

doi: 10.11720/wtyht.2024.1084

郑浩,崔月,许璐,等. 华南火成岩区深层地热勘探地震处理关键技术[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 88-97. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1084>Zheng H, Cui Y, Xu L, et al. A key seismic processing technique for deep geothermal exploration in igneous province in southern China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 88-97. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1084>

华南火成岩区深层地热勘探地震处理关键技术

郑浩, 崔月, 许璐, 齐鹏

(中石化石油物探技术研究院有限公司, 江苏 南京 211103)

摘要: 华南火成岩发育区是我国重要的地热资源区, 具备中高温地热的储藏条件, 地热资源丰富, 但深层地热资源勘探难度大, 基于重、磁、电的勘探方法对地层结构、热储边界及隐伏断裂的热储空间展布特征刻画不足。因此, 本文利用三维地震勘探资料, 开展面向深层地热勘探的地震关键处理技术研究, 形成具有识别深层地热构造的处理技术流程。首先, 通过面向深层热储的精细预处理技术解决深层低信噪比问题, 做好数据基础工作; 在此基础上, 采用断控精细速度建模技术建立高精度速度模型; 最后结合保低频逆时偏移技术实现深层热储高精度成像, 改善成像质量, 提高热储空间、高陡边界的刻画精度。实际资料测试验证了该技术流程的有效性与实用性。

关键词: 深层地热勘探; 热储边界; 预处理; 速度建模; 高精度成像

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)01-0088-10

0 引言

华南火成岩发育区有着陆缘地带的复杂构造格局和活动状态, 其中地热资源丰富, 近地表主要以中低温和中温水热存储, 深层富含高温、高压的地热储层, 是地热勘探的有利探区^[1-4]。对于深层地热勘探, 研究地热储层的结构、边界和空间展布至关重要。大量证据表明, 在地温梯度高、温度高的地区存在近垂直深断裂^[5], 即地热储层常伴有断裂发育。然而, 具有高陡构造形态的伴生断裂热储刻画难度较大, 常规重、磁、电等勘探方法难以取得较为理想的效果。相比较而言, 地震勘探具有更高的成像分辨率, 可以实现深层热储精细刻画。尽管三维地震勘探采集成本较高, 但部分探区已开展油气勘探, 可以利用其采集的三维地震资料进行高精度成像, 实现深层热储的精细刻画。相比于油气勘探, 地热勘探更加注重对热储分布及边界的刻画, 两者处理目标和处理方式差异较大。针对深层火成岩热储实际地质条件, 目前在地震资料处理方面, 应该从保低频

去噪、精细化速度建模、高精度成像 3 方面进行关键技术研发及应用, 建立具有识别深层地热构造的流程, 为后续地热储层的精细刻画提供高品质数据。

首先, 保低频去噪是深层热储精确成像的数据基础。目前, 地震资料去噪领域出现了诸多新技术、新方法, Saad 等^[6]基于自编码器原理, 提出了一种基于深度自编码器 (DDAE) 的智能化去噪方法, 在随机噪声压制方面效果突出, 能保护有效信号频带不受损失。Shan 等^[7]根据 Unet 网络学习传统去噪方法, 通过训练后的网络模型实现地震资料有效去噪, 一定程度上解决了传统智能化算法泛化性的问题。石战战等^[8]提出了一种在 F-X 域利用低秩矩阵近似的算法对共偏移距道集进行去噪, 可以实现非平稳信号的去噪处理, 并同时保持低频有效信号。崔亚彤等^[9]提出了一种快速自适应的非局部均值滤波技术, 通过自适应算法有效区分噪声与有效信号, 采用非局部的均值滤波压制低频噪声。在实用化应用方面, 杜耀斌等^[10]将多域去噪的方式成功应用于塔里木盆地深层探区, 有效压制了低频噪声, 提高了深层目的层构造成像的精度。徐颖等^[11]针对

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目课题 (2019YFC0604902)

第一作者: 郑浩 (1991-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事地球物理反演与 Q 值建模、智能化地震资料处理等研究工作。Email: zhenghao_swt@

sinopec.com

塔中奥陶系低信噪比的问题,利用“六分法”的多域组合去噪技术思路与处理流程实现了碳酸盐岩储层的保低频噪声压制,相比于常规处理流程,更加注重对低频信号的保护,使深层小尺度异常体清晰度明显提升。王立歆等^[12]根据超深层碳酸盐岩断控缝洞体的特点,提出了一种保低频的弱信号恢复技术,有效恢复深层能量,为高精度成像提供了基础数据。相比于油气勘探,深层地热勘探更注重对大中尺度构造的精细刻画,因此针对深层热储成像,如何在去噪过程中保护低频有效信号、压制低频噪声是关键。

另外,精细化速度模型是深层热储成像的核心。层析反演是目前深度域速度建模中常用的方法,该方法通常利用走时信息,沿波传播路径进行速度反演,将成像空间映射到模型空间^[13],得到地下层速度。目前,基于射线理论的层析反演方法已经较为成熟,并在地热勘探中进行了试验,有效提高了热储结构的识别能力^[14-15]。然而,传统的层析反演只能得到低波数分量,不能很好地反演得到深层热储结构特征及伴生断裂的速度。为了解决该问题,提高深层复杂构造的反演精度,通常会采用模型正则化方法进行先验信息约束。张在金等^[16]提出了一种井控与构造约束条件下的网格层析速度建模技术,对断层两侧的速度进行了准确刻画。郑浩等^[17-18]针对复杂构造及断裂建模难题,分别提出了基于构造导向滤波及断裂属性约束的层析速度建模技术,有效提升了速度反演的分辨率,得到了更符合地质认识的高精度速度模型,改善了成像质量。对于深层热储边界、高陡构造及复杂断裂,常规层析速度建模方法难以满足精度要求,应当采用模型正则化技术,形成一套考虑结构特征及伴生断裂的构造约束速度建模技术流程,实现深层热储边界及内幕的精细速度反演。

最后,高效的高精度成像方法是关键。对于深层热储边界、基底及复杂断裂系统,逆时偏移技术(RTM)具有较为明显的理论优势,该方法对于高陡构造成像效果较好,但作为双程波波动方程偏移,计算量及存储量较大,规模化应用较难。针对该问题,刘守伟等^[19]研发了可以应用于 GPU 集群的最佳匹配层边界条件逆时偏移技术。张慧宇等^[20]针对海量地震数据,研发了基于 GPU 集群的大规模分布式逆时偏移技术,能够应用于高密度采集的地震三维数据成像,推进了该技术的实用化进程。刘立民等^[21]根据起伏地表复杂构造成像中逆时偏移存在的问题,将有限元正演技术应用于逆时偏移中,进一步改善了复杂构造区逆时偏移的应用效果。目前,随着高性能硬件及并行算法的不断发展,高效 RTM 技术较为成熟,借助 GPU 加速算法,已基本实现规模化生产应用。对于华南火成岩深层热储高精度成像,应采用该算法实现高精度成像,改善热储边界及伴生断裂的成像效果。

