

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

沉积盆地深埋型岩溶热储地震探测数据采集参数优选

龙 慧,李胜涛,穆建强,刘东林,岳冬冬,闫国钰

Parameters optimization of seismic data acquisition for deep buried karst geothermal reservoir in sedimentary basin: A case study of the Niutuo geothermal field in Xiongan New Area

LONG Hui, LI Shengtao, MU Jianqiang, LIU Donglin, YUE Dongdong, and YAN Guoyu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301017

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data 马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199

沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究

A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type 马致远, 李嘉祺, 翟美静, 吴敏, 许勇 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 9–18

胶东典型花岗岩热储地下热水水化学特征及热储研究

A study of the hydrochemical characteristics and geothermal water of typical granite geothermal reservoir in the Jiaodong area 王晓翠, 孙海龙, 袁星芳 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 186–194

四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式

A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan

李明辉,袁建飞,黄从俊,刘慧中,郭镜 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 36-46

郑州地下水均衡试验场的改建工程——主要测试设施与数据自动化采集

Reconstruction project of groundwater balance experiment site of Zhengzhou:mainly test equipments and data automatic acquisition 李俊亭, 张彦辉, 申圆圆, 刘尚杰, 王帅 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 38-43

基于多源数据的弱透水层水文地质参数反演研究

Research on hydrogeological parameter inversion of an aquitard based on multi-source data: A case study of a silt layer in the Hohhot Basin

石鸿蕾, 郝奇琛, 邵景力, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 1-7



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301017

龙慧,李胜涛,穆建强,等.沉积盆地深埋型岩溶热储地震探测数据采集参数优选——以雄安新区牛驼镇地热田为例[J].水 文地质工程地质,2023,50(4):14-25.

LONG Hui, LI Shengtao, MU Jianqiang, *et al.* Parameters optimization of seismic data acquisition for deep buried karst geothermal reservoir in sedimentary basin: A case study of the Niutuo geothermal field in Xiongan New Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 14-25.

沉积盆地深埋型岩溶热储地震探测数据采集 参数优选 ——以雄安新区牛驼镇地热田为例

龙 慧1.2,李胜涛1.2,穆建强3,刘东林1.2,岳冬冬1.2,闫国钰3

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,天津 300309;2. 天津市地热资源勘查开发工程研究中心,天津 300309;3. 中国冶金地质总局地球物理勘查院,河北保定 071052)

摘要: 深层非均质性碳酸盐岩储层已经成为我国深部地热资源规模勘探的重要对象,地震探测技术在勘探开发中必不可 少,但存在深部能量衰减严重、数据采集噪声发育、构造隆起区基底内幕成像困难等问题。为获取高品质深部地震勘探资 料,在华北冀中平原典型地区开展了大量可控震源激发参数和检波器接收参数试验。在野外试验数据的基础上,通过对不 同激发参数和接收参数获得的原始单炮记录进行定性分析,同时从频段能量、道集间频率、信噪比等方面进行定量分析, 研究可控震源台数、扫描频率、扫描长度、震动次数、驱动幅度和检波器组合方式等参数的选择对地震资料质量的影响。 结果表明适用于冀中平原地区深埋型岩溶热储二维地震勘探野外施工参数为:28 t 可控震源 4 台震动 4~6次, 驱动幅度 75%,非线性扫描(斜坡长度-3),扫描频率 6~84 Hz,扫描长度 12 s。按此参数施工获得原始单炮记录和数据处理剖面的质 量较以往有了大幅提高,能够较为清晰地划分牛驼镇凸起构造区深部蓟县系高于庄组底界面。此次优选的地震采集参数 对沉积型盆地深部地震勘探有一定的借鉴和指导意义。

关键词: 沉积盆地; 深埋型岩溶热储; 地震勘探; 数据采集; 参数优选 中图分类号: P315; P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)04-0014-12

Parameters optimization of seismic data acquisition for deep buried karst geothermal reservoir in sedimentary basin: A case study of the Niutuo geothermal field in Xiongan New Area

LONG Hui^{1,2}, LI Shengtao^{1,2}, MU Jianqiang³, LIU Donglin^{1,2}, YUE Dongdong^{1,2}, YAN Guoyu³

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin 300309,

China; 2. Tianjin Engineering Center of Geothermal Resources Exploration and Development, Tianjin 300309, China; 3. Geological Exploration Academy of China Metallurgical

Geology Bureau, Baoding, Hebei, 071052, China)

