

doi:10.11720/wtyht.2015.2.07

王丹,魏水建,贾跃玮,等.地热资源地震勘探方法综述[J].物探与化探,2015,39(2):253-261.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.07

Wang D, Wei S J, Jia Y W, et al. An overview of methods for geothermal seismic exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 253-261. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.07

地热资源地震勘探方法综述

王丹¹, 魏水建¹, 贾跃玮¹, 卢志²

(1. 中石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中石油辽河油田勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010)

摘 要: 全球地热资源丰富, 具有巨大的开发潜力, 它将在全球的经济发展中起到强大的推动作用。地震方法是高精度地热勘探开发中不可或缺的手段。地热资源地震勘探方法包括主动地震和被动地震两大类, 这两类地震方法在地热勘探的不同阶段各自发挥着重要作用。首先分析了地热储层的地震响应特征, 然后总结了国内外被动地震和主动地震勘探新技术, 为进一步提高我国的地热资源地震勘探水平提供一些借鉴。研究表明, 被动地震在地热田最初的普查中起到关键作用, 但是在地热储层特征的精细刻画和裂缝探测的预测精度方面, 该方法存在一定的缺陷; 主动方法虽然成本相对较高, 但是由于其高信噪比和高分辨率, 所以它能更好地描述储层特征, 为未开发地热区选区评价和井位优选提供可靠的技术保障; 此外, 多波技术也将是地热勘探未来发展的重要方向。

关键词: 地热; 地震勘探; 被动地震; 主动地震; 多波技术

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2015)02-0253-9

全球能源问题日益突出。一是供需矛盾, 截止 2010 年, 20% 的世界人口仍然无法用电。二是能源需求增长与温室效应的矛盾, 2010 年初级能源需求增加 5%, 与之相关的二氧化碳排放量为 30.4 t, 相比 2009 年增长了 5.3%, 可能引起严重的温室效应。三是资源浪费, 由化石燃料补贴而引起严重的浪费性消费, 2010 年增加约 4 090 亿美元^[1]。四是不稳定因素, 能源分布不均, 中东和北非等国家的动荡易引起全球性能源危机。

而地热资源作为可再生无污染资源, 将对发展低碳经济起到极其重要的作用。《新能源报告》指出, 地热资源的能量是全球常规能源总能量的 45 万倍, 是全球煤资源的 1.7 亿倍。此外, 我国地热资源较为丰富, 中国主要盆地地热资源量为 2.496×10^{22} J, 折合标准煤 8.532×10^{11} t, 并且中国仅重点城市的浅层热能就达到 2.78×10^{20} J, 每年可利用量为 2.89×10^{12} kWh^[2], 因此我国地热资源的开发和利用前景广阔。

地热资源勘探的地震方法分为主动地震和被动地震两类方法。被动地震勘探是利用密集地震台阵来监测岩层中微地震活动所产生的地震波, 然后运

用地震学方法来反演微地震的活动特征, 并反演出研究区三维纵横波速度、纵横波速度比、泊松比等弹性参数分布的一种勘探方法。被动地震勘探方法在国外地热资源勘探中已得到普遍应用, 而国内对该方法研究尚不广泛。主动地震是指高分辨率的反射地震勘探方法。主动地震成本相对高, 因此在地热资源普查阶段仍然依靠被动地震, 而对于评价区的地热储层, 主动地震才是最可靠的资料。

地震方法作为一种超深且高精度的勘探方法, 在一定程度上弥补了重磁电方法勘探的不足。它已在我国大多数地热田展开了应用, 例如西藏、天津、河北、云南等省市地热田都采用了三维地震勘探技术^[3-4], 并且山东省地热田还采用高分辨率地震勘探技术^[5]。但是, 国内地热田仅仅利用主动地震方法来研究地质构造, 解决断裂识别的问题, 而如何有效利用地震信息解决热储层预测、裂隙通道精细刻画、地层水识别等关键问题尚是空白。另一方面, 被动地震方法在国内地热田中的应用严重不足。也就是说, 与美国、日本相比, 我国地震技术在地热资源勘探中利用得远远不够, 发展速度也相对滞后。在美国和冰岛等国家, 地震方法早已成为地热资源勘

探开发的主流手段,不仅利用叠后地震资料进行导水的断裂的识别,还综合利用叠前、叠后以及多波信息精细刻画和描述热储层特征,明显提高了地热勘探的精准度。

1 地热储层地震响应特征

1.1 地震波速度衰减

随着地层温度的升高,岩石的物性特征会发生

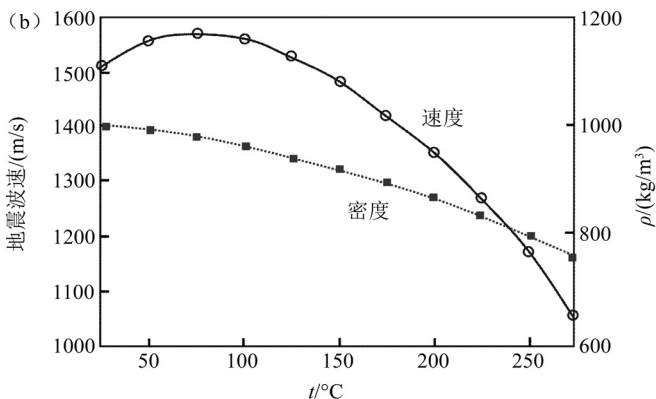
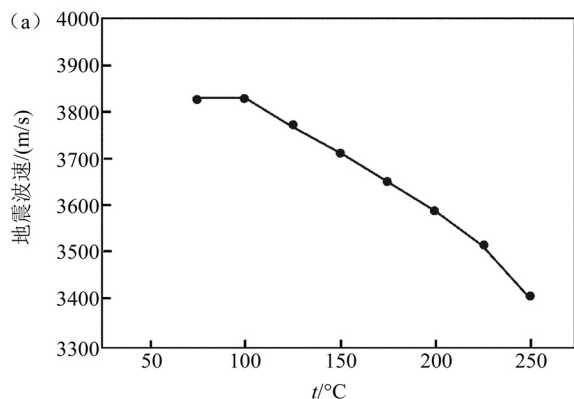


