

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020040301

非线性层析技术在琼东南天然气水合物成像中的应用

帅庆伟^{1,2}, 徐云霞^{1,2}, 文鹏飞^{1,2}, 沙志彬^{1,2}, 万晓明^{1,2}

1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075

2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760

摘要: 琼东南海域地震剖面上存在大量的含气特征, 同相轴下拉、明显的速度横向变化等, 因此水合物之下地层存在成像模糊且归位不准等问题, 本文利用基于非线性层析的深度偏移方法提升成像精度。该方法采用全三维体的层析成像反演法建立深度域速度模型, 通过对深度偏移道集拾取 RMO 量, 并对其进行反偏移计算运动学不变量; 在建立层位、倾角等骨架信息约束的混合模型基础上, 利用运动学不变量进行速度层析, 使得 RMO 最小以实现模型更新。该方法避免了常规速度更新的多次迭代偏移, 能极大地提升层析效率, 并能充分利用剖面骨架和倾角信息, 获得高精度的速度模型。在琼东南水合物资料的实际应用中, 有效地消除了含气对地层的影响, 获得高精度的深度域成像结果。

关键词: 非线性层析; 混合模型; 运动学不变量; 深度偏移

中图分类号:P738

文献标识码:A

Application of non-linear tomography technology to gas hydrate imaging in the Qiongdongnan area

SHUAI Qingwei^{1,2}, XU Yunxia^{1,2}, WEN Pengfei^{1,2}, SHA Zhibin^{1,2}, WAN Xiaoming^{1,2}

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geology Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: There are a substantial amount of gas-bearing sediments occurred in the Qiongdongnan area. Geophysical features, such as in-phase axial pulling down and velocity changes are commonly observed. Therefore, the images of sediments below the gas hydrate layer are always blurring. In this paper, a method based on non-linear tomographic depth offset is adopted to enhance the accuracy and resolution of imaging. The method of full 3D tomography inversion is used to establish the velocity model in depth domain, and the kinematic invariants are calculated by picking up the RMO of depth offset gathers and reverse deflection. Based on the mixed model under the constraints of skeleton information, such as horizons and inclination angles, kinematic invariants are used for velocity tomography to minimize RMO for model updating. This method can avoid multiple iteration PSDM processing while updating velocity and greatly improve the tomographic efficiency. Then the high precision velocity model can be obtained by making full use of the profile skeleton and inclination information. The effect of gas on stratigraphic formation is effectively eliminated in the practical application of hydrate data in the Qiongdongnan area, and high precision depth imaging results are obtained.

Key words: Non-linear tomography; hybrid model; kinematic invariant; PSDM

天然气水合物是一种存在于低温、高压环境下的甲烷聚合物。海洋天然气水合物主要分布于水深 300~4 000 m 的深水盆地^[1]。琼东南盆地发育于南海北部西北端大陆边缘, 位于南海北部陆坡深水区, 具有天然气水合物形成需要的高压低温稳定域环境。盆地内具有生物成因和热成因天然气的巨大气源供给条件, 是重要的天然气水合物远景区。盆地内具有非常丰富的泥底辟体、气烟囱及伴生的

底辟断层、裂隙等理想的气体运移通道, 导致地震反射层发生畸变, 呈现出无反射、模糊反射、杂乱反射等特征。而琼东南丰富的含气特征, 导致地震波能量被大量吸收而发生严重衰减, 会在成像剖面上形成大量模糊、空白反射或同相轴下拉现象^[2-6]。为了解决含气导致的成像模糊、时间偏移归位不准等问题, 恢复真实的地层构造信息, 本文对琼东南水合物资料进行叠前深度偏移处理。

资助项目:国家重点研发计划项目“中国海域冷泉系统演变过程及其机制”(2018YFC0310000); 广东省促进经济高质量发展专项资金“海洋经济发展项目”(GDOE(2019)A39); 中国地质调查局地质调查项目“神狐海域天然气水合物先导试验区资源评价”(DD20190224)

作者简介:帅庆伟(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地球物理综合研究和项目管理工作, E-mail: shuaiqw1984@163.com

