

引用格式:刘明,孟庆利,杜园,等.地震勘探技术在南川地区页岩气勘探开发中的应用[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):407-416.

LIU Ming, MENG Qingli, DU Yuan, et al. Application of seismic exploration technology in shale gas exploration and development in Nanchuan area[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 407-416.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.002

地震勘探技术在南川地区页岩气勘探开发中的应用

刘明,孟庆利,杜园,李彦婧
(中国石化华东油气分公司,江苏南京 210019)

摘要:针对南川探区地表地下“双复杂”的地质特点,通过地震资料采集、处理及解释技术攻关,探索形成了一套较为完整的页岩气地球物理勘探思路及技术流程,在南川地区页岩气勘探开发中取得了成功的应用效果。采集方面,通过实时优化激发点位,提高灰岩出露区、溶洞及采空区的地震资料品质;处理方面,采用复杂山地高精度静校正技术、溶洞及采空区针对性处理技术及各向异性叠前偏移成像技术,提高成像效果;解释方面,在精细构造解释基础上,从页岩气的富集性、储层的可改造性以及储层的驱动性三个维度开展页岩储层“甜点”预测,并在页岩气开发过程中,通过动态靶点埋深预测技术和水平井地层倾角预测技术,指导水平井钻探。

关键词:“双复杂”;地震勘探技术;页岩气;勘探开发;采集处理解释;南川地区

中图分类号:TE19

文献标识码:A

Application of seismic exploration technology in shale gas exploration and development in Nanchuan area

LIU Ming, MENG Qingli, DU Yuan, LI Yanjing

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

Abstract: Considering of the “Multi-Complex” geological characteristics of the surface and underground in the Nanchuan District, a set of relatively complete ideas and technical processes for shale gas geophysics exploration have been explored through technical research on seismic data acquisition, processing and interpretation. And it has been successfully applied in shale gas exploration and development in Nanchuan District, including three aspects: ①In terms of acquisition, the quality of seismic data in limestone outcrops, karst caves and mined-out areas can be improved through real-time optimization of excitation points; ②In terms of processing, in order to improve the imaging effect, high-precision static correction technique in complex mountainous areas, the targeted processing technique in karst cave and goaf, and the Anisotropic Pre-Stack Migration Imaging technique are adopted; ③In terms of interpretation, on the basis of fine structure interpretation, the “sweet spot” prediction of shale reservoir is carried out from three dimensions: the enrichment of shale gas, the remodelling of reservoir and the driving of reservoir., and in the process of developing shale gas, horizontal well drilling is guided by prediction technology of dynamic target buried depth and formation dip prediction technique for horizontal wells.

Keywords: “multi-complex”; seismic exploration technology; shale gas; exploration and development; seismic data processing and interpretation; Nanchuan area

页岩气的勘探开发最早始于美国,已经发展了几十年,目前美国和加拿大是实现页岩气工业化最早的两个国家,有着十分丰富的勘探开发经验和技

术。中国页岩气资源丰富,潜力巨大,勘探开发已取得一定进展,首个大型页岩气田—涪陵页岩气田实现了商业开发。由于中国页岩气勘探工作起步较

收稿日期:2021-07-13。

第一作者简介:刘明(1982—),男,本科,高级工程师,主要从事油气勘探与开发工作。地址:江苏省南京市建邺区金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail:lium.hdsj@sinopec.com

基金项目:中国石化科技开发部项目“南川复杂构造带页岩气勘探开发关键技术”(P19017-3)。

晚,相对于美国、加拿大等成熟开采的国家来说,开采的技术和经验都相对薄弱,存在一些不足。掌握的页岩气勘探开发技术还不够成熟,适应性较差,一些技术无法满足需求,独特的地质条件也决定了页岩气地质的特殊性,如页岩气埋深更大等,因此很多技术和理论知识不能直接照搬,需要根据页岩气区块的地质条件,进一步探索符合中国勘探现状的地震勘探技术。

目前中国对页岩气基础理论的研究较多,而应用页岩气地球物理技术的研究尚在探索阶段。刘振武等^[1]通过页岩气地球物理技术的需求分析和对未来发展的展望,明确指出地球物理技术作为页岩气储层评价和增产改造的关键技术,将在页岩气勘探开发中发挥重要的作用;李志荣等^[2]在对四川盆地南部页岩层段地质、地球物理响应特征分析的基础上,通过地震资料采集、处理及解释的技术攻关,形成了一套较为完整的页岩气地球物理勘探思路及技术流程,取得了页岩气地震勘探的新进展;刘伟等^[3]从页岩气资源评价参数出发,系统地阐述了地球物理方法在页岩气勘探和开发中能解决的一些问题,并提出了针对页岩气的地球物理方法的发展建议;夏一军等^[4]介绍了国外利用封闭应力指导水平井钻探,综合运用杨氏模量和水平应力差比进行页岩气工程“甜点”预测、运用得到的岩石力学属性进行相关分析指导压裂的一些成功范例,同时针对各向异性、含气丰度预测、工程“甜点”预测等难点,提出了发展适用于我国页岩气开发的特色地球物理技术的建议;陈祖庆等^[5]针对四川盆地东南部涪陵焦石坝地区三维地震资料特点,提出以满足页岩气勘探对构造解释、岩性解释以及裂缝预测的需要的思路,对焦石坝大型页岩气田的发现起到了重要的促进作用。

在前人研究的基础上,针对南川探区地表地下“双复杂”的地质特点,探索形成了针对性的地震勘探技术。资料采集根据地表岩性出露、溶洞及煤矿采空区分布情况优选激发点位,提高了有效炮比例,针对断裂发育区,设计了合理的炮点加密方案,提高断层成像效果;资料处理紧抓静校正、信噪比与偏移成像等关键处理环节,保证了处理成果能够满足精细构造解释、“甜点”预测和水平井导向的需求;资料解释通过精细构造解释和“甜点”预测,不仅满足了页岩气勘探有利目标优选、井位论证的需要,并且对页岩气开发过程中小层对比追踪、水平井“靶窗”设

