

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 0057

薛野,杨帆,赵苏城,等. 彭水地区残留向斜常压页岩气地震采集实践[J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1490–1499. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 0057](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0057)

Xue Y, Yang F, Zhao S H, et al. Seismic data acquisition of normally pressured shale gas reservoirs in residual synclines in the Pengshui area, Sichuan Basin, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1490–1499. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 0057](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0057)

彭水地区残留向斜常压页岩气地震采集实践

薛野,杨帆,赵苏城,蓝加达

(中国石化华东油气分公司 勘探开发研究院,江苏 南京 210007)

摘 要:中国南方常压页岩气主要分布于四川盆地外围的志留系残留向斜,资源潜力大。区内地质条件复杂,必须利用高信噪比地震资料精细刻画地下的构造特征并准确描述优质页岩的分布规律,提高水平井优质页岩钻遇率与钻井效率。自 2011 年起,在彭水地区持续开展了地震采集探索与实践。通过系统梳理总结已实施项目的方法、效果及不足,区域噪声特征分析,道距对静校正影响研究,三维地震观测系统退化分析,认为:①二维地震采集剖面五峰—龙马溪组页岩反射波组较清晰,支撑了常压页岩气的选区评价工作;②提出宽方位、低炮点密度、高横向覆盖次数以及中近偏移距信息丰富的三维观测系统设计原则;③三维地震处理剖面信噪比高、波组特征清楚,经实钻验证三维构造成像准确、地层深度预测误差 $<1\%$,有力支撑勘探开发。该技术体系可在类似常压页岩气探区推广。

关键词:残留向斜;常压页岩气;地震采集;观测系统;信噪比

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000–8918(2023)06–1490–10

0 引言

常压页岩气在中国南方广泛分布,资源潜力大^[1–2]。原国土资源部 2012 年预测结果显示,中国页岩气地质资源量 $134.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量 $25.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中南方常压页岩气技术可采资源量为 $9.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$,具有广阔发展前景^[3–9]。

彭水地区位于四川盆地东南缘武陵褶皱带,以上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组残留向斜为主要勘探目标,页岩气有利勘探面积 $2\,933 \text{ km}^2$,资源量 $1.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,勘探潜力大。然而受多期强构造改造作用影响,页岩气保存条件差,地层压力系数一般介于 $0.95 \sim 1.15$,为典型的常压区;勘探实践证实页岩气水平井单井产量低($3.5 \sim 4$ 万方/天)、单井可采储量小($0.5 \sim 0.8$ 亿方)、处边际经济效益。区内页岩地层地下埋深($1\,000 \sim 4\,500 \text{ m}$)、倾角($5^\circ \sim 45^\circ$)变化剧烈,优质页岩垂向靶窗小($<10 \text{ m}$),急需利用高精度地震勘探技术精细刻画地下构造特征并

准确反映优质页岩空间展布规律,评价页岩气甜点区,指导井位部署、水平井设计及钻井地质导向,保证所设计的水平井井轨迹能够连续钻遇上千米的优质页岩层进而获得商业产能,提高钻井综合时效以降低勘探开发成本^[10–11]。

以往人们针对中国南方四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气,开展了大量地震采集研究。陈祖庆等^[12]针对四川盆地东南部礁石坝背斜构造区提出了高覆盖、宽方位、小道距的高精度三维地震采集技术;薛野等^[13]针对四川盆缘南川复杂构造带,提出了统一排列片接收、分区不同密度炮点激发的变密度三维观测系统设计;周晓冀等^[14]针对以砂岩地表、向斜构造为主的四川盆地泸州区块,提出了 42 万道/ km^2 炮道密度的页岩气三维地震采集技术。总之,在针对四川盆地内部及盆缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气的地震采集技术研究方面取得积极进展,但是缺乏针对盆外碳酸盐岩复杂山地地表、残留向斜构造常压页岩气目标的地震采集观测系统参数研究,同时以往形成的采

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-10-08

基金项目: 国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061);中国石化科技开发部项目“常压页岩气地球物理评价技术研究”(P21087-3)

第一作者: 薛野(1990–),男,副研究员,主要从事石油物探技术研究和物探科技管理工作。

集方法具有炮点密度 (平均>69 炮/km²)、炮道密度 (平均>40 万道/km²) 较高的特点,在中国南方复杂山地地表区野外采集施工难度大、成本高,不满足边际经济效益常压页岩气的勘探开发需求。

自“十二五”以来,中国石化华东油气分公司在四川盆外彭水地区针对残留向斜常压页岩气有利目标,先后开展多轮次二维、三维地震观测系统设计及采集实践^[15],在资料效果和成本管控两方面取得了有效进展。本文介绍了彭水地区常压页岩气的地质背景,系统梳理总结近年来实施地震采集项目的主要方法、效果及存在不足,以突出上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩地层的反射特征为主,围绕道距、叠加次数、方位角以及偏移距等重点观测系统参数开展退化处理分析,以期建立适用于该区的观测系统设计主要原则,为中国南方常压页岩气地震采集提供参考。

1 地质背景

彭水地区在构造上位于四川盆地东南缘武陵褶皱带内,处于江南—雪峰隆起造山带与齐岳山断裂带之间,东与江南雪峰隆起以石门—慈利—保靖断裂为界,南与黔北坳陷相邻,西以齐岳山断裂与四川盆地分割,北与大巴山弧形构造对突;地理上位于重

庆市与贵州省交界的彭水、武隆、道真等县市。

晚奥陶世晚期—志留纪早期,彭水地区处于深水陆棚相、半深水陆棚逐步过渡为浅水陆棚相沉积,在五峰组—龙马溪组底部沉积了一套以深灰—黑色硅质页岩、炭质页岩为主的细粒沉积,这套黑色页岩分布范围广、厚度为 80~120 m、有机质类型以腐泥型为主、有机碳含量高,为页岩气勘探的主要目的层。

