

引用格式:刘成川,王勇飞,毕有益.中江气田窄河道致密砂岩气藏高效开发技术[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):345-355.

LIU Chengchuan, WANG Yongfei, BI Youyi. Efficient development technique of tight sandstone gas reservoir in narrow channel of Zhongjiang Gas Field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 345-355.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.02.010

中江气田窄河道致密砂岩气藏高效开发技术

刘成川,王勇飞,毕有益

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,四川 成都 610041)

摘要:中江气田沙溪庙组气藏高效开发面临着河道精细刻画、高产富集模式建立、开发技术政策制定、工程压裂改造技术配套4大难点。针对窄河道砂采用多域多属性精细刻画及储层精准预测技术,对多期叠置河道砂空间展布特征刻画效果较好,实现了最薄8 m、最窄50 m河道砂的刻画,且河道砂的沉积时间顺序也非常清晰,采用基于射线参数域的改进三参数叠前反演技术实现了薄层高精度定量预测,储层厚度、孔隙度预测误差均低于10%;通过建立烃源岩断层与河道砂有效搭配模式,古今构造高或古构造高、今构造低,同时储层物性好的区域有望获得气井高产、稳产;采用井组立体部署、井型优选及水平井优化设计等技术,极大提升了窄河道致密砂岩气藏储量动用程度,同时节约了投资成本;采用地质工程一体化水平井分段压裂改造技术,单井测试产气量稳步提升,改造效果提高至实施前的10.6倍。所形成的窄河道致密砂岩气藏高效开发技术实现了中江气田的高效勘探开发,建成了年产气量超 $10\times 10^8\text{ m}^3$ 的中国石化川西第一大气田。

关键词:窄河道;一体化;高效开发;致密砂岩气藏;中江气田

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Efficient development technique of tight sandstone gas reservoir in narrow channel of Zhongjiang Gas Field

LIU Chengchuan, WANG Yongfei, BI Youyi

(Exploration and Development Research Institute, Sinopec Southwest Oil and Gas Company, Chengdu, Sichua 610041, China)

Abstract: Efficient development of Zhongjiang gas reservoir is faced with four difficulties: the meticulous channel depiction, the establishment of high-yield enrichment mode, the formulation with development technology policy, and corresponding engineering fracturing technology. For the narrow channel sand bodies, the multi-domain and multi-attribute fine description and accurate reservoir prediction technology are used, and the spatial distribution characteristics of multi-stage and overlapping channel sand bodies are well described. It can depict the channel sand bodies of the thinnest 8 m and the narrowest 50 m, and the sedimentary time sequence of each channel sand body is also very clear. An improved three-parameter pre-stack inversion technique based on ray parameter domain is used to realize the high-precision quantitative prediction of thin-layer, the predicted error of reservoir thickness and porosity is less than 10%. By establishing an effective combination model of source rock fault and channel sand, with high ancient and modern structures or high ancient and low modern structures, and good reservoir physical properties, it is expected to obtain high and stable production of gas wells in these areas. By using the techniques of 3D deployment of well groups, well pattern optimization and horizontal well optimization design, the production degree of tight sandstone gas reservoir in narrow channel is greatly enhanced, and the investment cast is saved. By using the integrated horizontal well fracturing technology, the single well test gas production is steadily increased, and the transformation effect is increased to 10.6 times before implementation. High-efficiency development technology of tight sandstone gas reservoir formed by narrow channel enables efficient exploration and development of the Zhongjiang Gas Field, the largest gas field of Sinopec in western Sichuan, with an annual gas production of more than 1 billion cubic meters.

Keywords: narrow channel; integration; efficient development; tight sandstone reservoir; Zhongjiang Gas Field

收稿日期:2021-01-28。

第一作者简介:刘成川(1966—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事油气田开发方面的研究工作。地址:四川省成都市高新区吉泰路688号,邮政编码:610041。E-mail: liuchengchuan.xnyq@sinopec.com

通信作者简介:王勇飞(1980—),男,硕士,副研究员,主要从事天然气开发方面的工作。地址:四川省成都市高新区吉泰路688号,邮政编码:610041。E-mail: wangyf1980@126.com

基金项目:国家科技重大专项“川西凹陷斜坡带复杂致密砂岩气藏开发关键技术”(2016ZX05048-004)。

中江气田沙溪庙组气藏位处四川盆地川西坳陷,是以三角洲平原—前缘河道砂沉积为主的致密砂岩气藏。自1995年以来,中国石化西南油气分公司开始了对该气藏的勘探开发攻关实践,但由于气藏具有构造特征复杂,河道数量多(130余条)、单河道宽度窄(300~1 000 m, 90%以上河道宽度小于600 m)、延伸长度长(10~35 km),砂岩储层致密(孔隙度为8.66%,渗透率为 $0.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、厚度薄(5~30 m)、非均质性强,河道砂气藏含气性差异大、气水分布复杂、压力系数高(1.4~1.9)等地质特征,该气藏的勘探开发难度比一般的致密砂岩气藏更大,以致前期勘探开发进展十分缓慢。前后历经了3轮勘探,直至2012年随着水平井钻井及分段压裂工艺的进步,气藏评价逐步转变思路,变直井为水平井,同时开展水平井分段压裂试验,单井产量有所提高,才拉开了气田滚动评价及规模开发的序幕,但受窄河道砂预测精度、复杂的气水关系及储层改造工艺技术影响,依旧未能突破效益关^[1]。

中江气田沙溪庙组气藏高效开发面临四大技术难点:一是多期河道砂叠置,砂体厚度较薄,分期次河道刻画及精准预测难度大;二是高产富集规律不明,已有研究认为有利断砂搭配可以构成油气疏导体系^[2-5],但由于中江气田沙溪庙组气藏河道数量多,断裂复杂且与砂体的配置关系多样,寻找高产富集区难度大,增储上产目标不落实;三是河道窄、非均质性强,不同河道及相同河道不同部位之间的含气性、单井产能差异大,如何制定高效一体化开发技

术政策,使气藏储量动用程度和单井产能最大化面临巨大挑战;四是破裂压力高(地层破裂压力梯度大于3.7 MPa/m),储层改造难度大,增产效果差。国内外对于此类气藏无成熟开发技术系列可借鉴,缺乏相应的理论、技术和方法。因此,针对复杂窄河道致密砂岩气藏特点与高效开发技术难点,研究形成了多域多属性地震精细刻画技术,建立了“断砂疏导、差异成藏、构造调整、物性控产”的高产富集模式及立体高效开发技术对策,取得了水平井优快钻井及精细分段压裂改造技术等创新性成果,集成了中江气田沙溪庙组气藏复杂窄河道致密砂岩气藏地质—工程一体化高效开发技术系列(图1),建成了年产气量超 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的气田。

