

文章编号:0253-9985(2010)06-0707-08

深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术 ——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例

蔡希源

(中国石油化工股份有限公司,北京 100029)

摘要:深层致密砂岩气藏具有埋藏深、物性差、产量低的特点,但勘探潜力大。有利烃源岩发育区控制天然气的平面分布,深层致密砂岩储层中发育的“有效储渗体”是天然气富集、高产的关键。“有效储渗体”的发育受构造、沉积相和成岩相3种因素控制。有效孔隙控制了天然气的分布,裂缝控制了天然气的高产。四川盆地川西坳陷须家河组气藏具有超深、超高压、超致密等特征,储层和高产富集带预测难度大。利用三维三分量地震勘探技术,可有效解决优质储层预测、裂缝检测、含气性识别等关键问题。该技术在川西坳陷深层致密砂岩气藏勘探中应用取得了显著效果,使须家河组二段钻井成功率从15%提高到89%,高产井命中率从9%提高到67%,探明天然气地质储量 $1\,211 \times 10^8 \text{ m}^3$,实现了川西致密气田的高效勘探。

关键词:有效储渗体;三维三分量地震勘探;储层预测;深层致密砂岩;天然气富集、高产;须家河组气藏;川西坳陷;四川盆地
中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone:an example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan Depression,the Sichuan Basin

Cai Xiyuan

(China Petroleum & Chemical Corporation,Beijing 100029,China)

Abstract: Deep tight gas reservoirs are characterized by deep burial depth, poor reservoir quality and low production rate, but large exploration potentials. Distribution of favorable source rocks controls the planar distribution of gas reservoirs, and “effective reservoirs” in deep tight sands are the key to gas accumulation and production. Their development is under the control of structure, sedimentary facies and diagenetic facies. Effective porosity controls gas distribution, while fracture controls gas production rate. The gas reservoirs in the Xujiahe Formation in the western Sichuan depression feature in ultra-deep, superpressure and extra-tight, challenging prediction of reservoirs and sweet points. The 3D-3C seismic exploration technology is capable of solving such problems as quality reservoir prediction, fracture detection and gas potential identification. It has been successfully applied to exploration of the deep tight gas reservoirs in the western Sichuan depression. The success rate of exploratory drilling in the second member of the Xujiahe Formation is raised from 15% to 89%, and high yield well ratio increases from 9% to 67%, and the discovered gas in place is 121.1 BCM. High efficiency exploration of tight sand gas is realized in the western Sichuan depression.

Key words: effective reservoir, 3D-3C seismic exploration, reservoir prediction, deep tight sandstone, sweet point, gas reservoir in the Xujiahe Formation, western Sichuan Depression, Sichuan Basin

深层致密砂岩油气藏作为一种特殊油气藏,在世界范围内已受到人们的高度关注^[1-5]。自20

世纪80年代以来,多位专家提出了深盆气(Masters, 1979)、盆地中心气(Rose, 1986)和连续型油

收稿日期:2010-10-21。

作者简介:蔡希源(1953—),男,教授级高级工程师、博士生导师,矿产普查与勘探。

气藏(Schmoker,1995)等概念,就是针对在含油气盆地中广泛分布的致密砂岩和其他非常规储层(页岩气、煤层气)的勘探评价,试图用新的思维和技术方法评价其油气资源前景和勘探潜力,将前人认为非可采油气资源变为可勘探、开发、利用的能源。2007 年, Raymond 等在世界石油委员会报告中评价认为,世界致密砂岩气藏天然气资源量约为 $114 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 是未来重要的勘探增储领域。中国自 1971 年发现川西中坝气田之后,也逐步系统地开始了对致密砂岩含气领域的研究。勘探实践表明,我国致密砂岩气藏分布领域广,类型多样,在所有含油气盆地的深部,如四川、鄂尔多斯、吐哈、松辽、准噶尔、塔里木等 10 余个盆地,都具有形成致密砂岩气藏的地质条件。致密砂岩储层具有分布面积广、埋藏深度大、成岩演化作用复杂、储层物性差、非均质性强和不完全受制于达西定律和浮力驱动的运聚成藏特点,且单井产能低,常规勘探技术难以达到勘探目的。近年来,随着勘探技术的进步,在四川和鄂尔多斯的勘探实践证明致密砂岩蕴藏有丰富的天然气资源,不仅可以富集成藏,而且可以形成大型、特大型气田,只是这些气田的评价和勘探技术与常规油气勘探相比具有明显不同。本文以四川盆地川西坳陷须家河组近年的勘探实践为基础,总结深层致密砂岩大中型油气田的油气富集规律和高产主控因素的预测技术。