计、水平井轨迹现场跟踪起到了关键作用。地震勘探技术在南川地区页岩气勘探开发中取得了成功的应用效果。

1 工区概况

南川区块位于齐岳山断裂带与遵义—平坝断裂带转换部位的川东南褶皱带内,地表起伏剧烈,出露岩性以灰岩为主,呈条带状分布,灰岩地表占比约60%,局部存在灰岩溶洞及煤铝矿采空区,区内构造作用具有递进变形的特点,从盆内到盆外,构造变形强度逐渐变强,变形时间逐渐变早^[6]。受多期强构造改造作用,构造单元众多、构造复杂、地层高陡、断裂发育,导致地震反射波场复杂,资料信噪比低、连续性差,成像困难。

页岩气勘探开发对地震资料成果的精度要求较高,尤其是对南川高陡复杂构造带准确成像提出了严峻挑战。分析主要存在以下难点:

- 1) 南川地区地表出露岩性以灰岩为主,激发接收条件差,灰岩溶洞及煤矿采空区发育,干扰源、障碍物较多,导致资料信噪比低,目的层覆盖次数不均匀。
- 2) 地表起伏较大,高程变化剧烈,近地表速度横向变化快,给静校正量计算带来了困难,进而影响地震有效信号的同相叠加效果。
- 3) 区内构造复杂,地层倾角陡,变化快,速度场横向、纵向都存在剧烈变化,准确成像难度较大。
- 4) 页岩气勘探开发对钻井误差控制要求相比常规勘探精度更高,各向异性问题引起一定的深度误差。

2 地震勘探关键技术应用

2.1 地震资料采集

为了保障灰岩出露区地震资料品质、降低溶洞及采空区对地震资料品质的影响,提高对地下复杂构造地震波场的采样充分性,资料采集过程中根据地表及复杂地下情况实时优化激发点位。

1) 基于岩性调查的炮点位置优化

三叠系地层中,嘉陵江组和雷口坡组为砂灰岩过渡带,激发效果较差;飞仙关组主要为灰岩发育区,激发效果最差;须家河组为碎屑岩发育区,激发

效果相对较好。在炮点放样时,通过精细地表出露岩性调查,充分利用侏罗系、三叠系须家河组及志留系等有利激发区,在保证不出现缺口的前提下尽可能将灰岩条带的炮点偏移至上述有利区。经过优化设计后,全区的砂岩区炮数比例提高了6.22%(表1)。

2) 基于正演模型论证的溶洞及采空区变观技术

南川三维探区内存在大量溶洞及煤矿采空区,累计面积达到15.9 km²。针对采空区上方激发单炮品质差的问题,形成了基于正演模拟的采空区炮点优化技术^[7-8]。

正演模拟(图1)揭示了采集盲区的影响因素主要决定于:溶洞及采空区面积大小和深度、目的层深度、地下构造情况、炮点距离。根据溶洞及采空区大

小、埋深及地下构造情况,通过正演确定最佳炮点偏移距离,结合工区的实际情况,在炮点布设时,尽量将采空区炮点调到离采空区800~1 500 m,但考虑到资料缺口问题,在采空区临近区域仍需保留部分炮点。

3) 基于地质模型照明分析的炮点加密

南川工区发育4条大断裂,为提高该区资料品质,建立了工区内二维速度模型,开展了模型正演和射线追踪分析(图2),重点研究不同炮点位置对断层附近射线密度的影响,结果显示断裂上盘炮点对地下构造照明效果更好。因此,选择在断裂上盘进行炮点加密更有利于断层成像。从图2可以看出,加密炮点后剖面的信噪比更高,层位信息细节刻画更清晰。

2.2 地震资料处理

针对南川地区地表地下双复杂的特点,资料处理需要重点解决复杂山地静校正问题、溶洞及采空区地震资料品质问题、采集变观造成的面元属性问题、复杂构造成像及各项异性问题。采用的关键技术为复杂山地高精度静校正技术、溶洞及采空区针对性处理技术及各向异性叠前偏移成像技术。

1) 复杂山地高精度静校正技术

针对南川地区复杂的近地表特征,提出了联合

表1 全区炮点位置优化统计
Table 1 Statistic of shot point location optimization in whole region

岩性		层位	理论设计 (%)	优化设计 (%)	优化提高 (%)
砂岩 区	侏罗系砂岩	J ₂ s、J ₂ x、J ₁₋₂ z	29.16	32.53	3.37
	三叠系砂岩	T ₃ x	6.78	7.78	1.00
	志留系砂岩	S ₁ h、S ₁ x	9.72	11.58	1.85
灰岩 区	三叠系灰岩	T ₂ l、T ₁ j、T ₁ f	35.35	31.64	-3.71
	二叠系灰岩	P ₂ 、P ₁	18.99	16.48	-2.51

