

深部热储层弱地震信号采集技术研究

王瑞贞, 王金宽, 李海东, 崔宏良, 唐美珍

中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 河北 任丘

收稿日期: 2022年10月19日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

摘要

我国地热资源丰富, 分布范围广泛, 经过多年持续勘探开发, 浅部地热资源大多已探查完毕, 目前探查目标以深部地热资源为主。在众多地球物理勘探方法中, 地震勘探是地热资源勘探开发最有效的手段。受深部热储层地质条件影响, 地震反射信号弱, 信噪比低, 热储层成像效果差, 制约了深部地热资源的开发利用。本文通过对热储层地球物理特征的分析, 认为热储层与盖层间强波阻抗界面的屏蔽作用、热储层内部较小的反射系数以及热储层中的热液、蒸汽等高温流体对地震波严重的吸收衰减是造成深部热储层地震反射信号弱的主要原因。提出了一套以高精度可控震源低频激发、高灵敏度检波器长排列接收、小面元高覆盖等技术为主的地震资料采集技术, 应用到青海共和盆地干热岩地震采集中, 取得了很好的应用效果。

关键词

热储层, 弱信号, 地震采集, 高密度

A Study on the Acquisition Technology for Weak Seismic Signals from Deep Geothermal Reservoirs

Ruiwen Wang, Jinkuan Wang, Haidong Li, Hongliang Cui, Meizhen Tang

BGP, CNPC, Renqiu Hebei

Received: Oct. 19th, 2022; accepted: Nov. 23rd, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

There are rich geothermal resources widely distributed in China. After years of continuous exploration and production, most of the shallow geothermal resources have been explored. At present,

文章引用: 王瑞贞, 王金宽, 李海东, 崔宏良, 唐美珍. 深部热储层弱地震信号采集技术研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(11): 1519-1531. DOI: 10.12677/ag.2022.1211147

the exploration mainly focuses on deep geothermal resources. Among many geophysical exploration methods, seismic exploration is the most effective means of geothermal resource exploration and development. The weak seismic reflection signal, low S/N ratio and poor imaging of thermal reservoirs due to their seismic geological conditions restrict the production and utilization of deep geothermal resources. Based on the analysis of the geophysical characteristics of the thermal reservoir, it is concluded that the main reasons for the weak seismic reflection signal of deep thermal reservoir are the shielding effect of the strong wave impedance interface between the thermal reservoir and the cap, the small reflection coefficient in the thermal reservoir and the serious absorption and attenuation of the seismic wave by the high temperature fluids such as hydrothermal fluid and steam in the thermal reservoir. A set of seismic data acquisition techniques based on high precision vibroseis, low frequency excitation, high sensitivity geophone, long array receiving, small surface element, high coverage and other technologies are put forward, which has been applied to the dry hot rock seismic acquisition in Gonghe Basin, Qinghai Province, and achieved good application results.

Keywords

Geothermal Reservoir, Weak Signal, Seismic Acquisition, High Density

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地热资源作为新型清洁性可再生能源，已得到世界各国的普遍重视。据国土资源部发布官方数据表明，我国深部水热型地热资源折合标准煤 1.25 万亿吨，深部干热岩资源量折合标准煤 856 万亿吨，是中国目前年度能源消耗总量的 26 万倍，勘探开发意义非常重大。根据地热能赋存埋深和温度，将其分为浅层地热资源、水热型地热资源及增强型地热资源(干热岩地热资源)三类。浅层地热资源，指蕴藏于地表一定深度(一般小于 200 m)范围内岩土体、地下水和地表水的热能，主要通过热泵进行利用。水热型地热资源，指蕴藏在地下水中，通过天然通道或人工钻井进行开采利用的地热能。干热岩地热资源，指埋深 3000 m、温度大于 200°C，内部不存在流体或仅有少量地下流体的有较大经济开发价值的热储岩体。随着我国“绿色发展战略”的不断推进，地热资源勘探已转向资源储量更大的深部勘探。

我国地热资源勘查评价始于 20 世纪 50 年代，通过多年的勘查和评价，为国家探明了一批中高温地热田，并初步掌握了全国 2000 米以浅的地热资源基本状况和分布规律，形成了以非地震为主、地震勘探为辅的地热综合地球物理勘查技术。利用重力法可以确定地热田基底起伏(凸起和凹陷)及断裂构造的空间展布，利用磁法可以确定水热蚀变带位置和隐伏火成岩体的分布、厚度及其与断裂带的关系，利用电法可以圈定热异常和确定热储体的范围、深度，利用大地电磁法可以确定高温地热田的岩浆房及热储位置与规模，但这些非地震方法精度低，无法满足深部地热精细勘探开发的需求。地震方法作为一种超深且高精度的勘探方法，可以准确测定断裂位置、产状和热储构造，很大程度上弥补了重磁电方法勘探的不足，已成为地热资源勘探开发最有效的手段。但是，深部沉积岩地热储层经长期的沉积，地质年代相对久远，地层岩性多变，加之多期不同构造运动的叠合，受压实作用的影响，内幕地层构造复杂，层间反射系数小；深部老地层与上覆地层常存在强波阻抗界面，该强波阻抗界面对下伏热储层地震信号具有强屏蔽作用。深部火成岩热储层与围岩间存在强波阻抗界面，对地震波有很强的屏蔽作用，使能量难以传

播到干热岩体内部，导致接触面内侧干热岩层的反射波能量较弱，信噪比较低。另外，高温干热岩体一般为准块状结构，层理分层差，层间反射系数小，导致反射波能量弱，干热岩体内部地层信噪比低。两种类型的储层在地震资料上均表现为反射波能量弱，信噪比低，横向连续性差等特征，如何获取热储层的弱反射信号是地震勘探的难点。针对这一问题，国内外未见系统性的研究成果，王庆华、韩文功等[1][2]对弱信号的表现类型和特征进行了研究，结果表明当弱信号的信噪比大于2时，可以分辨弱信号，当信噪比为1时，识别困难，当信噪比为0.5时，无法识别弱反射信号。王志、李可恩、王瑞贞等[3][4][5][6]针对高速层屏蔽下的弱反射信号，提出了利用长排列广角反射地震勘探方法。余德平等[7]-[12]认为利用低频信号可以明显削弱玄武岩高速屏蔽层的影响，提高屏蔽层下深层成像的质量。王延光、陈昊金等[13][14]利用高精度高密度三维地震勘探技术解决深层火山岩弱信号的成像问题。赵路子、徐礼贵等[15][16][17]认为低频与宽频激发、宽线长排列高覆盖观测、两宽一高三维地震勘探技术有效解决了深层-超深层勘探难题，获得了良好地质效果。针对深部热储层反射信号弱的问题，本文提出了一套综合高精度可控震源低频激发、高灵敏度检波器长排列接收、高密度采集为主要内容的地震资料采集技术，并以青海共和盆地干热岩勘探为例，展示了应用效果，希望对深部热储层弱信号采集提供借鉴。

