

文章编号: 1001-3873(2010)05-0485-04

南海北部天然气水合物成矿区的地球物理异常特征

苏丕波¹, 雷怀彦^{1,2}, 梁金强³, 沙志彬³, 梁 劲³

(1. 厦门大学 海洋与环境学院 近海海洋环境国家重点实验室 福建 厦门 361005; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所 兰州油气中心, 730000; 3. 广州海洋地质调查局 广州 510760)

摘 要:以南中国海北部天然气水合物勘探区的实际地球物理资料为依据, 探讨了天然气水合物矿区的地震反射异常特征、地球物理测井异常特征、地热特征及其之间的关系。研究表明, 常规地震剖面结合叠后地震属性剖面解释能够有效识别水合物成矿带。水合物声波速度、电阻率与密度等测井曲线的组合分析是判断水合物层赋存的有效途径。通过地震、测井及地热等多种地球物理特征联合分析与融合, 能够优化、集成有效的地球物理技术, 提高天然气水合物识别的有效性, 形成可靠的水合物矿藏预测技术方法。

关键词: 南中国海 北部 天然气水合物 地球物理探测 方法

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

研究天然气水合物的分布状态、资源量的估算、天然气水合物储集层的精细描述以及勘探井位的设计等, 均需要发展相应的地球物理探测技术。目前, 我国对水合物的勘探研究主要集中在南海海域, 多种地球物理手段, 包括高分辨地震数据解释、地热条件分析以及地球物理测井技术等, 均被用于我国天然气水合物调查研究中。

1 地球物理调查概况

南中国海是西太平洋边缘海之一, 总面积约 $350 \times 10^4 \text{ km}^2$, 为北东-南西向的菱形海盆, 海底地势自边缘向中心呈阶梯状下降, 平均水深 1 212 m, 最大水深 5 377 m, 海底温度 $1 \sim 5^\circ\text{C}$ 。新生代由于构造运动和板块活动, 在南海形成了不同类型的大陆边缘和沉积盆地^[1]。北部陆缘为张裂大陆边缘, 分布有珠江口、琼东南、莺歌海与北部湾等含油气盆地, 常规油气资源十分丰富。其中, 南海北部陆坡具有十分有利的水合物生成和赋存的构造、沉积等条件^[1-4], 可能是我国天然气水合物最丰富的地区。

地震剖面上的似海底反射层^[5-6]通常指示天然气水合物稳定带的底界, 即含水合物沉积层与含游离气沉积层或含水沉积层的相边界, 文献[7]最早报道了南海存在似海底反射层, 1998年, 姚伯初通过复查原有的 10 万余千米的多道地震后发现, 在东沙全岛和西沙海槽有似海底反射层, 并推测这些地区存在天然

气水合物^[8]。同时, 台湾学者在处理台湾近海的地震资料时也发现了面积达 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的似海底反射层, 并推测该区域存在天然气水合物^[9]。1999年2月至4月, 大洋钻探船“JOIDES·决心号”驶入南海, 执行第 184 号钻探任务, 共在 6 个站位钻孔 17 口, 取心 5 500 m, 考虑到航次恰好位于水合物成矿远景区, 所以对其搭载了天然气水合物的相关研究。1999年, 广州海洋地质调查局首次在南海北部陆坡西沙海槽区进行了天然气水合物前期调查^[10], 完成多道高分辨率地震测线 534.3 km, 首次在西沙海域发现存在天然气水合物的重要地球物理标志——似海底反射层。2000年, 再次对西沙海槽开展天然气水合物地球物理调查, 发现似海底反射层分布面积 $5\,700 \text{ km}^2$, 初步预测西沙海槽区天然气水合物资源量约 $45.5 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量。2002—2003年相继在南海北部东沙群岛、神狐海域、西沙海槽、琼东南海域开展了相关调查和研究工作, 发现我国南海北部陆坡存在非常有利的天然气水合物赋存条件, 在南海北部陆坡的东沙群岛南部、西沙海槽的南北斜坡、笔架南盆地东缘等地发现了多处似海底反射层^[11](图 1), 归纳出了一系列地球物理学、地球化学、地质学和生物学特征。2004—2006年, 在南海北部东沙海域优选重点目标区开展高分辨率地震调查和似三维地震调查^[12]。2007年, 我国在南海北部神狐海域共完成 8 个站位的钻探、测井, 对 5 个站位进行了取心, 在其中 3 个站位上获得了天然气水合物样

收稿日期 2010-04-03

基金项目 国家 973 项目(2009CB219501D)、国家自然科学基金项目(40472156) 版权所有, http://www.cnki.net

作者简介 苏丕波(1981-) 男, 湖北潜江人, 在读博士研究生, 海洋地质 (E-mail) spb_525@sina.com.

