

Application Progress and Prospect of 3D Seismic Exploration Technology in the South China Sea

Jie Liu¹, Xiao Liu²

¹First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao Shandong

²College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong
Email: liujie@fio.org.cn

Received: Feb. 4th, 2016; accepted: Feb. 21st, 2016; published: Feb. 25th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

High resolution 3D seismic data of deep sea was becoming more mature with the rapid development of oil and gas exploration. In this paper, we systematically analyzed and discussed the present research concerning application progress of 3D seismic exploration technology in the South China Sea on exploration and development of marine resources, inversion of deep water depth, and identification and assessment of geological hazard in deep water. Otherwise, we put forward the unsolved problems presently, the research direction and emphasis in future. This work was instructive to promoting and enriching the deep processing and application of 3D seismic data in deep sea, and has great value of further studying and understanding sediment and engineering environment in deep sea.

Keywords

3D Seismic Exploration, Resource Exploration, Data Processing and Application, South China Sea

三维地震勘探技术在南海的应用进展及展望

刘杰¹, 刘潇²

¹国家海洋局, 第一海洋研究所, 山东 青岛

²中国海洋大学, 环境科学与工程学院, 山东 青岛
Email: liujie@fio.org.cn

收稿日期: 2016年2月4日; 录用日期: 2016年2月21日; 发布日期: 2016年2月25日

摘要

随着深水油气资源勘探开发的快速增长, 深海高分辨率三维地震资料精细处理和深度处理技术越来越成熟。本文对三维地震勘探技术在南海资源勘探开发中的应用进行了总结, 从海底资源勘探开发、水深地形地貌反演、深水地质灾害识别评估三个方面进行了论述, 并提出了目前研究工作中尚未解决的问题及未来的发展方向和研究重点。对促进和丰富我国深海三维地震资料的深度处理与应用, 深入研究和认识深海沉积与工程环境具有重要意义。

关键词

三维地震勘探, 资源勘探开发, 资料深度处理应用, 南海

1. 引言

地震波中包含着丰富的地球内部信息资料, 地震层析成像是研究地球内部层序地层、构造结构特征的重要手段, 常规三维地震主要用于油气资源勘探、地壳扩张等构造活动的研究中[1][2], 其目标层主要集中在深层沉积体中, 浅表层沉积体的分辨率较差。近年来, 随着深水油气资源勘探开发的快速增长, 深海高分辨率三维地震资料越来越多[3], 三维地震资料精细处理和深度处理技术越来越成熟, 利用精细化处理后的高分辨率三维地震数据可以对海底地形地貌、沉积体系进行识别、分析、研究[4]-[7], 也可以对海底潜在的浅层地质灾害和天然气水合物进行识别[8]-[10]。在深水区, 利用三维地震资料对海底(尤其是深水油气田资源区)地质灾害进行评估, 具有非常大的价值[11]。本文对三维地震勘探技术在南海资源勘探开发中的应用进行了总结, 从海底资源勘探开发、水深地形地貌反演、深水地质灾害识别评估三个方面进行了论述, 并提出了目前研究工作中尚未解决的问题及未来的发展方向和研究重点。对促进和丰富我国深海三维地震资料的深度处理与应用, 深入研究和认识深海沉积与工程环境具有重要意义。

2. 三维地震勘探技术在南海的应用进展

2.1. 水深地形地貌反演

三维地震勘探资料主要用于海底复杂地质构造、油气资源勘探等的高精度探测, 近年来, 许多学者尝试根据三维地震勘探资料提取水深数据[12]-[15], 其具体步骤如下: 设定海底反射波拾取标准; 进而以神经网络原理进行程序化坐标拾取, 通过在三维地震剖面上拾取海底双程反射时间; 最后以 1500 m/s 的平均声速进行反射时间和水深数据的转换。由于该方法在进行时深转换时用的是 1500 m/s 的平均声速, 并没有进行误差校正, 因此获得的是相对尺度的水深, 与实际水深存在一定的误差, 绝对精度不高, 但相对水深地形地貌分辨率较高, 且与水深无关[16], 并不影响对海底地形地貌和地质灾害的进一步研究。

李斌[12]、陈义兰[14]、杨文达[17]等均对三维地震勘探技术反演水深地形地貌在南海海域的应用进行了研究。其中, 陈义兰等在荔湾油气田区分别利用船载多波束测深数据、三维地震资料、AUV 搭载多波束数据, 对不同方法获得的研究区水深地形地貌结果(图 1)进行比较分析, 结果表明: AUV 获取的水深地形地貌资料最为精细; 参考 AUV 数据, 经过精细改正的地震反演水深数据精度要优于船载多波束的精度; 如果地震数据未经精细处理, 则其反演水深数据的绝对精度较差。