图1 地热区岩石(a)和水(b)的地震波速度、密度与温度的关系^[7]

1.2 地层吸收衰减

当地层含流体后,在地震资料上振幅和频率都有所反映:纵横波振幅能量严重衰减,地震波高频成分也大幅度衰减,且含蒸汽与含水时也存在一定的差别,含蒸汽时振幅、频率衰减更严重,有时在地震剖面上形成“空白带”反射,因此地层吸收系数和地震衰减属性是进行地热储层描述和流体预测的重要参数(如图2)。

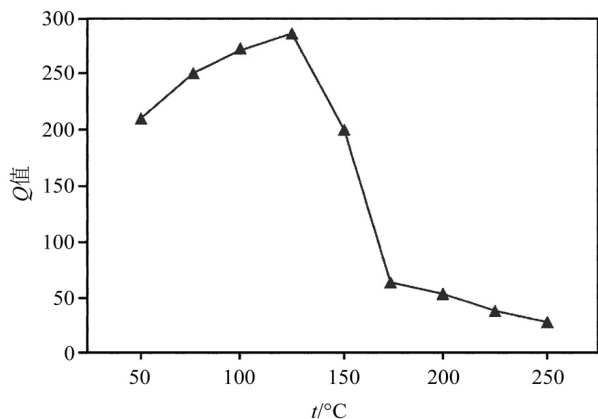


图2 温度对Q值的影响^[7]

1.3 弹性参数的影响

非地热储层、含水地层以及含蒸汽地层的纵横波速度比、泊松比等弹性参数有较大差异。在国外很多地热田中,都对纵横波速度比做过详细研究。总结这些研究可知,水占主导的地热储层(例如美

很大变化,其中最明显的变化是:随着温度的升高,岩石的纵波速度降低,横波速度也逐渐减小且趋于零^[6]。Makky 等^[7]通过岩石物理实验进一步印证了这一结论:岩石的地震波速度随温度升高而降低(图1a),水的地震波速度也随温度升高而降低(图1b)。此外,由于地热储层中蒸汽和裂缝的存在,将导致弹性波速度进一步衰减。

国 East Mesa 和墨西哥 Cerro Prieto 地热田)纵横波速度比高,达到 1.55~1.68。而气态水占主导的地热田(例如美国 Geysers 和 Coso 地热田)纵横波速比低。因此可以根据纵横波速度比识别地热储层,并进一步确定储层中的流体性质。

1.4 裂缝发育特征

断裂构造对地热资源分布有直接的控制作用。上地幔岩浆热液沿深大断裂上升至地壳上部,将浅层的地下水加热,这些被加热的地下水沿着断裂通道上升。断裂和裂缝为地下高温水、蒸汽和热量提供通道,因此地热储层中断裂和裂缝通道十分关键。据统计,具有价值的热储一般主要位于褶皱部位以及断裂构造发育部位,因此受断裂和裂缝影响,热储类型主要分为:孔隙裂缝型热储、岩溶裂缝型热储、构造裂缝型热储等。可以说,地热勘探的另一个重点就是寻找裂缝发育带。罗马尼亚 Moesian Platform 地热区的地热勘探中,在 Craiova-Bals-Slatina、Videle 和 Leordeni-Recea 三个地区的断层附近都找到了 80°C 的地层水,证实了断层、裂缝与地热储层的紧密关系^[8]。

2 被动地震勘探技术

2.1 速度成像

由于地热异常区内蒸汽和热水的上涌,时常导致地面震动以及局部的蒸汽爆炸。因此利用高精度微震仪可探测这些微震,从而圈定热储位置、上涌通

道以及分布范围等^[9]。被动地震方法成本低,在地热田的普查阶段发挥着重要作用。

基于被动地震数据的旅行时反演在地热勘探中应用较多^[10]。该方法是利用地震波旅行时数据,反演地下地质体的速度模型,找出速度异常体。Larderello-Travale 地热田就是采用旅行时反演对速度进行成像从而来圈定热储位置。该地热田以蒸汽为

主,是第一个用于发电的地热田。Matteis 等^[11]在该项目中,采用 v_p 、 v_s 、 v_p/v_s 、 $v_p \times v_s$ 四种属性来研究储层内流体分布特征,不仅识别出地热储层,还指出了热储的流体类型。由于低 v_p/v_s 异常一般对应含蒸汽地热储层,所以图 3 剖面中 Lago 井和 Miniera 井底部均为含蒸汽地层。而高 v_p/v_s 异常对应(并且对应低 $v_p \times v_s$)含水地层,因此剖面中浅层为含水层。