品。其中地球物理测井方法对准确判断天然气水合物的赋存层位起到了关键作用,特别是电阻率测井、声波速度测井等对天然气水合物敏感的测井曲线清晰地反映出天然气水合物的存在,为顺利取到天然气水合物样品提供了十分有用的信息^[13]。



图1 南海北部天然气水合物钻探位置和似海底反射层的分布(邓希光, 2008)

2 调查区的地震反射异常特征

一般情况下,含天然气水合物的海底沉积层具有似海底反射层、空白带、速度倒转及极性反转等主要地震异常特征,其中似海底反射层是水合物地震识别的主要标志,代表海底沉积物中天然气水合物稳定带底界。自1999年来,广州海洋地质调查局以多道高分辨率地震调查为主,先后在西沙海槽、东沙陆坡及神狐海域发现了水合物存在的似海底反射层、振幅空白、极性反转、似海底反射层与沉积地层斜交等地球物理特征标志。

从图2a上可以看到,在西沙海槽两侧斜坡和槽底均出现较明显的似海底反射层,振幅空白等异常反射特征。似海底反射层位于海底下180~750 m(约相当于200~750 ms)。由于区内地层产状基本上与海底平行,因此,似海底反射层产状与地层基本一致,仅局部斜交。在图2b上明显可见似海底反射层的强振幅特征,似海底反射层形态与海底大致平行且与正常沉积地层斜交,似海底反射层之上表现为弱反射振幅现象,具有典型的含天然气水合物地层的反射特征。此外,在典型的似海底反射层下方还可看到一个弱的似海底反射层。同时,似海底反射层呈“亮点”特征,这意味着似海底反射层符合第三类气层的AVO响应特征,表明似海底反射层之下存在游离气^[14]。

在常规剖面上,当似海底反射层产状与地层产状呈角度斜交时,似海底反射层反射易于识别;在似海

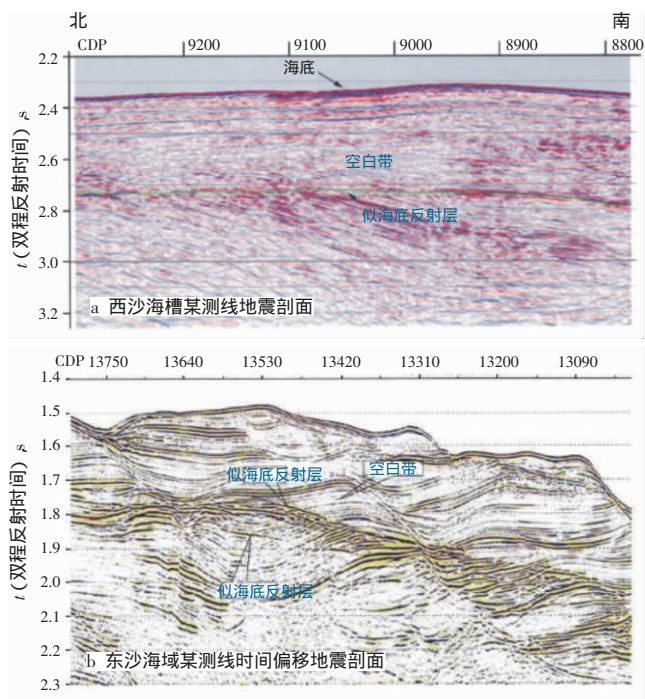


图2 南海北部天然气水合物成矿区典型地震剖面

底反射层产状与地层产状平行且振幅较弱,连续性较差的情况下,则不易判断。在难以利用常规地震剖面判断水合物的异常特征时,利用叠后地震属性(包括瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位)能够较好地揭示天然气水合物矿藏响应特征。

