

西沙永乐龙洞探秘前期调查工作综述

刘焱雄, 杜 军, 吴志露, 田梓文, 丰爱平

(国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要:西沙永乐龙洞是目前已知的最深蓝洞, 具有极高的科学研究与社会价值。目前永乐龙洞调查研究仅处于初级阶段, 科学揭秘亟待展开, 基于此, 国家海洋局第一海洋研究所拟大规模开展西沙永乐龙洞探秘工作。龙洞处于永乐环礁之上, 水浅礁多, 周边暗礁林立, 水下情况复杂多变, 缺乏直接大规模探测条件, 前期的进出航路探测和作业条件调查必不可少。本次调查综合利用大地控制测量、单波束测深、多波束测深与潮位控制等相关技术, 对龙洞周围以及永乐环礁大船进出航路进行了综合勘测, 建立了龙洞周边的大地基准, 获取了目标海域的水深资料, 为后期大型作业船进入永乐环礁提供了合理航道, 并为其选择了最优锚地, 也为工作驳船进入龙洞选定了安全航路。

关键字:永乐龙洞; 水深测量; 航道; 锚地

中图分类号: P711

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)03-0305-12

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.03.001

蓝洞是海洋中黝蓝、深邃、神秘的海洋地质遗迹, 蕴藏着许多未解之谜, 属于最重要的世界海洋自然遗产和世界地质奇迹之一, 也是地球演化和人类进化的参与者和见证者。近 30 a, 蓝洞已被广泛应用于喀斯特过程、全球气候变化、海洋生态学和碳酸盐岩地球化学等方面的研究, 极具科学研究价值^[1-5]。西沙群岛永乐环礁的蓝洞很早已被发现, 直至 2015 年我国才对该洞进行了探测。三沙航迹珊瑚礁保护研究所初步探明该蓝洞圆形敞口宽约 130 m, 深达 300.89 m, 是目前发现的全球最深的海洋蓝洞, 也是目前我国唯一已知的海洋蓝洞^[6]。2016-07-24 三沙市政府正式命名该海洋蓝洞为“三沙永乐龙洞”(Sansha Yongle Blue Hole)。

永乐龙洞是南海岛礁形成与演化的参与者, 虽然三沙航迹珊瑚礁保护研究所研究人员对其进行了大量的调查勘察, 但未对其深入探测与研究。基于此, 国家海洋局第一海洋研究所拟对已发现的西沙永乐龙洞开展专项调查, 探索龙洞成因机制, 探讨我国南海海平面变化与气候变化的关系, 揭示西沙蓝洞独特生物群落结构和生态系统维持机制, 以服务于海洋科学研究、经济建设和文化传播等。为此, 国家海洋局第一海洋研究所计划利用驳船搭载工作级水下机器人(Remote Operated Vehicle, ROV), 深入蓝洞进行精密探测并获取各种成因证据。

利用工作级 ROV 进行探测, 其需要搭载工作母船进行现场作业, 工作母船一般吃水超过 6 m。为了保护龙洞周边珊瑚礁生态系统, 拟采用工作母船搭载驳船方式进行就位作业, 亦即需要精确获得工作母船和驳船的航道。然而, 永乐环礁由众多岛屿、小礁盘和小环礁断续相接, 中间为礁湖^[7], 但礁湖中暗礁林立, 尤其是龙洞周边, 平潮时平均水深不到 1 m, 工作母船如何安全进入蓝洞附近、工作母船锚地的选择以及驳船到蓝洞中心航道设计对于项目顺利执行至关重要, 因此前期的作业条件调查必不可少。本文主要综述了前期调查工作情况和主要结论, 通过对蓝洞四周及航行水道进行的水深地形测量工作, 得到航行通道的水深和宽度, 给出了工作母船的船行路线和锚地, 划定了工作驳船进入蓝洞的安全路线, 保障大规模探秘工作的顺利实施。

收稿日期: 2017-05-16

资助项目: 国家自然科学基金项目——中国沿海海洋潮汐特征的 GPS 响应研究(41374044)

作者简介: 刘焱雄(1968-), 男, 山东青岛人, 研究员, 博士, 主要从事海洋测绘方面研究. E-mail: yxliu@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

1 西沙永乐龙洞概况

永乐环礁位于西沙群岛西南部,由琛航岛、晋卿岛、银屿、全富岛、珊瑚岛和甘泉岛、羚羊礁等岛洲滩礁组成^[8],龙洞位于永乐环礁东端的晋卿岛与石屿相连的礁盘中,地理坐标为(111°46′06″E,16°31′30″N),距晋卿岛 7 km、石屿 3 km、永兴岛 70 km,距离海南省三亚市约 328 km(图 1)。



图 1 西沙永乐龙洞位置概况

Fig. 1 Location for the Blue Hole in Xisha islands

永乐礁盘是个大型环礁,其周边有许多岛屿、小礁盘和小环礁断续相接,中间为大礁湖,湖内大部分水深为 40~50 m^[7],大部分地区适合航行。但环礁东部龙洞西侧水浅且有礁墩发育,水深变化剧烈,从 2~20 m 陡然变化且毫无规律,缺乏能让大型船舶进入的明确航道。龙洞位于石屿—晋卿岛礁盘中,国家海洋局第一海洋研究所 2016-08 月中旬初步探测得知,该地平潮期水深只有 0.5~0.8 m,高潮持续约 2 h,大潮潮差约 1 m,

水深和潮汐情况不利于船只航行,因此精确掌握龙洞周边水深资料对于项目顺利开展至关重要。西沙群岛潮汐属不正规日潮型,少数为不规则半日潮类型^[9],西沙群岛平均潮差 0.5 m,最大潮差为 1~2 m^[10-11],探明龙洞周边潮汐特性也是本次调查重要任务。