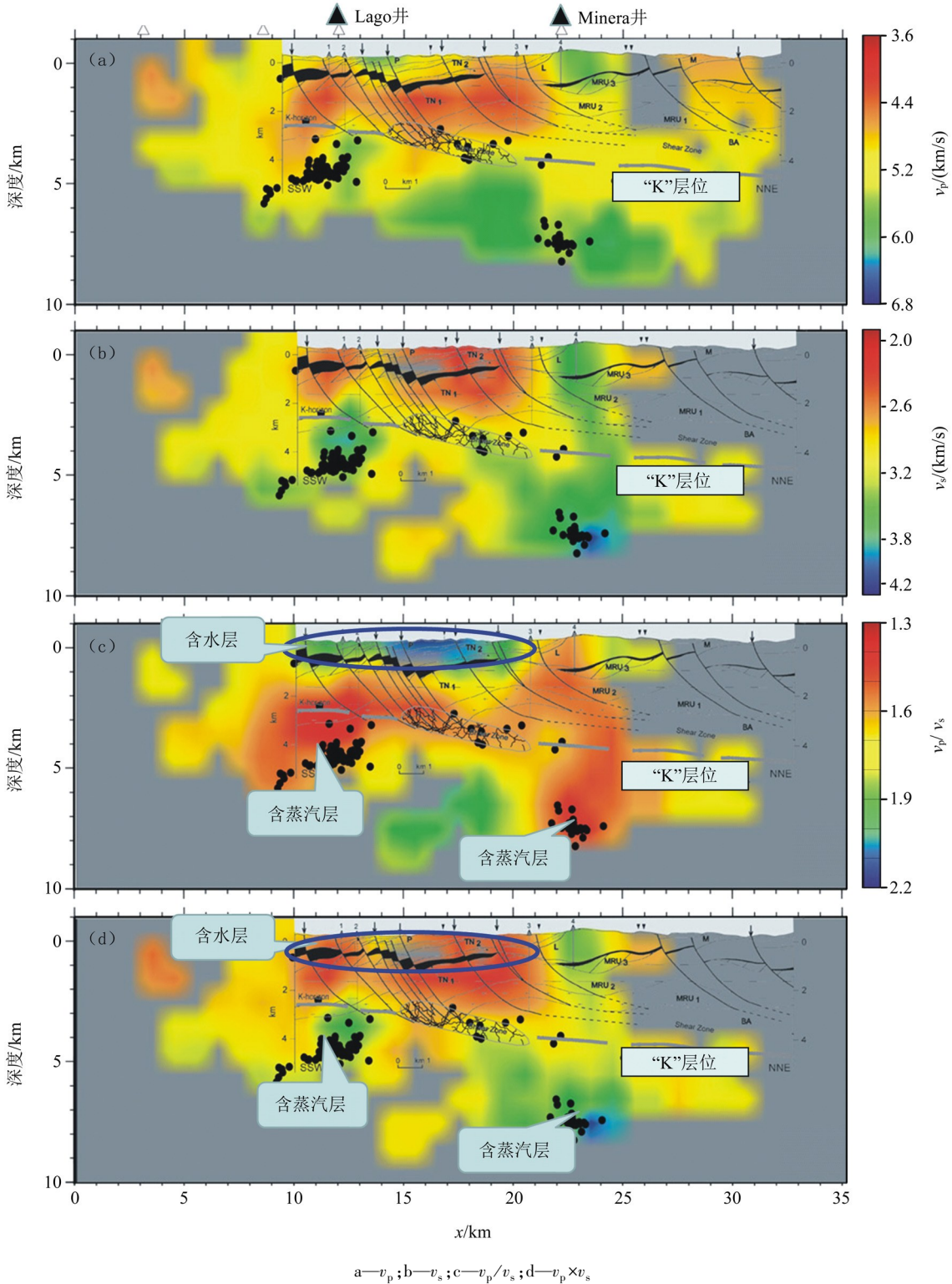


图3 Larderello-Travale 地热田四种属性剖面^[11]

2.2 随机噪声成像

随机噪声成像方法是利用从随机地震噪声中提取短周期面波,由这些数据可以得到面波的频散曲线,并利用频散曲线建立横波速度剖面,从而寻找速度异常的地热储层^[12]。该方法在探测下地壳和上地幔之间的构造中应用较为广泛^[13-14]。目前基于随机噪声成像的研究在新西兰、南非、西班牙、韩国、日本、美国等多个国家和地区都有所应用^[14]。

随机噪声主要指来源于天气变化、大气压力、海浪、潮汐、人类活动和机器产生的噪声。这些在地表探测到的微振动分为体波和面波,而 70% 的是面波^[15]。尽管这些随机噪声的振幅和波形随时间和地点不断变化,但是统计结果表明:一般情况下在某一特定时间和地点,随机噪声的振幅和波形相对比较稳定。

图 4 给出了该方法的简要原理及步骤:①提取随机噪声垂直分量:从多组台站记录到的持续时间较长的随机噪声中提取出垂直分量数据,该数据中主要包含瑞利面波信息;②噪声压制:根据面波频带范围,滤除非面波信号,并采用谱白化、振幅归一化等处理进一步压制无效信息;③计算互相关:在面波的频带范围内,对处理后不同台站的随机噪声计算互相关^[16-17]。④计算频散曲线:采用时频分析方法(FTAN)由互相关结果计算得到瑞利面波的相速度频散曲线。⑤面波成像:利用计算得到的频散曲线进行面波成像,得到瑞利面波相速度模型。很多学

者将面波成像方法单独地进行过详细介绍^[14]。⑥横波反演:通过使得实际计算的频散曲线和频散模型曲线差异最小,得到横波速度模型的最优解^[17]。最后,根据面波速度和横波速度结果,圈出地热储位置和范围。

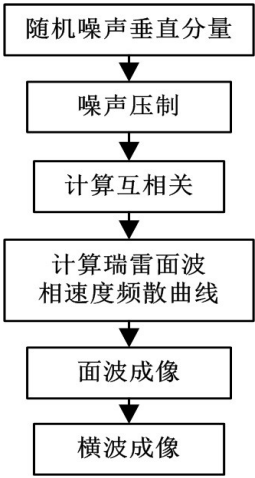


图 4 随机噪声成像流程

Yang 等^[18]采用地震随机噪声成像方法研究了美国加州 Coso 地热田的地质构造。图 5 是 Coso 地热田不同周期的相速度的扰动平面。不同周期的相速度扰动能反映不同深度的热储特征。在这项研究中,周期为 3 s 的瑞利面波能较好地反映 2 km 深的热储特征,而 10 s 的瑞利面波对 10 km 深的热储反映尤为明显,对 20 km 的也能较好反映。小的相速度扰动对应于热储区域。

