

川西坳陷东斜坡致密砂岩气藏储层精细评价

严焕榕, 黎华继, 詹泽东, 冯英, 殷越, 王启颖

中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都
Email: rongrong_y@126.com

收稿日期: 2021年2月4日; 录用日期: 2021年3月23日; 发布日期: 2021年3月31日

摘要

川西坳陷东斜坡沙溪庙组气藏为致密砂岩气藏, 河道条数多, 宽度小, 纵向上发育多期河道, 砂体厚度薄, 储层致密且非均质性强, 泛泛的粗线条储层评价难以指导气藏高效开发部署。为此, 以小层精细划分为基础, 应用沉积微相研究、砂体构型精细刻画、成岩相定量刻画成果, 同时考虑储层物性、孔隙结构等参数, 开展储层精细评价, 落实有利储层展布区。研究结果表明: 1) 该区为浅水三角洲沉积, 发育分流河道、河口坝、天然堤等, 其中稳定型低弯度河道砂储集性能较好; 2) 储层可分为I~III类3类, I类+II类储层为相对优质储层; 3) 纵向上, JS₁¹、JS₂¹、JS₃¹、JS₃³⁻¹、JS₃³⁻²、JS₃³⁻³等小层是I+II类优质储层发育层段, 平面上主要沿主河道中心呈条带状分布。基于该研究成果开展开发部署和建产, 实现了气藏高效开发。

关键词

川西坳陷, 致密砂岩, 储层精细评价

Detailed Evaluation for Tight Sandstone Gas Reservoir in East Slope of West Sichuan Depression

Huanrong Yan, Huaji Li, Zedong Zhan, Ying Feng, Yue Yin, Qiying Wang

Sinopec Southwest Oil Gas Branch of Exploration and Development Research Institute, Chengdu Sichuan
Email: rongrong_y@126.com

Received: Feb. 4th, 2021; accepted: Mar. 23rd, 2021; published: Mar. 31st, 2021

Abstract

Detailed reservoir evaluation for tight sandstone gas reservoir in east slope of West Sichuan Depression is the key to guide the efficient development of gas reservoirs characterized by narrow channel and multi-stage superimposition, thin sand body, tight reservoir and strong heterogeneity. Based on stratigraphic division, research of sedimentary microfacies, description of sandbody configuration, quantitative characterization of diagenetic facie, reservoir property and pore structure, the favorable reservoir is determined by comprehensive evaluation. The results show that this area is a shallow water delta with distributary channel, mouth bar, natural dike and so on, the stable low curvature channel sand has better performance. Besides, the reservoirs can be divided into three types named I, II and III, I and II are relatively high-quality reservoirs. Lastly, the sub layers named JS₁¹, JS₂¹, JS₃¹, JS₃³⁻¹, JS₃³⁻² and JS₃³⁻³ are the development intervals with more high-quality reservoirs, and are mainly distributed in the center of the main channel. Based on the research results above, the development and production are carried out.

Keywords

West Sichuan Depression, Tight Sandstone, Refined Evaluation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国致密砂岩气藏分布范围广，近年来，致密砂岩气藏开发在油气勘探开发中所占比例越来越大，而储层作为油气成藏基本要素之一，是控制油气分布、气藏储量及气井产能重要因素，因此储层评价工作直接关系到勘探开发目标的选取。

常规的储层评价主要是从影响储层储集性能的要害入手，分析构造演化、沉积环境、成岩作用等因素对储集性能的建设性或者破坏型作用，然后确定不同区域各因素的作用性质，以建设性因素的叠合区作为“甜点”区[1] [2]，该方法多为定性评价，在气藏的勘探阶段意义较大，但由于尺度较粗，在气藏开发阶段的适用性不太理想。

因此，有学者进一步综合考虑储层岩石学特征、孔渗条件、孔隙类型、孔隙结构等，利用灰色系统理论、聚类分析法等对储层进行定量评[3] [4]，该方法虽然实现了储层的量化评价，但表征储层储集性的参数众多，选取何种参数最能反映储层储集性能是一个难题；有学者利用恒速压汞、核磁共振、激光扫描共聚焦显微镜、纳米 CT 扫描等技术对微观孔隙结构进行研究，通过对微观孔隙结构进行分类划分，以此进行储层分类评价[5] [6]，该方法主要基于室内实验分析资料，对于井控程度较差或者缺少相关资料的地区难以推广；也有学者从高精度层序地层学的角度从纵向上细分层，在明确砂体展布的基础上结合实验分析数据对储层进行评价[7] [8]，该方法只考虑了沉积作用对储层的影响，不够全面。由此可见，不同的储层评价方法存在各自的局限性，需要根据研究区块实际情况采用合适的方法。