1 气田开发关键技术

1.1 复杂河道砂精细刻画及储层定量预测技术

准确刻画河道的空间展布和精准预测储层是中江气田沙溪庙组气藏高效开发的前提,但河道外形刻画、薄储层识别等都是困扰气藏高效开发的难题。

针对河道刻画及预测主要以目标处理、相带刻画、定量预测等技术攻关为重点,创建一套以“复杂窄河道致密砂岩气藏精细刻画”为典型特色的技术体系,实现了中江气田复杂窄河道的精细刻画。其中,目标处理是以突出含气砂体响应特征为目的,关键技术包含创建高保真目标处理技术流程及研发高分辨率目标处理技术;相带刻画是在高保真、高分辨率处理成果基础上,集成创新形成多域多属性相带

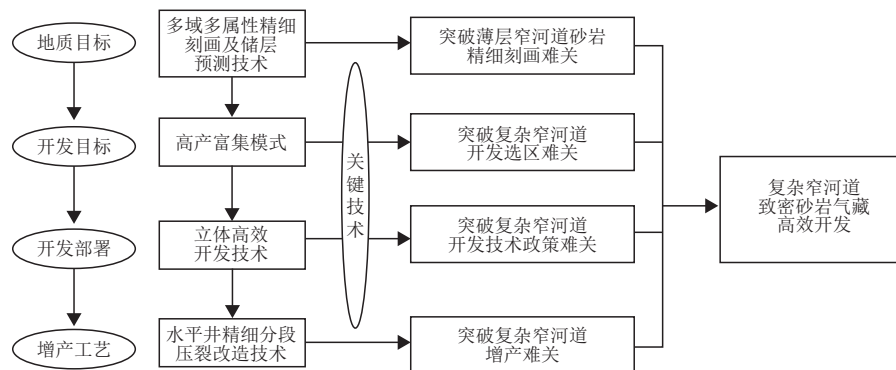


图1 中江气田窄河道致密砂岩气藏高效开发关键技术流程

Fig. 1 Flow chart of key technologies for efficient development of narrow channel tight sandstone gas reservoirs in Zhongjiang Gas Field

空间刻画技术,实现多期河道砂岩空间雕刻与剥离;定量预测主要依托自主研发的三参数叠前反演技术,实现河道砂体厚度、物性的定量预测。

1.1.1 针对岩性气藏高保真目标处理技术

中江气田位处成德绵经济带,人口稠密,属典型的都市型气田,人文地理和地下地质环境条件双复杂,地震采集记录中多种类型干扰波普遍存在,单炮激发能量弱、原始炮集资料记录主频偏低,地震资料品质受到严重影响,导致目标层砂体识别特征不清晰。针对气藏河道砂岩厚度薄、纵向叠置期次多、横向变化快、储层预测多解性强等难题,通过研究在岩性气藏中地震资料高保真处理、宽频成像等影响因素,以保幅为中心贯穿整个处理流程,在保持信噪比的前提下,以突出含气砂体地震响应和保持AVO(振幅随偏移距大小变化)特征为主要目标,优化完善目标处理关键技术,形成了基于波动方程的模型法自适应地滚波衰减技术、分频去噪技术、保持AVO属性的道集拉平技术、角度域反拉伸畸变技术、高密度Q体补偿技术、基于小波变换的Q体剩余补偿技术等特色技术,创建了河道砂岩气藏地震资料目标处理关键技术及实施流程。处理结果整体信噪比高,分辨率较高,保真度高,含气砂体(组)地震响应特征更为清晰(图2),实现了中江气田沙溪庙组地震资料高品质处理,为河道砂岩的边界识别、分期次刻画及储层定量预测等夯实了资料基础^[4]。

1.1.2 基于谐波准则恢复弱勢信号的高分辨率处理技术

在提高叠后成果资料纵向分辨率处理技术方面,研究认为基于谐波准则恢复弱勢信号(BBI)的高

分辨率处理技术能有效提高地震资料的纵向分辨率,可较好地应用于中江气田沙溪庙组气藏叠置河道砂纵向期次刻画中。该技术主要是利用小波变换和谐波准则实现对信号缺失频率成分的补偿,从而达到提高地震记录分辨率的目的。BBI技术可以在大幅提高分辨率的同时保证资料的可靠性,具有不依赖原资料信噪比的特点,完全能够处理低信噪比的资料,处理的结果只与资料有效频带的信噪比相关。

从原始剖面与反Q滤波、BBI处理振幅谱、成果剖面对比(图3、图4)可以看出:BBI处理结果低频信息得到较好保留,高频信息提高效果最为显著,地震剖面上纵向分辨率得到较大提高,复合波很明显地区分开,层间出现多个能量相对保持均衡的同相轴,同相轴空间展布信息更加丰富,很多小地层反射被分辨出来;整个剖面的能量保持均衡,没有出现局部强能量;波组特征保持较好,剖面中连续层位保持不变;地震频带拓宽30 Hz,主频提高15 Hz,实现了提升纵横向识别能力的重要突破,识别河道砂体厚度下限为8 m,同时为多期次叠置河道分期次刻画打下坚实基础。

1.1.3 多域多属性相带空间刻画技术

该技术主要包涵两个方面的研究,一是河道外形及内幕的刻画,二是多期叠置河道分期剥离。

在河道外形及内幕的刻画中关键技术主要有时频域频变能量融合及分频反演融合2种技术。时频域频变能量融合技术主要集成了像素去噪及加强、小波子体分频、频变能量融合表征等多项技术;像素去噪及加强技术是利用三维像素处理功能,针对叠