收稿日期:2020-04-03; **改回日期:**2020-04-17. 周立君编辑

速度层析既是深度偏移的过程也是深度偏移的结果, 在深度偏移中占有非常重要的作用。目前常用的速度更新主要采用线性更新, 在每次速度迭代中均需要进行一次深度偏移, 重复性的偏移和拾取剩余曲率(RMO)信息会严重降低项目运行效率, 导致计算成本较高。另一种速度更新方法是非线性反演方法, 在速度更新过程中不需要进行多次迭代偏移, 能极大地提高速度更新效率, V Farra 于 1988 年提出基于拾取的剩余曲率进行反偏移获得运动学不变量进行非线性反演^[7], 能有效提升速度反演效率; Clapp 等将构造信息加入到反演中, 通过引入模型中间变量, 使得反演结果具有更精细的构造特征^[8]; Emma Evans 等提出在非线性层析过程中加入层位约束, 可以通过硬约束和软约束来提升断层等构造的速度更新精度^[9]; Guillaum 等提出在层析反演中加入倾角约束^[10], 能极大提高速度反演精度。

考虑提升水合物成像精度、恢复真实构造形态的同时考虑提升速度反演运算效率, 本文尝试利用非线性速度层析方法对琼东南水合物数据进行速度建模, 并进行深度偏移处理。成像结果有效地消除了含气导致的同相轴下拉现象, 断层等构造特征成像清晰, 有效地获得了真实的构造成像结果, 取

得了良好的应用效果。

1 非线性层析

线性层析每更新一次速度都要进行一次深度偏移, 要获得最终理想的速度模型需要进行多次深度偏移, 使得速度更新的效率相对较低。非线性层析在速度更新过程中仅需进行一次深度偏移, 在深度偏移道集拾取剩余曲率, 通过对拾取的剩余量进行反偏移从而获得各反射点的双程走时和射线参数, 然后利用这些信息在叠前域获得运动学不变量。将运动学不变量与速度模型进行多次非线性反演, 进行模型更新, 直到获得理想的速度^[11-13]。非线性层析流程如图 1 所示。

本文非线性层析实现过程主要分为 4 步: ①剩余曲率拾取, ②运动学反偏移, ③混合模型建立, ④非线性反演。

1.1 剩余曲率拾取

在共偏移距域进行剩余曲率(RMO)拾取, 其描述从零偏移距到最大偏移距深度的误差, 拾取的精度决定了后续速度层析的精度^[14-16]。为保证提高拾

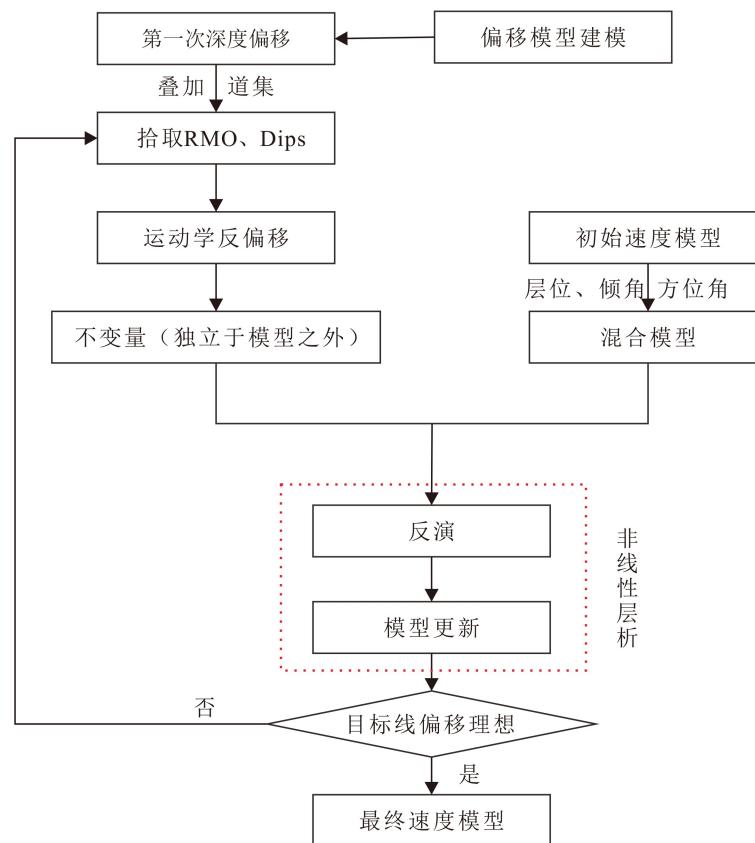


图 1 非线性层析流程

Fig.1 Flow chart of non-linear tomography technology

取的精度,降低由噪声引起的拾取误差,首先要对共偏移距道集进行噪声压制,提高资料的信噪比。同时需要对拾取后的 RMO 进行质量控制,分析拾取的剩余曲率是否与道集同相轴一致,并且要将远偏移距处畸变的拾取剔除掉,如图 2a 所示。另外,在拾取 RMO 的过程中,也会同时生成剩余曲率(gamma)属性体与质量因子(semblance)属性体,可对拾取结果的质量进行控制。gamma 属性体描述整体剩余曲率情况,蓝色表示进行深度偏移时速度偏小,红色表示速度偏高; semblance 为构造约束属性,值越高说明拾取的可信度越高。通过两属性体的分析,可以直观地分析出哪些部分速度偏小,哪些地方速度偏高,哪些地方拾取更为可靠,如图 2b 和图 2c 所示。

