

引用格式:刘厚裕.页岩气低密度三维地震勘探方法适应性评估分析[J].油气藏评价与开发,2020,10(5):34-41.

LIU H Y. Adaptability evaluation and analysis of low density 3D seismic exploration method for shale gas[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(5): 34-41.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.05.005

# 页岩气低密度三维地震勘探方法适应性评估分析

刘厚裕

(中国石化华东油气分公司,江苏南京210019)

**摘要:**“两宽一高”三维地震勘探技术广泛应用于常规和非常规油气勘探。技术有效性和经济性是制约地震勘探的两个主要因素,尤其是非常规油气勘探,其经济性是主要的影响因素。以武隆地区常压页岩气三维地震勘探为例,介绍了页岩气低密度、经济性三维成功做法,并且达到降低三维地震资料勘探成本、提高勘探效果的目的。结合与其类似的桃子荡地区常规三维地震勘探实例,着重对信噪比进行评估分析。指出了构造相对简单、区域性富集且具有强反射地震界面目的层的应用地质背景,性价比较高的低密度观测系统,能量强与信噪比高的单炮记录,及提高信噪比和高精度静校正的处理方法针对性的应用地震勘探技术是成功实现页岩气低密度三维关键。采用深井大药量饱和激发确保地震采集资料的能量和信噪比,提高有效炮的比率,以及现场管理方法和措施值得借鉴。其成功经验已在桂花和阳春沟两块三维地震勘探推广应用。

**关键词:**低密度;三维地震勘探;常压页岩气;饱和激发;信噪比;评估分析

中图分类号:TE132

文献标识码:A

## Adaptability evaluation and analysis of low density 3D seismic exploration method for shale gas

LIU Houyu

(Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

**Abstract:** 3D seismic exploration technology with the mode of “Wide-azimuth, high-density and broadband” is widely used in the exploration of conventional and unconventional oil and gas. Technical effectiveness and economy are the two main factors restricting seismic exploration, especially unconventional oil and gas exploration (shale oil and gas, coalbed methane, etc.), whose economy is the main influencing factor. Taking 3D seismic exploration for the shale gas with normal pressure in Wulong as an example, the successful 3D method of shale gas with low density and economy is introduced, and the purpose of reducing the exploration cost of 3D seismic data and improving the exploration effect is achieved. Combined with the similar conventional 3D seismic exploration examples in Taozidang area, the S/N ratio is evaluated and analyzed emphatically. It is pointed out that the application geological background with relatively simple structure, regional enrichment and strong reflective seismic interface, low density observation system with high cost performance, single shot record with high energy and SNR, and methods of improving S/N ratio and high-precision static correction for seismic exploration are the keys to the success of low density 3D shale gas. The application of deep well and large dosage saturation excitation to ensure the energy and S/N ratio of seismic acquisition data, improve the ratio of effective seismic record ratio, and the method and measure of field management are worthy of reference. Its successful experience has been widely used in 3D seismic exploration in Guihua and Yangchungou.

**Key words:** low-density, 3D seismic, normal-pressure shale gas, saturate exploding, S/N(signal-to-noise) ratio, evaluation analysis

收稿日期:2020-02-19。

作者简介:刘厚裕(1963—),男,本科,高级工程师,主要从事非常规资源勘探开发地震勘探技术管理工作。地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼,邮编:210019。E-mail:njlhy1963@163.com

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)。

对于四川盆地周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩残留向斜内的常压页岩气而言,其主要特点:1)地下保存条件遭受破坏,页岩气主要以吸附态残存于页岩储层中,地层压力系数一般小于1.3,单井产量低;2)地表为复杂山地,地形高差大,出露岩性多为灰岩且横向变化大;3)勘探开发难度大,“降低勘探投入成本,提高勘探效率”<sup>[1]</sup>的工程技术(包括三维地震勘探技术)是实现商业开发的关键。

随着计算机技术和地震仪器装备等的飞速发展,百万道采集地震仪器<sup>[2]</sup>能够满足高密度地震勘探技术要求。近年来在油气勘探领域,以高精度叠前深度偏移成像技术为核心的“两宽一高”(宽频、宽方位、高密度)三维地震勘探技术<sup>[3-4]</sup>已成为主流和方向,导致三维地震勘探资料采集、处理成本急剧上升。尤其是在非常规资源勘探(页岩油气、煤层气等),其经济性是制约地震勘探的主要因素。目前,解决低油价与地震勘探成本上升的矛盾,已成为石油公司和地震行业瓶颈问题。

在中国南方山地进行页岩气三维地震勘探<sup>[5]</sup>,衡量和评价地质效果主要指标是地震资料的信噪比和保真度。页岩气三维地震勘探主要任务除了满足常规油气查明地层空间展布、落实构造细节、预测岩性油气藏等外,还要满足寻找页岩气地质和工程甜点、页岩气藏建模<sup>[6]</sup>、钻井轨迹设计和水平井轨迹地震地质导向<sup>[7]</sup>等要求,为降低页岩气勘探开发井失误率和提高水平井轨迹在优质页岩气层穿行率提供支撑,已成为页岩气勘探开发不可缺少的有效方法。

