024-07-22 T02:00:00	表	9
	中	7		中	9
	底	14		底	11
2024-07-21 T14:00:00	表	14	2024-07-22 T04:00:00	表	6
	中	10		中	5
	底	18		底	9

续表5

时间	位置	含沙量/ (g·L ⁻¹)	时间	位置	含沙量/ (g·L ⁻¹)
2024-07-21 T16:00:00	表	7	2024-07-22 T06:00:00	表	8
	中	8		中	10
	底	12		底	9
2024-07-21 T18:00:00	表	7	2024-07-22 T08:00:00	表	7
	中	9		中	6
	底	11		底	8
2024-07-21 T20:00:00	表	8	2024-07-22 T10:00:00	表	6
	中	9		中	6
	底	11		底	10
2024-07-21 T22:00:00	表	12	2024-07-22 T12:00:00	表	9
	中	11		中	6
	底	13		底	11
2024-07-22 T00:00:00	表	9	2024-07-22 T14:00:00	表	13
	中	9		中	11
	底	13		底	16

根据含沙量统计表成果，可以分析得出总体上含沙量自表层向底层逐渐增大，同时统计大潮和小潮各测站最大含沙量值，见表 6。

表 6 各分析点位最大含沙量统计

Tab. 6 Statistics of maximum sediment concentration at each analysis point (g·L⁻¹)

潮汐条件	C1	C2	C3	C4	C5	C6
大潮	18	58	67	42	54	35
小潮	26	35	31	31	32	33

2.3 底质取样及分析

底质取样与分析是港口与航道建设和疏浚维护的重要环节，通过分析底质物理性质如粒度、承载力、剪切强度和稳定性等，为航道设计提供数据。采样点布设采用网格法，覆盖航道轴线、边坡、转弯处，避开人为扰动区^[11]，共布设 40 个取样点(S01~S40)，内河自码头沿航道至河口，海域自岸边至-20 m 水深处，取样点范围略大于测深范围，其中望加锡海峡内布设 15 个(S01~S15)，阿帕尔湾布设 20 个(S16~S35)，河道内布设 5 个(S36~S40)，每个取样点底质取样质量不少于 500 g，见图 5。

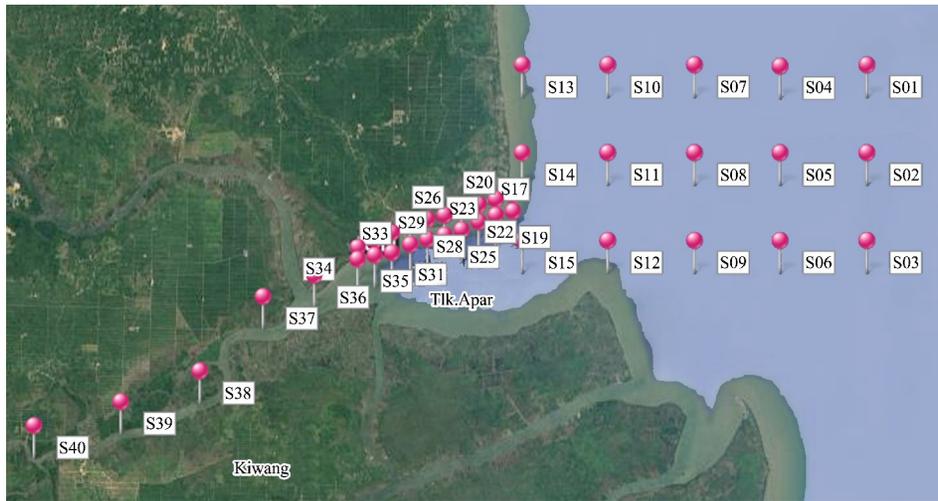


图5 取样点位置

Fig. 5 Sampling point location

试验分析方法采用激光衍射法和筛分法, 分析统计各粒径级的百分比分布, 计算中值粒径 D_{50} , 并绘制颗粒级配曲线, 计算黏土含量及分选系数等。

2.3.1 样品预处理流程

1)分样操作: 采用分样器将原始样品均分为两份, 遵循代表性原则; 2)烘干处理: $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ 恒温干燥至恒重, 避免高温破坏颗粒结构; 3)分级过筛: 采用标准筛组进行机械筛分(20~230目), 对 $<0.062\text{ mm}$ 细颗粒实施水洗法预处理; 4)粒度分段: 建立 $>0.062\text{ mm}$ (筛分法)和 $<0.062\text{ mm}$ (激光法)的联合分析体系。

2.3.2 粒度分析技术体系

激光衍射法测量范围: $0.02 \sim 2\ 000\ \mu\text{m}$, 配备超声分散模块(功率可调范围 $30 \sim 100\ \text{W}$), 根据样品矿物组成设定折射率 $1.52 \sim 1.65$; 对粗颗粒($>0.062\text{ mm}$)采用湿筛法, 以校正激光法边缘效应, 建立筛分-激光法分段函数数据融合模型, 确保全粒径段连续性。

根据含量计算各级粒径的质量占比和 D_{50} , 并绘制颗粒级配图。分析内容主要包括底质粒径分布表、分布曲线、中值粒径、黏土含量及分选系数等。试验分析底质粒径分布曲线计算中值粒径, 底质中值粒径见表7, 黏土含量及分选系数见表8。

