

doi: 10.12029/gc20231213002

连晟, 程正璞, 吴俊军, 董金伟, 田蒲源. 2025. 花岗岩型干热岩储层裂缝刻画的三维地震属性分析技术研究[J]. 中国地质, 52(2): 452–461.
Lian Sheng, Cheng Zhengpu, Wu Junjun, Dong Jinwei, Tian Puyuan. 2025. Research on three-dimensional seismic attribute fusion technology for characterizing fractures in granite geothermal reservoirs[J]. Geology in China, 52(2): 452–461(in Chinese with English abstract).

花岗岩型干热岩储层裂缝刻画的三维地震属性分析 技术研究

连晟^{1,2}, 程正璞^{1,2}, 吴俊军³, 董金伟⁴, 田蒲源^{1,2}

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300304; 2. 天津地热资源勘查开发中心, 天津 300300; 3. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 河北 涿州 072750; 4. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司辽河物探分公司, 辽宁 盘锦 124010)

摘要:【研究目的】花岗岩型干热岩储层中天然裂缝的发育特征对增强型地热系统(EGS)工程中钻孔部署和开采方案确定至关重要。【研究方法】本文旨在通过高精度的地震资料和属性特征分析方法, 对花岗岩储层中天然裂缝的特征、空间分布进行预测, 为 EGS 工程施工提供科学依据。本文利用宽频带、宽角度、高密度采样的三维地震数据, 采用构造导向滤波和多窗口倾角扫描等处理方法, 这些技术的应用提高了地震资料的信噪比, 进一步优化了花岗岩内幕探测效果。同时, 本文还结合多方位角约束的地震属性体、最大似然体、相干体、曲率体、方差体和蚂蚁体等三维地震属性, 对裂缝簇的空间分布密度进行了预测。【研究结果】通过综合属性分析认为研究区花岗岩型干热岩储层主要发育北东向和北西向裂缝的规律, 该规律与钻孔成像测井结果高度吻合。【结论】通过高精度的地震资料和属性特征分析方法, 成功预测了花岗岩型干热岩储层中天然裂缝的特征和空间分布, 为 EGS 工程施工中的裂隙探测、钻孔部署和开采方案确定提供了重要依据。

关 键 词: 三维地震; 地震属性; 花岗岩裂隙; 增强型地热系统; 干热岩; 地热地质调查工程

创 新 点: 利用高精度的地震资料和属性特征分析方法, 对花岗岩型干热岩储层中天然裂缝的特征进行了研究, 预测出其空间分布, 可作为 EGS 工程施工中钻孔部署和开采方案确定的依据。

中图分类号: P631 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0452-10

Research on three-dimensional seismic attribute fusion technology for characterizing fractures in granite geothermal reservoirs

LIAN Sheng^{1,2}, CHENG Zhengpu^{1,2}, WU Junjun³, DONG Jinwei⁴, TIAN Puyuan^{1,2}

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin 300304, China; 2. Tianjin Engineering Center of Geothermal Resources Exploration and Development, Tianjin 300300, China; 3. BGP INC., China National Petroleum Corporation, Zuozhou 072750, Hebei, China; 4. Liaohe Geophysical Exploration Company Branch of BGP CNPC, Panjin 124010, Liaoning, China)

Abstract: This paper is the result of geothermal geological survey engineering.

收稿日期: 2023-12-13; 改回日期: 2024-02-25

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20211336、DD20230018)资助。

作者简介: 连晟, 男, 1985 年生, 高级工程师, 从事水文地球物理、地热地球物理勘查技术应用与研究; E-mail: liansheng@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 程正璞, 男, 1990 年生, 工程师, 从事地热地球物理勘查与研究工作; E-mail: czp1990@126.com。

[Objective] It is necessary to predict the characteristics, spatial distribution and density of natural fractures in granite reservoirs using high-precision seismic data and feature analysis methods, which provide scientific evidence for the construction of Enhanced Geothermal System (EGS). **[Methods]** This study adopted advanced 3D seismic techniques, including wideband, wide-angle, high-density sampling, as well as advanced processing methods such as structural-oriented filtering and multi-window dip scanning. The application of these techniques greatly improved the signal-to-noise ratio of seismic data, further optimizing the detection effect of the granite interior. At the same time, this study also combines 3D seismic attributes such as seismic attribute volume, maximum likelihood volume, coherence volume, curvature volume, variance volume, and ant volume with multi-azimuth constraints to accurately predict the spatial distribution density of fracture clusters. **[Results]** Through comprehensive attribute analysis and drilling imaging logging results, we reveal the regularity of the development of northeast and northwest fractures in granite-type hot dry rock reservoirs. These results are highly consistent with drilling imaging logging results, further verifying the accuracy and reliability of this research method. **[Conclusions]** This study successfully predicted the characteristics, spatial distribution, and density of natural fractures in granite-type hot dry rock reservoirs through high-precision seismic data and feature analysis methods. This method provides important evidence for fracture detection, drilling deployment, and mining plan determination in EGS engineering construction.

Key words: three-dimensional seismic; seismic attributes; granite fractures; enhanced geothermal systems; hot dry rock; geothermal geological survey engineering

Highlights: An investigation into the characteristics of natural fractures within granite-type hot dry rock reservoirs was conducted using high-precision seismic data and characteristic analysis techniques. The spatial distribution and density of natural fractures were predicted, serving as a valuable foundation for drilling deployment and mining scheme determination in Enhanced Geothermal System (EGS) engineering construction.

About the first author: LIAN Sheng, male, born in 1985, senior engineer, engaged in the research of hydrogeophysics, geothermal geophysics; E-mail: liansheng@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: CHENG Zhengpu, male, born in 1990, engineer, engaged in the research of geothermal geophysics; E-mail: czp1990@126.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20211336, No.DD20230018).