1 地质背景

川西坳陷位于四川盆地西部,大地构造位置处于龙门山造山带以东、扬子地块西北缘,走向北东,总面积约 $3.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ [6]。晚三叠世以来,川西坳陷经历了印支、燕山、喜马拉雅多期构造运动作用,始终处于受益缘山系隆升与挤压控制的被动沉降环境 [7~9]。川西坳陷发育浅中层(侏罗系一下白垩统)、深层(三叠系须家河组)和海相(马鞍塘组、雷口坡组等)三大勘探领域(图 1)。“十五”以前,探明的天然气储量主要集中在中浅层;深层须家河组由于地质条件复杂,储层为致密低渗砂岩,具有很强的非均质性 [10~14] 和流体异常超高压 [15,16],故在勘探开发过程中遇到了不少困难,虽然取得一定发现,但未取得实质性突破和进展。“十一五”以来,在“早聚、中封、晚活化”深层

层位	岩性组合		生储盖	组合
须五段	—		盖层	Ⅱ
须四段	• • • —		储层	
	• • • —			
	• • •			
	须三段	—		烃源 盖层
须二段	• • •		储层	Ⅰ
小马塘 鞍子塘 组	—		烃源	

图 1 川西坳陷须家河组地层简图
Fig. 1 Simplified stratigraphic column of the Xujiahe Formation in the western Sichuan Depression

致密碎屑岩的天然气成藏理论指导下,通过典型井解剖和储层的再评价,认识到须家河组致密低渗砂岩虽然具有很强的非均质性,但仍发育一定的有效基质孔隙和裂缝,其中有效孔隙控制了天然气的分布、裂缝控制了天然气的富集和高产。因此,如何准确预测储层有效孔隙分布和裂缝发育带是高效勘探的关键。勘探实践证明,三维三分量地震勘探技术可有效解决优质储层预测、裂缝检测、含气性识别等关键问题,在川西坳陷深层致密砂岩气藏勘探中应用取得了显著效果。

2 深层致密砂岩气藏天然气富集规律

2.1 烃源岩发育区控制天然气的分布

川西坳陷处于四川盆地上三叠统的沉积中心和生烃中心。上三叠统是一套以含煤碎屑岩系为主的地层,烃源岩主要分布于须(须家河组)一段、须三段、须五段,具有厚度大、分布广、有机质丰度高的特点。其中,马鞍塘组一小塘子组烃源岩有机质类型以 I 型、II 型干酪根为主,显微组分含大量类脂组;须三段、须五段以 III 型干酪根为主,为有机质丰度高(残余有机碳含量为 1.13%~3.47%)、品质好的煤系烃源岩 [17]。烃源岩生气强度高,彭州-灌县生烃中心最大可达