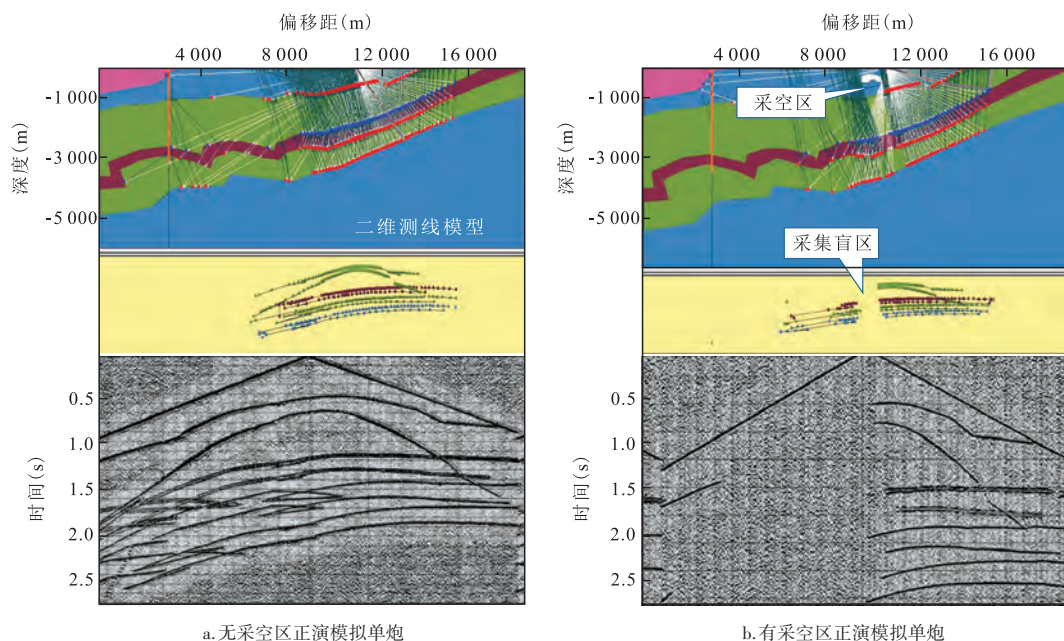


图1 正演模拟单炮

Fig. 1 Forward modeling of single shot

应用多种静校正方法解决静校正问题的思路^[9]。首先应用微测井约束层析静校正方法,通过初至信息迭代反演出低速带结构,求取中、长波长静校正量;然后应用地表一致性剩余静校正,利用反射信息,求取短波长剩余静校正;最后通过非地表一致性静校正,校正时变时差,求取残余的剩余静校正量,进一步增强有效反射信息。3种静校正方法的联合使用,有效地解决了该地区突出的静校正问题,波组连续性得到大幅改善(图3)。

2) 溶洞及采空区针对性处理技术

南川工区内灰岩溶洞及煤矿采空区分布比较广泛,这些溶洞及采空区在浅表层形成了一个范围相当大的“空腔效应”,其激发和接收效果明显变差,导致地震资料出现重低频噪声、有效信息能量极弱、信噪比极低等特征;同时野外采集阶段为增加有效炮激发比率比例,会对溶洞及采空区位置进行变观采集,采集的变观造成了地震资料覆盖次数、方位角及偏移距等面元属性存在空间差异,在资料处理阶段容易产生假频、降低成像质量^[10]。

针对原始单炮信噪比低,有效信号能量弱、连续性差的问题,在资料处理中需要对弱小信号进行提取与加强。分频噪声压制+奇异值分解(SVD)方法可以实现信噪分离并保护有效信号,具体的实施思

路为:首先进行噪音频带分析,根据分析结果将噪音优势频带信息分离出来,然后对低频噪音进行压制,将该部分频带的有效信息提取出来与有效频带信号进行重构。将低频噪音压制后,在CMP(共中心点)域应用奇异值分解方法对有效信号进行识别、提取。将弱信号识别提取后,再结合能量、频率补偿,最终可以提高弱信号的信噪比与连续性(图4)。

对于采集变观造成的不规则采样问题,采用了叠前五维匹配追踪傅立叶插值(5D MPFI)技术^[11]进行解决。该技术是基于反假频傅立叶变换,适用于任意不规则观测系统,适应假频严重或构造复杂陡倾角数据。通过线域、点域、时间域、炮检距域、方位角域五维空间的插值和重构实现数据规则化。具体实现过程为:①对数据进行离散傅立叶变换;②选取振幅最大的傅立叶谱成分;③在“估算谱”上加入傅立叶谱成分;④对该傅立叶谱成分进行反傅立叶变换,输出迭代结果;⑤在原始数据基础上减去该次迭代结果,进行下一轮迭代。最后,对最终“估算谱”通过反傅立叶变换输出到期望位置。

图5为五维插值处理前后的叠前深度偏移剖面对比,可以看到,五维插值处理技术的应用消除了由于面元属性不均匀导致的偏移画弧现象,改善了采空区下方目的层的成像效果。

3) 各向异性叠前深度偏移处理技术

南川地区构造复杂,地层倾角大,区内存在比较严重的各向异性问题,采用各向同性叠前深度偏移方法得到的偏移结果通常会产生以下两个问题:①偏移结果中的地震层位与测井信息存在较大的深度误差,不满足地质精度要求;②偏移后共成像点道集的远偏移距存在没有拉平的现象,影响成像效果。