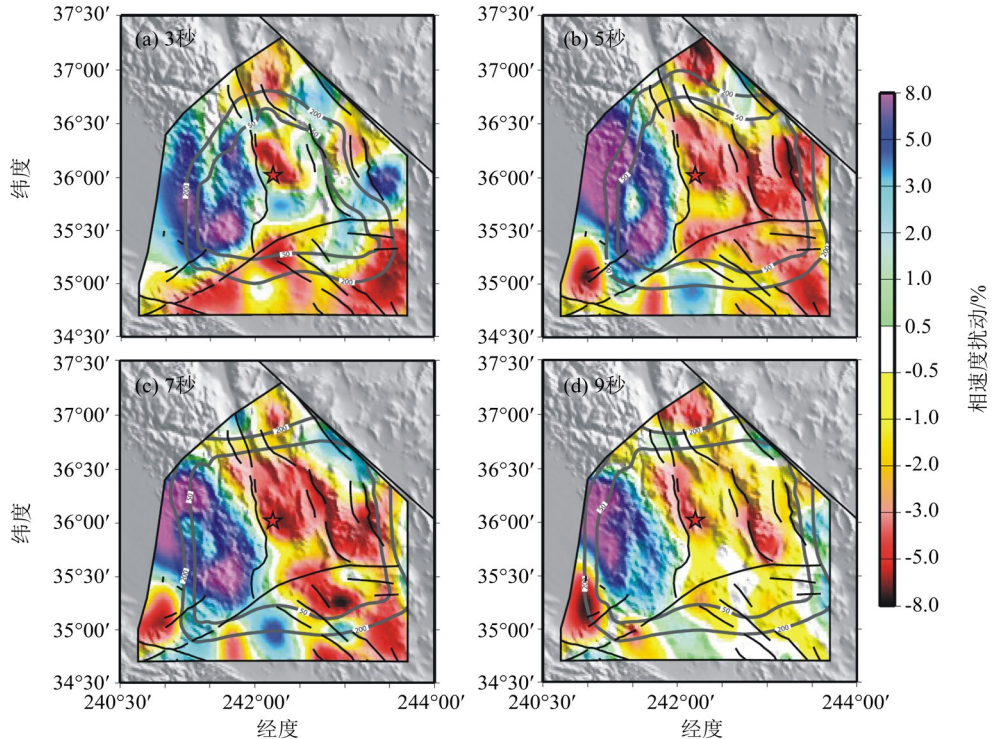


图 5 加州 Coso 地热田不同周期的相速度扰动平面图(黑色实线表示断裂,颜色深浅表示相速度扰动值大小)^[18]

国内部分地热田也采用了该方法,并取得了预期效果。Xu^[12]通过随机噪声成像研究了江苏吴江的地热勘探项目。通过随机噪声成像最终得到横波剖面(图6)。从横波剖面上看,浅层速度横向上连续,说明该地层沉积环境相对稳定;深部存在低速异常,说明存在断层和裂缝发育带以及含水层或石灰岩洞穴等地质体。此外,也得到了地热储层深度、厚度等重要信息。

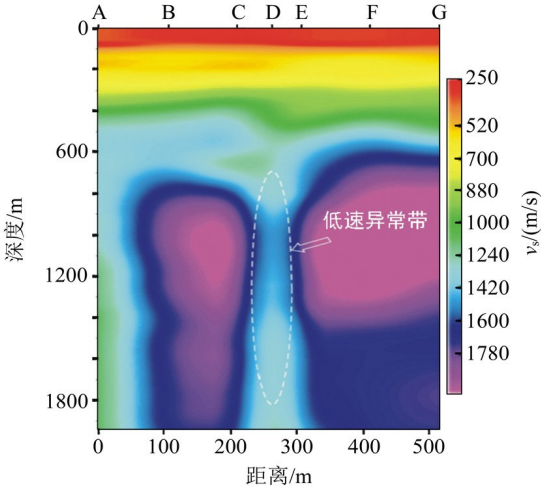


图6 江苏地热田横波速度剖面探测速度异常体(A-G为7个观测点位置)^[19]

此外,国内外通常采用多种地球物理方法综合预测,从而提高预测的准确度和精度。美国犹他州西南的Cove Fort地热田项目同时采用了面波数据和局部天然地震数据^[20]。宽频带的随机噪声数据由美国国家台阵记录得到,利用该数据得到相速度频散曲线,从而用于面波成像;局部地下活动的微地

震数据则由当地10个台站记录得到,利用双精度的层析成像方法得到纵波和横波速度模型。加利福尼亚北部的Geysers浅层地热储层探测也采用了微地震数据和面波数据的联合反演方法^[21]。此外,综合面波、局部微地震数据以及重磁电数据综合分析得到横波速度体的方法也是非常常用且有效的方法^[22],多种方法能相互印证,相互补充,使预测结果更为合理。

2.3 横波分裂技术

横波分裂技术一致被认为是探测地热储层裂缝密度和方向行之有效的方法^[23]。由于从微地震事件中同样也能接收到快、慢横波信息,因此完全可以将横波分裂技术应用到被动地震之中。

横波传播经过裂缝时分裂为快横波和慢横波,快横波平行于裂缝发育方向,慢横波垂直于裂缝方向,当裂缝密度很大时,导致慢横波存在较大延迟。裂缝密度越大,快慢横波时间差异越大。因此,快慢横波的时间延迟可以用于探测裂缝发育密度,而快横波可用于探测裂缝发育方向^[24]。利用横波分裂预测裂缝的理论和方法国外很多学者已经做过研究^[25-28]。