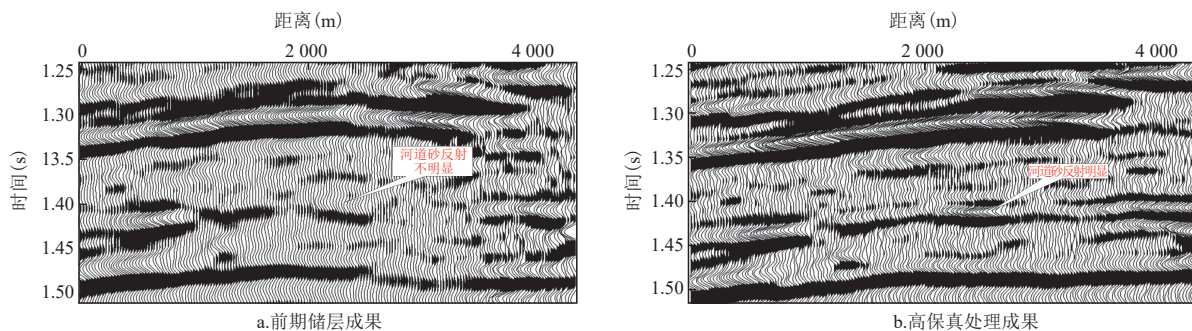


图2 中江气田地震资料处理成果剖面对比

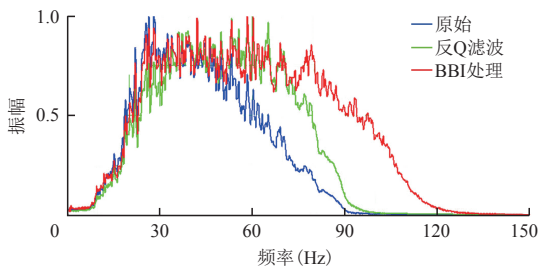
Fig. 2 Section comparison by seismic data processing results in Zhongjiang Gas Field

后资料中存在的系统噪声和随机噪声,通过各向异性滤波技术进行有效消除,从而达到提高地震资料信噪比,突出河道砂边界有效地震反射特征的目的,便于窄河道砂精准识别与刻画;小波子体分频以及频变能量融合技术是利用小波变换,把地震反射各频率对应的调谐能量识别出来,形成对应频率能量异常体,赋予每一单频体一种颜色,单频体内不同采样点处依据能量差异赋予此点同种颜色、不同亮度和饱和度,最后将各单频体同一点处不同颜色的亮度和强度按照 RGB 混合方式得到对应的颜色值,融合形成属性体,可较好地刻画河道外形及边界,河道砂体宽度可识别最窄下限达 50 m。分频反演融合技术主要是在小波分频体基础上开展分频多属性反演,并将不同频率体多属性反演体进行融合,可细致反映河道内幕相带变化,一般情况下河道内融合体亮点区域往往发育物性较好或厚度较大的砂体,开

发建产效果明显好于亮度较低区域。

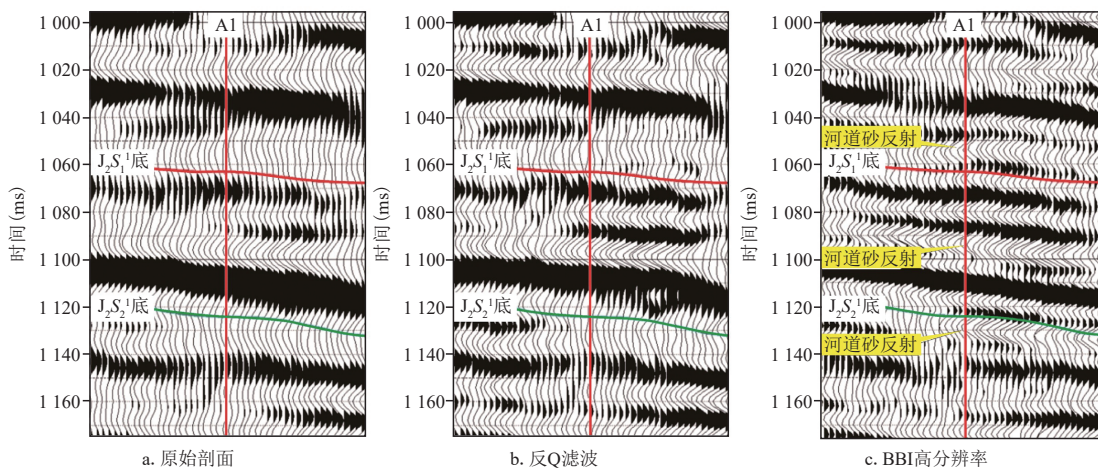
在叠置河道分期剥离方面,受地震分辨率影响,相邻很近的多期次叠置河道砂在地震反射中多表现为同一复合相位或单相位特征。利用不同河道埋深、走向、岩石骨架、厚度、物性等特征差异对于地震反射时间构造、振幅能量以及频率的影响,基于高分辨率处理成果,采用三维可视化子体追踪技术、时频域频变能量融合技术联合,开展同一相位内叠置河道期次识别与划分。在中江气田叠置河道砂岩期次刻画中,可实现在同一复合相位内 3~4 期河道刻画与期次区分^[6]。

图 5 为中江气田沙溪庙组 JS₂¹ 砂组多期河道砂在地震剖面及平面上的展布形态结果,河道叠置关系复杂,地震剖面上河道砂响应时窗在一个或复合相位内(图 5a),早晚期次、叠置关系均复杂不清,亟需理清不同期次的河道的展布形态。首先,针对河道砂体开展时频域分频频变能量融合,确定了 4 条主要河道砂体平面展布特征(图 5b);其次,利用三维子体刻画技术针对时频域刻画的每一条河道砂体开展子体追踪,并利用不同的颜色进行区分(图 5c),实现了多期次交叉叠置的①、②、③、④号河道在空间上剥离;不同期次河道砂体在时间构造上的分布位置特征能揭示其沉积期次,晚期沉积的河道砂体时间埋深最浅,图 5d 可以看出①号河道埋深最浅,其次为②、④号河道,③号河道埋深相对较深。利用空间展布特征、单河道砂子体刻画、纵向相对高低位置刻画



注: BBI 为基于谐波准则恢复弱势信号。

图 3 原始与反 Q 滤波、BBI 处理振幅谱对比
Fig. 3 Comparison of amplitude spectra of original section with inverse q filtering and BBI processing



注: BBI 为基于谐波准则恢复弱势信号。

图 4 原始地震剖面与反 Q 滤波、BBI 处理地震剖面对比
Fig. 4 Comparison of original seismic section with inverse Q filtering and BBI processing seismic section

