

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.04.015

高分辨率三维海洋反射地震 P-cable 系统应用进展

朱俊江¹, 李三忠^{1,2}

(1. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质功能实验室, 青岛 266237)

摘要: 高分辨率三维海洋反射地震 P-cable 系统已经成功应用在海底天然气水合物、储层填图和海底灾害的研究中, 特别是针对海底气烟囱和泥火山等小目标体的内部结构和空间分布特征的研究。在海底大洋钻探的目标区, P-cable 系统能够提供准确的高分辨率的三维地震数据, 有利于海底大洋钻探的井位选取和井位钻探时间评估。与常规的工业界使用的长电缆三维海洋反射地震比较, 高分辨三维海洋反射地震 P-cable 系统具有简单、高效和经济实用性的优点, 能够更加高效、快捷地为科研人员开展海洋地质和地球物理的研究工作, 有助于为今后我国在深潜方面发现的海底“烟囱”开展详细地下高分辨率的三维地震结构调查, 成为深潜方面的一个补充和一个强有力的海洋填图工具。依据实例分析并讨论了高分辨的三维海洋地震 P-cable 系统在海底气烟囱和泥火山内部结构以及空间分布特征方面的应用和科学研究。建议今后在海洋地球物理调查中开展高分辨的三维海洋反射地震调查和研究, 特别针对广阔海域陆坡区天然气水合物、海底泥火山和气烟囱以及海底滑坡灾害方面开展更为精细的三维海洋反射地震调查和相关科学问题的研究工作。

关键词: 三维海洋反射地震 P-cable 系统; 高分辨率; 气烟囱; 泥火山; 天然气水合物

中图分类号: P631.46

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)04-0221-08

由于信息和计算机技术的发展, 国内外石油工业界已经开始频繁使用三维海洋反射地震采集和成像技术, 虽然利用三维海洋反射地震的成像结果能够准确识别地下复杂体的空间变化, 但是, 海洋三维地震数据采集和处理费用十分昂贵, 导致在学术研究方面很难开展实际的相关应用, 大多数研究者都是利用工业界或者全球极少的多缆科考船采集的地震数据开展相关的地质与地球物理研究^[1]。最近几十年, 学术界开发和应用了简易方便的高分辨率三维海洋反射地震调查设施, 使用不同的地震震源采集技术, 其中包括电火花、布默(BOOM)、CHIRP、大容量气枪等作为地震震源开展的三维海洋地震调查^[2-12]。不同的三维海洋地震调查设施有不同的技术参数和地震分辨率, 同时也针对地下不同尺度的调查目标, 绝大多数都是浅层的三维海洋地震调查, 穿透深度比较浅但分辨率很高, 详细的各种三维海洋反射地震调查的参数和分辨率见表 1^[12]。目前,

三维海洋反射地震开始使用一种新的简易调查方式, 方便灵活, 不需要超大的多缆地震调查船, 大大节省了调查费用, 这一技术被称为高分辨率的三维海洋反射地震 P-cable 系统(图 1)^[13-15]。

高分辨的三维海洋反射地震 P-cable 系统非常适合在 10~50 km² 范围内开展高分辨率三维海洋反射地震探测^[13,14]。快速高效的投放和回收, 使得在一次科考航次中可以开展多个区域的三维地震调查任务。2005 年 P-cable 系统开始了它的首次测试航次, 重点任务是调查海底泥火山的地下三维地震结构(图 1)。2006 年在卡迪斯湾和地中海区域开展了海底泥火山的滑塌研究。该系统 2005 年由英国南安普顿国家海洋中心负责第一期系统测试, 2006—2007 年由挪威特罗姆瑟大学、英国国家海洋中心、德国海洋地质研究中心和企业共同参与负责第二期项目的研发任务^[14]。2008 年为了进一步研发 P-cable 系统的实际应用功能, P-cable 3D Seismic AS 企业在挪威正式成立, 随后该公司与美国加州圣何塞的 Geometrics 公司合作, 继续 P-cable 系统的研发和应用, 三维系统主要使用短的固态或者液态电缆, 船体尾部拖曳的电缆由美国 Geometrics 公司设计^[16]。

高分辨率的三维海洋反射 P-cable 系统使用简单, 可在科考船尾部拖拽几十条短排列电缆(通常

基金项目: 广州市科技计划项目(一般项目)(201607010220); 国家自然科学基金杰出青年基金(41325009); 山东省泰山学者特聘教授项目; 国家重点研发计划(2017YFC0601400-1); 鳌山卓越科学家计划(2015ASTP-0S10)