2 调查技术与过程

2.1 调查方案讨论

龙洞探秘只能从西向进入,因为龙洞东边 500 m 处为永乐环礁的边缘,水浅、浪高、流急,母船和工作驳船无法进入,环礁外部水深陡然变深到 800 m,也无法作为母船锚地。进入通道可考虑石屿门、银屿门、晋卿门:1)石屿门的距离最近,但是,石屿门航道狭窄、流急浪高,水深很快由 20 多 m 变浅到 3~5 m,其与龙洞之间多为暗礁区域,工作母船无法抵进龙洞。调查期间发现,该处并无大船停泊,当地渔民也证实,该地不可作为锚地。2)银屿门位于全富岛和银屿之间,在龙洞的西北方向,为狭长水道,水深达 20 m,是西沙旅游游轮锚地之一;调查期间也发现多船在此地停靠避风。但是,银屿门水道南端与石屿门的交叉处,水深只有 5 m,往龙洞方向为连绵的暗礁。工作母船无法抵进龙洞,只能停靠在龙洞西北 6 km 处,距离龙洞较远,转运驳船来回母船较远,非理想锚地和航行线路。3)晋卿门在龙洞的东南方向,为浅湖外通重要航道,水深 30~40 m,海底地形平缓,且距离龙洞近,也适合大船停锚。

从海图上看,晋卿岛和全富岛之间有 20 m 等深线,适合大船航行,实地探测也证实了航路可行。该航道在龙洞正西方,最近处不足 5 km,所以,本次调查选择了从龙洞正西向进入的方案,勘察工作也由此展开。另外,我们从海南方向航行至永乐环礁时,从老粗门(珊瑚岛和甘泉岛之间水道)进入,所以本次调查也包含老粗门至晋卿岛之间的航行水道。因此本次作业调查主要任务为老粗门至龙洞附近锚点以及锚点至龙洞的水深测量与航道设计,调查范围如图 2 所示。调查使用工作母船为 500 t,还配有多艘小船,调查内容包括控制测量、潮位测量以及水下地形地貌测量三部分内容。

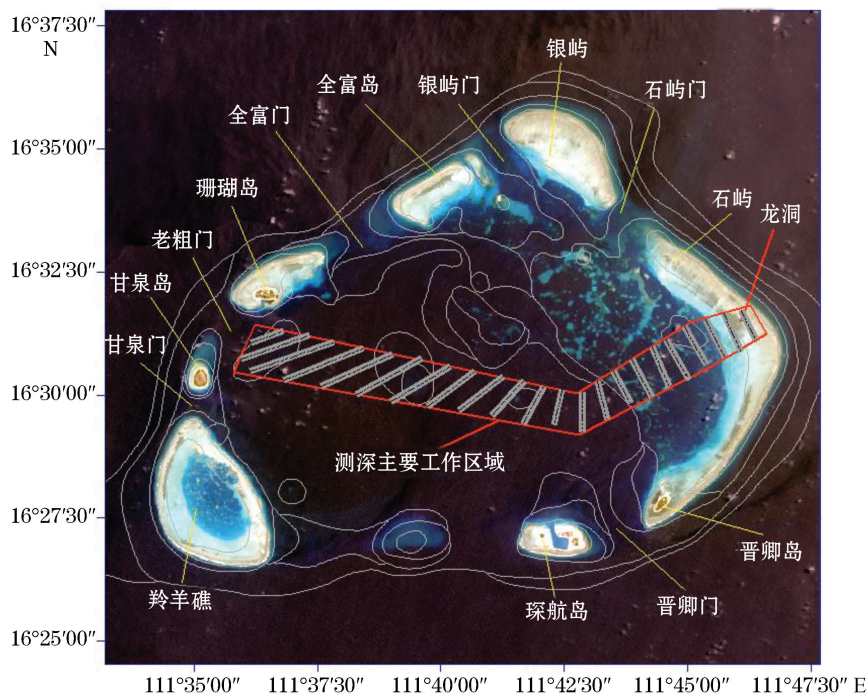


图 2 调查范围示意图

Fig.2 Sketch Map of survey area

2.2 控制测量

控制测量主要任务是为潮位测量以及水深测量提供参考基准点,也为后续的调查提供大地基准。具体设计方案:1)在银屿与晋卿岛布设大地控制点并架设 GNSS(Global Navigation Satellite System)观测设备,与海南岛内 GNSS 连续观测站点进行不低于 48 h 联测。银屿与晋卿岛的布设站点选择视野开阔、无遮挡且远离电磁场地区,接收机接收 GPS 和 GLONASS 双频数据,卫星截止高度角设为 10° ,并配备扼流圈天线。2)数据处理使用专业高精度 GNSS 数据处理软件进行静态长基线解算,得到控制点 CGCS2000 坐标,并利用高斯-克吕格 3 度带投影,获得研究区域内的平面控制坐标。3)进一步利用“927”一期工程的高精度大地水准面精化成果,计算控制点的 1985 国家高程,获得研究区域的高程控制基准点。

银屿与晋卿岛都为有人岛屿,可作为长期参考点保留,但考虑到龙洞作业区域离银屿、晋卿岛距离都超过 7 km,当地的电磁场情况复杂,在这 2 处架设 GPS RTK 基站无法覆盖龙洞周边的作业区域,因此在距离不足 3 km 的石屿布设了临时控制点。石屿控制点 CGCS2000 坐标通过与银屿及晋卿岛的联测获得。在石屿的控制点上架设基站,通过外置无线电台发送差分信号,可覆盖整个作业区域。

实际外业观测过程中,在银屿与晋卿岛上使用了 TRIMBLE NETR9 GNSS 接收机,配置了扼流圈天线,有效观测时长 72 h;在石屿架设 Topcon HiPer IIG 接收机,并与银屿、晋卿岛进行联测,观测时长 70 min。数据处理时,采用了 TRIMBLE 公司的商业软件 TBC(Trimble Business Center),与海南岛的东方、海口和清澜 GNSS 长期观测站组网进行基线解,这些站点为已知站点,其 CGCS2000 坐标由国家海洋局第一海洋研究所的 GNSS 数据中心提供。由于 GNSS 网基线长短边差异太大,银屿、晋卿与海南本岛三处站点单独组网解算。解算采用 IGR 快速星历,卫星高度截止角设为 15° ,处理历元间隔为 10 s。固定清澜与东方站坐标,分别解算得到银屿和晋卿坐标,最后解算银屿—晋卿—石屿 GNSS 网,获得 3 个控制点精确坐标。利用高斯-克吕格 3 度投影至平面,对控制点进行高程异常归算,得到站点的 1985 国家高程。