通常,在地震剖面上空白带与其上下地层逐渐过渡,没有明显的边界,因此,难以在地震剖面上解释空白带,而瞬时振幅剖面上突出了天然气水合物发育部位的空白带,其与上下地层分界明显,此外,瞬时振幅剖面上似海底反射层显示为强振幅,特征清晰,可对常规剖面似海底反射层进行验证(图3a),常规地震剖面不能反映游离气的信息,瞬时频率剖面可利用含

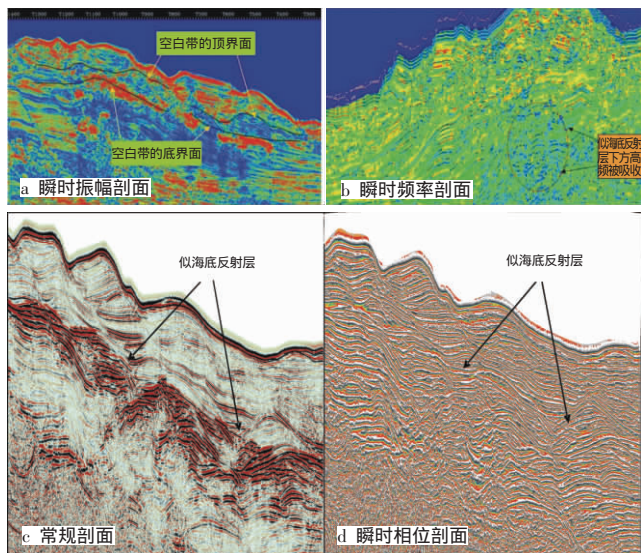


图3 南海北部天然气水合物成矿叠后地震属性剖面

游离气层对高频的吸收反映游离气富集区的分布,而游离气与水合物之间有密切的关系,因此,在瞬时频率剖面上可以验证游离气的存在(图 3b),在似海底反射层振幅较弱,连续性差-较差的情况下,利用瞬时相位剖面可以使似海底反射层清晰,易于追踪,而且空白带内地层产状信息也很清楚(图 3c,图 3d)。

3 钻探区水合物层的测井曲线异常特征

在南海北部陆坡的神狐海域钻探过程中使用了自然伽马、电阻率、密度、声波全波列、井温-井方位、井径及中子等 7 种测井仪器,测量的参数主要包括地层的自然反射性、电阻率、密度、纵波速度、温度、井径及长(短)源中子计数率等,这些参数对于成功准确判断水合物的赋存层位,钻取了天然气水合物实物样品,起了关键的作用,特别是声波速度测井与电阻率测井组合特征,可清晰地反映出天然气水合物的存在。

图 4 的特征分别为:①声波速度测井厚度 40~248 m,声波速度值主要在 1 600~2 250 m/s。按曲线变化特征可分为 4 段:40—195 m 为第 1 段,声波速度缓慢增大,1 600~1 900 m/s,是普通的沉积物特征;195—215 m 为第 2 段,声波速度随深度增加而起伏,且表现为递增快,递减快,呈典型三段式异常特征,即两头大中间小。其中在 195—215 m 段声波速度明显增高,该厚度范围内声波速度平均值为 2 105 m/s,属于异常区域,推测地层中含有水合物或其他高阻矿物。215—220 m 段声波速度快速下降到 1 750 m/s,推测可能是水合物之下存在游离气层的缘故。220—248 m 段,声波速度缓慢增加,为普通的沉积物特征。②电阻率测井由浅到深,电阻率呈缓慢上升趋势,其中,在 195—215 m 段,电阻率由 2 Ω·m 快速上升,最大值为 3.3 Ω·m,一般高阻异常由含气体、水合物或其他高阻矿物造成,由于该段为高速声波段,排除含气体,推测为水合物或其他高阻矿体带。③密度测井:195—215 m 段,密度值 1.78~2.1 g/cm³,中部有一段低密度区,最小值 1.78 g/cm³,其上下围岩地层密度 2.0 g/cm³。据此结