Abstract: Deep heterogeneous carbonate reservoirs have become more and more important in the deep exploration

收稿日期: 2023-01-11; 修订日期: 2023-05-04 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20221680)

第一作者:龙慧(1987-),女,硕士,高级工程师,主要从事水工环地质领域地球物理勘探技术方法应用与研究。 E-mail: longhui@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 李胜涛(1982-), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事水工环地质及地热热储工程研究。E-mail: list07@mails.jlu.edu.cn

of geothermal resources in China. The essential seismic exploration technology has many difficulties, such as serious attenuation of deep energy, low signal-to-noise ratio, difficult imaging of inner basement in tectonic uplift areas. In order to acquire high-quality deep seismic exploration data, a large number of vibroseis excitation parameters and geophone receiving parameters experiments have been received in a typical areas of the Central Hebei Plain in North China. On the basis of a large number of field experimental data, a qualitative analysis of the original single-shot records is carried out, and quantitative analysis is also carried out from the aspects of frequency band energy, inter-channel frequency, signal-to-noise ratio, etc., to study the parameter selection such as the number of vibroseis, sweep frequency, sweep length, vibration times, driving amplitude and geophone combination mode, which can affect the quality of the seismic data. In this paper, the field construction parameters for 2D seismic exploration of deep carbonate reservoirs in the North China Plain are optimized as follows: 4 sets of 28 tons vibrate 4–6 times, 75% driving amplitude, non-linear sweep (slope –3), 6–84 Hz sweep frequency, and

12 s sweep length. The quality of the single-shot records and data processing profiles are greatly improved after parameter optimization, which can be more clearly divided into the bottom interface of the Gaoyuzhuang Formation of the Jixian System and the top interface of the Archean Erathern in the Niutuozhen uplift tectonic area. The optimized seismic acquisition parameters are of certain reference and guiding significance for deep seismic exploration in sedimentary basins.

Keywords: sedimentary basin; deep buried karst geothermal reservoir; seismic exploration; data acquisition; parameters optimization

地热能作为一种清洁、低碳、绿色、环保的可再 生能源,具有储量大、分布广、稳定性好等特点。中 国地热资源分布广泛,不同类型的地热资源分布具有 明显的规律性和地带性印。碳酸盐岩热储是中国中低 温地热开发利用的主力储层,也是最具潜力的储层, 广泛分布在各大沉积盆地内[2-5]。该类岩溶热储具有 埋藏较深、非均质性强、地层结构与平面分布复杂等 特点。碳酸岩盐热储的探测以二维地震反射波法为 主⁶,是利用地震波在地层传播的吸收和衰减特性来 识别和评价地层、构造特征与地热异常。碳酸盐岩储 层具有地震波传播速度高、振幅强、频率低等地震响 应特征,且在白云岩储层会随着白云化程度增强,其 速度、密度、纵波阻抗和振幅增大四。碳酸盐岩地层 二维地震探测过程中,存在资料采集困难¹⁸、储层埋 深4000m以下地震波高频能量衰减严重¹⁹、构造隆起 区基底内幕成像差^[10]、各反射界面之间反射波彼此干 涉四等难点,造成深层地震资料信噪比和分辨率低 [12]、保幅性差、地质特征解释不够清楚、元古界碳酸 盐岩地层界面识别难等问题。

地震数据采集是后续处理和解释环节的基础^[13], 只有得到高质量的地震剖面才能对深层目的层进行 精细的追踪解释,为地热储层预测提供依据。雄安 新区地热资源丰富,3km以深存在地热开发的第二空 间——蓟县系碳酸盐岩热储,具有温度高、水量大、热 储易于回灌等特点^[14]。因此,本文选择华北平原典型 地区——雄安新区牛驼镇地热田,开展目标储层为蓟 县系碳酸盐岩热储的二维地震采集参数试验,优选激 发和接收参数。