针对上述华南火成岩深层地热地震资料处理三大关键问题,本文提出了以保低频多方法联合去噪、断控层析速度建模及高效解析波场逆时偏移技术组合的解决方案,形成了一套面向复杂岩性和构造条件下的深层地热地震资料处理技术流程。实际资料测试表明,该技术流程能够有效提升深层热储边界、基底和复杂断裂系统的成像精度,为后续地热开发有利目标优选和井位部署提供可靠的数据基础。

1 深层地热地震预处理关键技术

华南火成岩地区多类型噪声发育(图 1),相干噪声和非相干噪声并存。这些噪声特征差异大,不

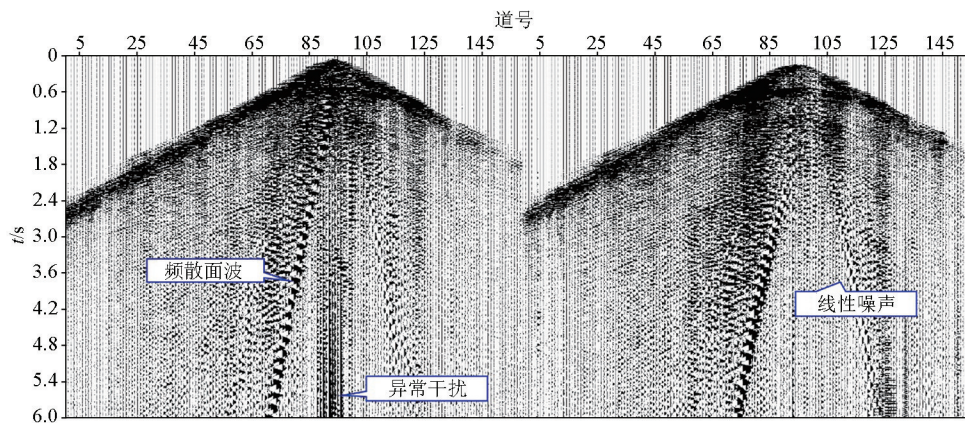


图 1 华南火成岩地区多类型噪声发育

Fig. 1 Kinds of noises exist in seismic data of Southern China

同区域噪声类型不同,且噪声在不同域的表现特征不同。首先针对浅层噪声,通常以相干噪声为主,常规处理流程压制效果较好,去噪效果较为理想。但对于深部储层,有效信号能量弱,波场较为复杂,噪声影响较大,常规去噪流程难以有效压制。根据探区的单炮记录对噪声类型进行详细分析,建立了针对性的叠前多域分步、分类、多方法联合迭代去噪处理流程(图2),有效压制了各类型噪声,逐级提高资料信噪比。

1.1 自适应频散面波压制技术

频散面波介于相干噪声与非相干噪声之间,能量强、频率低,且深度越深,影响范围越大,通常以扫把状形态分布于近偏移距。在频散面波压制方面,本文采用自适应频散面波压制技术,通过迭代计算的方式调整褶积因子,修改频散面波模型,使之接近真实面波,最后通过自适应相减的方式从单炮记录

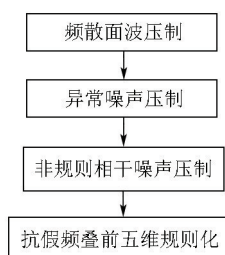


图2 噪声压制流程

Fig. 2 Workflow of seismic data denoising

中减去模拟的频散面波,达到面波压制的效果。基于华南火成岩高精度数据,建立 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的空间频散曲线场计算频散面波模型,通过自适应相减去除频散面波,去噪效果如图3所示,可以看出,该技术能够有效压制频散面波,同时最大限度地保护有效信号不受损失。相比于常规 FK 滤波方法,该方法对低频信号具有更好的保护作用,有利于深层热储基底高陡构造的精确成像。

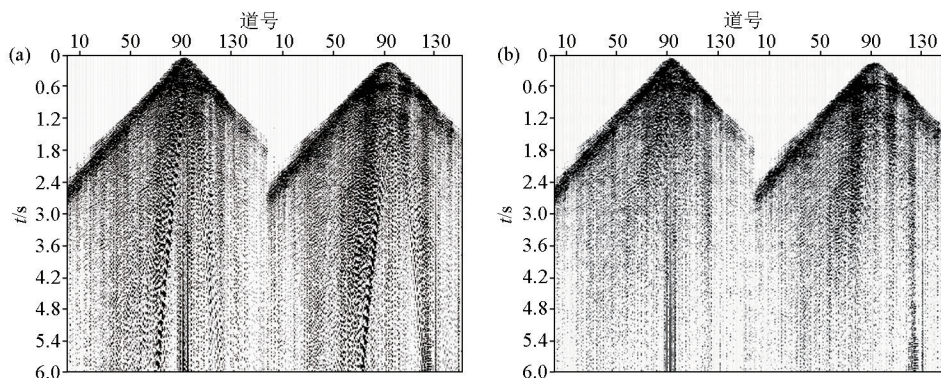


图3 频散面波压制前(a)与压制后(b)效果对比

Fig. 3 Comparison of surface wave noise before (a) and after (b) suppression

1.2 异常振幅噪声压制技术

面波压制后,单炮记录中还存在有异常道、野值干扰等非相干噪声,对地震成像影响较大。根据不同数据域中有效信号与噪声的差异,本文采用频率域噪声压制技术分别将数据分选到炮域、检波点域及 CMP 域进行异常振幅去噪,有效压制非相干噪

声,从而进一步提升去噪效果。该技术的关键是选取合理的时窗确定压噪阈值,从而保护有效信号,去除异常振幅类的非相干噪声,这里选取处理时窗为 $1\ 000\text{ ms}$,门槛值为 15,去噪效果如图4所示。显然,通过该技术处理后,异常振幅得到有效压制,信噪比显著提升。