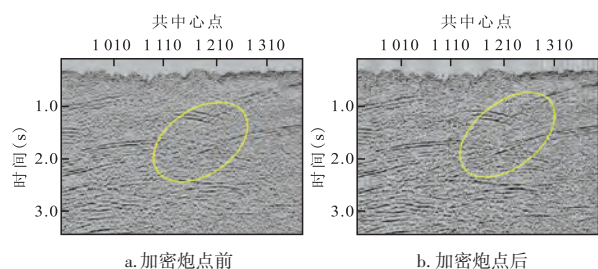


图2 加密炮点前后叠加剖面

Fig. 2 Stack section before and after increasing shot density

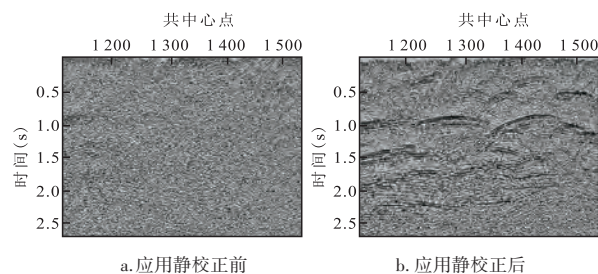


图3 应用静校正前后叠加剖面

Fig. 3 Stack section before and after static correction

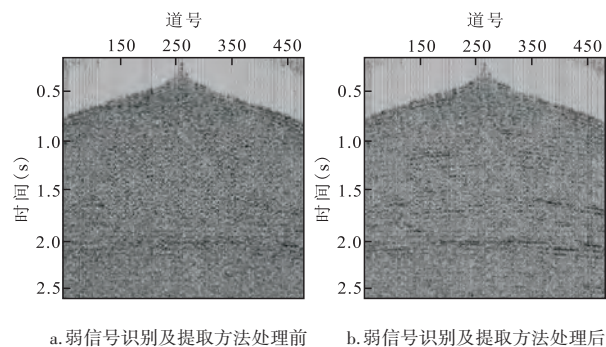


图4 弱信号识别及提取方法处理前后CMP道集

Fig. 4 CMP gather before and after weak signal recognition and extraction

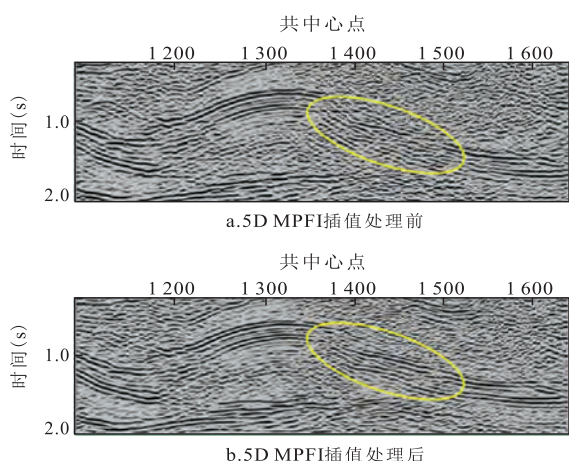


图5 5D MPFI插值处理前后叠前深度偏移剖面
Fig. 5 Prestack depth migration profile before and after 5D MPFI interpolation

因此,需要引入 paradigm 软件的各向异性叠前深度偏移技术,各向异性叠前深度偏移^[12]的关键是速度模型的建立。

各向异性速度建模首先要建立三维各向同性速度模型,进行各向同性叠前深度偏移,并在偏移剖面上解释出主要的地质层位,在南川地区主要为龙潭组、梁山组、韩家店及五峰组,然后利用JY10、JY194-3等导眼井计算井点位置处主要地质层位的井震闭合差,对其进行插值,求取各个层位的井震闭合差,建立井震闭合差模型。利用该模型和三维各向同性速度及深度层位信息,建立网格层析方程进行层析反演,输出更新后的各向异性速度体、深度层位模型和各向异性参数 δ 、 ϵ ,计算各个层位新的井震闭合差,再进行下一轮网格层析迭代,直至各个层位井震误差趋于0。一般进行2~3轮迭代后,可使井震闭合差变小,满足地质精度要求。

利用迭代得到的最终各向异性速度、各向异性参数 δ 和 ϵ ,进行各向异性叠前深度偏移,从而获得理想的叠前深度偏移结果。

由图6可以看出,各向同性偏移数据的波组产状与实钻水平井轨迹存在较大差异,而各向异性偏移数据与实钻情况吻合,钻井分层从龙潭至五峰与地震剖面对应良好,较好地解决了井震误差问题。

2.3 页岩气“甜点”预测

南川地区构造变形起始时间早且变形期次多,页岩气保存条件差,地层压力系数0.9~1.3,属于典

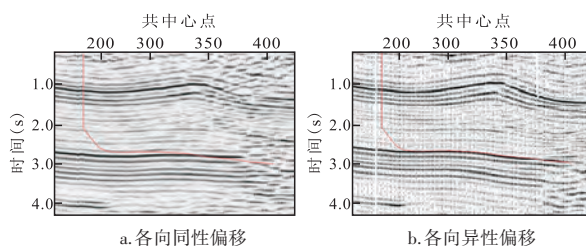


图6 各向同性偏移和各向异性偏移井震对比剖面
Fig. 6 Well-seismic contrast of isotropy migration profile and anisotropy migration profile

型常压页岩气,具有含气量偏低($2 \sim 5 \text{ m}^3/\text{t}$)、吸附气占比高(40%~60%)、地层地应力差异系数大、水平井单井产量及EUR低的特点。为了实现常压页岩气的效益开发,需要在构造特征分析的基础上,对页岩储层甜点进行预测,优选有利勘探目标区。主要从页岩气的富集性、储层的可改造性以及储层的驱动性3个维度开展研究工作^[13-14]。

2.3.1 页岩气“地质甜点”综合评价技术

地质“甜点”是页岩储层评价的基础,涵盖了优质页岩厚度、储层地球化学指标(总有机碳含量TOC和 R_o)和储层储集指标(如孔隙度、含气性)。在南川工区勘探实践中,形成了以岩石物理分析为基础,叠前同时反演为核心的地质“甜点”地震综合评价技术,并结合多属性分析、神经网络的方法实现了页岩气富集评价参数的预测^[15-22]。

1) 页岩厚度预测技术

由于优质页岩段有机成因的硅质矿物含量增加,会造成速度反转的现象,单一的纵波阻抗或横波阻抗都不足以筛选出优质页岩。通过岩石物理分析发现,南川地区优质页岩段纵横波速度比低于1.65,因此,利用叠前同时反演获得纵横波速度比属性体能够预测优质页岩厚度。主要技术思路及关键点包括以下几点:①对叠前道集进行超道集、拉平、振幅平衡等针对性处理,获得高信噪比地震资料;②将不同入射角数据与对应子波矩阵褶积后构建叠前反演目标函数;③将不同形式的先验信息作为约束项引入目标函数中,以增强反演函数的稳定性;最后在测井、层位等地质资料约束下,采用数学优化算法反演弹性参数。

利用纵横波速度比属性预测南川地区优质页岩厚度介于30~47 m,呈现由北西向南东变厚趋势,其

中在平桥背斜北部JY194-3井区厚度较大,介于38~42 m。平桥南斜坡和东胜南斜坡优质页岩厚度介于40~46 m,见图7a。

2) 孔隙度预测技术

孔隙度的求取方法包括实验测定、测井解释,以及井震联合计算。实验测定的精度最高,但是受限于岩心样点数,只能针对有岩心的部分分析。测井解释纵向精度高,能针对全井段,同样无法获得平面连续的孔隙度特征。基于叠后和叠前属性的神经网络技术,通过概率神经网络建立样本与目标之间的映射关系,并将映射关系应用到全区,能有效预测全区孔隙度分布。