雄安新区牛驼镇凸起构造区的研究开始于20世 纪90年代,尤其是随着雄安新区的设立,中国地质调 查局加大力度开展雄安新区地热清洁能源勘查工作[15-16], 进一步加深牛驼镇凸起构造区的研究程度。杨海盟 等171认为牛驼镇凸起太古界内幕深层牛东断裂下盘 存在1组地震波反射,反映牛东断层下盘发育逆断 层; 王凯等^[18] 认为牛驼镇凸起下方的 5~11 s 存在反 射同相轴呈"穹隆状",一直延伸至莫霍面;岳航羽 等199认为雄安新区及周边深反射地震数据存在深层 信号弱、跨构造单元多、干扰因素复杂等问题,有必 要开展深反射地震高精度成像关键技术研究。以往 地震资料显示,牛驼镇凸起构造区深部信噪比低、基 底内幕成像差、蓟县系高于庄组底界和太古界顶界识 别不清等问题,且研究主要集中于中浅部和上地壳两 个层次。为获取3~6km深部高品质地震勘探资料, 在以往地震采集技术的基础上,进行了波场特征调查 和检波器组合方式试验,增加了可控震源台数、震动 次数和扫描长度,降低了扫描频率,从信噪比、能量、 频谱等方面分析不同参数对干扰波的压制效果及对 有效信号的影响,从而获取更优的现场施工参数。

1 工区地质地球物理特征

工区位于华北平原北部,属太行山麓平原向冲积 平原的过渡带。地势较为平坦,海拔在7~19m之间, 西北较高,东南略低。地表多为农田覆盖,城镇化程 度较高,城镇、村庄、工厂、高压线塔、铁路、高速公 路、省道、河流等均有分布,会给地震数据采集带来 不同程度的噪声干扰。

1.1 浅部地震地质条件

工区地表岩性由黏土、砂土与粉砂、细砂组成,不 等厚互层,结构较为松散。小折射调查结果显示,表 层低速层表现为二层结构,第一低速层平均速度450~ 500 m/s,厚9~15 m;第二低速层平均速度在900~ 1 200 m/s之间,厚11~15 m;与下伏地层速度相差较 大,速度分界明显。第四系松散覆盖层厚300~500 m, 尤其是存在较厚卵砾石层的地区,其吸收衰减作用尤 为明显。

1.2 深部地震地质条件

根据以往勘探成果可知,新近系以下地层起伏变 化较大,构造发育,地震波场复杂;深部热储层与上覆 新生界地层之间存在一个强波阻抗界面,会对地震波 产生较强的屏蔽作用,不利于深层成像;元古界地层 成层性差、波阻抗差异小,会导致深层信号较弱。

2 采集参数试验

结合工区地震地质特点和勘探目的,此次地震勘 探采集参数试验包括波场特征调查、激发参数试验和 接收参数试验。

2.1 波场特征调查

波场特征调查的目的是掌握工区有效波、干扰波 和噪声的分布情况,提出噪声抑制措施。此次采用 盒子波技术开展干扰波调查,通过雷达图分析技术深 入了解工区主要干扰波类型及其速度、信噪比、频 率、波长等属性特征,分析干扰波的成因、规律及影响 程度。

盒子波技术调查结果表明,影响地震资料品质的 干扰波主要包括折射波、侧面波、面波和随机干扰波 等(图1)。折射波发育复杂,较为稳定的有2层,第一 层视速度1800~2500 m/s、频率15~22 Hz,第二层视 速度3000~4500 m/s、频率12~20 Hz。侧面波主要 发育2组,第一组速度350~1500 m/s、频率15~20 Hz, 第二组速度3000~4000 m/s、频率25~30 Hz,均沿垂 直测线方向传播。面波发育2层,第一层速度220~ 400 m/s、频率 8~14 Hz, 第二层高阶面波视速度在 800~1 500 m/s之间, 频率 8~12 Hz。由于地表条件 较差, 乡镇分布面积广、公路交错复杂, 随机干扰波发 育, 频率较高, 无固定规律。

2.2 激发参数试验

此次震源激发选择可控震源,可控震源在地震勘 探中具有施工成本低、安全环保、激发信号可人为控 制、施工组织灵活等优点,广泛应用于地形起伏较小 的地区,在城镇化程度较高地区取得了良好的勘探效 果^[20-21]。工区构造复杂、地层结构变化大,二维地震 测线横跨多个构造单元,同一套震源激发参数不适应 所有的地质条件。因此,安排了1个系统试验点和 7个考核试验点(表1),系统试验点确定基本参数,考 核试验点根据地质条件和地表干扰情况的变化调整 激发参数。通过对原始单炮记录进行定性分析,并从 频段能量、道集间频率、信噪比等方面进行定量分 析^[20],优选可控震源的震动台次、扫描方式、扫描频 率、扫描长度和驱动幅度等激发参数,确保在不同环 境下获取最优单炮记录,进而取得低信噪比地区相对 高质量的地震资料。