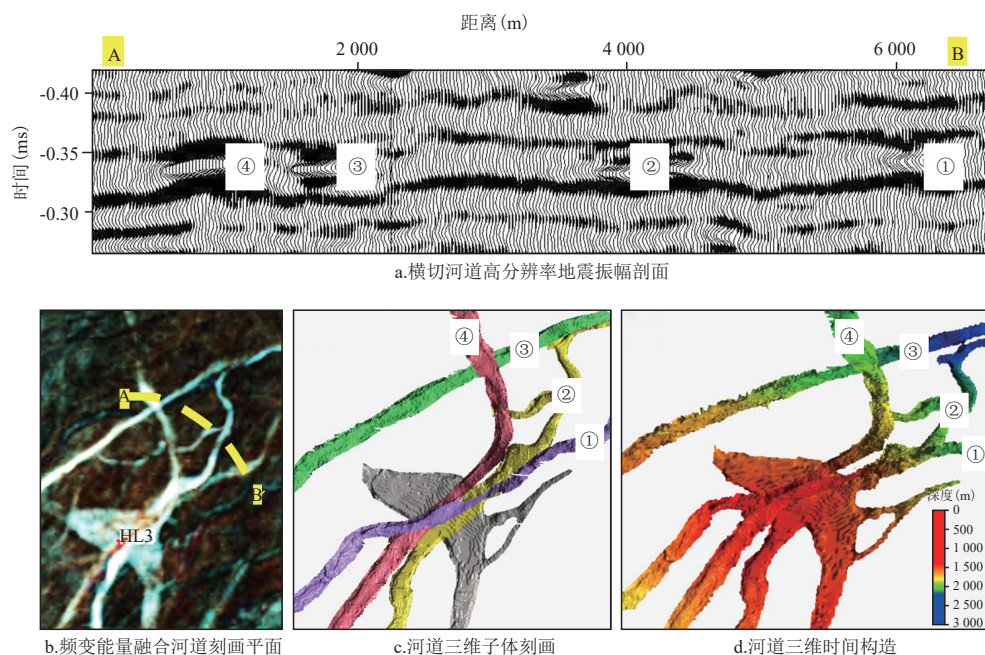


图5 中江气田 JS_2^1 多期叠置河道分期剥离效果

Fig. 5 Staged stripping of JS_2^1 multiple overlapping rivers channel in Zhongjiang Gas Field

结合高分辨率剖面解释,多期相互交叉叠置的河道砂体,其相对发育期次、叠置关系以及空间展布特征刻画效果较好,沉积时间顺序亦非常清晰,4条河道按编号序次发育。

1.1.4 河道砂高精度定量预测技术

现有的叠前反演技术主要是通过分析地震振幅随着偏移距大小变化的信息反推地下岩层的弹性信息。在实际工作中,一般都是先将偏移距域的道集数据转换到角度域中,然后根据 Zoeppritz 方程进行振幅信息反演计算。但是 Zoeppritz 方程在角度域反演计算过程中,因上覆地层速度信息求取误差较大以及地震反射系数与岩性参数绝对值无关^[7],造成反演的多解性,在实际应用中需要通过其他的约束条件才能得到岩层弹性参数的绝对值信息。

针对 Zoeppritz 方程反演计算存在的问题,提出并研发了叠前反演的另一种思路:将地震道集数据从偏移距域转换到射线参数域中进行反演。通过射线参数,速度信息可从反射轴中提取,可有效避免因求取上覆地层速度信息误差大导致反演计算带来的偏差。此外,将射线参数引入到 Zoeppritz 方程中,新增了纵波速度参量,使得反演计算自变量参数从之

前的4个增加至5个,因此,速度参量的绝对值信息可被较为准确地求取出来,在反演计算过程中无须条件约束即可对速度信息进行求取,从而减小了反演的多解性,提高反演结果的精确性。

从中江气田高庙地区 JS_3^{3-2} 基于叠前弹性参数反演方法的孔隙度预测和储层厚度(图6)中可以看出,河道特征清晰,河道砂体厚度较大、物性较好的部位主要位于中心部位,河道内部储层存在非均质性,与钻井情况吻合,这些反演结果能够反映储层的真实特征,定量预测成果有效应用于中江气田的高效开发,厚度、孔隙度误差率均小于10%。

1.2 河道砂高产富集规律与模式

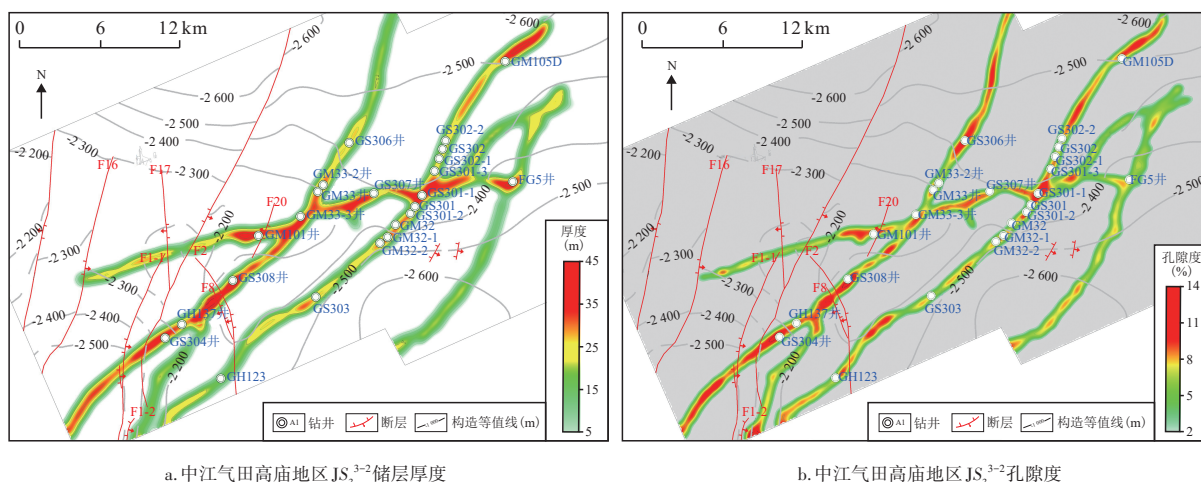
1.2.1 河道砂高产富集要素及规律

勘探开发实践揭示中江气田沙溪庙组气藏不仅受古今构造控制,成藏富集与断层演化、砂体的配置关系密切,而且储层的储集性能对气藏的高产、稳产也起着决定性作用。为此,基于对中江气田获产层系、高产河道以及高产井单井解剖,逐一分析构造条件、断砂配置关系、相带展布、储层物性、含气性等因素对单井产能及油气富集的影响^[8-12]。

1) 断层既是成藏的基础,又是散失的通道。勘探开发实践及研究证实,富集层系河道砂与断层距离近才可能成藏,同时断层与河道砂的配置方式必须是有效的,即在成藏期砂体下倾方向与断层相接,呈现“V”形,有利于砂体俘获天然气并有效保存成藏。断层在气藏后期调整过程中又是失散的通道,近断层部位易产水(图7)。