JY10井—JY194-3井孔隙度连井剖面图(图8a)紫色为孔隙度高值区域,黄色为孔隙度低值区域。纵向上优质页岩段孔隙度较高,往上孔隙度减小。横向上对比发现,孔隙度变化明显,JY10井以南孔隙度降低,分布不连续。JY10井预测孔隙度3.35%(实测3.28%),JY194-3井预测孔隙度4.1%(实测3.9%),相对误差小于6%,神经网络技术属性预测孔隙度准确率高。

南川地区优质页岩段孔隙度整体大于2.9%,表现为南高北低的趋势,JY194-3井以北存在局部高值区。西北部地层埋深较大,压实作用增强,孔隙度变低,接近2.6%;中部沿SY9-1井、SY2井、SY1井、JY194-3井连井条带范围内高于两侧;东部呈降低趋势;南部由于地层抬升埋藏浅,上覆岩层压力小,孔隙度变大。平桥南斜坡和东胜南斜坡物性较好,优于东胜背斜(图7b)。

3) 含气量预测技术

含气量受地层压力、储层温度、保存条件的影响较大,利用地震资料很难将吸附气和游离气分开,只能对其综合地球物理响应进行预测。由于单属性分析的局限性,南川地区页岩气含气量预测采用多属性联合分析技术。在做好井震标定后,提取井旁道震属性,采用逐步回归分析方法,以含气量为目标函数,构建地震属性与含气量的函数表达式,基于预测误差最小确定最优的属性集。按照逼近原则,优选的地震属性依次是密度、脆性指数、平均频率、纵波阻抗。

从JY10井—JY194-3井含气量连井剖面图看(图8b),红色为含气量高值区域,黄色为含气量低值区域。纵向上优质页岩段含气量整体大于4 m³/t,往

上逐渐降低;横向上JY194-3井北部含气量高于南部。JY10井预测含气量4.0 m³/t(实测4.09 m³/t),JY194-3井预测含气量5.1 m³/t(实测5.0 m³/t),相对误差小于3%,预测结果可靠。

南川地区优质页岩含气量整体呈现南北两侧高,中间低的特点,总含气量介于4.4~4.8 m³/t,平桥南斜坡、东胜南斜坡等区域页岩平均总含气量高达4.6 m³/t以上,剥蚀区附近含气量逐渐变低(图7c)。

2.3.2 页岩气“工程甜点”综合评价技术

1) 多尺度裂缝预测

在页岩气勘探开发中,不同尺度裂缝都能对压裂提供支撑作用^[23]。裂缝地震检测包括横波勘探、多波多分量勘探和三维纵波裂缝检测。横波受地表影响严重,信噪比和频率都较低。多波多分量地震勘探的激发和接收成本巨大,地震资料品质通常较差,数据处理过程中还存在一些问题。目前裂缝储层预测大多综合利用不同属性数据来提高预测精度。

①大尺度裂缝预测

大尺度裂缝主要应用曲率预测技术,体曲率是把三维地震反射层位看作空间坐标函数 $u(x,y)$,梯度 $\text{grad}(u)$ 反映反射面沿着不同方向的变化率,其结果为该反射点的视倾角向量,能有效刻画断裂特征,曲率值较高,预测的构造裂缝也较发育。通过南川地区勘探实践发现,曲率属性不仅能刻画构造特征(图7d),还能够预测水平井压裂过程中的相对停泵压力,曲率值越大,停泵压力越小;曲率值越小,停泵压力越大。而水平井压裂停泵压力相对较低,指示的压裂效果往往较好。

②微裂缝预测

微裂缝能改善油气藏的渗流条件,利于储层改造,提高单井产量。南川地区微裂缝的预测,是利用叠前CMP道集优化处理的结果进行各向异性分析求取的,能够有效反映裂缝发育强度和方位。首先对CMP道集进行一系列的优化处理,然后进行偏移、叠加,最后计算并优选瞬时主频属性来求取目标段各向异性裂缝密度和裂缝方位。根据该方法预测出南川地区裂缝发育方向以近东西与北东方向为主,在微裂缝发育中低值的平桥南区及东胜背斜,钻井普遍获得高产(图7e)。

