

空间数据挖掘在海域天然气水合物资源评价中的应用

林霖, 张伟, 陈宏文, 郭依群, 龚跃华, 梁金强

(中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760; 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510760)

摘要:海域天然气水合物早期勘探阶段多使用地震调查方法, 利用 BSR 和速度异常等指标圈定水合物矿体进行资源评价、优选预测勘探目标。阐明了空间数据挖掘技术在天然气水合物早期勘探评价阶段的应用, 并通过珠江口盆地东部海域多道地震速度分析中所获速度异常信息, 应用核密度估计方法, 定量地划分了 2 个天然气水合物有利分布区(面积分别为 18 km^2 和 70 km^2), 进而为后期天然气水合物试采生产提供了重要依据及基础数据。

关键词:天然气水合物; 资源评价; 速度分析; 空间数据挖掘; 核密度估计

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2018.11006

天然气水合物是一种似冰状的固体化合物, 在适当的温度、压力条件下由天然气(通常为甲烷)和水分子组合成笼形结构的化合物。在自然界中, 天然气水合物一般存在于海底浅层沉积物中, 在陆地冻土层中也有发现。作为一种潜在的能源资源, 天然气水合物正日益受到研究者和工业界的注意。在调查海域天然气水合物分布情况的初期阶段, 使用最多的是地球物理手段, 其中最主要的是地震调查方法。因为海域水合物的赋存经常在地震剖面上形成较为明显的识别标志, 即似海底反射(bottom-simulating reflector, BSR)。但是在实践中, BSR 的识别有时比较困难, 如地层与海底平行的情况, 难以将 BSR 与地层界面进行区分。BSR 也存在多解性, 如含蛋白石的地层在地震剖面上也表现为反极性特征^[1]。因此, 在只有地震资料的早期调查阶段, 除了 BSR 的解释

识别, 还需要其他指标以进一步确定天然气水合物的分布。地震资料处理时获得的地震波速度在一定程度上可以作为参考指标。含天然气水合物地层与其周边不含水合物的正常地层相比, 其地震波速度值较高, 在速度分析时表现为高速异常。然而出于时间成本的考虑, 地震速度分析是沿地震测线以一定的间隔进行, 通过速度分析发现的速度异常在空间上是较为稀疏的点状分布, 根据其分布特征只能定性地评价天然气水合物的分布区域, 难以在空间上确定其范围。本文通过引入空间数据挖掘技术, 能够在速度分析异常点空间分布的基础上, 定量评价天然气水合物的有利区分布, 为下一步的勘探、钻探工作提供目标参考, 进一步降低天然气水合物早期勘探的风险性。

1 天然气水合物早期勘探与评价

天然气水合物早期勘探与评价一般指的是对某区域进行大范围的初步调查, 目的是评价区域内天然气水合物的资源潜力, 优选有利勘探目标。对于海域的天然气水合物而言, 这一阶段使用的

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160227, DD20160211)

作者简介: 林霖(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事天然气水合物勘查评价与研究工作。E-mail: linlin_gmgs@163.com

勘探手段多是以能够覆盖较大区域面积,并且成本相对较低的地球物理手段为主,如二维多道地震调查、浅层剖面调查^[2,3]、多波束测深^[4]和 OBS^[5,6]等声学手段,以及可控源电磁测量^[7,8]等。这是由天然气水合物及其赋存地层的特殊岩石物理性质(如声波速度高,电阻率高)决定的。

从实际的应用来看,目前使用较多的仍是多道地震调查。主要是因为其有效探测深度相对较深,并且有较为明显的天然气水合物识别标志,即 BSR。但是 BSR 的强振幅和反极性特征多是由游离气产生,没有 BSR 的地层中也发现有水合物的存在^[9],因此,尽管多数情况下 BSR 是个明确的评价指标,但仍需要尽可能结合其他探测手段及方法从多方面补充评价依据。