四川盆地川西坳陷作为典型的致密砂岩含气区，具有广阔的勘探开发前景[9] [10] [11]，其中的东斜坡区沙溪庙组气藏近年来滚动开发取得突破，年产气量超 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，该气藏为三角洲平原-前缘沉积体系，河道条数多(共计 100 多条)，且多期沉积；河道宽度窄(宽 0.25~1.3 km)，平面上砂体呈条带状展布，纵向上叠置程度差。单层砂体厚度薄，变化大，储层致密，且非均质性强，优质储层分布不连续，给气

藏精细描述及定量评价带来极大困难,影响了开发评价及建产目标的选区。

前期针对储层特征研究主要是针对岩石学、物性、微观孔隙结构[12][13][14],而储层分类及有利储层展布研究较少,且尺度较粗,导致气藏开发评价初期有利区选取难度大,优质储层钻遇率也较低[15]。只有进一步开展致密砂岩储层精细分类评价,认清砂体和有利储层展布规律,以满足气藏高效开发和规模建产的需要。

2. 储层基本特征

2.1. 岩石学特征

研究区沙溪庙组储层类型以浅灰色细-中粒岩屑长石砂岩(占比 64.94%)、长石岩屑砂岩(占比 14.8%)为主,其次为岩屑砂岩及岩屑石英砂岩,少量长石砂岩。从矿物组别来看,石英含量较低(平均含量 44.97%),长石含量较高(平均含量 31.02%),岩屑含量低(平均含量 23.59%),整体表现为“富长石、低石英、低岩屑”的特征。颗粒中粒为主,分选好为主,磨圆度主要为次棱角状,胶结类型主要为孔隙式胶结,结构成熟度中等-较低。

2.2. 物性特征

2960 块岩心样品统计分析表明,砂岩孔隙度 0.9%~15.52%,主要集中在 7%~13%,平均孔隙度 8.07%;渗透率 0.001~1910 mD,呈双峰状分布,主峰位分别介于 0.04~0.08 mD 和 0.1~1 mD,平均 1.89 mD,基质渗透率 0.001~3.804 mD,平均 0.2 mD。据统计,含缝岩样占比 0.09%,储层以孔隙性储层为主。

2.3. 孔隙结构

铸体薄片及扫描电镜结果表明,储集空间主要为粒间孔、粒内溶孔。根据主力气层 367 块岩样高压压汞实验结果得知,该区储层平均排驱压力 1.48 MPa,中值压力 17.58 MPa,中值喉道半径 0.01~0.49 μm ,平均 0.07 μm 。由 37 个样品恒速压汞实验得出,该区储层孔隙半径差异不大,多为 100~240 μm (图 1),但喉道半径有较大差异,喉道半径从 0.3~5.5 μm 均有分布(图 2),储层主流喉道半径、孔喉半径比值与渗透率相关性好,相关系数分别为 0.8355、0.7973,可见喉道半径及孔喉半径比值是引起渗透率差异的重要因素。