1 引言

现今,世界能源危机和环境问题日益严峻,发展储藏量大且环境友好的新型替代能源逐渐受到各国政府和科学家的重视。可以有效开发的水热型地热资源仅占已探明地热资源中的 10% 左右,更多的地热能储存于干热岩型地热资源中(汪集旸等,2012; 许天福等,2018; 王晓丽等,2024)。作为干热岩型地热资源的有效利用手段,增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)的开发实施需要对低孔、低渗的岩石进行改造(多吉和王贵玲,2022)。作为中国首例 EGS 工程,在青海省共和县恰卜恰镇进行的 EGS 工程需要针对花岗岩型干热岩储层进行人工造储,而花岗岩储层内部裂缝的分布规律在场地评价中扮演着尤为重要的角色(姜晓宇等,2020; Johnson et al., 2021)。干热岩储层中的

裂隙从形成原因上可分为天然裂隙和诱发裂隙两种类型,干热岩储层改造阶段所形成的裂隙系统即为诱发裂隙,岩石物理实验表明压裂改造形成的诱发裂隙是在天然裂隙的基础上,受现今应力特征所控制,复杂缝网的形成与天然裂隙发育与否有较大的关联,施工中应在天然裂隙较丰富的层段开展水力压裂,便于实现复杂裂隙网络(周舟等,2019; 王璜等,2020; 刘德民等,2021)。天然裂隙从发育规模上可以分为大尺度断裂带和小尺度裂缝,EGS 工程井位部署应选择小尺度裂缝发育的区域,同时还要尽可能避开大尺度断裂带,防止导致断层活化,诱发地震(张森琦等,2019)。花岗岩型干热岩储层内部裂隙系统分布规律复杂,裂缝的研究应当贯穿于干热岩开发的整个过程中(张雨晴等,2016; Johnson et al., 2021; 解经宇等,2022)。因此,如何准确刻画花岗岩储层中的裂隙系统成为 EGS 场地优选、压裂作业实施以及开发钻孔合理部署的关键(汪集旸

等, 2012; 刘国平等, 2016; 李振宇等, 2022; 谢紫霄等, 2022)。花岗岩储层裂隙发育影响人工压裂造储裂缝延伸, 是影响 EGS 工程规模化开发的主要因素, 也是一项具有挑战性的难题(张盛生等, 2019)。

为推进深部热能(干热岩)开发利用产业化, 中国地质调查局组织实施了“干热岩资源调查与勘查试点示范工程”, 该工程在青海共和盆地实现了干热岩试验性发电(Zhang et al., 2022), 期间应用三维地震属性融合技术成功地对花岗岩型干热岩裂缝进行了评价, 本文分析其应用效果, 以期为花岗岩型干热岩储层裂缝探测提供参考。

2 研究区概况

共和盆地处于昆仑山脉与秦岭山脉之间, 是古近系初形成的呈北西向展布的菱形断陷盆地, 该盆地属于东昆仑、西秦岭造山带接合部位。按地力学划分, 属昆仑—秦岭纬向构造带与河西系构造复合的沉降带(图 1, 张森琦等, 2020)。盆地周边均受山前深大断裂的控制, 北侧是青海南山、拉脊山断褶隆起带, 南侧是河卡南山、巴吉山断褶隆起带, 西为鄂拉山构造岩浆岩带, 东为扎马山断褶隆起带, 中间被瓦里贡山构造岩浆岩隆起带分隔出共和、贵德两盆地(李振宇等, 2022)。挽近期构造活

动强烈, 山体隆升, 盆地大幅度下降, 沉积了较厚的第四系冲洪积、河湖相堆积物和新近系、古近系湖相堆积物(图 1, 张森琦等, 2018)。工作区内三叠系广泛出露在盆地周边隆起带, 组成盆地基底, 中—下三叠统为海相沉积, 上三叠统为陆相沉积。盆地内侵入岩以花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩和斑状花岗岩等为主, 侵入于中—下三叠统, 与三叠系共同构成褶皱基底(张森琦等, 2019)。盆地内发育三级湖相阶地和多级黄河阶地, 说明随青藏高原隆升, 盆地一直处于间歇性抬升状态(唐显春等, 2020)。共和盆地内具有局部高大地热流及高地温特征, 在盆缘边界断裂带有多处温泉出露, 已在恰卜恰及扎仓寺等地多口钻井钻遇盆地基底——印支期花岗岩类干热岩。盆地内主要的地热储层岩性为印支期—燕山期花岗闪长岩、二长花岗岩等(Gao et al., 2018)。

研究区位于共和盆地东北部, 基础地质研究认为区内快速抬升减压造成的深部部分熔融体持续为干热岩体供热, 盆地深大断裂沟通热储, 形成局部对流型热循环通道, 巨厚的放射性花岗岩体起到增温和传热导热作用, 上部覆盖约 2000 m 厚的低热导率古近系以来的沉积盖层起到保温聚热作用(张森琦等, 2021)。

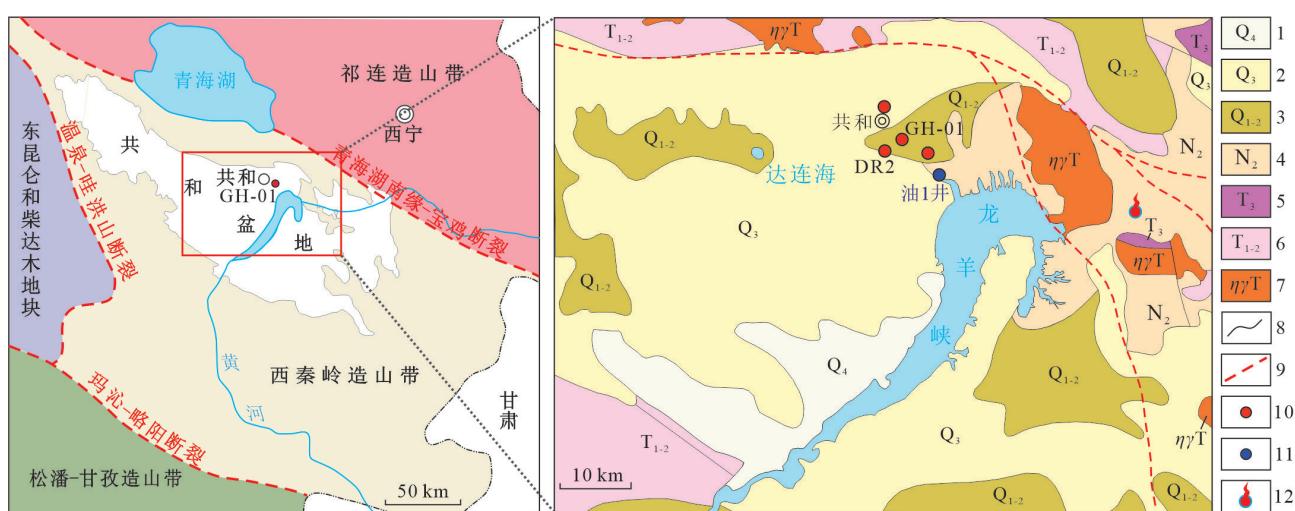


图 1 共和盆地及周边地质概况图(据张森琦等, 2018)

1—全新统; 2—上更新统; 3—中—下更新统; 4—上新统; 5—上三叠统; 6—中—下三叠统; 7—印支期花岗岩体; 8—地层界线; 9—断裂; 10—地热钻孔; 11—油井; 12—热泉

Fig.1 Geological map of the Gonghe Basin and surrounding areas (after Zhang Senqi et al., 2018)