与图 2c 所示。

1.2 运动学反偏移

运动学反偏移即将拾取的 RMO 深度误差以及 gamma 与 semblance 等属性参数进行反偏移,涉及到的概念为图偏移,图偏移能够将时间域的层位转换到深度域,在时间域里拾取的层位能够提供 2 种信息:例如在一个偏移剖面中,有一法向入射的射线如图 3a 所示,通过射线能够计算双程旅行时;与法向入射有一定夹角的射线如图 3b 所示,与法向入射相比有一定的时间坡度。通过这个拾取,就能找到沿产生这种射线的入射点 X_{NR} ,也因此能够通过图偏移获得实际的速度模型。在模型更新过程

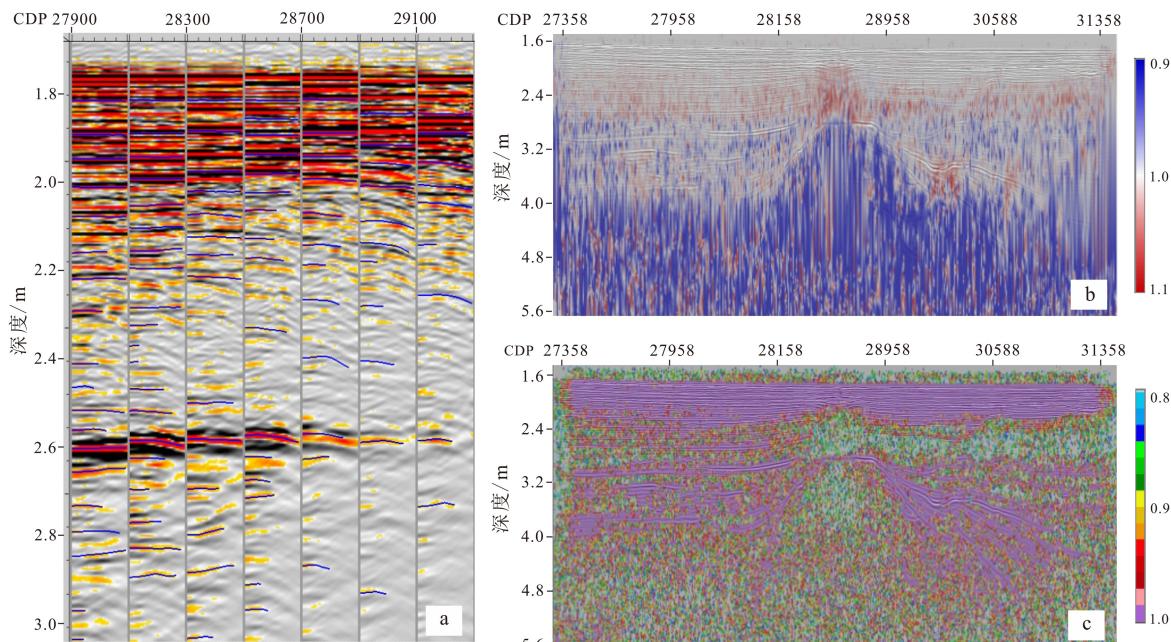


图 2 剩余量拾取

a. 道集中 RMO 拾取量, b. 剩余曲率属性, c. 质量因子属性。

Fig.2 The remaining quantity picking up

a. RMO quantity is picked up from gathers, b. gamma attribute, c. semblance attribute.