作者简介: 朱俊江(1976—), 男, 教授, 主要从事海洋地质与地球物理研究, E-mail: zhujunjiang@ouc.edu.cn

收稿日期: 2017-05-31; **改回日期:** 2017-06-19. 蔡秋蓉编辑

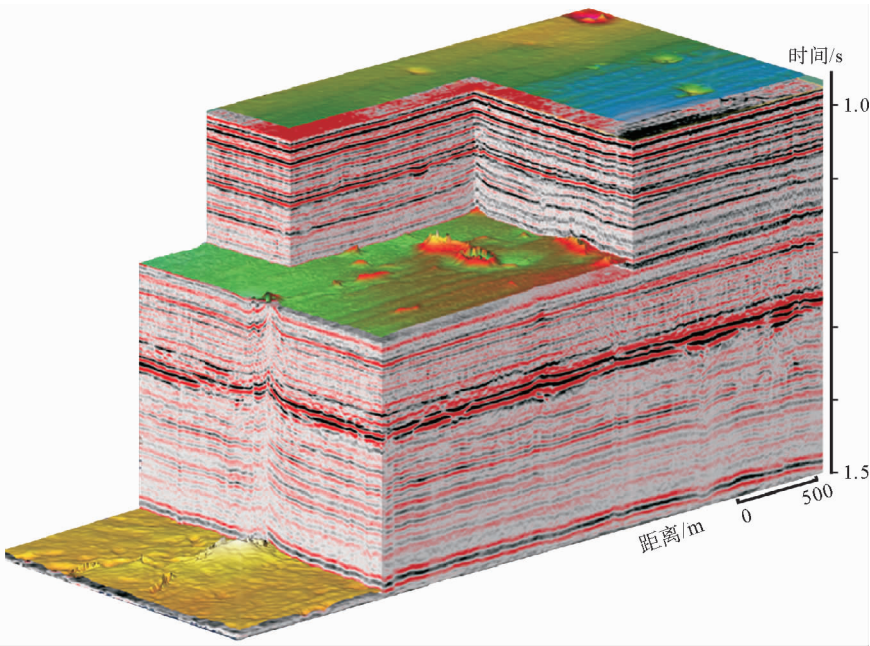


图 1 P-cable 采集的三维地震数据(据文献[14])

Fig. 1 3-D seismic data acquired by the high-resolution 3-D seismic P-cable system(modified after [14])

表 1 不同类型的三维海洋地震采集设备和分辨率特征(据文献[13])

Table 1 3-D marine seismic acquisition devices and their resolution (data from reference[13])

序号	名称	震源和频率范围	接收	分辨率	目标区域
1	3D CHIRP	调频声呐 1.5~13 kHz	11 条电缆@25 cm 间距 6 道@25 cm 间距	<10 cm	100s×100s m ² 10s m
2	SEANAP 3D	布默 4.5 kHz	8 条电缆@50 cm 间距 4 道@50 cm 间距	10 cm	100s×100s m ² 10s m
3	OPU3D	布默 2 kHz	8 条电缆@2 m 间距 2 道@2 m 间距	20 cm	100s×100s m ² 10s m
4	VHR3D	电火花(250 J) 500 Hz	4 条电缆@4 m 间距 6 道@2 m 间距	75 cm	several km ² 10s m
5	3D	单一微型气枪 300 Hz	3 条电缆@7.5 m 间距 24 道@2.5 m 间距	1.2 m	several km ² 100s m
6	HR3D	2 组微型气枪阵 110 Hz	2 条电缆@25 m 间距 24 道@6 m 间距	3.5 m	10 s km ² 100s m
7	P-cable	2 组气枪阵 90 Hz	12 条电缆@12.5 m 间距 8-16 道@6.25 m 间距	4 m	10s km ² 100s m
8	R/V Langseth	2 组气枪阵 50 Hz	4 条电缆@150 m 间距 468 道@12.5 m 间距	7.5 m	100s km ² 1 000s m

注:本表列举的是非工业界的海洋三维地震采集参数。

12~24 条)同时记录地震波信号。而常规的三维海洋反射地震需要拖拽几条长排列电缆(长达 6~10 km),同时需要大容量气枪作为震源,需要花费高昂的海上采集费用,高分辨率三维海洋反射 P-cable 系统是便携式的,能够快速地布放和回收,可以使用小容量的震源就能记录到地下成像目标体的三维地

震结构,采集深度一般达到水深的深度^[14]。近年国外科研机构已经开展了一些高分辨的海洋三维地震调查,重点研究海底气烟囱和泥火山的内部结构以及天然气水合物有关的浅层气体和流体的运移,得到了很好的研究成果,因此,本文将重点介绍该系统的基本组成和系统的关键参数,以及在海底气烟

囱和泥火山方面的实际应用。

1 高分辨三维海洋反射地震 P-cable 系统

1.1 系统组成

P-cable 系统主要由一系列的地震短电缆拖拽在科考船的尾部,能够在节省费用的前提下高效地同时开展多剖面的地震数据采集^[14]。该系统主要由科考船甲板上的记录系统和尾部的拖拽部分组成。