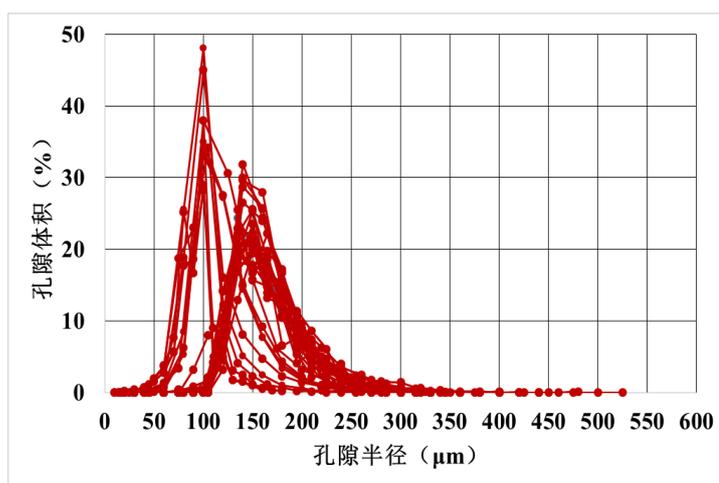


Figure 1. Pore radius distribution of Dongpo JS gas reservoir

图 1. 东坡 JS 气藏储层孔隙半径分布图

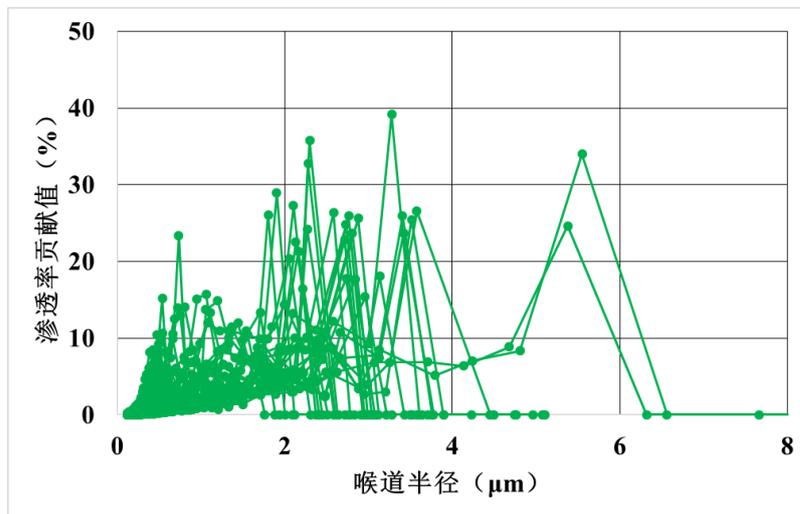


Figure 2. Distribution of main throat radius in Dongpo JS gas reservoir
图 2. 东坡 JS 气藏储层主流喉道半径分布图

2.4. 非均质性

为定量评价储层非均质，选取各取芯井渗透率测定值，分别求取表征砂体渗透率非均质程度的变异系数(Vk)、突进系数(Tk)、级差(Jk)。一般而言，Vk、Tk、Jk 越大，储层非均质性越强，反之，非均质性则越弱。非均质性划分标准见表 1。

由计算结果(表 2)可知，无论是不同小层之间，还是同一层内，亦或是同一层不同河道之间，非均质性强弱不一，储层储集性能存在极大差异。

Table 1. Classification Standard of reservoir heterogeneity[16]

表 1. 储层非均质性划分标准[16]

非均质类型	变异系数 Vk	突进系数 Tk	级差 Jk
均质型	<0.5	<2	<2
较均质型	0.5~0.7	2~3	2~6
不均质型	>0.7	>3	>6

Table 2. Calculation of permeability heterogeneity parameters of JS formation gas reservoir in Dongpo

表 2. 东坡沙溪庙组气藏储层渗透率非均质性参数计算表

	非均质表征参数(岩心)			
	变异系数	突进系数	级差	
不同小层间	1.28	3.93	53	
JS ₃ ³⁻² 层内河道砂	0.54	1.7	6.91	
JS ₃ ³⁻² 层内 不同河道	①号河道	2.57	5.87	234.6
	②号河道	7.31	2.09	76.4
	中江河道	0.13	1.1	1.37

3. 储层精细刻画

前期赵爽等、曾焱等对气藏富集规律和成藏模式进行了研究,认为沙溪庙组气藏有多种天然气富集因素,而在其它天然气高产富集条件相近的情况下,储层储集性能是控制油气富集的重要因素[17] [18] [19]。而研究区储层属于低-特低孔、特低渗储层,非均质性强,泛泛的粗线条储层评价难以指导气藏高效开发部署,只有进一步精细评价刻画,才能更有效找到有利目标。

3.1. 小层精细划分

勘探开发实践证明,沙溪庙组气藏地层厚度平均 800 m 左右,而小层砂体厚度介于 1~39 m 之间,平均 16.2 m,河道砂多期叠置。针对沙溪庙组气藏地层厚、砂体薄、期次多的难题,储层精细评价首先要从纵向上进行细化。

以高分辨层序地层学理论为指导,在下沙溪庙组底部的“关口砂岩”、下沙溪庙组顶部的最大湖泛面等区域标志层的控制下,同时结合局部地区发育的标志层进行等时对比,实现全区统一分层。再结合典型井重点砂组的合成地震记录标定对层位进行追踪,井震结合,实现地震层位的全区闭合,最终建立并完善等时地层格架。