2.3 潮位测量

精确的潮位资料可为当地理论深度基准面的计算提供起算数据,也可在 RTK 定位信号较差时对潮位数据做必要补充。故本次在进行水深地形测量之前,根据测区实际情况布设潮位数据采集站,所采集的潮位数据可以准确反应整个测区潮位变化。经过现场勘察后,分别在晋卿岛、石屿、银屿和龙洞四处投放了水位计进行联合观测,验潮站点分布如图 3 所示。

潮汐测量设备为加拿大 RBR 潮位仪。安置验潮仪时,需用重物捆绑 RBR,保证 RBR 可以沉至海底且在测量期间仪器固定不动,放置地点需保证最低潮时验潮仪仍然在海面以下,同时还需要绑好浮于水面的标志物,便于日后仪器的回收。验潮仪的坐标通过 GNSS-RTK 或者静态观测的方式获得。同时,GNSS-RTK 无验潮模式测深的同时可直接获得水面在相应高程基准下的潮位变化,此外还在银屿码头进行人工验潮,多个站点、多种验潮方式结合,观测结果相互验证对比,确保潮位数据的准确。

RBR 观测时间不完全相同,其中银屿、石屿、晋卿岛观测时间约为 8 d,龙洞验潮点仅为 2 d,具体验潮结

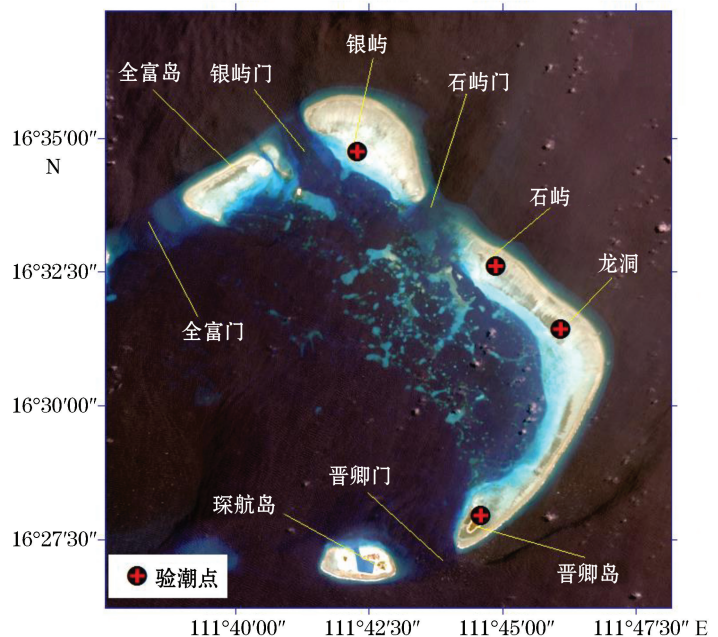


图 3 验潮站位置示意图

Fig.3 Sketch Map of tide gauge stations

果如图 4 所示,水面高程基准为 1985 国家高程。潮汐性质的划分主要以 $F=(H_{K_1}+H_{O_1})/H_{M_2}$ 值来判断,其中 $H_{K_1}, H_{O_1}, H_{M_2}$ 分别为分潮 K_1, O_1, M_2 的振幅, $0 < F \leq 0.5$ 为半日潮性质, $0.5 < F \leq 4$ 为混合潮, $F > 4$ 为日潮^[13]。本次潮位观测时间不够长,无法进行调和计算,但观察多天的潮位变化图,发现龙洞周边具有不规则半日潮特性。

在读取银屿水位计数据之后,重新放入海中,计划在所有项目完成后再取出,届时观测时长将超过 3 个月,由此进行更为科学的区域海潮特性分析,进一步完善当地潮汐特性的研究。

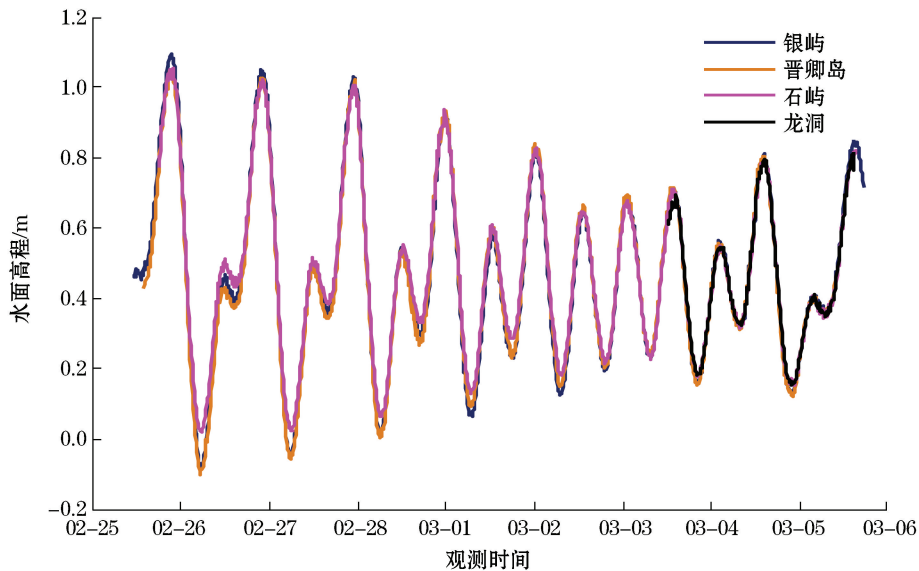


图 4 龙洞周边潮位观测结果

Fig.4 Observations of tidal levels around the Blue Hole

2.4 水深地形测量

2.4.1 多波束测量

水深地形分为单波束测量与多波束测量。深水区域采用多波束测量方式,共获得 10 km^2 航路及母船锚地区域水深数据,主要区域包括龙洞西侧锚地—晋卿岛—老粗门(图 2)之间的深水航道,调查区域水深 $17 \sim 40 \text{ m}$,宽度 $100 \sim 600 \text{ m}$ 。本次多波束测深设备为 Reson SeaBat 7125 测深仪,导航设备为 NavCom SF-3050 星站差分接收机,船行姿态记录设备为 POS MV 320,数据采集软件为 PDS2000。