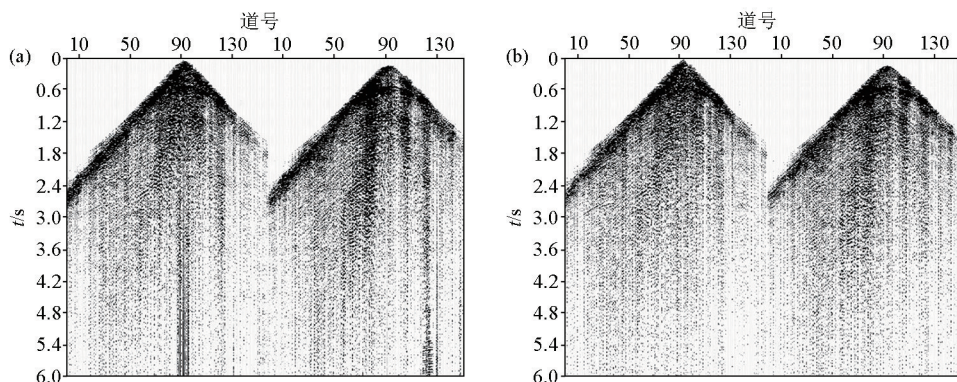


图4 异常振幅噪声压制前(a)与压制后(b)效果对比

Fig. 4 Comparison of abnormal amplitude noise before (a) and after (b) suppression

1.3 非规则相干噪声压制技术

在进行面波、非相干噪声压制后,还会存在部分非均匀线性干扰,这里采用非均匀线性噪声压制技术进一步提高数据的信噪比,改善数据品质。该技术基于不规则的炮点/检波点采集数据驱动,设计抗假频 F-X 滤波器获取地震道对应的线性噪声模型,通过匹配相减从叠前记录中去除噪声,分频压制线

性噪声。根据原始资料分析,这里选取的两组线性干扰速度区间分别为 $100 \sim 600 \text{ m/s}$ 及 $500 \sim 1\,000 \text{ m/s}$,滤波频率为 25 Hz ,有效信号保护的速度区间为 $1\,600 \sim 2\,000 \text{ m/s}$,去噪效果如图 5 所示。可以看出,该技术能有效压制残余的部分非均匀线性噪声,进一步改善了叠前数据品质,为后续深层热储成像提供了高品质数据。

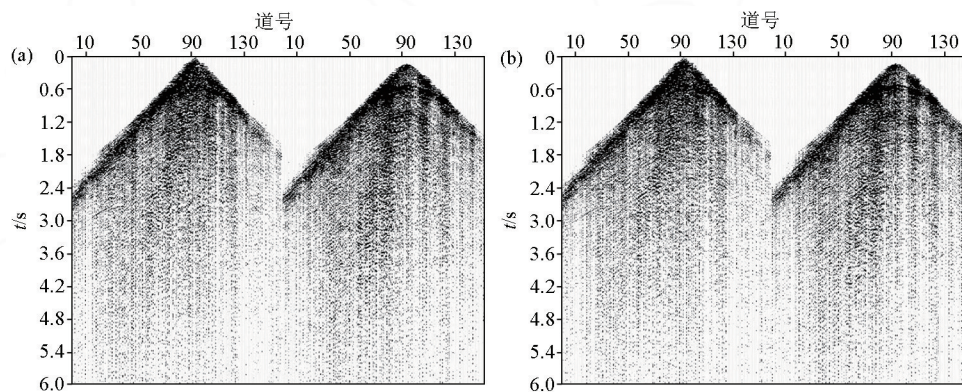


图 5 非规则相干噪声压制前 (a) 与压制后 (b) 效果对比

Fig. 5 Comparison of irregular coherent noise before (a) and after (b) suppression

1.4 叠前五维规则化技术

地震采集受地形和地表因素影响,炮点和检波点变观严重,数据在空间上不规则,容易产生空间假频等现象。对数据进行五维规则化处理后,不规则观测系统的炮检点归位到理论设计点位,能够有效防止空间假频现象,进一步提升数据信噪比。叠前五维规则化技术基于防假频傅里叶变换,在线域、点域、时间域、炮检距域、方位角域五维空间进行插值,通过对每一个频率依据最小视速度确定出重构数据的带宽,然后从不规则地震数据的空间傅里叶系数中估计出重构数据的空间傅里叶系数,将估计的傅里叶系数进行非规则傅里叶反变换,重构出目标观

测系统地震数据,达到规则化目的。该技术适用于深层热储复杂陡倾角数据,能够有效改善假频问题,解决变观引起的数据缺失,改善地震数据叠加及成像质量。在处理华南火成岩地震资料时,通过参数优选测试,最终确定时间方向插值时窗为 100 ms ,主测线和联络线方向插值时窗均为 12 m ,偏移距插值时窗为 $1\,000 \text{ m}$,方位角插值时窗为 180° 。图 6a、b 分别为叠前五维规则化处理前后的叠加效果对比,可以看出,经过五维规则化处理,信噪比进一步提升,高陡构造刻画更加清晰,叠加质量明显改善。

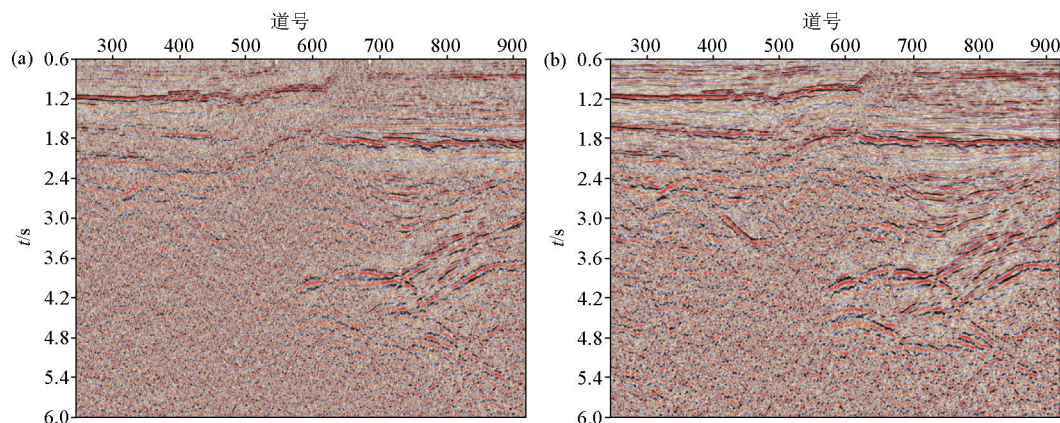


图 6 叠前五维规则化前 (a)、后 (b) 效果对比

Fig. 6 Comparison of matching pursuit Fourier interpolation before (a) and after (b) application

