

纵波-转换横波联合反演技术在页岩气藏勘探中的应用

袁书坤^{1,2}, 陈开远¹, Bob A Hardage³, 冯志强², 魏水建⁴

(1. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083; 2. 中国石化 国际石油勘探开发公司, 北京 100083; 3. 美国德克萨斯大学 奥斯汀分校 经济地质局, 德克萨斯州奥斯汀 78758; 4. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:近几年的页岩油气开发实践表明,页岩非均质性及水平井段的方位对页岩气单井产量、采收率及页岩气开采的经济性影响较大,而页岩非均质性主要受到天然微裂缝的影响。因此,开展页岩内天然微裂缝研究,寻找页岩储层“甜点”等是成功部署高产气井、提高页岩气开采经济效益的必然选择。基于美国阿巴拉契亚盆地 Marcellus 页岩区的 3C/3D 高分辨率地震资料,利用快/慢速转换横波(PSV-1/PSV-2)反射时间厚度差法,对 Marcellus 地层的天然微裂缝发育带进行了探测。应用纵-转换横波(PP-PS)联合反演技术,结合联合反演密度、纵横波速度比(v_p/v_s)等组合属性参数,对天然微裂缝的开闭性及张性天然微裂缝孔隙空间的含气性分别进行了识别和检测,并利用实钻井资料对地球物理方法预测的页岩储层“甜点”(含气张性微裂缝)进行验证,取得较好效果。实际应用表明,纵-横波联合反演技术对于张性天然微裂缝的识别及含气性检测具有突出优势,能有效降低钻探风险。

关键词:转换横波;联合反演;微裂缝探测;含气性检测;Marcellus 页岩

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

Application of joint PP and PS inversion to the exploration of shale-gas reservoirs

Yuan Shukun^{1,2}, Chen Kaiyuan¹, Bob A Hardage³, Feng Zhiqiang², Wei Shuijian⁴

(1. School of Energy Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. International Petroleum Exploration and Production Corporation, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Bureau of Economic Geology, University of Texas, Austin, TX 78758, USA; 4. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: In recent years, the development of shale oil and gas shows that shale heterogeneity and lateral orientation have relatively great impacts on single well shale gas production, recovery factor and the economy of shale gas exploitation, and natural micro-fracture is the main factor resulting in shale heterogeneity. Accordingly, to carry out research on the natural micro-fractures and prediction of sweet spots within shale has become an inevitable choice for successful emplacement of high-yielding wells and improving economic benefits of shale gas exploitation. Based on the high resolution 3C/3D seismic data in Marcellus shale play within Appalachian Basin, North America, natural micro-fracture zone of Marcellus shale was predicted by means of fast and slow converted shear wave (PSV-1/PSV-2) integrated interpretation, then the open/closed fractures and gas-bearing property of extensional micro-fractures were separately identified and detected by utilizing combined attribute parameters like joint inversion density, velocity ratio of compressional and converted wave (v_p/v_s) extracted from joint inversion of compressional wave and converted shear wave (PP-PS). In addition, drilling data were used to verify the sweet spots predicted by geophysical method in Marcellus shale. Joint inversion technique (PP-PS) has outstanding advantages in natural extensional micro-fractures identification and gas-bearing detection, which can effectively reduce the drilling risk.

Key words: converted shear wave, joint inversion, micro-fracture detection, gas-bearing detection, Marcellus shale

21 世纪以来,随着水平钻井、水力分段压裂和微地震压裂监测等技术的快速发展及天然气价格逐渐回升,非常规致密砂岩、页岩油气藏的开采逐渐变得具有经济、可行性。北美 Marcellus 页岩气藏是页岩开发最为成功的案例之一。

页岩储层一般具有厚度薄、波阻抗低、天然裂缝带较发育和非均质性强等特点,天然裂缝发育与否对页岩油气藏的经济性至关重要,尤其体现在单井初始产量上^[1]。近年来,转换横波(PS)地震资料在天然微裂缝探测方面的优势日益受到业内关注。

收稿日期:2014-01-22;修订日期:2014-10-20。

第一作者简介:袁书坤(1982—),男,博士研究生、工程师,海外油气勘探地质管理、非常规油气、含油气盆地分析及层序地层学。E-mail: skyuan.sipc@sinopec.com。

基金项目:美国能源安全合作研究组织项目(RPSEA-08122)。

纵波(PP)是地层骨架、孔隙、孔隙流体及压力等特征的综合反映,而横波则主要与地层骨架、孔隙度、压力有关,但与孔隙流体性质和饱和度相关性不大。因此,综合利用纵波和横波信息对天然微裂缝较发育的页岩、致密砂岩等非常规油气层进行研究比单纯利用纵波会更加科学、有效^[2]。美国德州大学经济地质局的 EGL 实验室、加拿大卡尔加里大学等在多波地震勘探技术的理论研究、实际应用方面积累不少成功经验,极大推进了该技术的工业化进程^[3]。因此,我们基于美国 Marcellus 页岩的三维三分量(3C/3D)地震资料(炸药震源,单点三分量检波系统采集),应用PSV-1/PSV-2 方法实现了天然微裂缝探测,结合 PP/PS 联合反演密度、纵横波速度比(v_p/v_s)等组合属性分别对微裂缝性质及张性微裂缝的含气性进行识别和检测,并在钻、测井资料上得到了较好验证。