2 速度异常

水合物赋存对地层声学性质的影响很大,随着水合物饱和度的增加,含水合物地层的声波速度明显增加^[10,11]。一般认为正常地层的声波速度是随着地层埋深增加而递增,若将地层速度的这种变化趋势称为“正常速度”,那么当地层中含有水合物时,其声波速度大于下伏地层速度,形成速度异常现象。若下伏地层中含有游离气,地层的声波速度会比较明显的减小,速度异常现象将更加明显。因此,声波速度异常是识别和分析天然气水合物分布的一个重要指标。

在天然气水合物早期勘探阶段,通过叠加速度分析获取地层声波速度是比较常用的方法^[12-15]。考虑时间成本的情况下,叠加速度分析难以对测线上所有的 CMP 道集进行分析,只能以一定的间隔抽取 CMP 道集进行分析。将存在速度异常的位置在平面空间上标识出来,可以得到一个速度异常点的平面分布,据此对可能的含水合物层分布进行评价。这里的问题是,受限于早期勘探手段,不管是 BSR 还是速度异常,都是空间上离散的信息,对于评价空间上连续分布的地质体,仅通过叠合这些离散信息是不充分的。

3 空间数据挖掘

针对前述速度异常点在水合物有利区评价中

的问题,经过实例验证,认为可以使用空间数据挖掘技术来进一步分析,获得一个对于水合物资源评价更有参考意义的结果。这里的一个前提假设是,当速度异常点在某一区域较为集中时,认为该区域水合物的赋存概率和等级都较高。

概括的说,空间数据挖掘是从空间数据集中提取潜在有用信息的过程。空间数据挖掘是在空间分析、统计学、集合论和计算机科学等多学科基础上发展起来的各种空间数据处理技术方法的集合^[16]。这里我们利用空间数据挖掘中对点集数据的常用处理方法,即密度估计,对识别的地震速度异常点在空间上进行分析。

核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)是一种较好的密度估计方法,属于非参数统计方法。对于单变量的情况,假定 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为空间中的 n 个样本点,其密度估计为:

$$\begin{aligned}\hat{f}(x, h) &= \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - X_i), h > 0\end{aligned}$$

式中: $K(u)$ 为核函数, $K_h(u)$ 为归一化的核函数。可用的核函数很多,常用的有正态(normal)、箱形(uniform)、三角(triangle)、四次(biweight)等。 h 是带宽参数,表示核函数的窗长。作为一个自由参数, h 取值越大,那么结果越平滑。理论上有一种方法可以优化 h 参数的选取,如最小化积分均方误差(mean integrated squared error, MISE)方法。核密度估计的结果可以直观的反映数据的分布情况,作为一种非参数统计方法,核密度估计无需了解或假设数据的总体分布,因此,在实践中是非常好的一种统计工具^[17]。

4 应用实例

4.1 研究区概况

研究区位于珠江口盆地东部海域(图 1),2013 年邻近区域的钻探表明,海底以下约 200 m 沉积层内发育有多层天然气水合物,随钻测井资料表明部分站位 BSR 之下发育游离气层^[18]。钻探结果表明该区域天然气水合物的成矿条件良好,气源充足,具有良好的资源前景。为了拓展对

这一区域天然气水合物分布的认识,广州海洋地质调查局开展了高分辨二维多道地震调查。地震调查测网间距为 4 km×8 km,接收系统采用具有

240 道的数字电缆,道间距 12.5 m,采样间隔1 ms,记录长度 7 s。震源激发系统为单排气枪阵列,容量 560 in³(约 0.009 2 m³),激发炮间距25 m。