1-Holocene; 2-Upper Pleistocene; 3-Middle-Lower Pleistocene; 4-Pliocene; 5-Upper Triassic; 6-Middle-Lower Triassic; 7-Indosinian granitic rocks; 8-Stratigraphic boundary; 9-Fault; 10-Geothermal drilling hole; 11-Oil well; 12-Hot spring

3 研究思路

青海共和干热岩试采场地在选址阶段开展了重力、磁法、大地电磁和深反射地震剖面探测等多种地球物理勘查手段, 明确了共和盆地结构特征, 优选出 EGS 工程试采场地, 该场地位于盆地中西部, 远离盆地边缘大断裂。其中地震 02 测线(图 2)显示研究区周边多条断裂穿花岗岩基底, 断层性质以西倾逆断层为主。花岗岩顶面构造整体呈西低东高的构造形态。从沉积岩层的发育情况看, 西部沉积厚度较大, 东部厚度较薄, 自西向东地层呈楔形。为进一步明确 EGS 试采场地范围内裂缝发育特征, 项目组开展了宽频带、宽角度、高密度采样的三维地震工作。三维地震工作区面积 4 km^2 , 覆盖次数达到 238 次以上, 面元大小 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, 道距 20 m, 激发点距 10 m 或 20 m, 横纵比 0.77; 数据处理软件使用东方地球物理公司的 GEOEAST。

由于花岗岩型干热岩储层位于近 2000 m 厚的沉积盖层下, 花岗岩地层内幕杂乱地震波杂乱反射, 因此提取其内部裂缝带发育规律难度较大。故本文首先使用构造导向滤波和多窗口倾角扫描技术进一步提升三维地震资料的信噪比(Nguyen et al., 2014; 范存辉, 2015; 谢舟等, 2017)。通过多方位角约束的地震属性技术对断裂分布展开预测, 针对裂缝簇, 叠前应用最大似然体进行属性预测, 叠后采取相干体、曲率体、方差体等三维地震属性预测裂缝簇的空间分布密度(Khair et al., 2015)。最后, 利用多属性融合技术实现了多种分析结果的对比, 最终实现对裂缝发育带的预测。

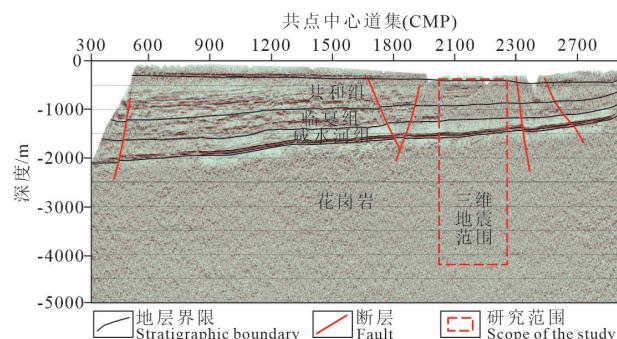


图 2 研究区二维地震剖面结果
Fig.2 Result of 2D seismic profile in the study area

4 地震属性裂缝预测技术

4.1 多窗口倾角扫描

多窗口倾角扫描技术通过搜索各点不同的倾角窗口, 得到地震数据的倾角数据体, 局部反射界面的成像效果优化, 提高了倾角和方位角的计算精度(Marfert et al., 1998; 印兴耀等, 2014)。多窗口倾角扫描技术还可利用特定方位角进行倾角扫描, 更好地识别特定方位走向的断裂, 用于估算局部反射层的不连续性, 有助于微小断层的解译(应玉双, 2016)。研究区内三维地震资料的有效扫描倾角为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 以 15° 为间隔将三维地震数据体计算生成倾角数据体, 由于研究区多发育北西向和北东向断裂, 垂直于断裂走向进行倾角扫描能够更清楚地识别该断裂, 最终通过对比发现, 30° 方位角数据体对断裂的反映更为清晰(图 3)。

4.2 多方位角相干技术

多方位角相干技术利用地震波在不同方向传播时的差异性, 通过方向滤波和相干性分析, 提取具有特定方向和频率特征的地震信号, 可以有效地提高地震数据的分辨率和信噪比(Bahorich and Farmer, 1995; 刘传虎, 2001)。将多窗口倾角扫描的系列结果进行相干处理, 形成多方位角相干数据体。在地震解译基础上, 对方位角相干数据体提取沿花岗岩顶界面相干切片, 勘查结果(图 4)显示预测的裂隙带展布与构造解译的类型发育带方向基本一致, 研究区内大断裂并不发育。

4.3 构造导向滤波

由于花岗岩界面与上覆沉积岩有较大的波阻抗差异, 使花岗岩顶面形成了一个地震波反射信号遮挡面, 对地震反射信号有屏蔽作用, 使得花岗岩内幕反射信号变弱, 反射地震剖面受噪声影响较大, 需要通过解释性处理, 降低噪音影响, 突出裂缝信息, 以达到提高裂缝预测精度的目的。构造导向滤波是应用效果较好的预处理方法之一, 它在分析同相轴的延伸方向及变化点(断点)的基础上, 沿地震同相轴进行平滑, 平滑操作不跨越断点, 能够使断点间的同相轴变得更加连续, 同时使断点显得更加突出, 十分有利于裂缝预测。原始地震资料虽然能够反映一些小断裂或者裂缝(图 5a), 但由于地震有效信号弱, 断点并不清晰。根据该区构造特征选

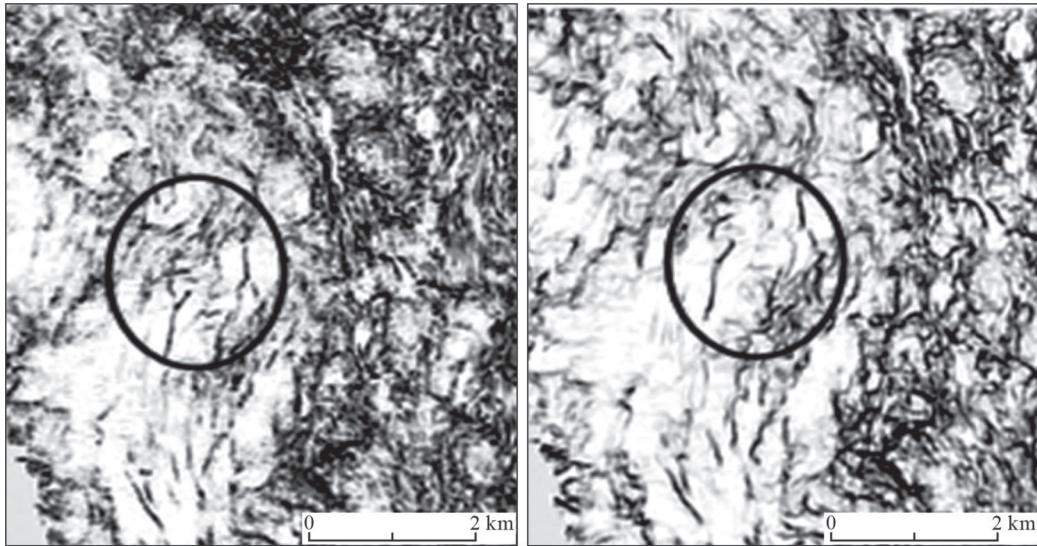


图 3 基于多倾角窗口扫描前后计算的相干时间切片(据应玉双, 2016)

