

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.06.017

岛礁地震资料特征分析及处理流程

——以西沙永乐环礁为例

张汉羽^{1,2}, 吴时国¹, 韩孝辉³, 刘刚³, 陈万利¹, 刘怀山², 邢磊²

1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南省海底资源与探测技术重点实验室, 三亚 572000

2. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

3. 海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206

摘要: 岛礁为国际科学研究前沿, 其内部结构是揭示深海地质演变、古环境古气候变化等科学问题和解决岛礁建设、人造岛礁等工程问题的关键。西沙永乐环礁历经南海地质演变过程, 发育了世界最深海洋蓝洞, 为我国岛礁研究重点区域, 但受限于探测手段和成像方法目前尚未窥得其内部结构。以西沙永乐环礁为例, 利用 3.125m 道间距高分辨地震探测数据, 开展岛礁地震资料特征分析, 探索岛礁地震资料处理流程和岛礁地震处理方法, 提升岛礁地震资料信噪比、分辨率和成像准确度, 获取反映岛礁内部结构的高精度地震成像剖面。研究表明: 本文提出的岛礁地震资料处理流程在海底珊瑚礁绕射波偏移归位、岛礁内部浅层结构和深水盆地区域地震同相轴刻画方面具有优势, 将为我国下一步的南海岛礁地震资料采集和处理提供借鉴。

关键词: 现代碳酸盐台地; 岛礁结构; 岛礁地震; 永乐环礁

中图分类号: P738

文献标识码: A

Characteristics of seismic data and its processing procedures in the areas of Reef Islands——a case from Yongle Atoll of Xisha Islands

ZHANG Hanyu^{1,2}, WU Shiguo¹, HAN Xiaohui³, LIU Gang³, CHEN Wanli¹, LIU Huaishan², XING Lei²

1. Key Laboratory of Marine Georesources and Prospecting, Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Science, Sanya 572000, China

2. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3. Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China

Abstract: Reef islands have recently become one of the hot interests in international geoscientific researches. Recent progress indicates that the internal structure of reef island is the key to some scientific issues, such as deep-sea geological evolution, paleo-environmental and paleo-climatic changes and to some engineering problems, for example, the construction of man-made reefs and islands. The Yongle Atoll in the Xisha Islands of the South China Sea, which has experienced the geological evolution as part of the South China Sea and become famous because of the deepest Blue Hole in the world, is a key area for marine scientific research in China. However, the internal structure of the islands is not clear at present due to lack of detecting facilities and imaging methods. Based on the collected high-resolution seismic data with 3.125m trace distance from the Yongle Atoll, this paper revealed for the first time the fine internal structure of the reef islands of the Yongle Atoll with high-precision seismic images by enhancing the signal-to-noise ratio, resolution and imaging accuracy of the seismic data via improvement of seismic data analysis, seismic data processing process and seismic imaging methods. The output indicates that the seismic data processing procedures promoted by this paper has advantages in the migration and reorientation of the seabed reefs diffraction wave, working out clearer shallow structures inside the reef, and acquiring the in-phase axis of seismic reflection from deep water. Our study proves that it is a suitable and effective method for seismic data acquisition and processing in the area of reef islands as such in the South China Sea of China.

Key words: modern carbonate platforms; reef island's internal structures; seismic survey in Reef islands' sea area; Yongle Atolls

资助项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题“南海中建海域深水油气地质条件及目标评价”(2017ZX05026-006); 海南省青年基金“西沙永乐环礁内部结构高精度地震成像研究及其对深海地质演变的提示意义”

作者简介: 张汉羽(1989—), 男, 博士生, 助理研究员, 主要从事岛礁和深渊地球物理方法研究, E-mail: zhanghy@idsse.ac.cn

通讯作者: 吴时国(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋地球物理与海底构造研究, E-mail: swu@idsse.ac.cn

收稿日期: 2018-06-30; **改回日期:** 2018-10-26. 文凤英编辑

生物成因岛礁,为现代孤立碳酸盐台地最活跃部分,因蕴含着深海地质演变、古海洋环境变化、碳酸盐岩油气成藏、全球碳循环及气候变化等系列科学问题和岛礁建设、人造岛礁、岛礁地质灾害等系列工程问题,是国际科学研究的热点^[1-3]。对于我国,在国家基金委“南海深部过程演变”重大研究计划、中国科学院“南海环境变化”战略性先导科技专项和三沙市政府“三沙市重点岛礁综合地质调查与评价”专项的联合驱动下,南海岛礁成为我国地球科学研究的重点区域^[4,5]。

南海共轭大陆边缘广泛发育现代和淹没碳酸盐台地,其规模可与巴哈马滩媲美^[2,6,7],而西沙碳酸盐台地属于南海大型现代孤立台地,是我国岛礁研究最典型区域(图 1)。西沙碳酸盐台地自中新世开始发育,面积达 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$,厚度约 1250m,这为大油气成藏提供了储层条件,具备重大油气资源潜力和深入研究价值^[2,6,8]。永乐环礁位于西沙海域中部,是我国典型环状分布珊瑚岛屿,因其历经南海地质演变多期构造运动和岩浆活动,结晶基底和沉积地层地质结构复杂,又因发育了全球最深的水下独特地貌单元海洋蓝洞——三沙永乐蓝洞,是揭示古

海洋、古气候事件和南海地质演变等科学问题的理想场所^[9-12]。

岛礁区地质情况复杂,反射地震因高分辨率优势一直是探测岛礁内部结构的重要手段^[2,12-14]。高精度成像地震数据能够识别岛礁碳酸盐岩沉积相、滑塌体及沉积运移通道,刻画岛礁精细内部结构和基底形态,对揭示现今碳酸盐台地沉积过程、发育演化模式以及将今论古探讨古代碳酸盐岩成岩过程、油气成藏理论、古海洋和古环境事件等都具有重要作用^[12-18]。目前,国外许多学者在巴哈马滩、马尔代夫、大堡礁区域进行了大量地震数据分析和研究,主要集中于海上资料基本流程成像剖面基础上的浅层地质构造解释^[18-24]。对于我国,主要是以古代淹没碳酸盐台地油气勘探和深部地壳探测为主,而针对现代岛礁原始地震资料提高地震剖面信噪比、分辨率和成像准确度的研究几乎为空白^[6-8,25,26]。生物成因现代碳酸盐岩岛礁的地质情况特殊,海底地形复杂,水深变化剧烈,其反射地震资料具有独特特征而内部结构成像困难(图 2)。因此,需要开展岛礁地震资料特征分析和岛礁地震资料处理流程和成像方法的探索研究。