1 Marcellus 页岩概况

Marcellus 页岩地层位于北美阿勒格尼高原,埋深

为 610~2 600 m,厚度在 15~90 m(自西南向东北方向逐渐变厚,图 1),分布面积约 $24.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布在俄亥俄、西弗吉尼亚、宾夕法尼亚及纽约南部。Marcellus 黑色页岩形成于 3.65 亿年前比较重大的有机物沉积事件,以石英、粘土矿物或泥等细粒沉积为主,总有机碳含量(TOC)达 3%~10%,最高可达 20%^[4]。在长期的挤压应力作用下,受压缩而形成,压缩层理结构较发育,故孔(Φ)、渗(K)性差($\Phi < 8\%$, $K < 0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),释放油气的速率极慢,有机质含量丰富、脆性好,且岩层刚性强。随着温度、压力的增加,页岩内部的有机物质成熟度逐渐成熟,进而生成大量天然气,页岩中现存的天然气主要保存在天然微裂缝和孔隙中^[5]。大约 3 亿年前,有机质成熟大量排烃从而形成天然气超压导致页岩形成了现今近 ENE-WSW 展布的 J_1 裂缝带^[6];2.8 亿年前,在地层超压和 SE-NW 向构造挤压应力的共同作用下形成 NW-SE 向展布的 J_2 裂缝带, J_2 与 J_1 近似垂直相交^[7]。

Marcellus 地层位于中泥盆统 Hamilton 群底部,岩性具三分性特征,包括区域稳定分布的上、下段富有机质页岩及中段薄层 Cherry 石灰岩(图 1)。其中,Marcel

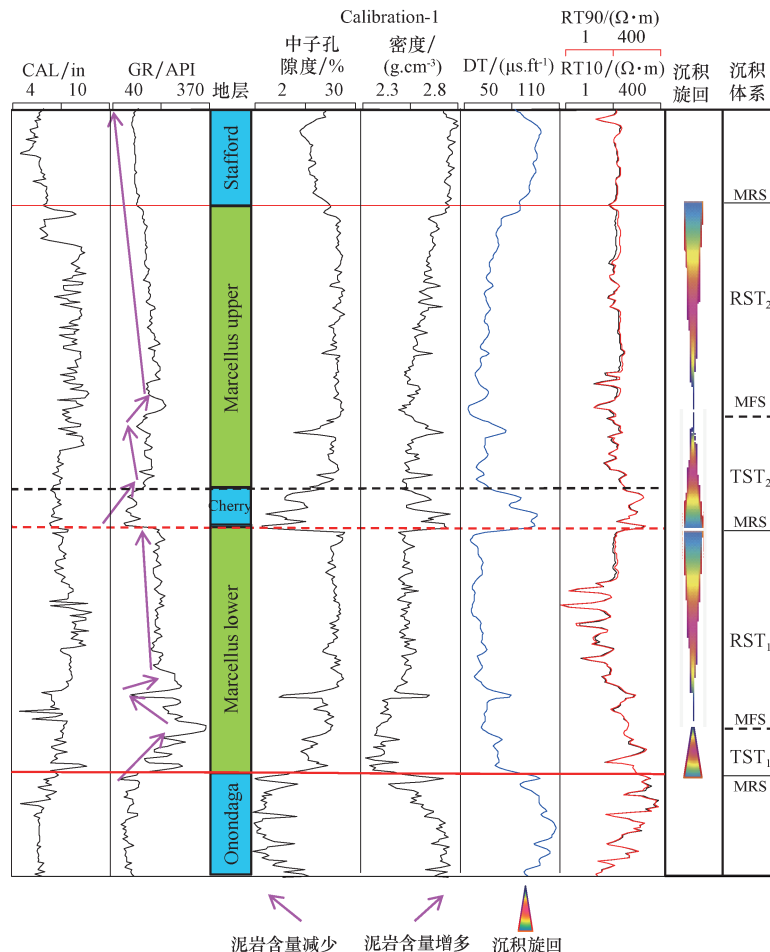


图 1 阿巴拉契亚盆地 Marcellus 页岩段典型电测特征及层序划分方案

Fig. 1 Typical Logging properties and sequeuce division scheme in Marcellus shale in the Appalachian Basin

TST. 海进体系域;RST. 海退体系域;MRS. 最大海退面;MFS. 最大海泛面

lus 下段页岩位于三级层序界面/海进面 (SB/TSE) 之上,测井曲线上可见下部伽马值向上增加的海侵体系域 (TST₁) 和上部伽马值向上递减海退体系域 (RST₁), 最高伽马测值处,即为最大洪泛面 (MFS); Marcellus 上段页岩是另一个三级沉积层序,包括底部海退面 (RSE)、以石灰岩为主体的相对较薄的海侵体系域 (TST₂) 和较厚的海退体系域 (RST₂)^[8-9]。