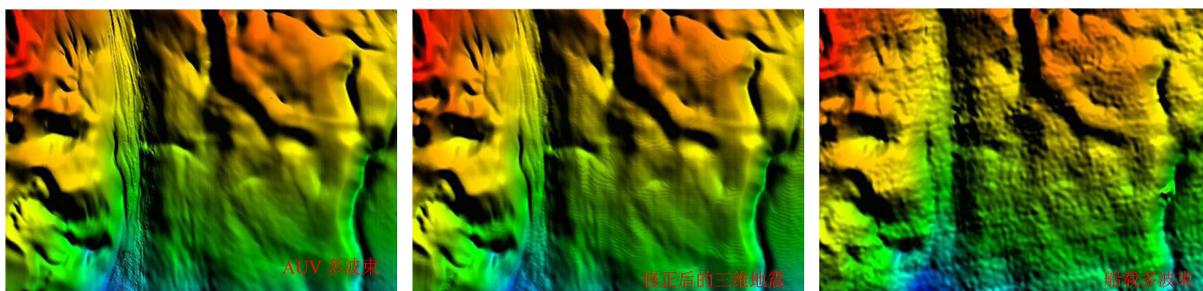


Figure 1. Topographic map of deep seabed obtained by different equipment (modified from [14])

图 1. 不同设备测量获得的深海海底地形图(据文献[14])

2.2. 海底地质灾害识别评估

三维地震数据是以深层勘探为目的的[18], 资料存在分辨率低、偏移距大等问题, 因此, 在对浅地层地质灾害进行识别评估前, 应提高三维地震的分辨率[19]。目前提高三维地震分辨率的处理内容主要包括振幅补偿、去噪、子波处理、精细速度分析、振幅保持、叠加、叠后时间偏移等[20]。经对三高处理后, 浅部地层分辨率显著改善, 三维地震反射波成像品质明显提高, 可以较为清晰地反映海底浅表层土体的反射信息。经进一步解译分析, 可以识别海底滑坡、断层、浅层气、泥火山、麻坑等地质灾害类型。

杨文达[17]、罗鹰[21]等利用高分辨率的三维地震资料对南海不同区域, 尤其是油气田资源区的浅层地质灾害类型、特点及其分布等进行了研究, 结果表明: 经过高分辨率处理的三维地震数据精度明显提高, 尤其是在海底以下 1.5 s 范围内的地震剖面, 地层内部反射结构更为清晰; 通过三维地震资料可以识别出南海海域有可能引发海底地质灾害的不稳定因素主要有海底滑坡、断层、浅层气、泥火山、麻坑、侵蚀槽、碎屑流沉积体、蠕动海底等, 高质量的三维地震资料基本可以满足海底地质灾害评价的需要。

李西双[22]等基于三维地震等地球物理数据, 对南海北部陆坡区峡谷内滑坡的搬运过程、发育和触发机制、滑坡面积及其地质灾害风险等进行了详细研究, 结果表明: 峡谷内小型滑坡发育, 最近的滑坡主要表现出半透明或平行反射, 分别代表了峡谷内滑坡具有脆性和塑性两种变形方式; 大多数滑坡的面积不超过 3 km²; 研究区块体搬运的触发机制是沉积物的自重负荷、坡度和弱的土体力学性质。

2.3. 海底资源勘探开发

传统上, 三维地震主要用于对不同类型的油气资源进行勘探调查, 陈佳梁[23]、王彦峰[24]等对隐蔽型、缝洞型油气藏的高精度三维地震勘探技术进行了研究, 曾宪军[25]等对南海北部海域海底油气资源调查技术及其应用进行了研究, 为我国南海海域油气资源调查提供了技术支持。

随着我国在南海海域发现了丰富的天然气水合物资源, 在十一五期间实施了“海洋天然气水合物的地震识别技术”研究[26]。大量的科研人员投入到天然气水合物的三维地震识别研究中[27]。针对南海海域天然气水合物的特点和赋存条件, 形成了一套天然气水合物的高分辨率三维地震调查技术。根据天然气水合物在地震剖面上的响应, 对适合天然气水合物调查的三维地震调查频带参数进行了研究[28] [29]; 从反射振幅等角度出发, 分析了三维地震调查导航定位、电缆排缆长度与水合物信息识别的关系[30]-[33]。形成了震源与电缆沉放深度、电缆排列长度与道数组合等的水合物三维地震组合参数。