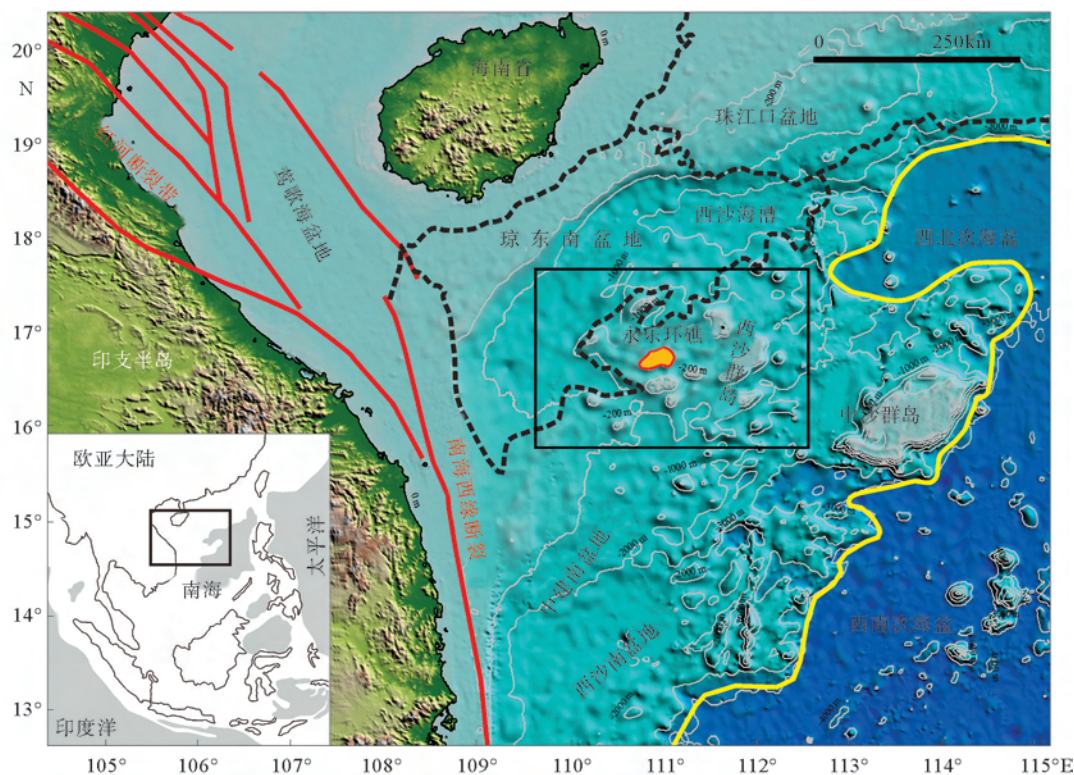


图 1 西沙永乐环礁区域位置与地形地貌

Fig.1 Location and Geomorphology of Yongle Atoll in Xisha sea area

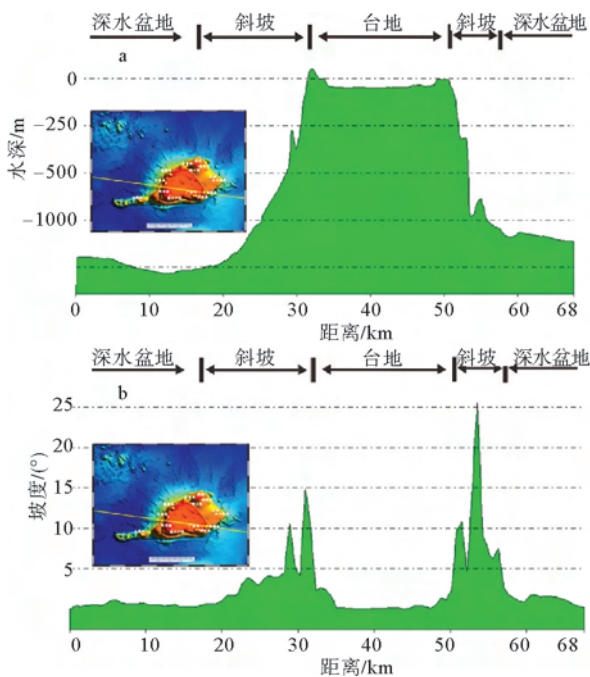


图2 永乐环礁水深剖面 and 坡度图

a. 垂直水深剖面; b. 海底坡度分布剖面

Fig.2 Bathymetric and slope map of Yongle Atoll

a. Bathymetric profile in vertical;

b. Submarine slope distribution profile in vertical

本文以揭示岛礁内部精细结构为研究目标,利用西沙永乐环礁 3.125m 小道距高分辨率地震资料,开展岛礁地震资料特征分析、岛礁地震资料处理流程和岛礁地震处理方法探索,以获取岛礁高精度地震成像剖面,揭示西沙永乐环礁的内部精细结构和层序地层,并为我国下一步南海岛礁地震资料采集和处理提供借鉴。

1 地质背景

西沙现代碳酸盐台地位于南海北部西沙群岛及其邻近海域,东接双峰盆地,南连中沙群岛,西南部毗邻莺歌海盆地,北临琼东南盆地南部凹陷带(图1),面积约 49800km²[2]。其自中新世以来在南海西沙隆起两次区域性沉降作用下逐渐被海水淹没,并受南海西部和北部坳陷带影响,该区陆源供给被切断,形成适合碳酸盐岩和生物礁发育的清水环境,后期发展为现今的厚层碳酸盐岩和生物礁地层。根据西永1井钻探表明,西沙碳酸盐岩和生物礁地层厚度达 1250m^[25,26]。

永乐环礁位于西沙群岛中部,宣德环礁西部,是该区几个出露水面的现代孤立碳酸盐台地之一。其因南海张裂地质演变过程中拉张和走滑等构造作

用,该区结晶基底和沉积地层遭受了多期构造运动和岩浆活动侵蚀,地质构造复杂。在水深地形图上,永乐环礁为蝌蚪状的规则凸起,主要由礁环和潟湖两部分组成,发育有晋卿门、石屿门、银屿门、全富门、老粗门和甘泉门等水道。这些水道都与大海相通,且将礁环分割为7个礁盘。在这7个礁盘上发育有金银岛、甘泉岛、珊瑚岛、全富岛、鸭公岛、银屿、银屿仔、咸舍屿、石屿、晋卿岛、琛航岛、广金岛等12座岛屿(图3)。

永乐环礁海底地形复杂,整体水深变化于0~1138m,台地之上水深变化很小,基本为0~50m,台地斜坡水深变化剧烈,约50~800m,台地边缘深水盆地平原水深变化范围为800~1138m。从坡度平面分布图来看,永乐环礁坡度变化为0~55°;台地之上坡度变化很小,绝大部分区域约为0°;局部区域例如台内礁呈现少数坡度较大变化;台地边缘、台地斜坡区域坡度变化剧烈,约为5°~55°;深水盆地区域的坡度变化小,约为0~3°(图3)。因此,永乐环礁在地形地貌和形态结构上具有特殊性,其反射地震资料应具有独特特征,对此开展针对性的地震成像研究更有意义。

2 数据和方法

2.1 地震资料采集

本研究使用的地震数据均来自于2017年度海南省海洋地质调查研究院组织、中国科学院深海科学与工程研究所参与的西沙永乐环礁高分辨地震探测航次。该航次针对质地坚硬、高波速、高密度的碳酸盐岩岛礁地质体开展岛礁地震探测数据采集,利用主频100~120Hz的520in³ Mini-GI组合枪阵和3.125m道间距128道的高分辨率地震拖缆采集系统,采用12.5m炮间距、69.7m最小偏移距、466.575m最大偏移距、枪深3m、缆深3m的拖曳式连续作业方式在西沙永乐环礁海域覆盖礁盘-斜坡-深水盆地的整个区域进行了14条413km的高分辨率地震测线采集(图3)。该航次为我国首次针对岛礁结构专门设计的地球物理探测航次,其相比于国际上2007年的马尔代夫M74/4和2010年的巴哈马Carambar的岛礁地震探测航次^[14,17-24],在道间距、气枪容量等采集参数和测线密度方面体现出横向和纵向高分辨率的优势(表1)。