以地下为向斜型构造、地表为山地灰岩出露的“单复杂”武隆地区常压页岩气勘探开发为例,并结合类似地区的桃子荡常规三维地震资料,着重对信噪比进行对比分析,为现阶段寻找“经济、适用、有效”三维地震方法探出新的思路,总结出可以推广和借鉴的经验。

## 1 问题提出

中国南方常压页岩气资源丰度低、分布范围广、资源总量大,具有巨大的勘探开发潜力,已成为国内页岩气勘探攻关的重点<sup>[9-14]</sup>。武隆地区是四川盆地周缘众多典型的奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩残留向斜之一。通过多年的勘探攻关,武隆地区常压页岩气取得了突破。LY1HF井测试产量为

$4.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、LY2HF井测试产量  $9.22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,但单井产量  $(2 \sim 4.5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,属于边际效益。武隆地区志留系龙马溪组常压页岩气有望成为常压页岩气商业开发的示范基地,已列为国家科技重大专项资助的重点研究区。

武隆地区地表复杂,山地地表高差大,出露岩性有侏罗系、三叠系、二叠系、志留系、奥陶系等地层(图1)。地下构造相对简单,以大型宽缓向斜构造为主,志留系页岩埋深为1 500~4 500 m,断层不发育,有良好的反射界面等(图2)。以往的二维地震资料虽然查清了基本构造格局,但构造细节不落实。要查明武隆地区的构造细节、断层分布及地层展布特征,精细评价志留系龙马溪组页岩气目的层,落实“甜点”发育区和气藏建模,为井位部署和水平井轨迹设计、跟踪提供依据,就必须开展三维地震勘探。

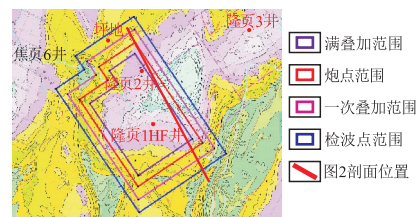


图1 武隆三维工区

Fig. 1 3D seismic prospect of Wulong area

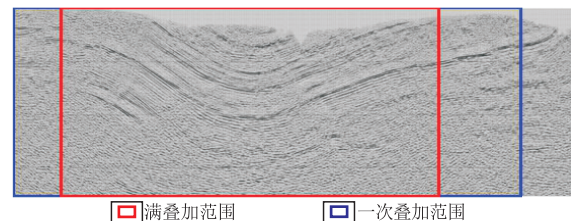


图2 武隆三维工区典型二维地震剖面

Fig. 2 Typical 2D seismic section of Wulong area

影响地震资料采集成本主要因素是炮道密度,尤其是炮密度。依据单位平方千米炮密度、道密度<sup>[15]</sup>统计数定义三维地震勘探密度。一般认为,炮道密度小于30万炮道/ $\text{km}^2$ 为低密度,30~100万炮道/ $\text{km}^2$ 为中密度(常规),大于100万炮道/ $\text{km}^2$ 为高密度。密度越高、精度超高、成本越大。近十年来,中国石化在南方页岩气勘探过程中,先后实施焦石坝、焦石坝南(平桥北)、南川、丁山、东溪、平桥西(桃子荡)等页岩气三维地震勘探,炮道密度为36~49万道/ $\text{km}^2$ (图3)。武隆地区作为国家科技重大专项常压页岩气重点研究区,是渝东南盆缘构造复杂带残留向斜

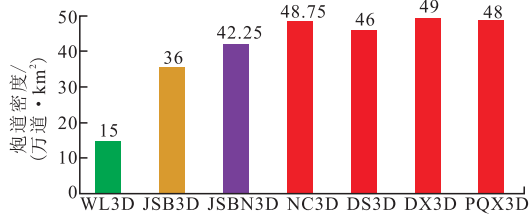


图3 武隆及周边三维地震资料采集炮道密度统计

Fig. 3 Statistic of shot trace density gathered by 3D seismic data in Wulong and surrounding areas

常压页岩气有利目标区的典型代表。基础地质理论研究和低成本工程工艺技术攻关是实现商业开发的关键。在综合考虑技术、成本和效益基础上经过反复调研和论证,选择页岩气低密度三维地震勘探进行方法攻关。主要攻关思路是:在总结周边地区三维地震勘探方法和资料分析基础上,以满足勘探目标和地质任务要求为准则,基于正演模型算法,对面元大小、覆盖次数、炮检点分布等观测系统参数进行充分论证,采用深井大药量饱和激发提高单炮能量及信噪比、降低炮道密度,从而达到降低三维地震资料采集成本。武隆地区页岩气低密度三维地震炮道密度只有15万道/km<sup>2</sup>,不到邻区页岩气常规三维地震的1/3,能否满足地质任务的要求是关键。攻关一旦获得成功,对类似地区常压页岩气勘探开发具有示范带动意义。