在多波束测量系统安装完成后,进行了海上横摇(Roll)校准、纵摇(Pitch)校准及仰角(Yaw)校准,在作业区附近选择符合对应条件的地形区域,布设校准测线,最终获取偏差值 $-0.97^\circ, -1.81^\circ, -2.31^\circ$ 。由于海水是不均匀介质,因此声波在水中传播会导致传播声线的弯曲,因此测量前对调查区域进行了声速剖面测量,以提高水深测量精度。在多波束测量过程中,通过 PDS2000 软件实时监控多波束数据质量,进而判断是否需要更新声速文件。

同时利用 PDS2000 进行多波束数据后期处理,原始测量数据经过预处理、潮位改正、基准转换等后处理工作,最后生成水深地形图。

2.4.2 单波束测量

单波束测量主要在龙洞周边 0.5 km^2 及母船抛锚点至龙洞航道水深较浅、地形复杂区域开展,共 3 艘小船同时工作,其中 2 艘吃水小于 50 cm ,主要在龙洞周围作业,另一艘小船吃水 80 cm 左右,在计划锚点至龙洞外侧工作,部分浅水区需趁高潮时开展。龙洞北侧水浅,不是本次测量重点,测线适当放宽至 20 m ;龙洞南侧水较深,为驳船候选进入区域,因此主测线间距加密为 5 m ;同时,两片区域在垂直测线方向都布设了检

查线,检验测深精度,测线布设如图 5 所示。

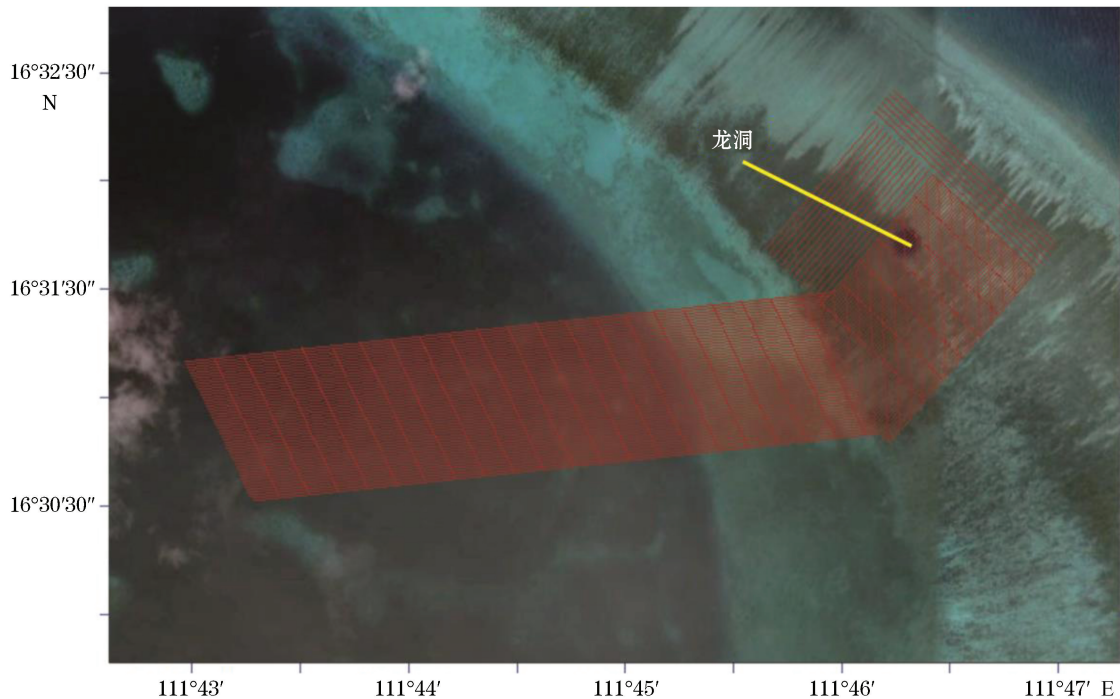


图 5 小船测线布设方案

Fig.5 Layout scheme of boat surveying lines

单波束测深采用中海达公司的 HD-MAX 和 HD-370 测深仪,测深导航模式为 RTK,基站架设在石屿上,导航与测深软件都为中海达内置软件,实现测深与导航软件一体化。每次正式开始测深前,进行了声速改正,与比对盘进行深度比对,检校测深仪是否工作正常。

单波束数据处理软件为中海达公司的水深处理软件 HI-MAX,主要通过手动或自动平滑以消除涌浪和噪声因素影响。本次水深测量采用 GNSS-RTK 无验潮方式进行,故不需考虑动态吃水改正和潮位改正。对单波束数据测深数据进行涌浪和噪声处理以及水面高程改正之后,得到龙洞周围地形图(1985 国家高程基准)。

3 调查结果及分析

通过控制测量、水位测量、水深测量(单波束与多波束测量)等技术手段,获得了龙洞附近的平面与高程基准和潮汐特性,也获得了西沙永乐岛礁(主要为龙洞附近)精确的水深数据资料。