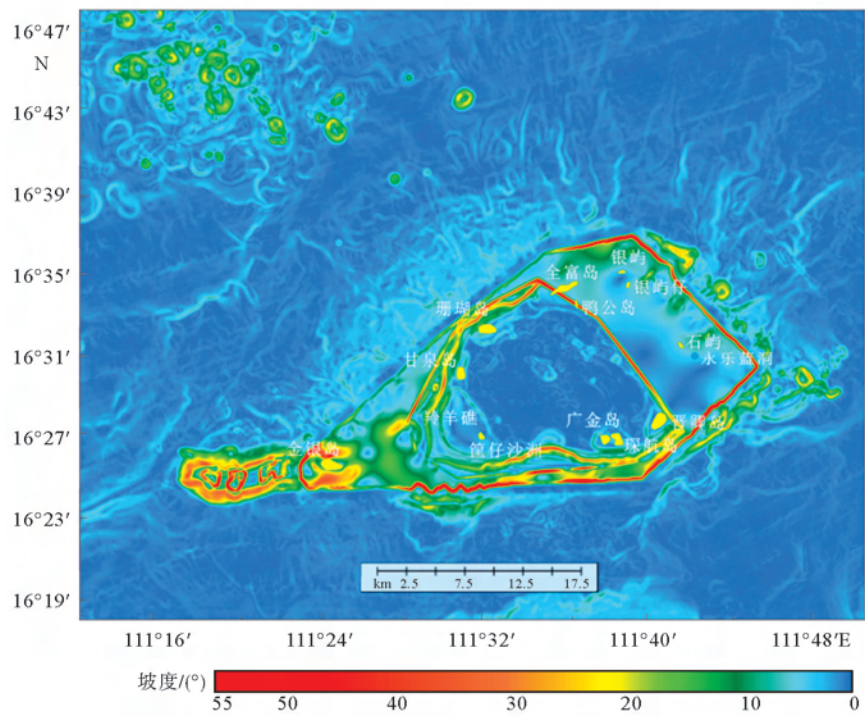


图 3 永乐环礁坡度平面分布图

Fig.3 Spatial distribution of submarine slope in the area of Yongle Atoll

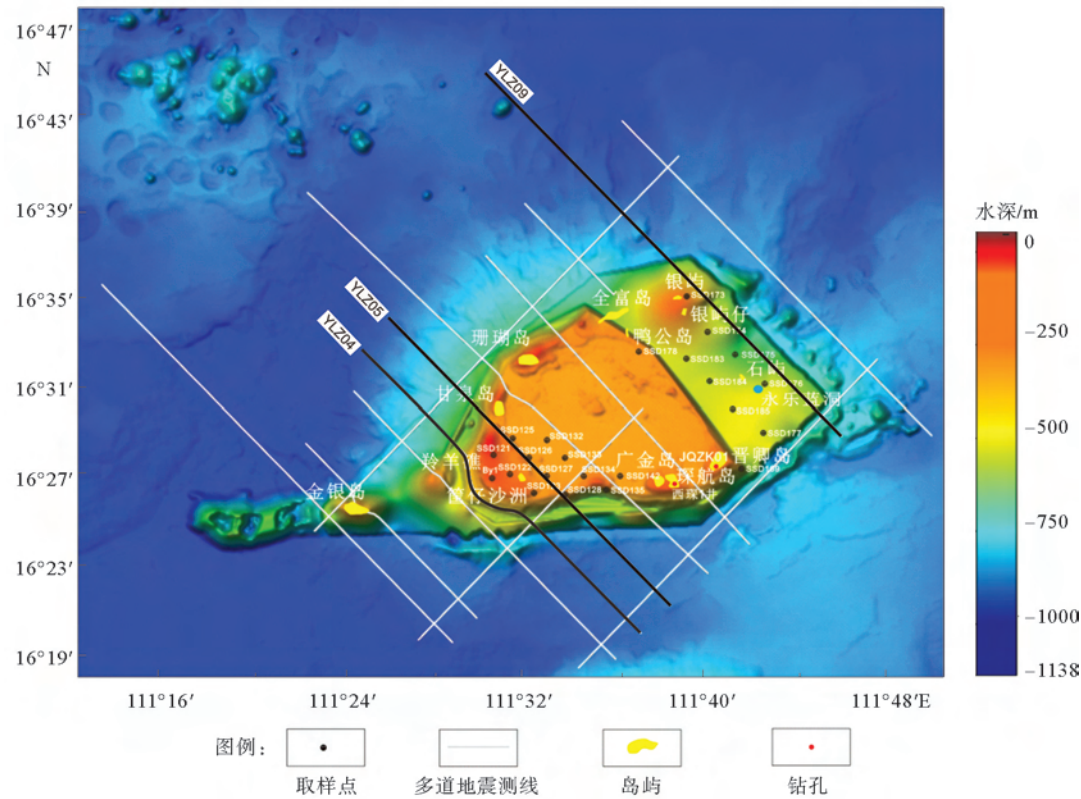


图 4 研究区采集地震测线分布

Fig.4 Seismic survey lines in the study area

表 1 岛礁地震探测航次采集参数对比
Table 1 Comparison of reef island seismic acquisition parameters

采集参数	2010 年巴哈马 Carambar 航次	2007 年马尔代夫 M74/4 航次	2017 年永乐环礁 高分辨地震探测航次
接收道数	96 道	144 道	128 道
测线间距	斜坡区 2.5km 其他 5~30km	不详	主测线 2.5~5km 联络测线 10km
道间距	6.25m	6.25m	3.125m
最小偏移距	不详	不详	69.7m
炮间距	不详	25m	12.5m
震源容量	Mini-G I 24 in ³	组合 Mini-GI 105 in ³	组合 Mini-GI 520in ³
信号频带	40~350Hz	主频 100~120Hz	主频 100~120Hz
公里数	1480km	1400km	413.41km

2.2 岛礁地震资料特征分析

生物成因现代碳酸盐岩岛礁的地质情况特殊,海底地形复杂,水深变化剧烈,其反射地震资料应具有独特特征。通过单炮地震记录和叠加剖面上的干扰波、信噪比、频带和能量分布分析,了解岛礁多道地震资料特征和属性,为其资料处理流程设计和高精度成像剖面获取做好铺垫。

2.2.1 干扰波分析

图 5①和②显示,永乐环礁区域地震资料中发育有大量低频噪声和涌浪噪声,并大面积出现在单炮地震记录上,表现为强振幅、低频率和长周期特征,并伴随尖脉冲随机干扰噪音存在。究其原因,该类噪声主要是在地震拖缆采集作业时受到海流干扰,海流对电缆进行挤压、抬升、弯曲冲击并绝大多数被检波器记录下来,从而形成低频率、长周期的规则噪声。该类型噪声在岛礁区还存在另一现象:深水盆地区振幅在相对于浅水礁盘区呈现更明显。这一现象发生的主要原因是岛礁区水深变化迅速,浅水礁盘区向深海盆地过渡迅速,导致浅水礁盘区随着大风的停止,海流冲击逐渐减小,涌浪噪声也会迅速消失,而在深水盆地区域,风浪过后涌浪持续时间较长,继续对地震资料产生严重干扰和影响。

图 5③和④显示,永乐环礁区域地震资料中表面多次波和海底鸣震普遍发育。在水深 0~50m 的礁盘区,主要发育浅水短周期全程表面多次波,且多次波在海面-海底-海面之间多次震荡形成海底鸣震。经钻井取芯、抓斗取样和卫星数据分析表明,礁盘区底质主要由活体珊瑚、珊瑚礁体、泥晶颗粒灰岩、碳酸盐骨架和珊瑚、介壳碎屑组成,导致该区底质坚硬、珊瑚礁体林立、凹凸不平,从而使海底表层

拥有强地震波速、水/岩界面波阻抗差异大的特征,导致地震波难以穿透。加之海面同样为强波阻抗差的气/水界面,人工震源激发的大部分能量被迫“围困”于水层中并来回震荡,从而形成强振幅的多次波和海底鸣震。在岛礁斜坡区,受高角度地形变化影响,海水深度从 50m 迅速过渡到 1100m 的深水盆地,这一特别现象致使该区地震资料发育有独具特色的高角度变周期多次波(图 5④),该类干扰波受岛礁斜坡边缘底形控制,地震叠加剖面上呈现为平行于斜坡边缘的高角度分布,震荡周期具有时变性。绕射多次波是岛礁斜坡区地震资料的一类特殊干扰波,其主要是在珊瑚礁体不均匀生长和凹凸不平地形的驱动下产生绕射波,并受气/水和水/岩界面影响在水层中来回震荡而形成。在深水盆地地区,由于海底底质主要以细粒珊瑚碎屑、泥沙沉积为主,底质相对较软,沉积地层清晰,主要发育中深水长周期全程表面多次波,该类干扰波相对能量较小,周期较长且震荡次数少。此外,海上地震资料中常见的线性噪音在岛礁资料中相对较少发育,地震记录中表现不明显,但船舶噪声、侧源反射干扰波在部分地震记录上有所出现,但频率不高,影响不大。