2. 地球物理特征及弱信号采集技术

2.1. 深部热储层地球物理特征

在地震勘探中反射信号强弱主要以在一定噪声背景下有效反射波幅度(波形)大小来衡量，所谓弱信号是指在一定噪声背景下有效信号的幅度值很小，视觉难以分辨。地质目标的类型、规模、厚度、地层及构造发育等复杂的地质条件以及近地表地震地质条件是造成地震反射信号弱的主要因素。深部火成岩热储层与围岩间存在强波阻抗界面，对地震波有很强的屏蔽作用，使能量难以传播到干热岩体内部；另外，高温干热岩体一般为准块状结构，地层分层差，界面杂乱无章，延伸规模小，层间反射系数小。如图1综合测井曲线图上，在花岗岩顶界面(Tg)上下速度、波阻抗发生突变，对应地震记录为强反射，Tg面以下反射系数变小，地震记录信号弱，反射杂乱。沉积岩地热储层是经过漫长的地质年代形成的，地层岩性多变，加之多期不同构造运动的叠合，使储层格局十分复杂，新老地层之间常存在强波阻抗界面，对地震波有很强的屏蔽作用；受压实作用的影响，老地层速度差异和层间反射系数小；受多期构造运动的影响，老地层通常构造复杂、起伏剧烈。如图2是某沉积岩水热井综合测井曲线与地震剖面，从图上可以看出Tg面上下地层速度、波阻抗与剖面地震波特征与上述表现类似。两种类型的热储层都存在上覆强反射界面的屏蔽和内幕反射系数小的问题，在地震资料上均表现为反射波能量弱，信噪比低，横向连续性差。另外，热储层内部发育有裂缝，进一步降低了资料信噪比。因此，地震资料采集的任务是采用合理的方法，克服强波阻抗界面的屏蔽作用，提高热储层内部弱反射资料的信噪比，提高热储层的成像效果。

2.2. 弱地震信号采集技术

通过深部热储层地球物理特征分析，笔者认为针对深层弱地震信号采集应该从地震波激发、接收和观测系统设计三个方面结合解决，主要方法包括：1) 激发：加大炸药震源激发药量或利用大吨位可控震源、低频激发，提高地震波下传能量；2) 接收：采用高灵敏度检波器长排列接收，提高弱信号的接收能力；3) 观测系统：采用小面(线)元、高密度采集，通过对波场的充分、均匀和对称采样减少弱信号的损失。

2.2.1. 可控震源低频激发技术

地层对地震波的吸收衰减作用遵循 $G(f,t) = e^{-\pi f t / Q}$ 规律，式中， f 为地震波频率， t 是传播时间，

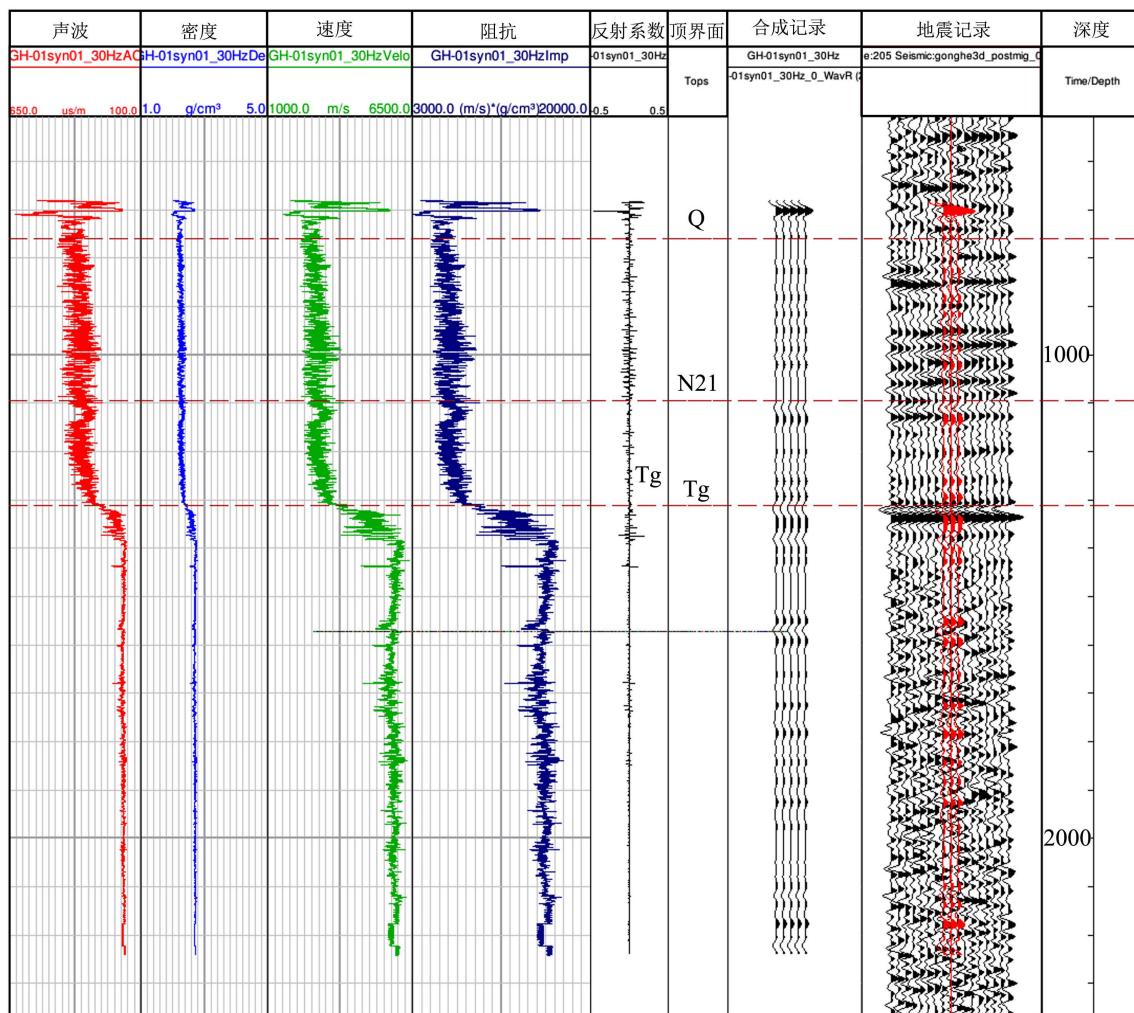


Figure 1. Comprehensive logs of Well GH1 and the over well seismic section
图 1. GH1 井综合测井曲线与过井地震剖面