3. 发展方向与研究重点

3.1. 目前存在的主要问题

目前南海大陆边缘深水油气和前新生界油气的勘探和研究程度都还很低, 南海三维地震勘探资料大

部分集中在已知油气资源区。相对我国南海深水广阔海域,尚存在三维地震勘探调查的空白区;另外,因部门管理的不同,南海深水区调查获得的大量不同类型数据资料分散在不同的部门,不利于勘探调查资料的深入处理应用。与三维地震勘探资料深度处理相关的深水海域地质、水文环境和沉积物岩土力学性质等地质灾害相关区域背景信息没有全面系统的掌握,与地质灾害触发机制相关的底部流场特征、海域地震构造及其新近纪的活动性、地震作用下的海底土动力学特性等方面的研究还非常薄弱。

AUV/ROV/深拖等搭载多波束、浅地层和侧扫声呐设备是深水高精度地球物理勘察或地质灾害勘察的保证。我国目前引进了深水(作业水深 3000 m)作业级 ROV 等,开展了 AUV 的研制,但尚不具备深水作业的能力。此外,原位测试、现场原位监测和单元模型测试等技术水平能够满足近海(50 m 以浅)水域的要求,尚无法进入深水(大于 200 m)。在原位测试探头标定和检测等只能依靠国外供应商。而 AUV 研发中的电源供给与管理、惯性导航定位和测试模块集成管理等关键技术尚未攻克。深水钻探取样和现场原位测试——坐底式/钻孔式静力触探设备和测试探头等的研究与国际先进水平的差距较大,在深水(大于 400 m)的相关工作几乎都委托国外执行;缺乏相关经验,积累的深水沉积物的物理力学性质参数的数据也有限。这极大的限制了我国相关学科的研究,如深水地震振幅-沉积物波阻抗-沉积物物理力学的相关性质、静力触探结果与室内测试结果的相互校准研究等。

3.2. 夯实基础数据资料应用研究

我国已实施过多次海域综合调查,累积了大量不同时代、不同分辨率、不同类型的地形、地貌、沉积物、重力、工程地质和构造等数据资料。整合和同化这些数据,构建国家海洋长期数据集,在区域性多波束和三维地震首波时程等数据支持下,编制高分辨海底形态图,以此为基础识别地质灾害,甄选海底滑坡、浊流多发区域,摸清深水地质灾害的类型和分布,编制地质灾害图,显示地质灾害特征分布,描绘与重现有关的事件量级,建立海底滑坡编录,为开展深入研究奠定基础。

3.3. 构建深水调查研究能力

我们深水勘察技术和工具所需的深度和技术要点在过去的十年里已经得到了明显的改善。基于海底地震仪(OBS)、底流观测计、地层压力传感器、新型海水电池、水下接驳器和光纤传输等技术均取得了重要突破,研制适用于深水可长期布放于海底的观测系统和观测网络,攻克高精度网络化综合观测系统设计布设的技术堡垒,搭建起海底原位观测网络,获取海洋基本要素变换的观测数据,分析其较大尺度的动态变化及影响,为构建区域地质模型和地质灾害数据模拟提供输入指标。

AUV 已在国际深水油气开发工程中得到广泛应用,成为深水地质灾害和工程勘察的必备和首选工具。我国在“863”项目资助下,开展了 AUV 技术攻关和研制,在系统集成、控制和水下声学定位等方面取得可喜的成功,还需加快技术攻关的步伐,自主建造深水作业级 AUV,使之在我国管辖深水海域和国际深水工程区大显身手。

3.4. 开展三维地震勘探资料的深度处理与应用研究

针对我国南海深水资源勘探开发的重点区块,开展三维地震勘探资料的深度处理与应用研究。多波束声纳和短距离偏移三维地震技术可生成几乎完整的海底测深覆盖(以及地下地震数据),地震折射方法(GAMBAS 系统)可以提供超高分辨率(± 0.2 m)的地层剖面,能分辨 5 m 以浅的海底地层,包括最上面的 1 m。基于三维地震海底峰值振幅与 MSCL 测量的岩芯阻抗之间的关系,加上钻探取样/原位测试数据,建立三维地震首波振幅、沉积物波阻抗、沉积物物理力学性质之间的关系,可以推测出区域内不同土层土体的强度参数,进而将多波束海底坡度、三维地震资料和土体强度数据输入无限边坡稳定分析中,可