2.2.2 频率分析

频率分析能获取原始岛礁地震资料的初步信息,了解主频、频宽及各种频率成分的分布范围,明晰有效反射信号和干扰波的分布规律,为后续的处理试验选取关键参数提供依据。通过图 6 单炮记录频率扫描显示,永乐环礁地震资料有效波频带较宽:在 1500ms 以内的地震记录上,频带 5~360Hz 范围均存在;在 1500ms 以外的地震记录上,频带 5~180Hz 范围均存在。在整体背景噪声水平上,低频噪声能量尤为明显,其频带主要分布于 20Hz 范围

的低频端。另外,图 6 还表明自由表面多次波能量呈全频带分布,因此,基于频率差异压制多次波的方法在此处不适用。

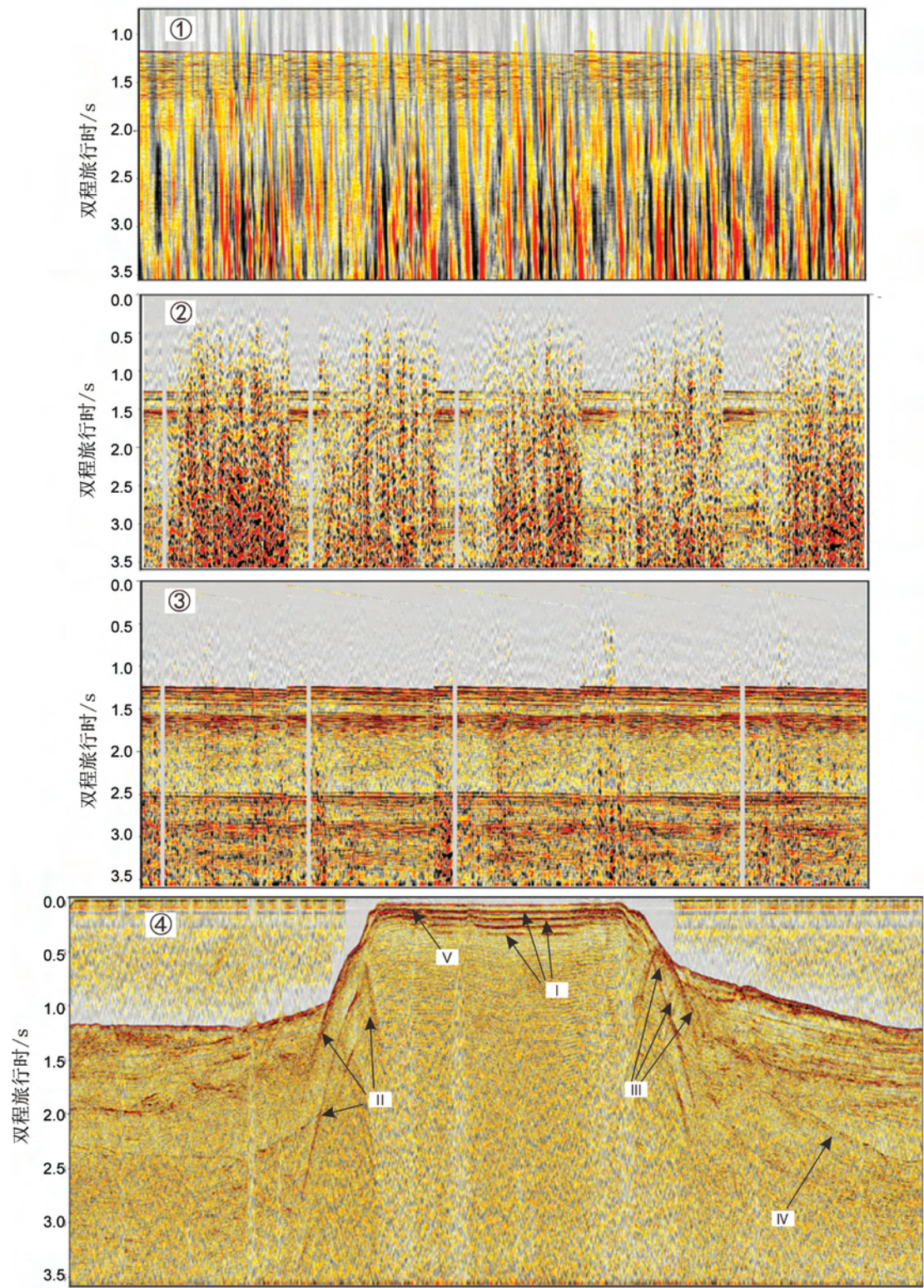


图 5 岛礁地震资料干扰波(YLZ05 线)

①低频噪声;②涌浪噪声;③自由表面多次波;④ I -海底鸣震, II -高角度变周期多次波, III -绕射多次波, IV -长周期表面多次波, V -短周期表面多次波

Fig.5 Seismic interference waves along line YLZ05 in the reef island area

①Low frequency noise; ②Seismic swell noise; ③Surface-related multiple; ④ I -Submarine reverberation; II - High-angle and variable-period multiple; III - Diffraction multiple; IV - Long-period surface-related multiple; V - Short-period surface-related multiple