2) 古构造高是油气富集的前提。前期勘探研究证实为深源浅聚、断砂疏导的次生气藏^[13],天然气在成藏期通过断层向河道砂高部位运移富集。总体表现为当古构造高,今构造高,物性好,河道砂富集成藏;当古构造低,今构造高,物性好,河道砂不成藏。

3) 储层物性高低及厚度大小是气井高产、稳产



a. 中江气田高庙地区JS₃³⁻²储层厚度

b. 中江气田高庙地区JS₃³⁻²孔隙度

图6 中江气田高庙地区JS₃³⁻²储层厚度和孔隙度平面

Fig. 6 Thickness and porosity of JS₃³⁻² reservoir in Gaomiao area of Zhongjiang Gas Field

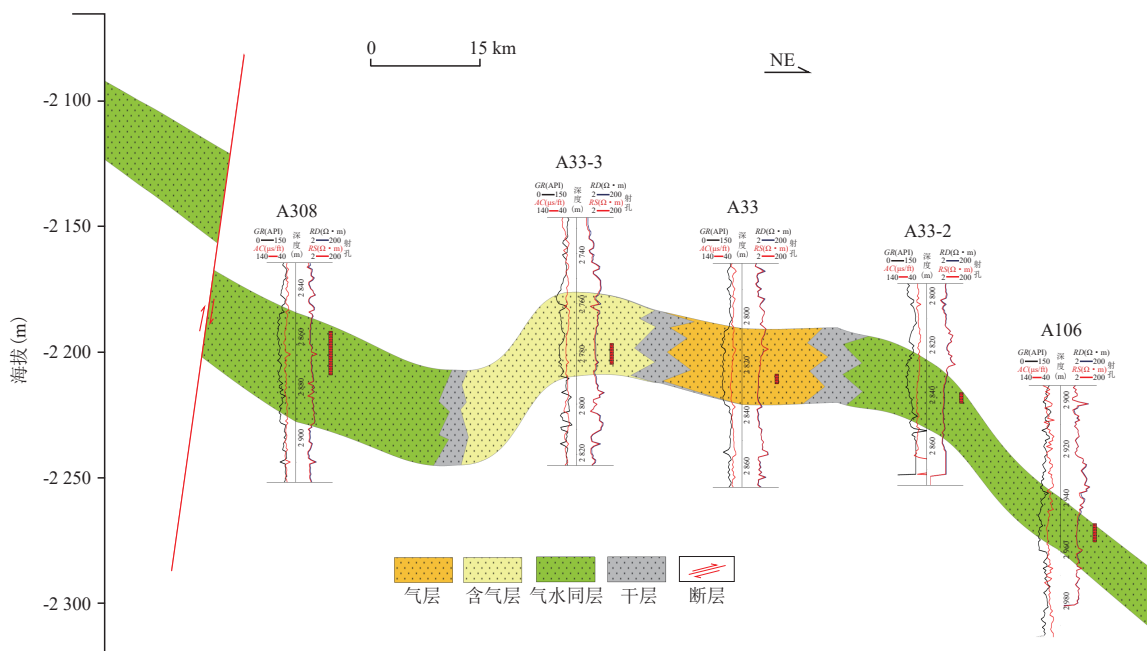


图7 中江气田JS₃³⁻²气藏2号河道气藏剖面

Fig. 7 Profile of Channel 2 of JS₃³⁻² gas reservoir in Zhongjiang Gas Field

的关键^[14]。中江气田沙溪庙组气藏整体属致密气藏,储层物性偏差且非均质性极强,有效厚度变化大,同时河道宽度窄,单井控制储量受河道相带边界影响很大。因此,在满足其他成藏的条件下整体表现出:储层物性相对越好,尤其是储层的渗透性越高,气井产能越高;优质储层越发育、厚度越大,单井控制储量相对越大,气井稳产效果越好。

4) 物性封堵是非正向构造带油气富集的核心。河道砂储层在古构造相对高部位成藏后,其后期持续差异压实和成岩作用造成河道内砂岩储层具强烈的非均质性,在同一河道砂内可形成多段有效的物性封堵,随着喜山期的构造运动调整及改造作用,使得近断裂带部位整体抬升以及局部出现微幅构造。一是近断层处封堵性差且裂缝发育,对于未形成有效物性封堵的河道砂即使其古今构造均处于构造高部位,天然气经断层散失未能有效富集;二是局部构造呈现古、今构造反差,对于封堵条件好的河道,构造低部位天然气得以有效保存,造成气水在河道砂内呈现“香肠式”的分布特征。

1.2.2 高产富集模式

基于气藏古今构造、有效断砂配置、河道砂优质储层展布等要素与产能的相关性,明确了气藏有效烃源岩断层和河道砂有效配置是获产的基础,优势的古构造是获产的前提,优质储层的发育程度是气井高产的关键,有效物性封堵是油气富集的核心^[15-16],即“断、砂、构、储”高产富集四控因素,并形成了8种“断、砂、构、储”配置模式。其中,高产富集模式有2种:①构造主控模式,烃源岩断层与河道砂有效搭配,古今构造位置均高,储层物性好;②物性主控模式:烃源岩断层

与河道砂有效搭配,古构造高,今构造低,河道内有效的物性封堵与优质储层相互间隔。

1.3 强非均质性窄河道致密砂岩气藏立体高效开发技术

1.3.1 多层系立体部署模式

中江气田沙溪庙组气藏多以单条河道砂发育为主,河道砂储层具“宽度窄、厚度薄、叠置多、非均质型强”的特征,气藏难以利用规则井网进行开发。同时气田主要位于川西经济发达城市群周边,土地资源紧缺,井场的高效利用尤为重要。考虑到不同气层、河道间及河道内部非均质性强,物性差异大的特点,采用沿河道砂体方向以不规则井网进行部署,通过在砂体发育、储层厚度大、物性条件好的地方布井,并根据地面条件及河道砂体特征对井网进行优化调整,针对性地提出了地面地下一体化的“一场多井、一井多层”立体部署思路,实现了评价快速化,储量动用最大化,成本最小化。

1.3.2 受物性约束的井型优选标准

近年来,水平井技术的发展极大地推动了致密气藏的效益开发。根据川西地区致密气藏开发实践,有针对性地提出了实施直井(斜井)和水平井的物性初步标准,即渗透率为 $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时采用水平井开发效果最好(表1),并应用于中江气田井型的选择。当储层物性较差时(渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),整体以水平井为主;物性较好时,整体以直井(定向井)为主。

表1 川西不同渗透率砂岩储层井型优选

Table 1 Optimization of well pattern for sandstone reservoirs with different permeability in western Sichuan

渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	直井/水平井对比	推荐井型
> 5.0	水平井开发效益不明显	直井
1.0~5.0	水平井开发有一定增产效果,但经济效益仍不如直井	直井
0.5~1.0	直井开发可达经济下限标准,水平井开发效益相对较好	水平井
0.1~0.5	直井开发产量偏低,水平井增产效果最佳	水平井
0.05~0.10	直井开发无效益,水平井开发经济效益差	水平井
< 0.05	直井、水平井开发均无效益	

1.3.3 窄河道水平井优化设计技术

水平井开发是低渗致密砂岩气藏开发的重要技术手段^[15]。根据窄河道地质特征,在河道精细刻画的基础上,通过数值模拟技术,以实现井控储量最大化、经济效益最优化为目标,对水平井位置、水平段方位、水平段长度进行了优化研究^[17-19]。

中江气田沙溪庙组气藏储层类型复杂,含气性差异大,即使同一储层类型、不同河道间气井的开发动态差异性也较大。以储层品质为主评价因子,结合河道宽度、储层厚度以及动态指标对中江气田沙溪庙组气藏的河道类型综合划分为宽厚低渗型、薄窄/致密型、高含水致密型3种类型的6类典型河道,如表2所示。

中江沙溪庙组气藏河道宽度有限,地质、地球物理预测、实钻以及数模预测结果均表明优质储层一般分布在河道中部,河道中部物性明显优于河道边部,水平井开发效果明显比边部好,且水平段越偏离河道中部,其采出程度越低。因此,水平井轨迹应沿河道方向于河道中心部位穿行。当地面条件限制时,水平井也应当尽量部署在距河道中心50~100 m范围内。

水平段长度是影响水平井单井控制储量、气井产量、采收率等技术经济指标的主要因素。通常水平段越长,水平井筒与储层有效接触面积越大,气井产能和产量也相应越大。但水平段长度与产量并非呈线性关系,而是随水平段长度的增加,产量增长幅度逐渐变小,并且增加水平段长度,也将增大钻完井作业的风险。因此,需要针对窄河道气藏特殊的地

质特征,考虑目前钻井工艺技术水平及水平井开发的经济效益,对不同类型河道中水平段的长度进行综合优化。

从图8—图10中可以看出该区水平井产能与水平段长度呈正相关性,水平井越长,气井产能越高,但百米产能逐渐下降。当水平段长度达到900~1 100 m范围,水平井产能增幅变缓,水平段百米产能多降至 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下,说明水平段过长并不利于增大水平井的生产能力。不同河道水平段的合理长度存在一定差别,其中I-A类河道水平段合理长度为900~1 000 m, I-B类河道水平段合理长度为1 000~1 100 m, II-A类河道水平段合理长度则在1 100~1 200 m。上述结果说明水平段长度与河道物性密切相关,河道宽、物性好,建产所需的水平段长度越短,而宽度窄、物性差的河道需要通过增加水平井长度来提高单井产量^[20]。

1.4 地质工程一体化压裂改造技术

中江气田沙溪庙组气藏河道砂展布窄、薄,储层品质差、非均质性强、含气性差异大,且地层易出砂,堵塞流体流动通道,储层压裂改造易受伤害,储层改造提产效果难以得到保障^[21]。因此,首先基于河道宽度、储层厚度及非均质性,建立了压裂三维地质模型,通过压力波传播模拟划分独立渗流单元,在渗流单元内以施工压力最低设置裂缝位置,以有效储层充分控制且产量最优为目标进行裂缝形态及间距优化,形成了基于三维地质模型全覆盖下非均质储层水平井压裂精细分段布缝优化设计技术;其次,采用一把钥匙开一把锁的设计思路,自主研发了基于机

表2 中江气田沙溪庙组气藏主力河道类型划分标准

Table 2 Standard of main channel type of gas reservoir in Shaximiao Formation of Zhongjiang Gas Field

河道类型	储层类型	河道宽度(m)		有效厚度(m)		有效渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)		
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	
宽厚低渗型	I-A类	I	450~1 000	600	20.0~35.0	26.5	0.20~1.25	0.52
	I-B类	I	300~600	400	17.0~26.0	20.2	0.10~1.01	0.41
薄窄/致密型	II-A类	II	250~530	360	11.0~34.0	23.5	0.02~0.31	0.15
	II-B类	I	220~300	240	8.0~19.6	12.8	0.07~0.65	0.36
高含水致密型	III-A类	II、III			9.3~19.5	14.0	0.03~0.10	0.07
	III-B类	II、III					<0.1	

械编码设计思想的无限级压裂滑套,通过研制配套全通径封隔器、纳米可溶压裂球等工具,形成了水平井无限级压裂管柱,突破了常规投球滑套压裂管柱分段数受限的瓶颈(井下已实现30级分段能力),为水平井实现多级多缝分段压裂提供基础支撑;再次,

是针对常规连续性加砂有效缝长短、稳产能力差的问题,以提高支撑裂缝有效性为目标,形成“脉冲加砂、纤维固砂”为核心的脉冲式柱塞加砂压裂技术,工艺技术现场应用230余井次,有效缝长/支撑缝长由30%提高至50%,支撑剂用量较常规压裂井减少

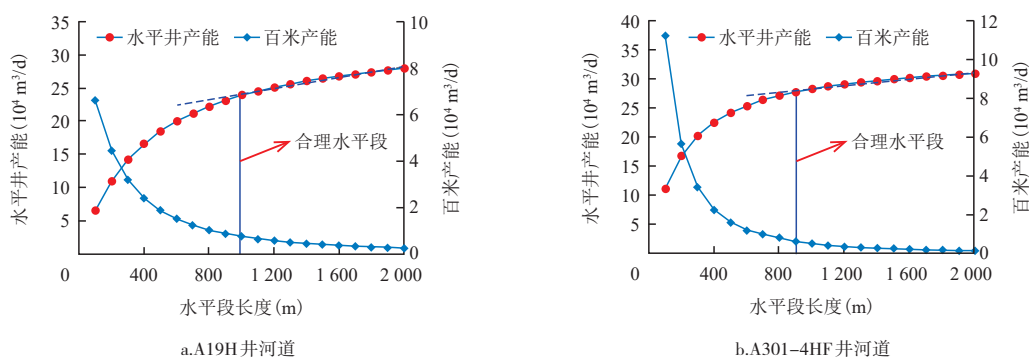


图8 中江气田沙溪庙组气藏I-A类河道水平井长度与产能关系

Fig. 8 Length versus productivity curves of horizontal well with channel types I-A of gas reservoir in Shaximiao Formation, Zhongjiang Gas Field