2.2.1 扫描方式试验

可控震源地震扫描信号分为线性扫描和非线性 扫描^[22]。线性扫描信号频率变化均匀,能量平均分 配。非线性扫描信号扫描速率是变化的,根据目的层 反射波频率特征可重新分配频率和能量,通过在高频 段合理增加扫描时间来实现对高频衰减的补偿^[23]。扫 描方式对比试验包括:线性扫描和非线性扫描,非线 性扫描坡度又分为-2和-3。其他参数设置为:可控震 源4台,震动次数2次,驱动幅度75%,扫描频率6~ 84 Hz,扫描长度12 s。

通过对 3 种扫描信号获得的原始单炮记录 1.5~ 4.5 s 目的层反射波能量、信噪比和频谱分析可知(图 2), 线性扫描的有效频率宽度较非线性扫描宽; 坡度为 -3 的非线性扫描的能量较线性扫描、坡度为-2 的非 线性扫描更强, 信噪比更高, 且 6 Hz 以下低频干扰、 20 Hz 以上高频干扰幅度更低。因此, 现场施工拟采 用非线性扫描, 坡度为-3。

2.2.2 震动台次试验

使用多台可控震源同时激发,并通过多次垂直叠 加增强目的层反射波能量^[24],压制随机干扰,在满足 最深目的层探测要求的同时提高单炮记录的信噪 比。但是,过多的增加震动次数,也会加强与有效信 号频带接近的干扰波,甚至改变地震记录的相位,从





Fig. 1 Schematic map of the radar interference wave analysis

而降低分辨率^[25]。此次探测最深目的层位为元古界蓟 县系高于庄组热储层,选择4和5台可控震源分别进 行2次、4次、6次垂直叠加对比试验,其他固定参数 设置为驱动幅度75%、非线性扫描、扫描频率6~84 Hz、 扫描长度12 s^[26]。

2023年

从试验单炮记录来看,4台和5台可控震源多次 垂直叠加得到的地震记录各目的层能量均得到增强, 尤其是2.5,4.0 s左右目的层的反射波能量增强较为 明显,同相轴均清晰可见。定量分析2.0~4.5 s之间 有效波的频谱和信噪比可知(图3),随着震源台数的 增加,主频变化不大,频宽加宽,起始频率在6Hz以下 低频干扰幅度升高,单炮记录的信噪比有所降低, 4台6次激发的深层能量较4台4次、4台2次强,分 辨率较高。因此,现场施工时根据随机噪声的干扰程 度等选取4台可控震源4~6次震动次数方可满足勘 探需求。

2.2.3 扫描频率试验

可控震源扫描频率的输出应在最高截止频率的 范围内,根据工区干扰波特点和目的层反射波频带范 围,选择有助于压制低频干扰波的最低频率和不高于 目的层反射波的最高频率。随着勘探深度越来越大, 选择可控震源激发的最低频率越小越好。兼顾探测 更深目的层位和压制部分低频面波,最低扫描频率不 能过低,此次未对最低扫描频率进行对比试验,设置 为6Hz;主要对比试验了64,72,84,100Hz的扫描高 频,其他参数设置为可控震源4台、震动次数2次、驱 动幅度75%、非线性扫描、扫描长度12s。

综合地质资料,对比单炮记录(图4),炮集面貌干

· 18 ·

表 1 试验内容一览表 Table 1 List of experiment contents				
1个系统 试验点	震动台次	驱动幅度75%, 扫描频率6~84 Hz, 非线性扫描(坡度−3), 扫描长度12 s	4台2次、4台4次、4台6次、 5台2次、5台4次、5台6次	6
	扫描频率	4台2次,驱动幅度75%,非线性扫描(坡度-3),扫描长度12 s	6 ~ 64, 6 ~ 72, 6 ~ 84, 6 ~ 100 Hz	4
	扫描方式	4台2次, 驱动幅度75%, 扫描频率6~84 Hz, 扫描长度12 s	线性扫描、非线性扫描(坡度分别为-2和-3)	3
	扫描长度	4台2次, 驱动幅度75%, 扫描频率6~84 Hz, 非线性扫描(坡度-3)	12, 14, 16, 20 s	4
	驱动幅度	4台2次, 扫描频率6~84 Hz, 非线性扫描(坡度-3), 扫描长度12 s	65%、70%、75%	3
7个考核 试验点	震动台次	驱动幅度75%, 扫描频率6~84 Hz, 非线性扫描(坡度-3), 扫描长度12 s	4台2次、4台4次、4台6次、 5台2次、5台4次、5台6次	6
	扫描频率	4台4次,驱动幅度75%,非线性扫描(坡度-3),扫描长度12 s	6 ~ 64, 6 ~ 72, 6 ~ 84, 6 ~ 100 Hz	4
	扫描长度	4台4次, 驱动幅度75%, 扫描频率6~84 Hz, 非线性扫描(坡度-3)	12, 14, 16, 20 s	4
		合计		118