Fig.3 Coherent time slices computed before and after multi-window inclination scanning (after Ying Yushuang, 2016)

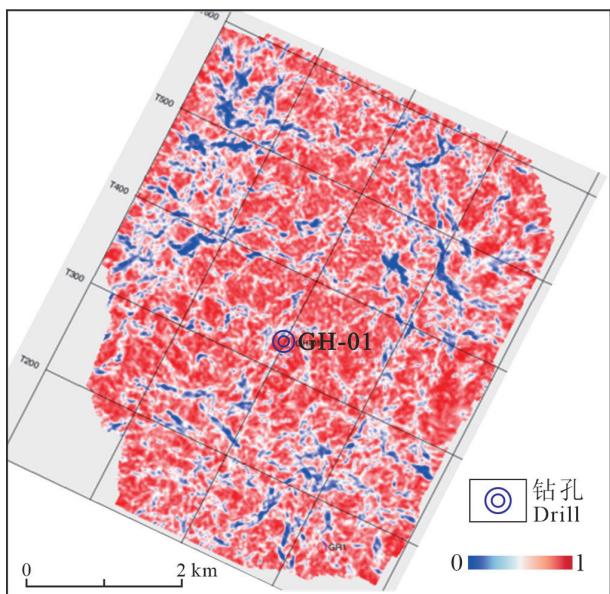


图 4 多方位角相干体属性切片图

Fig.4 Sliced image of multi-azimuth coherence volume attribute

择合理的参数进行构造导向滤波, 得到如图 5b 所示的地震剖面, 滤波后地震剖面断点变得更加清晰、干脆, 有利于裂缝预测。

4.4 锐化曲率体属性

地震曲率体属性通过计算层面的弯曲程度定量裂缝产生的可能性, 作为一种常规手段在裂缝发育区预测应用较为广泛(Roberts, 2001; 王雷等, 2010)。本研究在计算曲率体的基础上, 利用曲率锐化技

术, 将构造导向滤波后的地震数据体先计算传统曲率体, 在传统曲率体的基础上利用锐化手段生成新的高精度锐化曲率属性体。通过曲率锐化不但能保持与传统曲率体预测的裂缝展布规律一致, 还能更清晰地识别小断裂。从锐化前后的对比结果中可见(图 6): 锐化后的属性切片对于大断裂及破碎带的整体平面展布是相似的, 但是对于小尺度裂缝的预测更为丰富和清晰。裂缝发育带曲率值较大(红色), 研究区发育有高曲率值的裂缝, 裂缝与断裂带走向基本一致, 沿北东和北西走向呈条带状分布。曲率体对花岗岩顶界面处裂缝发育带准确度较高, 花岗岩体内部裂缝发育带需要结合其他属性才能够获得。

4.5 裂隙玫瑰图分析

裂缝玫瑰图分析方法常用来描述特定线状特征的方位分布, 便于直观分析裂隙分布规律, 通过在层切片上选取主测线和联络测线组成的网格化矩形分析时窗来产生玫瑰分布图。在每个时窗内, 将每个样点根据其方位最小曲率映射到玫瑰图上的花瓣上, 然后相加并按比例形成玫瑰图, 最终成为了玫瑰图数据体。每个玫瑰分布值均位于原始数据分析时窗的中心位置, 这样就形成了表达裂缝分布的属性体, 显示裂缝分布的密度和方位。分析结果(图 7)显示, 研究区内裂缝方向以北东向和北西向为主, 与 GH-01 井钻井揭示的裂缝方向一致。玫瑰图属性预测的裂缝发育区范围与

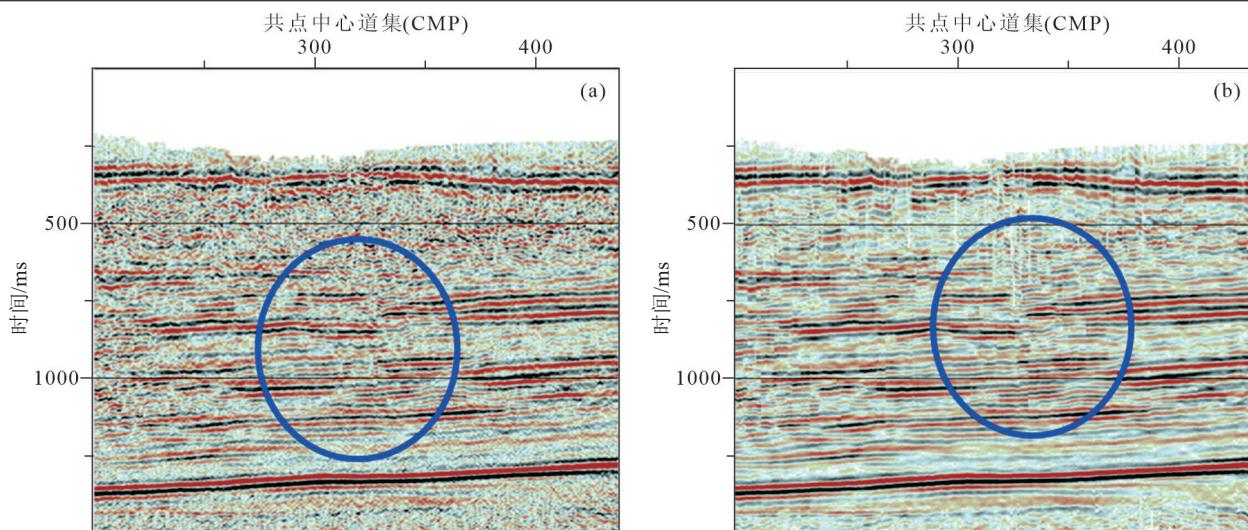


图 5 构造导向滤波前后对比图(a, 原始地震数据体, b, 构造导向滤波后数据体)

Fig.5 Comparison of before and after structural-oriented filtering (a, original seismic data; b, seismic data after structural-oriented filtering)