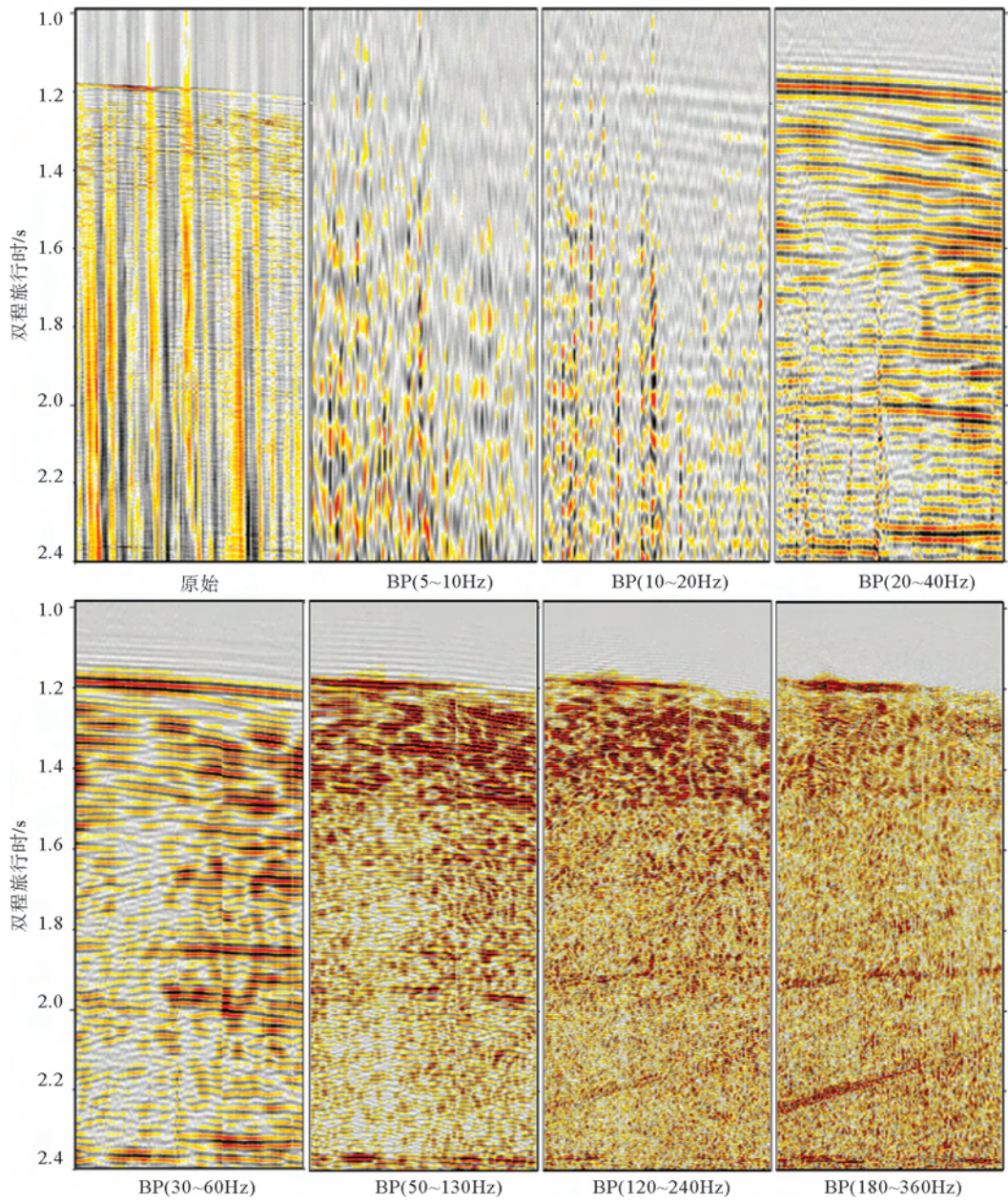


图 6 频带扫描分析
Fig.6 Scanning analysis for frequency Band

2.2.3 能量分析

频谱分析方法,能获取岛礁资料信号和噪音在频率和能量上的分布规律,是干扰波压制、信噪比提升、能量补偿等处理前的常用手段。图 7 为岛礁深水盆地区和浅水礁盘区的地震记录频谱分析图,其结果表明:深水盆地区能量横向和纵向分布相对均匀,浅层能量主要集中于 50~150Hz,中层能量集中于 40~60Hz,深层能量集中于 0~10Hz 和 90~110Hz,且浅-中层有效信号能量占主导,深层噪声信号占主导,而在浅水礁盘区域垂向能量衰减很快,

浅层能量主要集中于 40~80Hz,中层和深层能量集中于 0~20Hz,且浅层噪声能量大,资料信噪比低,中-深层有效信号几乎为低频噪声所覆盖。该两区域有效信号垂向上出现能量不均匀分布现象,其主要是由于浅水礁盘区拥有强波阻抗界面,地震波难以穿透,造成能量屏蔽,导致地震波能量快速衰减,使得岛礁内有效信号弱。因此,岛礁地震成像处理中应尽量对中深层有效信号能量进行保护,并有必要开展弱信号能量补偿处理。

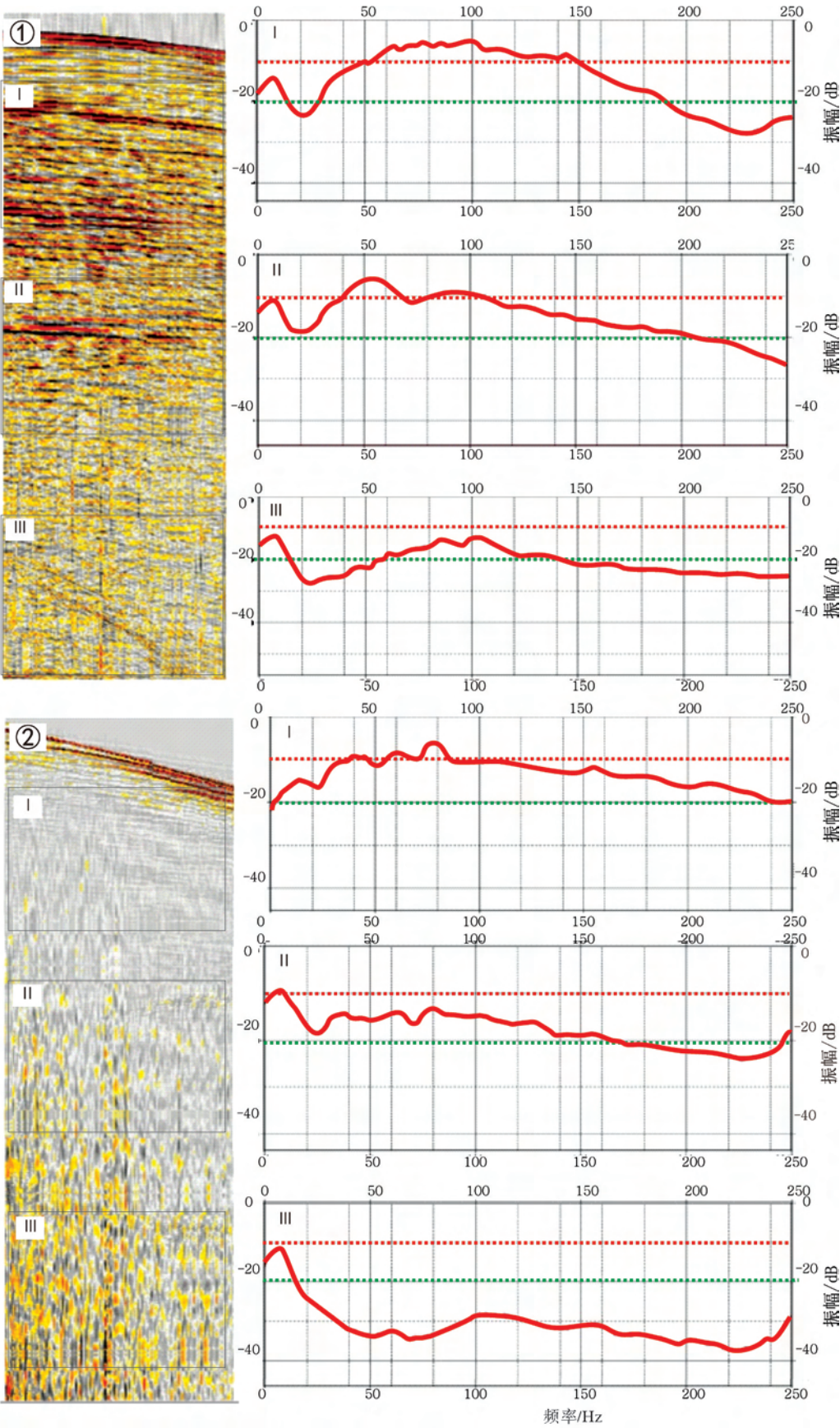


图 7 地震频谱分析

①深水盆地区;②浅水礁盘区

Fig.7 Spectrum analysis of seismic record

① Deepwater basin region; Carbonate platform upside where booming coral reef and covered by shallow water

2.3 岛礁地震处理方法

通过上述资料特征分析,本文针对岛礁内部精细结构成像开展了探索性的地震处理流程方法研究。在振幅处理方面,针对岛礁内部和斜坡下伏地层分辨能力弱及反射能量不均衡问题,在地表一致性振幅处理基础上,开展不同尺度的球面扩散、吸收衰减能量补偿和振幅恢复,最大限度地保证地震资料相对保幅,以满足层序地层解释和岛礁结构研究需要。在信噪比和分辨率方面,采用区别于常规海上资料处理和高分辨率地震资料处理的流程,将提升浅层分辨率和中—深层信噪比作为处理核心环节。在保证中—深层较高信噪比前提下,利用自由表面 SRME 多次波压制技术和预测反褶积方法组合压制岛礁资料中发育的多次波,以拓宽有效信号频带,提升主频能量,突出优势频率,提高浅层地震资料分辨率。在偏移成像方面,为确保岛礁目标体的成像精度,在动校正和精细速度分析基础上,通过多次高密度速度谱拾取,建立精细偏移速度场,力求在岛礁横向波速变化剧烈斜坡区域也获得较为准确的成像,并同时偏移剖面进行能量均衡处理,确保整条剖面的成像精度。

本文采用以下资料处理流程(图 8),主要技术和关键步骤包括:①叠前多域联合压噪处理,利用带通滤波方法消除低频干扰,利用振幅统计法、异常振

幅衰减技术消除涌浪噪(图 9),利用小波阈值法分段地消除其他类型随机噪声;②多次波组合压制,利用预测反褶积方法压制浅水短周期表面多次波和海底鸣震,利用自由表面多次波预测技术(SRME)压制中—深层长周期表面多次波(图 10);③时间域叠前偏移成像,利用即时交互速度分析方法、动校正质量控制(QC)以及常速、变速扫描方法反复进行速度迭代分析,获取可靠的偏移速度场,再通过 Kirchhoff 叠前偏移方法开展岛礁地震资料时间域偏移成像(图 11)。