2) 地层压力系数预测

地层压力系数是反映储层保存条件好坏的直接

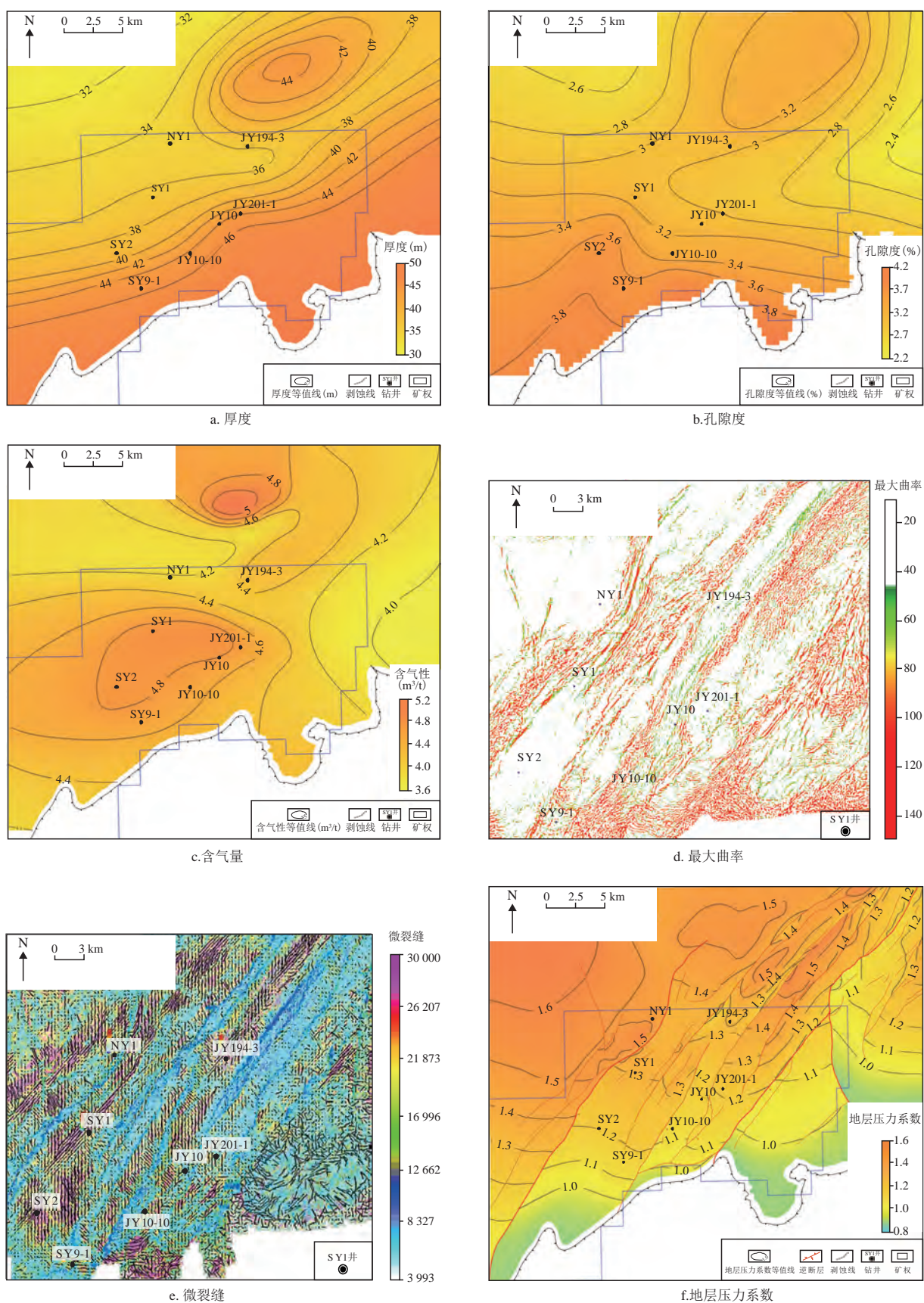


图7 南川地区五峰组—龙马溪组优质页岩段“甜点”参数预测平面图

Fig. 7 Prediction maps of attributes(“sweet spot”) of high quality shale reservoir of upper Ordovician-lower Silurian in Nanchuan area

参数。目前已有多种公式描述孔隙压力,比较典型有等效深度法、Eaton法、Bowers法、Fillippone法及其改进等。以地震资料为主Fillippone法(式1)能提供不同深度范围的压力空间分布,其精度取决于速度体的准确度。

$$p_p = \frac{v_{\max} - v_i}{v_{\max} - v_{\min}} \rho_A kh \quad (1)$$

式中: p_p 为地层压力,MPa; v_{\min} 为最小层速度,m/s; v_{\max} 为最大层速度,m/s; v_i 为第*i*层的层速度,m/s; h 为深度,m; k 为压力系数; ρ_A 为地层平均密度,通常用Gardner公式计算。

具体做法是:在叠前反演之前,利用井速度校正处理速度,提高CRP(共反射点)道集转换角道集的精度,进而提高反演精度。在获得高质量反演结果的基础上,提取高精度速度体^[24-26],解决了直接用处理速度预测地层压力系数精度低的问题。

预测南川地区地层压力系数介于0.8~1.6,工区西部、北部异常压力较大,往南部出露区地层压力系数降低、趋于正常压力。平桥构造带、东胜构造带地层压力系数介于1.0~1.3,属于常压范围(图7f)。

2.4 水平井地震导向

在南川页岩气开发过程中,为了有效为水平井钻探提供支撑,通过现场开发实践,形成了一套以动态靶点埋深预测技术和水平井地层倾角预测技术为主的现场地震预测技术。

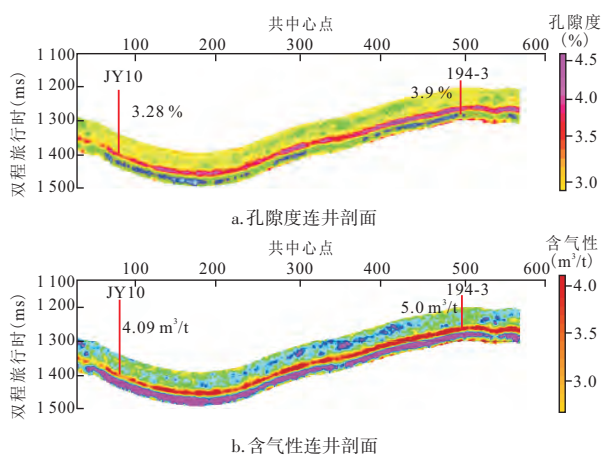


图8 南川地区JY10井—JY194-3井连井剖面

Fig. 8 Cross well profile from Well-JY-10 to Well-JY-194-3 in Nanchuan area

2.4.1 动态靶点埋深预测技术

在页岩气水平井钻探过程中,由于页岩非均质性较强,前期预测靶点可能存在误差,所以需要靶点埋深进行动态预测,以保证水平井能顺利入靶。在调整靶点过程中,主要使用了构造图邻井深度误差校正法、地震标志层时差推算法和基于地质资料的厚度推算法。通过多方法动态靶点预测,在南川地区取得了较好的效果。

1) 构造图邻井深度误差校正法

常用于开钻前、一开或二开阶段。及时收集完钻井实钻标志点的垂深数据,以老速度场作为质量控制前提,对全区时深转换速度场进行更新,获得真实合理的变速速度场编制构造图;直接读取靶点对应的等值线数值,即可得到靶点垂深。