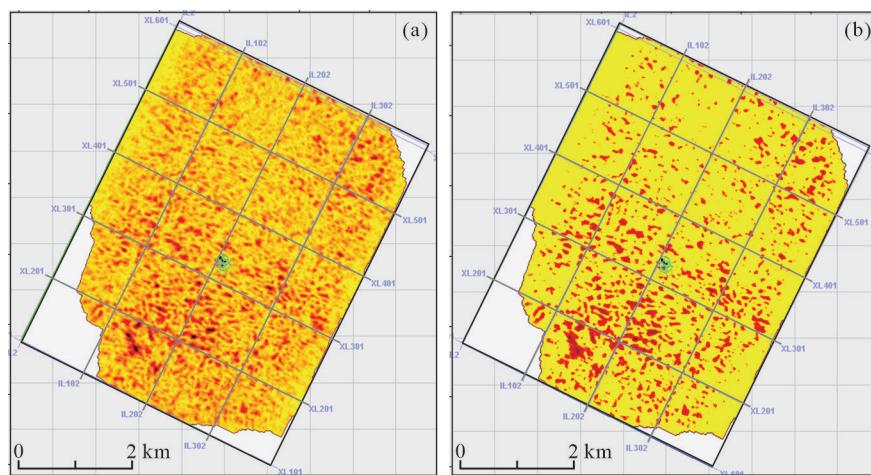


图 6 曲率体锐化前后对比图

Fig.6 Comparison diagram of curvature body of before and after sharpening contrast

曲率体、蚂蚁追踪以及相干体属性具有相似的特征, 在裂缝发育区玫瑰图具有明显的裂缝发育方向; 在裂缝不发育区, 玫瑰图没有明确的裂缝发育方向。

4.6 属性融合技术

属性融合技术就是利用数学运算把多种属性结合在一起, 实现在同一色板模式下, 同时显示多种属性的功能。以多方位角相干体和曲率锐化体成果按等比例关系属性融合(图 8), 把单属性对于断裂带和裂缝型储层的多解性降低, 提高研究区的断裂识别精度。

5 讨 论

共和盆地花岗岩干热岩储层裂缝的发育呈现非均质特征(王璜等, 2020), 需要应用针对性的三维地震分析技术, 以提升对裂缝发育带的刻画效果。本文利用构造导向滤波和多窗口倾角扫描技术, 提高了地震资料的信噪比; 通过相干体、锐化曲率体、裂隙玫瑰体等多种三维地震属性, 预测了裂缝的空间分布。

多窗口倾角扫描技术是干热岩储层裂隙刻画中重要的数据处理方法, 在压制地震噪声的同时,

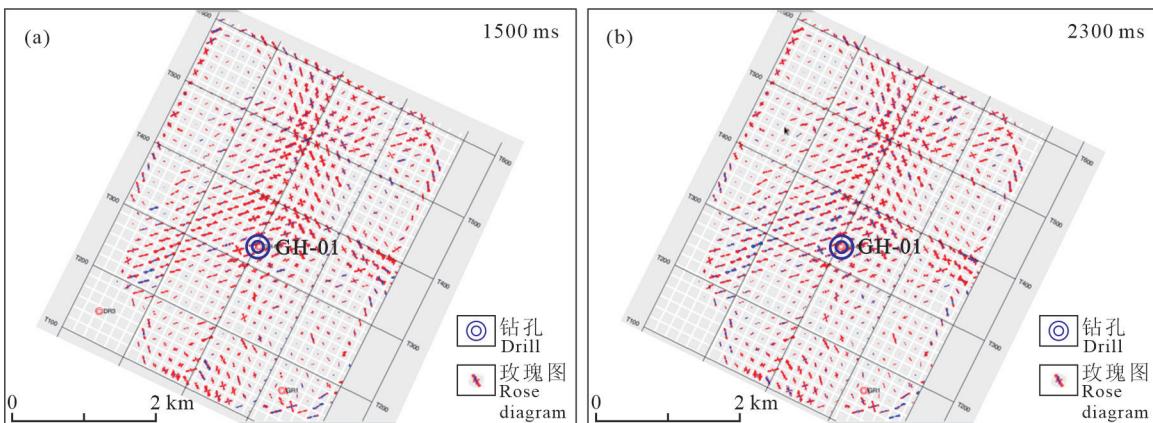


图 7 玫瑰图 1500 ms 和 2300 ms 时间切片图
Fig.7 Rose diagrams of time slice images at 1500 ms and 2300 ms

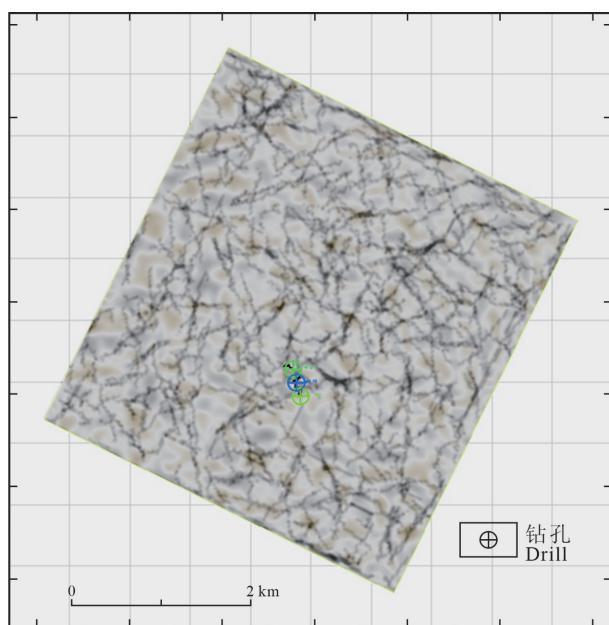


图 8 花岗岩顶面沿层曲率与相干体属性融合成果图
Fig.8 Fusion result map of the top surface of granite along the layer curvature and coherence attribute

有效保留了反射结构的边缘信息。通过对比不同属性体的预测结果可知,相干体属性对较大尺度的裂缝发育带有良好的刻画效果,但受限于算法精度,不能刻画裂缝发育带内部结构及中小尺度的裂缝发育区;曲率体属性比相干体属性精度高,可以较清楚地刻画中小尺度裂缝发育,且对裂缝密集发育区有较好的预测效果,但对较大尺度裂缝发育带的刻画效果不如相干体属性。通过利用曲率体、相干体属性等融合而成的三维地震融合属性,可以发挥各自优势,预测裂缝簇的发育特征。横向从花