1839 年,地质家已在纽约马塞勒斯镇发现页岩露头^[10-11],但只到近几年,随着地质认识程度的不断加深、水平井钻井技术的不断进步及地震勘探新方法的不断引入,Marcellus 页岩才被认为是北美地区最大的页岩气藏。

2 多波地震技术天然微裂缝探测

2.1 PP 及 PS 波标定及匹配

利用纵波 (PP) 及转换模波 (PS) 进行联合解释、反演时,须首先进行时间域的统一校正,通常是把 PS 波匹配到 PP 波的时间域。现行方法多用 PP 与 PS 波的波形相似性,经扫描得到速度比,从而实现 PS 波向 PP 波时间域的匹配^[12]。此外,视情况还需进行波形、能量等信息匹配^[13-15]。如图 2 所示,时间域统一后,Marcellus 页岩基底之上的 PS 比 PP 波纵向分辨率要高很多 (PP 波主频约 25Hz, PS 波主频约 40Hz)。因

此,PP-PS 联合反演方法应能有效提高反演的精度和准确性。

2.2 断层及裂缝简析

Marcellus 页岩区内的主断层具有很好的纵向继承性,多数均贯穿了 Marcellus 页岩及下伏的 Onondaga 灰岩。现今水平最大构造主应力方向为 ENE-WSW,主要断层走向为 ENE-WSW 和 EW 方向 (图 3a),主