沙溪庙组整体可划分为 2 个长期旋回,对应上、下沙溪庙组 2 个段;3 个中期旋回,其中上沙溪庙组发育 2 个中期旋回,对应 JS₁、JS₂ 气藏,下沙溪庙组发育 1 个中期旋回,对应 JS₃ 气藏。沙溪庙组可划分 11 套砂层组、18 套小层砂体,其中上沙溪庙组从上到下划分为 JS₁¹~JS₁⁴和 JS₂¹~JS₂⁴(JS₂¹划分为 JS₂¹⁻¹、JS₂¹⁻², JS₂⁴划分为 JS₂⁴⁻¹和 JS₂⁴⁻²) 8 套砂组 10 套小层砂体;下沙溪庙组从上到下划分为 JS₃¹~JS₃³(JS₃¹又划分为 JS₃¹⁻¹、JS₃¹⁻², JS₃²划分为 JS₃²⁻¹、JS₃²⁻², JS₃³划分为 JS₃³⁻¹、JS₃³⁻² 早期、JS₃³⁻² 晚期以及 JS₃³⁻³) 3 套砂组 8 套小层砂体。

3.2. 沉积微相刻画

本次研究采用传统的“点-线-面”研究方式,基于区域沉积背景、物源分析,通过岩心观察描述,结合电测曲线形态与韵律特征,完成单井相划分,建立沉积微相岩电识别模板,以此开展沉积微相剖面对比研究,结合地震预测结果,进行各级别砂体沉积微相平面展布精细刻画。

东斜坡区沙溪庙组沉积相为典型的浅水三角洲,物源来自北部米仓山,河道由北东往南西向延伸,局部发育河口坝、决口扇、天然堤等微相,不同层位沉积特征不同。总体来说,JS₃ 下沙溪庙组沉积时期水体相对较深,发育一次水进水退旋回,沉积亚相主要为三角洲内前缘和外前缘;JS₁、JS₂ 上沙溪庙组沉积时期水体相对较浅,发育两个水进水退旋回,三角洲平原与三角洲前缘交替沉积(图 3)。平面上,离物源近的高庙-中江地区,在水退时期处于三角洲平原沉积亚相;而远离物源的南部回龙-福兴地区在整个沙溪庙组沉积时期就一直为三角洲内、外前缘沉积。

3.3. 砂体构型刻画

由于川西拗陷东斜坡面积大,受气候、地形坡降、水动力能量等诸多因素影响,不同沉积环境下砂体形态、空间叠置形式、组合方式不同,导致即使是同一条河道同一沉积微相内的砂体,其储集性能和连通性也存在差异。而传统沉积微相研究不能进行砂体内部单砂体的刻画。因此,采用层次分析法的原理,对河道砂体进行分类别、分级次研究,以等时地层格架为前提,在沉积时间单元划分基础上,进行复合河道的研究,利用泥质、钙质隔夹层、电性突变层等垂向构型界面识别标志,高程差异、厚度差异、侧向叠加等平面界面识别标志进行单砂体刻画,从而建立该区不同类型河道砂体构型模式。