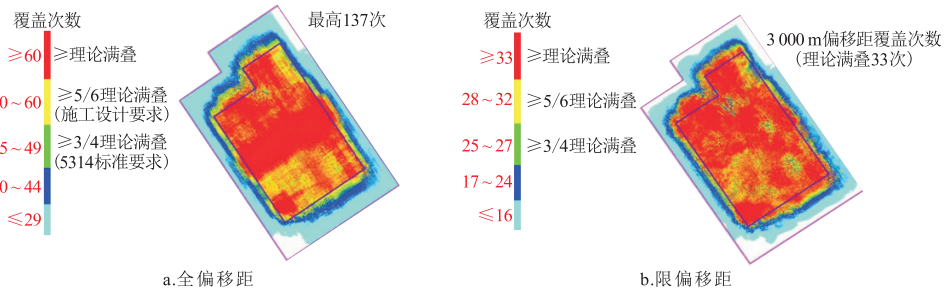
## 2 武隆地区三维地震勘探

武隆地区常压页岩气三维地震勘探主要地质任务是查清志留系龙马溪—奥陶系五峰组地层空间展布、预测页岩气地质与工程“甜点”、为钻井设计与轨迹跟踪、气藏建模和提交储量提供依据和支撑,为实现商业开发利用常压页岩气,有针对性地寻求性价比较高的页岩气低密度三维地震勘探方法,探索出“降本增效”途径。页岩气低密度三维地震勘探设计

的主要技术依据是:1)武隆地区地下为一宽缓的向斜构造,凹界面对射线的聚焦作用;2)以往二维地震剖面表明向斜内的志留系页岩反射波组具有较高的信噪比;3)基于宽方位地震数据中的方位各向异性信息开展页岩裂缝预测。主要攻关思路是:1)采用饱和激发提高原始单炮能量、减少炮密度和叠加次数,降低三维地震资料采集成本;2)根据地表和地下构造复杂情况,有针对性地调整激发接收点布设,确保有利目标区资料采集满足地质任务要求;3)加强资料采集质量控制,尤其是激发接收环节噪音控制,提高原始资料的信噪比;4)选择在高保真前提下、着重提高信噪比和高精度静校正的处理流程和参数,确保处理和解释成果能为常压页岩气勘探开发提供支撑;5)结合成果应用和效果分析进行后评估。

武隆地区页岩气低密度三维地震勘探资料采集观测系统见表1。全偏移距覆盖次数为60次(纵向12次、横向5次),3 000 m偏移距覆盖次数为33次(图4),共计25束线,满覆盖面积195.37 km<sup>2</sup>,资料面积411.34 km<sup>2</sup>,炮点面积287.94 km<sup>2</sup>(炮密度35.54炮/km<sup>2</sup>)、施工面积555.56 km<sup>2</sup>(道密度90.78道/km<sup>2</sup>)。采用深井大药量炸药震源激发(砂页岩区激发因素:井深21 m、药量14 kg;三叠系灰岩区:井深23 m、药量16 kg;二叠系灰岩区:井深25 m、药量18 kg;14 kg以上药量激发单炮占比大于85%,最低激发药量8 kg,图5)。

现场采用以“质量为核心”的“123456工作法”实行全过程管控,即:组建1个攻关项目组,构建“地质物探相结合、设计采集处理解释一体化<sup>[6]</sup>”2个平台,采用“甲、乙和监督”3方独立运行模式,坚持“组织管理、质量控制、技术支持、处理解释”4个方面到现场,严抓“测量、钻孔、下药、检波器器置、干扰背景控制”5个环节质量,达到“设计、管理、队伍、施工、技术、成果”6个一流的管理目标。例如:为确保激发环节的能量,设计要求“14 kg以上药量激发单炮占比大于85%,最低激发药量8 kg”,钻孔、下药采用100%视



a.全偏移距

b.限偏移距

图4 武隆三维地震实际覆盖次数

Fig. 4 Actual fold number distribution of Wulong 3D seismic survey

表1 桃子荡与武隆地区地质背景与三维地震采集方法对比

Table 1 Comparison of geological background and 3D seismic acquisition methods in Taozidang and Wulong