Silas等^[29]在Casa Diablo地热田勘探中采用的就是基于微地震数据的横波分裂预测裂缝方法。首先,通过研究快横波和慢横波的振动方向,得到裂缝发育方向;然后用快慢横波的时间差计算得到裂缝发育密度。图7是Casa Diablo区横波分裂预测的裂缝发育密度深度切片。红色表示高裂缝密度发育。从图中可以得出,该区有两个有利的地热储层。

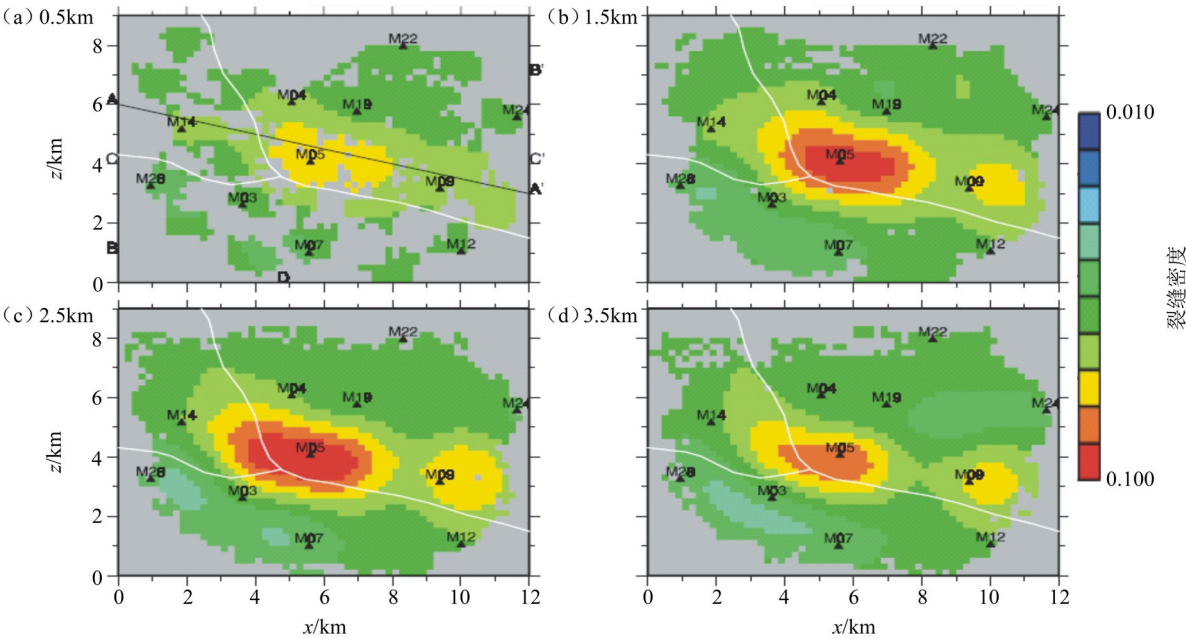


图7 Casa Diablo 地热田裂缝发育密度不同深度切片(颜色表示裂缝密度大小,红色为高裂缝密度,蓝色为低裂缝密度)^[29]

一个是 Casa Diablo 区 1~3 km 深度处的北边和东部,一个是 2.5 km 深度的远东部(Mammoth 机场附近)的。

被动地震成本低,能有效预测热储位置和分布范围,但是由于被动地震数据接收的站点少,数据覆盖范围小等不足,导致预测结果的纵横向分辨率都较低,所以基于被动地震的勘探方法一般局限于地热田的普查阶段,而选区评价和井位优选时必须借助主动地震。

3 主动地震勘探

利用地表上有限个台站数据进行分析,难以实现对大面积地热区进行高精度评价研究。因此,针对较大区域的地热区,需要借助三维主动地震勘探方法。主动地震勘探覆盖面积广,信息量大,能够提供更丰富的地下信息。

3.1 地震衰减属性

在地热储层中,由于热液、蒸汽等高温流体存在,导致地震波振幅、频率吸收衰减严重。因此很多学者尝试建立地热田的三维吸收衰减系数模型,通过吸收衰减系数模型找到热储^[30-31]。Wu 等^[32]通过计算纵波的三维吸收衰减系数 Q 模型来研究加州 Coso 地热储层,而 Sanders 等^[33]则采用横波衰减属性研究该区热储。此外,频率属性也是预测地热资源的有效手段。

Wei 等^[34]在加利福利亚南部 Wister 地热田采用了有效频带宽度属性预测高温流体分布。由于地热田高温流体的存在,导致频率衰减,地震有效带宽变窄,故有效带宽的低值区指示高温流体分布范围。因此,由图 8 预测出高温流体主要分布在工区西南部。