2 断控层析速度建模技术

针对华南火成岩局部高速异常及深层热储基底、断裂体速度建模难题,本文采用了断控层析速度建模技术,有效改善火成岩速度异常、热储基底及复杂断裂带的速度反演精度。

通常,深度域高斯束层析目标函数可以表示为:

$$S(m) = \|z^{\text{true}} - z^{\text{pick}}\|_2^2, \quad (1)$$

式中: $S(m)$ 表示速度模型空间下的目标函数; z^{true} 表示成像道集拉平时的真实成像深度; z^{pick} 表示目前尚未拉平的成像道集对应的拾取深度。断控层析速度建模技术通过成像道集深度差反投影到速度空间,实现速度反演,达到速度建模的目的。该技术对于大尺度构造速度建模效果较好,但对小尺度异常体及复杂断裂刻画精度不足。在此基础上,本文加入不等式层析正则化项及断控正则化项,通过利用测井速度约束和构造先验信息约束进一步提高了速度反演精度,实现了面向华南火成岩区的高精度速度建模。

首先,为进一步提高局部火成岩的反演精度,本文引入了不等式层析正则化技术,利用测井速度及地震相分布得到区域速度范围界限,实现对火山岩速度异常体的速度范围“软约束”,提高了局部火成岩速度建模精度:

$$S(m) = \|z^{\text{true}} - z^{\text{pick}}\|_2^2 + I(v_{\min} - v) + I(v - v_{\max}), \quad (2)$$

式中: $v_{\max}$ 、 $v_{\min}$ 分别是通过测井资料获得的该层段的速度最大、最小值; I 为对数分界函数,可以表示为

$$I(u) = \begin{cases} -\frac{1}{t} \lg(-u) & u < 0 \\ \infty & u > 0 \end{cases},$$

该项通过压缩反演零空间,实现更加精细的速度约束反演。

在此基础上,为进一步提高深层热储边界、复杂断裂等高陡构造的速度建模精度,这里引入断控算子进行先验信息约束,那么目标函数可以表示为

$$S(m) = \|z^{\text{true}} - z^{\text{pick}}\|_2^2 + I(v_{\min} - v) + I(v - v_{\max}) + \|F\Delta m\|_2^2, \quad (3)$$

式中: F 表示断控正则化算子,该算子通过引入断裂、基底边界等构造信息实现模型更新量 Δm 的先验约束。目前 F 有多种构建方式,本文采用最优路径寻优算法计算断控算子 F ,实现正则化约束^[17]。

利用式(3)即可实现针对深层热储成像的精细速度建模,该技术与常规深度域偏移速度建模流程基本一致,通过输入 CMP 道集进行叠前深度偏移,输出偏移剖面 and 偏移距域成像道集进行层析反演。区别在于该技术通过在反演过程中加入测井速度范围及构造等先验信息约束实现更加精细的速度建模,具体流程如下图 7 所示。

通过以上技术流程即可实现面向深层热储的高精度层析速度建模,该技术的关键在于准确地提取成像道集 RMO,从而获得 z^{true} 与 z^{pick} ;同时利用井资料及火成岩相信息构建不等式约束项 I ;利用成像数据体获取热储边界、断裂等信息计算断控正则化算子 F ,构建层析反演目标泛函数;最后通过共轭梯度法求解,得到精细速度模型。采用该流程经过四轮建模迭代完成靶区速度建模工作,成像道集基本拉平。

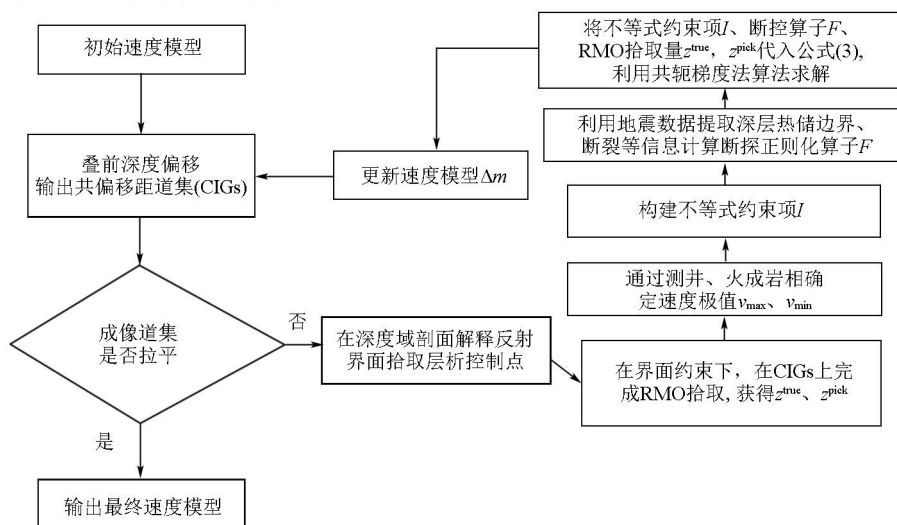
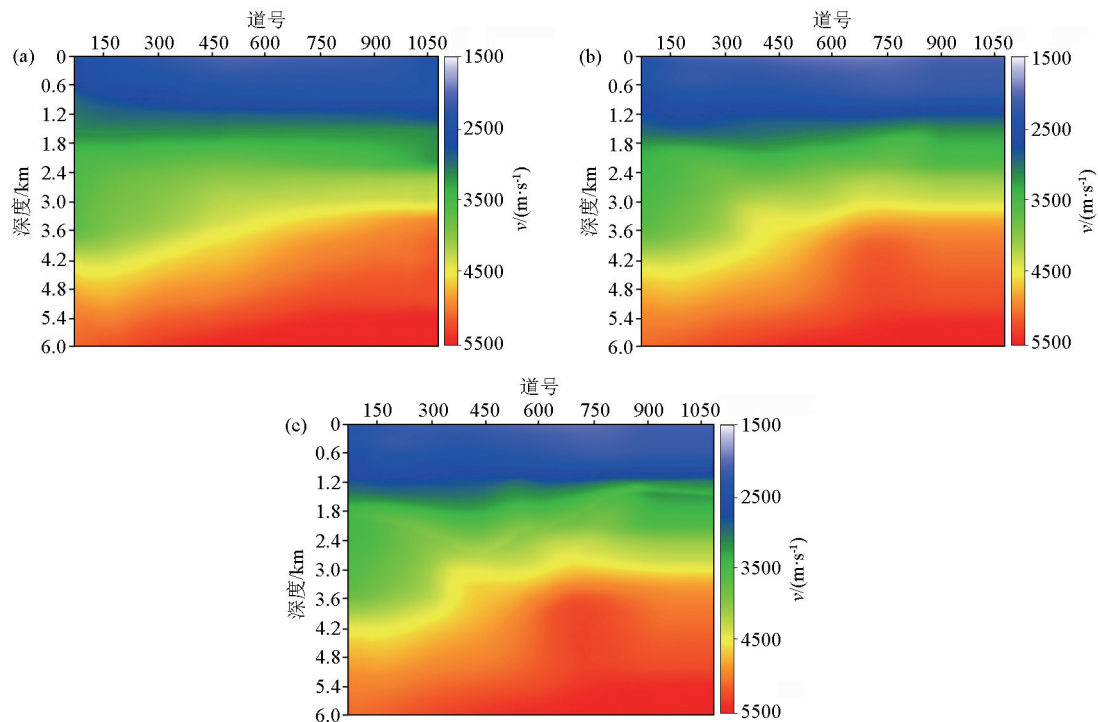