对比项目	桃子荡地区	武隆地区
勘探目的层	二叠系(礁滩)、志留系	志留系
目的层埋深/m	二叠系:1 800~3 500;志留系:2 500~4 500	志留系:1 500~4 000
构造类型	斜坡	向斜
断层发育程度	不发育	不发育
地表类型	山地,地表高差较小	山地,地表高差大
地表出露岩性	侏罗系砂岩(80%)、少部分三叠系灰岩	三叠系、二叠系灰岩、少部分侏罗系砂岩(25%)
二叠系地质任务	精细刻画二叠系内幕反射,寻找礁滩有利目标,为探井提供依据	
志留系页岩气地质任务	查清志留系龙马溪—奥陶系五峰组地层空间展布、预测页岩气地质与工程“甜点”、为钻井设计与轨迹跟踪、气藏建模和提交储量提供依据和支撑	
观测系统	24L7S288T1R192F	20L7S216T2R60F
纵向排列	5740-20-40-20-5740	4300-20-40-20-4300
面元尺寸	20 m×20 m	20 m×20 m
覆盖次数	16(横)×12(纵)=192次	12(横)×5(纵)=60次
二叠系覆盖次数	埋深2 000 m时,75次	
志留系覆盖次数	埋深3 000 m时,105次	埋深3 000 m时,33次
道间距/m	40	40
检波线距/m	280	280
炮点距/m	360	360
接收道数	288×24=6 912道	216×20=4 320道
最大非纵距/m	3 340	2 900
纵横比	0.58	0.67
线束间滚动距离/m	280	560
炮道密度/(万道·km <sup>2</sup> )	47.5	15
激发因素	炸药震源,平均井深20 m、药量10.5 kg	炸药震源,平均井深23 m、药量14.7 kg
接收因素	12个20DX-10Hz检波器圆形埋置组合接收	24个20DX-10Hz检波器同心圆埋置组合接收
地震剖面对比	地表出露岩性均为侏罗系砂岩,志留系埋深都在3 000 m左右	

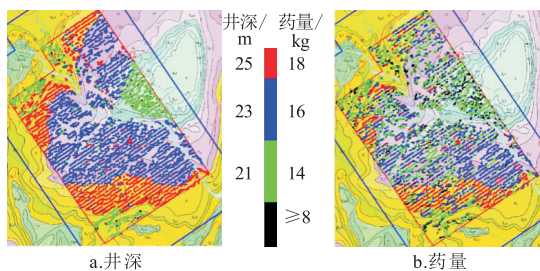


图5 武隆三维地震炸药震源井深、药量分布

Fig. 5 Dynamite source well depth and charge distribution of Wulong 3D seismic survey

频录像;为确保接收环节质量,检波器埋置采用100%照片上传;为确保激发接收点位准确率,炮、检点偏移采用100%复测;为确保原始资料信噪比,派专人到仪器组控制激发接收时的噪音干扰等;按照复杂山地三维地震资料采集现场处理<sup>[17]</sup>操作流程进行现场监控处理,对当日资料单炮记录品质分析不过夜、监控剖面不超过48 h,做到及时反馈并提示施工方、监督方对发现的问题及时整改。通过“123456

工作法”的实施,使得现场资料采集的每一炮、每一道质量均在有效受控状态。

武隆页岩气低密度三维地震勘探资料采集主要存在两个方面的问题:1)受炮道密度低的影响,资料处理准确求取静校正量难度加大;2)受地表障碍物(如城镇、铁路和公路、地质灾害点、溶洞等)的影响,激发、接收点分布不均匀,造成CMP面元内道集、炮检距、方位角等分布不均匀,资料保真处理和成像难度加大。针对这两个方面的问题,武隆页岩气低密度三维地震资料处理,参照“两宽一高”(宽频、宽方位、高密度)三维地震资料处理技术在高保真的前提下,注重提高信噪比和高精度静校正处理环节以弥补资料采集存在的缺陷。针对提高信噪比和高精度静校正的处理方法主要有:①针对不同地表岩性条件下的噪声特征,采用差异化分步、多域噪声衰减<sup>[18-19]</sup>处理精细去噪;②针对复杂山地静校正和单位面积内炮、检点分布点较少的特点,采用基于近地表

速度模型<sup>[20]</sup>反演的方法进行多轮次静校正迭代;③针对因大型障碍物造成变观、不规则采样问题,采用三维规则化处理技术<sup>[21-22]</sup>实现数据规则化重构,使得反射面元属性的均匀性趋好。

武隆地区三维地震数据体处理受低密度采集的影响,如果保真度不高,就存在海相沉积地层和页岩层的地震反射波组“串相位”<sup>[23]</sup>和混波的缺陷(图6)。在地震资料处理解释一体化<sup>[24]</sup>运作模式下,采用建立构造模式基础上重构偏移速度模型、通过地层构造格架和地层倾角共同来约束反演趋势进行叠前深度偏移,使得陡倾角地层成像保真度效果得到明显提高。经过多次迭代,最终提交的数据体“串相位”现象基本消除(图7)。

通过武隆页岩气低密度三维地震的实施,取得主要成果是:1)获得了三维满覆盖主体区主要目的层五峰组—龙马溪组地震反射波组信噪比大于5的较好资料(图8、图9);2)地震反射波组与三维区内现有的LY1和LY2钻井以及LY1HF和LY2HF钻遇的地层吻合程度好(图10、图11);3)目的层五峰组—龙

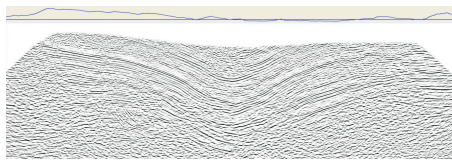
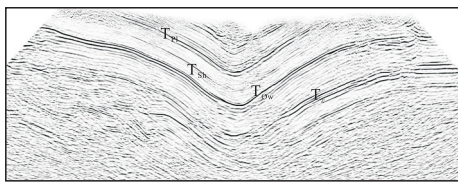