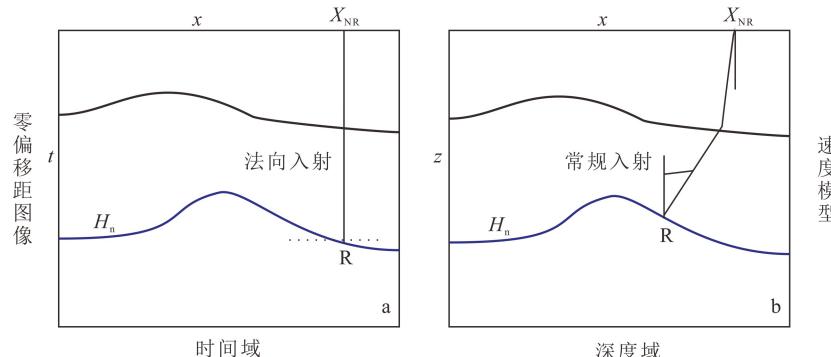


图 3 运动学反偏移原理

Fig.3 Principle of kinematic reverse migration

中, 能够消除速度模型对原来的深度域观测模型的依赖, 从而提升模型更新的效率。

1.3 混合模型建立

目前主流速度模型为网格模型, 网格单元的大小控制了每一层内速度的变化, 以及各地层之间的接触关系。一个精细的网格, 能够精确地定义各层之间的位置, 但需要非常大的数据空间。而混合模型包含了地质单元与许多地震属性, 每一层都被定义为一个独立的属性体。由于属性体中网格单元的大小与层位位置无关, 单元网格的大小可以定义得大一些, 因此, 混合模型比传统的网格模型更加节省资源; 较之用网格来定义每一层的属性, 混合模型采用样条插值思想, 在保证模型精度的前提下, 能够大大缩减模型大小^[9, 17-18], 如图 4 所示。假

设一维速度模型如图 4a 所示, 均匀分割的网格模型如要真实地还原速度模型, 则需要较小的网格(图 4b), 较为稀疏的网格则不能真实接近速度模型如图 4c 所示, 但采用样条插值思想, 却能用较为稀疏的网格点真实地还原速度模型(图 4d)。

所包含的属性信息包括骨架信息与倾角信息等, 倾角信息是在初始深度偏移叠加剖面上做最小二乘搜索离散的局部地层斜率数据体, 产生两个三维离散地层斜率数据体, 分别为投影到主测线和联络测线方向的地层斜率^[19-21]。图 5 为主测线方向的地层倾角剖面显示, 蓝色表示地层倾向沿北东方向, 红色表示沿北西向, 白色表示地层较平, 由图可见, 计算的倾角与实际构造吻合较好, 能够为非线性反演提供良好的约束。

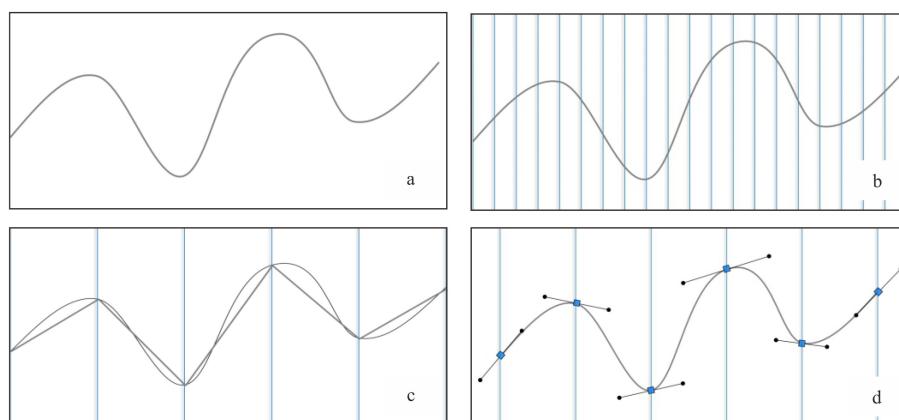


图 4 样条插值思想

a. 一维速度模型, b. 小网格还原速度情况, c. 大网格还原速度情况, d. 样条插值还原速度情况。

Fig.4 Spline interpolation

a. 1D velocity model, b. small grid reduction velocity model, c. big grid reduction velocity model, d. spline interpolation reduction velocity model.