船上的记录系统主要包括甲板电缆、电力供应单元、CNT-2 海洋地震控制器以及仪器的支架。甲板电缆长度约 50 m,连接信号缆和电力供应单元,电缆直径约 19 mm。电力供应单元提供 36~72 V

直流电给 A/D 转换模量。CNT-2 海洋地震控制器提供通讯和对 A/D 模量转换的控制,包括显示数据和将数据写到存储介质中,以及将导航数据写入地震标准格式(SEG-D 或 SEG-Y)的道头中。

船尾部的拖体系统详细组成见图 2,拖体系统主要由 12~24 条短排列电缆组成,电缆长度一般约 25~50 m,内部水听器间隔约 3.125 m,短排列电缆在交叉缆上的间隔一般约 6~12 m(图 2)^[14, 17]。多条短排列电缆连接在一条弯曲的交叉电缆上,两侧的分缆器提供张力,能够使交叉缆和短排列电缆保持在水下 2.5 m 深度。两条 150~200 m 拖绳拖拽着分缆器,通过 20~30 m 的分支线连接交叉缆、拖绳和分缆器(图 2),一条信号缆和一条回收线连接在船体上,回收线方便系统的回收作业,信号缆将短排列电缆记录到的地震信号传输到船上的地震记录器内部并保存在相应的存储介质中。

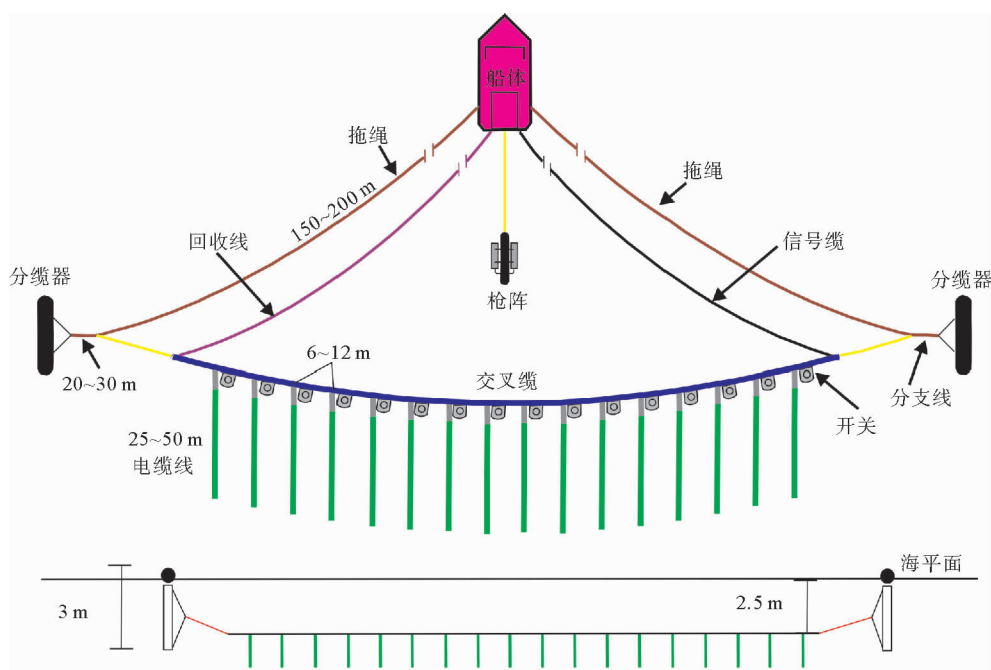


图 2 高分辨率三维海洋反射地震 P-cable 系统结构图(系统轮廓图据文献[17])

Fig. 2 Sketch diagram of the high resolution 3-D seismic P-cable system(from [17])

1.2 系统参数

P-cable 系统主要集中在 10~50 km² 的地震采集区域内,高效的收放系统可以在一个科学航次采集多个三维立方体数据。该系统主要的特征是:采集的立方体尺寸范围是 3~300 km²;频率范围是 50~250 Hz,控制频率是 150 Hz;工作水深是从 200 m 至约 3 000 m;bin 尺寸为 6 m×6 m;垂直分辨率

大约是 1.5 m。

P-cable 系统正常工作的船速是 3~5 节,采集数据的地震源可以是任何高频震源(微型 GI 气枪或气枪阵列、电火花、布默源等)。高分辨率三维海洋反射地震 P-cable 系统在海上一般约 2 h 内完成布放和回收的任务,每天可以采集约 25 km² 范围内的三维地震数据体^[15],水下短排列电缆一般间距是 6~12 m,投放在海面以下 2.5 m 的深度(图 2)。