图 2 不同扫描方式定量分析对比图









净,500ms处反射波为新生界底界与中生界顶界面之 间的反射波,该层反射波连续性均较好;在最高扫描 频率大于 80 Hz 及以上时能量稍强[24], 4 000 ms 反射波 推测为蓟县系雾迷山组顶板,该层反射波较清晰,6~ 84 Hz 的单炮记录能量及分辨率优于其他。

定量分析不同扫描频率 2.0~4.5 s 目的层有效波 的频谱和信噪比可知(图 5), 主频无明显变化, 6~ 84 Hz 扫描频率单炮记录的有效频带宽度稍宽于其他 频率,且信噪比优于其他扫描频率。因此,本次工作 拟采用 6~84 Hz 的扫描频率。

2.2.4 扫描长度试验

可控震源的扫描长度越长,激发的能量越强,单 炮记录的信噪比也会有所加强,同时资料占据的存储 空间越大。考虑目的层勘探深度,设置可控震源4 台、垂直叠加2次、驱动幅度75%、非线性扫描、扫描 频率 6~84 Hz, 对比试验了 12, 14, 16, 20 s 的扫描时 间。分析不同扫描时间所得记录 2.0~4.5 s 之间有效 波的频谱和信噪比可知(图 6), 主频和频宽均无明显 变化,6Hz以下低频干扰在扫描时间12s情况下幅度 更低;同等干扰条件下,12s单炮记录的信噪比稍优



Fig. 4 Comparison of different single-shot records at sweep frequencies of 6–64, 6–72, 6–84 and 6–100 Hz



图 5 不同扫描频率定量分析对比图

Fig. 5 Quantitative analysis and comparison of different sweep frequencies



图 6 不同扫描长度定量分析对比图



于14,16,20 s。因此,12 s的扫描长度即可满足此次勘探需求。

2.2.5 驱动幅度试验

可控震源与地表的耦合情况是影响驱动幅度大小的主要因素,过高追求输出力,反而会降低子波的重复性和地震资料的品质^[27]。此次根据典型地表的总谐波畸变情况设置了65%、70%、75%不同驱动幅度的对比试验,固定其他震源参数为:可控震源4台、垂直叠加2次、扫描频率6~84Hz、非线性扫描、扫描长度12s。通过对不同驱动幅度取得单炮记录1.5~4.5 s 双程时之间的能量、道集间频率和信噪比等进行定性和定量分析(图7、图8),认为随着驱动幅度增加,主频和频宽变化不太明显;驱动幅度为75%单炮记录的资料品质、激发能量和信噪比明显高于70%和65%。综合考虑,驱动幅度采用75%。

2.3 接收参数试验

接收参数试验以检波器组合方式试验为主。检 波器组合是数据采集时衰减干扰波提高原始记录信 噪比的一种方法。信噪比的高低与检波器组合个数、 组内距、组合方式等均有关系。此次试验是在盒子波 调查资料的基础上,按照4×3、6×2、12×1 只检波器面 积组合的方式,增加单支检波器、12 只串检波器堆放 方式开展试验。 从单炮记录和能量分析可知,12只检波器接收效 果较单支检波器好、能量较强,12只检波器面积组合 接收效果较12只检波器堆放好、能量较强,4×3方形 组合接收效果最好、能量最强,6×2平行组合次之, 12×1较差。从频谱分析结果可以看出(图9),12只堆 放、6×2平行组合、4×3方形组合的主频较单支检波 器和12×1线性组合的大,频宽更宽。25 Hz和50 Hz 振幅异常是由于试验场地随机干扰、电力干扰发育所 致。因此,二维地震勘探数据采集时检波器接收参数 宜采用以下方式:组内距2m,组内高差小于0.5 m, 4×3只检波器面积组合,按照"实、直、深、准、不漏 电"的原则挖坑埋置,遇地表地震地质条件较差无法 挖坑的地段,采用电钻打孔方式插直检波器,并用沙 土袋盖实。