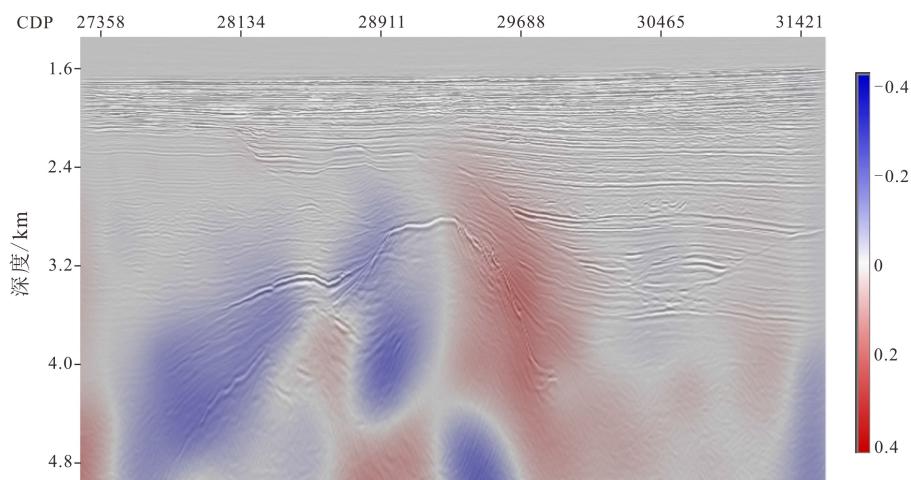


图 5 主测线方向的地层斜率剖面

Fig.5 Stratigraphic inclining profile in the direction of inline

1.4 非线性反演

非线性层析,采用数据驱动的全三维层析反演更新速度模型,每一次模型更新均是一个正、反演迭代的过程,主要包括两个部分:正演模拟,以产生速度模型的 RMO 曲线;反演模拟,即扰动和建模 RMO 之间的线性关系,从而产生模型更新^[22-23]。正演和反演是反复迭代进行的,直到最后的 RMO 量足够低。

图 6a 与图 6b 分别为初始速度模型和最终速度模型所计算的 RMO 量统计直方图,横坐标为 gamma 值,纵坐标为 gamma 值对应的拾取个数, gamma 为 1 说明偏移道集很平;gamma 小于 1 则速度偏小,道集上翘;gamma 大于 1 则速度过大,道集下拉。最终速度模型相对初始速度模型而言, gamma 值更趋近于 1,说明速度更加准确。

2 应用效果分析

在前期道集精细处理的基础上,结合琼东南海域天然气水合物相对的地球物理特征以及地质构造特征,应用非线性层析方法对该区速度模型进行多次非线性速度层析,提升速度模型精度和深度偏

移成果质量。整个层析过程中仅进行一次深度偏移,大大提升了速度层析的速度。

图 7 是水合物目标区的一条主测线的叠前时间偏移剖面,BSR 的强振幅特征刻画清晰。在水合物稳定域之下,由于含有丰富的气体,导致地震反射同相轴出现下拉现象,不利于进行 BSR 之下的地质构造解释,不利于建立精细的水合物相关地质模型。图 8 为利用非线性层析技术获得速度模型后,获得的深度偏移成果,水合物分布位置约在 1 900 m,水深约为 1 700 m,可知该区域水合物分布较浅,为海底以下 200 m 左右;水合物之下的含气区域,由于速度模型准确,经过深度偏移,由含气导致的同相轴下拉现象消除,恢复了真实的地层特征;且基底的陡倾角特征更加真实可靠。

图 9 为非线性层析前后速度对比图,图 9a 为 cdp29350 处的速度曲线对比图,初始深度域层速度模型为线性趋势,不能较好地区分速度增大和减小区域;更新后的曲线能很明显地分析出速度的变化趋势,更利于进行含水合物和含气区域的分析;图 9b 与图 9c 分别为进行深度偏移的初始模型与经过非线性层析后的最终模型在深度 2 200 m 处的切片显示。切片显示中速度值域范围为 1 508~2 000 m/s,蓝色为低速度值,红色为高速度值。速度层析以后