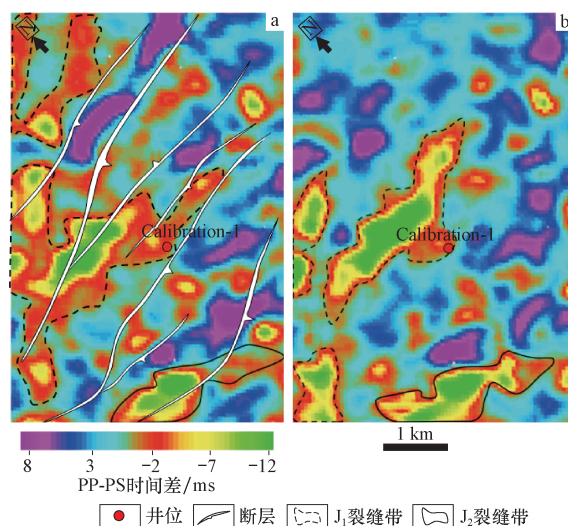


图3 Marcellus 地层天然微裂缝带分布

Fig. 3 Distribution map of natural micro-fractures in the Marcellus Formation

a. Marcellus 下段页岩; b. Marcellus 上段页岩

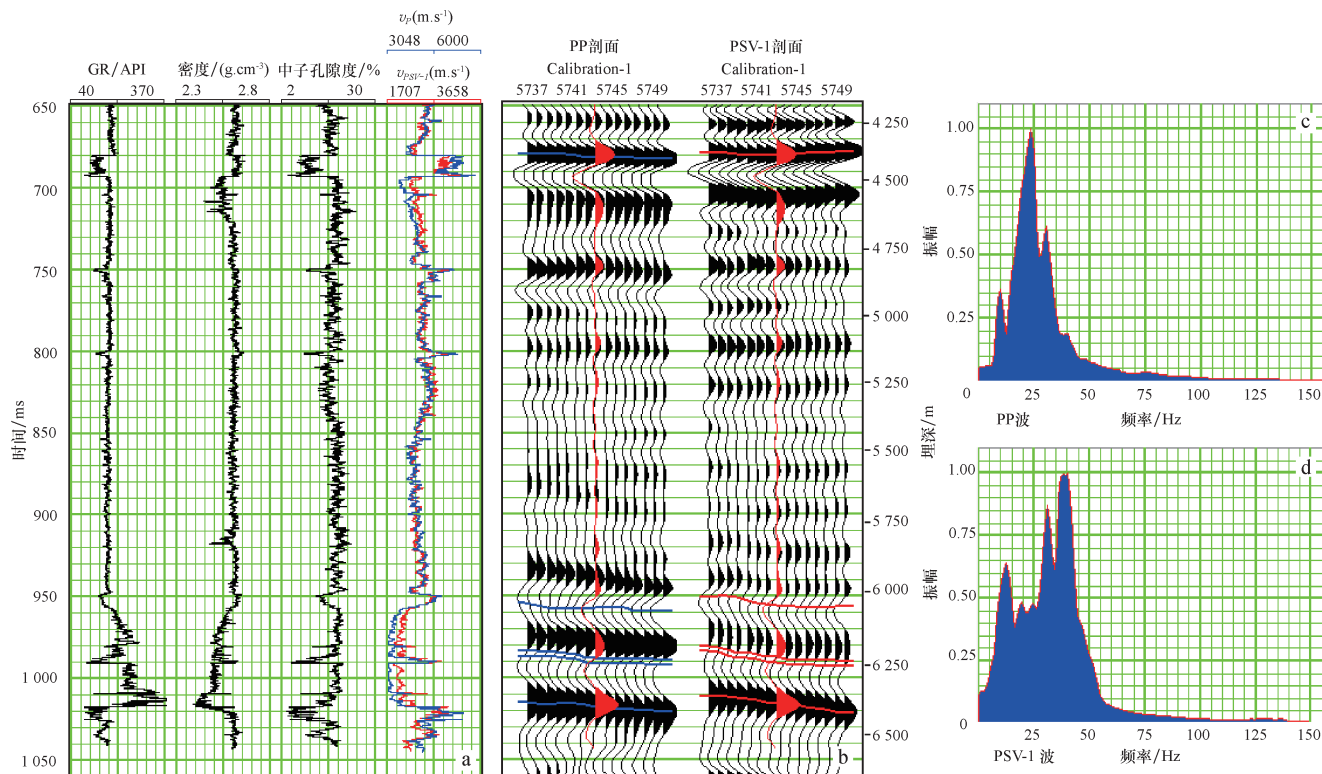


图2 Marcellus 页岩及以上层段合成记录标定及频谱分析结果

Fig. 2 Seismic synthetic record calibration and amplitude spectrum analysis of Marcellus shale and its overlying layers

a. 测井曲线; b. 合成记录; c. PP 波频谱分析; d. PSV-1 波频谱分析

要断层类型为逆断层和逆冲断层等。

生产实践证明,Marcellus 页岩的天然微裂缝对采出大规模的天然气至关重要,合理的水平井段方位对单井产能和产量影响巨大^[16-17]。传统的裂缝探测方法包括 AVA 和 VVA 等。然而,因单纯应用了 PP 波资料,这些方法都存在较大不确定性^[18]。鉴于此,本文采用快(PSV-1)慢(PSV-2)转换横波时间厚度差法进行裂缝非均质性横向预测。基于多个样点,通过分析 PP 反射时间及能量随方位角的变化关系,得出研究区内的 PSV-1 方位整体为 N60E^[19-20],据此可从 3C/3D 体处理得到 PSV-1 及 PSV-2 数据体。因受裂缝带的影响,Marcellus 页岩在 PSV-1 和 PSV-2 的反射时间厚度上会存在差异,通常认为时间厚度差异异常(低值)为裂缝的主要发育带^[21]。根据负值或低值区(暖色)可识别出两套主要的天然裂缝带:其中, J_1 天然微裂缝带呈近 ENE-WSW 走向, J_2 天然微裂缝带呈 NW-SE 向展布(图 3)。然而,因局部应力环境或裂缝密集带(J)方位改变从而影响了 PSV-1 方位,天然微裂缝发育带并非总显示为负时差异常。此外, J_1 展布方向与 NE-SW 断层走向存在相关性,但多被 SE-NW 逆冲的主断层切割(图 3a)。因此,可以推断 J_1 裂缝带形成时间较早,且裂缝成因主要为地层超压,而与后期的 SE-NW 向的逆冲构造应力关系不大。

3 PP-PS 联合反演

3.1 联合反演可行性

传统 PP 波地震反演在油气勘探中曾发挥重大作

用,但不能直接引入 S 波信息,故无法提供关键参数用于解决天然微裂缝、致密砂岩气藏等的勘探难题^[22-23]。理论上,PP 和 PS 波在岩石内的传播速度存在良好的线性相关^[24],PP 波速度和地层密度也有着非常密切的关系^[25]。Marcellus 地层上、下段页岩均为富含有机质的泥岩,但下段页岩的有机质类型更好、有机质含量更丰富($TOC > 10\%$),成熟度更高($R_o > 3\%$)^[26],且这种岩性特征几乎稳定分布于整个阿巴拉契亚盆地。因此,合理引入 PS 波信息,利用 PP 和 PS 波的内在联系进行 PP-PS 联合反演应可以提高地震反演的精度和可靠性,在本研究区具有可行性。

3.2 联合反演及页岩气储层“甜点”识别

基于可行性分析、PP-PS 信息匹配、PSV-1/PSV-2 天然微裂缝探测,再利用 PP-PS 波速度、密度模型等资料,我们获得了较理想的 PP-PS 联合反演结果。如图 4 所示,因受分辨率限制,传统的 PP 波反演虽然可以区分 Marcellus 地层的三分性,但细节过于粗糙,反演精度无法满足生产需求。然而,在 PP-PS 联合反演剖面上,不但能识别出 Marcellus 上、下段页岩及中间的 Cherry 石灰岩,而且可以刻画出 Cherry 灰岩薄互层的展布,岩性旋回等特征。此外,PP-PS 联合反演波阻抗剖面上可明显看到 Marcellus 下段页岩的阻抗值低于上段页岩,这与上、下段页岩的有机质丰度特征完全吻合。反演效果差异大,可能有 3 个原因:①PP-PS 联合反演可以直接、同时引入 P 波和 S 波信息;②PS 波蕴含更为丰富的岩性、微构造等信息;③如