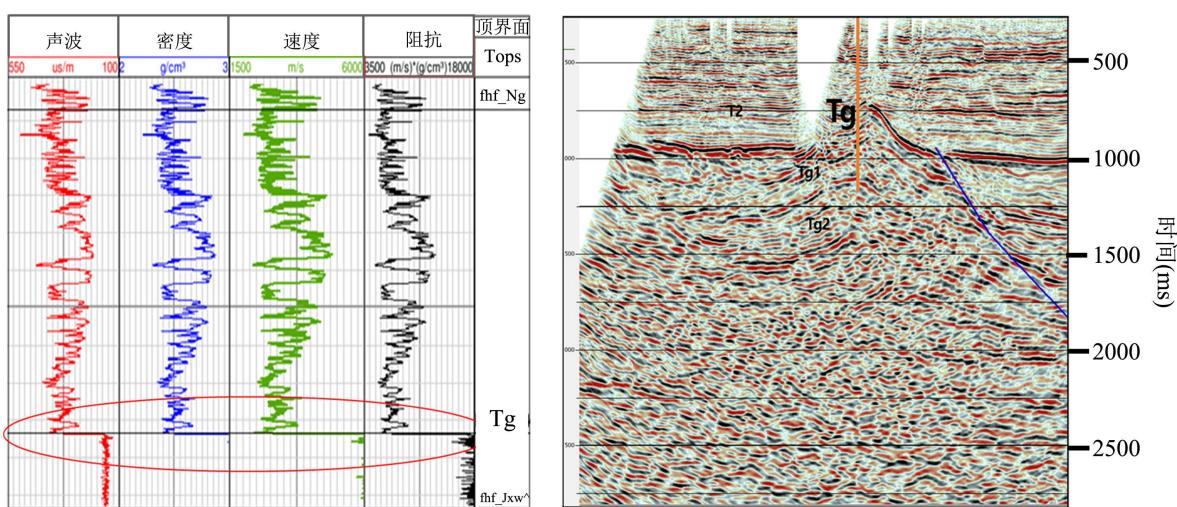


Figure 2. Comprehensive logs of a sedimentary hydrothermal well and its seismic profile
图 2. 某沉积岩水热井综合测井曲线与地震剖面

Q 为地层品质因子。它反映出地层对地震波的吸收衰减和频率有关，随着频率的增加呈指数增强。同时也表明，低频信号有较强的抗吸收能力，更易穿透高速屏蔽层，提高深层成像质量。如图 3 所示，主频分别为 25 Hz 和 50 Hz 雷克子波在同一地层内经过相同的传播时间，衰减前后子波形态和振幅变化情况，50 Hz 的吸收衰减明显强于 25 Hz。因此，用低频激发技术降低强波组抗界面的屏蔽影响，提高原始资料品质是可行的。

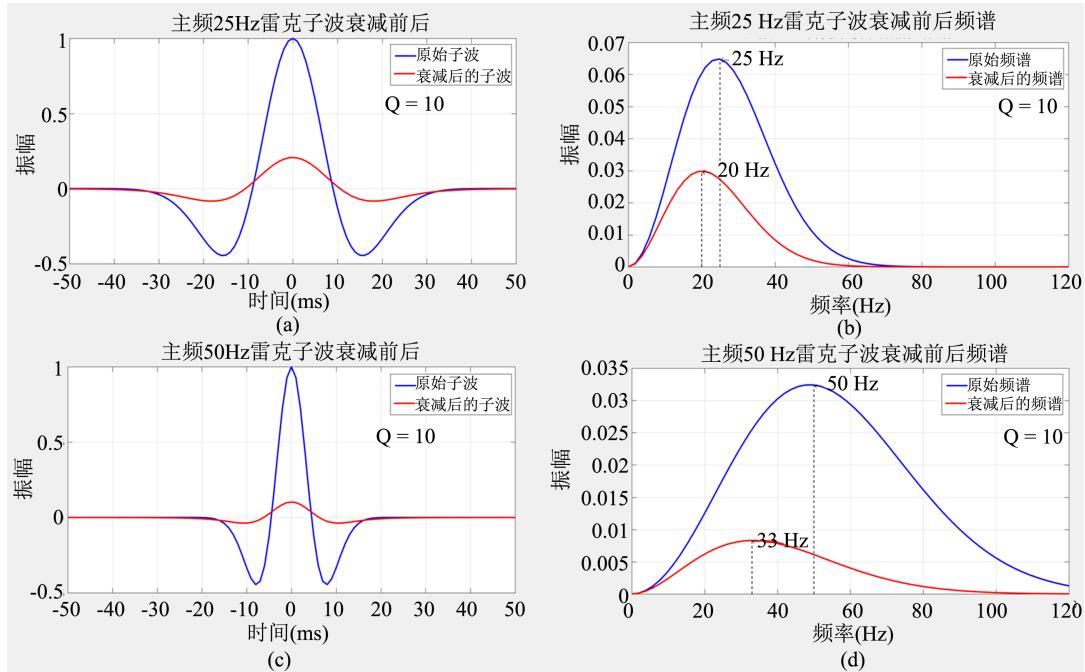


Figure 3. The Ricker wavelets of different dominant frequencies before and after attenuation: (a) The 25 Hz Ricker wavelet before and after attenuation, (b) The spectrum of the 25 Hz Ricker wavelet before and after attenuation, (c) The 50 Hz Ricker wavelet before and after attenuation, (d) The spectrum of the 50 Hz Ricker wavelet before and after attenuation

图 3. 不同主频雷克子波衰减前后对比。(a) 主频 25 Hz 雷克子波衰减前后；(b) 主频 25 Hz 雷克子波衰减前后频谱；(c) 主频 50 Hz 雷克子波衰减前后；(d) 主频 50 Hz 雷克子波衰减前后频谱

根据热储层特征，建立了以花岗岩为热储层的模型，如图 4(a)所示。花岗岩分为两层，速度分别为 4800 m/s 和 5400 m/s，上覆砂泥岩速度分别为 2100 m/s 和 2900 m/s。分别采用 3 Hz、15 Hz、30 Hz 不同主频子波进行波动方程正演模拟，模拟结果如图 4(b)~(d)。从正演单炮看，3 Hz 激发获得的花岗岩地层能量最强，15 Hz 次之，30 Hz 最弱。

通常可控震源激发采用线性扫描方式，通过降低起始扫描频率增强深部储层弱反射信号能量。若突出某一频段信号能量，本文提出了一种可控震源非线性信号设计方法。已知可控震源线性升频信号时域表达式：

$$s(t) = A \sin 2\pi \left(f_1 + \frac{(f_2 - f_1)t}{2T} \right) t \quad (1)$$

其中， T 为扫描长度， f_1 、 f_2 为起止频率， A 为振幅。扫描时段(Δt)的总能量 E 为：

$$E = \sum_{j=0}^{\Delta t} A^2 \sin^2 2\pi \left(f_1 + \frac{(f_2 - f_1)t}{2T} \right) t \quad (2)$$

上式中设： $A = 1$ ， $f_1 = 1.5$ Hz， $f_2 = 84$ Hz， $\Delta t = 2$ ms， $T = 12$ s，绘制 E 随 t 变化曲线，如图 5 所示。