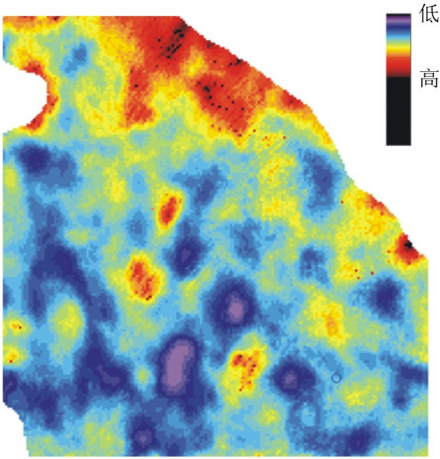
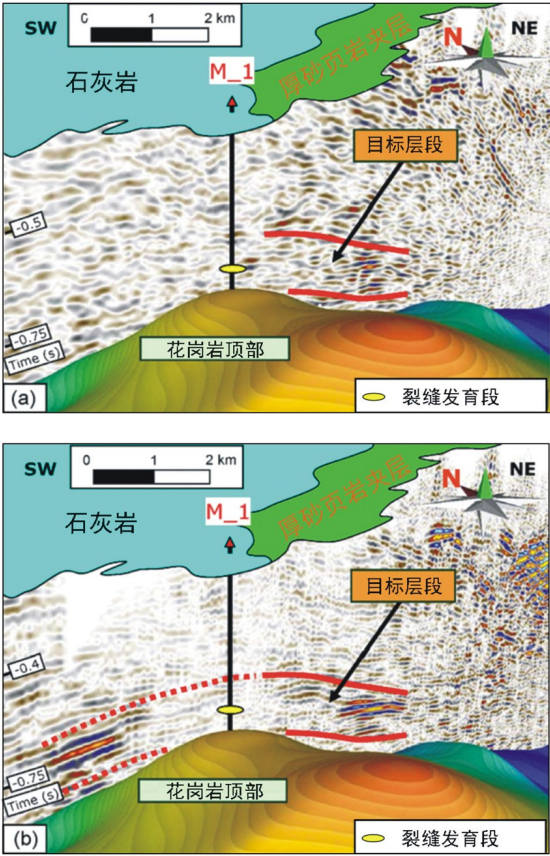


图 8 Wister 地热田纵波有效频带宽度平面示意(红色为高值,紫色为低值)^[34]

3.2 构造精细成像

地热资源主要受地质构造因素控制,与火山结构或断层活动高度相关联,这些因素导致地热资源分布极其不均匀^[35]。另外,地质构造位置和大小共同决定了地热储集体的大小^[36]。因此,地震资料的构造成像效果对地热储层预测尤为关键。

在意大利 Tuscany 地热田勘探中,尽管常规处理结果(图 9a)大部分资料能够满足勘探要求,但是在石灰岩地层中由于岩石的吸收衰减降低了地热储层的成像质量,故信噪比急剧降低,所以 Casini^[36]在前期处理和成像过程中,改进了资料品质,提高了成像精度。如图 9b 为改进后的地震资料,M_1 井目标层段的信噪比和层位精度得到明显提高。



a—常规处理结果;b—改进的处理结果

图 9 过井地震剖面^[36]

3.3 三维多波多分量地震勘探

基于被动地震数据的横波分裂技术对预测地热储集体,特别是裂缝体系具有很好的效果。为了更好地服务于地热能源的开发与建设,提高勘探精度,近年来一些国家开展了地热区多波三维地震勘探。受美国能源部委托,德州大学奥斯汀分校勘探地球物理实验室 2009 年开始开展多波地热储集体的表征研究。现在该实验室已采集到了 Soda 和 Wister

两块地热区多波地震资料,开展了一些研究工作。三维多波多分量的优势主要体现在以下两个方面。一是,由于PP波穿过热流体衰减严重,降低资料信噪比,而PS波受热流体影响小,因此PS波的应用会显著提高地热区的地震解释精度。二是,利用PP波和PS波计算的弹性参数(例如 v_p/v_s)更加可靠,对热流体分布指示更准确;此外,利用横波分裂技术能有效识别储层裂缝。总之,多波多分量三维地震勘探比基于被动地震数据的多分量勘探精度和分辨率更高,它将是地热地震勘探的重要发展方向。

图10和图11是Wister地热田三维多波多分量地震资料应用实例。图10是Wister地热田Cane-

brake/Olla/Diablo层段与Deguynos层段地震解释剖面,图10a为PP波,图10b为PS波。对比两者虚线椭圆框内不难发现,PP波受浅层热流体影响,反射同相轴被削弱,资料信噪比急剧降低,而PS波受热流体影响小,虚线框内资料信噪比仍然较高,更有利于地震解释工作的开展。另外,由PP波和PS波计算得到的 v_p/v_s 数据体比常规反演得到的 v_p/v_s 数据体可靠性更高。图11是利用PP波和PS波计算得到的Canebrake/Olla/Diablo层与Deguynos层之间的 v_p/v_s 平面分布,由图可知Wister地热田西南部 v_p/v_s 低于2.6(红色区域),因此该区域为最有利的地热储层。

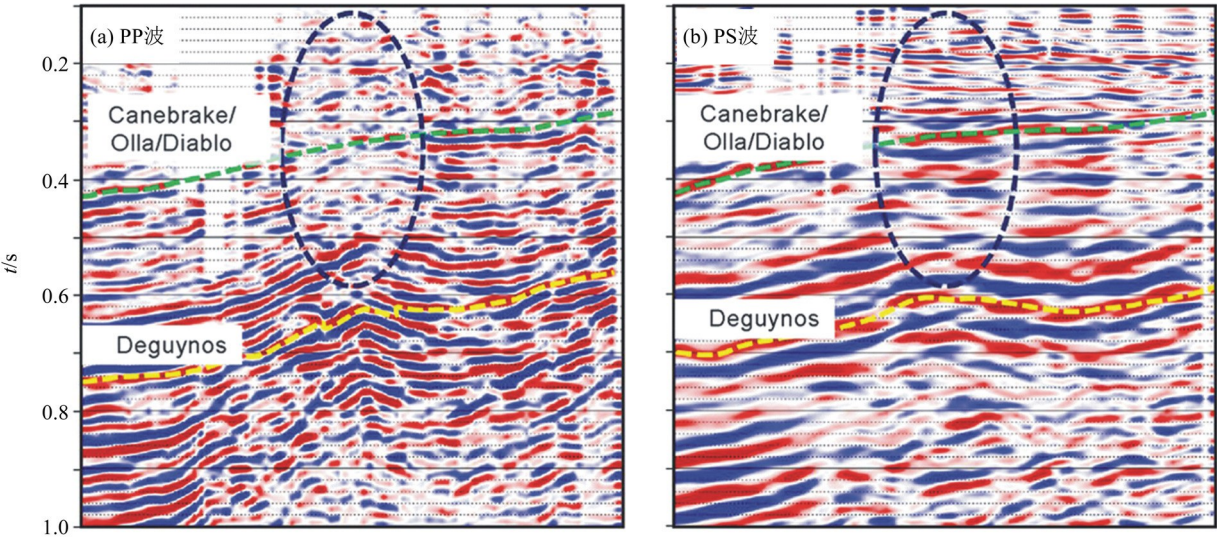


图10 PP波和PS波地震解释剖面^[34]