以确定海底沉积物潜在的不稳定区域。通过上述技术可以实现利用地球物理数据评估区域性沉积物的工程地质特征, 有效解决区域工程性质评估时取样成本高、效率低等问题。

围绕深水、超深水油气勘探开发工程, 在设计、施工建设以及运行过程中存在的地质灾害风险, 开展技术开发与理论分析研究; 识别与圈定海域深水油气资源区的地质灾害类型, 研究海底土的物理力学性质和工程地质分区; 研究地质灾害分布特征、成因机制与演化规律, 评价油气资源区海底稳定性并进行风险区划; 开展海洋油气工程构筑物风险评价研究; 推动深水、超深水海域地质灾害风险评价理论技术的发展, 为深水油气资源开发提供安全保障。开发高效处理和显示三维数据的系统软件, 以新的海底形态学透视方法显示区域地形、地层和地质灾害体分布与微观结构的能力, 以及地层物质组成和物理力学性质等。以此为基础编制地质灾害图, 显示油气田区域中地质灾害分布特征, 并且描绘地质灾害重现及量级的风险。

4. 结论

(1) 常规三维地震主要用于油气资源勘探、地壳扩张等构造活动的研究中, 随着深水油气资源勘探开发的快速增长, 深海高分辨率三维地震资料精细和深度处理技术越来越成熟, 精细化处理后的高分辨率三维地震数据已成功应用于南海海底资源勘探开发、水深地形地貌反演、深水地质灾害识别评估等方面。

(2) 目前, 存在的主要问题为深水勘探调查能力相对薄弱, 与三维地震勘探资料深度处理相关的深水地质、水文环境和沉积物岩土力学性质等数据缺失等。因此, 从构建深水海域勘探调查能力、夯实基础调查数据资料深度应用研究, 针对我国南海深水资源勘探开发的重点区块, 开展三维地震勘探资料的深度处理与应用研究。利用地球物理数据评估深水海域区域性浅表层沉积物的工程地质特征, 深入研究和认识深海沉积与工程环境, 有效解决取样成本高、效率低等问题。

基金项目

海洋一所基本科研业务费专项(No.2015G08)。

参考文献 (References)

- [1] 方银霞, 金翔龙, 杨树锋. 利用地震反射法评价海底天然气水合物资源[J]. 海洋通报, 2000, 19(2): 49-52.
- [2] 刘丽华, 吕川川, 郝天珧, 等. 海地地震仪数据处理方法及其在海洋油气资源探测中的发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2673-2684.
- [3] 陶维祥, 何仕斌, 赵志刚, 等. 琼东南盆地深水区储层分布规律[J]. 石油试验地质, 2006, 28(6): 554-559.
- [4] Posamentier, H.W. and Kolla, V. (2003) Seismic Geomorphology and Stratigraphy of Depositional Elements in Deep-Water Settings. *Journal of Sedimentary Research*, **73**, 367-388. <http://dx.doi.org/10.1306/111302730367>
- [5] Li, L., Wang, Y.M., Xu, Q., et al. (2012) Seismic Geomorphology and Main Controls of Deep-Water Gravity Flow Sedimentary Process on the Slope of the Northern South China Sea. *Science China: Earth Sciences*, **55**, 747-757. <http://dx.doi.org/10.1007/s11430-012-4396-1>
- [6] Zeng, H.L., Loucks, R., Janson, X., et al. (2011) Three-Dimensional Seismic Geomorphology and Analysis of the Ordovician Paleokarst Drainage System in the Central Tabei Uplift, Northern Tarim Basin, Western China. *AAPG Bulletin*, **95**, 2061-2083. <http://dx.doi.org/10.1306/03111110136>
- [7] 王大伟, 吴时国, 董冬冬, 等. 琼东南盆地第四纪块体搬运体系的地震特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 65-71.
- [8] Sun, Q.L., Wu, S.G., Hovland, M., et al. (2011) The Morphologies and Genesis of Mega-Pockmarks near the Xisha Uplift, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, **28**, 1146-1156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.03.003>
- [9] 何家雄, 徐瑞松, 刘全稳, 等. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与天然气及 CO₂ 运聚成藏规律研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 91-98.