3.1 控制测量结果分析

使用 TBC 进行数据处理时,采用了不同方案以验证结果的精度和可靠性。首先,采用单基线的方式,分别计算晋卿岛至清澜、海口、东方站的基线向量,根据这 3 个站推算晋卿岛的三维坐标,发现不同站点和时段推算的晋卿岛坐标互差不超过 2 cm。然后,利用清澜站为控制点,推算银屿的三维位置,获得银屿—晋卿岛之间的位置差,再与直接计算出二者之间的基线向量进行比较,发现他们之间的差异也小于 2 cm。最后,分别以晋卿岛和银屿为控制点,计算石屿的三维坐标,比较二者的差异,发现它们之间的互差也小于 2 cm。经过这些外部(与海口站等站联测比较)和内部(银屿与晋卿岛基线向量)检核,不同方式得到的控制点坐标相

差不超过 2 cm,由此推及控制点绝对位置精度优于 2 cm,解算结果见表 1。1985 国家高程的转换采用了“927”一期工程的成果,利用其大地水准面精化模型,计算晋卿岛、银屿和石屿三点的高程异常,再由 3 点的大地高减去高程异常,得到 3 点的 1985 国家高程。由于“927”一期工程的成果精度优于 10 cm,由此可见 3 点的 1985 国家高程精度也优于 10 cm。

表 1 控制点结果

Table 1 Control points results

控制点	N	E	Y/m	X/m	H/m	H ₈₅ /m
晋卿	16.27xxxxxx	111.44xxxxxx	18xxxxx.824	57xxxx.096	x9.26	x7.46
银屿	16.34xxxxxx	111.42xxxxxx	18xxxxx.267	57xxxx.763	x3.39	x1.59
石屿	16.32xxxxxx	111.44xxxxxx	18xxxxx.606	57xxxx.160	x3.45	x1.65

注:坐标系为 CGCS2000;平面坐标投影方式为高斯-克吕格 3 度带投影;中央经线为 111°;为安全起见,关键数据以 x 代替

3.2 潮位数据分析

基于 4 个验潮点短期的验潮数据对当地潮位特性进行初步研究,得到龙洞区域为不规则半日潮;各站点一天之内最大潮差为 1.1 m,平均潮差为 80 cm。站点之间平均海平面高程差小于 3 cm。为了安全,不再详细描述各验潮站的平均海平面、最低潮位面和最高潮位面。

3.3 水深地形结果分析

水深地形测量结果如图 6~图 7 所示,相关高程基准为 1985 国家高程,其中图 6 为单波速测深结果,图 7 为多波速航道测深图。平面坐标为高斯-克吕格 3 度投影坐标,中央经线为 111°。

由测深结果可知:从老粗门至龙洞西侧 5 km 处水深从 35~60 m 变化,呈现中间深两边浅的趋势,符合环礁的水深变化特性;龙洞西侧 5 km 左右有大片礁盘发育,其中距离龙洞 1~5 km 范围内水深为 20~30 m,随着距离龙洞越近水深越浅,浅点较多且分布杂乱,最浅处仅有 5 m 左右,水道最窄处不足 50 m;龙洞周围 1 km 范围内水深从 20 m 骤减至 0.5 m,北浅南深,水深主要变化范围为 0.5~0.9 m。永乐环礁内呈现东浅西深的趋势,西边的水深条件利于大型母船航行,东边礁石林立,水道浅且窄,进一步印证了工作母船只能从西边水门进入;龙洞位于一片大礁盘之上,周围平均水深不足 1 m,而西南方向水深更深,可作为驳船进入通道。

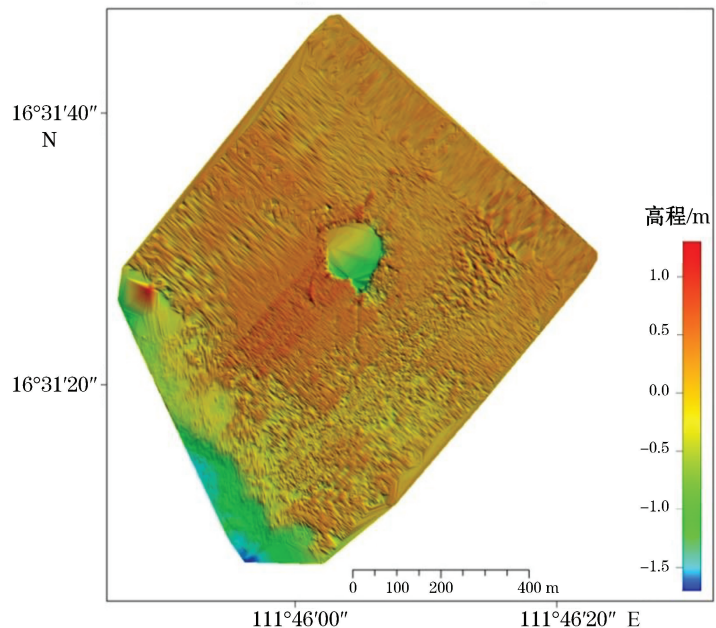


图 6 龙洞周边单波束测量的水深地形图(剔除洞内水深)

Fig.6 Single beam bathymetric survey results of water depth and topography around Blue Hole (after excluding the depth of the tunnel)