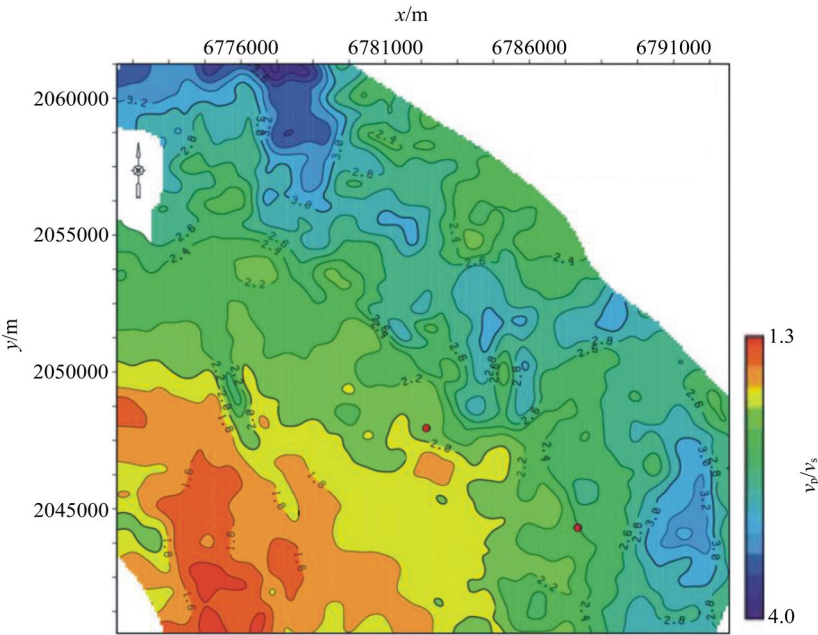


图11 由PP波和PS波计算的 v_p/v_s 平面^[37]

4 结论及认识

(1)在未来的地热资源勘探开发应用中,地震方法优势巨大。

(2)地热勘探最主要的目标是寻找裂缝和断裂发育区,而裂缝和断裂能够造成地震波弹性参数明显的变化,地震方法是捕捉这些变化最有效的手段。因此,使用地震进行地热勘探将会明显提高勘探精度。

(3)被动地震方法理论成熟,成本较低,但是分辨率低,适合地热田的初期开发;主动地震方法密度大,高信噪比和高分辨率,适合地热田的选区评价和井位优选;将二者有效结合,能够提高地热资源的探测精度。

(4)地震多波技术,对描述裂缝和断裂特征有显著效果,是地热勘探未来发展的重要方向。

参考文献:

- [1] Birol F, Olerjarnik P. Will China lead the world into a clean-energy future[J]. *Economics of Energy and Environmental Policy*, 2012, 1 (1): 5-9.
- [2] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 312-321.
- [3] 陈焯, 李德春, 须振华. 地震勘探技术在地热勘探中的应用[J]. *工程勘察*, 2008, (12): 57-59.
- [4] 刘革, 刘迪新. 地震方法在地热勘探中的应用[J]. *煤炭技术*, 2002, 21(4): 113-117.
- [5] 孙党生, 雷炜, 李洪涛, 等. 高分辨率地震勘探在地热资源勘查中的应用[J]. *勘察科学技术*, 2002, 6: 55-59.
- [6] 曾昭发, 陈雄, 李静, 等. 地热地球物理勘探新进展[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(1): 168-178.
- [7] Jaya M S, Shapiro S A, Kristinsdóttir L H, et al. Temperature dependence of seismic properties in geothermal rocks at reservoir conditions[J]. *Geothermics*, 2010, 39(1): 115-123.
- [8] Panea I, Negut A, Mocanu V. The relationship between the deep faults and the geothermal structures identified on the Moesian Platform territory[C]//presented at the 2011 SEG Annual Meeting, 2011.
- [9] 周厚芳, 刘闯, 石昆法. 地热资源探测方法研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(4): 656-661.
- [10] Karastathis V K, Papoulia J, Fiore B D, 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]. *J Volcanol Geoth Res*, 2011, 206(3): 106-120.
- [11] Matteis R D, Vanorio T, Zollo A, et al. Three-dimensional tomography and rock properties of the Larderello-Travale geothermal area, Italy[J]. *Phys Earth Planet In*, 2008, 168(1): 37-38.
- [12] Xu P F, Li C J, Ling S Q. Mapping collapsed columns in coal mines utilizing microtremor survey methods[J]. *Chinese J Geophys*, 2009, 52(7): 1923-1930.
- [13] Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise[J]. *Science*, 2005, 307(5715): 1615-1618.
- [14] Sabra K G, Gerstoft P, Roux P, et al. Surface wave tomography from microseisms in Southern California[J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(14): L14311.
- [15] Toks Z M N, Lacoss R T. Microseisms: Mode structure and sources[J]. *Science*, 1968, 159(3817): 872-873.
- [16] Ling S Q. Research on the estimation of phase velocities of surface waves in microtremors[D]. Hokkaido University, 1994.
- [17] Okada H. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method[J]. *Exploration Geophysics*, 2006, 37(1): 73-85.
- [18] Yang M, Elkiabi M, Rial J A. An inversion scheme to model subsurface fracture systems using shear wave splitting polarization and delay time observations simultaneously[J]. *Geophys J Int*, 2005, 160(3): 939-942.
- [19] Xu P F, Ling S, Zhang D M, et al. Geothermal exploration and exploitation using microtremor survey method: methodology and examples[C]//Denver: 2010 SEG Annual Meeting, 2010.
- [20] Toksoz M N, Zhang H J, Li J L. Geothermal reservoir characterization using passive seismic tomography: A case history[C]//The Istanbul 2012-International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition, 2012.
- [21] Reiter D, Leidig M, Ferris A, et al. Improved time-dependent seismic monitoring systems for shallow reservoir characterization[J]. presented at the 2011 SEG Annual Meeting, 2011.
- [22] Zhang H, et al. Joint geophysical imaging of the Utah area using seismic body waves, surface waves and gravity data: Eos Trans[J]. presented at the AGU Fall Meeting Abstracts, 2009.
- [23] Yang Y J, Ritzwoller M H, Jones C H. Crustal structure determined from ambient noise tomography near the magmatic centers of the Coso region, southeastern California[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(2).
- [24] Vlahovic G, Elkiabi M, Rial J A. Shear-wave splitting and reservoir crack characterization: the Coso geothermal field[J]. *J Volcanol Geoth Res*, 2003, 120(1): 123-140.
- [25] Lou M, Shalev E, Malin P E. Shear-wave splitting from micro-earthquakes seismograms in the Northwest Geysers, California[J]. *EOS*, 1997, 77(46): 513.
- [26] Rial J A, Elkiabi M, Yang M. Shear-wave splitting as a tool for the characterization of geothermal fractured reservoirs: lessons learned[J]. *Geothermics*, 2005, 34: 365-385.
- [27] Elkiabi M, Rial J A. The Geysers geothermal field: results from shear-wave splitting analysis in a fractured reservoir[J]. *Geophys J Int*, 2005, 162: 1024-1035.
- [28] Verdon J P, Kendall J M. Detection of multiple fracture sets using observations of shear-wave splitting in microseismic data[J]. *Geophysical Prospecting*, 2011, 59: 593-608.
- [29] Simiyu S M, Malin P E. A "Volcanoseismic" approach to geothermal exploration and reservoir monitoring: Olkaria, Kenya and Casa Diablo[C]//Kyushu-Tohoku: The Proceedings of the World Geo-

thermal Congress 2000,2000.

[30] Hough S E, Lees J M, Monastero F. Attenuation and source properties at the Coso Geothermal Area, California [J]. B Seismol Soc Am, 1999, 89 (6) : 1606–1619.

[31] Muksin U, Haberland C, Bauer K, et al. Three-dimensional upper crustal structure of the geothermal system in Tarutung (North Sumatra, Indonesia) revealed by seismic attenuation tomography [J]. Geophysical Journal International, 2013, 195 : 2037–2049.

[32] Wu H T, Lees J M. Attenuation structure of Coso geothermal area, California, from wave pulse widths [J]. B Seismol Soc Am, 1996, 86 (5) : 1574–1590.

[33] Sanders C, Ho-Liu P, Rinn D, et al. Anomalous shear wave attenuation in the shallow crust beneath the Coso volcanic region, California [J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth (1978 – 2012), 1988, 93 (B4) : 3321–3338.

[34] Wei S J, DeAngelo M V, Hardage B A. Advantages of joint interpretation of P-P and P-SV seismic data in geothermal exploration [J]. Interpretation, 2014, 2 (2) : 117–123.

[35] Wang J, Sun Z. Amazing geothermal [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

[36] Casini M, Ciuffia S, Fiordelisi A, et al. Results of a 3D seismic survey at the Travale (Italy) test site [J]. Geothermics, 2010, 39 (1) : 4–12.

[37] Wei S J, DeAngelo M V, Hardage B A. Interpretation of multicomponent seismic data across Wister geothermal field, Imperial Valley, California [J]. Interpretation, 2014, 2 (2) : 125–135.

An overview of methods for geothermal seismic exploration

WANG Dan¹, WEI Shui-Jian¹, JIA Yue-Wei¹, LU Zhi²

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute of Sinopec, Beijing 100083, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield Branch Company of PetroChina, Panjin 124010, China)

Abstract: Geothermal resources are very abundant in the world and thus have great exploration potential. In addition, the geothermal resources will considerably stimulate the global economic development. In the exploration and development of geothermal resources, the seismic technique has been playing the essential role. This technique mainly includes active and passive seismic methods which are to be conducted at different stages of geothermal exploration. In this paper, seismic responses of geothermal reservoir are analyzed first, then new technologies of passive and active seismic methods are summarized, with the purpose of providing some valuable references for the geothermal seismic exploration in China. Studies show that passive seismic method should be conducted first in the initial geothermal survey. Nevertheless, this method has some limitations on the precision in the fracture detection and the description of permeability features; in contrast, active seismic method, which relies on the high S/N ratio and high-resolution itself, can describe reservoir characteristics better, therefore guaranteeing more-refined regional evaluation and extreme site optimization of undeveloped geothermal areas. Besides, multi-wave technique also will be the future orientation of geothermal development.

Key words: geothermic resources; seismic exploration; passive seismic survey; active seismic survey; multi-wave technique

作者简介: 王丹 (1987–), 女, 助理工程师。2012 年毕业于中国石油大学 (北京) 地球探测与信息技术专业, 获硕士学位。现在中国石化石油勘探开发研究院从事储层预测研究工作。