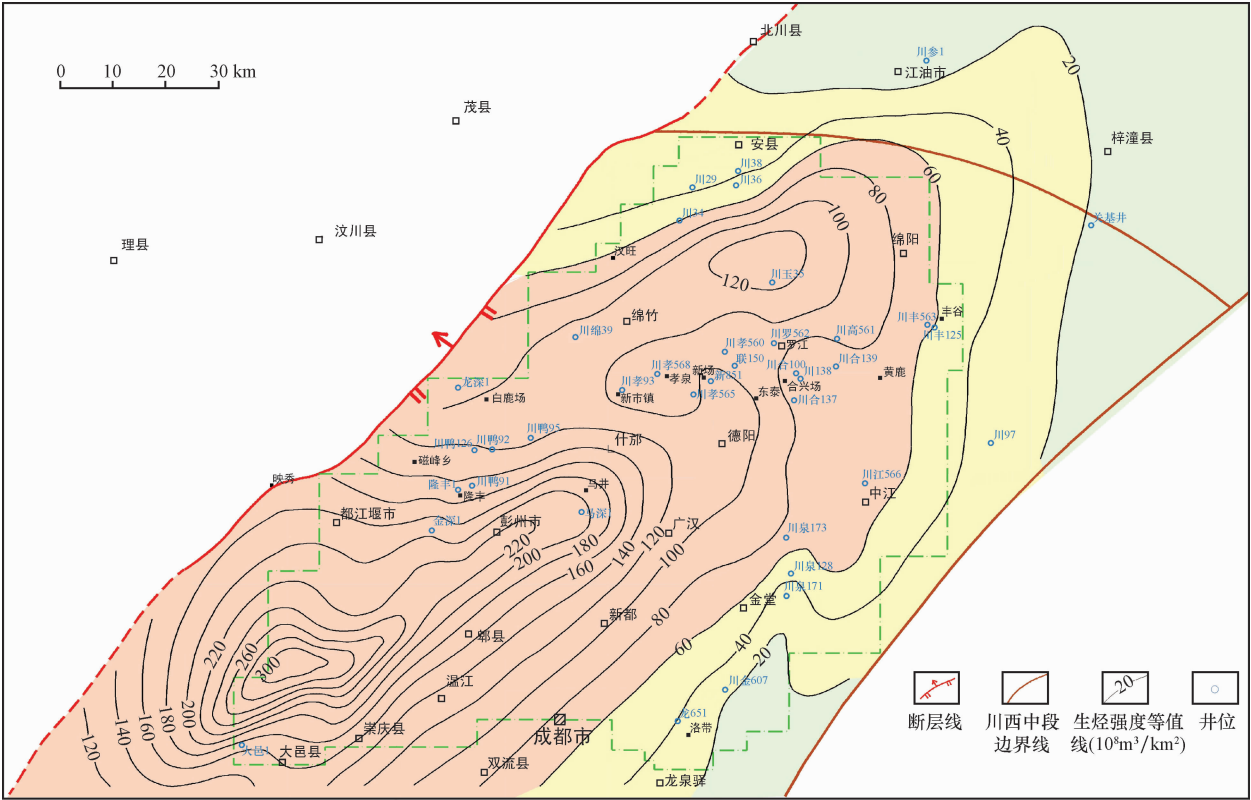


图2 川西坳陷上三叠统生烃强度平面图

Fig. 2 Plane view of hydrocarbon-generating intensity of the Upper Triassic in the western Sichuan Depression

$200 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以上,大部分地区生气强度在 $30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以上,具备形成大中型气田的烃源条件^[18~22]。根据郑冰和曾华盛的计算,川西坳陷中段须家河组天然气资源量为 $11\,984 \times 10^8 \text{ m}^3$,目前的发现主要集中在烃源岩发育区内的孝泉-丰谷构造带和龙门山前缘大邑-鸭子河构造带。须家河组已查明圈闭 38 个,以构造-岩性圈闭为主,主要围绕生烃凹陷呈环形分布(图 2),大部分为印支晚期或燕山早期形成的,燕山中、晚期继承性发展,喜马拉雅期改造定型。随着地质认识和技术进步,勘探逐步向深凹区的岩性气藏发展,最终可形成满凹含气的场面。

2.2 构造、沉积、成岩作用控制圈闭的发育与分布

目前,在须家河组二段和四段发现的多个气藏均具有极强的非均质性,同一地区同一构造的不同部位含气性有较大差异。综合研究表明,构造、沉积环境和成岩作用是造成这一差异的主要因素。

1) 构造演化对圈闭形成和展布的作用

川西坳陷经历了多次构造形变,具有构造雏

形出现早、定型晚的特点,与生烃高峰期相匹配的燕山中、晚期构造对油气的早期聚集具有重要作用,大型古隆起及其斜坡是油气富集的有力部位。由于喜马拉雅期构造形变较强,形成了众多局部构造,对早期油气藏具有很强的调整和改造作用,主要表现在以下两个方面:一是局部构造位置控制着油气的分布,使得单个圈闭高部位含气、低部位可能含水;二是形成的裂缝系统与相对优质储层相匹配,构成天然气高产、富集带。

2) 沉积相对圈闭形成的作用

须家河组二段砂岩孔隙度一般为 2%~5%,须家河组四段砂岩孔隙度一般为 5%~8%,渗透率都小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。但在这两段也分别发育孔隙度为 6%~12%和 8%~12%、渗透率大于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的相对优质储层,如位于新场构造北翼的新 7 井 TX26 砂组平均孔隙度为 9.02%,平均渗透率为 $0.399 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大孔隙度为 12.12%,最大渗透率为 $1.092 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。研究表明,这些相对优质储层与河口坝和分流河道密切相关,即高能沉积相带是岩性圈闭形成的基础。

3) 成岩演化对圈闭形成的作用

成岩作用研究表明,绿泥石衬垫和溶蚀作用是主要的建设性成岩作用。绿泥石衬垫有抵抗压实的支撑作用和阻止石英次生加大的作用,使得部分原生孔得以保存下来;溶蚀作用通过溶解长石和喷出岩岩屑形成次生孔,主要溶蚀期低势能区是溶蚀孔发育的有利区。这两项建设性成岩作用大幅提高了储层的孔隙度,有利于成岩圈闭的发育。

上述构造、沉积、成岩的共同作用,形成了构造- 裂缝、构造- 岩性、岩性- 裂缝等多种类型的圈闭。构造- 裂缝、构造- 岩性圈闭主要发育在坳陷的周边,岩性、岩性- 裂缝圈闭主要分布在坳陷中心。

2.3 有效储渗体是天然气富集、高产的关键

通过探井解剖和储层的再认识,发现“有效储渗体”是深层致密砂岩气藏天然气富集、高产的关键因素。“有效储渗体”是指由孔隙和裂缝组成,具有一定储集空间、疏导能力和含气性的实体(图 3),其发育受构造、沉积相和成岩相 3 种因素控制。有效孔隙控制了天然气的分布,裂缝控制了天然气的高产。