图 7 断控层析速度建模技术流程

Fig. 7 Workflow of fault-guided velocity tomography

本文采用时间域 RMS 速度,通过 DIX 公式转换为层速度,利用时深转化结合大平滑操作建立初始速度模型,见图 8a。通常初始速度准确性较差,成像结果相对不准确,构造信息不可靠,因此,第一轮层析反演(反演网格为 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$)使用常规无约束信息的速度反演;经过两轮反演可以得到相对准确的低频背景速度场,此时速度低波数信息较为可靠,但缺乏中波数信息,表现为反演结果整体较好,大尺度构造信息较为可靠,但细节不足,如图 8b 所示;因此,第三、四轮反演(反演网格为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$)采用断控层

析速度建模技术,通过引入大尺度层位、断裂等构造信息实施构造约束,对速度局部细节进行精细反演,得到精细速度模型,如图 8c 所示。本次建模采用无约束—大尺度构造约束—小尺度断控层析的建模策略,依据道集的拉平度判断每次更新的有效性,最终实现成像道集拉平(图 9),得到高精度速度模型。图 10a、b 分别是初始速度模型(图 8a)和最终速度模型(图 8c)的成像效果对比,可以看出,通过多轮迭代后,图 10b 中成像结果反射层位同相轴更加连续,断裂刻画更加清晰,基底成像质量明显提升。

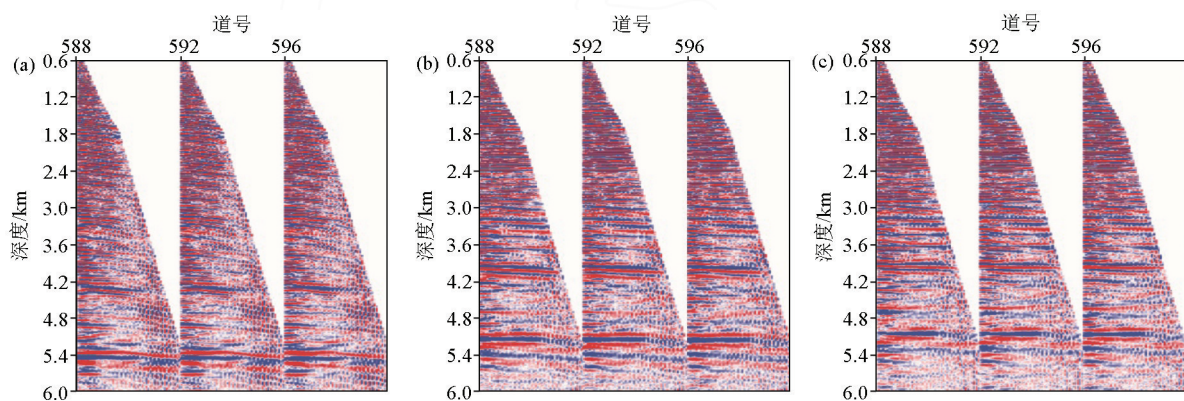


a—初始模型深度域速度;b—无约束大尺度层析速度;c—构造约束小尺度层析速度

a—initial velocity model;b—large-scale velocity update without fault constraint;c—small-scale velocity update with fault constraint

图 8 速度更新迭代结果对比

Fig. 8 Comparison of velocity iterative update

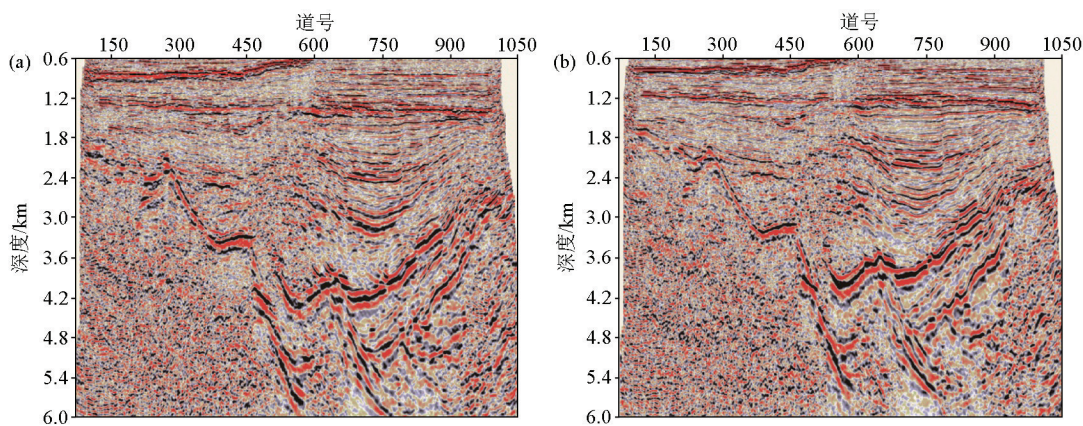


a—初始模型深度域成像道集;b—无约束大尺度层析成像道集;c—构造约束小尺度层析成像道集

a—CIGs of initial velocity model;b—CIGs of large-scale velocity without fault constraint;c—CIGs of small-scale velocity with fault constraint

图 9 迭代过程成像道集对比

Fig. 9 Comparison of CIGs corresponding to the iterative process



a—图 8a 速度模型对应的 PSDM 成像剖面;b—图 8c 最终速度模型对应的 PSDM 成像剖面
a—PSDM section of initial velocity model (Fig. 8a); b—PSDM section by updated velocity model (Fig. 8c)