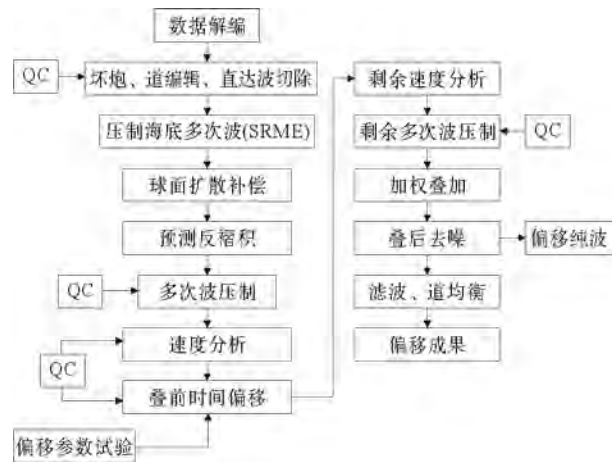


图 8 永乐环礁地震资料处理流程

Fig.8 Flow chart of seismic data processing in the area of Yongle Atoll

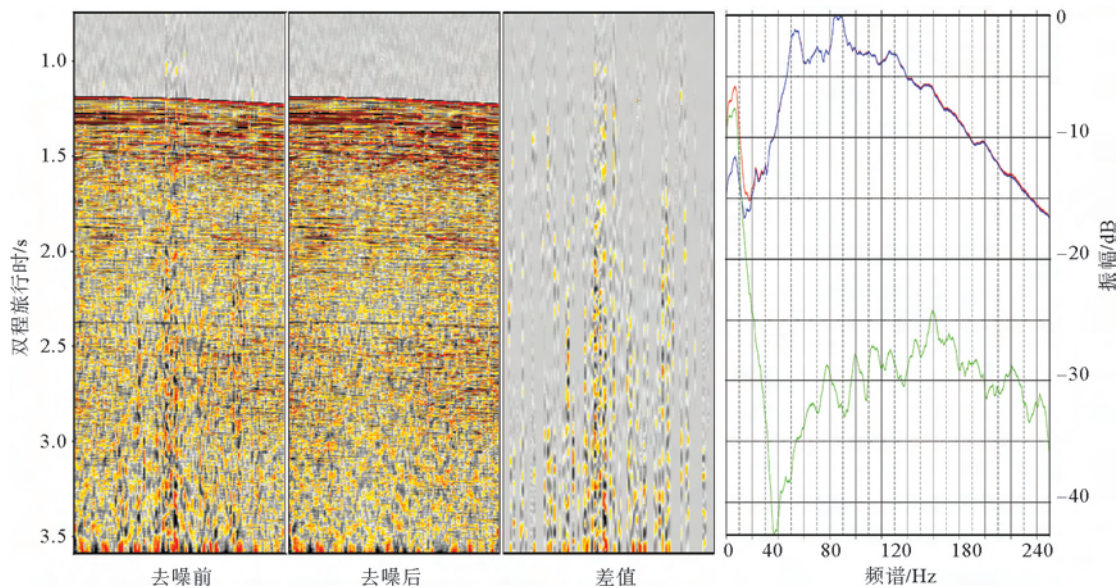


图 9 涌浪噪音压制

频谱曲线红色为去噪前,蓝色为去噪后,绿色为压制噪音

Fig.9 Swell noise attenuation

The red line denotes spectrum of seismic profile before denoising, and the blue is after denoising, the cyan is the attenuated noising

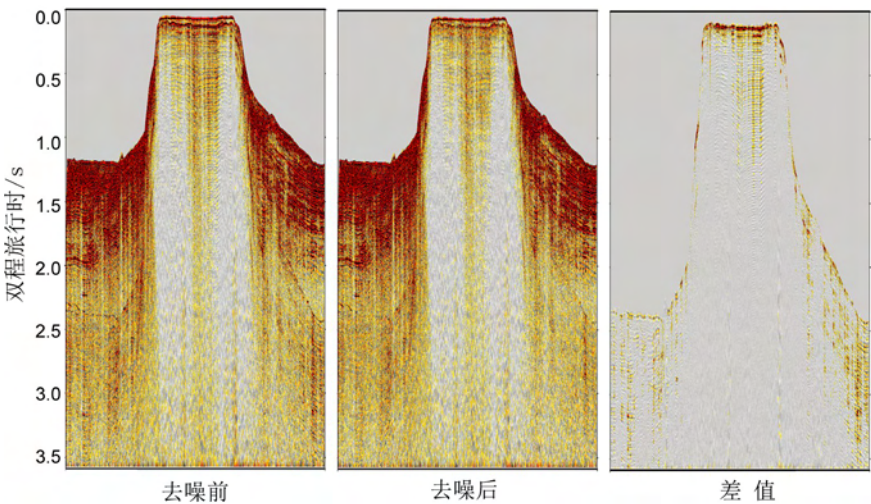


图 10 自由表面多次波压制

Fig.10 Attenuation of surface-related multiple

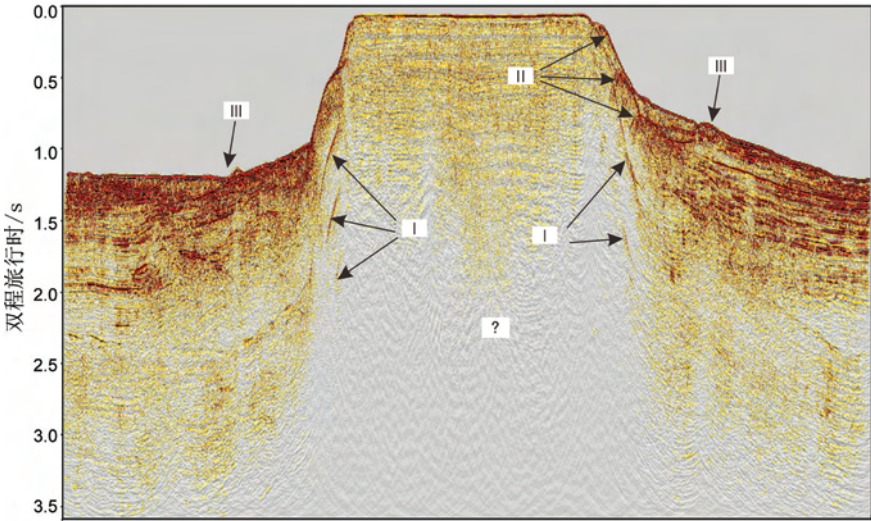


图 11 时间域叠前偏移成像剖面

I - 高角度变周期多次波; II - 绕射多次波; III - 绕射波

Fig.11 Time-domain seismic prestack migration profile

I - High-angle and variable-period multiple;

II - Diffraction multiple; III - Diffraction wave

如图 9 所示,涌浪噪声是低频率、强能量干扰波,其在岛礁地震单炮记录上也表现为强振幅、低频率的噪声背景特征,频带范围 2~10Hz,呈随机性出现。因此,根据“多道识别,单道去噪”思路,在不同的频带内自动识别地震记录中存在的强能量干扰,通过定义涌浪噪声频带范围和多次测试有效带通滤波的阈值和衰减系数的异常振幅衰减技术来实现涌浪噪声压制。经过压制后,低频涌浪噪声得以明显消除(绿色频谱曲线)。

如图 10 所示,多次波组合压制方法对长周期和短周期表面多次波的压制效果明显,但对高角度变周期多次波和绕射多次波的应用效果不佳。究其原因

是由于永乐环礁海底地形复杂,礁盘区水深极浅,台地斜坡水深变化剧烈,最大坡度达到 55°,而预测反褶积方法主要适应于海底地形变化缓慢区域和多次波周期明显、相关性强的地震资料,SRME 技术主要适用于中—深层长周期表面多次波压制,对水深很浅、初至波和海底反射波混叠无法区分的区域适应能力有限。可见岛礁地震资料高角度变周期多次波和绕射多次波的压制方法尚有待提高,需要进一步探究。