本区经历了多次构造运动,加里东运动及印支运动以升降运动为主,区域上呈现隆坳相间的古构造格局;构造变形主要发生于晚侏罗世与白垩纪,即早—中燕山期发生强烈的由 SE 向 NW 的挤压褶皱变形,形成以 NE—SW 向为主的残留向斜与残留背斜相间构造模式为主的“槽—档”构造格局,奠定了现今主要构造形态。其中背斜窄,地层陡峭紧闭,两翼通常不对称,抬升剥蚀程度大,志留系下部页岩被剥蚀殆尽,出露奥陶系及寒武系地层;向斜通常轴部宽阔,地层相对平缓,呈“屈”状,内部构造相对简单,地层较为齐全,核部发育侏罗系地层,两翼依次出露三叠系、二叠系、志留系、奥陶系地层,下志留统页岩埋深小于 4 500 m。区内常压页岩气有利目标主要包括桑柘坪向斜、湾地向斜、武隆向斜以及道真向斜,见图 1。

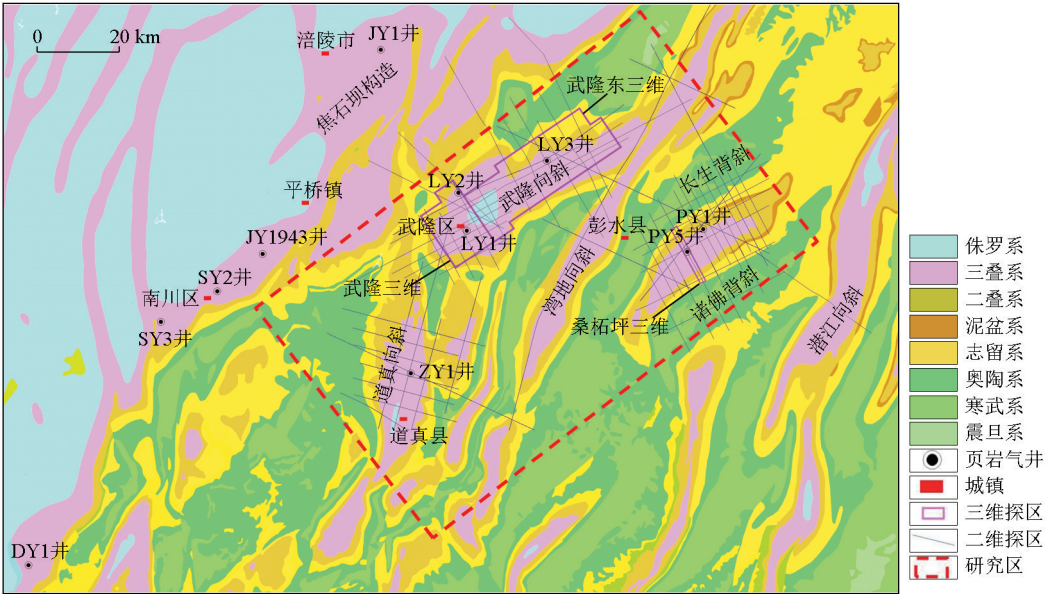


图 1 彭水常压页岩气探区构造位置

Fig. 1 Structural location of Pengshui normal pressure shale gas exploration area

2 二维地震采集与效果分析

二维地震勘探具有成本投入小、勘探周期短以

及覆盖面积大等优点,2010~2015 年在彭水地区页岩气勘探初期被用来进行区域概查,初步了解整体构造格局。基于干扰波调查分析,结合排列长度、炮点距及覆盖次数等重点参数处理退化试验^[16-17],综

合考虑技术有效性、经济性,建立了适合该区的主要二维观测系统参数。

2.1 基于 FK 谱分析的道距优选

道距的确定要考虑以下几点因素:①对最高频率有效波进行充分采样;②避免假频产生偏移噪声;③对干扰波充分采样。只有对反射波和主要干扰波充分采样,才能在室内处理时,采取合理的去噪手段,有效分离干扰波与反射波,实现提高信噪比的目的。

为了研究道距大小对本区地震反射波和主要干扰波充分采样的影响,对实际资料进行道距抽稀,对比分析不同道距条件下的 FK 谱。结果表明,针对二维地震,道间距小于 40 m 时,可较为全面地采集记录该区干扰波特征、清晰地分辨面波视速度和能量的变化特点;随着道距增大,干扰波属性特征的细节在逐渐丢失,50 m 道距后开始出现明显空间假频,不利于后期资料处理,见图 2。通过 FK 谱分析,彭水地区地震采集道距应不大于 40 m。

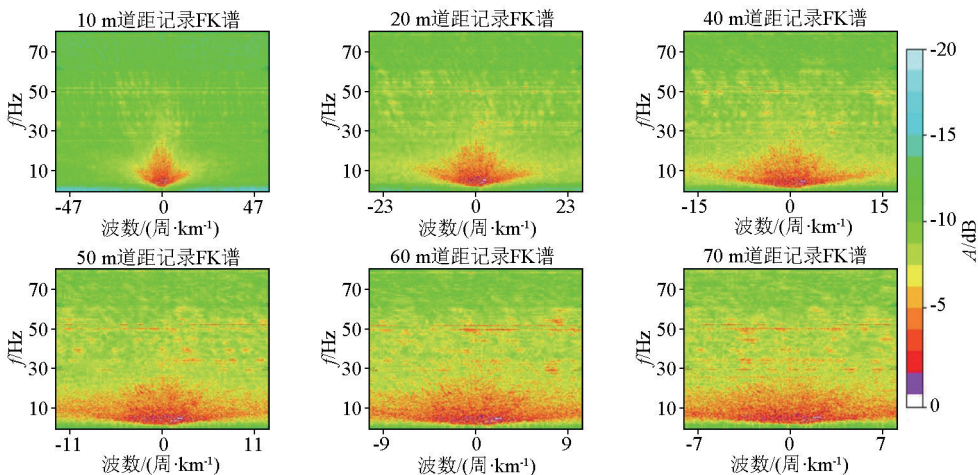


图 2 不同道距记录的 FK 谱

Fig. 2 FK spectra recorded at different track distances

2.2 道距对复杂地表静校正处理影响研究

常压页岩气区地形高差大、低降速带横向变化剧烈,存在严重的静校正问题^[18]。炮检点布设密度及均匀性对静校正计算结果影响较大,对比了不同道距条件下二维地震初至层析反演近地表速度模型