有效孔隙发育带是深层致密砂岩气藏稳产的基础。虽然须家河组自须五段到须二段储层普遍含气,但要形成具一定规模的气藏、甚至气田,必须具有广泛发育的具一定孔渗性的良好储层作支撑,否则难以形成具一定经济开采价值的气藏。川西勘探实践证明了仅靠裂缝发育是不够的,它只能获得较高的初期产能,但因储集空间有限不

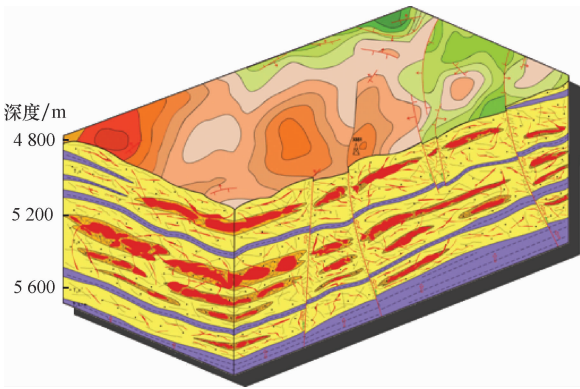


图 3 有效储渗体模式图
Fig. 3 Model of effective reservoirs

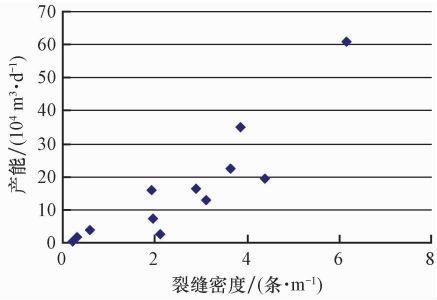


图 4 川西坳陷须家河组储层裂缝密度与产能的关系
Fig. 4 Relationship between fracture density and production capacity of the Xujiahe Formation in the western Sichuan Depression

能保持稳产。例如丰谷构造的 CF175 井便是如此,该井钻遇须四段裂缝性气层发生强烈井喷,估计产能为几十万方,当事故处理完毕基本无产能。新场须二中亚段气藏和高庙子须二中亚段气藏发育有较好基质孔隙的储层,当这些储层具有一定厚度时,即使无明显裂缝改造也可以获得稳定的工业产能。如须二段储层孔隙度平均仅 3.61%,渗透率平均仅 $0.084 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为致密甚至超致密储层,但非均质性极强,区内最大孔隙度可达 16.76%,最大渗透率接近 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,揭示了致密化背景上发育相对优质储层。因此,具有较好的孔渗带是稳产的基础。

裂缝发育是天然气高产的关键。图 4 的试气资料表明,天然气产能与裂缝的发育程度呈正相关,显示了裂缝对改善致密储层渗透率的重要作用。天然气产能大于 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的裂缝密度多大于 3 条/m。

川西须家河组储层总体十分致密,即使相对优质储层如无裂缝叠加也难以获得较高产能,而且是要有相当规模的裂缝发育才行,裂缝规模小了也难以获得较高的稳定产能,图 4 亦说明了这点。X851 和 X2 等高产、稳产井既得益于因断层发育导致该区裂缝发育,又得益于该区 $\text{Tx}^{2(4-5)}$ 砂组储层品质相对较好,其孔隙度高于平均值,有较大储集空间,是天然气富集、高产的关键。

3 有效储渗体预测技术

有效储渗体预测是世界级难题。针对这一难题,开展地质-地震联合攻关。一是开展储层精细地质建模,通过细分层系对储层沉积相、沉积微相

进行研究,编制出分层系砂岩分布图,精细刻画古河道的分布;同时,结合古构造及其演化研究,搞清古应力场的分布规律,建立有效储层发育的综合地质模型。二是以综合地质模型为基础,以多尺度介质正演模拟为桥梁,以三维三分量地质资料采集、处理、解释一体化为突破口,开展全方位攻关,形成3项创新性技术:①创建了针对深层致密砂岩气藏的陆地三维三分量、多波接收窗口优化和全方位分散式复合模板地震采集技术,使深层多波资料信噪比显著提高,实现了陆地多波多分量地震工业化生产;②创建了保护深层横波分裂信息的各向同性、各向异性处理技术;③创建了纵、横波分级标定、逐步逼近的综合解释技术。利用上述技术,通过纵、横联合反演,在川西新场地区预测了深层致密砂岩有效储渗体。有效储渗体预测包括优质储层预测、裂缝检测和含气性识别3个方面。

3.1 优质储层预测技术

川西坳陷深层须家河组储层以三角洲前缘砂坝为主,部分为三角洲平原分流河道。砂体厚度高达90 m,孔隙度通常在1%~4%,渗透率普遍低于 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在孔渗性极差的致密厚层砂体中,发育孔隙度大于4%、渗透率偏高的优质储层。如CX560井钻遇的优质储层,平均孔隙度达7.11%。因此,优质储层是天然气高产、稳产的关键条件。然而,受储层埋藏超深(埋深约5 000 m)及地震信号主频低、频带窄等不利因素的制约,优质储层预测难度极大。