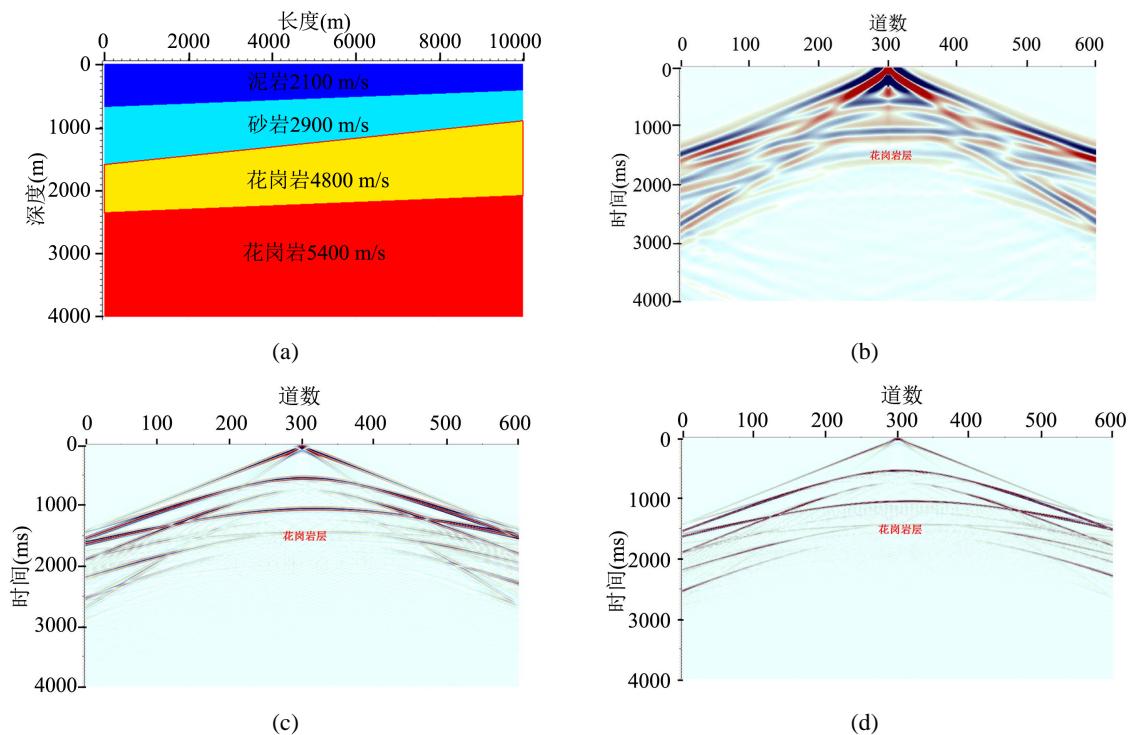


Figure 4. The theoretical model. The observation system is 2990-5-10-5-2990 (a) and the 3 Hz (b), 15 Hz (c) and 30 Hz (d) dominant frequency forward modeling seismic records

图 4. 理论模型(a)和 3 Hz (b)、15 Hz (c)、30 Hz (d) 主频正演模拟地震记录

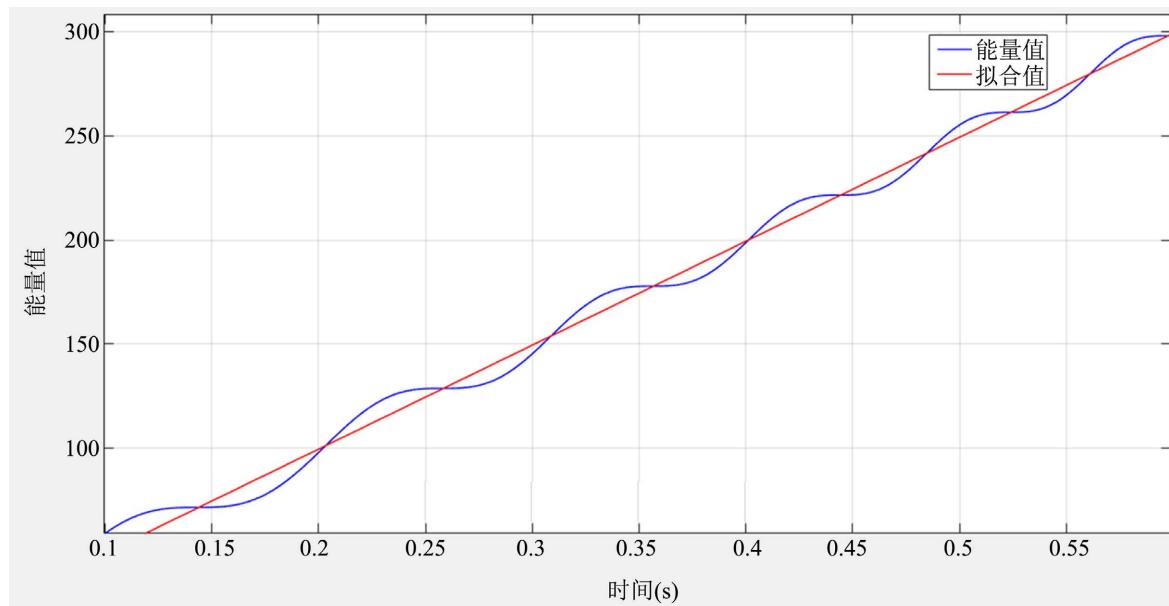


Figure 5. Schematic diagram of the time-integrated curve of vibroseis energy

图 5. 可控震源能量的时间积分曲线示意图

图 5 中红色直线是能量的线性拟合，从图 5 可以看出，能量的时间积分近似线性的。根据这一结果，可以通过改变不同频段的扫描时间来改变可控震源能量分配，提高目的层不同频段的地震响应，达到提高原始资料品质的目的。将该项技术应用于弱信号的采集中，可以在震源线性扫描方式的基础上，进一

步加强低频信号能量，增强信号抗屏蔽能力。图 6 是可控震源非线性扫描信号试验记录对比，震源起止扫描信号为 1.5 Hz~84 Hz，按频率分成 1.5 Hz~10 Hz、10 Hz~30 Hz、30 Hz~60 Hz 和 60 Hz~84 Hz 四段，信号 1 在 60 Hz 以下三个频段的扫描时间比信号 2 分别长了 800 ms、3500 ms 和 700 ms，而在 60 Hz~84 Hz 频段，信号 2 比信号 1 长了 5000 ms，从两个不同扫描信号的单炮记录及其频谱曲线上可以看出，同一目的层地震响应特征明显不同，信号 1 的记录主频较信号 2 的低，信噪比高。利用该项技术，可以通过改变目标频段的扫描时间来改变可控震源不同频段的能量分配，达到提高目的层资料品质的目的。