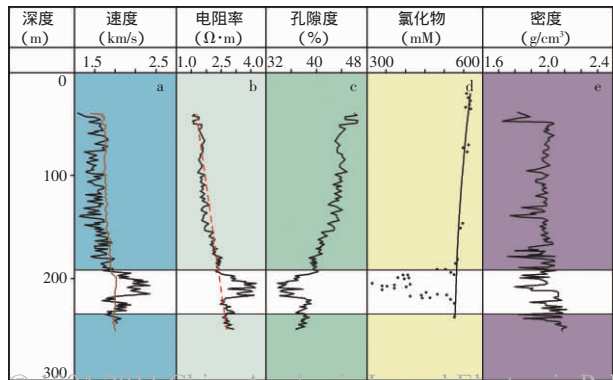


图 4 过神狐 A 站位的测井曲线

合声波速度测井、电阻率测井可以排除其他高密度高阻矿体,推测该段为含水合物层。

从测井特征曲线分析,声波速度测井、电阻率测井与密度测井异常段均处于 195—215 m 段。此外,从过 A 站位的地震剖面上,可以算出似海底反射层位置距海底 239 ms,根据时深转换,对应的深度约为 210 m,地震解释结果与测井数据解释结论基本一致。基于以上分析,最终准确在该段取出约 20 m 厚的水合物岩心样品。

4 1144、1148 站位地温资料分析

天然气水合物的形成与水深(静水压力)、海底温度、地温梯度等直接相关。基于盐水相平衡曲线、实测的水深、海底温度和地温梯度可以计算各个站位稳定带的深度。

1144 站位位于北纬 20°03′、东经 117°25′ 的东沙海域,站位水深 2 037 m,海底温度 3.1℃,地温梯度为 24℃/km。基于盐水相图计算的天然气水合物稳定带深度 695 m。地震剖面上识别的似海底反射层对应深度应为 700 m。由于钻探深度不够,声波测井曲线未出现异常段。

1148 站位位于北纬 18°50′、东经 116°34′ 的东沙海域,水深 3 294 m,海底温度 3.5℃,地温梯度 83℃/km,盐水相图计算的天然气水合物稳定带厚度 219 m。地震剖面上识别的似海底反射层距海底的双程走时为 0.48 s,对应深度约为 475 m。1148 站位声波测井曲线异常段在 450—475 m,速度高达 2 400 m/s,比世界上对应深度的沉积物速度明显偏高。

将 1144、1148 站位的稳定带深度,通过站位的地震反射剖面似海底反射层深度及声波测井异常深度进行对比(表 1)。从表中可以看出:1144 站位的地热资料解释的天然气水合物稳定带厚度与地震剖面资料上的似海底反射层深度比较吻合,但由于钻探深度不够,测井曲线上未出现与之一致的异常段,据此推测该处可能存在水合物且水合物稳定带深度较深,大概在 700 m 左右。1148 站位的地热资料解释的天然气水合物稳定带厚度与地震资料似海底反射层深度有一定差异,虽然测井资料解释的结果支持地震数据得出稳定带深度较一致,但由于不满足生成水合物的地温条件,据此推测该站位附近可能含其他高阻异

表 1 水合物稳定带深度与地球物理测试异常深度对比

站位	水深 (m)	海底 温度 (℃)	温度 梯度 (℃/km)	水合物 稳定带 深度 (m)	地震剖面 似海底反射 层对应深度 (m)	声波测井 异常特征 对应深度 (m)
1144	2 037	3.14	24	695	700	无
1148	3 294	3.48	83	219	475	475

常矿物,不具备水合物形成的条件。

5 讨论与建议

目前,我国寻找南海北部存在天然气水合物成矿带的地球物理证据一般是基于地震剖面解释、测井数据解释与地温资料解释,南海北部水合物成矿区揭示的水合物层的地震解释剖面特征包括似海底反射层、空白振幅带及速度反转、极性反转等典型指示标志。要比较准确地判别水合物的异常特征,必须在常规地震资料处理基础上对剖面进行特殊处理,要综合利用其多种属性剖面才能更好地识别似海底反射层、水合物成矿带和游离气带。地震反射剖面解释结果证明了目前我国对南海北部水合物成矿带的地震采集、处理技术是可行的,结合地震属性剖面能够有效识别水合物成矿带。水合物钻探区的测井解释结果表明,水合物声波速度测井曲线、电阻率测井曲线与密度测井曲线的组合分析是判断水合物层赋存的有效途径,由于水合物的形成与水深、海底温度和地温梯度直接相关,基于盐水相平衡曲线、实测水深、海底温度和地温梯度计算水合物的稳定带深度可以作为水合物赋存的参考参数,与其他地球物理异常特征一起作为判断水合物带是否存在的有利证据。同时,水合物层是否存在不能凭单一的地球物理特征来进行识别,也不能由于缺少某一识别特征而忽视水合物成矿带的存在,在水合物的勘探阶段,应该综合应用多种地球物理资料以及结合地质、地球化学资料进行综合研究。