图 10 初始模型与更新后模型对应的 PSDM 剖面对比

Fig. 10 Comparison of PSDM sections corresponding to the initial velocity and the updated velocity

3 保低频逆时偏移技术

逆时偏移是一种可以适用于陡倾角构造成像的双程波波动方程偏移技术。该技术通过多年的发展和实用化打磨,目前已基本实现实际资料的规模化应用。为了兼顾计算效率与成像质量,本文就华南火成岩深层热储成像问题,开展实用化的保低频逆时偏移方法研究及应用测试,采用解析波场隐式分解的成像条件,形成了高效稳定的保低频逆时偏移成像技术及流程,达到了保低频成像效果,显著改善了成像质量。

解析波场隐式分解的逆时偏移成像条件通常可以表示为:

$$I(x, y, z) = \int_0^{T_{\max}} [s_+(t, x, y, z) r_+(t, x, y, z)] dt, \quad (4)$$

式中: $s_+(t, x, y, z)$ 表示 t 时刻在位置 (x, y, z) 处炮点产生的正传播场, $r_+(t, x, y, z)$ 表示 t 时刻在位置 (x, y, z) 处检波点产生的反传播场, $T_{\max}$ 表示最大延拓时间。基于波场分解,正反传播场均可分解为上、下行波场的形式:

$$\begin{aligned} s_+(t, x, y, z) &= s_+^d(t, x, y, z) + s_+^u(t, x, y, z), \\ r_+(t, x, y, z) &= r_+^d(t, x, y, z) + r_+^u(t, x, y, z), \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $s_+^u(t, x, y, z)$ 、 $s_+^d(t, x, y, z)$ 分别表示炮点正传播场 $s_+(t, x, y, z)$ 分解的上、下行波场; $r_+^u(t, x, y, z)$ 、 $r_+^d(t, x, y, z)$ 分别表示检波点反传播场 $r_+(t, x, y, z)$ 分解的上、下行波场。那么根据逆时偏移成像条件,在成像过程中,仅保留传播方向相反的成像

结果,式(4)可以表示为

$$I(x, y, z) = \int_0^{T_{\max}} [s_+^u(t, x, y, z) r_+^d(t, x, y, z)] dt + \int_0^{T_{\max}} [s_+^d(t, x, y, z) r_+^u(t, x, y, z)] dt. \quad (6)$$

通过上式即可实现解析波场成像条件下的逆时偏移成像,相比于基于互相关成像条件的逆时偏移技术,该技术能有效避免同向波场相关带来的低频噪声,从而保护数据中的低频信息,达到保低频效果,这对于提高深层热储基底及复杂高陡断裂成像质量具有重要意义。基于同一套速度模型偏移,利用预处理后的单炮记录作为输入,采用最大偏移距为 8 000 m 的偏移孔径进行 RTM 成像,图 11 展示了克希霍夫 PSDM 成像结果与本文采用的保低频逆时偏移成像效果对比,可以看出,相比于克希霍夫偏移(图 11a),逆时偏移结果(图 11b)对断裂刻画更加清晰,断点干脆,整体成像信噪比提升,热储基底及内幕成像质量明显改善。

4 华南火成岩区实际处理效果

实际资料选自中国华南某火成岩发育区,该区资料浅中层沉积环境相对稳定,速度变化较小;深层波场复杂,信噪比较低,受陡倾角构造的影响,纵、横向速度变化大,速度建模及成像困难。

为解决火成岩区热储边界、断裂成像刻画难题,采用本文建立的地震成像技术流程(图 12)进行应用测试。

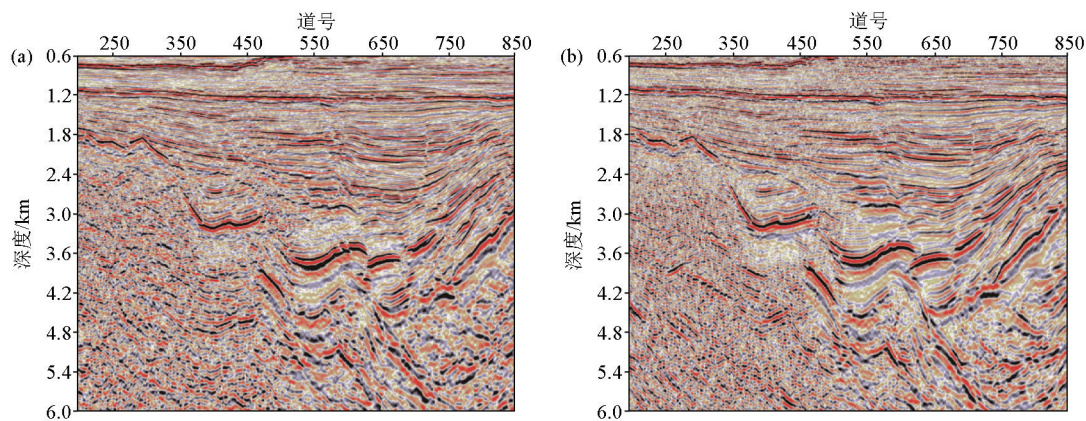


图 11 克希霍夫偏移(a)与保低频 RTM 偏移(b)效果对比

Fig. 11 Comparison of Kirchhoff migration(a) and RTM migration(b)

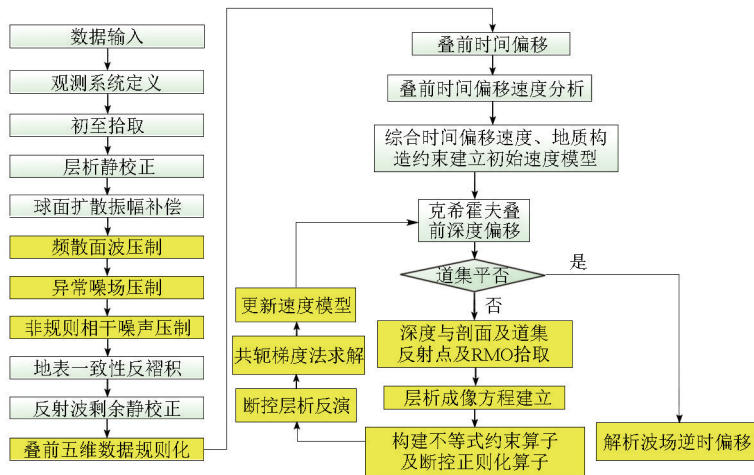


图 12 面向复杂岩性和构造条件下的深层地热水震资料处理关键技术流程(图中黄色位置为关键性技术)