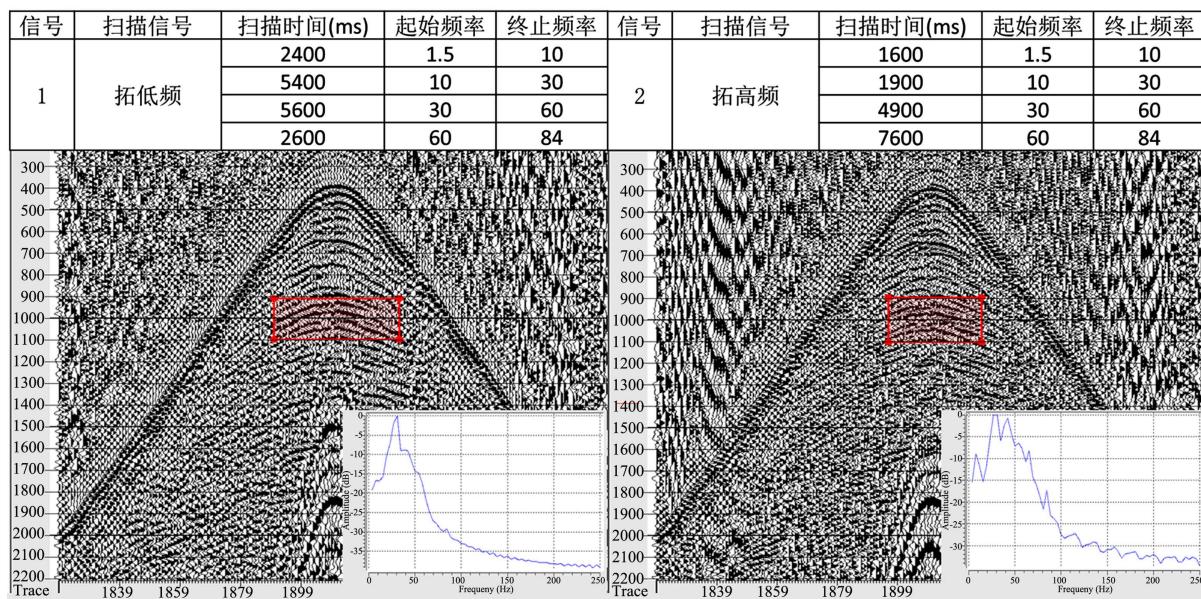


Figure 6. Comparison of the vibroseis nonlinear sweep signal test records

图 6. 可控震源非线性扫描信号试验记录对比

2.2.2. 高精度接收技术

灵敏度是检波器对外部激励(振动)输入相应的敏感程度，通常用输出和单位输入的比值表示。从其物理意义可知，同等条件下灵敏度越高输出信号的振幅就越强，有利于接收弱小信号(图 7)。所以，在其他技术指标等同的条件下，较高灵敏度的检波器有更佳的弱小信号响应能力。自然频率是决定检波器低截频第一要素，其能有效接收的最低频率为自然频率的四分之一。为了能够响应 1.5 Hz 甚至更低频率的地震信号，检波器的自然频率应不大于 6 Hz。因此，深部热储层地震勘探，需要采用高灵敏度、低自然频率的检波器，提高弱信号的接收能力。目前，常用的检波器如表 1 所示，弱地震信号采集应选择自然频率为 5 Hz，灵敏度大于 80 V/m/s 的检波器。

Table 1. Main technical parameters of commonly used geophones (including nodes)

表 1. 常用检波器(含节点)主要技术参数表

检波器类型	GT DS5-5 Hz	GT DS5-10 Hz	GT DS-5 Hz3X1	SN5-5 Hz	SN5-10 Hz	SG5-5 Hz	Smartsolo	Quantum	eSeis	30DX-10	30DX-10 Hz5X2
自然频率(Hz)	5	10	5	5	10	5	5	5	5	10	10
直流电阻(Ω)	1920	1800	5760	1820	1550	1850	1850	1850	1920	395	707.5

Continued

阻尼系数	0.6	0.56	0.6	0.7	0.68	0.6	0.6	0.6	0.6	0.3	0.707
开路灵敏度 (V/m/s)	83.2	85.8	249.6	86	98	80	80	80	83.2	28	100.5
失真度	<0.1%	$\leq 0.1\%$	$\leq 0.2\%$	$<0.1\%$	$<0.1\%$	$\leq 0.1\%$					

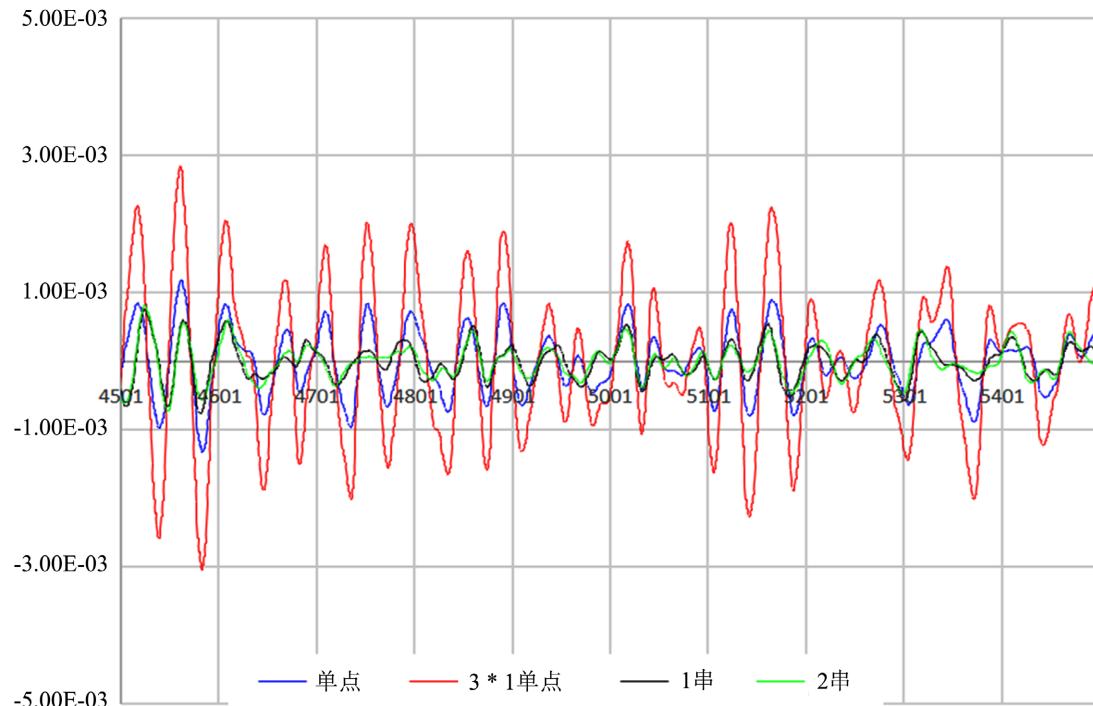


Figure 7. Comparison of the true amplitudes of different geophones in the target layer.
图 7. 不同检波器目的层真振幅对比