岗岩顶面沿层曲率与相干体属性融合解译裂缝发育带结果(图 9)揭示研究区内花岗岩发育区内发育裂隙带,裂隙带分布方向以北东和北西向为主,与该区历史主应力方向基本对应。纵向上对比成像测井裂缝发育图(图 10),成像测井结果揭示井周发育中高角度和网状缝构造缝,该井位于裂缝较为发育的区域。通过地震裂缝预测与钻井结果对比(图 10),达到了干热岩裂缝探测的评价要求。三维地震属性体综合分析结果显示研究区内裂缝较为发育,裂缝发育带主要沿北东向展布,裂缝发育带以北东向和北西向展布,深度越深裂缝越发育,预

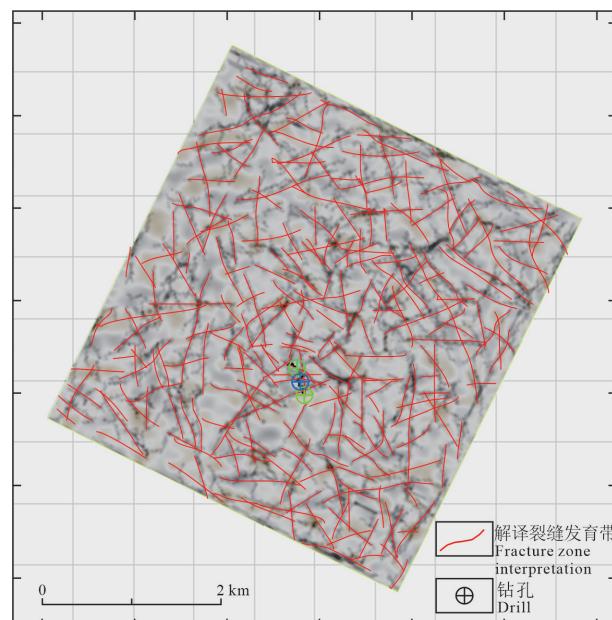


图 9 综合解译裂缝发育带分布图
Fig.9 Distribution map of fracture zone interpretation

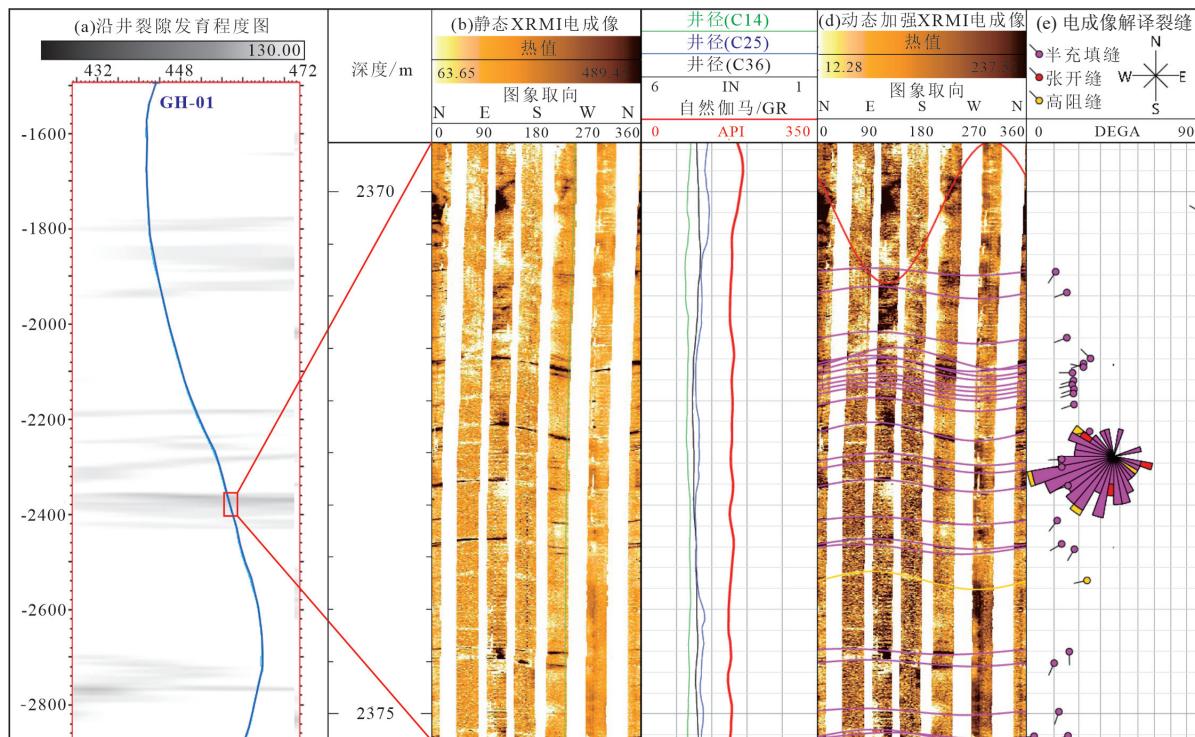


图 10 深度 2370~2375 m 范围内三维地震解译裂缝发育程度与钻孔成像测井对比图

Fig.10 Comparison between 3D seismic interpretation fracture and borehole imaging logging in the depth range of 2370–2375 m

测裂缝发育带分布情况与钻井资料吻合。

利用地震属性体可以预测干热岩储层裂缝的发育程度,但目前更着重于目标储层裂缝的发育密度,对裂缝的充填程度和裂缝开度并没有表征和预测。在实际生产中,裂缝充填及裂缝开度作为干热岩储层建模中不确定性的主要来源,其对储层孔隙度和渗透率的贡献较裂缝密度更显著。未来需要结合实验室模拟、数值模拟及地球物理测井等多种信息,对储层裂缝参数进行更加科学有效的表征。

6 结 论

(1) 共和盆地干热岩靶区内裂缝发育带分布规律通过属性融合后精度大幅度提高,降低了裂缝预测的多解性。

(2) 不同属性分析技术的应用效果,曲率属性对花岗岩顶界面裂缝带判别效果较好,但对花岗岩内裂缝带发育情况在相干体属性显示结果优于曲率体,利用属性融合技术可以将两种属性分析结果优势互补,对花岗岩型干热岩储层裂缝带探测具有较好的效果。