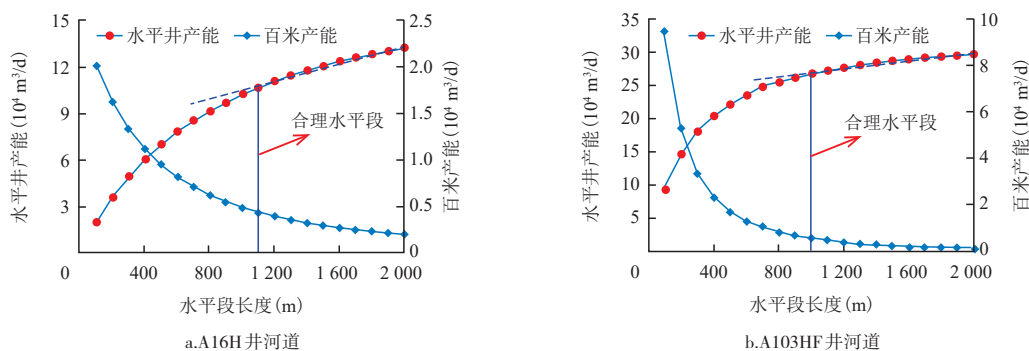


图9 中江气田沙溪庙组气藏I-B类河道水平井长度与产能关系

Fig. 9 Length versus productivity curves of horizontal well with channel types I-B of gas reservoir in Shaximiao Formation, Zhongjiang Gas Field

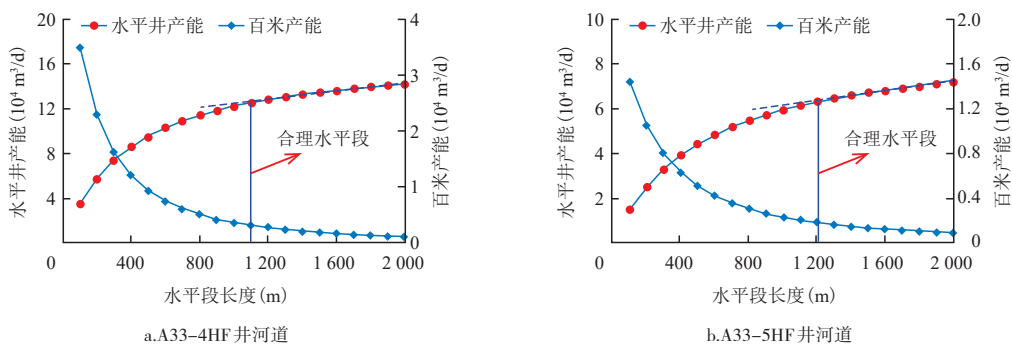


图10 中江气田沙溪庙组气藏II-A类河道水平井长度与产能关系

Fig. 10 Length versus productivity curves of horizontal well with channel types II-A of gas reservoir in Shaximiao Formation, Zhongjiang Gas Field

21%,应用效果明显;最后,以实现快速返排及低伤害为目标,基于压裂液伤害量化评价结果,研制了低毛管力压裂液,配套侵入带深度压裂工艺、高效返排工艺,形成了考虑动态滤失的水平井分段压裂高效返排工艺技术,技术应用后,压裂液返排率较以前提高35%,降低了储层伤害,确保了改造效果(图11)。

一体化压裂改造技术,增产效果显著,平均单井测试产量稳步提升,改造效果提高至实施前的10.6倍,成为气藏高效开发的主体保障技术^[22-23]。

2 应用效果

在深化地质研究与认识的基础上,将形成的开发关键技术直接运用于中江气田的高效开发。形成的复杂窄河道砂地球物理综合预测技术,砂体钻遇率95%以上,储层预测符合率达90%以上,实施效果好;建立的复杂窄河道高产富集模式、形成的高效开发技术政策及地质工程一体化压裂改造技术,有力地指导了气藏滚动评价与产能建设。“十三五”期间实施滚动勘探和气藏评价井30口,落实商业开发储量 $350 \times 10^8 \text{ m}^3$,增储效果显著;实施产能建设井

120口,新增动用储量 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$,高效建成了11层32条高产河道,累计新建产能 $13.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,新增经济可采储量 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2020年中江气田年产气超 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$,建成了中国石化川西第一大气田,效益显著。

3 结论

1) 通过创建高保真目标处理技术流程,研发BBI高分辨率处理技术,集成多域多属性相带空间刻画、基于射线参数域的改进三参数叠前反演等技术对薄、窄、多期、交叉叠置的河道砂体空间展布特征刻画效果较好,实现了中江气田复杂窄河道砂的精细刻画。

2) 通过对川西中江地区烃源岩、构造、断裂系统、断砂配置、储层等天然气高产富集主控因素分析,建立了致密河道砂岩气藏8种“断、砂、构、储”的配置关系,结合开发实践提出了2种高产富集模式:一是构造主控富集模式,二是物性主控富集模式,有力地指导了气田的评价及开发部署。

3) 基于储层及开发特征,划分河道类型并制定差异化开发技术政策,采用井组立体部署技术、井型

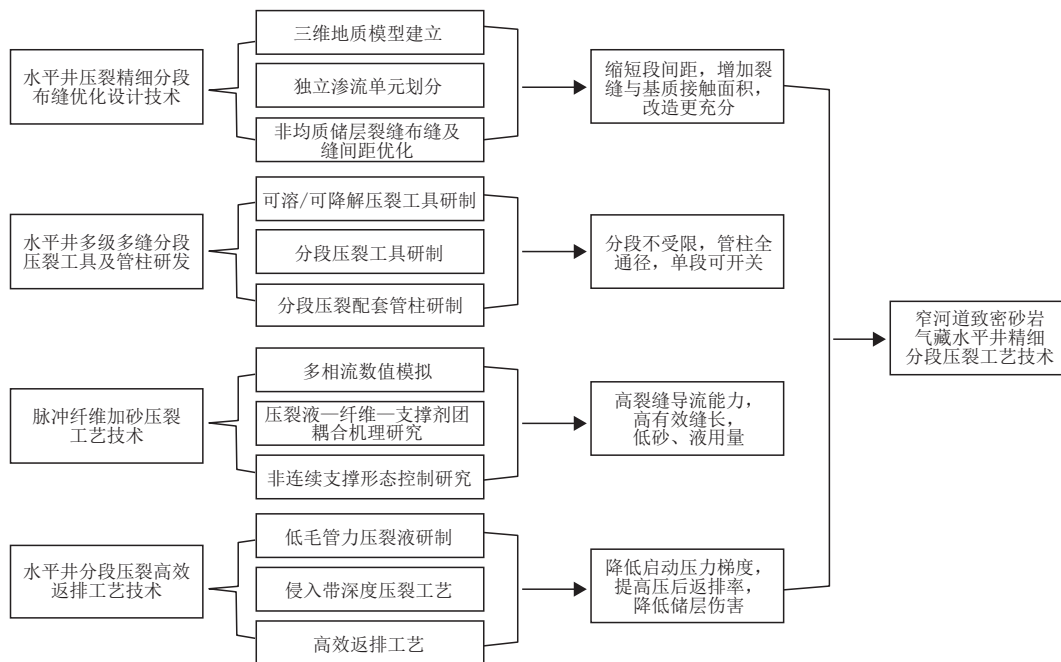


图11 中江气田水平井压裂改造技术流程

Fig. 11 Flow chart of fracturing technology for horizontal wells in Zhongjiang Gas Field