2.2.3. 高密度采集技术

近年来以高密度三维地震勘探技术提高地震勘探精度已成为业界的共识，高密度采集通过对波场的充分、均匀和对称采样减少弱信号的损失，提高剖面和反演精度。高密度采集中面元、覆盖次数是两个最重要的参数，小面元有利于提高空间采样精度，高覆盖有利于提高信噪比，二者均有利于提高成像质量。

小面元地震数据的优势可概括为：①提高空间采样精度，提高横向分辨率；②可得到完整的线性噪声波场，有利于噪声压制；③有利于反演高精度的近地表速度模型；④可获得高质量的初至波，利于基于初至波层析反演的静校正。从图 8 不同面元时间切片对比看，小面元资料断裂系统更清楚，分辨率更高，有利于热储层内幕弱信号的利用。

高覆盖技术是地震勘探提高信噪比和目的层能量的主要技术。花岗岩内地层受反射系数小、成层性差、屏蔽严重等因素影响，资料信噪比极低，高覆盖技术解决这一问题的有效手段。图 9 是花岗岩不同覆盖次数的照明效果。从图中可以看出，随着覆盖次数的提高，目的层的照明效果越来越好。从实际资料不同覆盖次数叠加剖面对比看(图 10)，覆盖次数越高热储层资料信噪比越高、地质现象越清晰。

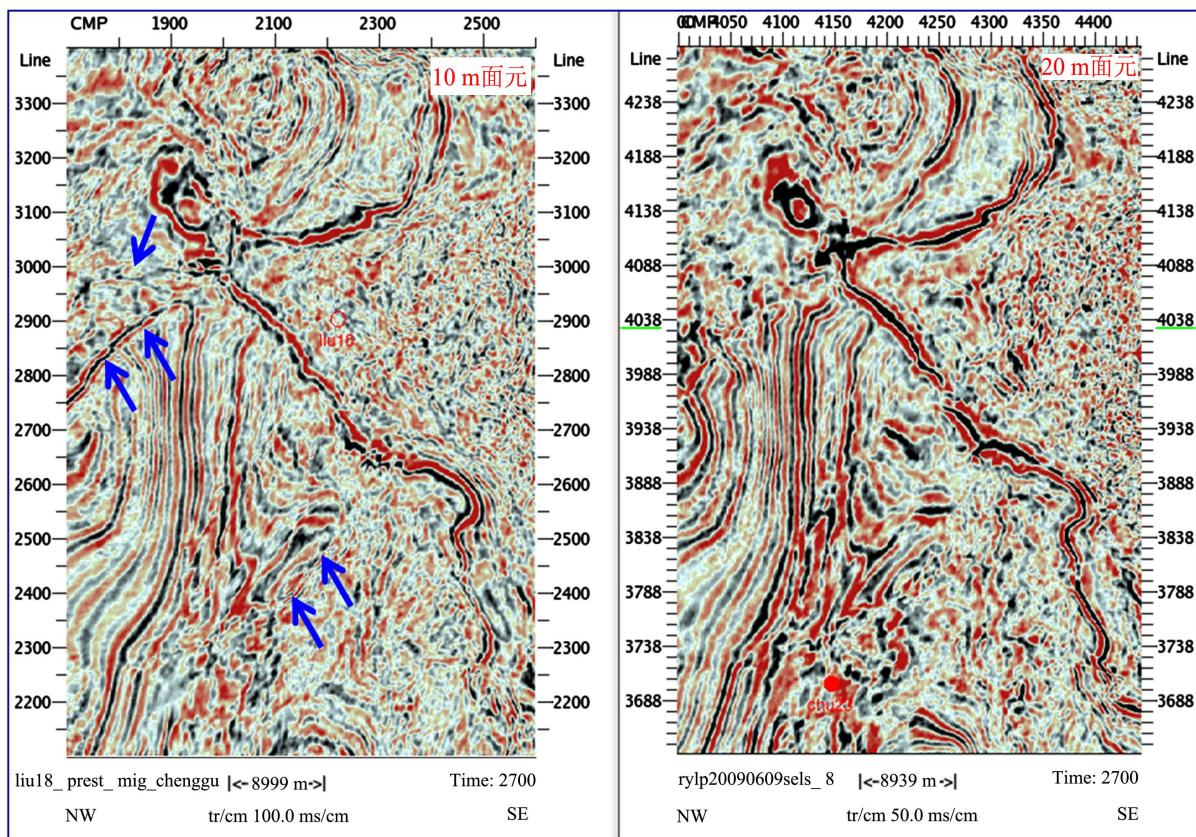


Figure 8. Comparison of the time slices of different bin sizes
图 8. 不同面元时间切片对比

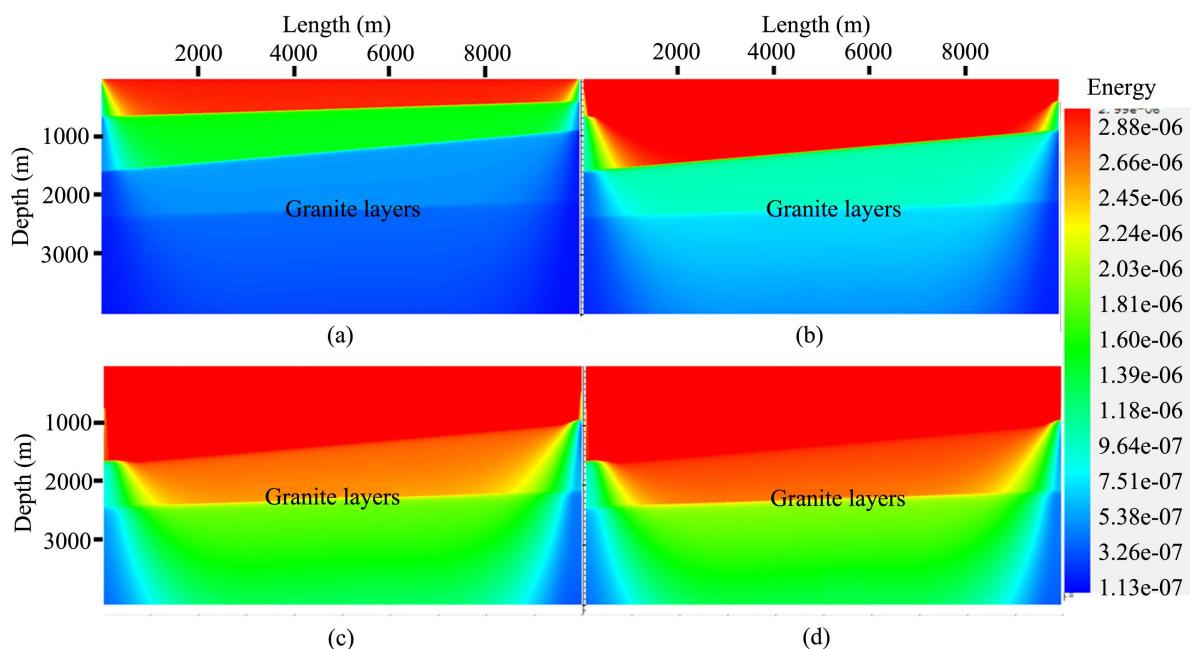


Figure 9. Comparison of the illumination effects of the data acquired from the HDR using different folds ((a) 200 folds, (b) 400 folds, (c) 600 folds and (d) 800 folds)
图 9. 干热岩不同覆盖次数照明效果对比((a) 200 次、(b) 400 次、(c) 600 次、(d) 800 次)