(图 3):随道距的增大,模型细节逐渐丢失,10、20 m 道距计算近地表速度模型细节相对较为丰富、近地表速度变化更为合理。因此,针对二维地震采集,道距应不大于 20 m。

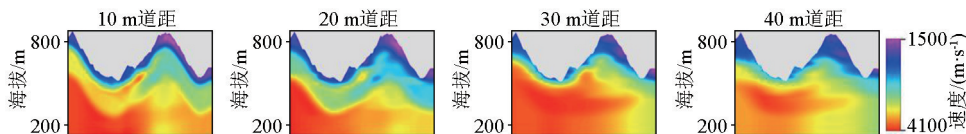


图 3 不同道距资料求取近地表速度模型

Fig. 3 Comparison of near-surface velocity models with different track spacing data

2.3 二维地震采集观测系统及效果

彭水地区页岩气二维采集采用主要观测系统参数:20 m 道距、60 m 炮点距、5 990-10-20-10-5 990 排列的单线二维观测系统,10 m 的线元条件下覆盖次数 100 次。如图 4 所示,二维地震剖面五峰—龙马溪组页岩反射波组较清晰。在“十二五”选区评价阶段,利用二维解释成果初步优选出桑柘坪向斜、武隆向斜、湾地向斜以及道真向斜等常压页岩气有利目标。但二维地震资料存在以下几方面问题:①受复杂地形影响,二维测线空道、空炮现象普遍,覆盖次数不均匀,局部存在缺口;②二维采集只能单一方位观测,观测方位窄、受限;③目的层反射波组连续

性较差、微小断裂落实程度低,难以全面精确落实探区构造。“十二五”期间,利用二维解释成果部署实施多口探井,实钻揭示二维地震构造描述精度较低(深度误差 2%~7%),影响页岩气水平井优质页岩钻遇率(<75%)。

3 三维地震采集与观测系统退化分析

常压页岩气区三维地震勘探处于一个进退两难的境地,既要求尽量高的地震采集精度,又要求尽量低的采集成本;如何实现地质任务与经济成本的平衡是首要考虑的问题。观测系统设计是地震采集中

最重要的环节,它不但决定了地震勘探的成本投入,更直接影响到地震勘探横向分辨率和构造成像效果;观测系统设计要做到兼顾技术方案有效性和经济可行性。

武隆向斜长 55 km,宽 17~27 km,面积 1 135 km²,被近 SN 向断层分割为西部团堡次向斜、东部火炉次向斜两部分。团堡次向斜呈盾形,核部平缓而开阔,上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩埋深约 1 000~4 500 m,两翼不对称且地层较陡(倾角 25°~40°),内部断层不发育;向斜核部地表由中、下侏罗统组成,两翼依次为三叠系及二叠系地层出露,碳酸盐岩地表占比 77%。火炉次向斜呈长轴状,北翼地层倾角为 15°~35°,南翼地层倾角为 25°~40°,核部地层倾角 5°~15°,目的层埋深约 1 000~3 800 m,内部发育多条断裂,碳酸盐岩地表占比 86%。为探索利用三维地震观测技术解决碳酸盐岩地表、残留向斜型构造常压页岩气勘探问题的能力^[19-23],建立最经济合理的观测系统方案,2019 年华东油气分公司在武隆向斜团堡次向斜南部完成了武隆三维采集试验与观测系统退化分析研究,提出了偏移距、观测方位、覆盖次数等观测系统参数优化方案;2020 年,在武隆三维北侧继续实施武隆东三

维地震观测,基于已有认识,兼顾施工成本同时合理优化采集方法,持续提升了资料品质。

3.1 武隆三维地震采集与效果

激发工序是中国南方山地地震采集中成本最高、用工最多、耗时最久的环节,包括测量、钻井、爆破、青苗补偿以及炸药的购置、储存、运输及下药等相关费用;其中受复杂地形及碳酸盐岩地表岩性影响,钻井成本尤其高昂。因此,高炮点密度必然导致三维采集成本高、投入大、勘探周期长。为提高勘探效率、降低成本,武隆三维采用低炮点密度、宽方位、中等排列长度以及低炮道密度的观测系统设计理念,形成 20 线 7 炮 216 道三维观测系统:道距 40 m,线距 280 m,排列长度 4 300 m,接收道数 4 320 道(为邻区三维地震的 54%~83%),炮点距 80 m,炮线距 360 m,炮点密度 34.72 个/km²(为邻区三维的 33%~50%),纵横比 0.68,束线间滚动距离 560 m,20 m×20 m 面元条件下覆盖次数 60 次,炮道密度 15 万道/km²(为邻区三维的 18%~42%)。与二维剖面相比,武隆三维地震叠前深度偏移剖面信噪比提高、目的层反射波组连续性显著加强、波组反射特征更加清楚、构造成像精度更高(图 4)。

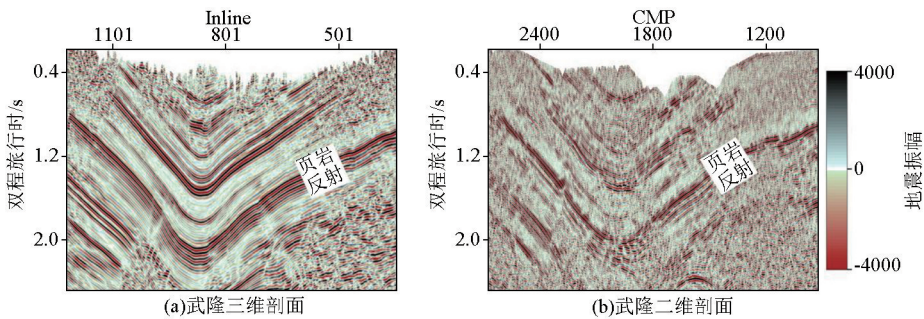


图 4 武隆三维(a)与二维(b)同位置剖面对比

Fig. 4 Profile comparison between 3D seismic(a) and 2D seismic(b) at the same location