如图 5 和图 11 所示,岛礁区地形复杂,斜坡区海底倾角大,绕射波发育,横向波速变化剧烈,精准速度场建模困难,而精度高的偏移成像方法对速度

模型精度依赖性强,因此采用复杂地形适应性强,计算效率高的 Kirchhoff 积分法进行时间域岛礁地震偏移成像应用。其应用结果表明:在岛礁水深变化缓慢的礁盘区和深水盆地区适应性较好,绕射波归位正确,整体偏移成像效果显著,但在水深迅速变化的岛礁斜坡区,绕射波和绕射多次波残余较多。究其原因主要是由于岛礁斜坡区水深变化快、海底地形复杂,横向波速差异大,Kirchhoff 偏移方法适应性变差所导致。

3 实际应用效果分析

本文在“保证中—深层资料信噪比,最大限度提升浅层分辨率”的思路指导下,对岛礁资料特征进行分析和岛礁地震成像流程方法进行探索,相比于常规处理流程,实际应用效果如下:

图 12 展示的是穿过永乐环礁东北部边缘 YLZ09 地震测线剖面(图 4)。从剖面上可以看出,常规成像剖面整体的分辨率较高,但资料信噪比很低,海底凸起珊瑚礁引起的绕射波收敛归位效果差,岛礁内部结构和地层界面几乎无法分辨,而通过本

文方法所获得的成像剖面信噪比比较高,礁盘浅层的地震同相轴相对清晰,有效展示了岛礁内部结构和地层界面,且在海底凸起珊瑚礁处的绕射波收敛较好,珊瑚礁体尺度和结构展示得更为精细,但岛礁内部的多次波、绕射波依旧残余,导致反射同相轴连续性较为一般,地层接触关系和同相轴真假难辨(如图 2II 区),这将大大增加后期的解释难度。

图 13 展示的是穿过永乐环礁西南部边缘 YLZ04 地震测线剖面(位置见图 4),该测线横跨永乐环礁礁盘、边缘斜坡和深水盆地,水深落差达到 1.1s 以上,具有岛礁地震资料的典型特征。通过图 13 可知,常规方法获得成像剖面质量较差,而本文方法的成像剖面在资料信噪比和成像准确度方面占有一定优势,其将岛礁礁盘浅部结构展示得更加清晰,并提升了岛礁斜坡区和深水盆地区的反射同相轴和沉积地层界面的连续性,但同样是岛礁地震资料高角度变周期多次波和绕射多次波残余,导致岛礁礁盘-斜坡-深水盆地之间的反射同相轴不够连续(如图 13②中 I 和 II 区)。由此可见,岛礁地震资料特殊干扰波压制和高准确度偏移成像方法尚有待提高。

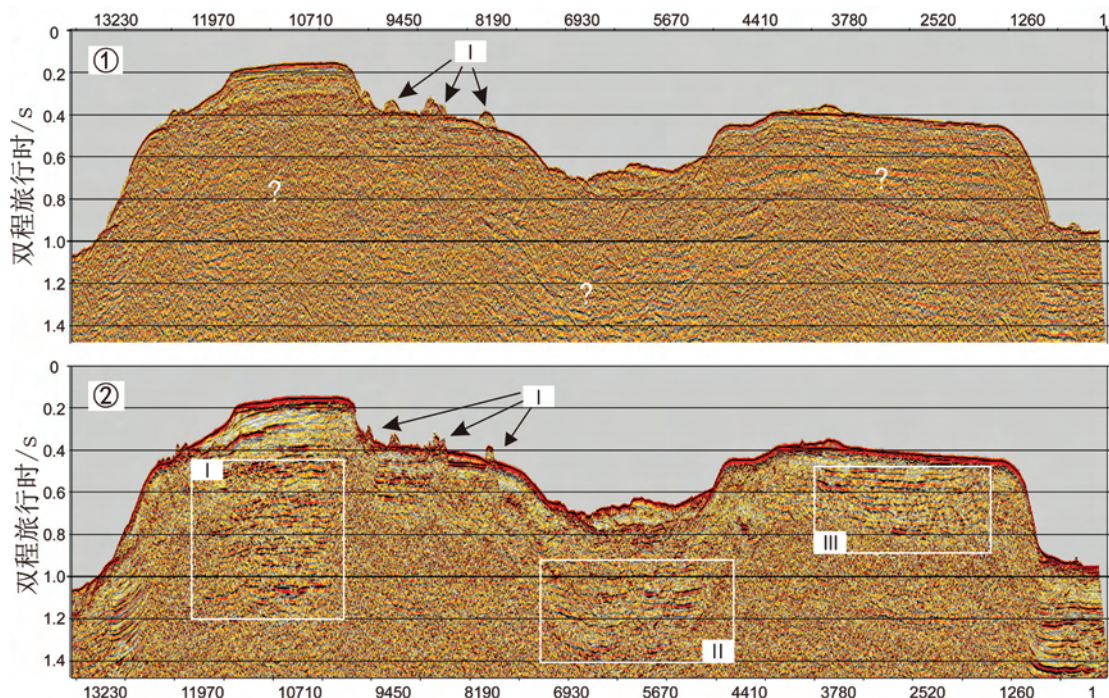


图 12 YLZ09 测线叠前时间偏移剖面

①常规处理流程方法;②本文处理流程方法; I -海底凸起珊瑚礁; II -岛礁礁盘区地层结构

Fig.12 A prestack time migration profile achieved from the survey line of YLZ09

①The profile processed with conventional method; ②The profile processed with the method of this paper;

I -upraised coral reef; II - The geological structure of the carbonate platform

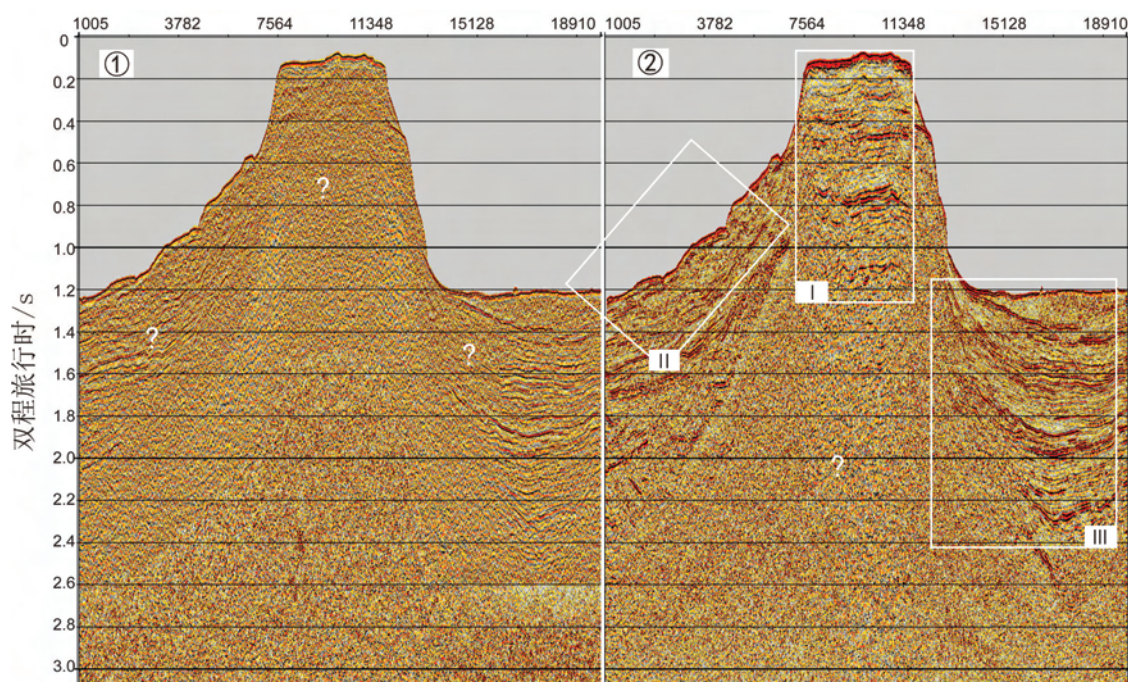


图13 YLZ04 测线叠前时间偏移剖面

①常规处理流程方法;②本文处理流程方法

Fig.13 A prestack time migration profile achieved from the survey line YLZ04

①The profile processed with conventional method; ②The profile processed with the method of this paper