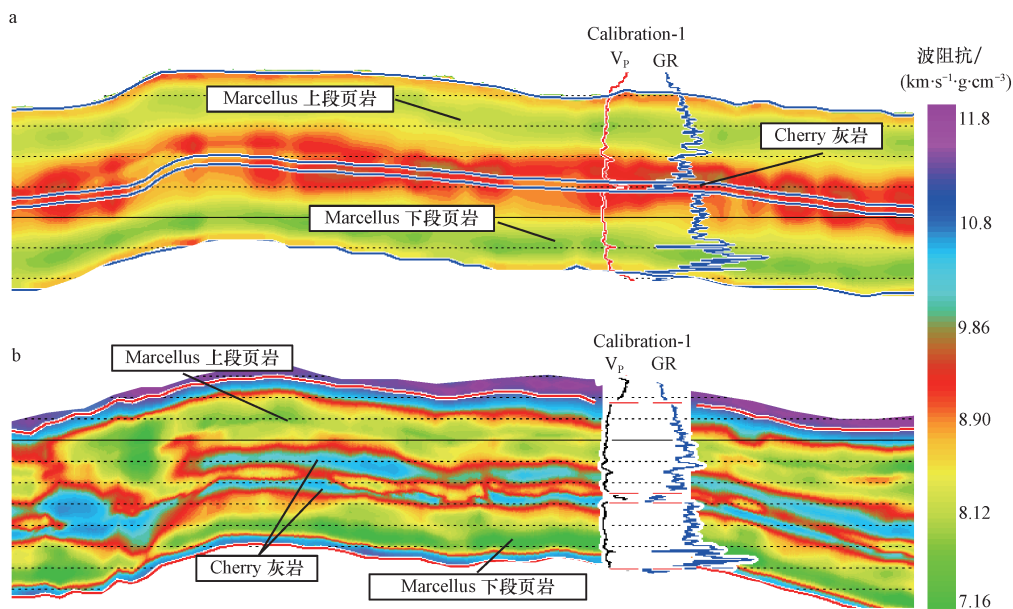


图4 传统纵波反演与 PP-PS 联合反演对比剖面

Fig. 4 Correlation profiles of conventional PP inversion and PP-PS joint inversion

a. 常规 PP 波反演;b. PP-PS 波联合反演

图2,在 Marcellus 基底之上,PS(40Hz)比 PP(25Hz)波地震资料具有更高的纵向分辨率。

除波阻抗属性外,PP-PS联合反演还能提供纵横波速度比(v_p/v_s)、密度等组合属性^[27]。生产及实验研究表明^[28-32]:①岩层的 v_p/v_s 属性对地层岩性、储集空间内流体性质、流体饱和度等特征反应很敏感;②地震纵横波速度都随密度减小而降低,但横波降低幅度更大;③地震横波主要沿岩石骨架传播,与孔隙流体性质及变化关系不大;④纵波速度在遇到油气层时会显著减小,尤其在气层中;⑤高孔隙流体压力及裂缝发育带,尤其是后者,易引发高 v_p/v_s 比值。因而,我们可以得出以下推论:在天然微裂缝欠发育的页岩地层内(体积密度较均匀),地震横波速度(v_s)几乎不会有变化,而纵波速度(v_p)可能因为页岩粒间孔隙的含气性而显著降低,从而可用 v_p/v_s 比值有效识别页岩气储层“甜点”。相反,在天然微裂缝发育的页岩层中, v_s 会明显降低(在某一特定裂缝带内,因破碎程度相似,可假定 v_s 较低但相对稳定),而 v_p 则主要取决于裂缝的填充及结晶程度、裂缝孔隙中的流体性质及饱和度等。因此,在特定的天然微裂缝带分布区内, v_p/v_s 比值也能很好的指示页岩气储层“甜点”。

地层密度本质上反应的是地层的电子密度,而电子密度相当于地层体积密度。随着有机质和烃类气体含量的增加将会使地层密度值变低;此外,天然张性微裂缝的发育,也会使地层密度测井值降低^[33]。在岩性相对稳定分布的页岩范围内,地层密度能很好的反应

粒(晶)间孔隙、张裂缝等的发育程度。因此,基于PP-PS联合反演密度属性,可以有效识区分PSV-1/PSV-2法所探测的天然微裂缝性质,即张裂缝(与现今水平最大主应力一致,结晶度较低)、闭合裂缝(充填、胶结程度较高或挤压缝合)^[34]。

以 Marcellus 地层下段页岩为例,如图5a所示:PP-PS联合反演密度属性特征(测井上稳定页岩段密度为 2.513 g/cm^3)与PSV-1/PSV-2时间厚度差法预测的裂缝分布结果高度吻合性,尤其表现在裂缝预测的主体部位(图3a);PSV-1/PSV-2方法预测的天然微裂缝分布带(暖色)在PP-PS联合反演密度属性图上表现为低值区(暖色)。两者局部差异可能与裂缝的充填、胶结程度、裂缝内的流体性质及饱和度、岩性纯度、应力环境、压实及地层压力等有关。因此,考虑到裂缝胶结的不完全性,基于PSV-1/PSV-2方法的微裂缝分布探测成果,结合PP-PS联合反演密度属性的平面特征,可以有效识别张性天然微裂缝带的分布范围(PSV-1/PSV-2时间厚度差、地层密度均为低值)。