图6 武隆三维地震初步处理剖面反射波组“串相位”和混波现象严重

Fig. 6 Serious “series phase” and mixed wave phenomenon of reflection wave group in preliminary processing by 3D seismic in Wulong area



(T<sub>n</sub>二叠系龙潭组反射, T<sub>n</sub>志留系韩家店组反射, T<sub>n</sub>奥陶系五峰组反射, T<sub>n</sub>寒武系反射)

图7 武隆三维地震最终成果剖面

Fig. 7 Final result section of Wulong 3D seismic section

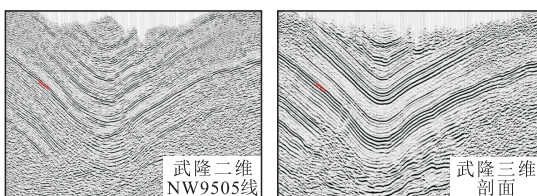


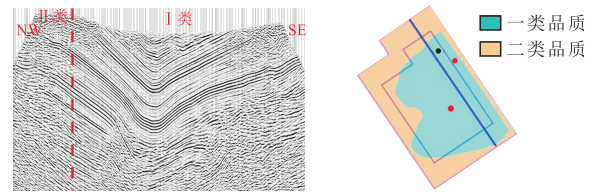
图8 武隆地区三维地震与以往的二维地震剖面对比

Fig. 8 Comparison of 3D and 2D seismic sections in Wulong

马溪组空间展布规律更加可靠(图12);4)CMP道集表明,志留系龙马溪组—奥陶系五峰组页岩储层AVO响应明显,地质工程甜点和地应力预测<sup>[25]</sup>可信用度高(图13);5)地震资料满足页岩气储层评价要求,为新一轮钻井部署提供可靠的支撑;6)通过高保真的前提下注重提高信噪比和高精度静校正处理技术,以弥补资料采集存在的缺陷,从而实现低密度三维地震资料采集成本较以往类似地区下降46%,为常压页岩气勘探开发探索出一套经济实用有效的地震勘探方法与技术,对推动中国南方常压页岩气实现商业开发具有重要借鉴意义。

### 3 评估分析

中国南方山地灰岩出露区地震资料信噪比低,主要原因是地表高差大、出露岩性横向变化大、灰岩出露区浅地表溶洞和煤矿坑道等广泛分布,给地震资料采集激发和接收环节一致性以及资料处理静校正、速度分析<sup>[26-27]</sup>和成像等带来较大影响<sup>[28]</sup>。因此,评



a. Inline 900剖面品质分析 b. 武隆三维地震反射波组品质分析 (满覆盖范围内I类占86%)

图9 武隆地区志留系龙马溪组—奥陶系五峰组三维地震反射波组品质分析

Fig. 9 Quality analysis of 3D seismic reflection wave group of Longmaxi Ordovician Wufeng Formation of Silurian in Wulong

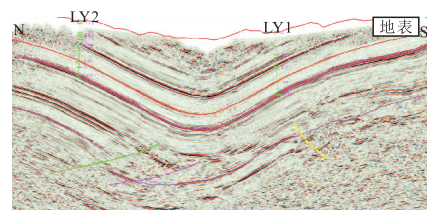


图10 过LY1井和LY2井连井剖面

Fig. 10 Cross well profile of Well-LY1 and Well-LY2

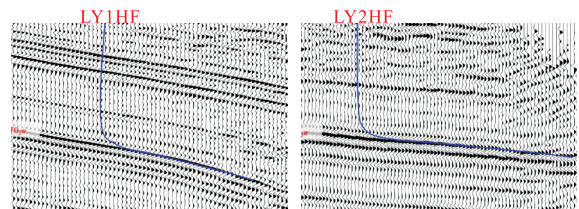


图11 过LY1HF井和LY2HF井连井剖面

Fig. 11 Profile of Well-LY1HF and Well-LY2HF

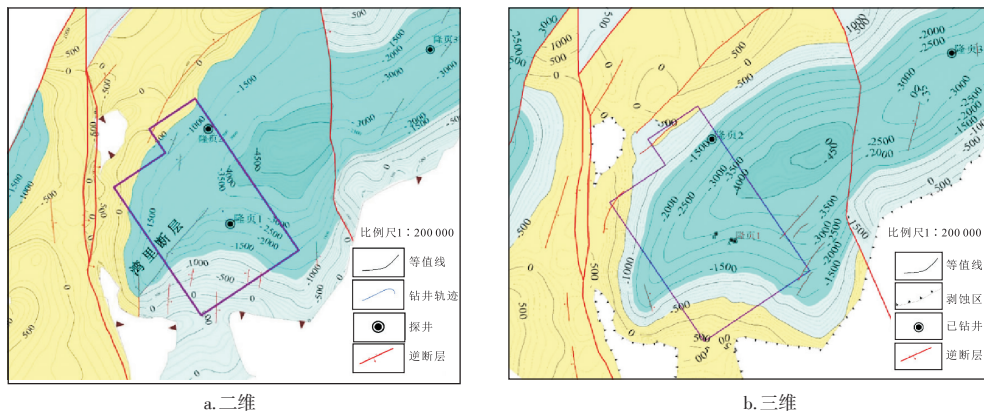


图12 武隆地区志留系龙马溪—奥陶系五峰组底面构造

Fig. 12 Bottom structure of Silurian Wufeng-Ordovician Longmaxi Formation in Wulong area