20世纪80年代以来,纵波反演技术在储层预测中发挥了重要作用。然而,面对川西坳陷深层须家河组这样的非常规复杂天然气储层,纵波反演技术难以凑效。

自21世纪以来,多波多分量地震勘探技术日渐兴起,并在隐蔽性较强的复杂油气储层预测中展现出极大优势^[23]。尤其是高质量的C波资料的获得,为纵、横波联合反演技术的发展与应用夯实了基础。纵、横波联合反演技术同时利用了纵波、C波的地震资料 and 全波测井数据、岩石物理参数等综合信息,充实了反演的数据空间,降低了反演的多解性;尤其是C波资料的参与,使反演的信息量成倍增加。相比之下,纵波反演技术仅仅利用了纵波的地震资料及部分测井数据,反演约束条件不足,反演精度相对较低,许多重要的岩性参数及优质储层敏感参数难以获得。因此,纵、横波联合反演技术的优势十分明显。

基于川西坳陷深层须家河组的地质、岩石物理、全波测井及3D3C地震数据等综合资料,利用纵、横波联合反演技术,获得了密度、纵横波阻抗、弹性阻抗、弹性阻抗梯度、各向异性系数、纵横波速度、速度比、泊松比、剪切模量、拉梅系数、体积模量等重要参数。通过参数对比、多体交会与敏感性综合分析,优选出对岩性、储层和流体性质的敏感参数;在横向上勾勒出河道、砂坝的沿层发育情况,在纵向上描述砂体的厚度,进而在3D空间中雕刻出川西深层须家河组致密碎屑岩中优质储层的空间展布(图5)。

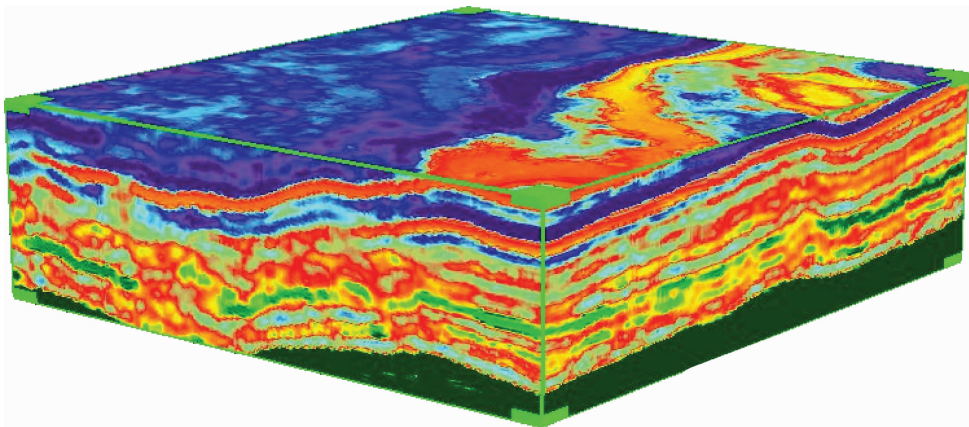


图5 川西坳陷深层须家河组纵、横波联合反演优质储层预测

Fig. 5 Prediction of quality reservoirs in the Xujiache Formation in the western Sichuan Depression through combined P- and S-wave inversion

3.2 裂缝预测技术

川西深层须家河组致密非均质裂缝性气藏的特点决定了裂缝预测难度极大,单靠一种方法难以排除裂缝预测的多解性。因此,采用纵、横波裂缝预测方法相结合,形成了多方法、多尺度裂缝综合预测技术系列。在预测中,大尺度约束小尺度,分级控制,最终通过纵、横波联合反演,实现对裂缝的表征和建模,以提高裂缝预测的精度和可靠性^[24]。

1) 用地史成因法预测裂缝发育带

地史成因裂缝预测是基于地应力场变化的地质成因预测方法。它通过对地层的构造发育史进行恢复,并通过构造演化过程的正演来计算构造运动对地层产生的应变变量;然后,以构造演化过程中的应变变量作为控制裂缝生长的参数,采用多参数(地层厚度、岩性、裂缝发育方向等)控制的随机模拟算法进行裂缝发育区及发育方向预测;并利用地震属性(如相干、振幅属性等)和其他气藏地质属性(如孔隙度、渗透率等)进行约束,从而提高裂缝预测的精度。

2) 用纵波检测裂缝

纵波方位各向异性裂缝预测技术是目前利用纵波资料检测裂缝最为可靠和直接的方法。它利用地震波在各向异性介质中传播时会发生振幅、速度、传播时间、AVO 属性随方位角变化来检测裂缝。研究表明,川西深层须家河组裂缝型储层存在明显的 HTI 介质的各向异性特征,除了方位振幅差异外,还存在方位速度和方位时间等差异。但是,利用纵波资料仅能检测到 5 m 以上的高角度裂缝。