成像开展研究工作。

4 结论

(1)永乐环礁底质坚硬、水深和横向地震波速变化剧烈,反射地震资料复杂,产生大量低频噪声和涌浪噪声,其频带范围为2~10Hz,可通过异常振幅衰减技术得以消除;发育有高角度变周期绕射多次波、绕射多次波以及由浅至深的短、长周期表面多次波、海底鸣震等强振幅规则干扰波,可通过SRME技术和预测反褶积方法消除岛礁资料中的长周期和短周期表面多次波,但对高角度变周期多次波和绕射多次波的应用效果不佳,具体有效方法待于研究。

(2)Kirchhoff积分法时间域叠前偏移方法在岛礁水深变化缓慢的礁盘区和深水盆地区适应性较好,但在水深迅速变化的岛礁斜坡区,绕射波和绕射多次波残余较多,其主要原因是岛礁斜坡区水深变化快、横向波速差异大,导致方法适应性变差。

(3)本文探索的岛礁地震资料处理流程在海底珊瑚礁绕射波偏移归位、刻画岛礁内部浅层结构和深水盆地区域反射同相轴方面具有相对优势,但礁盘-斜坡-深水盆地之间的地震同相轴连续性不够,其原因仍受岛礁特殊干扰波和横向波速剧烈变化影响,为此建议下一步针对岛礁高角度变周期多次波形成机理及压制方法、岛礁速度建模和深度域偏移

参考文献 (References)

- [1] Austin J, Schlager W, Comet P, et al. Site 628: Little Bahama Bank. Proceedings of the Ocean drilling program[R]. part A: initial reports, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1986, 101: 213-270.
- [2] WU Shiguo, ZHANG Xinyuan, YANG Zhen, et al. Spatial and temporal evolution of Cenozoic carbonate platforms on the continental margins of the South China Sea: Response to opening of the ocean basin [J]. Interpretation, 2016, 4(3): SP1-SP19.
- [3] McNeill L, Shillington D, Carter G. Expedition 381 Scientific Prospectus: Corinth Active Rift Development [R]. International Ocean Discovery Program, 2017. <https://doi.org/10.14379/iodp.sp.381>.
- [4] 汪品先. 追踪边缘海的生命史:“南海深部计划”的科学目标[J].科学通报, 2012, 57(20):1807-1826. [WANG Pingxian. Tracing the life history of a marginal Sea: On the “South China Sea Deep” Research Program [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57, doi:10.1007/s11434-012-5087-1]
- [5] 丁巍伟, 李家彪. 南海南部陆缘构造变形特征及伸展作用:来自两条973多道地震测线的证据[J].地球物理学报, 2011, 54(12):3038-3056. [DING Weiwei, LI Jiabiao. Seismic stratigraphy, tectonic structure and extension model across the Reed Bank Basin in the South China Sea: evidence from NH973-2

- multi-channel seismic profile [J]. *Geophysics*, 2011, 36(5): 895-904.]
- [6] 吴时国, 张新元. 南海共轭陆缘新生代碳酸盐台地对海盆构造演化的响应[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2015, 40(2): 234-248. [WU Shiguo, ZHANG Xinyuan. Response of Cenozoic Carbonate Platform on Tectonic Evolution in the Conjugated Margin of South China Sea [J]. *Earth Science*, 2015, 40(2): 234-248.]
- [7] 卢树参, 许红, 陈勇, 等. 巴哈马滩与西沙群岛台地生物礁地质特征对比[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(3): 57-63. LU Shuchen, XU Hong, CHEN Yong, et al. Comparative study of the reef Geology Between Bahama Banks and Xisha Islands [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(3): 57-63.]
- [8] 杨振, 吴时国, 吕福亮, 等. 西沙海区晚新生代碳酸盐台地的发育模式及控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(5): 47-55. [YANG Zhen, WU Shiguo, LV Fuliang, et al. Evolutionary model and control factors of late cenozoic carbonate platform in xisha area [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(5): 47-55.]
- [9] France R E. The Holocene Geology of the Pelsaert Reef Complex, Southern Houtman-Abrolhos, Western Australia [D]. Perth, Australia: University of Western Australia, doctoral thesis, 1985: 248.
- [10] Willams T D, Kroon S, Spezzaferri. Middle-upper-Miocene cyclostratigraphy of downhole logs and short to long term astronomical cycles in carbonate production of Great Bahama Bank [J]. *Marine Geology*, 2002, 185: 75-93.
- [11] Wyrwoll K H, Zhu Z R, Collins L B, Hatcher B G. Origin of Blue Hole Structures in Coral Reefs: Houtman Abrolhos, Western Australia [J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 221: 202-208.
- [12] MA Benjun, WU Shiguo, LV Fuliang, et al. Seismic characteristics and development of the Xisha carbonate platforms, northern margin of the South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(3): 770-783.
- [13] Mulder T, Ducassou E, Eberli G. P, et al. New insights into the morphology and sedimentary processes along the western slope of Great Bahama Bank [J]. *Geology*, 2012, 40(7): 603-606.
- [14] Mulder T, Ducassou E, Gillet H, et al. First Discovery of Channel-Level Complexes In A Modern Deep-Water Carbonate Slope Environment [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84(11): 1139-1146.
- [15] Read J F. Carbonate platforms of passive (extensional) continental Margins—types, characteristics and evolution [J]. *Tectonophysics*, 1982, 81: 195-212.
- [16] Read J F. Carbonate platform facies models [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69: 1-21.
- [17] Saenger E H, Gold N, Shapiro S A. Modeling the propagation of elastic waves using a modified finite-difference grid [J]. *Wave Motion*, 2000, 33: 77-92.
- [18] Betzler C, John J G, Reijm, et al. Sedimentary patterns and geometries of the Bahamian outer carbonate ramp (Miocene ± Lower Pliocene, Great Bahama Bank) [J]. *Sedimentology*, 1999, 46: 1127-1143.
- [19] Betzler C, Lindhorst S, Eberli G P, et al. Periplatform drift: The combined result of contour current and off-bank transport along carbonate platforms [J]. *Geology*, 2014, 42: 871-874.
- [20] Betzler C, Fürstenau J, Lüdmann T, et al. Sea-level and ocean-current control on carbonate-platform growth, Maldives, Indian Ocean [J]. *Basin Research*, 2013, 25(2): 172-196.
- [21] Betzler C, Hübscher C, Lindhorst S, et al. Lowstand wedges in carbonate platform slopes (Quaternary, Maldives, Indian Ocean) [J]. *The Depositional Record*, 2016, 2(2): 196-207.
- [22] Betzler C, Lüdmann T, Hübscher C, et al. Current and sea-level signals in periplatform ooze (Neogene, Maldives, Indian Ocean) [J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 290: 126-137.
- [23] Principaud M, Ponte J P, Mulder T, et al. Slope-to-basin stratigraphic evolution of the northwestern Great Bahama Bank (Bahamas) during the Neogene to Quaternary: interactions between downslope and bottom currents deposits [J]. *Basin Research*, 2017, 29(6): 699-724.
- [24] Lüdmann T, Kalvelage C, Betzler C, et al. The Maldives, a giant isolated carbonate platform dominated by bottom currents [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 326-340.
- [25] 马玉波, 吴时国, 杜晓慧, 等. 西沙碳酸盐岩建隆发育模式及其主控因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(4): 59-67. [MA Yubo, WU Shiguo, DU Xiaohui, et al. Evolutionary Model and Control Factors of Xisha Carbonate Buildup [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(4): 59-68.]
- [26] 马玉波, 吴时国, 邢树文, 等. 南海北部陆坡混合沉积地层模式及地震响应特征[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2012, 42(S1): 88-95. [MA Yubo, WU Shiguo, XING Shuwen, et al. Stratigraphic model and seismic characteristics of the mixed sedimentation in the slope area of north south china sea [J]. *Journal of Jilin University*, 2012, 42(S1): 88-95.]