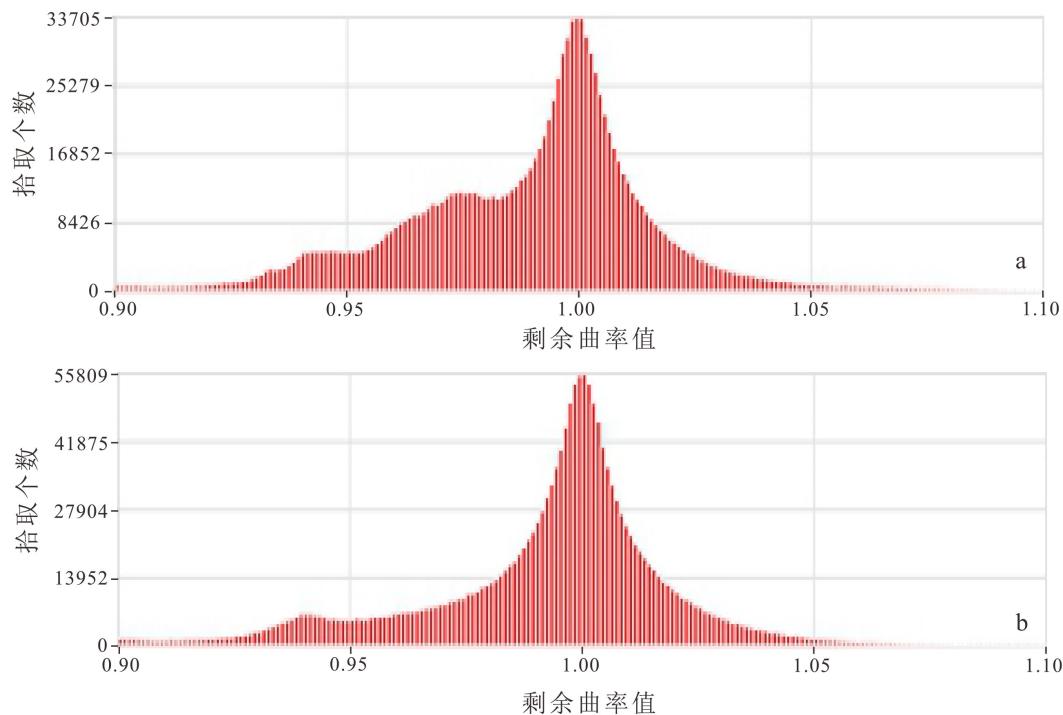


图 6 RMO 量统计直方图

a. 初始速度模型计算的 RMO 量统计直方图, b. 最终速度模型计算的 RMO 量统计直方图。

Fig.6 RMO quantity statistical histogram

a. statistical histogram of RMO quantity calculated by initial velocity model, b. statistical histogram of RMO quantity calculated by final velocity model.