3) 用横波分裂检测裂缝

由于横波在通过各向异性介质(裂缝)时会发生分裂,质点振动沿裂缝走向时传播速度快,而质点振动垂直于裂缝走向时传播速度慢,因此在通过裂缝系统后就会出现快横波和慢横波,也称为横波双折射现象。只要找出快横波的方向,就准确确定了裂缝发育的走向;而快、慢横波的层间时差,就指示裂缝发育的密度。研究表明,川西坳陷新场地区三维三分量纵波记录中大量存在裂缝发育(图 6)的证据。采用横波分裂裂缝检测方法可

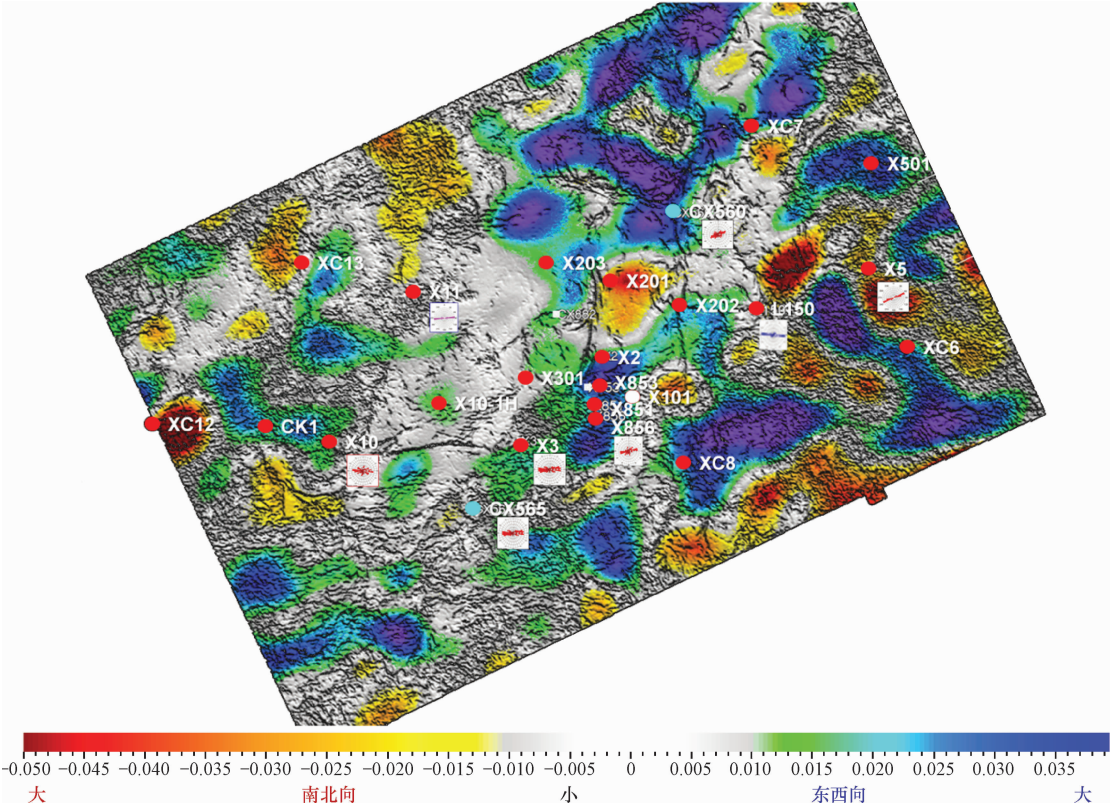


图 6 川西坳陷新场地区三维三分量 T_5^{12} 层裂缝检测图

Fig. 6 Fracture detection of T_5^{12} layer in Xinchang area of the western Sichuan Depression with the 3D-3C seismic exploration technique
(蓝绿色代表东西向裂缝,红黄色代表南北向裂缝,颜色深浅代表裂缝发育密度)

以较好检测到小于 5 m 尺度的裂缝,并能计算不同角度裂缝的发育方向和密度,结果与实钻情况吻合较好。

通过纵、横波联合反演来实现裂缝网络建模,通过裂缝建模在地质体上建立裂缝的空间模型,并定量计算出裂缝的发育方向和密度,从而预测储集空间的大小和联通性。

3.3 含气性预测技术

川西深层须家河组气藏含气性检测因其超深、超致密、地震波动力学特征不明显而显得十分困难。利用多波多分量资料进行含气性检测,严格遵循了岩石物理学基础,通过纵、横波联合反演成果确定储层的含气性。