经实钻验证,武隆三维地震地造成像精度高,构造解释预测深度误差小于 1%(前期二维解释构造图误差率 2%~7%)。利用三维地震成果,一方面优化页岩气水平井轨迹设计,确保优质页岩储层钻遇率,为单井产量和产能的增加奠定基础;另一方面,有效指导钻井导向,避免水平井钻进过程中频繁调整井斜角,使得钻井工程得以顺利实施,提高钻井效率,节省工程成本。利用武隆三维地震部署与设计水平井的优质页岩钻遇率达 100%,单井平均钻井周期由初期的 93.3 d(2016 年二维地震指导下实施的 LY1HF 井)下降至 38.4 d,其中 LY1-2HF 井钻井周期下降至 22.22 d。图 5 为武隆向斜团堡次向斜武隆三维过 2 口页岩气水平井的地震剖面,反射波

组与实钻井轨迹的深度、产状一致。

分析揭示武隆三维满叠范围内 86%剖面五峰—龙马溪组反射波组信噪比≥4、主频≥27 Hz、频宽≥55 Hz,满足常压页岩气资料解释需求。

3.2 武隆三维观测系统退化分析

武隆三维品质较差剖面集中在南侧向斜核部区域,地表为二叠、三叠碳酸盐岩出露,地下构造较陡(地层倾角 30°~40°)。因此,为提高碳酸盐岩地表资料信噪比,加强向斜核部复杂回转波场采样是本区地震采集的重点与难点。对此开展了偏移距、方位角、覆盖次数等面元属性对地震数据质量的影响分析。

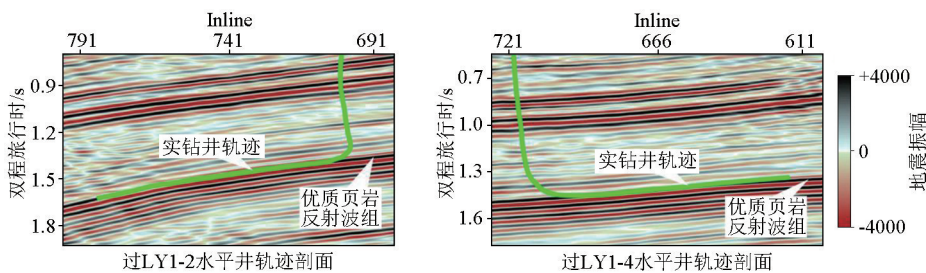


图 5 武隆三维过页岩气水平井地震剖面

Fig. 5 Wulong 3D seismic profile and shale gas horizontal well superposition display

3. 2. 1 分偏移距叠加处理研究

针对残留向斜区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩地层倾角陡、埋深变化大的特点,开展了分偏移距叠加处理,对比不同偏移距采集页岩层反射信息信噪比、有效观测深度的差异。

地震观测有效偏移距主要受目的层埋深、上覆地层速度结构及资料信噪比的影响,一方面反射波超过临界角后发生折射或不能到达地表,从而无法被远偏移距的排列接收^[24];另一方面过大传播距离导致地震波严重衰减、信噪比低,以及发生动校正拉伸畸变。实际资料处理发现对于五峰—龙马溪组反射波组而言,武隆三维远偏移距大部分道集为无效道集,已被切除,导致资料实际有效覆盖次数往往低于设计的覆盖次数。

图 6 所示为武隆三维不同偏移距范围叠加剖面

对比,0~1 km 偏移距范围叠加剖面受复杂山地地形炮检点变观影响,局部出现空道,覆盖次数低(0~6 次),资料信噪比较低;1~2 km 剖面未获取埋深小于 500 m 的地层反射信息,覆盖次数 10~14 次,浅、中、深层反射信息信噪比较高,向斜核部回转波场清晰;2~3 km 剖面未获取埋深小于 1 000 m 的地层反射信息,覆盖次数高(15~20 次),向斜翼部页岩反射波组信噪比高、核部回转波场信噪比略低于 1~2 km 剖面;3~4 km 剖面未获取埋深小于 1 700 m 的地层反射信息,覆盖次数高(15~18 次),整体信噪比低于 1~2 km 和 2~3 km 剖面;4~5 km、5~6 km 剖面最浅有效观测深度分为 2 300 m、3 000 m,覆盖次数较低(小于 10 次)、页岩反射波组信噪比低;对比显示中近偏移距(<3 km)信息对目的层信噪比及向斜核部回转波场获取的贡献最高。

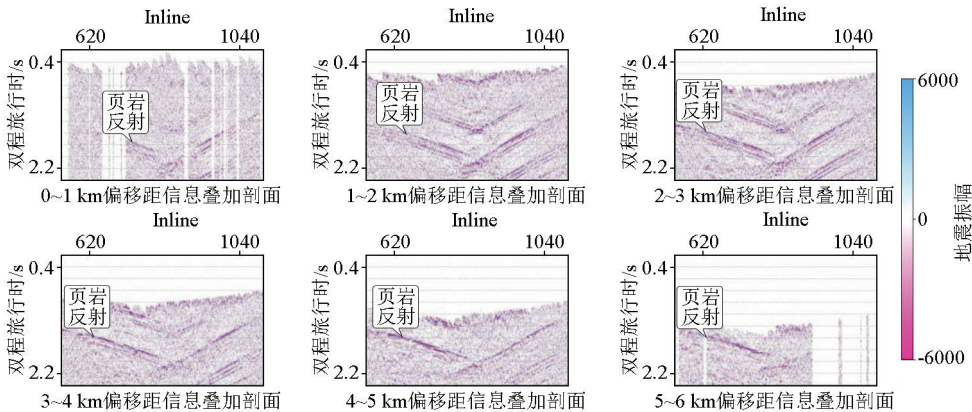


图 6 武隆三维不同偏移距信息叠加剖面对比

Fig. 6 Profile comparison of 3D seismic with different offset range information in Wulong

综合考虑不同偏移距范围对成像的贡献能力不同,以及中近偏移距信息对静校正处理、浅层速度建模与成像具有重要意义,地震采集中应进一步提高 3 km 以内偏移距信息的覆盖次数。