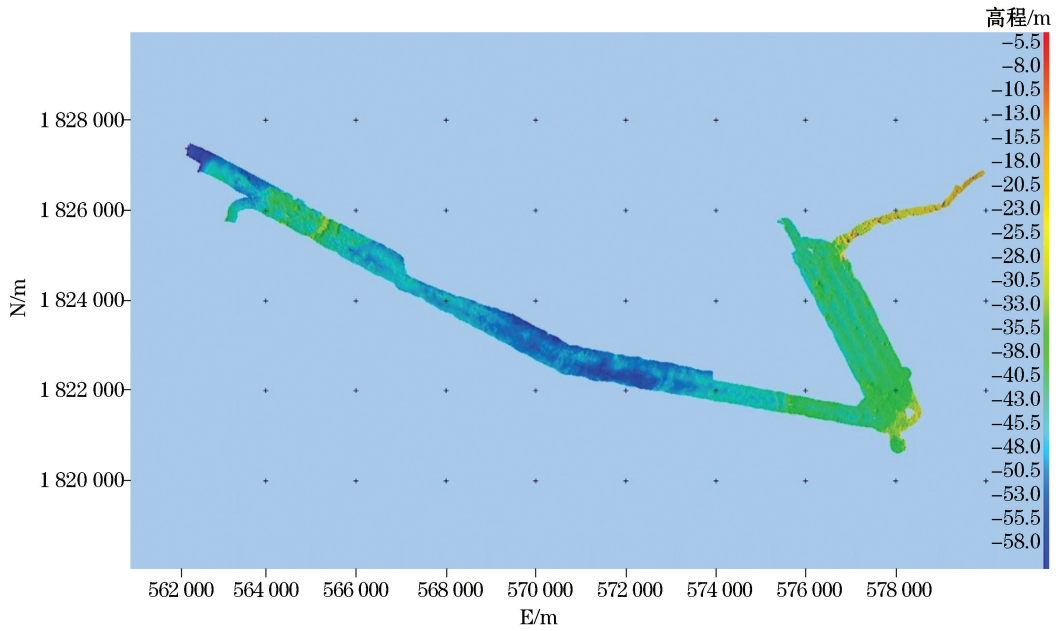


图 7 航道水深地形多波束测量成果图

Fig. 7 Multibeam bathymetric survey results for channel depth and its topography

3.4 锚地分析

考虑到作业平台就位方式和 ROV 作业便捷性等因素,也参考水深测量结果,最终给出 4 个参考抛锚点,如图 8 所示。其中距离龙洞西侧 2 km 锚地为最佳锚地,西侧 4.5 km 锚地为母船无法到达最佳锚地的备选锚地,其余 2 个锚地为本次测量曾经落锚地点,也可作为备选落锚点,4 个锚地的优缺点如表 2 所示。

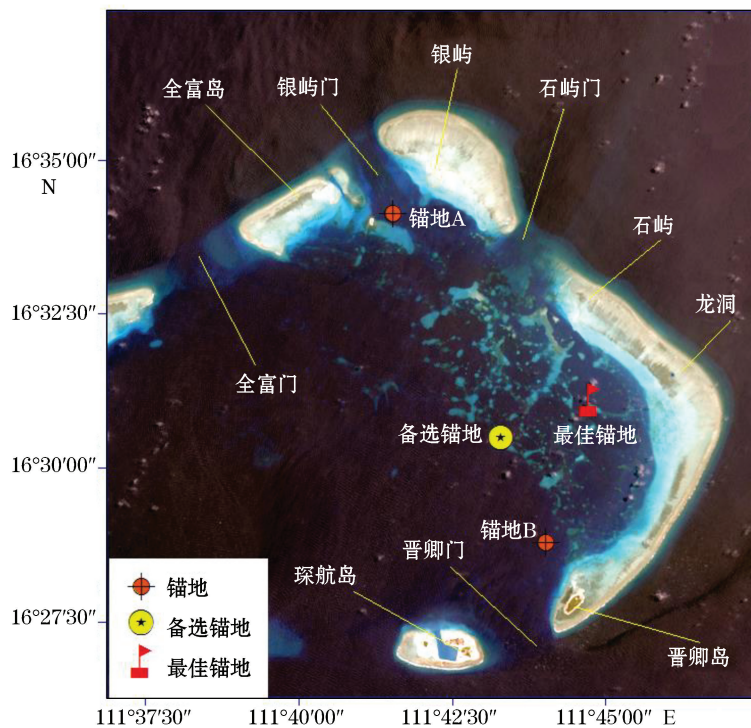


图 8 最佳锚地与备选锚地分布图

Fig.8 Layout of the best anchorage and standby anchorages

表 2 4 个锚地优缺点比较表

Table 2 Comparison of merits and demerits of four anchorages

锚地	位置	优点	缺点
锚地 A	全富岛、鸭公岛附近	距离测区较近	养殖区密集,海流强劲
锚地 B	晋卿岛、琛航岛之间	水深,可无障碍进入	风大浪急,距离测区远
锚地 C (推荐锚地)	龙洞西 2 km	距离调查区近,约 2 km,方便作业,位于永乐环礁盘内,风浪影响较小,安全	进出航路礁盘较多,大型船只航行进入难以保障
锚地 D (备选锚地)	龙洞西 4.5 km	距离调查区近,安全航行水深较大,进出方便;位于永乐环礁盘内,风浪影响较小,安全	相对于锚地 C,距离工地地点稍远;距离航道较近,受其他船只影响

3.5 航路设计

本次测量工作母船吨位为 500 t,吃水小于 3 m,而后期进入永乐环礁的母船吨位 8 000 t,吃水超过 5 m,因此大船航行路线选择需非常谨慎。设计航路如图 9 所示:从老粗门进入后,沿着红线首先逐次通过 1~4 点,这段航路相对较为安全;其后从 4 号点进入礁石群,依次通过 4~6 号点;而后将会到达一个浅水拐点,航道宽度不足 50 m,两侧水深不足 5 m,这里将是未来母船到达最佳锚地的最大困难与挑战。建议在最高潮时驶入,航行时需警惕凸起的礁石,无法到达时,船停靠在锚地 D 上。