2) 地震标志层时差推算法

以目的层五峰组作为标志层,读取已知井与正钻井靶点五峰组反射时差,根据钻井声波时差曲线反算出的平均速度,推算正钻井靶点深度。如利用JY194-3井五峰组深度预测JY197-2井A靶点深度(图9),两点时差为12 ms。利用JY194-3井海拔下垂深度减去两点相差的地层厚度可获得JY197-2井靶点深度。

3) 基于地质资料的厚度推算法

通常应用于三开阶段,目的层上方的小河坝组、浊积砂岩等可作为标志层,来分析判断目的层实际垂深。通过已钻井地层厚度,加上正钻井标志层深度,从而预测正钻井靶点深度。例如,预测JY201-2HF井A靶点时,可用该井已钻韩家店组底面深度,

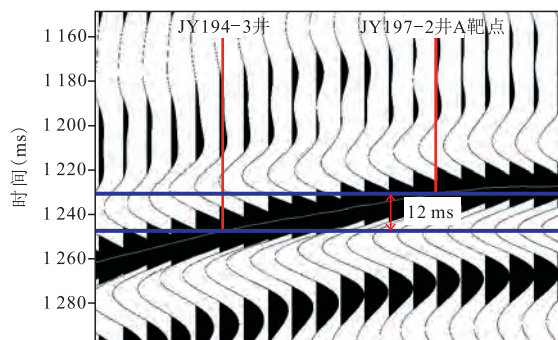


图9 南川地区JY194-3—JY197-2井A靶点连井剖面

Fig. 9 Cross well profile from Well-JY-194-3 to target A in Well-JY-197-2 of Nanchuan area

加上工区统计出的未钻地层厚度,重点参考邻井JY201-1井地层厚度,从而推算出201-2HF井A靶点埋深。

2.4.2 水平段地层倾角预测技术

在南川工区水平井钻探实践中,针对水平井倾角预测的难题,创新性形成了“多道统计、落实拐点、分段平均、求取倾角”的工作方法。通过等间隔进行地层倾角计算,对水平井不同地层倾角段进行分段描述,引导定向施工。在构造突变处如有倾角或倾向变化、断层发育,提前提示风险,建议做好轨迹调整,及时有效地指导了水平井的钻探。

3 页岩气勘探开发效果

通过上述地震勘探技术的应用,在南川地区获取了较高精度的三维地震成果,有效指导了页岩气的勘探开发。根据研究相继部署的JY194-3井、SY1井、SY2井等15口探评井,测试日产气在 $(7.1 \sim 34.3) \times 10^4 \text{ m}^3$,实现了页岩气勘探的重大突破,落实了平桥、东胜、阳春沟3个千亿立方米增储区带,发现国内首个大型常压页岩气田。至此南川地区累计探明含气面积约 200 km^2 ,新增探明储量约 $2\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

4 结论

1) 采用基于岩性调查的炮点位置优化,基于正演模型论证的溶洞及采空区变观技术和基于地质模型照明分析的炮点加密,实时优化激发点位,可以提高对地下复杂构造地震波场的采样充分性,保障灰岩出露区地震资料品质、降低溶洞及采空区对地震资料品质的影响。

2) 在页岩气处理过程中,针对复杂山地静校正、不同采集观测系统、复杂构造成像及各项异性等问题,形成了针对南川页岩气勘探的地震资料处理特色技术,进一步提高了成像效果,降低了井震误差。

3) 开展页岩气“地质甜点”地震综合评价技术研究,预测优质页岩厚度、孔隙度和含气量;开展页岩气“工程甜点”综合评价技术研究,预测不同尺度裂缝和地层压力系数。

4) 在南川工区水平井钻探实践中,通过多方法

动态靶点预测和水平段地层倾角预测,及时有效地指导了水平井的钻探,降低风险。

5) 针对南川典型“双复杂”探区页岩气勘探开发,通过实践探索形成了针对性的地震勘探技术,取得了成功的应用效果,不仅支撑了该区页岩气储量的发现,并且有效指导了页岩气产建过程中水平井的部署及钻探工作,可以在类似探区进行推广应用。

参考文献

- [1] 刘振武,撒利明,杨晓,等.页岩气勘探开发对地球物理技术的需求[J].石油地球物理勘探,2011,46(5):810-818.
LIU Zhenwu, SA Liming, YANG Xiao, et al. Needs of geophysical technologies for shale gas exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(5): 810-818.
- [2] 李志荣,邓小江,杨晓,等.四川盆地南部页岩气地震勘探新进展[J].天然气工业,2011,31(4):40-43.
LI Zhirong, DENG Xiaojang, YANG Xiao, et al. New progress in seismic exploration of shale gas reservoirs in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 40-43.
- [3] 刘伟,贺振华,李可恩,等.地球物理技术在页岩气勘探开发中的应用和前景[J].煤田地质与勘探,2013,41(6):68-73.
LIU Wei, HE Zhenhua, LI Keen, et al. Application and prospective of geophysics in shale gas development[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(6): 68-73.
- [4] 夏一军,胡向阳,魏水健.页岩气勘探开发中地球物理技术的应用[J].地球物理学进展,2015,30(4):1798-1803.
XIA Yijun, HU Xiangyang, WEI Shuijian. Applications of geophysics in shale gas exploration and exploitation[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1798-1803.
- [5] 陈祖庆.海相页岩TOC地震定量预测技术及其应用—以四川盆地焦石坝地区为例[J].天然气工业,2014,34(6):24-29.
CHEN ZuQing. Quantitative seismic prediction technique of marine shale TOC and its application: A case from the Longmaxi shale play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin. Natural Gas Industry[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 24-29.
- [6] 郭旭升,郭彤楼,魏志红,等.中国南方页岩气勘探评价的几点思考[J].中国工程科学,2012,14(6):101-105.
GUO Xusheng, GUO Tonglou, WEI Zhihong, et al. Thoughts on shale gas exploration in southern China[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6): 101-105.
- [7] 孟美辰,程冰洁.三维地震资料观测系统设计中的关键参数[J].科学技术与工程,2014,14(36):6-11.
MENG Meichen, CHENG Bingjie. The key parameters in 3D seismic data observation system[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(36): 6-11.
- [8] 兰晓雯,晏信飞,王成虎.地震正演模拟在高分辨率隐伏断层地震勘探中的应用[J].西北地震学报,2008,34(1):354-359.
LAN Xiaowen, YAN Xinfei, WANG Chenghu. Application of seismic modeling in the shallow seismic prospecting methods to Urban active fault detection[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 34(1): 354-359.