3. 2. 2 不同观测方位叠加处理研究

宽方位三维地震观测对加强波场采样、提高复杂构造照明度具有重要意义。针对复杂构造,不同地震观测方位对反射波场的获取能力会有较大差异。

彭水地区志留系残留向斜均呈现长轴状,构造走向方位角 45°,沿构造走向地层视倾角小,垂直构造走向地层埋深变化快(1 000~4 500 m)、倾角变化大(20°~40°)。三维检波线方向垂直构造走向、炮线方向平行构造走向,总覆盖次数 60 次(20 m×20 m 面元),其中垂直构造走向(纵向)覆盖次数 12 次、平行构造走向(横向)覆盖次数 5 次。通过实际资料分析发现,沿不同观测方位,对向斜核部回转波场的采样效果差异明显。图 7 所示为武隆三维不同

方位角范围叠加剖面对比,0°~30°观测方位角与45°构造走向夹角小,范围内地震覆盖次数6~16次,叠加剖面显示向斜核部回转波场信噪比较高;30°~60°观测方位角与45°构造走向基本平行,范围内地震覆盖次数较低(2~10次)情况下获得高信噪比向斜核部回转波场;60°~90°观测方位角与45°构造走向夹角较小,范围内地震覆盖次数较低(2~12

次),向斜核部回转波场信噪比较高、略差于30°~60°观测方位角剖面;90°~120°、120°~150°、150°~180°观测方位角与45°构造走向夹角较大,地震覆盖次数高(6~20次),但向斜核部回转波场信噪比低;整体表现为平行构造走向观测对回转波场采样效果优于垂直构造走向观测。平行构造走向的覆盖次数低是导致武隆三维向斜核部回转波场采样效果差的原因之一。

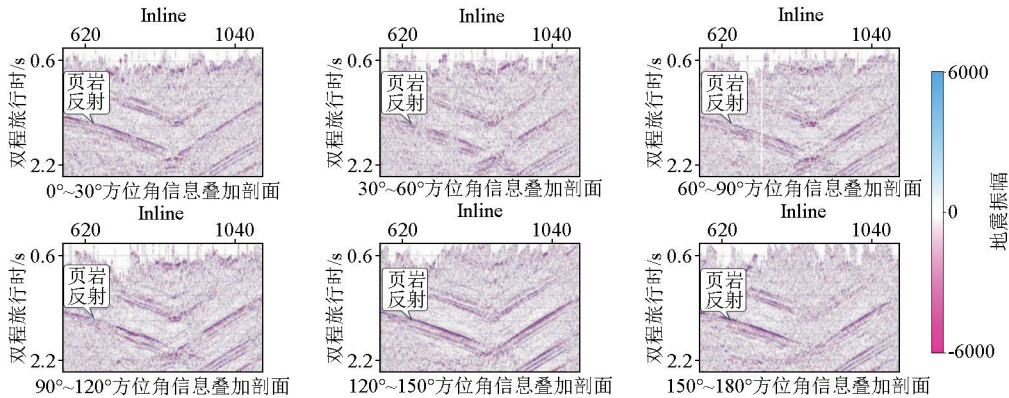


图7 武隆三维不同方位角信息叠加剖面对比

Fig. 7 Profile comparison of 3D seismic with different azimuth range information in Wulong

3.2.3 信噪比与覆盖次数关系研究

碳酸盐岩地表地震激发接收资料有效反射能量弱、次生干扰发育、一致性差,需要采用较高覆盖次数以确保地震信噪比^[25]。采用20 m×40 m面元,开展了碳酸盐岩地表资料信噪比变化规律和覆盖次数关系研究,采用稀疏炮排、道距退化方式,同时尽可能保持偏移距与方位角分布规律不变,炮道密度随机退化的方式,分析覆盖次数从20次增加至120次叠前深度偏移剖面五峰—龙马溪组页岩反射波组信噪比变化规律。结果显示,随覆盖次数增加,信噪比提升,整体可划分为3个阶段:①快速增长阶段,覆盖次数由20次增大至60次,目的层反射波组平均信噪比由1.17快速增大至4.57;②持续增长阶段,平均信噪比增长速度有所减缓,覆盖次数增加至90次,信噪比增大至5.49;③缓慢增长阶段,覆盖次数增加至120次,平均信噪比增大至5.67,该阶段信噪比基本稳定,见图8。

依据处理退化分析结果,认为武隆三维观测系统存在以下不足:①平行构造走向(横向)覆盖次数低(5次),不利于向斜核部复杂回转波场采样;②束间滚动距(560 m)较大,面元属性均匀性差、采集脚印强,不利于叠前偏移成像;③需增加0~3 km中近偏移距覆盖次数,提高碳酸盐岩地表资料信噪比。为提高采集质量、确保成像效果,在类似地区开展地震采集应提高覆盖次数至90次,且应提高中近偏移距(<3 km)与平行构造走向的覆盖次数为主。

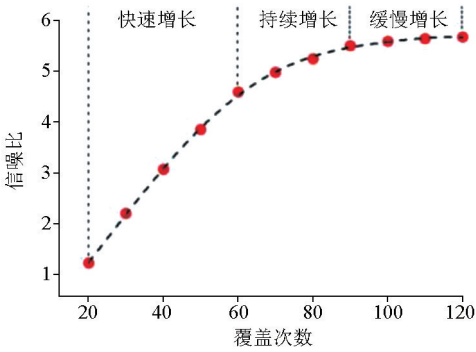


图8 武隆三维信噪比与覆盖次数关系

Fig. 8 Relationship between S/N ratio and coverage times of 3D seismic in Wulong

3.3 武隆东三维地震采集与效果

3.3.1 武隆东三维观测系统设计

基于武隆三维观测系统处理退化分析取得认识,武隆东三维设计采用小滚动距、高横向覆盖次数观测系统,提高技术针对性同时兼顾方案经济性,具体参数见表1;较武隆三维观测系统主要有3点优化改进:

1) 检波线距由280 m减小至240 m,炮线距由360 m减小至240 m,碳酸盐岩地表区20 m×20 m面元条件下总覆盖次数由武隆三维的60次提高至90次,0~3 km偏移距范围内覆盖次数由33~37次提高至55~57次,以增加中近偏移距覆盖次数为主。