Fig. 12 The key processing flow for deep geothermal imaging(the yellow position in the figure is the key technology)

图 13a 及 14a 是采用常规处理流程得到的最终成像结果,可以看出,面向油气勘探的常规处理流程在浅层碎屑岩储层成像效果较好,地层刻画较为清晰,连续性较好,但在深层断裂及基底成像质量较差,缺乏低频信息,高陡构造及复杂断裂系统刻画不足。图 13b 及 14b 是采用本文提出的针对性处理流

程得到的最终成像结果,相比于前期处理结果(图 13a、14a),本期处理以深层热储边界、基底及内部复杂断裂系统刻画为主要目标,成像结果能够更加精确地反映深层热储信息,深层热储边界(图 13b)及内幕细节(图 14b)成像质量明显改善,有利于后续地热储层的精细构造解释及圈闭落实。

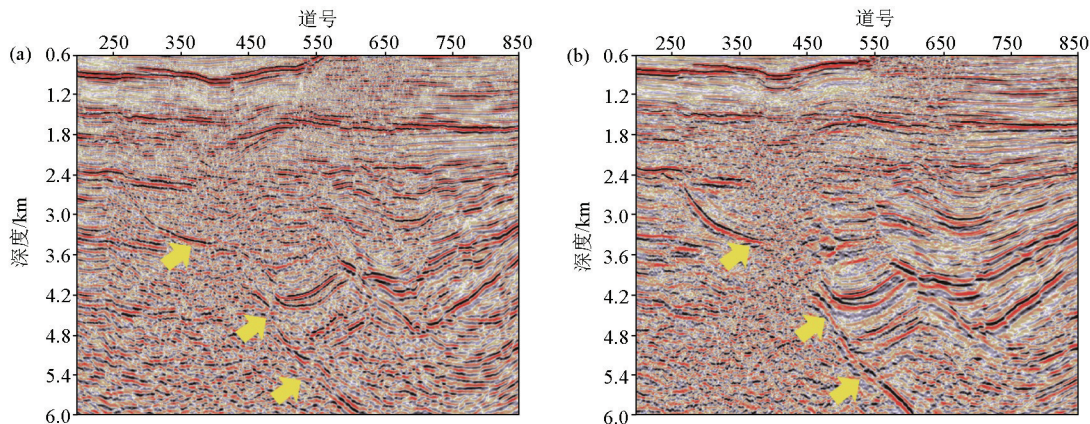


图 13 前期处理结果(a)与本期处理结果(b)基底边界成像效果对比

Fig. 13 Boundary imaging comparison of previous imaging results(a) and current imaging results(b)

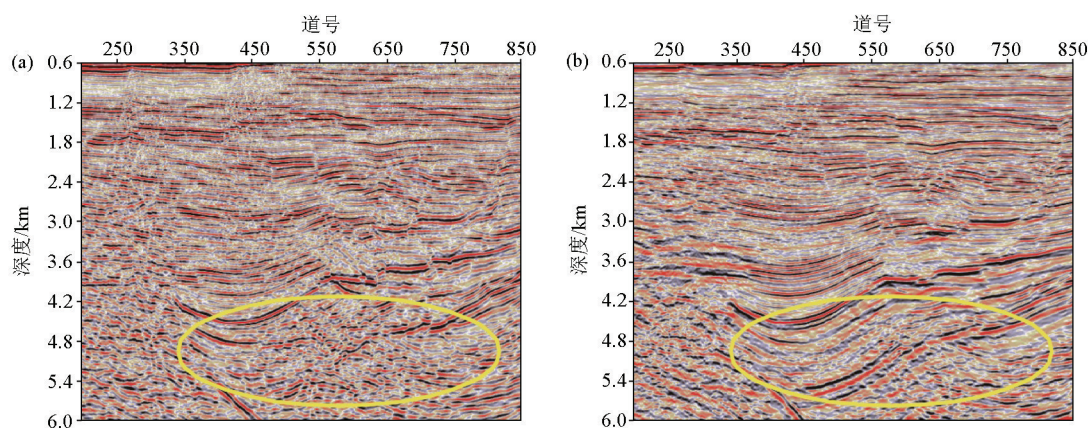


图 14 前期处理结果(a)与本期处理结果(b)基底内幕成像效果对比

Fig. 14 Basement insider imaging comparison of previous imaging results(a) and current imaging results(b)