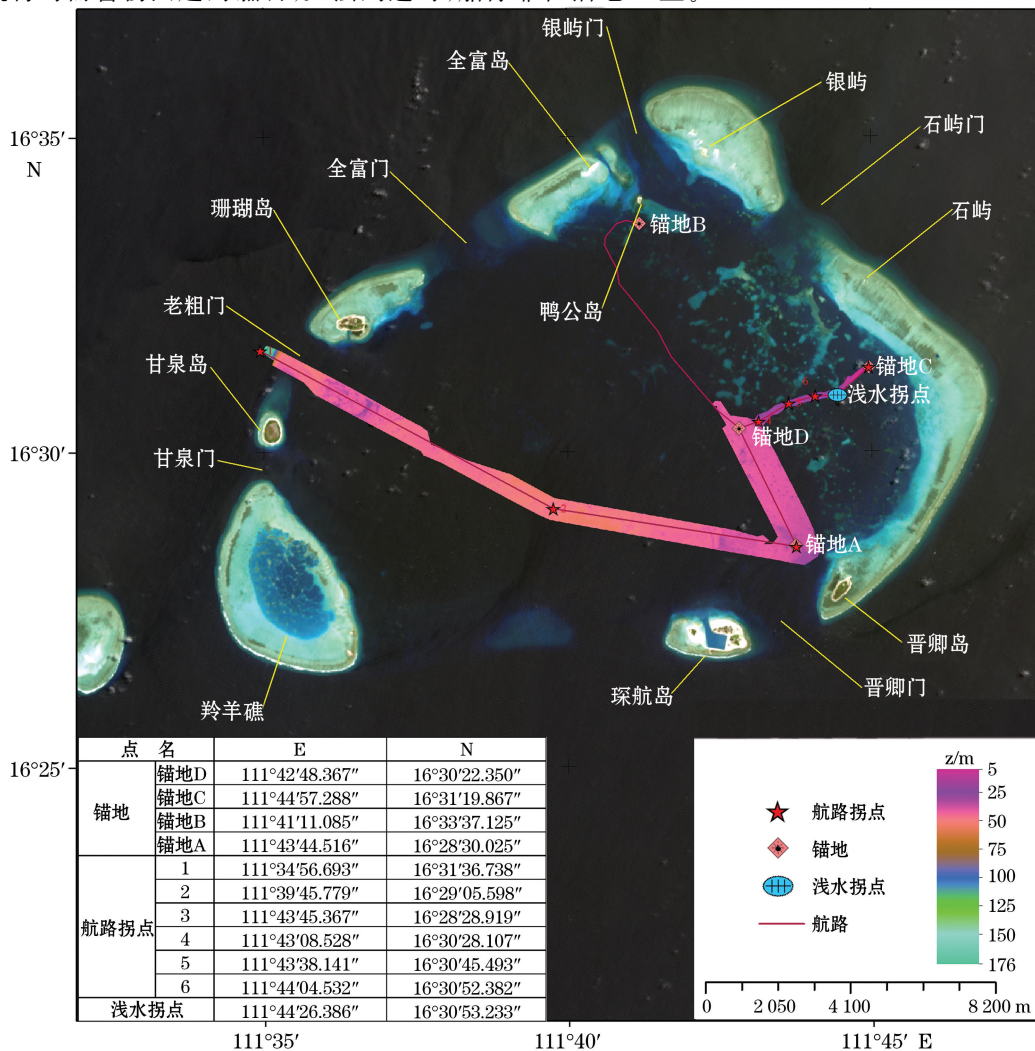


图 9 大船进入龙洞航路图

Fig.9 Chart of routes for ship entering

龙洞东北侧距离永乐环礁外围较近,涌浪较大;龙洞西北侧具有大面积的鱼排分布,均不适合作为航道。龙洞西南侧位于永乐环礁内部,距离泻湖较近,风浪较小,泻湖水位深,且水面无障碍物,适合通行。龙洞周边礁盘环聚,浅点较多,南侧水位相对较深,且无浅点分布。由此拟订驳船进入龙洞航路,如图 10 所示。具体由龙洞西南侧深水区,迂回至礁盘南部区,北拐后绕至龙洞东侧进入龙洞。拟选定的航道宽度大部分在 40 m 以上,最窄处 23 m。在拟选定航道内,礁石较少,未发现水深浅点。在预报潮高 1.2 m 及以上时,水深不小于 80 cm,可满足 ROV 驳船的通航要求,能够安全进入龙洞区域。

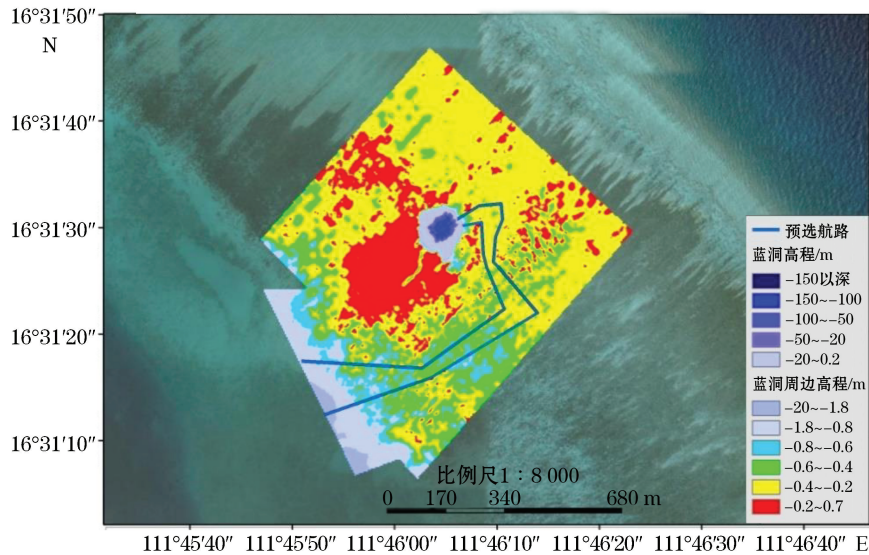


图 10 ROV 驳船进入龙洞航路图

Fig.10 Chart of routes for ROV barge entering the Blue Hole

4 结 论

蓝洞蕴藏着极大的科学研究及社会价值,近 30 a 来国内外对于蓝洞的探测与研究从未停止。西沙永乐龙洞是世界已探知的最深的蓝洞,具有独特的结构与地理位置,蕴藏着巨大的科学秘密,但对于永乐龙洞的探知目前仅处于起步阶段,进一步揭秘西沙永乐龙洞的成因迫在眉睫。对西沙永乐龙洞的综合调查也有利于进一步开发利用龙洞资源、保护龙洞环境、发展三沙经济。