表7 底质中值粒径分析成果

Tab. 7 Results of median particle size of substrate

取样点	中值粒径/mm	取样点	中值粒径/mm	取样点	中值粒径/mm	取样点	中值粒径/mm
S01	0.001 4	S11	0.001 4	S21	0.001 4	S31	0.001 1
S02	0.001 6	S12	0.001 8	S22	0.001 3	S32	0.001 6
S03	0.001 2	S13	0.001 8	S23	0.001 2	S33	0.001 5
S04	0.001 9	S14	0.001 0	S24	0.001 5	S34	0.001 7
S05	0.001 4	S15	0.002 5	S25	0.001 8	S35	0.001 4
S06	0.001 3	S16	0.001 4	S26	0.001 4	S36	0.001 9
S07	0.001 3	S17	0.001 4	S27	0.001 2	S37	0.001 4
S08	0.001 6	S18	0.001 5	S28	0.001 8	S38	0.017 0
S09	0.008 5	S19	0.001 3	S29	0.024 0	S39	0.036 0
S10	0.001 3	S20	0.001 2	S30	0.001 4	S40	0.140 0

表 8 底质黏土含量分选系数成果

Tab. 8 Results of sorting coefficient for bottom clay content

取样点	黏土含量/%	分选系数									
S01	70.43	0.010 6	S11	70.38	0.010 3	S21	71.27	0.010 1	S31	72.95	0.010 0
S02	68.66	0.011 1	S12	68.57	0.010 5	S22	72.09	0.010 8	S32	68.72	0.010 5
S03	72.12	0.010 6	S13	66.83	0.015 3	S23	72.08	0.010 3	S33	70.36	0.010 7
S04	66.94	0.012 4	S14	72.96	0.010 4	S24	69.54	0.011 2	S34	68.73	0.010 2
S05	71.23	0.010 4	S15	64.36	0.014 1	S25	67.82	0.011 6	S35	70.41	0.010 1
S06	71.27	0.011 0	S16	70.36	0.010 4	S26	70.39	0.010 4	S36	67.88	0.012 1
S07	71.24	0.011 1	S17	71.25	0.010 3	S27	72.94	0.010 0	S37	71.23	0.010 2
S08	68.68	0.010 6	S18	70.42	0.010 4	S28	68.69	0.010 8	S38	33.70	0.044 6
S09	40.63	0.028 6	S19	72.11	0.010 6	S29	20.19	0.086 1	S39	18.43	0.151 6
S10	71.28	0.010 4	S20	72.97	0.009 9	S30	70.42	0.010 7	S40	1.98	0.225 3

3 结论

1) 因地制宜的测绘基准建设与技术看新: 针对海外大型港口及航道建设工程复杂的地形与水文环境, 通过融合 GNSS 静态测量、多波束测深、潮位观测等技术, 建立了兼顾当地国家基准与国际标准的测绘基准体系, 解决了陌生区域基础测绘数据缺失的难题, 提供了高精度、可靠的空间数据支撑。

2) 综合水文观测体系的实践价值: 通过系统布设潮位观测站、潮流观测点及底质取样点, 结合多层次的潮汐调和分折、潮流动态监测及底质物理特性研究, 为航道疏浚设计、码头高程确定及防淤治理提供了科学依据, 显著提升了工程的安全性与经济牲。

3) 智能化测绘技术的应用前景: 测绘科技的发展和智能化、无人化设备不断更新迭代, 如无人机、无人船、水下智能机器人等智能化装备在复杂水域测量应用中的高效牲与可靠性, 将进一步推动港口航道测绘向无人化、高精度、低成本的智能化方向发展。

参考文献:

- [1] 韩亚民, 江木春, 李勇, 等. 海南马村港远岛规划水文观测与分析[J]. 中国水运·航道科技, 2021(30): 74-80.
HAN Y M, JIANG M C, LI Y, et al. Hydrological observation and analysis of remote island planning of

Macun Port in Hainan [J]. China water transportation (science & technology for waterway), 2021(30): 74-80.

- [2] 蒲小勇. JATIGEDE 工程大坝外部变形观测施工[J]. 四川水力发电, 2019, 38(6): 99-100, 107.
PU X Y. Observation construction of external deformation of the dam of jatigede project[J]. Sichuan water power, 2019, 38(6): 99-100, 107.
- [3] 马瑞, 张从从, 张旭哲, 等. 基于多波束测深技术河道测深优化研究[J]. 水力发电, 2025, 51(3): 44-49, 91.
MA R, ZHANG C C, ZHANG X Z, et al. Research on the optimization of river channel bathymetry based on multi-beam bathymetry technology [J]. Water power, 2025, 51(3): 44-49, 91.
- [4] 李秀亭. 山东半岛沿岸海域的潮汐特征[J]. 海岸工程, 1989, 8(4): 30-36.
LI X T. Tidal characteristics of the coastal waters of the Shangdong peninsula [J]. Coastal engineering, 1989, 8(4): 30-36.
- [5] 侯放. 基于 FVCOM 的舟山群岛海域潮流能分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
HOU F. The analysis of tidal energy in Zhoushan Island based on FVCOM [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [6] 童章龙. 潮汐调和分折的方法和应研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
TONG Z L. Research on methods and applications of tidal harmonic analysis[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.

(下转第 42 页)