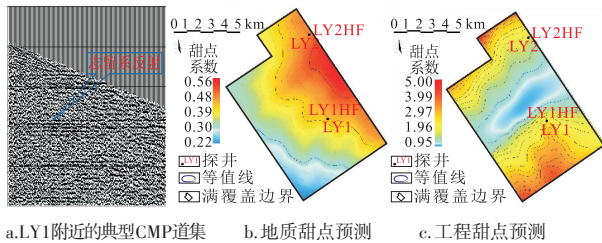


图13 武隆地区志留系页岩气甜点预测  
(红色:高值;蓝色:低值)

Fig. 13 Sweet spot prediction of Silurian shale gas dessert in Wulong (red: high value; blue: low value)

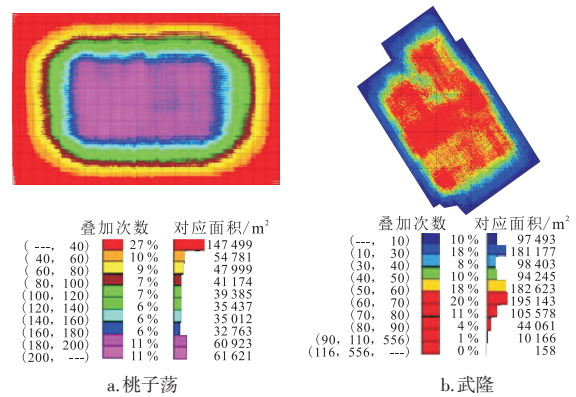


图14 三维地震叠加次数对比

Fig. 14 Comparison of 3D seismic stacking times

价此类资料的品质主要指标是勘探目的层反射波组的信噪比。

桃子荡三维地震勘探工区是位于四川盆地内、地表出露岩性80%为侏罗系砂岩,地表地形高差与武隆三维地震勘探工区相比相对较小,地下构造为斜坡型,相对简单,勘探目的层为二叠系(礁滩)和志留系(页岩)。桃子荡与武隆三维地震勘探工区一样,都是地表地形相对复杂、地下构造相对简单的“单复杂”地区,两者具有可比性(表1)。桃子荡三维地震勘探方法采用192次覆盖、炮道密度为47.5万道的观测系统(图14)。通过对桃子荡三维地震勘探的分析,为武隆三维地震勘探评估分析<sup>[29]</sup>提供参考依据。

影响地震资料信噪比因素很多。将2块三维地震资料采用同一流程和参数进行抽炮处理,分别形成桃子荡三维20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120次叠加地震数据体和武隆三维20、30、40、50、60次叠加地震数据体。武隆三维地震数据选取地表岩性与桃子荡地区一样都是侏罗系砂岩覆盖地区、志留系埋深都在3 000 m左右的地震剖面,针对相对稳定的龙马溪目的层反射波组进行信噪比分析,其分

析结果是能够反映原始资料叠加次数与信噪比之间的关系(图15、图16)。

通过对2个工区三维地震覆盖次数与平均信噪比关系分析,发现在地表复杂、地下构造相对简单的向斜构造区,能满足五峰—龙马溪组地震资料成像和地质任务要求的,较为经济的三维地震覆盖次数为80次左右。图16中可以看出,在相同覆盖次数的情况下,武隆三维地震数据体资料显示志留系反射波组信噪比略高于桃子荡三维,分析主要原因是:1)武隆三维地震资料采集过程中,采用“14 kg以上药量激发单炮占比大于85%,最低激发药量8 kg”有效措施,平均井深和药量都比桃子荡三维要大,在激发环节采用饱和激发,保证了每一炮的资料采集能量(图17);2)武隆三维采用2串24个20DX-10 Hz检波器同心圆埋置组合接收,比桃子荡三维单串12个20DX-10 Hz检波器圆形埋置组合接收压制干扰效果要好一些,在接收环节保证组合接收效果;3)志留系平均埋深和所处的构造位置,武隆为3 000 m左

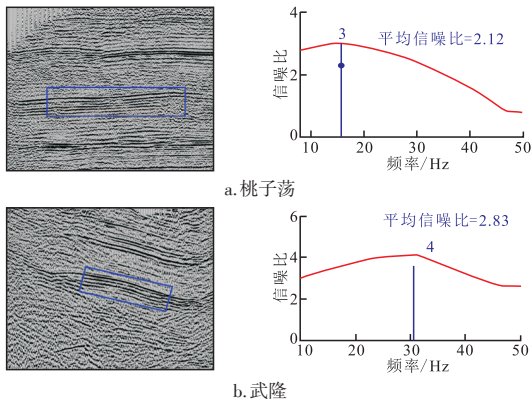


图15 三维地震叠加次数为40次信噪比分析  
Fig. 15 Analysis of S/N ratio for 40 times of 3D seismic stacking