2 高分辨三维海洋反射地震 P-cable 系统的应用

高分辨率三维海洋反射地震 P-cable 系统应用非常广泛,主要针对海底小目标体的详细三维地震结构调查,重点应用在海底天然气水合物调查、海底自由气的识别以及海底气烟囱和泥火山的地下结构的精准填图方面。对深水海底钻探的目标区能够提供准确的地震数据,方便海底大洋钻探的井位位置选取。P-cable 系统在海洋科学的应用目标是利用高分辨的三维地震数据研究海底滑坡的动力机制^[18];天然气水合物存储结构以及水合物分解引起的海底滑坡和气候变化^[19],包括海底气烟囱结构^[9,20,21]、流体流动系统的运移模式^[22]和浅层气的运移通道以及似海底反射层(BSR)的三维地震变化特征。以下依据详细的实际案例展示 P-cable 三维地震系统强大的实际应用能力。

2.1 气烟囱结构和地震特征

2007 年 P-cable 系统采集的三维地震数据清晰地展现了洋脊上面的气烟囱结构(gas chimney)(图 3)^[9],该气烟囱结构位于斯瓦尔巴德(Svalbard)的

弗拉姆海峡西部的洋脊扩张区段。三维地震数据体采集在 Vestanesa 洋脊西部的顶部,水深大约 1 200~1 300 m,无数的海底麻坑分布在海底洋脊的顶部^[23,24],同时,气烟囱上部的气体火焰展示了该区域活跃的流体流动特征^[25]。

三维地震数据由挪威特罗姆瑟大学 2007 年采集,使用 8~12 条 25 m 长的短电缆,总共采集了 23 km² 范围的地震数据。采集参数主要是用两套 GI 气枪为震源,频率范围为 20~250 Hz,气枪总容量为 240 in³,以 4 节的船速,每 10 s 放一炮,炮间距大约是 20 m^[9]。

利用 P-cable 系统采集的三维地震数据清晰展现了气烟囱或者地下管道系统在沉积地层中的结构,在垂直方向的地震成像图中,气烟囱或者管道系统显示声学透明或不连续反射特征,刺穿了富含天然气水合物的沉积层(图 3b)。在海底之下 160~170 m,地震数据清晰地展示了存在似海底反射层(BSR),分布在天然气水合物稳定带的预测深度上,作为天然气水合物存在的地震方面的直接证据(图 3d)^[9]。

海底椭圆状的凹陷异常一般被解释为海底麻坑,也代表着聚集的流体流动^[20,21,26]。在海底麻坑外围展示均一的反射振幅特征,在麻坑内部显示很强的非均一性反射振幅变化特征(图 3c,图 3d)。气烟囱的直径也从海底 400 m 宽度到深部双程走

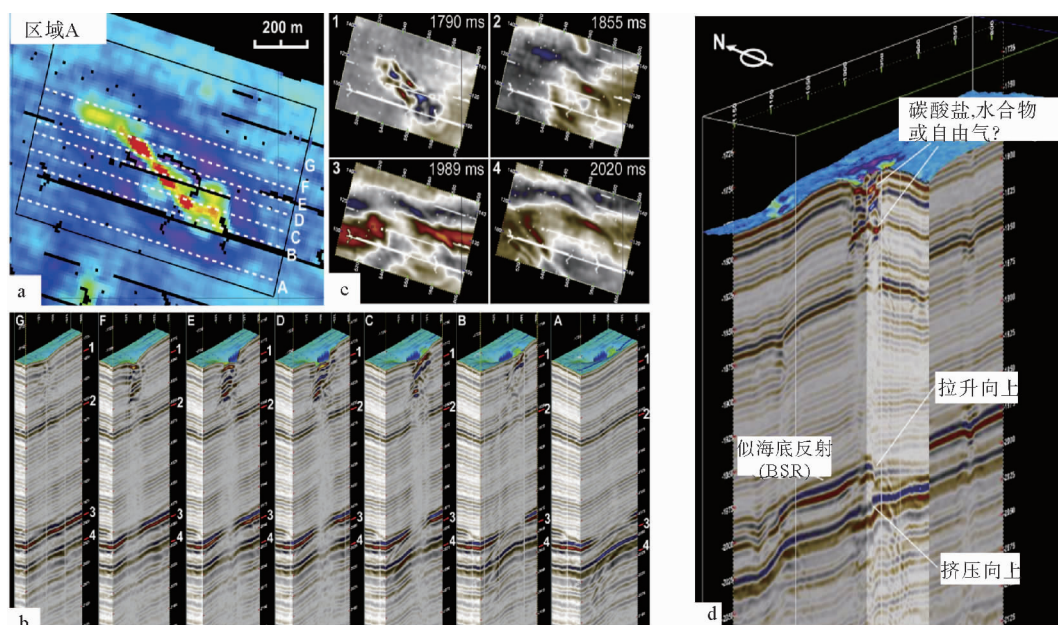


图 3 海底气烟囱结构图(据文献[9])

- a. 区域 A 的海底振幅和测线位置图; b. 连续不同地震测线显示的气烟囱结构变化;
c. 不同地震时间切片图,数字显示的不同层位; d. 地震交叉测线显示的气烟囱结构图