- [10] 吴时国, 孙启良, 吴拓宇, 等. 琼东南盆地深水多边形断层的发现及其油气意义[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 22-26.
- [11] 杨文达, 刘望军. 海洋高分辨率地震技术在浅部地质勘探中的运用[J]. 海洋石油, 2007, 27(2):18-25.
- [12] 李斌, 杨文达, 李培廉. 利用三维地震资料评估深水井位工程地质灾害[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 121-127.
- [13] 李磊, 王小刚, 曹冰, 申雯龙, 杨林. 东海陆架沙脊三维地震地貌学、演化及成因[J]. 现代地质, 2013, 27(4): 783-790.
- [14] 陈义兰, 刘乐军, 刘晓瑜, 李西双. 深海油气勘探中的海底地形勘测技术[J]. 海洋测绘, 2015, 35(2): 18-22.
- [15] Scott, E., Peel, F., Taylor, C., Bryant, W. and Bean, D. (2001) Deep Water Gulf of Mexico Sea Floor Features Revealed through 3D Seismic. *Offshore Technology Conference*, Houston, 30 April-3 May 2001, OTC-12961-MS. <http://dx.doi.org/10.4043/12961-MS>
- [16] Mosher, D.C., Lapiere, A.B., Hughes-Clarke, J.E. and Gilbert, G.R. (2002) Theoretical Comparison of Seafloor Surface Renders from Multibeam Sonar and 3D Seismic Exploration Data. *Offshore Technology Conference*, Houston, 6-9 May 2002, OTC-14272-MS. <http://dx.doi.org/10.4043/14272-MS>
- [17] 杨文达, 李斌, 胡津炎, 张华, 张异彪. 三维地震资料在深水油气勘探井场地质灾害评价中的运用: 以南海琼东南海区为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 83-90.
- [18] 王建, 赵明辉, 贺恩远, 张佳政, 丘学林. 初至波层析成像的反演参数选取: 以南海中央次海盆三维地震探测数据为例[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(5): 74-83.
- [19] Mallick, S. and Dutta, N.C. (2012) Shallow Water Flow Prediction Using Prestack Waveform Inversion of Conventional 3D Seismic Data and Rock Modeling. *Leading Edge*, 21, 675-680. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1497323>
- [20] 李斌, 杨文达, 李培廉. 利用三维地震资料评估深水井位工程地质灾害[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 121-127.
- [21] 罗鹰, 巩伟. 高分辨率三维地震处理技术及其在浅层地质灾害评估中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(6): 56-59.
- [22] Li, X.S., Liu, L.J., Li, J.G., Gao, S., Zhou, Q.J. and Su, T.Y. (2015) Mass Movements in Small Canyons in the Northeast of Baiyun Deepwater Area, North of the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 34, 35-42. <http://dx.doi.org/10.1007/s13131-015-0702-z>
- [23] 陈佳梁, 胡润苗. 高分辨率三维地震勘探隐蔽油气藏的效果[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(4): 451-453.
- [24] 王彦峰, 王乃建, 高国成, 刘衍贵, 吕景峰. 缝洞型油气藏高精度三维地震采集技术[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(S1): 1-5.
- [25] 曾宪军, 韦成龙, 翟继锋. 南海北部海域油气资源调查技术及其应用研究: 双船折射/广角反射地震勘探研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(2): 39-42.
- [26] 赵庆献. 天然气水合物准三维地震资料采集技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [27] 潘文勇, 雷新华, 沙志彬, 张新, 雷新民, 刘豪杰. Kirchhoff 叠前偏移在天然气水合物准三维地震资料处理中的应用[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 986-992.
- [28] 赵庆献. 天然气水合物准三维地震调查面元参数优化研究[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(1): 70-77.
- [29] 曾宪军, 伍忠良, 郝小柱. 天然气水合物矿体的三维地震与海底高频地震联合采集技术: 海底地震仪观测系统研究[J]. 海洋技术, 2010, 29(1): 124-130.
- [30] 伍忠良. 海洋天然气水合物三维地震与海地地震勘探中的震源技术研究[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(1): 49-60.
- [31] 赵庆献. 天然气水合物准三维地震调查电缆排列长度研究[J]. 海洋技术, 2010, 29(3): 101-104.
- [32] 张明, 彭朝旭, 沙志彬. 天然气水合物准三维地震调查导航定位技术[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 101-106.
- [33] 赵庆献, 韩立国, 伍忠良, 崔杰. 天然气水合物准三维地震勘探电缆动态定位精度研究[J]. 吉林大学学报, 2009, 39(5): 936-941.