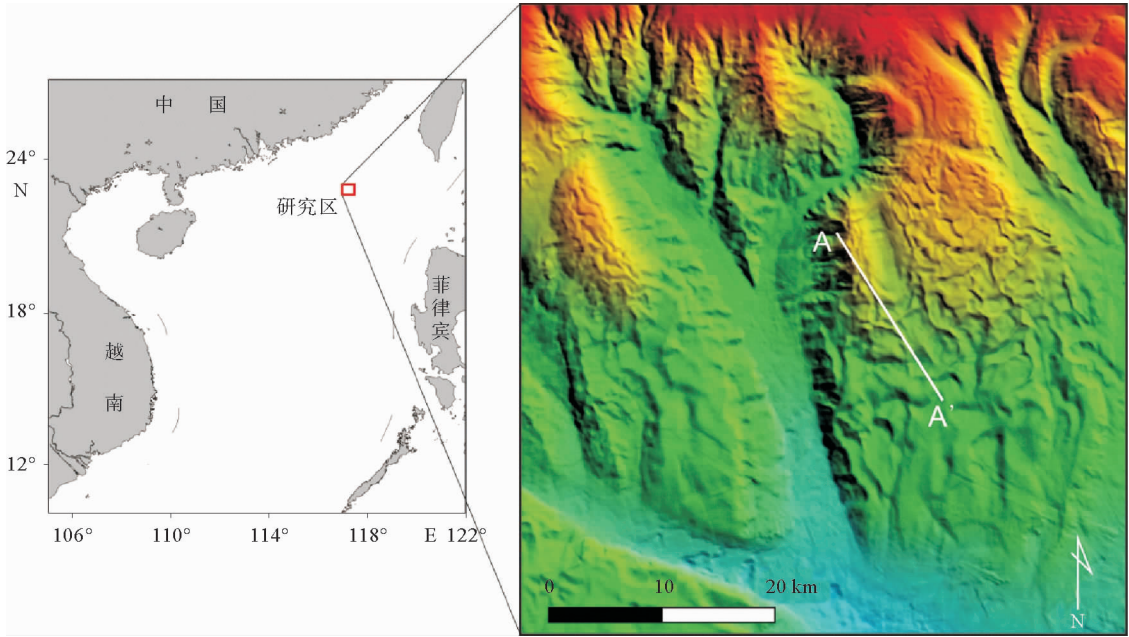


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location map of study area

4.2 速度异常及 BSR 特征

研究区地震测线上可以观察到较为典型的 BSR 特征(图 2),表现为大致平行于海底的强反射,与海底极性相反,并且有明显的穿层现象,在横向上有一定的连续性。并且相应的速度分析结

果也存在明显的速度异常特征。如图 2 所示,在测线上抽取的 15440 号 CMP 位置,速度谱上能观察到 1 448 ms 之下有明显的低速异常,与叠后剖面对比可发现此处正对应为 BSR。速度谱上拾取的叠加速度可用 Dix 公式转换为层速度。经计算,15440 号 CMP 位置的 BSR 上方有一层较

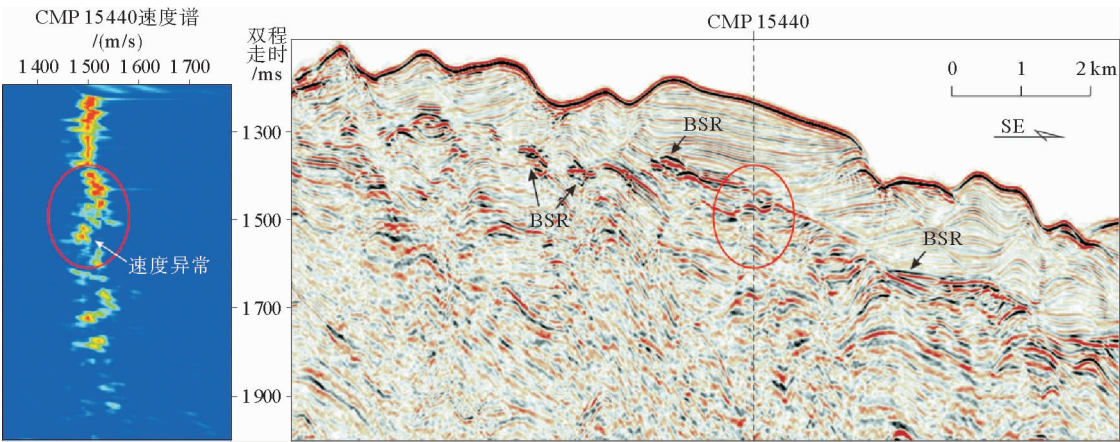


图 2 研究区 BSR 特征及速度谱异常(测线位置见图 1)

Fig. 2 Typical BSR and abnormal seismic velocity in the study area (see Fig. 1 for seismic profile location)