3 试验结论与应用

系统分析试验资料,确定了工区的基本采集参数 为:(1)接收参数,采用12只检波器平行组合接收,组 内距2m,挖坑埋置;(2)激发参数,4台28t可控震源, 4~6次垂直叠加,75%驱动幅度,6~84Hz扫描频率, 12s扫描长度和非线性扫描(坡度-3),地质条件发生 变化或随机干扰增强的地段,采用相同的方法开展试 验及时调整激发参数。 2023年







基于以上试验参数,二维地震勘探采用加拿大 Geo-X公司 Aries 数字地震仪,4台28t可控震源(扫 描频率范围5~250 Hz,最大出力28t),10 Hz 12 只串 联检波器,道间距20m、炮间距40m、680道滚动接收、最小偏移距10m、最大偏移距6790m、覆盖次数大于170次的观测系统采集了二维地震剖面,取得了



图 9 不同检波器组合方式频谱分析和信噪比对比图 Fig. 9 Spectrum and SNR comparison of different geophone combinations

较高质量的原始单炮记录和成果剖面。

4 结果分析

从单炮记录可以看出(图 10),发射波信息丰富, 由浅至深在双程时 1.0, 1.3, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 s 等 处,反射波能量强,信噪比高,连续性好,浅层反射波 频率主要在 10~25 Hz 之间,深层频率为 8~20 Hz。 从 DZ-6 测线地震解释剖面可以看出(图 11),资料品 质整体较高, 地震反射波组特征明显, 由浅至深解释 了9组特征明显的反射波, 分别为 T_{Q} , T_{Nm} , T_{Ng} , T_{Ed} , T_{Esl} , T_{Isw} , T_{Jxg} , πT_{Ar} , 对应第四系底界面, 新近系明 化镇组底界面、馆陶组底界面, 古近系东营组底界 面、沙河街组一段底界面、沙河街组底界面, 蓟县系 雾迷山组顶界面、高于庄组顶界面和太古界顶界面。 同时, 解释了 2条区域断层和若干条次级断层, 均为 正断层性质。





图 11 DZ-6 测线地震时间剖面 Fig. 11 Seismic time profile of the DZ-6 line

从深部成像效果来看,凹陷区整体信噪比较高, 反射波具有能量较强、连续性较好、易于追踪解释的 特征。凸起区缺失中生界和古生界地层, T_{Jxw}、T_{Jxg}和 T_{Ar}为主要反射波组, 蓟县系雾迷山组顶界面埋深清晰 可见, *T*_{Jxw} 反射波能量强, 连续性较好, 信噪比较高, 易 于追踪解释, 双程时在 0.59~0.73 s之间, 埋深 515~ 715 m; *T*_{Jxg} 和 *T*_{Ar} 反射波能量较弱, 信噪比较低, 基本 可连续追踪解释, 双程时分别为 1.06~2.4 s 和 1.25~ 3.75 s, 埋深分别为 1 100~4 000 m 和 1 550~7 000 m。 经剖面 2 430 m 处 D02 钻孔 验证, 钻孔 揭露蓟县系 雾迷山组顶界面埋深 1 335 m、高于庄组顶界面埋深 2 511 m, 地震解释成果与钻探揭露成果基本吻合。

5 结论与建议

(1)雄安新区牛驼镇地热田地震数据采集参数优 选试验表明,可控震源台数、震动次数、驱动幅度、扫 描方式、扫描频率、扫描长度和检波器组合方式的选 择在一定程度上影响地震原始记录的分辨率和信噪 比,进而影响勘探效果。适用于该地区深部地震勘探 最佳采集参数为:28t可控震源4台,震动4~6次,驱 动幅度75%,扫描频率6~84 Hz,扫描长度12s和非 线性扫描(斜坡长度-3);最佳接收参数为12只检波 器方形组合。

(2)基于采集参数试验获得的叠加剖面整体成像 效果较以往有了大幅度提高。牛驼镇凸起构造区深 部能量得到明显增强,蓟县系高于庄组底界面和太古 界顶界面的地震波反射轴较为清晰、连续,能够准确 识别,为3~6km深部蓟县系碳酸盐岩热储的勘探、 开发等提供采集参数借鉴。