(3) 通过上述几种裂缝预测技术在花岗岩型干

热岩裂缝探测中的应用可以发现,研究区内不发育大型断裂,小尺度裂缝带较为发育,发育方向以北东向和北西向为主。

(4) 在研究区预测出的裂缝发育带对比常规测井和成像测井结果,裂缝带预测结果基本一致。

References

- Bahorich M S, Farmer S L. 1995. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube[J]. Geophysics, 14: 1053–1058.
- Duo Ji, Wang Guiling. 2022. Intensify research on deep thermal exploration and production technology and continuously promote large-scale exploitation of geothermal resources[J]. Science & Techonlogy Review, 40(20): 1 (in Chinese).
- Fan Cunhui. 2015. Comprehensive Study on Carboniferous Volcanic Reservoirs in Zhongguai Uplift Northwestern Margin of Junggar[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–176 (in Chinese with English abstract).
- Gao J, Zhang H J, Zhang S Q, Chen X B, Cheng Z P, Jia X F, Li S T, Fu L, Gao L, Xin H L. 2018. Three-dimensional magnetotelluric imaging of the geothermal system beneath the Gonghe Basin, Northeast Tibetan Plateau[J]. Geothermics, 76: 15–25.
- Jiang Xiaoyu, Zhang Yan, Gan Lideng, Song Tao, Du Wenhui, Zhou Xiaoyue. 2020. Seismic prediction technology for granite buried mountain fractures[J]. Oil Geophysical Prospecting, 55(3): 694–704

- (in Chinese with English abstract).
- Johnson T C, Burghardt J, Strickland C, Knox H, Vermeul V, White M, Schwering P, Blankenship D, Kneafsey T, the EGS Collab Team. 2021. 4D proxy imaging of fracture dilation and stress shadowing using electrical resistivity tomography during high pressure injections into a dense rock formation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(11): e2021JB022298.
- Khair H A, Cooke D, Hand M. 2015. Seismic mapping and geomechanical analyses of faults within deep hot granites, a workflow for enhanced geothermal system projects[J]. *Geothermics*, 53: 46–56.
- Li Zhengyu, Yun Xiaorui, He Bizhu, Zhang Xinyuan, Cai Zhihui, Zhen Menglin, Liu Ruohan, Cheng Haifeng. 2022. Macro fracture systems of the granites controlled by the tectonism: A case study of the Dangjiasi pluton in the northeastern margin of the Gonghe Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(11): 3578–3596 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chuanhu. 2001. Application of seismic coherent analysis technology to prediction of fractured reservoir[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 36(2): 238–244 (in Chinese with English abstract).
- Liu Demin, Zhang Changsheng, Sun Minghang, Wei Meihua, Guan Junpeng, Kang Zhiqiang, Xiong Aimin, Zhou Tianyu. 2021. Evaluation indexes and formation conditions of hot dry rock exploration[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(3): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guoping, Zeng Lianbo, Lei Maosheng, Zhu Kewei, Wang Fei, Liu Qi, Li Wenfang. 2016. Fracture development characteristics and main controlling factors of the volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression[J]. *Geology in China*, 43(1): 329–337 (in Chinese with English abstract).
- Marfurt K J, Kirlin R L, Farmer S L, Bahorich M S. 1998. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm[J]. *Geophysics*, 63(4): 1150–1165.
- Nguyen T, Bao W, Nguyen L, Dang T. 2014. A new method for building porosity and permeability models of a fractured granite basement reservoir[J]. *Petroleum Science and Technology*, 32: 1886–1897.
- Roberts A. 2001. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons[J]. *First Break*, 19(2): 85–100.
- Tang Xianchun, Wang Guiling, Ma Yan, Zhang Dailei, Liu Zhong, Zhao Xu, Cheng Tianjun. 2020. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2052–2065 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijun, Zhao Ping Zhu Chuangqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science and Technology Review*, 30(32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huang, Wang Guiling, Yue Gaofan, Gan Haonan. 2020. Numerical simulation of granite hydraulic fracture propagation under the influence of natural fractures[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2124–2130 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lei, Chen Haiqing, Chen Guowen, Xie Wei. 2010. Prediction of fracture zones and their occurrences using curvature attributes[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 45(6): 885–889 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoli, Song Weijian, Wang Xin, Chen Yang, Zhang Jing. 2024. The development trends and implications of global patent technologies for exploration, development and comprehensive utilization of hot dry rock[J]. *Geology in China*, 51(6): 2111–2114 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jingyu, Wang Dan, Li Ning, Wang Zhenyu, Fu Guoqiang, Jin Xianpeng, Ming Yuan. 2022. Development status and suggestions of hot dry rock hydraulic fracturing for building geo-thermal reservoirs[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(3): 321–329 (in Chinese with English abstract).
- Xie Zixiao, Huang Zhongwei, Xiong Jianhua, Wu Xiaoguang, Li Gengsheng, Zhou Wenchao, Long Tengda. 2022. Influence of natural fractures on the propagation of hydraulic fractures in hot dry rock[J]. *Natural Gas Industry*, 42(4): 63–72 (in Chinese with English abstract).
- Xie Zhou, Li Bin, Xu Hongxia, Wu Meilian, Yue Qingzheng, Zhao Haitao. 2017. Application of multi-attribute analysis technology in fault block reservoirs of Sangtamu Oilfield[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 52(1): 181–188 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tianfu, Hu Zixu, Li Shengtao, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Li Fengyu, Liang Xu, Feng Bo. 2018. Enhanced geothermal systems: International research progress and research status in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1936–1947 (in Chinese with English abstract).
- Yin Xingyao, Gao Jinhua, Zong Zhaoyun. 2014. Curvature attribute based on dip scan with eccentric window[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(10): 3411–3421 (in Chinese with English abstract).
- Ying Yushuang. 2016. Application of multi-angle scanning and filtering coherence technology in Xudong area[J]. *West-China Exploration Engineering*, 28(9): 87–88 (in Chinese).
- Zhang E Y, Wen D G, Wang G L, Yan W D, Wang W S, Ye C M, Li X F, Wang H, Tang X C, Zhang S Q, Jin X P, Wu H D, Zhang L Y, Feng Q D, Cheng Z P. 2022. The first power generation test of hot dry rock resources exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 5(3): 372–382.
- Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dunpeng, Jia Xiaofeng, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Fu Lei, Wu Haidong, Zeng Zhaofa, Li Zhiwei, Mu Jianqiang, Cheng Zhengpu, Hu Lisha. 2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 45(6): 1087–1102 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Wen Dongguang, Xu Tianfu, Fu Lei, Jia Xiaofeng, Sun Sheng, Weng Wei, Zhang Yang, Yang Tao, Moore Joseph, Jiang Shu, Allis Rick, McLennan John. 2019. Comparison between the geothermal frontier observatory research program of hot dry rock in