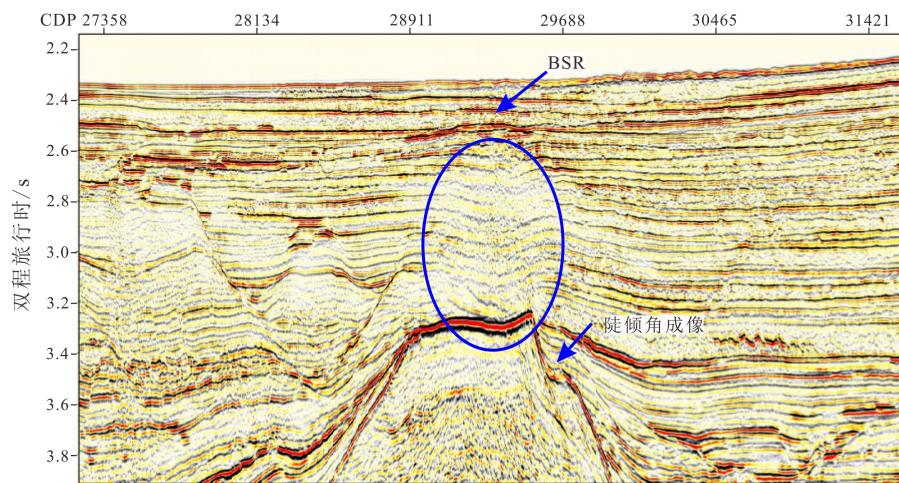


图 7 主测线叠前时间偏移剖面
Fig.7 Prestack time migration profile along inline

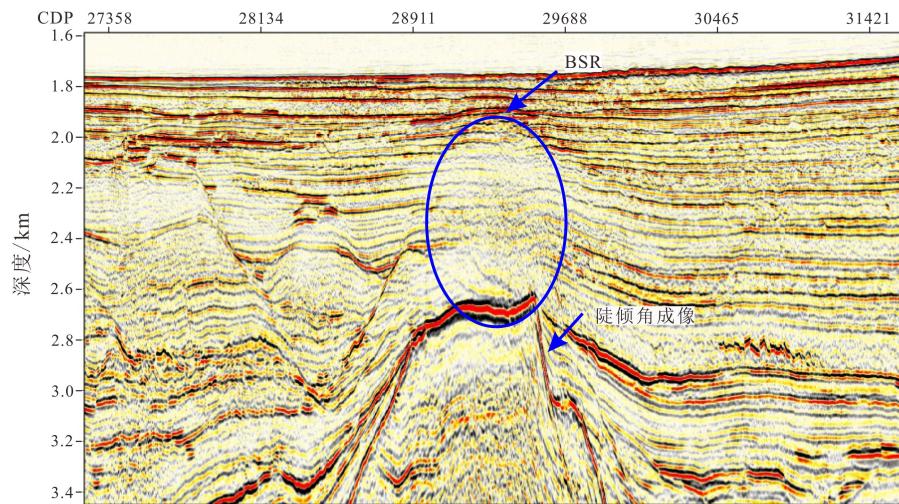


图 8 主测线叠前深度偏移剖面
Fig.8 Prestack depth migration profile along inline

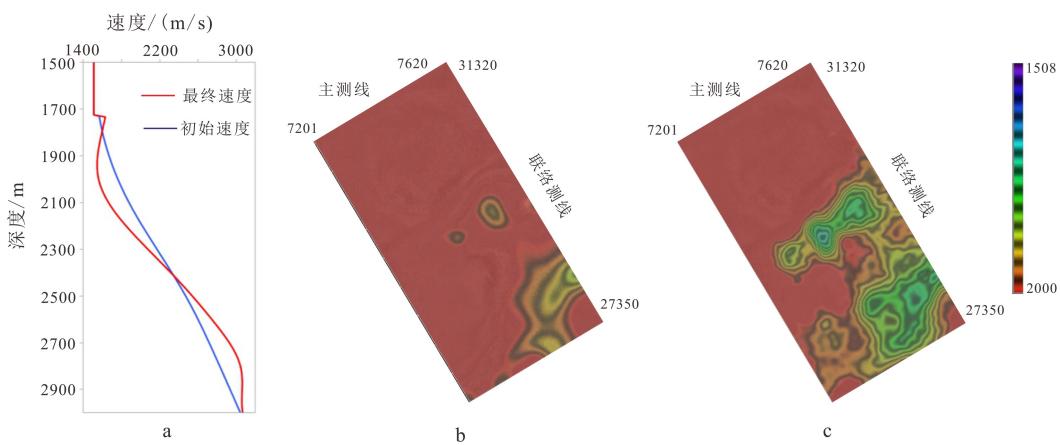


图 9 非线性层析前后速度切片对比

a. 层析前后速度曲线对比, b. 初始速度切片, c. 非线性层析后速度切片。

Fig.9 Comparison of velocity slices before and after nonlinear tomography

a. the comparison of velocity curves before and after tomography, b. initial velocity slice, c. Velocity slice after nonlinear tomography.

的速度切片中有更多的细节特征,对由含气导致的低速异常范围刻画更加清晰,低速异常值范围约为1 650~1 750 m/s,通过更新后的速度,能更加直观地对水合物及游离气的空间分布范围进行刻画。

3 结束语

非线性层析充分运用运动学不变量信息,能有效避免速度层析过程中的多次迭代深度偏移,能够极大提高速度层析的效率;且非线性层析过程中采用混合模型方式,有效地融入倾角、地层骨架等地震属性信息,采用样条插值的模式进行模型建立,能有效地减小模型空间,提升模型层析精度。

在实际天然气水合物资料应用中,非线性层析获得的速度模型能有效地对速度异常体进行精细刻画;基于此进行的深度偏移,其成果能有效地消除含气导致的地层同相轴下拉现象,恢复含气区域的地层真实形态;能有效地对倾角区域进行清晰成像,使得地下地质构造特征更加真实可靠。

参考文献 (References)