(3)在沉积型盆地构造凸起区基底内幕成像困难 的问题依然存在,建议从以下几个方面开展下一步研 究:一是由于低频信号可得到深部信息,且低频能量 具有更好的穿透能力,建议成本可控的条件下震源激 发优先使用低频可控震源;二是采用"宽线"观测系 统,增加覆盖次数,压制侧面干扰及其他噪声,一定程 度上可增强深层弱反射信号,提高地震资料品质;三 是在后期资料处理环节,提高静校正、振幅补偿、速 度分析、叠前偏移等技术的准确性,消除原始资料能 量差异,提高叠加速度精度,获得深部碳酸盐岩地 层界面的有效反射信息,精细研究地层结构和断裂 构造。

参考文献(References):

 [1] 杨海.中国陆域居里面特征研究[D].成都:成都理工 大学, 2015. [YANG Hai. Characteristics of Chinese continental Curie point isotherm[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 康玉柱.中国古生代碳酸盐岩古岩溶储集特征与油 气分布[J].天然气工业,2008,28(6):1-12. [KANG Yuzhu. Characteristics and distribution laws of paleokarst hydrocarbon reservoirs in palaeozoic carbonate formations in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6):1-12. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 姜光政,高堋,饶松,等.中国大陆地区大地热流数据 汇编(第四版)[J].地球物理学报,2016,59(8):2892-2910. [JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China(4th edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2892 - 2910. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 庞宏磊.车镇凹陷沙四上亚段低坡折带湖相碳酸盐 岩地震识别及沉积特征[J].油气地球物理,2017, 15(1):6-11. [PANG Honglei. Seismic identification and sedimentary features of lacustrine facies carbonate rock in low slope-breaks of the upper of ES4 in Chezhen Depression[J]. Petroleum Geophysics, 2017, 15(1):6-11. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张薇,王贵玲,刘峰,等.中国沉积盆地型地热资源特征[J].中国地质, 2019, 46(2): 255 268. [ZHANG Wei, WANG Guiling, LIU Feng, et al. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 255 268. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张军林,田世澄. 缝洞型碳酸盐岩储层反射波法地震 勘探技术的现状与趋势[J].石油天然气学报,2013, 35(12): 62 - 66. [ZHANG Junlin, TIAN Shicheng. Current situation and trend of seismic exploration technique of reflection wave method of fracturevuggy carbonatite reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(12): 62 - 66. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 柴绪兵.古城地区中下奧陶统碳酸盐岩储层地震预 测技术研究[D].大庆:东北石油大学,2017.[CHAI Xubing. Study on seismic prediction technology of carbonate reservoir in Gucheng area[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 黄锐.川东北碳酸盐岩地区地震勘探技术难点与对策[J].石油物探,2008,47(5):476-482.[HUANG Rui. Technical difficulties in and countermeasures for seismic exploration in the carbonate area of northeast

Sichuan Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(5): 476 – 482. (in Chinese with English abstract)]

- [9] 李博. ZG15区块奥陶系碳酸盐岩地震资料精细解释
 [J]. 甘肃科技, 2018, 34(10): 16-17. [LI Bo. Seismic data interpretation of Ordovician carbonate rocks in ZG15 block[J]. Gansu Science and Technology, 2018, 34(10): 16-17. (in Chinese)]
- [10] 李鹏飞,崔德育,黄诚. 地震资料处理解释一体化技 术在塔北碳酸盐岩储层识别中的应用[J].石油地球 物理勘探, 2018, 53(增刊2): 306 - 313. [LI Pengfei, CUI Deyu, HUANG Cheng. Carbonate reservoir identification in Tabei Area, Tarim Basin with integrated seismic data processing and interpretation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(Sup 2): 306 - 313. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 常少英,李昌,陈娅娜,等.海相碳酸盐岩储层地震预测技术进展及应用实效[J].海相油气地质,2020,25(1):22-34. [CHANG Shaoying, LI Chang, CHEN Yana, et al. Progress and application of seismic prediction technology for marine carbonate reservoir[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(1):22 34. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 杜伟. K1地区地震数据目标处理技术及效果[J]. 石油 地质与工程, 2018, 32(2): 43 - 46. [DU Wei. Seismic data processing technology and its effect in K1 area[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2018, 32(2): 43 -46. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 龙姣. FG地区二维地震资料采集技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017. [LONG Jiao. Research on 2D seismic acquisition technology in FG area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 高俊,李燕燕,王贵玲,等. 雄安新区高阳地热田蓟县系热储特征及资源量评估[J]. 地球学报, 2023, 44(1): 133 144. [GAO Jun, LI Yanyan, WANG Guiling, et al. Geothermal reservoirs characteristics and resource assessment of Jixian system in Gaoyang geothermal field, Xiongan New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(1): 133 144. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 姚亚辉, 贾小丰, 李胜涛, 等. 雄安新区D01井岩溶热 储下伏太古界中热流测定研究[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1723 - 1731. [YAO Yahui, JIA Xiaofeng, LI Shengtao, et al. Heat flow determination of Archean strata

under the karst thermal reservoir of D01 well in Xiongan New Area[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1723 – 1731.(in Chinese with English abstract)]