- the United States and the exploration status of typical EGS sites in China and the United States[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(2): 321–334 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Fu Lei, Zhang Yang, Song Jian, Wang Fuchun, Huang Jinhui, Jia Xiaofeng, Li Shengtao, Zhang Linyou, Feng Qingda. 2020. Delineation of hot dry rock exploration target area in the Gonghe Basin based on high-precision aeromagnetic data[J]. *Natural Gas Industry*, 40(9): 156–169 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Li Xufeng, Song Jian, Wen Dongguang, Li Zhiwei, Li Dunpeng, Cheng Zhengpu, Fu Lei, Zhang Linyou, Feng Qingda, Yang Tao, Niu Zhaoxuan. 2021. Analysis on geophysical evidence for existence of partial melting layer in crust and regional heat source mechanism for hot dry rock resources of Gonghe Basin[J]. *Earth Science*, 46(4): 1416–1436 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shengsheng, Zhang Lei, Tian Chengcheng, Cai Jingshou, Tang Baocun. 2019. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(4): 501–508 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuqing, Wang Hui, Fan Tingen, Song Laiming, Nie Yan, Liang Xu, Chen Fei. 2016. Granite buried hill reservoir characterization and modeling: Taking offshore an oil-field in Bohai Bay as an example[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(5): 1312–1320 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhou, Jin Yan, Zeng Jinyi, Zhang Xudong, Zhou Jian, Wang Wenzhi, Meng Han. 2019. Experimental study on hydraulic fracturing physics simulation, crack initiation and propagation in hot dry rock geothermal reservoir in Gonghe Basin, Qinghai[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(5): 1425–1430 (in Chinese with English abstract).
- 唐显春, 王贵玲, 马岩, 张代磊, 刘忠, 赵旭, 程天君. 2020. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. *地质学报*, 94(7): 2052–2065.
- 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱庆伟, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. *科技导报*, 30(32): 25–31.
- 王璜, 王贵玲, 岳高凡, 甘浩男. 2020. 天然裂缝影响下的花岗岩水力裂缝扩展数值模拟[J]. *地质学报*, 94(7): 2124–2130.
- 王雷, 陈海清, 陈国文, 谢薇. 2010. 应用曲率属性预测裂缝发育带及其产状[J]. *石油地球物理勘探*, 45(6): 885–889.
- 王晓丽, 宋韦剑, 王鑫, 陈杨, 张敬. 2024. 全球干热岩勘探开发和综合利用专利技术发展趋势与启示[J]. *中国地质*, 51(6): 2111–2114.
- 解经宇, 王丹, 李宁, 王振宇, 付国强, 金显鹏, 明圆圆. 2022. 干热岩压裂建造人工热储发展现状及建议[J]. *地质科技通报*, 41(3): 321–329.
- 谢紫霄, 黄中伟, 熊建华, 武晓光, 李根生, 邹文超, 龙腾达. 2022. 天然裂缝对干热岩水力压裂裂缝扩展的影响规律[J]. *天然气工业*, 42(4): 63–72.
- 谢舟, 李斌, 徐红霞, 吴梅莲, 岳清政, 赵海涛. 2017. 多属性分析技术在桑塔木油田断块油气藏中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 52(1): 181–188.
- 许天福, 胡子旭, 李胜涛, 姜振蛟, 侯兆云, 李凤昱, 梁旭, 冯波. 2018. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状[J]. *地质学报*, 92(9): 1936–1947.
- 印兴耀, 高京华, 宗兆云. 2014. 基于离心窗倾角扫描的曲率属性提取[J]. *地球物理学报*, 57(10): 3411–3421.
- 应玉双. 2016. 多倾角扫描及滤波的相干技术在徐东地区应用[J]. *西部探矿工程*, 28(9): 87–88.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 贾小丰, 张盛生, 李胜涛, 付雷, 吴海东, 曾昭发, 李志伟, 穆建强, 程正璞, 胡丽莎. 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 45(6): 1087–1102.
- 张森琦, 文冬光, 许天福, 付雷, 贾小丰, 孙晟, 翁炜, 张杨, 杨涛, Moore Joseph, 蒋恕, Allis Rick, McLennan John. 2019. 美国干热岩“地热能前沿瞭望台研究计划”与中美典型 EGS 场地勘查现状对比[J]. *地学前缘*, 26(2): 321–334.
- 张森琦, 付雷, 张杨, 宋健, 王富春, 黄金辉, 贾小丰, 李胜涛, 张林友, 冯庆达. 2020. 基于高精度航磁数据的共和盆地干热岩勘查目标圈定[J]. *天然气工业*, 40(9): 156–169.
- 张森琦, 李旭峰, 宋健, 文冬光, 李志伟, 黎敦朋, 程正璞, 付雷, 张林友, 冯庆达, 杨涛, 牛兆轩. 2021. 共和盆地壳内部分熔融层存在的地球物理证据与干热岩资源区域性热源分析[J]. *地球科学*, 46(4): 1416–1436.
- 张盛生, 张磊, 田成成, 蔡敬寿, 唐保春. 2019. 青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力[J]. *地质力学学报*, 25(4): 501–508.
- 张雨晴, 王晖, 范廷恩, 宋来明, 聂妍, 梁旭, 陈飞. 2016. 花岗岩潜山储层裂缝建模表征方法——以渤海花岗岩潜山 A 油田为例[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 46(5): 1312–1320.
- 周舟, 金衍, 曾义金, 张旭东, 周健, 汪文智, 孟翰. 2019. 青海共和盆地干热岩地热储层水力压裂物理模拟和裂缝起裂与扩展形态研究[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 49(5): 1425–1430.

附中文参考文献

- 多吉, 王贵玲. 2022. 加大深部热能探采技术攻关 持续推进地热资源规模化开发[J]. *科技导报*, 40(20): 1.
- 范存辉. 2015. 准噶尔西北缘中拐凸起石炭系火山岩储层综合研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 1–176.
- 姜晓宇, 张研, 甘利灯, 宋涛, 杜文辉, 周晓越. 2020. 花岗岩潜山裂缝地震预测技术[J]. *石油地球物理勘探*, 55(3): 694–704.
- 李振宇, 负晓瑞, 何碧竹, 张新远, 蔡志慧, 郑孟林, 刘若涵, 陈海锋. 2022. 构造作用对花岗岩宏观裂缝系统的控制: 以共和盆地东北部党家寺岩体为例[J]. *岩石学报*, 38(11): 3578–3596.
- 刘传虎. 2001. 地震相干分析技术在裂缝油气藏预测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 36(2): 238–244.
- 刘德民, 张昌生, 孙明行, 韦梅华, 关俊朋, 康志强, 熊爱民, 周天禹. 2021. 干热岩勘查评价指标与形成条件[J]. *地质科技通报*, 40(3): 1–11.
- 刘国平, 曾联波, 雷茂盛, 祖克威, 王菲, 刘奇, 李文芳. 2016. 徐家围子断陷火山岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. *中国地质*, 43(1): 329–337.
- http://geochina.cgs.gov.cn 中国地质, 2025, 52(2)