Fig. 3 Internal structure of a gas chimney (modified after [9])

- a. Seafloor amplitude map of area A showing location of seismic lines; b. Structure of gas chimneys along different continuous seismic lines; c. Time-slice map of different seismic times, number 1, 2, 3 and 4 represent the different levels;
d. Structure of a gas chimney along crossing seismic lines

时 2.02 s 位置的 600 m 宽,气烟囱的中心随着深度变化不是近垂直在地下分布,而是在麻坑的底部有一定的垂向偏移^[9]。

2.2 泥火山内部结构和地震反射特征

海底泥火山或埋藏泥火山需要高分辨率的反射地震调查技术追踪泥火山的三维结构空间变化,多次活动的泥火山也需要高分辨的地震反射特征分析

不同期次的活动,查明泥火山活动与海底冷泉和天然气水合物形成以及海底流体活动方式的关系,这些关系对天然气水合物形成机制的研究是十分重要的。在挤压构造背景下,海底泥火山的发育是非常普遍的,主要反映了聚集流体流动的特征。在地震剖面上,海底泥火山显示的是混杂凌乱的地震反射特征,往往泥火山的形态轮廓表现出“圣诞树”样式的结构(图 4)^[27]。

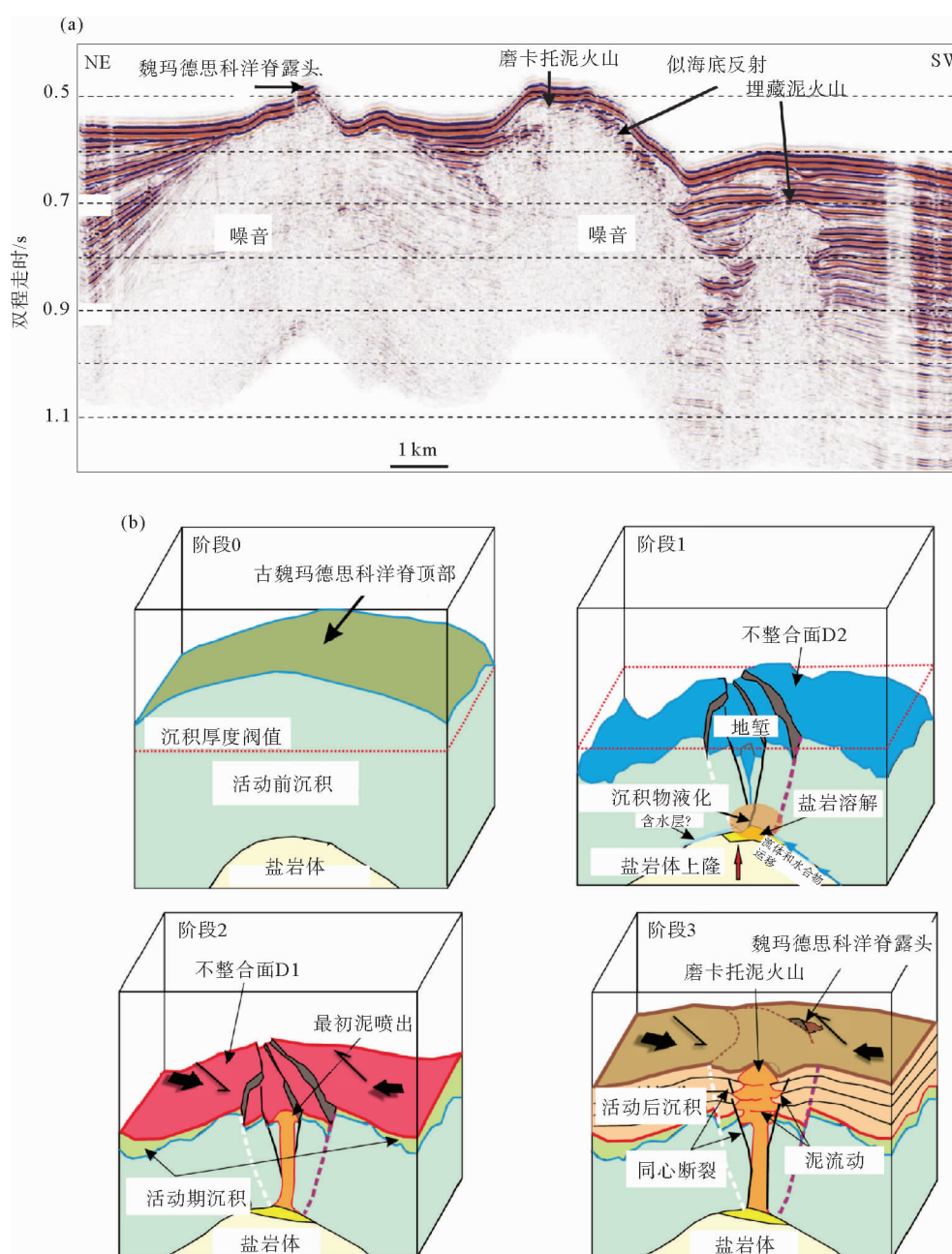


图4 海底泥火山地震和地质解释结构图(据文献[27])

a. P-cable 系统采集并抽取的二维地震反射剖面,清晰展示了磨卡托泥火山(MMV)和一个埋藏泥火山(BMV);b. 泥火山形成和演化模式图

Fig. 4 Seismic signature of a mud volcano and geological interpretation(modified after [27])

a. An inline seismic profile extracted from 3-D seismic block by the P-cable system,