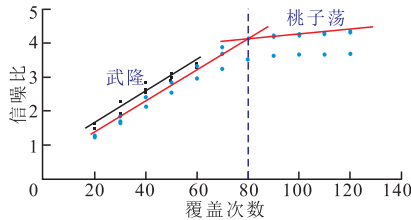


图16 桃子荡与武隆三维地震覆盖次数与平均信噪比关系  
Fig. 16 Relation between 3D seismic coverage times and average S/N of Taozidang and Wulong

右、向斜部位(对地震成像有聚焦作用),桃子荡为4 000 m左右、斜坡部位。虽然武隆地区地表灰岩出露占75%,桃子荡地区地表砂岩出露占80%,激发和接收条件武隆地区不如桃子荡地区,由于采取了针对性方法,使得同叠加次数的三维地震数据体的信噪比武隆三维比桃子荡三维略高。

武隆虽然覆盖次数偏低(60次),仅达到80次的3/4,但仍能使得满覆盖区域的地震资料能够满足地

质任务的要求。为了确保地震勘探地质效果,建议在后续类似地区进行三维地震勘探时,覆盖次数应不低于80次,炮道密度应不低于20万道/km<sup>2</sup>。页岩气低密度三维地震勘探方法和经验,中国石化现已在四川盆地西南缘正在实施的桂花和阳春沟变密度三维推广应用。桂花三维是地下构造相对简单、断层不发育,地表高程较大的“单复杂”地区,南部地层倾角较陡,地表主要出露岩性为二叠系、三叠系灰岩;北部地层倾角较缓、地表主要出露侏罗系、白垩系砂岩,勘探主要目的层是志留系页岩,埋深在750(南)~5 000(北)m。根据工区的特点、地质任务要求和降本增效的理念,借鉴武隆地区页岩气低密度三维经验,南部采用130次覆盖、30万道/km<sup>2</sup>炮道密度,北部采用72次覆盖、18万道/km<sup>2</sup>数炮道密度的变密度三维地震方法。阳春沟三维是地下构造复杂、地表情况复杂的“双复杂”地区,勘探主要目的层是志留系页岩,埋深在1 000(南)~4 500(北)m。同样根据工区的特点、地质任务要求和降本增效的理念,借鉴武隆地区页岩气低密度三维经验,南部地层倾角较陡、断层发育、西部为一高陡构造带,地表主要出露岩性为二叠系、三叠系灰岩,采用180次覆盖、45万道/km<sup>2</sup>炮道密度三维地震方法进行资料采集;北部地层倾角较缓、断层不发育、地表主要出露侏罗系砂岩,采用90次覆盖、45万道/km<sup>2</sup>炮道密度三维地震方法进行资料采集。

### 4 结论

1) 页岩气低密度三维地震勘探技术应用地质背景是地下构造相对简单地区区域性富集且具有强反

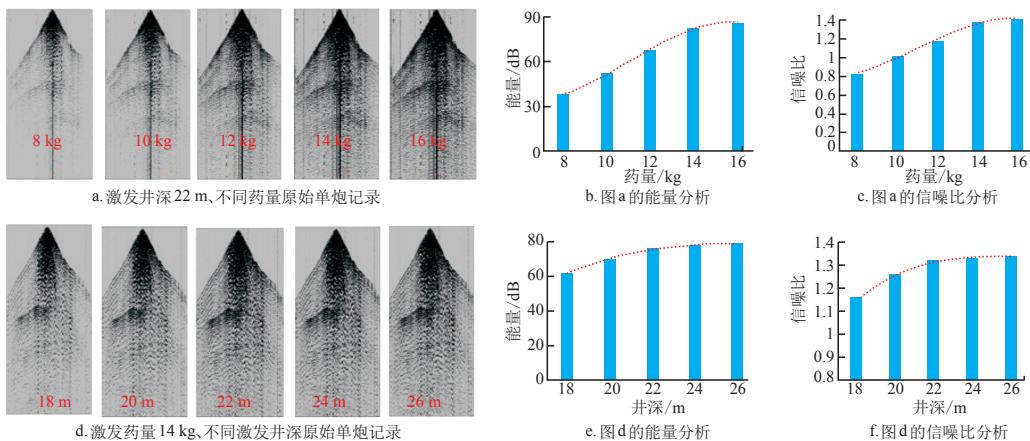


图17 侏罗系砂岩不同激发因素单炮记录能量与信噪比分析  
Fig. 17 Analysis of energy and S/N ratio recorded by single shot for different excitation factors of Jurassic sandstone

射地震界面目的层,其特点是针对性地选择性价比较高的页岩气低密度观测系统,采用深井大药量饱和激发提高单炮能量与信噪比,采取高保真前提下的提高信噪比和高精度静校正的处理方法,达到降低三维地震资料勘探成本、提高勘探效果的目的。