优选技术及水平井优化设计技术,实现了气田评价建产快速化,储量动用最大化,成本最小化。

4) 以“立体精细布缝优化设计控制河道砂体,脉冲纤维加砂压裂工艺技术提高裂缝导流能力,无级压裂滑套提高分段能力,分段压裂高效返排工艺降低储层伤害”为关键的水平井精细分段压裂工艺技术,提高了气井增产效果,成为气藏高效开发的主体技术保障。

参考文献

- [1] 武恒志,叶泰然,王志章,等.复杂致密河道砂岩气藏开发精细描述技术[M].北京:中国石化出版社,2018.
WU Hengzhi, YE Tairan, WANG Zhizhang, et al. Fine description technology for development of complex tight channel sandstone gas reservoirs[M]. Beijing: Sinopec Publishing House, 2018.
- [2] 武卫峰.不同类型断-砂输导体系分布及对油气成藏的贡献[J].大庆石油地质与开发,2019,38(3):40-45.
WU Weifeng. Distributions of different-type fault-sand transporting systems and their contributions to the hydrocarbon accumulation[J]. Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(3): 40-45.
- [3] 孙建军.不同类型断-砂配置输导的油气特征及成藏控制作用[J].东北石油大学学报,2013,37(1):57-63.
SUN Jianjun. Hydrocarbon migration characteristics and reservoir-forming control of different fault-sand configurations [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(1): 57-63.
- [4] 段永明,曾焱,刘成川,等.窄河道致密砂岩气藏高效开发技术——以川西地区中江气田中侏罗统沙溪庙组气藏为例[J].天然气工业,2020,40(5):58-65.
DUAN Yongming, ZENG Yan, LIU Chengchuan, et al. Technologies for the efficient development of tight sandstone gas reservoirs in narrow channels: A case study of Middle Jurassic Shaximiao Formation gas reservoir in the Zhongjiang Gas Field of western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5): 58-65.
- [5] 姜振海.不同方向运移油气在断裂附近聚集特征的差异性[J].大庆石油地质与开发,2017,36(5):1-7.
JIANG Zhenhai. Differences of the oil-gas accumulation characteristics near the fault from different directions[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(5): 1-7.
- [6] 武恒志,叶泰然,赵迪,等.川西拗陷陆相致密气藏河道砂岩储层精细刻画技术及其应用[J].石油与天然气地质,2015,36(2):230-239.
WU Hengzhi, YE Tairan, ZHAO Di, et al. Fine characterization technique and its application to channel sandstone in continental tight gas reservoirs of western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 230-239.
- [7] 赵迪.中江气田沙溪庙组河道砂岩储层定量预测[J].物探技术,2017,39(5):657-662.
ZHAO Di. Quantitative prediction of channel sandstone reservoir in Shaximiao formation of Zhongjiang Gas Field[J]. Computing Techniques For Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 39(5): 657-662.
- [8] 曾焱,黎华继,周文雅,等.川西拗陷东坡中江气田沙溪庙组复杂“窄”河道致密砂岩气藏高产富集规律[J].天然气勘探与开发,2017,40(4):1-8.
ZEN Yan, LI Huaji, ZHOU Wenya, et al. High-yield enrichment laws of Shaximiao Formation tight sandstone gas reservoir of complex "narrow" channel in Zhongjiang Gas Field, in the eastern slope of West Sichuan Depression[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(4): 1-8.
- [9] 黎华继,周文雅,代平,等.川西拗陷致密河道砂岩气藏类型及其高产富集模式[J].天然气勘探与开发,2018,41(2):7-14.
LI Huaji, ZHOU Wenya, DAI Ping, et al. Types, and high-yield and enrichment modes of tight channel sandstone gas reservoirs, Western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018, 41(2): 7-14.
- [10] 赵爽,张小菊,高倩,等.川西中浅层高效成藏模式研究[J].矿物岩石,2017,37(2):91-101.
ZHAO Shuang, ZHANG Xiaoju, GAO Qian, et al. Research on the high efficient reservoir-forming pattern for the shallow layer in the Western Sichuan[J]. Mineralogy and Petrology, 2017, 37(2): 91-101.
- [11] 吴世祥,江泽成,张林.川西侏罗系成藏主控因素及分类[J].天然气工业,2001,21(4):20-23.
WU Shixiang, JIANG Zecheng, ZHANG Lin. Main controlling factors and classification of Jurassic Reservoir formation in Kawanishi[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(4): 20-23.
- [12] 李智武,刘树根,林杰,等.川西拗陷构造格局及其成因机制[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6):645-653.
LI Zhiwu, LIU Shugen, LIN Jie, et al. Structural configuration and its genetic mechanism of the West Sichuan depression in China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 645-653.
- [13] CAI K, LI M. Research on the exploration target of shaximiao formation in the south of west Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(10): 1-5.
- [14] CHEN D X, PANG X Q, YAN Q X. Geochemical and stable carbon isotope composition variations of natural gases in tight sandstones from the West Sichuan Basin, China[J]. Geological Journal, 2017, 52(6): 1020-1031.
- [15] 任山,杨永华,刘林,等.川西低渗致密气藏水平井开发实践与认识[J].钻采工艺,2009,32(3):50-53.
REN Shan, YANG Yonghua, LIU Lin, et al. Development practice and knowledge of horizontal wells in low permeability and compact gas reservoirs in western Sichuan[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(3): 50-53.
- [16] 刘明洁,季永承,刘震,等.牛庄洼陷砂岩透镜体成藏关键因素与富集条件研究[J].特种油气藏,2020,27(1):40-46.
LIU Mingjie, JI Yongcheng, LIU Zhen, et al. Key hydrocarbon accumulation factors and enrichment conditions of the