2) 在保留80 m大炮点距设计基础上,采用“炮点错动布设”模式,即相邻炮线间炮点横向错动半个炮点距布设(图9),三维束线间滚动距离由560

m(2条检波线距)降低至240 m(1条检波线距),使得炮点分布更加均匀,面元属性均匀性更好,在不增加接收线数、缩小炮点距情况下,平行构造走向(横向)覆盖次数由5次提高至10次,同时保持观测系统具有较好经济性。

3)团堡次向斜核部大面积侏罗系砂岩覆盖,激发接收条件好、原始资料信噪比高,页岩埋深大(3 800~4 500 m);在该区采用差异化观测系统设

计,一方面增大炮线距至320 m,减少激发点,适当降低覆盖次数,节省采集成本,砂岩地表区共减少25%激发点;另一方面排列长度由4 300 m加长至4 480 m,以此加强向斜核部埋深较大(3 800~4 500 m)区域的目的层反射信息采样。

武隆东三维平均炮点密度51.25个/km²,为中石化邻区已实施大量页岩气三维地震炮点密度的49%~74%。

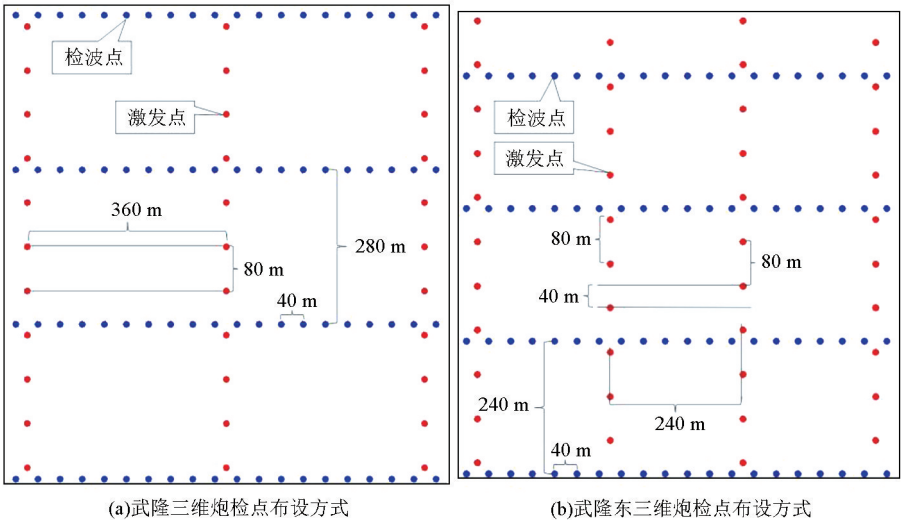


图 9 武隆三维(a)与武隆东三维(b)物理点布设模式对比

Fig. 9 Comparison of Wulong 3D(a) and Wulong East 3D(b) physical point layout mode

表 1 彭水地区页岩气地震观测系统参数

Table 1 Shale gas seismic observation system parameter in Pengshui area

项目	二维	武隆三维	武隆东三维	
			侏罗系砂岩地表区	碳酸盐岩地表区
观测系统	1L1S600T	20L7S216T	20L3S224T	20L3S216T
面元/线元	10 m	20 m×20 m	20 m×20 m	20 m×20 m
覆盖次数	100	12(纵)×5(横)=60次	7(纵)×10(横)=70次	9(纵)×10(横)=90次
道间距	20 m	40 m	40 m	40 m
检波线距		280 m	240 m	240 m
炮点距	60 m	80 m	80 m	80 m
炮线距		360 m	320 m	240 m
接收道数	600 道	216×20=4320 道	224×20=4480 道	216×20=4320 道
最大非纵距		2900 m	2380 m	2380 m
横纵比		0.67	0.53	0.55
束线间滚动距离		560 m	240 m	240 m
3000 m 内覆盖次数	50	33~37	41~43	55~57
炮点密度		34.72 个/km ²	39.06 个/km ²	52.08 个/km ²
炮道密度		15 万道/km ²	17.5 万道/km ²	22.5 万道/km ²

3.3.2 武隆东三维地震效果

图 10 所示,为地表岩性(碳酸盐岩地表)、目的层埋深(向斜核部最大埋深约3 000 m)、两翼地层倾角(15°~35°)、向斜构造宽度(13~16 km)基本相当情况下,武隆东三维(左)与武隆三维(右)叠加剖面对比,可见武隆东三维目的层反射信息能量更强、信噪比更高、波组特征更加清楚、向斜核部目的层回转波场信息更加丰富、浅层成像改善明显;表明武隆东三维观测系统优化方案有助于改善碳酸盐岩地表

区资料信噪比、提高向斜核部复杂回转波场采样。

武隆东三维叠前深度偏移剖面品质高、构造成像准确。依据武隆东三维地震资料部署实施隆页4HF井(图11),设计水平段1 800 m,地震预测A靶点深度4 045 m,水平段地层下倾8°~10°;实钻A靶点深度4 060 m(误差0.4%),水平段地层平均下倾9.1°;水平井轨迹设计精度高,精确指导钻井导向,优质页岩钻遇率达100%。

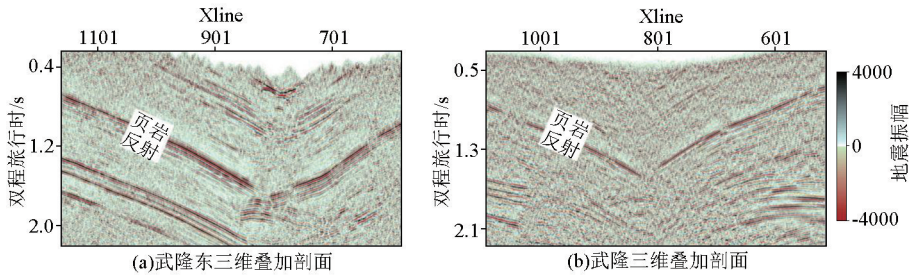


图 10 相同地表、构造条件下武隆东三维 (a) 与武隆三维 (b) 叠加对比

Fig. 10 Comparison of stack profiles between Wulong East 3D (a) and Wulong 3D (b) under the same surface and structural conditions