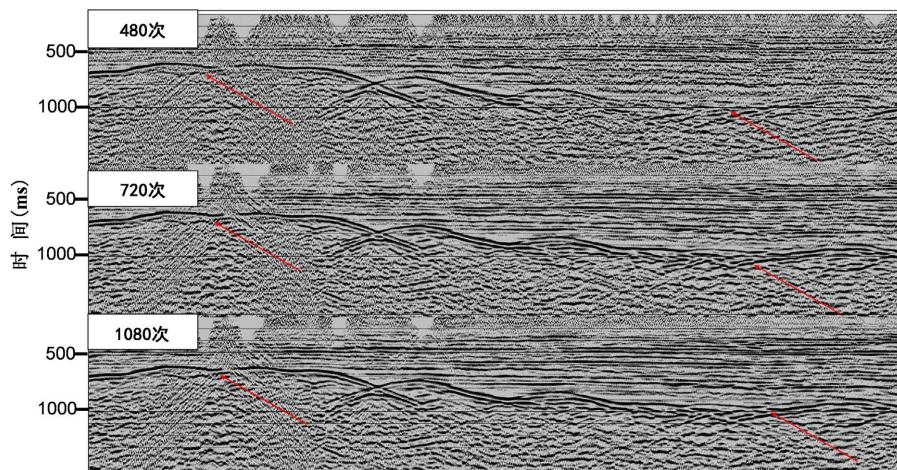


Figure 10. Comparison of the stackings sections of the data acquired using different folds in a sedimentary rock thermal storage area

图 10. 某沉积岩热储区不同覆盖次数叠剖面对比

3. 共和盆地干热岩地震采集技术及效果

青海共和盆地位于青藏高原东部，资源类型为沉积盆地型干热岩[18]。盆地内部上覆巨厚沉积地层为新近系(N)和第四系(Q)的泥岩和砂岩，地热资源储层主要为印支期花岗岩，花岗岩岩体有较好的导热性，深部热能沿花岗岩体向上传导，沉积地层热导率极低，上覆沉积地层起到隔热作用，防止热能继续向上逸散，为高品位干热岩资源的形成创造了条件[19] [20] [21] [22] [23]。

研究区地形较为平坦，地表由草场、砂山土地等地貌组成。区内第四系沉积物厚达1000 m以上，特别是南北两侧山前堆积有巨厚的分选性极差砾石层，极不利于野外施工，对地震记录的品质也影响极大。区内主要发育中晚更新世河流相砂砾卵石、早中更新世共和组、上新世临夏组、中新世咸水河组与中晚三叠世花岗岩，勘探目的层为花岗岩，埋深1500~6000 m之间。共和盆地的地震勘探工作主要集中在90年代，采用可控震源激发，覆盖次数只有30~60次。从以往二维采集剖面效果来看，干热岩岩体成像不清楚(图11中圈定的位置)，无法满足精细刻画断层、裂隙、破碎带等发育情况，深层能量弱，无法落实深层干热岩体的分布及埋深。

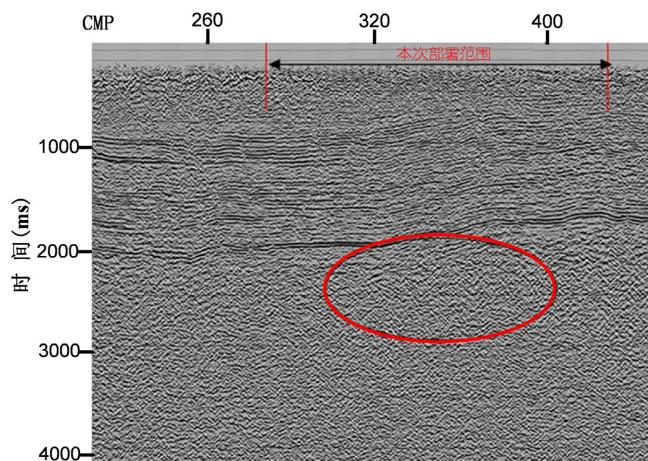


Figure 11. The section of the hot dry rock development area in Gonghe Basin

图 11. 共和盆地干热岩发育区剖面

根据研究区内 GH1 井资料(图 1), 基底花岗岩与上覆地层砂泥岩密度和速度差异很大, 二者形成了一个很强的波组抗界面, 激发产生的地震入射波到达这一界面时, 产生的反射波能量强, 透射波能量弱, 屏蔽作用严重, 造成目的层反射能量弱, 影响了目的层成像效果。基岩花岗岩地层速度、密度差异小, 反射系数较小, 不利于地震成像。

在共和盆地开展干热岩三维地震采集中, 为了获得热储层弱地震信号, 改善资料成像效果, 在激发方面, 一是采用了大吨位 EV56 高精度低频可控震源组合激发(2 台 1 次), 同时增大了扫描长度(18 s), 增强地震波穿透火成岩顶界面的能力, 提高弱信号的反射能量; 二是采用宽频扫描技术, 降低扫描起始频率, 采用 2~96 Hz 扫描起止频率, 低频有利于克服花岗岩顶界面的屏蔽作用, 提高下传能量, 高频有利于提高分辨率。在接收方面, 采用单只 smartsolo-5 Hz 低频节点接收, 一方面避免了组合效应损伤弱信号, 另一方面较低的自然频率(5 Hz)和较高的灵敏度(80 V/m/s), 有利于提高低频弱信号的接收能力。在观测系统方面, 采用高密度采集技术, $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 小面元、600 次以上覆盖次数的观测系统(表 2), 覆盖密度达到了 600 万/km², 有利于提高热储层的弱信号的成像效果。

Table 2. The 3D Seismic Geometry in GH1 Well Area, Gonghe Basin

表 2. 共和盆地 GH1 井区三维地震观测系统表

观测系统类型	14 L \times 15 S \times 253 T 正交全排列接收	炮线距	6 m/120m
面元大小	10 m \times 10 m	激发点距	10 m/20m
覆盖次数	600~1140 次	最大非纵距	3890 m
接收道数	3308 道	最大炮检距	6374 m
接收线距	300 m	横纵比	0.77
道距	20 m		