参考文献:

- [1] 姚伯初,杨木壮.南海晚新生代构造运动与天然气水合物资源[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(4):93-100.
- [2] 于兴河,张志杰,苏新,等.中国南海天然气水合物沉积

成藏条件初探及其分布[J].地质前缘(中国地质大学,北京),2004,11(1):311-315.

- [3] 张光学,黄永祥,祝有海,等.南海天然气水合物的成矿远景[J].海洋地质与第四纪地质,2002,22(1):75-81.
- [4] 张志杰,于兴河,刘博.我国台西南附近构造沉降与沉积作用对气水合物成藏的可能控制[J].天然气地球科学,2004,15(6):655-659.
- [5] Markl R G, Bryan G M, Ewing J I, *et al.* Structure of the Blake Bahama outer ridge[J]. *Geophys. Res.*, 1970, 75: 4 539-4 555.
- [6] Rutherford S R, Williams R H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands[J]. *Society of Exploration Geophysicists*, 1989, 54(6): 680-688.
- [7] Reed D L, Lundberg J, Liu C S, *et al.* Structural relations along the margin of the offshore Taiwan accretionary: implications for accretion and crustal kinematics[J]. *Acta Geologica Taiwanica*, 1992, 30: 105-122.
- [8] 姚伯初.南海北部陆缘天然气水合物初探[J].海洋地质与第四纪地质,1998,18(4):11-18.
- [9] CHI W C, Reed D L, LIU C S, *et al.* Distribution of the bottom-simulation reflector in the offshore Taiwan collision zone[J]. *TAO*, 1998, 9(4): 779-794.
- [10] 张洪涛.中国天然气水合物调查研究现状及其进展[J].中国地质,2007,34(6):953-960.
- [11] 张光学,黄永祥,陈邦彦.海域天然气水合物地震学[M].北京:海洋出版社,1992.
- [12] 姚永坚.天然气水合物的形成条件及勘探现状[J].新疆石油地质,2007,28(6):668-672.
- [13] 陆敬安,杨胜雄,吴能友,等.南海神狐海域天然气水合物地球物理测井评价[J].现代地质,2008,22(3):447-451.
- [14] 徐华宁,郑晓东,张光学.南中国海存在天然气水合物的地球物理证据[J].地质科技情报,2006,25(2):60-63.

Geophysical Anomaly Characteristics of Gas Hydrate Zone in Northern South China Sea

SU Pi-bo¹, LEI Huai-yan^{1,2}, LIANG Jin-qiang³, SHA Zhi-bin³, LIANG Jin³

(1.State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 2.Lanzhou Research Center of Petroleum Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3.Guangzhou Marine Geology Survey, Guangzhou, Guangdong 510760, China)

Abstract: Based on the geophysical data of gas hydrate prospecting area in northern South China Sea, the correlation analysis of the seismic reflectance and attribute profiles, geophysical logging curves and geothermal data in this area is conducted, and the anomaly characteristics of these and their relations are discussed. The result shows that the conventional seismic profile integrated with post-stack seismic attribute profile interpretation can be used to effectively identify the gas hydrate zone in northern South China Sea; the combination of acoustic velocity logs, resistivity logs and density logs is the effective way to judge the occurrence of the gas hydrate zone in this area; the comprehensive analysis and combination of these geophysical characteristics can optimize and integrate effectual geophysical technologies, enhance the validity of identifying gas hydrate and develop a set of reliable prediction means.

Key Words: South China Sea; north; gas hydrate; geophysical prospecting; method