薄的高速层,其速度约为 1 699 m/s,而 BSR 之下有一相对低速层,其速度约为 1 046 m/s,已经远远低于正常海底沉积层速度。这一结果符合 BSR 上方为水合物层、BSR 下方为游离气层的地层速度模型特征:上高下低。

4.3 速度异常的空间密度估计

通过抽取 CMP 道集进行速度分析,在研究区内识别出具有速度异常现象的 CMP 共 76 个,其平面分布如图 3 所示。仅通过观察速度异常的平面分布,大致可以将其划分为 2 个或 3 个区域,除此之外很难进一步获取有关水合物分布的信息。若同一水合物藏及其下伏游离气形成的速度异常在空间分布上有聚集效应,那么利用核密度估计就可以分析可能的的水合物藏分布,以及对水合物分布预测结果的可靠性作出定性估计。

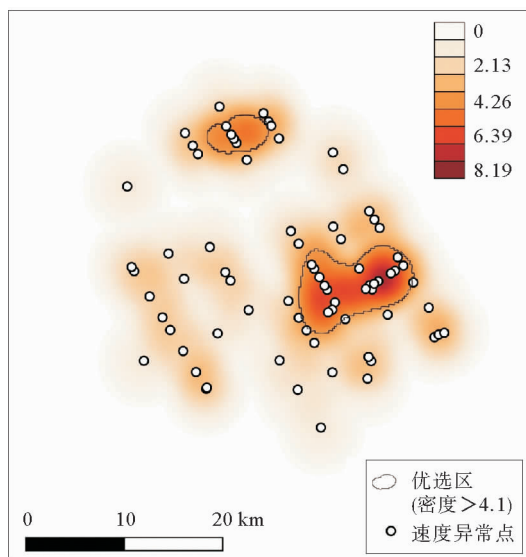


图 3 研究区速度异常点及其空间核密度估计

Fig. 3 Space distribution of abnormal seismic velocity and its KDE result

这里使用的核函数是接近正态分布,但更为平滑的四次函数,即:

$$f(x) = \begin{cases} 15/16(1-x^2)^2, & |x| < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

由于研究区的数据量较小,并且了解数据分布的尺度,因此,核函数窗长参数的选取通过简单的参数试验方法来确定。核密度估计的计算结果

是一个大于零的无量纲值,值越大表示分布的密度越大。

从核密度估计的结果可以看到,速度异常分布较为密集的区域有 2 处,偏南部区域的范围较大,且密度值也较高。据此可以认为该区域具有更好的水合物资源潜力。

通过设置密度阈值,可以进一步量化的优选水合物分布有利区。这里以核密度估计结果最大值的 50% 为门槛,即选取密度 > 4.1 的区域,得到 2 个面积分别为 18 km² 和 70 km² 的优选区(图 3)。

5 讨论及结论

海域天然气水合物资源勘探与评价的早期阶段,主要依靠地球物理手段进行调查,其中使用最多的是多道地震调查方法。除了在地震剖面上识别 BSR 以外,地震速度分析识别的速度异常也是重要的天然气水合物评价指标。一个容易接受的假设是,水合物藏资源潜力越大,其各项评价指标越明显,在空间上的分布也越趋于集中在某一区域。基于此,可以使用空间数据挖掘技术,如本文使用的核密度估计方法,利用上述评价指标量化的评价天然气水合物有利区,增加资源评价结果的可靠性,进而降低后续勘探风险。

利用空间数据挖掘技术,对珠江口盆地东部海域天然气水合物调查资料进行了实例研究。应用结果显示研究区内存在 2 个区域,其速度异常分布密集。通过设置门槛值,定量地评价出 2 个水合物有利区,面积分别为 18 km² 和 70 km²。限于研究区调查资料情况,本文只利用了速度异常这一评价指标。如果在调查资料充分的情况下,如具备与水合物相关的海底浅表层地质地球化学等分析调查资料,再综合其他各项评价指标,最后通过空间数据挖掘进行定量化的水合物资源评价,其评价预测结果将更为可靠。这将是今后下一步研究的工作内容。

参考文献:

- [1] Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, et al. Natural gas hydrates: A review[C]//Collett T, Johnson A, Knapp C, et al. Natural gas hydrates—Energy resource potential and

- associated geologic hazards. AAPG Memoir 89, 2009: 146-219.
- [2] 尚久靖, 吴庐山, 梁金强, 等. 南海东北陆坡海底微地貌特征及其天然气渗漏模式[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(12): 37-44.
- [3] 刘伯然, 宋海斌, 关永贤, 等. 南海东北部陆坡冷泉系统的浅地层剖面特征与分析[J]. 地球物理学报, 2015, 58(1): 247-256.
- [4] 陈霖, 宋海斌. 海底天然气渗漏的地球物理特征及识别方法[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1067-1073.
- [5] Schnurle P, Liu C S, Hsuan T H, et al. Characteristics of gas hydrate and free gas offshore Southwestern Taiwan from a combined MCS/OBS data analysis[J]. Marine Geophysical Researches, 2004, 25(1/2): 157-180.
- [6] 张光学, 徐华宁, 刘学伟, 等. 海底高频地震仪在南海北部天然气水合物探测中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 185-192.
- [7] Weitemeyer K, Constable S, Key K. Marine EM techniques for gas-hydrate detection and hazard mitigation[J]. Geophysics, 2006, 25(5): 629-632.
- [8] Weitemeyer K, Constable S. Mapping shallow geology and gas hydrate with marine CSEM surveys[J]. First Break, 2010, 28(6): 97-102.
- [9] Haacke R R, Westbrook G K, Hyndman R D. Gas hydrate, fluid flow and free gas: Formation of the bottom-simulating reflector[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 261(3/4): 407-420.
- [10] Chand S, Minshull T A, Gei D, et al. Elastic velocity models for gas-hydrate-bearing sediments—a comparison [J]. Geophysical Journal International, 2004, 159(2): 573-590.
- [11] Hu G W, Ye Y G, Zhang J, et al. Acoustic properties of gas hydrate - bearing consolidated sediments and experimental testing of elastic velocity models[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2010, 115(B2): 102-113.
- [12] He T, Spence G D, Wood W T, et al. Imaging a hydrate-related cold vent offshore Vancouver Island from deep-towed multichannel seismic data[J]. Geophysics, 2009, 74(2): B23-B36.
- [13] Hornbach M, Holbrook W, Gorman A, et al. Direct seismic detection of methane hydrate on the Blake Ridge[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 92-100.
- [14] 梁劲, 王明君, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域含天然气水合物沉积层的速度特征[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 29-35.
- [15] Crutchley G J, Maslen G, Pecher I A, et al. High-resolution seismic velocity analysis as a tool for exploring gas hydrate systems: An example from New Zealand's southern Hikurangi margin[J]. Interpretation, 2016, 4(1): SA1-SA12.
- [16] 李德仁, 王树良, 李德毅. 空间数据挖掘理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 15-17.
- [17] Gramacki A. Nonparametric Kernel Density Estimation and Its Computational Aspects [M]. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018: 25-48.
- [18] Zhang G X, Yang S X, Zhang M, et al. GMGS2 Expedition investigates rich and complex gas hydrate environment in the South China Sea[J]. Fire in the Ice, 2014, 14(1): 1-5.

APPLICATION OF SPATIAL DATA MINING TO GAS HYDRATES RESOURCE EVALUTION

LIN Lin, ZHANG Wei, CHEN Hongwen, GUO Yiqun, GONG Yuehua, LIANG Jinqiang

(Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510760, China; Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resource, Guangzhou 510760, China)

Abstract: In the early stage of gas hydrates exploration, seismic through identification of BSR and abnormal seismic velocity is the common method for resource potential assessment. In this article, we will introduce the method of spatial data mining into the evaluation of gas hydrates resource. Upon the kernel density estimation made for seismic velocity data, we quantitatively defined two potential gas hydrates provinces, which are 18 km² and 70 km² in areas respectively in the east of Pearl River Mouth Basin, the South China Sea. The results are proved significant for further investigation or production test of gas hydrates in this area.

Key words: gas hydrates; resource evaluation; velocity analysis; spatial data mining; kernel density estimation