- [16] 邢一飞,王慧群,李捷,等. 雄安新区地热水的化学场特征及影响因素分析[J]. 中国地质, 2022, 49(6):
 1711 1722. [XING Yifei, WANG Huiqun, LI Jie, et al. Chemical field of geothermal water in Xiongan New Area and analysis of influencing factors[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1711 1722.(in Chinese with English abstract)]
- [17] 杨海盟,戴俊生,汪必峰,等.牛驼镇凸起发育过程
 [J].东北石油大学学报,2014,38(6):22-29. [YANG Haimeng, DAI Junsheng, WANG Bifeng, et al. Development process of Niutuozhen uplift[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(6):22-29. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王凯,张杰,白大为,等.雄安新区地热地质模型探究:来自地球物理的证据[J].中国地质,2021,48(5):
 1453 1468. [WANG Kai, ZHANG Jie, BAI Dawei, et al. Geothermal-geological model of Xiongan New Area: Evidence from geophysics[J]. Geology in China, 2021, 48(5): 1453 1468. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 岳航羽,王凯,张杰,等. 雄安新区及周边深反射地震高精度成像技术[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(4): 855 - 869. [YUE Hangyu, WANG Kai, ZHANG Jie, et al. High-precision imaging technology of deep reflection seismic in Xiongan New Area and its surroundings[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(4): 855 - 869. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 陈鹏,于常青,韩建光,等.低频可控震源在哈拉湖冻 土区二维地震勘探试验研究[J].地球物理学进展, 2018, 33(2): 562 - 570. [CHEN Peng, YU Changqing, HAN Jianguang, et al. Low-frequency vibroseis experimental study of 2D seismic exploration for Hala Lake's permafrost region[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 562 - 570. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈玉达,林君,邢雪峰.可控震源技术发展与应用[J]. 石油物探, 2020, 59(5): 666 - 682. [CHEN Yuda, LIN Jun, XING Xuefeng. Development and application of vibroseis technology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(5): 666 - 682. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 邸志欣.哈拉阿拉特山山前构造带三维地震采集技 术研究[D].青岛:中国海洋大学,2013. [DI Zhixin.

3D seismic acquisition technology research for piedmont tectonic belt in Halaalate mountain[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese with English abstract)]

- [23] 蓝加达.可控震源非线性扫描在高分辨率地震采集中的应用[J].石油物探,2008,47(2):208-211. [LAN Jiada. Application of vibroseis nonlinear sweep in high resolution seismic data acquisition in S area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(2): 208-211. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 吴华,张保卫,王凯,等.哈拉湖地区浅层地震勘探可 控震源激发参数对比试验[J].物探与化探,2018, 42(5):1033 - 1041. [WU Hua, ZHANG Baowei, WANG Kai, et al. Comparative test of vibroseis excitation parameters for shallow seismic exploration in Har Hu area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(5):1033 - 1041. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 孙海川.可控震源地震采集技术在H探区煤炭勘查中的实验[J].物探与化探,2020,44(1):42-49. [SUN Haichuan. Experimental study of vibroseis seismic

acquisition technology on coal exploration in H prospecting area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 42 - 49. (in Chinese with English abstract)]

- [26] 李忠雄, 卫红伟, 马龙, 等. 羌塘盆地可控震源采集试验分析[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(2): 199 208. [LI Zhongxiong, WEI Hongwei, MA Long, et al. Vibroseis acquisition tests in Qiangtang Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(2): 199 208. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 刘小峰, 槐永军, 刘会林, 等. 根据工区地表条件确定 合适的可控震源驱动幅度[J]. 物探装备, 2018, 28(6): 399-403. [LIU Xiaofeng, HUAI Yongjun, LIU Huilin, et al. How to determine the appropriate driving level of vibroseis according to the surface conditions of the work area[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2018, 28(6): 399-403. (in Chinese with English abstract)]

编辑:汪美华 刘真真