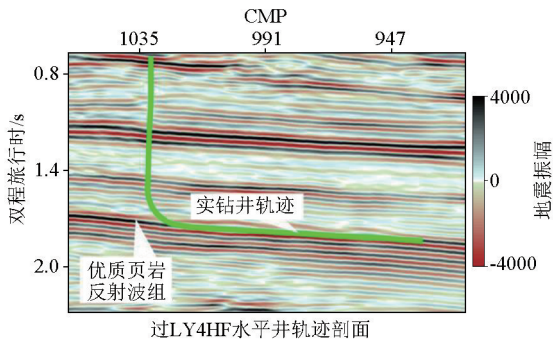


图 11 武隆东三维过页岩气水平井地震剖面

Fig. 11 Wulong East 3D seismic profile and shale gas horizontal well superposition display

4 结论

1) 小道距 ($\leq 20\text{ m}$) 二维采集可较为全面地采集记录该区干扰波特征、利于复杂山地静校正处理,建立了以 20 m 道距、 60 m 炮点距、 6 km 排列长度、 100 次覆盖次数、单线接收等参数为主的二维采集观测系统;二维剖面可见清晰五峰—龙马溪组页岩反射波组,但波组信噪比较低、难以准确查明页岩空间展布。

2) 处理退化分析表明,碳酸盐岩裸露区三维地震覆盖次数达 90 次时页岩反射波组信噪比趋于稳定, $0\sim 3\text{ km}$ 偏移距范围内信息对提高地震信噪比更有利且对静校正处理、浅层速度建模具有重要意义,平行构造走向观测利于向斜核部复杂回转波场采样。

3) 三维地震采集观测系统设计应以突出上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组地层的反射特征为主,采用宽方位、低炮点密度、高横向覆盖次数以及中近偏移距信息丰富的三维观测系统设计原则,同时做到平衡页岩气高昂的勘探开发成本;针对碳酸盐岩地表、向斜构造的地质条件,建立了以 40 m 道距、 240 m 接收线距、 20 线 216 道接收排列、 80 m 炮点距、 240 m 炮线距、炮点密度 $52.08\text{ 个}/\text{km}^2$ 、炮道

密度 $22.5\text{ 万道}/\text{km}^2$ 等参数为主的三维采集观测系统;针对砂岩地表、向斜构造的地质条件,采用 320 m 炮线距、 $39.06\text{ 个}/\text{km}^2$ 炮点密度、 4 480 m 排列长度、 $17.5\text{ 万道}/\text{km}^2$ 炮道密度,其他参数保持一致。

4) 二维地震采集剖面五峰—龙马溪组页岩反射波组较清晰,支撑了彭水地区常压页岩气的选区评价工作;三维地震采集大幅提升地震成像效果,精细落实地下构造,提高了优质储层钻遇率与钻井时效,有力支撑页岩气的勘探开发工作。

参考文献 (References):

[1] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等.中国页岩气勘探发现现状与优选方向[J].中国矿业大学学报,2020,49(1):13-35.
Nie H K, He Z L, Liu G X, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 13-35.

[2] 马新华.四川盆地南部页岩气富集规律与规模有效开发探索[J].天然气工业,2018,38(10):1-10.
Ma X H. Enrichment laws and scale effective development of shale gas in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 1-10.

[3] 何希鹏.四川盆地东部页岩气甜点评价体系与富集高产影响因素[J].天然气工业,2021,41(1):59-71.
He X P. Sweet spot evaluation system and enrichment and high yield influential factors of shale gas in Nanchuan area of eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 59-71.

[4] 郭彤楼,蒋恕,张培先,等.四川盆地外围常压页岩气勘探开发进展与攻关方向[J].石油实验地质,2020,42(5):837-845.
Guo T L, Jiang S, Zhang P X, et al. Progress and direction of exploration and development of normally-pressured shale gas from the periphery of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(5): 837-845.

[5] 郭彤楼.页岩气勘探开发中的几个地质问题[J].油气藏评价与开发,2019,9(5):14-19.
Guo T L. A few geological issues in shale gas exploration and development[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(5): 14-19.

[6] 何贵松,何希鹏,高玉巧,等.渝东南盆缘转换带金佛斜坡常压页岩气富集模式[J].天然气工业,2020,40(6):50-60.
He G S, He X P, Gao Y Q, et al. Enrichment model of normal-