为确保西沙永乐龙洞大规模综合调查的顺利进行,前期勘察综合开展了控制测量、水位测量以及水深测量(多波束与单波束)等工作,建立了龙洞周边的大地基准,掌握了龙洞周边的潮位变化规律,获取了作业区域精确的水深数据资料,得到了工作母船最优的航行线路和最佳的锚地,并进一步拟订了驳船进入龙洞的航行路线。这些基础性的工作及结果将成为后期探测的关键支撑,其调查数据及成果也可服务于三沙市政建设和其他调查工作。

参考文献

- [1] GASCOYNE M, BENJAMIN G J, SCHWARCZ H P, et al. Sea-level lowering during the Illinoian glaciation: evidence from a Bahama "Blue Hole"[J]. *Science*, 1979, 205(4408): 806-808.
- [2] GISCHLER E, SHINN E A, OSCHMANN W, et al. A 1500-year Holocene Caribbean climate archive from the Blue Hole, Lighthouse reef, Belize[J]. *Journal of Coastal Research*, 2008, 24(6): 1495-1505.
- [3] STEADMAN D W, FRANZ R, MORGAN G S, et al. Exceptionally well preserved late quaternary plant and vertebrate fossils from a

- blue hole on Abaco, the Bahamas[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(50): 19897-19902.
- [4] WHITAKER F F, SMART P L. Groundwater circulation and geochemistry of a karstified bank-marginal fracture system, South Andros Island, Bahamas[J]. Journal of hydrology, 1997, 197(1): 293-315.
- [5] GONZALEZ B C, ILIFFE T M, MACALADY J L, et al. Microbial hotspots in anchialine blue holes: initial discoveries from the Bahamas[J]. Hydrobiologia, 2011, 677(1): 149-156.
- [6] GAI G S. The deepest ocean Blue Hole[J]. Ocean World, 2016, 263(11): 72-77. 盖广生. 最深的海洋蓝洞——三沙永乐龙洞[J]. 海洋世界, 2016, 263(11): 72-77.
- [7] XIE Y X. Underwater topography of Paracel Islands Sea area[J]. Marine Science Bulletin, 1979, 52(3): 24-33. 谢以萱. 西沙群岛海区的水下地形[J]. 海洋科技资料, 1979, 52(3): 24-33.
- [8] ZHAO H T. History of expeditions to Xisha Islands[J]. Geographical Research, 1996, 15(4): 55-65. 赵焕庭. 西沙群岛考察史[J]. 地理研究, 1996, 15(4): 55-65.
- [9] WANG D R, SHI M C, NAN F. Study on features of tide and residual currents in the region of Paracel Island[J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Science), 2012, 42(10): 1-9. 王道儒, 侍茂崇, 南峰. 西沙群岛潮、余流特征研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(10): 1-9.
- [10] YU M G. Preliminary study of tidal characteristics in the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1984, 26(3): 293-300. 俞慕耕. 南海潮汐特征的初步探讨[J]. 海洋学报, 1984, 26(3): 293-300.
- [11] DING W L. Distribution of tides and tidal currents in the South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinic, 1986, 73(6): 468-480. 丁文兰. 南海潮汐和潮流的分布特征[J]. 海洋与湖沼, 1986, 73(6): 468-480.
- [12] YANG W K. Numerical simulation and studies on tides and tidal currents in the Northern South China Sea[D]. Qingdao: Chinese Academy of Science(Institute of Oceanology), 2012. 杨万康. 南海北部潮汐潮流的数值模拟与研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- [13] WU J Y, XIAO J G, CHENG J, et al. Characteristics of tidal type distribution along the coast of China[C]//Chinese Society for Geodesy, Photogrammetry and Cartography(CSGPC). Proceedings of the 2008 academic annual conference and the Ninth Annual Conference of Chinese Society for Geodesy, Photogrammetry and Cartography(CSGPC), 2008: 6. 吴俊彦, 肖京国, 成俊, 等. 中国沿海潮汐类型分布特点[C]//中国测绘学会. 中国测绘学会九届四次理事会暨 2008 年学术年会论文集, 2008: 6.
- [14] Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for Global Position System(GPS) surveys: GBT 18314—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009. 中国国家标准化管理委员会. 全球定位系统(GPS)测量规范: GBT 18314—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [15] Ministry of transport of the People's Republic of China. Technical requirements for multibeam echosounder system surveying: JTT 790—2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2011. 中华人民共和国交通运输部. 多波束测深系统测量技术要求: JTT 790—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [16] The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Specifications for marine engineering topographic surveying: GB 17501—1998[S]. Beijing: China Standard Press, 1999. 国家质量技术监督局. 海洋工程地形测量规范: GB 17501—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

Preliminary Investigation on the Yongle Blue Hole in Xisha Islands

LIU Yan-xiong, DU Jun, WU Zhi-lu, TIAN Zi-wen, FENG Ai-ping
(*The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*)

Abstract: Among all known blue holes in the world, the Yongle Blue Hole in Xisha Islands is the deepest one, which has high scientific research and social value. The investigation on the Yongle Blue hole is only in the initial stage, and its scientific secret need to be unfolded urgently. The First Institute of Oceanography (SOA, China) plans to carry out large-scale exploration for the Yongle Blue hole. However, many factors hinder us to carry out such exploration, for example, the hole is located on the Yongle Atoll, and there are many shallow reefs and submerged reefs around the hole, and the underwater situation is complex and unstable. In this preliminary survey, by using comprehensive, combined techniques such as geodetic control, single beam sounding, multibeam bathymetry, tidal level control and other relative techniques, we explored the Blue hole and the Yongle Atoll, found out the entrance and exit for the big ship, built the geodetic data, and obtained the water depth data for the targeted areas. Finally, we provide a reasonable channel for big ships entering the Yongle Atoll, and select the optimal anchorage for the safe route, which is very helpful for large-scale exploration work on the hole in the near future.

Key words: Yongle Blue Hole; bathymetry; channel; anchorage

Received: May 16, 2017