利用纵波和横波联合反演预测储层含气性是多波多分量勘探的特殊优势。由于 AVO 叠前同

时反演是利用纵波的 AVO 特性,通过 Zeppritz 方程求解出横波信息,因而带有一定的近似和假设。而多分量勘探能够直接获得横波信息,因而反演结果更加真实、可靠。纵、横波联合反演包括叠后联合反演和叠前联合反演两类方法。通常情况下,利用 P 波小入射角叠加剖面反演声阻抗,利用 C 波叠加剖面反演横波阻抗,利用大入射角资料反演弹性阻抗,并通过多参数融合,构建含气指标反映储层的含气性。图 7 是川西坳陷新场地区 $T\alpha^{2(4)}$ 含气指标平面图。X851, X2 等高产井处在含气指标的高值区。

综合优质储层、裂缝、含气性预测结果来圈定有效储渗体发育带,在新场地区探井部署的应用中见到较好效果。“十一五”期间,根据“有效储渗体”预测结果部署的多口井在须家河组获高产工业气流。其中,新 2 井在须家河组二段获得 $52.000 \times$

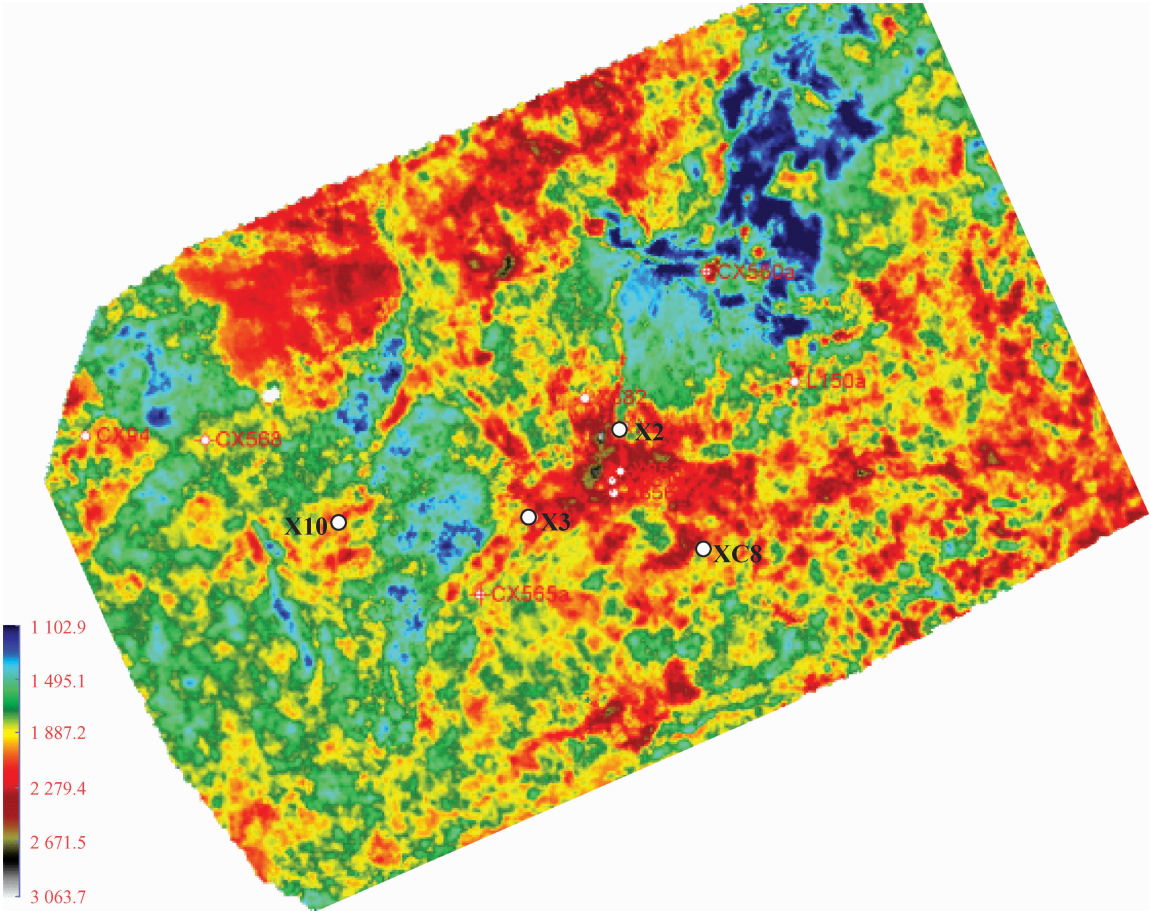


图7 川西坳陷新场地区纵、横波联合反演含气指标平面图

Fig. 7 Gas potential index of Xinchang area in the western Sichuan Depression obtained through joint inversion of P- wave and S-wave