MMV and BMV are imaged on the seismic profile, b. Formation and evolution of mud volcanoes

2006 年挪威特罗姆瑟大学首次在摩洛哥西北的卡迪斯湾海底泥火山区域利用 P-cable 系统采集了高分辨率三维反射地震数据,地震数据清晰识别了磨卡托泥火山(MMV)和一个埋藏泥火山(BMV)的地震结构(图 4),依据地震反射层特征,两个泥火山具有周期性活动特征。该地震实验使用 11 条单道电缆连接交叉缆作为水下拖体部分,4 只 40 in³ 的 Bolt 气枪作为震源,震源频率范围 30~350 Hz,中间频率为 120 Hz,模拟信号使用 Geometrics Geode 24 作为船上地震记录系统,使用 Konsberg DGPS 作为导航系统,其中在两个分缆器安装两套 DGPS 天线,气枪浮体上安装一套定位天线,船甲板上安装一套定位天线,放炮间距近似 12.5 m,最后完成由 56 条航迹线覆盖的 9.95 km × 3.2 km 的三维地震工区,最大垂直分辨率约为 3~4 m,水平分辨率约 10~15 m^[27]。

在地震反射剖面上每一个构造相的内部反射特

征都是连续的,除了在不整合面和一些被泥火山切断的混乱地震反射面(图 4a,图 5)以外。在磨卡托泥火山顶部(双程走时 0.5 s)和埋藏火山的顶部(双程走时 0.3 s)显示了连续的沉积地层,分别显示了 2 和 0.6 km 直径的泥火山特征(图 4a)。地震剖面上展示的突起通常称之为“圣诞树”结构,主要形成在泥火山活动时期,随后在泥火山活动的平静期被埋藏在非火山沉积物之下(图 4b)。通过地震剖面识别和解释了 4 期次泥火山喷发活动^[27]。在向上运移的流体中富含高度集中的 Cl 和 Na 元素含量,表明在磨卡托泥火山底部存在一个大的盐体,在盐岩的顶部,重新活动的盐岩构造作用形成了一个地堑结构(图 4b)。“L”型地堑侧面也限制了磨卡托泥火山和埋藏泥火山的侧向延伸(图 5)。在磨卡托和埋藏泥火山分布的更大区域内分布其他 30 多个不同大小的泥火山群,它们相似的喷出沉积时间可能证实是来自同一个源^[28-30]。

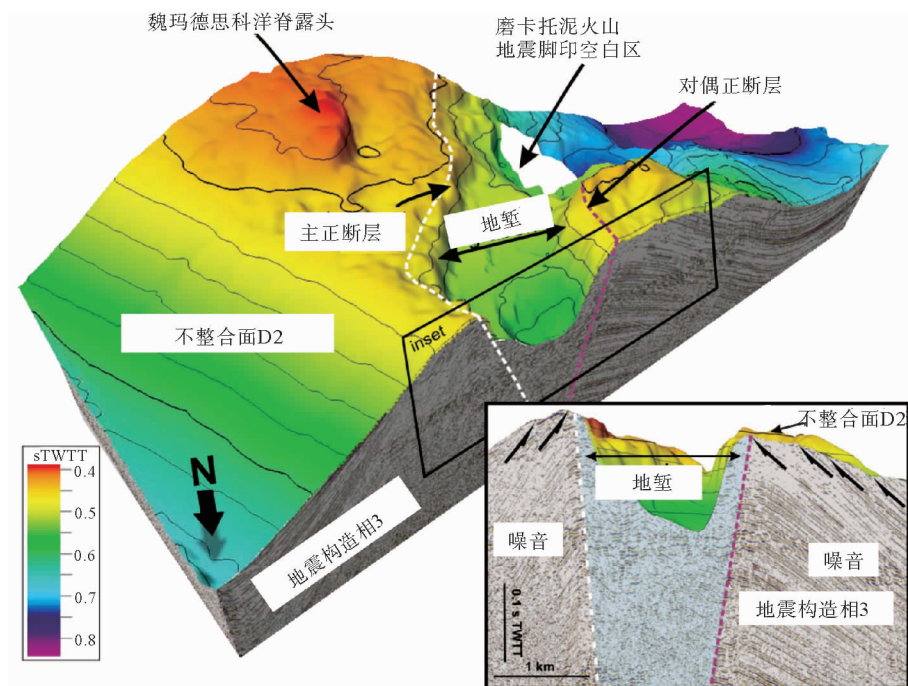


图 5 海底泥火山在剥蚀面上的三维地震图(据文献^[27])