基于张性天然微裂缝分布预测,结合PP-PS联合反演 v_p/v_s 组合属性特征(图5b, v_p/v_s 低值区为可能的页岩气富集带),可对张裂缝内的流体性质及丰度进行有效检测,进而可预测研究区内最有利的页岩气藏储层“甜点”(图5c)。在张性微裂缝带之外的高密度、低 v_p/v_s 区,可能是孔、渗性相对较差的致密孔隙(晶间、粒间)性页岩气储层。

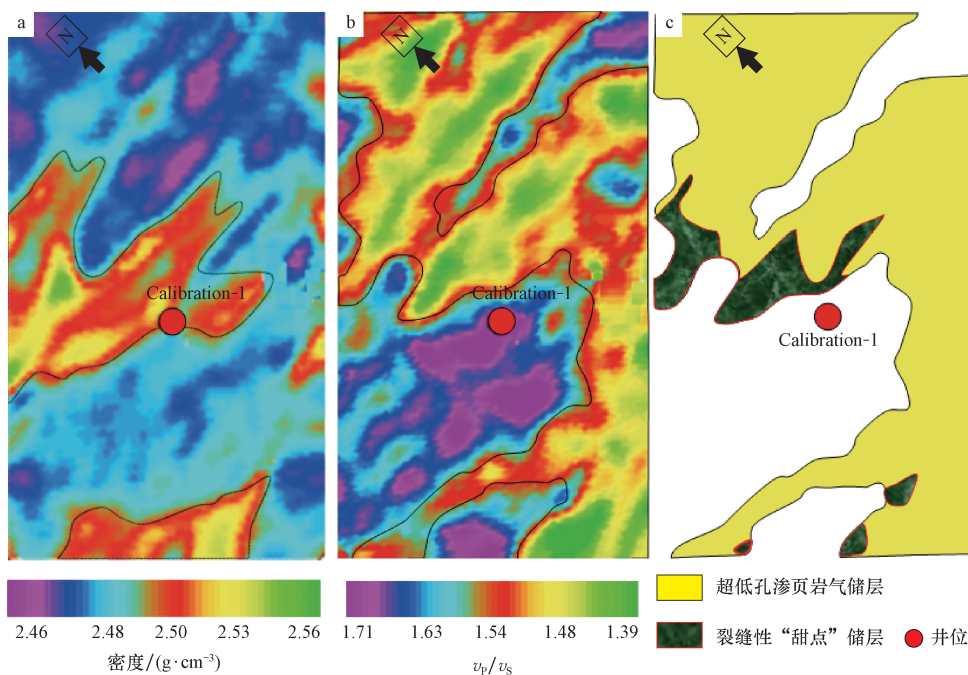


图5 PP-PS联合反演组合属性及页岩气藏“甜点”预测

Fig. 5 Assemblage attributes of PP-PS joint inversion and sweet spots of shale gas reservoirs

a. 联合反演密度;b. 联合反演速度比值;c. 页岩气储层分类

3.3 预测效果分析

Calibration-1 是 3C/3D 研究区内唯一的领眼井,其测井特征如下:①Marcellus 下段页岩较上段具有相对高伽马、低密度的测井响应特征;②深、浅侧向电阻率曲线均有明显齿化特征,可能有裂缝发育的迹象;③深浅侧向电阻率值近乎相同,表明 Marcellus 的下段页岩具有超低孔低渗特征,稳定页岩段不易受到泥浆浸入影响;④地层电阻率最高仅为 $40 \Omega \cdot \text{m}$ (图 1),未见含气显示^[35];⑤裂缝欠发育页岩段的 v_p/v_s 均值约为 1.56。因此,Calibration-1 井应位于张裂缝分布范围内,但在页岩气富集区之外,故测井上有裂缝发育迹象但无明显气测显示。此外,据赞助方反馈,Calibration-1 井北西方向水平井段(Cal-1st)的含气显示及气产量明显好于 SE 方向的水平井段(Cal-2st)。总之,Calibration-1 的岩、电性特征与地球物理方法预测的结果高度吻合,这很好地验证了 PSV-1/PSV-2 方法裂缝探测结果及应用 PP-PS 联合反演方法进行天然微裂缝性页岩气储层“甜点”^[36]预测的正确、可行性。

4 结束语

基于 3C/3D 地震资料,本文应用 PSV-1/PSV-2 时间厚度差法对 Marcellus 页岩的天然微裂缝分布进行预测,并结合 PP-PS 联合反演属性对裂缝性质、张裂缝含气性分别进行识别和检测,较好的展示了 PP-PS 联合反演技术的优越性,主要有以下认识:

1) PP-PS 联合反演可直接、充分引入横波的岩性、微构造等信息,比传统的 PP 地震反演具有更高的纵、横向分辨率,有利于岩性识别和页岩气储层“甜点”的精细刻画。