5 结论

地震资料处理是一项复杂的系统工程。对于不同地质目标,应具体问题具体分析。面向华南火成岩深层地热勘探地震资料处理,本文围绕深层热储地震资料信噪比低、构造复杂、陡倾角发育几个关键问题,通过保低频联合去噪、断控速度建模及解析波场逆时偏移技术组合应用,建立了面向华南火成岩深层热储地震资料的针对性处理流程。实际处理效果显示了本文技术流程能够显著改善深层热储边界、内幕复杂断裂系统的成像质量,为后续热储刻画提供了高品质成像数据,具有较好的推广应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 滕吉文,司芾,庄庆祥,等. 福建陆缘壳幔异常结构与深部热储潜能分析[J]. 科学技术与工程,2017,17(17):6-38.
Teng J W, Si X, Zhuang Q X, et al. Abnormal structure of crust and mantle and analysis of deep thermal potential in Fujian continental margin[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(17): 6-38.
- [2] 张健,王蓓羽,唐显春,等. 华南陆缘高热流区的壳幔温度结构与动力学背景[J]. 地球物理学报,2018,61(10):3917-3932.
Zhang J, Wang B Y, Tang X C, et al. Temperature structure and dynamic background of crust and mantle beneath the high heat flow area of the South China continental margin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 3917-3932.
- [3] 王佳龙,邸兵叶,张宝松,等. 音频大地电磁法在地热勘查中的应用——以福建省宁化县黄泥桥地区为例[J]. 物探与化探, 2021, 45(3): 576-582.
Wang J L, Di B Y, Zhang B S, et al. The application of audio frequency magnetotelluric method to the geothermal exploration: A case study of Huangniqiao area, Ninghua County, Fujian Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3): 576-582.
- [4] 范艳霞,李海龙,张军龙,等. 东南沿海黄沙洞地热田地应力与控热构造研究[J]. 地球物理学报,2022,65(10):3944-3961.
Fan Y X, Li H L, Zhang J L, et al. Research on the in situ stress state and the geothermal-controlling structure of the Huangshadong Geothermal Field in the Southeast Coast of China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(10): 3944-3961.
- [5] Panea I, Negut A, Mocanu V. The relationship between the deep faults and the geothermal structures identified on the Moesian Platform territory [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Society of Exploration Geophysicists, 2011.
- [6] Saad O M, Chen Y K. Deep denoising autoencoder for seismic random noise attenuation [J]. Geophysics, 2020, 85(4): V367-V376.
- [7] Shan W J, Wang Y Q, Lu W K. ECA-UNet: Denoise seismic data by learning from traditional method [C]//First International Meeting for Applied Geoscience & Energy Expanded Abstracts. Denver, CO and virtual. Society of Exploration Geophysicists, 2021.
- [8] 石战战,庞溯,王元君,等. 基于 f-x 域时频非凸正则化低秩矩阵近似的共偏移距道集去噪方法[J]. 物探与化探, 2022, 46(6): 1444-1453.
Shi Z Z, Pang S, Wang Y J, et al. Random noise attenuation of common offset gathers by f-x low-rank matrix approximation with nonconvex regularization [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1444-1453.
- [9] 崔亚彤,王胜侯,蔡忠贤. 基于快速自适应非局部均值滤波的地震随机噪声压制方法[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1187-1195.
Cui Y T, Wang S H, Cai Z X. Seismic random noise attenuation method based on the fast adaptive non-local means filtering algorithm [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1187-1195.
- [10] 杜耀斌,曾庆才. 塔里木盆地河南探区地震资料处理方法研究[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(1): 53-55.
Du Y B, Zeng Q C. Study of the methods for seismic data processing in Henan prospecting area in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(1): 53-55.
- [11] 徐颖,刘晨,吕秋玲,等. 多域组合去噪技术在塔中奥陶系低信噪比资料处理中的应用[J]. 石油物探, 2015, 54(2): 172-179, 196.
Xu Y, Liu C, Lyu Q L, et al. Application of multi-domain composite

- denoising technology for the processing of Ordovician low SNR seismic data in Tazhong Area[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(2): 172–179, 196.
- [12] 王立歆, 李海英, 李弘, 等. 复杂地质条件下超深层碳酸盐岩断控缝洞体成像及预测技术[J]. *石油物探*, 2022, 61(5): 865–875.
- Wang L X, Li H Y, Li H, et al. Imaging and prediction technology of fault-karst reservoirs in ultra-deep carbonate rocks under complex geological conditions[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(5): 865–875.
- [13] Cai J X, Zheng H. Gaussian beam velocity tomography based on azimuth-opening angle domain common imaging gathers[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2019, 16(5): 992–1008.
- [14] Karastathis V K, Papoulia J, Di Fiore B, et al. Deep structure investigations of the geothermal field of the North Euboean Gulf, Greece, using 3-D local earthquake tomography and Curie Point Depth analysis[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2011, 206(3/4): 106–120.
- [15] Toksoz M N. Geothermal reservoir characterization using passive seismic tomography: A case history [C]//Istanbul: International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition, Society of Exploration Geophysicists and the Chamber of Geophysical Engineers of Turkey, 2012: 1–4.
- [16] 张在金, 陈可洋, 范兴才, 等. 井控与构造约束条件下的网格层析速度建模技术及应用[J]. *石油物探*, 2020, 59(2): 208–217.
- Zhang Z J, Chen K Y, Fan X C, et al. Seismic wave velocity modeling through grid tomography inversion constrained by well logging and structural modeling[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(2): 208–217.
- [17] 郑浩, 蔡杰雄, 王静波. 基于构造导向滤波的高斯束层析速度建模方法及其应用[J]. *物探与化探*, 2020, 44(2): 372–380.
- Zheng H, Cai J X, Wang J B. Gaussian beam tomography with structure-filtering and its applications[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(2): 372–380.
- [18] 郑浩, 刘俊辰, 万城程. 基于断裂属性约束的深度域层析速度建模技术[J]. *石油物探*, 2021, 60(4): 556–564, 573.
- Zheng H, Liu J C, Wan C C. Fault-constrained velocity tomography in the depth domain[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(4): 556–564, 573.
- [19] 刘守伟, 王华忠, 陈生昌, 等. 三维逆时偏移 GPU/CPU 机群实现方案研究[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(10): 3487–3496.
- Liu S W, Wang H Z, Chen S C, et al. Implementation strategy of 3D reverse time migration on GPU/CPU clusters[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(10): 3487–3496.
- [20] 张慧宇, 王立歆, 孔祥宁, 等. 适于大规模数据的逆时偏移实现方案[J]. *物探与化探*, 2015, 39(5): 978–984.
- Zhang H Y, Wang L X, Kong X N, et al. The implementation scheme of reverse-time migration for mass seismic data[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(5): 978–984.
- [21] 刘立民, 刘定进, 李博. 起伏地表谱元逆时偏移方法[J]. *石油物探*, 2021, 60(2): 312–322.
- Liu L M, Liu D J, Li B. Reverse time migration for irregular topography based on spectral element method[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(2): 312–322.

A key seismic processing technique for deep geothermal exploration in igneous province in southern China

ZHENG Hao, CUI Yue, XU Lu, QI Peng

(SINOPEC Geophysical Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: Southern China's igneous province, as a significant geothermal resource area in China, possesses abundant geothermal resources owing to its favorable accumulation conditions for medium-to-high temperature geothermal resources. However, gravity-magnetic-magnetotelluric exploration methods fail to sufficiently characterize the formation structures, geothermal reservoir boundaries, and the spatial distribution of geothermal reservoirs within the concealed fault zones, posing challenges in exploring deep geothermal resources. Hence, this study delved into the key seismic processing techniques for deep geothermal exploration based on 3D seismic exploration data, establishing a targeted processing flow. First, the problem of low signal-to-noise ratios in deep layers was solved through fine-scale preprocessing for deep geothermal reservoirs, laying a solid data foundation. Then, a high-precision velocity model was built via fault-guided tomography velocity modeling. Finally, the high-precision imaging of deep geothermal reservoirs was achieved using the amplitude-preserving low-frequency reverse-time migration technology, thus improving the imaging quality and the characterization accuracy of geothermal reservoir spaces and high-steep boundaries. Field data-based testing verified the validity and practicability of the processing flow.

Key words: deep geothermal exploration; geothermal reservoir boundary; preprocessing; velocity modeling; high-precision imaging

(本文编辑:叶佩)