Fig. 5 3-D seismic of a mud volcano at an erosional surface D2(modified after reference^[27])

3 前景和展望

在国家“一带一路”倡议下,海洋科学研究领域必须开展海洋地质与地球物理方面的国际和国内合作调查,开展高效的国内外海洋调查已经是目前重要的发展趋势。常规的长电缆三维海洋反射地震调查手段由于使用成本高昂受到一定的限制,然而高

分辨率三维海洋反射地震 P-cable 系统能够很好地解决这一难点,能够顺利开展不同海域的天然气水合物的资源勘查,特别适用于天然气水合物有关的海底气烟囱和泥火山等小目标体的内部精细结构和空间分布的调查与研究,能够满足今后我国“21 世纪海上丝绸之路”的海上科学调查和研究任务。为了增强“智力丝绸”之路海洋调查方面的广度和深度,配合我国深潜器的水下调查任务,高分辨率三维

海洋反射地震 P-cable 系统是解决地下目标体精细的三维地震结构的一个强有力的工具,尤其是在地下流体和小目标体的详细勘查方面起到关键的作用。高分辨率三维海洋反射地震 P-cable 系统能够提供准确的三维地震数据,有利于大洋钻探的井位选取和井位钻探时间的评估,因此,P-cable 系统不仅将成为今后海洋海底调查的一个强有力的海底填图工具,也为我国今后大洋钻探科学目标区的详细调查提供新的调查手段。

参考文献(References)

- [1] Bangs N L B, Hornbach M J, Berndt C. The mechanics of intermittent methane venting at South Hydrate Ridge inferred from 4D seismic surveying[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310(1-2): 105-112.
- [2] Marsset T, Marsset B, Thomas Y, et al. Very high resolution 3D seismic: a new imaging tool for sub-bottom profiling[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2002, 334(6): 403-408.
- [3] Marsset T, Marsset B, Thomas Y, et al. Analysis of Holocene sedimentary features on the Adriatic shelf from 3D very high-resolution seismic data (Triad survey)[J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1-4): 73-89.
- [4] Missiaen T. VHR marine 3D seismics for shallow water investigations: some practical guidelines[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2005, 26(2-4): 145-155.
- [5] Scheidhauer M, Marillier F, Dupuy D. Development of a system for 3D high-resolution seismic reflection profiling on lakes[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2005, 26(2-4): 183-195.
- [6] Gutowski M, Bull J M, Dix J K, et al. Three-dimensional high-resolution acoustic imaging of the sub-seabed[J]. *Applied Acoustics*, 2008, 69(5): 412-421.
- [7] Vardy M E, Dix J K, Henstock T J, et al. Decimeter-resolution 3D seismic volume in shallow water: a case study in small-object detection[J]. *Geophysics*, 2008, 73(2): B33-B40.
- [8] Mutter J C, Carbotte S, Nedimovic M, et al. Seismic imaging in three dimensions on the East Pacific Rise[J]. *EOS*, 2009, 90(42): 374-375.
- [9] Petersen C J, Bünz S, Hustoft S, et al. High-resolution P-Cable 3D seismic imaging of gas chimney structures in gas hydrated sediments of an Arctic sediment drift[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(9): 1981-1994.
- [10] Vardy M E, Bull J M, Dix J K, et al. The geological Hubble: a reappraisal for shallow water[J]. *The Leading Edge*, 2011, 30(2): 154-159.
- [11] Moore G F, Bangs N L, Taira A, et al. Three-dimensional splay fault geometry and implications for Tsunami generation[J]. *Science*, 2007, 318(5853): 1128-1131.
- [12] Thomas Y, Marsset B, Westbrook G K, et al. Contribution of high-resolution 3D seismic near-seafloor imaging to reservoir-scale studies: application to the active North Anatolian Fault, Sea of Marmara[J]. *Near Surface Geophysics*, 2012, 10(4): 291-300.
- [13] Planke S, Berndt C. Apparatus for seismic measurements: US, 7221620 B2[P]. 2007-05-22.
- [14] Planke S, Eriksen N, Berndt C, et al. P-cable high-resolution seismic[J]. *Oceanography*, 2009, 22(1): 81.
- [15] Ebuna D, Mitchell T J, Hogan P J, et al. High-resolution offshore 3D seismic geophysical studies of infrastructure geohazards[C]//Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP). Denver, Colorado USA: Environment and Engineering Geophysical Society, 2013: 311-320.
- [16] Geometrics. GeoEel Solid Streamer[C]. San Jose, California USA: Geometrics, Inc., 2012, <http://www.geometrics.com/files/geoeelsolid.pdf>.
- [17] Eriksen O K, Berndt C, Büenz S, et al. Styles of shallow gas migration and accumulation on the Norwegian continental margin[C]//73rd EAGE Conference & Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2011. Vienna, Austria: SPE, 2011.
- [18] Berndt C, Costa S, Canals M, et al. Repeated slope failure linked to fluid migration: the Ana submarine landslide complex, Eivissa Channel, Western Mediterranean Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 319-320: 65-74.
- [19] Kvenvolden K. Gas hydrates-geological perspective and global change[J]. *Review of Geophysics*, 1993, 31(2): 173-187.
- [20] Plaza-Faverola A, Bünz S, Mienert J. Repeated fluid expulsion through sub-seabed chimneys offshore Norway in response to glacial cycles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 305(3-4): 297-308.
- [21] Hornbach M, Bangs N, Berndt C. Detecting hydrate and fluid flow from bottom simulating reflector depth anomalies[J]. *Geology*, 2012, 40(3): 227-230.
- [22] Karstens J, Berndt C. Seismic chimneys in the Southern Viking Graben-implications for palaeo fluid migration and overpressure evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 412: 88-100.
- [23] Vogt P R, Crane K, Sundvor E, et al. Methane-generated (?) pockmarks on young, thickly sedimented oceanic crust in the Arctic: Vestnesa Ridge, Fram Strait[J]. *Geology*, 1994, 22(3): 255-258.
- [24] Vogt P R, Gardner J, Crane K, et al. Ground-truthing 11- to 12-kHz side-scan sonar imagery in the Norwegia-Greenland Sea: Part I: pockmarks on the Vestnesa Ridge and Storegga slide margin[J]. *Geo-Marine Letters*, 1999, 19(1-2): 97-110.
- [25] Hustoft S, Bünz S, Mienert J, et al. Gas hydrate reservoir and active methane-venting province in sediments on <20 Ma young oceanic crust in the Fram Strait, offshore NW-Svalbard[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284(1-2): 12-24.
- [26] Judd A, Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment [M]. Cam-