2) 在岩性分布相对稳定的地区,PP-PS 联合反演的密度、 v_p/v_s 等组合属性对天然微裂缝的开闭性识别、含气性检测等具较大优势。但是,该方法对地震解释及 PP 和 PS 信息匹配精度要求较高。

3) 裂缝性页岩储层的影响因素众多,联合反演分析应综合考虑多种地质、地物及地化参数(如应力环境、胶结程度、地震反射差异、流体性质及饱和度等)。

致谢:感谢 Michael, Joseph 和 Dallas 在访学工作中给予的帮助,感谢公司和部门领导对我赴美访学的支持,感谢审稿专家及编辑老师们的热心指导。

参 考 文 献

[1] Lee D S, Herman J D, Elsworth D, et al. A critical evaluation of un-

conventional gas recovery from the Marcellus shale, Northeastern United States[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15(4): 679-687.

[2] 陈志海, 马旭杰, 黄广涛. 缝洞型碳酸盐岩油藏缝洞单元划分方法研究-以塔河油田奥陶系油藏主力开发区为例[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 847-855.

Chen Zhihai, Ma Xujie, Huang Guangtao. Research on fracture-vug unit division of fractured-vuggy carbonate rock oil pools [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 847-855.

[3] Stewart R R, Gaiser J E, Brown R J, et al. Converted wave-seismic exploration[J]. Geophysics, 2002, 67(5): 1348-1363.

[4] Bowker K A, Grace T. The downside of using GR to determine TOC content: an example from the Marcellus Shale in SE West Virginia [C] // American Association of Petroleum Geologists (AAPG). Critical assessment of shale resource plays of AAPG Hedberg Research Conference. Austin: Sine nomine, 2010: 5-6.

[5] Enomoto C B, Coleman J L. Geology of the Devonian Marcellus Shale-Valley and Ridge Province, Virginia and West Virginia [C] // AAPG. A Field Trip Guidebook for the American Association of Petroleum Geologists Eastern Section Meeting. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2011: 37-46.

[6] 郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 79-85.

Hao Fang, Dong Weiliang. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1): 79-85.

[7] Smith L B, Leone J. Integrated characterization of Utica and Marcellus black shale gas plays [C] // AAPG. AAPG Annual meeting. New Orleans: AAPG Format, 2010: 1-7.

[8] Lash G G, Engelder T. Thickness trends and sequence stratigraphy of the Middle Devonian Marcellus Formation Appalachian Basin [C] // AAPG. AAPG Annual Meeting. Houston: Gulf Publishing Company, 2011: 61-103.

[9] Slatt R M, Rodriguez N D. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: commonality or coincidence? [J]. Journal of Natural Gas Engineering and Science, 2012, 8(9): 68-84.

[10] Brad G. The facts about natural gas exploration of the Marcellus Shale [M]. New York: Independent Oil and Gas Association of New York, 2008: 2-3.

[11] Harper J A. The geology of pennsylvania [M]. Pennsylvania: Pennsylvania Geologic Survey and Pittsburgh Geological Society, 1999: 108-127.

[12] 陈双全, 王尚旭, 李向阳, 等. PSV 与 PP 波时间匹配应用研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(4): 497-501.

Chen Shuangquan, Wang Shangxu, Li Xiangyang, et al. Time matching between P-SV wave and P-P Wave [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(4): 497-501.

[13] 黄跃, 徐天吉, 程冰洁, 等. 地震转换波叠后联合反演技术在川西须家河组气藏的应用 [J]. 地质勘探, 2010, 30(4): 1-4.

Huang Yue, Xu Tianji, Chen Bingjie, et al. Application of converted-wave poststack joint inversion in the Xujiache Formation gas reservoir in the western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(4): 1-4.

[14] Deangelo M V, Backus M, Hardage B A, et al. Depth registration of P-wave and C-wave seismic data for near-seafloor sediment