- [1] 杨胜雄. 南海天然气水合物成藏理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 2-3. [YANG Shengxiong. Research on Gas Hydrate Accumulation in South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2019: 2-3.]
- [2] 龚跃华, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 琼东南盆地天然气水合物成矿远景 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2018, 48(4): 1030-1042. [GONG Yuehua, YANG Shengxiong, WANG Hongbin, et al. Prospect of gas hydrate resources in Qiong Dongnan basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2018, 48(4): 1030-1042.]
- [3] 张伟, 何家雄, 卢振权, 等. 琼东南盆地疑似泥底辟与天然气水合物成矿关系初探 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(11): 2185-2197. [ZHANG Wei, HE Jiaxiong, LU Zhenquan, et al. Preliminary study of the relationship between the suspected mud Diapir and natural gas hydrate in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(11): 2185-2197.]
- [4] 刘杰, 杨睿, 张金华, 等. 琼东南盆地华光凹陷天然气水合物成藏条件及有利区带预测 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(1): 134-142. [LIU Jie, YANG Rui, ZHANG Jinhua, et al. Gas hydrate accumulation conditions in the Huaguan depression of Qiongdongnan basin and prediction of favorable zones [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(1): 134-142.]
- [5] 何家雄, 苏丕波, 陆振权, 等. 南海北部琼东南盆地天然气水合物气源及运聚成藏模式预测 [J]. 天然气工业, 2015, 35(8): 19-29. [HE Jiaxiong, SU Pibo, LU Zhengquan, et al. Prediction of gas sources of natural gas hydrate in the Qiongdongnan basin, northern South China Sea, and its migration, accumulation and reservoir formation pattern [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(8): 19-29.]
- [6] 张伟. 南海北部主要盆地泥底辟/泥火山发育演化与油气及天然气水合物成矿成藏 [D]. 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文, 2016. [ZHANG Wei. Research on the development and evolution of mud diapir/mud volcano and their relationship with migration and accumulation of petroleum and natural gas-hydrate in major basins, northern South China Sea [D]. Doctor Dissertation of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [7] Madariaga V F R. Non-linear reflection tomography [J]. Geophysical Journal International, 1988, 95(1): 135-147.
- [8] Clapp R G, Biondi B, Claerbout J F. Incorporating geologic information into reflection tomography [J]. Geophysics, 2004, 69(2): 533-546.
- [9] Evans E, Papouin M, Abedi S, et al. Southern North Sea preSDM imaging using hybrid gridded tomography [C]//Proceedings of 2005 SEG Annual Meeting. Houston, Texas: Society of Exploration Geophysicists, 2005: 2530-2534.
- [10] Guillaume P, Reinier M, Lambaré G, et al. Dip constrained non-linear slope tomography [C]//Proceedings of 2013 SEG Annual Meeting. Houston, Texas: Society of Exploration Geophysicists, 2013.
- [11] 王兆旗, 庄锡进, 李立胜, 等. 非线性层析反演速度建模技术 [J]. CT理论与应用研究, 2017, 26(5): 543-551. [WANG Zhaoqi, ZHUANG Xijin, LI Lisheng, et al. Non-linear tomography inversion technology for velocity modeling [J]. CT Theory and Applications, 2017, 26(5): 543-551.]
- [12] 王兆旗, 李立胜, 叶明月, 等. 倾角约束的非线性层析反演速度建模技术 [J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(2): 156-161. [WANG Zhaoqi, LI Lisheng, YE Yueming, et al. Dip constrained non-linear tomography inversion technology for velocity modeling [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(2): 156-161.]
- [13] Adler F, Bainbridge R, Soudani M A, et al. Nonlinear 3D tomographic least-squares inversion of residual moveout in Kirchhoff prestack-depth-migration common-image gathers [J]. Geophysics, 2008, 73(5): VE13-VE23.
- [14] 张凯, 李振春. 双复杂条件下层析速度反演方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3001-3006. [ZHANG Kai, LI Zhenchun. Tomographic velocity inversion method with dual-complexity [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3001-3006.]
- [15] 李辉, 王华忠, 刘守伟. 基于高斯束的速度层析方法研究 [J]. 石油物探, 2017, 56(1): 116-125. [LI Hui, WANG Huazhong, LIU Shouwei. A velocity tomography algorithm based on Gaussian beam [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(1): 116-125.]
- [16] 欧阳甜子. 高斯束叠前深度偏移在普光气田的应用研究 [J]. 非常规油气, 2018, 5(5): 35-42. [OUYANG Tianzi. Applied research on Gaussian beam prestack depth migration in Puguang gas field [J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(5): 35-42.]
- [17] Jones I F, Sugrue M, Hardy P. Hybrid gridded tomography [C]// Proceedings of First Break. EAGE, 2007: 35-41.
- [18] Lambaré G, Guillaume P, Zhang X, et al. Multi-layer non-linear slope tomography [C]//Proceedings of 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013. London: European Association of Geoscientists & Engineers, 2013.

- [19] Guillaume P, Hollingworth S, Zhang X M, et al. Multi-layer tomography and its application for improved depth imaging[C]// Proceedings of 2012 SEG Annual Meeting. Las Vegas, Nevada: Society of Exploration Geophysicists, 2012: 1-5.
- [20] 肖艳玲, 范旭, 王晓涛, 等. 网格层析速度反演技术在齐古背斜叠前深度偏移中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(S2): 98-103. [XIAO Yanling, FAN Xu, WANG Xiaotao, et al. Mesh tomographic velocity inversion for the prestack depth migration of the Qigu anticline [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(S2): 98-103.]
- [21] 潘兴祥, 秦宁, 曲志鹏, 等. 叠前深度偏移层析速度建模及应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3080-3085. [PAN Xingxiang, QIN Ning, QU Zhipeng, et al. Tomography velocity modeling and application of prestack depth migration [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3080-3085.]
- [22] 王红丽. 南海复杂构造地震成像及其应用研究[D]. 中国科学院深海科学与工程研究所博士学位论文, 2018. [WANG Hongli. Seismic imaging of complex structures and its application research in South China Sea[D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [23] 杨振武. 海洋石油地震勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 126-124. [YANG Zhenwu. Offshore Oil Seismic Exploration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 121-126.]