- bridge: Cambridge University Press, 2009: 475.
- [27] Perez-Garcia C, Berndt C, Klaeschen D, et al. Linked Halokinesis and mud volcanism at the Mercator mud volcano, Gulf of Cadiz[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116 (B5): B05101, doi: 10.1029/2010JB008061.
- [28] Van Rensbergen P, Depreiter D, Ivanov M K, et al. El Arraiche mud volcano field[M]//Kenyon N H, Ivanov M K, Akhmetzhanov A M, et al. *Interdisciplinary Geoscience Research on the North East Atlantic Margin, Mediterranean Sea and Mid-Atlantic Ridge*[M]. Paris: Intergovernmental Oceanographic Commission, 2003, 67: 43-51.
- [29] Van Rensbergen P, Depreiter D, Pannemans B, et al. The El Arraiche mud volcano field at the Moroccan Atlantic slope, Gulf of Cadiz[J]. *Marine Geology*, 2005, 219(1): 1-17.
- [30] Van Rensbergen P, Depreiter D, Pannemans B, et al. Seafloor expression of sediment extrusion and intrusion at the El Arraiche mud volcano field, Gulf of Cadiz[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(F2): F02010, doi: 10.1029/2004JF000165.

PROGRESS OF APPLICATION OF P-CABLE SYSTEM OF 3-D HIGH-RESOLUTION SEISMIC

ZHU Junjiang¹, LI Sanzhong^{1,2}

(1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education,
College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: The P-cable system of high-resolution 3-D seismic has been successfully applied to the researches of submarine gas hydrate, reservoir mapping and seafloor geohazards, especially to the internal structure and spatial distribution patterns of small targets such as seafloor gas chimneys and mud volcanoes. The P-cable system can also provide accurate high-resolution 3-D seismic data for ocean drilling site survey, especially for site selection and drilling time estimation. Comparing to the long streamer 3-D seismic survey commonly used by the industry, the P-cable system of high-resolution 3-D seismic is more flexible and easy to users. It is simple, fast and economic to marine geological and geophysical researches. The detailed description of 3-D structures of seafloor gas chimneys, which is usually done by deep diving, can be made by the P-cable system as well and thus the P-cable system of high-resolution 3-D seismic may be used as a supplement to deep diving and a strong seafloor mapping tool in the future. In this paper, we presented some real cases on the application of the system to the internal structures description of seafloor gas chimneys and mud volcanoes and their spatial distributions. We suggest that the P-cable system of high-resolution 3-D seismic be applied more often in the future to marine geophysical survey, specially to fine marine seismic investigation and associated scientific researches related to submarine gas chimneys, seafloor mud volcanoes and slumping slides in the areas of continental slope.

Key words: 3-D seismic P-cable system; high resolution; gas chimneys; mud volcanoes; gas hydrate