- [9] 李苏光,何鑫,蒋福友.复杂山地地震资料处理方法探析[J]. 中国西部科技,2013(4):32-34.
LI Suguang, HE Xing, JIANG Fuyou. Discussion on processing method of the complex mountainous seismic data. Science and Technology of West China[J]. Science and Technology of West China, 2013(4): 32-34.
- [10] 薛国强,潘冬明,于景邨.煤矿采空区地球物理探测应用综述[J].地球物理学进展,2018,33(5):2187-2192.
XUE Guoqiang, PAN Dongming, YU Jingcun. Review the applications of geophysical methods for mapping coal-mine voids[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2187-2192.
- [11] 王霞,李丰,张延庆,等. 五维地震数据规则化及其在裂缝表征中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2019,54(4):844-852.
WANG Xia, LI Feng, ZHANG Yanqing, et al. Regularization of 5D seismic data and its application in fracture characterization [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(4): 844-852.
- [12] 李慧,程德安,金婧. 网格层析成像速度建模方法与应用[J]. 石油地球物理勘探,2013,48(S1):12-16.
Li Hui, CHENG De'an, JIN Jing. Velocity model building based on grid tomography[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(S1): 12-16.
- [13] 郭旭升.涪陵页岩气田焦石坝区块富集机理与勘探技术[M]. 北京:科学出版社,2014:267-271.
GUO Xusheng. Enrichment mechanism and exploration technology of Jiaoshiba area in Fuling shale gas field[M]. Beijing: Science Press, 2014: 267-271.
- [14] 郭旭升.四川盆地涪陵平桥页岩气田五峰组—龙马溪组页岩气富集主控因素[J].天然气地球科学,2019,30(1):1-10.
GUO Xusheng. Controlling factors on shale gas accumulations of Wufeng-Longmaxi formation in Pingqiao shale gas field in Fuling ares, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(1): 1-10.
- [15] 吴艳艳,曹海虹,丁安徐,等.页岩气储层孔隙特征差异及其对含气量影响[J].石油实验地质,2015,37(2):231-236.
WU Yanyan, CAO Haihong, DING Anxu, et al. Pore characteristics of a shale gas reservoir and its effect on gas content[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 231-236.
- [16] 张勇,何贵松,李彦婧,等.基于叠前反演的神经网络孔隙度预测技术——以南川地区为例[J].科学技术与工程,2019,19(25):83-89.
ZHANG Yong, HE Guisong, LI Yanjing, et al. Neural network porosity prediction technology based on prestack inversion: Take Nanchuan Area as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(25): 83-89.
- [17] 殷文.叠前地震反演关键技术及影响因素分析与研究[J].地球物理学进展,2013,28(6):2958-2968.
YIN Wen. The analysis on the key techniques and influence factors of prestack seismic inversion[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 2958-2968.
- [18] 汤婕,吴国忱,邓小凡.基于贝叶斯理论的裂缝性介质叠前地震同步反演方法[J].油气地质与采收率,2018,25(6):45-50.
TANG Jie, WU Guochen, DENG Xiaofan. Pre-stack seismic synchronous inversion method for fractured media based on Bayesian theory[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(6): 45-50.
- [19] 张建芝,邻晓华.基于随机神经网络的储集层孔隙度预测技术在Y3区块的应用[J].新疆石油地质,2014,25(5):582-586.
ZHANG Jianzhi, LIN Xiaohua. Application of reservoir property prediction based on probabilistic neural network (PNN) in Y3 block[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 25(5): 582-586.
- [20] 杨超,熊永强,张金川.中国不同沉积类型页岩生烃有机孔发育差异[J].地球化学,2019,48(6):544-554.
YANG Chao, XIONG Yongqiang, ZHANG Jinchuan. Developmental differences of secondary organic pores among marine, lacustrine, and transitional shale in China[J]. Geochimica, 2019, 48(6): 544-554.
- [21] 张海杰,蒋裕强,周克明,等.页岩气储层孔隙连通性及其对页岩气开发的启示——以四川盆地南部志留统龙马溪组为例[J].天然气工业,2019,39(12):22-31.
ZHANG Haijie, JIANG Yuqiang, ZHOU Keming, et al. Connectivity of pores in shale reservoirs and its implications for the development of shale gas: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 22-31.
- [22] 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 Xipeng. 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.
- [23] 代鹏,丁文龙,何建华,等.地球物理技术在页岩储层裂缝研究中的应用[J].地球物理学进展,2015,30(3):1315-1328.
DAI Peng, DING Wenlong, HE Jianhua, et al. Application of geophysical techniques in fracture of shale reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1315-1328.
- [24] 胡华锋,胡起,林正良.页岩气储层地层压力预测方法及其在四川盆地的应用[J].石油物探,2018,57(3):362-368.
HU Huafeng, HU Qi, LIN Zhengliang. Pore pressure prediction for shale gas reservoir sand its application in the Sichuan basin, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3): 362-368.
- [25] 张广智,陈娇娇,陈怀震,等.基于页岩岩石物理等效模型的地应力预测方法研究[J].地球物理学报,2015,58(6):2112-2122.
ZHANG Guangzhi, CHEN Jiaojiao, CHEN Huaizhen, et al. Prediction for in-situ formation stress of shale based on rock physics equivalent model[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(6): 2112-2122.
- [26] 李金磊.涪陵焦石坝页岩气层压力预测技术研究[J].石油物探,2017,56(4):567-574.
LI Jinlei. Pressure prediction of Jiaoshiba shale gas reservoir in the Fuling shale gas field[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(4): 567-574.

(编辑 徐佩)