2) 在实际应用时,以页岩气低密度三维地震勘探技术为基础,根据地下构造和地表出露岩性情况,在有利目标区适当增加有效炮,可形成变密度宽方位三维地震勘探技术。

3) 坚持深井大药量饱和激发,提高有效炮比率是低密度三维地震勘探资料采集的关键。武隆地区采用“14 kg以上药量激发单炮占比大于85%,最低激发药量8 kg”的经验,对激发环节提高有效炮比率、确保单炮记录的能量和信噪比起关键作用,值得借鉴。

4) 武隆地区常压页岩气低密度三维地震勘探经验可以推广到类似的地表复杂、地下构造相对简单的地区。

#### 参考文献

- [1] 马永生,张建宁,赵培荣,等.物探技术需求分析及攻关方向思考[J].石油物探,2016,55(1):1-9.  
MA Y S, ZHANG J N, ZHAO P R, et al. Requirement analysis and research direction for the geophysical prospecting technology of SINOPEC[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(1): 1-9.
- [2] 夏颖,王艳,王丽新,等.适用于百万道采集的地震仪器技术展望[J].物探装备,2013,23(5):281-284.  
XIA Y, WANG Y, WANG L X, et al. Prospect of seismic instrument technology suitable for million channel acquisition[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2013, 23(5): 281-284.
- [3] 王华忠.“两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析[J].石油物探,2019,58(3):313-324.  
WANG H Z. Key problem analysis in seismic exploration based on wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(3): 313-324.
- [4] 宁宏晓,唐东磊,皮红梅,等.国内陆上“两宽一高”地震勘探技术及发展[J].石油物探,2019,58(5):645-653.  
NIN H X, TANG D L, PI H M, et al. The technology and development of “WBH” seismic exploration in land, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(5): 645-653.
- [5] 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[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.
- [6] 龙胜祥,张永庆,李菊红,等.页岩气藏综合地质建模技术[J].天然气工业,2019,39(3):47-55.  
LONG S X, ZHANG Y Q, LI J H, et al. Comprehensive geological modeling technology for shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(3): 47-55.
- [7] 查树贵,刘利平,廖朋,等.水平井地震地质导向技术及其在涪陵页岩气田的应用[J].石油物探,2018,57(3):369-377.  
ZHA S G, LIU L P, LIAO P, et al. Seismic geo-steering technology of horizontal well and its application in Fuling shale gas field[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3): 369-377.
- [8] 何贵松,何希鹏,高玉巧,等.一种盆缘复杂构造区常压页岩气藏成藏模式建立方法:CN110259440A[P]. 2019-09-20.  
HE G S, HE X P, GAO Y Q, et al. A method to establish the reservoir forming model of atmospheric shale gas reservoir in the basin margin complex structural area: CN110259440A[P]. 2019-09-20.
- [9] 王超,张柏桥,舒志国,等.四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J].石油与天然气地质,2018,39(3):485-497.  
WANG C, ZHANG B Q, SHU Z G, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation—Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 485-497.
- [10] 何陈诚,何生,郭旭升,等.焦石坝区块五峰组与龙马溪组一段页岩有机孔隙结构差异性[J].石油与天然气地质,2018,39(3):472-484.  
HE C C, HE S, GUO X S, et al. Structural differences in organic pores between shales of the Wufeng Formation and of the Longmaxi Formation's first Member, Jiaoshiba Block, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 472-484.
- [11] 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.
- [12] 蔡进,吉婧,刘莉,等.湘鄂西—鄂西渝东地区上奥陶统五峰—下志留统龙马溪组页岩气成藏条件研究[J].非常规油气,2019,6(4):18-24.  
CAI J, JI J, LIU L, et al. Study on shale gas accumulation condition of Upper Ordovician Wufeng Formation—Lower Silurian series Longmaxi Formation in Western Hubei and Hunan—western hubei and eastern Chongqing area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(4): 18-24.
- [13] 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.
- [14] 高玉巧,蔡潇,张培先,等.渝东南盆缘转换带五峰组—龙马溪组页岩气储层孔隙特征与演化[J].天然气工业,2018,38(12):15-25.  
GAO Y Q, CAI X, ZHANG P X, et al. Pore characteristics and evolution of Wufeng—Longmaxi Fms shale gas reservoirs in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(12): 15-25.
- [15] 屠世杰.高精度三维地震勘探中的炮密度、道密度选择[J].石油地球物理勘探,2010,45(6):926-935.  
TU S J. Selection of shot density and trace density in high precision 3D seismic exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(6): 926-935.
- [16] 赵贤正,张以明,唐传章,等.高精度三维地震采集处理解释一体化勘探技术与管理[J].中国石油勘探,2008,13(2):74-82.  
ZHAO X Z, ZHANG Y M, TANG C Z, et al. High-precision 3D seismic data acquisition and interpretation-integrated exploration technology and management[J]. Chinese Oil Exploration, 2008, 13(2): 74-82.

(下转第48页)