- pressure shale gas in the Jinpo slope of the basin-margin transition zone in Southeast Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(6): 50-60.
- [7] 何希鹏, 何贵松, 高玉巧, 等. 渝东南盆缘转换带常压页岩气地质特征及富集高产规律[J]. 天然气工业, 2018, 38(12): 1-14.
- He X P, He G S, Gao Y Q, et al. Geological characteristics and enrichment laws of normal-pressure shale gas in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(12): 1-14.
- [8] 方志雄. 中国南方常压页岩气勘探开发面临的挑战及对策[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(5): 1-13.
- Fang Z X. Challenges and countermeasures for exploration and development of normal pressure shale gas in southern China[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(5): 1-13.
- [9] 方志雄, 何希鹏. 渝东南武隆向斜常压页岩气形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 819-827.
- Fang Z X, He X P. Formation and evolution of normal pressure shale gas reservoir in Wulong Syncline, Southeast Chongqing, China[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 819-827.
- [10] 曲寿利. 物探新技术是降低油气勘探开发成本的重要利器[J]. 石油物探, 2019, 58(6): 783-790.
- Qu S L. New geophysical exploration technology: An important tool to reduce the cost of oil and gas exploration and development[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 783-790.
- [11] 杨勤勇, 郭恺, 李博, 等. TTI 各向异性地震成像技术及其在页岩气勘探中的应用[J]. 石油物探, 2019, 58(6): 882-889, 897.
- Yang Q Y, Guo K, Li B, et al. Application of TTI anisotropic seismic imaging in shale gas exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 882-889, 897.
- [12] 陈祖庆, 杨鸿飞, 王静波, 等. 页岩气高精度三维地震勘探技术的应用与探讨——以四川盆地焦石坝大型页岩气田勘探实践为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 9-20.
- Chen Z Q, Yang H F, Wang J B, et al. Application of 3D high-precision seismic technology to shale gas exploration: A case study of the large Jiaoshiba shale gas field in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(2): 9-20.
- [13] 薛野, 任俊兴, 杨帆, 等. 南川复杂构造带常压页岩气变密度三维地震采集技术的实践与认识[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12461-12469.
- Xue Y, Ren J X, Yang F, et al. The practice and understanding of variable-density 3D seismic exploration technology of normal pressure shale gas in Nanchuan Complex Structural Belt[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12461-12469.
- [14] 周晓冀, 杨智超, 杜文军, 等. 四川盆地泸州区块页岩气三维地震覆盖密度优选[J]. 天然气勘探与开发, 2021, 44(2): 93-99.
- Zhou X J, Yang Z C, Du W J, et al. Optimizing 3D seismic coverage density in Luzhou shale-gas block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2021, 44(2): 93-99.
- [15] 薛野, 杨帆, 刘厚裕, 等. 彭水地区碳酸盐岩山地地表地震激发接收因素优选及效果[J]. 物探与化探, 2022, 46(3): 608-617.
- Xue Y, Yang F, Liu H Y, et al. Determination of the optimal factors of seismic excitation and reception on the ground surface of carbonate mountainous areas in Pengshui area and its seismic acquisition effects[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 608-617.
- [16] 薛野, 刘田田. 贵州织金浅煤层地震勘探技术的实践与认识[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 161-167.
- Xue Y, Liu T T. The practice and understanding of seismic exploration technology of shallow coal seams in Zhijin area, Guizhou Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 161-167.
- [17] 吕公河. 宽线地震勘探观测系统参数对信噪比的影响作用分析探讨[J]. 石油物探, 2013, 52(5): 495-501, 442.
- Lyu G H. Discussion on the influence of geometry parameters of wideline seismic survey on S/N[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(5): 495-501, 442.
- [18] 刘宜文, 罗勇, 尹丽丽, 等. 淮南复杂山地探区基准面静校正方法与质控策略[J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1209-1214.
- Liu Y W, Luo Y, Yin L L, et al. Strategy of static correction in complicated mountainous area on the south margin of Junggar Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1209-1214.
- [19] 敬朋贵, 殷厚成, 陈祖庆. 南方复杂山地三维地震勘探实践与效果分析[J]. 石油物探, 2010, 49(5): 495-499, 19.
- Jing P G, Yin H C, Chen Z Q. 3D seismic exploration practice and effect analysis in complicated mountainous area in Southern China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(5): 495-499, 19.
- [20] 冯凯, 和冠慧, 尹成, 等. 宽方位三维观测系统的发展现状与趋势[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 24-28, 113.
- Feng K, He G H, Yin C, et al. Present situation and prospect of wide-azimuth 3D inspection system[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2006, 28(6): 24-28, 113.
- [21] 刘依谋, 印兴耀, 张三元, 等. 宽方位地震勘探技术新进展[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(3): 596-610, 420.
- Liu Y M, Yin X Y, Zhang S Y, et al. Recent advances in wide-azimuth seismic exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(3): 596-610, 420.
- [22] 刘传虎. 宽方位地震技术与隐蔽油气藏勘探[J]. 石油物探, 2012, 51(2): 138-145, 104.
- Liu C H. Wide azimuth seismic technique and subtle hydrocarbon reservoir exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(2): 138-145, 104.
- [23] 屠世杰. 高精度三维地震勘探中的炮密度、道密度选择——YA 高精度三维勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 926-936, 792.
- Tu S J. Selection of shot density and trace density in high precision 3D seismic exploration: A high precision 3D exploration case in YA area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(6): 926-936, 792.
- [24] 陈吴金, 于静, 张怀邦, 等. 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, 741.
- Chen W J, Yu J, Zhang H B, et al. Variation regularity of weak reflected signal in high density seismic acquisition[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 701-710, 741.
- [25] 齐中山, 王静波, 张文军, 等. 米仓一大巴山山前带地震勘探进展及下一步攻关方向探讨[J]. 石油物探, 2018, 57(3): 458-

469.

China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57 (3) : 458-469.

Qi Z S, Wang J B, Zhang W J, et al. Progress and research direc-
tion of seismic exploration in the Micang-Dabashan piedmont zone,

Seismic data acquisition of normally pressured shale gas reservoirs in residual synclines in the Pengshui area, Sichuan Basin, China

XUE Ye, YANG Fan, ZHAO Su-Cheng, LAN Jia-Da

(Research Institute of Exploration & Development, East Company, SINOPEC, Nanjing 210007, China)

Abstract: Normally pressured shale gas reservoirs in southern China, exhibiting significant potential resources, are primarily distributed in Silurian residual synclines at the periphery of the Sichuan Basin. Given intricate geological conditions in the study area, seismic data with high signal-to-noise ratios (SNRs) are required for fine-scale characterization of underground structural features and accurate description of the distribution patterns of high-quality shales. The purpose is to improve the probability of penetration of high-quality shales in horizontal wells and the drilling efficiency. Since 2011, the research and application of seismic data acquisition have been continually conducted in the Pengshui area. This study systematically summarized the methods, effects, and deficiencies of relevant projects implemented, and analyzed regional noise characteristics, the influence of channel spacing on static correction, and the degradation of the 3D seismic observation system. The results are shown as follows: (1) The 2D seismic data acquisition profiles displayed relatively clear reflection wave groups of shales in the Wufeng-Longmaxi formations, supporting the target selection and evaluation of normally pressured shale gas reservoirs; (2) The design principles of a 3D observation system, characterized by a wide azimuth, a low shot density, a high lateral fold number, and rich medium-near offset information, were proposed in this study; (3) The 3D seismic data processing profiles manifested high SNRs and clear wave group characteristics. The drilling results reveal accurate 3D structure imaging and a formation depth prediction error below 1%, strongly supporting shale gas exploration and production. The technical system in this study can be applied to similar exploration areas of normally pressured shale gas reservoirs.

Key words: residual syncline; normally pressured shale gas reservoirs; seismic data acquisition; observation system; signal-to-noise ratio

(本文编辑: 叶佩)