- characterization, Gulf of Mexico [J]. The Leading Edge, 2003, 22 (2): 96 – 105.
- [15] Fomel S, Backus M M, DeAngelo M V, et al. Multicomponent seismic data registration for subsurface characterization in the shallow Gulf of Mexico [C] // Offshore Technology Conference (OTC) Program Committee. Offshore Technology Conference. Houston: Sine nomine, 2003: 1 – 2.
- [16] Wrightstone G. The Marcellus Experience [C] // Society of Petroleum Engineers (SPE). Applied Technology Workshop. Houston: Sine nomine, 2012: 33 – 34.
- [17] 杨振恒, 韩志艳, 李志明, 等. 北美典型克拉通盆地页岩气成藏特征、模式及启示 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34 (4): 463 – 470.
- Yang Zhenheng, Han Zhiyan, Li Zhiming, et al. Characteristics and patterns of shale gas accumulation in typical North American cratonic basins and their enlightenments [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34 (4): 463 – 470.
- [18] 张丰麒, 陆占国, 刘昱彤. 联合 PP、PS 波叠前 AVA 反演方法 [J]. 物探与化探, 2012, 36 (6): 985 – 990.
- Zhang Fengqi, Lu Zhanguo, Liu Yutong. A Study of combining AVA inversion with PP-Wave data and PS-Wave data [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36 (6): 985 – 990.
- [19] Hardage B A. Evaluation of fracture systems and stress fields within the Marcellus Shale and Utica Shale and characterization of associated water-disposal reservoirs, Appalachian Basin [M]. Pittsburgh: RPSEA Unconventional Gas Conference, 2012: 55 – 67.
- [20] 孙炜, 李玉凤, 何巍巍, 等. P 波各向异性裂缝预测技术在 ZY 区碳酸盐岩储层中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34 (1): 137 – 144.
- Sun Wei, Li Yufeng, He Weiwei, et al. Using P-wave azimuthal anisotropy to predict fractures in carbonate reservoirs of the ZY block [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34 (1): 137 – 144.
- [21] Hardage B A, DeAngelo M V, Murray P E, et al. Multi-component seismic technology [M]. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 2011: 253 – 266.
- [22] 孟元林, 胡越, 李新宁, 等. 致密火山岩物性影响因素分析与储层质量预测——以马朗—条湖凹陷条湖组为例 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35 (2): 244 – 252.
- Meng Yuanlin, Hu Yue, Li Xinning, et al. Controlling factors on physical property of tight volcanic rocks and reservoir quality prediction: a case study of the Tiaohu Formation in Marlang-Tiaohu Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35 (2): 244 – 252.
- [23] 田景春, 刘伟伟, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35 (2): 183 – 189.
- Tian Jingchun, Liu Weiwei, Wang Feng, et al. Heterogeneity of the Paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao Area of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35 (2): 183 – 189.
- [24] Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic rocks [J]. Geophysics, 1985, 50 (4): 571 – 581.
- [25] Gardner G H F, Gardner L W, Gergory A R. Formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps [J]. Geophysics, 1974, 39 (6): 770 – 780.
- [26] Carter K M, Harper J A, Schmid K W, et al. Unconventional natural gas resources in Pennsylvania—the backstory of the modern Marcellus Shale play [J]. Environmental Geosciences, 2011, 18 (4): 217 – 257.
- [27] 王文争, 刘俊杰, 乌锐. PP-PS 联合反演含气性预测方法及应用 [J]. 物探与化探, 2011, 35 (4): 516 – 520.
- Wang Wenzheng, Liu Junjie, Wu Rui. PP-PS Joint inversion technology and its application to gas reservoir prediction [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35 (4): 516 – 520.
- [28] 谷明峰, 徐美茹, 周进高, 等. 叠前同时反演技术在碳酸盐岩储层预测中的应用 [J]. 岩性油气藏, 2013, 25 (2): 60 – 64.
- Gu Mingfeng, Xu Meiru, Zhou Jingao, et al. Application of prestack simulation inversion to the prediction of carbonate reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25 (2): 60 – 64.
- [29] 李奎周, 赵海波, 韩林, 等. 孔隙流体对砂岩弹性参数的影响 [J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30 (5): 171 – 174.
- Li Kuizhou, Zhao Haibo, Han Lin, et al. Influences of the pore fluids on the elastic parameters of sandstone [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2011, 30 (5): 171 – 174.
- [30] 李铭, 李艳华, 楚泽涵. 声频谱测井方法研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18 (2): 229 – 233.
- Li Ming, Li Yanhua, Chu Zehan. Research evolution of acoustic spectrum logging methods [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18 (2): 229 – 233.
- [31] Wang X Q, Schubne A, Fortin J, et al. High V_p/V_s ratio: Saturated cracks or anisotropy effects? [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39 (11): 22 – 27.
- [32] Stockton S L. The use of 3 – component seismic data to identify sweet spots in fractured bakken reservoirs [C] // APPG. APPG. Annual Meeting. Houston: Gulf Publishing Company, 2011: 213 – 227.
- [33] 潘仁芳, 赵明清, 伍媛. 页岩气测井技术的应用 [J]. 中国科技信息, 2010, (7): 16 – 18.
- Pan Renfang, Zhao Mingqing, Wu Yuan. Application of log technology in shale gas [J]. China Science and Technology Information, 2010, 22 (7): 16 – 18.
- [34] 杨少春, 王惠娟, 任怀强, 等. 下扬子地区不同应力场下的成岩作用特征研究 [J]. 石油天然气学报, 2011, 33 (6): 54 – 61.
- Yang Shaochun, Wang Huijuan, Ren Huaqiang, et al. Research on diagenetic characteristics of various stress field in Lower Yangtze Area [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33 (6): 54 – 61.
- [35] 罗蓉, 李青. 页岩气测井评价及地震预测、监测技术探讨 [J]. 天然气工业, 2011, 31 (4): 34 – 39.
- Luo Rong, Li Qing. Log evaluation, seismic prediction and monitoring techniques of shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31 (4): 34 – 39.
- [36] 涂乙, 邹海燕, 孟海平, 等. 页岩气评价标准与储层分类 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35 (1): 153 – 157.
- Tu Yi, Zou Haiyan, Meng Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35 (1): 153 – 157.

(编辑 张亚雄)