图 12 是共和盆地干热岩叠加剖面, 新生界沉积地层波阻特征明显, 花岗岩顶面特征清楚, 深层花岗岩内幕信息丰富, 达到了干热岩勘探需求。

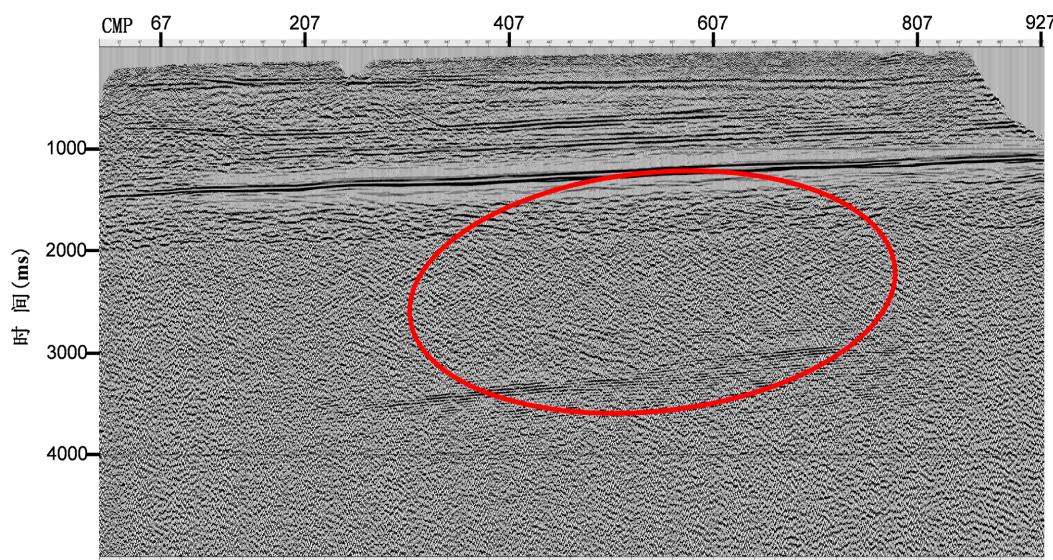


Figure 12. The new section of the data acquired from the HDR in Gonghe Basin

图 12. 共和盆地干热岩新采集剖面

4. 结论

1) 深部热储层地震反射信号弱主要有三方面的原因：一是热储层与盖层速度、密度差异大，波阻抗差异大，形成了一个较强的波阻抗界面，对能量下传造成了很强的屏蔽作用；二是热储层内部速度密度变化小，没有有效的波阻抗界面，反射能量弱；三是热储层中存在热液、蒸汽等高温流体，吸收衰减严重。

2) 深部热储层弱信号的采集问题应从激发、接收和观测系统三方面综合考虑，通过一系列配套技术的综合应用解决。强能量或高精度可控震源低频激发、高灵敏度检波器长排列接收、高密度采集是一套行之有效的方法。

3) 在深部热储层地震勘探中，弱信号的采集、处理和解释都具有挑战性，需要一体化攻关才能取得好的效果。

致 谢

感谢国家重点研究开发项目(批准号：2020YFE0201300)的支持。

基金项目

本研究得到国家重点研发计划的资助(批准号：2020YFE0201300)。

参考文献

- [1] 王庆华. 地震弱反射信号地震响应特征分析[J]. 内江科技, 2013, 34(3): 57+40.
- [2] 韩文功, 张军华. 弱反射地震信号特征及识别方法理论研究[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(2): 232-236.
- [3] 王志, 贺振华, 黄德济, 王熙明, 杜正聪. 高速屏蔽层下弱反射层地震勘探——广角反射[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(5): 23-27.
- [4] 李可恩, 熊晓军, 杨俊. 高速屏蔽层下地震数据的采集[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(4): 527-531.
- [5] 王瑞贞, 王晓东, 等. 广角反射在复杂弱反射区的应用研究与效果[J]. 工程技术, 2022(3): 136-140.
- [6] 王瑞贞, 白旭明, 王金宽, 等. 朝克乌拉凹陷火成岩覆盖区地震勘探方法研究[J]. 石油物探, 2020, 59(3): 382-395.
- [7] 陶知非. 低频地震激发中的能量问题[J]. 物探装备, 2018, 28(2): 71-73.
- [8] 陶知非, 刘志刚, 马磊, 郝磊. EV-56 高精度可控震源技术[J]. 物探装备, 2018, 28(5): 281-282+288.
- [9] 崔仁胜, 周银兴, 陈阳, 等. 精密可控震源非线性扫描信号优化设计[J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(1): 117-124.
- [10] 裴正林, 牟永光. 火成岩区地震波传播规律研究[J]. 石油物探, 2004, 43(5): 433-437.
- [11] Liu, K., Liu, H., Wu, Z. and Yue, L. (2016) Seismic Acquisition Parameters Analysis for Deep Weak Reflectors in the South Yellow Sea. *Journal of Ocean University of China*, **15**, 758-766. <https://doi.org/10.1007/s11802-016-2978-9>
- [12] 余德平, 管路平, 徐颖, 李佩. 应用低频信号提高高速玄武岩屏蔽层下的成像质量[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(5): 565-567.
- [13] 王延光, 刘国章, 梁鸿贤, 等. 深层火山岩油气藏高精度三维地震采集观测系统设计[J]. 油气地球物理, 2020, 18(1): 43-48.
- [14] 陈吴金, 于静, 张怀邦, 吴安楚. 高密度地震采集弱反射信号的变化规律[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 701-710.
- [15] 赵路子, 张光荣, 等. 深层复杂地质构造带地震勘探关键技术——以四川盆地龙门山断褶带北段为例[J]. 地质勘探, 2018, 38(1): 39-48.
- [16] 徐礼贵, 倪宇东, 李明杰. 超深层地震勘探攻关的三项进展[C]//中国石油学会石油物探专业委员会, 国际勘探地球物理学家学会. SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议论文集(中文): 2020 年卷. 石油地球物理勘探, 2020: 1351-1354.

-
- [17] 白旭明, 李海东, 陈敬国, 等. 可控震源单台高密度采集技术及应用效果[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(6): 39-43.
 - [18] 王斌, 何世豪, 李百祥, 宋窑东. 青海共和盆地地热资源分布特征兼述 CSAMT 在地热勘查中的作用[J]. 矿产与地质, 2010, 24(3): 280-285.
 - [19] 许天福, 汪禹, 封官宏. 深部超临界地热资源研究进展及开发前景展望[J]. 天然气工业, 2021, 46(3): 155-167.
 - [20] 孙知新, 李百祥, 王志林. 青海共和盆地存在干热岩可能性探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 119-124+129.
 - [21] 薛建球, 甘斌, 李百祥, 王志林. 青海共和-贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质——地球物理特征[J]. 物探与化探, 2013, 37(1): 35-41.
 - [22] 赵贵福, 尉亮, 李百祥, 王志林. 从青海共和-贵德盆地地热勘查成果探讨干热岩综合地球物理勘查技术[J]. 甘肃地质, 2016, 25(2): 62-67.
 - [23] 王吉玉, 张兴鲁. 青海共和盆地的挽近构造运动[J]. 西北地质科技情报, 1979(1): 25-29.