10⁴ m³/d 的高产工业气流,新 3 井在须二段获得天然气无阻流量 36.705 × 10⁴ m³/d,新场 8 井在须二段获得天然气产量 25.056 × 10⁴ m³/d、无阻流量 32.376 × 10⁴ m³/d,新 10 井须二段测试获气 10.330 × 10⁴ m³/d。“十一五”期间,根据“有效储渗体”预测的结果在须二段共部署完钻 9 口井,有 8 口井获得成功,须二段钻井成功率从 15% 提高到 89%,高产井命中率从 9% 提高到 67%;在须四段部署完钻 5 口井,4 口井获工业气流,钻井成功率从 18% 提高到 80%。截止 2010 年底,须二段探明天然气地质储量 1 211 × 10⁸ m³,须四段也基本落实十亿方储量规模,实现了川西深层致密气田的高效勘探。

4 结论

1) 深层致密砂岩气藏具有埋藏深、物性差、产量低的特点,但勘探潜力大,有利烃源岩发育区控制天然气的平面分布。

2) “有效储渗体”是天然气富集、高产的关键。“有效储渗体”发育受构造、沉积相和成岩相 3 种因素控制。有效孔隙控制了天然气的分布,裂缝控制了天然气的高产。

3) 三维三分量地震勘探技术可有效解决优质储层预测、裂缝检测、含气性识别等关键问题,为井位部署提供支撑,从而实现高效勘探,大幅度提高钻探成功率和单井产量。

参 考 文 献

1 吕正祥. 川西孝泉构造上二叠统超致密储层演化特征[J]. 成都理工大学学报,2005,32(1):22~26

2 谯述蓉,张虹,赵爽. 川西 DY 地区须家河组致密砂岩储层预测技术及应用效果分析[J]. 石油与天然气地质,2008,29(6):774~780

3 甘其刚,许多. 川西深层致密碎屑岩气藏储层预测方法[J]. 石油物探,2008,47(6):593~597

4 丁晓琪,张哨楠,谢世文,等. 鄂尔多斯盆地西缘麻黄山地区中生界油藏富集规律[J]. 石油与天然气地质,2009,30(6):726~731

5 刘埃平,文龙,张闻林,等. 川西地区上三叠统异常高压的分布特征及形成机制研究[J]. 天然气勘探开发,2004,27(4):3~8

6 杨克明. 川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):786~793

7 郭正吾,邓康龄,韩永辉,等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社,1996. 113~138

8 李勇,曾允孚,伊海生. 龙门山前陆盆地沉积及构造演化[M]. 成都:成都科学技术出版社,1995. 25~37

9 李书兵,何鲤,柳梅青. 四川盆地晚三叠世以来陆相盆地演化史[J]. 天然气工业,1999,19(增刊):18~23

10 郑荣才,叶泰然,翟文亮,等. 川西坳陷上三叠统须家河组砂体分布预测[J]. 石油与天然气地质,2008,29(3):405~411,417

11 范小林,朱彤,潘文蕾,等. 川西坳陷中段晚三叠世前陆盆地构造变形与油气勘探[J]. 石油实验地质,2002,24(1):25~28

12 李宗银,李耀华. 川西前陆盆地上三叠统天然气有利区带评价[J]. 天然气勘探与开发,2004,27(2):1~4

13 郭东晓. 川西上三叠统一侏罗系致密砂岩储集体特征[J]. 天然气工业,1999,19(增刊):50~52

14 杨克明,叶军,吕正祥. 川西坳陷上三叠统须家河组天然气分布及成藏特征[J]. 石油与天然气地质,2004,25(5):501~505

15 刘树根,徐国盛,徐国强,等. 四川盆地天然气成藏动力学初探[J]. 天然气地球科学,2004,15(4):323~330

16 徐国盛,刘树根,李仲东,等. 四川盆地天然气成藏动力学[M]. 北京:地质出版社,2005. 101~115

17 唐立章,张贵生,张晓鹏,等. 川西须家河组致密砂岩成藏主控因素[J]. 天然气工业,2004,24(9):5~7

18 王庭斌. 中国大中型气田成藏的主控因素及勘探领域[J]. 石油与天然气地质,2005,26(5):572~582

19 卢双舫,李宏涛,付广,等. 天然气富集的主控因素剖析[J]. 天然气工业,2003,23(6):7~11

20 戴金星,王庭斌,宋岩. 中国大中型天然气田形成条件与分布规律[M]. 北京:地质出版社,1997. 10~80

21 曹烈,安凤山,王信. 川西坳陷须家河组气藏与古构造关系[J]. 石油与天然气地质,2005,26(2):224~229

22 戴金星,宋岩,张厚福. 中国大中型气田形成的主要控制因素[J]. 中国科学(D 辑),1996,26(6):481~486

23 刘保国. 提高大牛地气田三维地震储层预测精度的思考[J]. 石油物探,2008,47(1):95~102

24 甘其刚,高志平. 宽方位 AVA 裂缝检测技术应用研究[J]. 天然气工业,2005,25(5):42~44

(编辑 李 军)