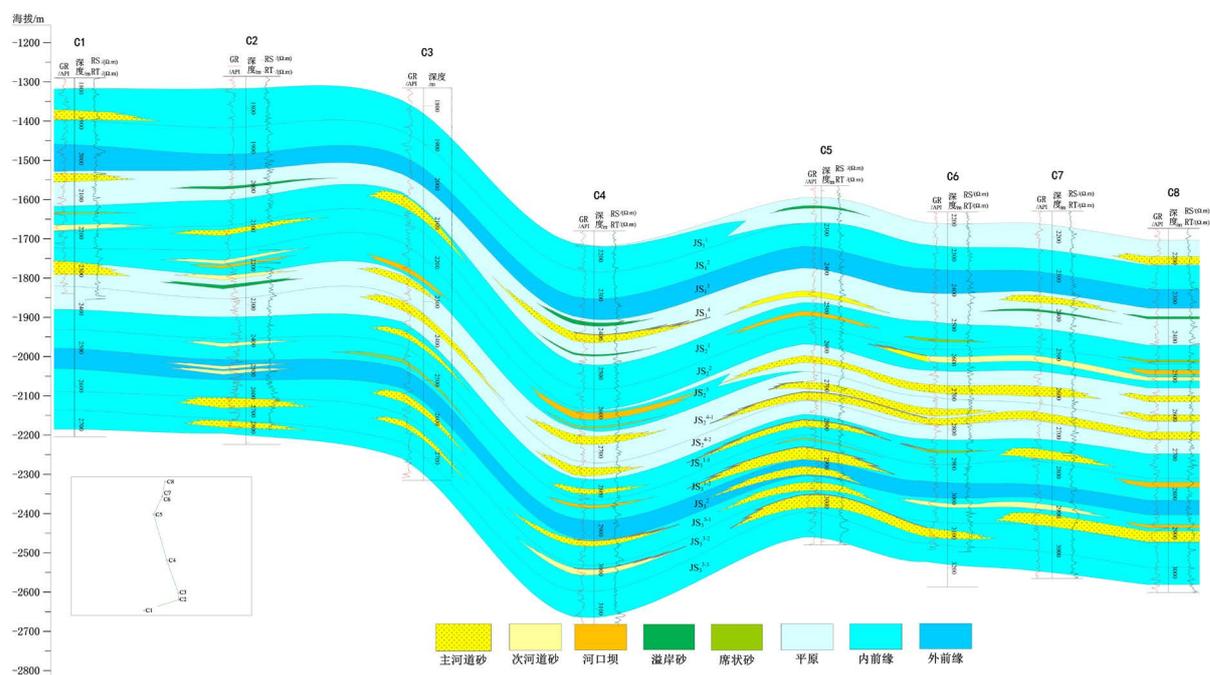


Figure 3. The comparison for sedimentary microfacies profile for JS gas reservoir in Zhongjiang gas field
图 3. 中江气田 JS 气藏沉积微相剖面对比图

研究表明：研究区北部离物源较近上游地区，三角洲平原砂体叠置连片，砂体主要呈宽带状或片状，局部发育孤立的条带状河道砂；远离物源的下游地区，三角洲前缘砂体叠置程度较差，砂体主要呈孤立条带状或窄条带状展布。研究区主要发育曲流河、低弯度分流河道 2 种河道类型，均为分级河道(即主河道与次级河道)，曲流河道内可以分为点坝砂体和废弃河道，低弯度分流河道以发育单期河道为主，内部夹层近似水平分布，可分为稳定型和动荡型低弯度分流河道。

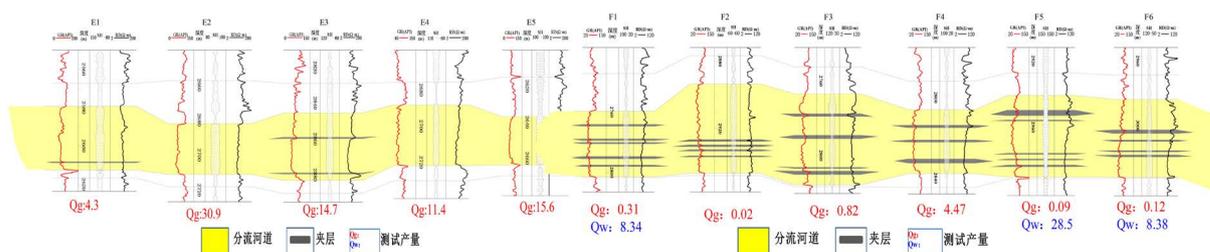


Figure 4. Internal structure analysis of low curvature distributary channel in layer JS_3^{3-2} of JS formation (turbulent on the right and stable on the left)
图 4. 沙溪庙组 JS_3^{3-2} 层低弯度分流河道内部结构分析(右为动荡型，左为稳定型)

将不同砂体构型模式的砂体厚度、物性进行对比，结果表明：稳定型低弯度分流河道砂体厚度大，物性最好，是最有利的砂体构型模式，其次为动荡型低弯度河道(图 4)，曲流河点坝物性最差。产量较高的井多数分布在稳定型低弯度河道中。

3.4. 成岩相刻画

众所周知，影响砂岩储集性能好坏主要有构造演化、沉积环境、成岩作用三方面因素。成岩相作为成岩环境和成岩作用的综合，直接影响储层储集性能和油气富集。因此，成岩相的划分对预测有利储层

及“甜点”分布有重要意义。

基于前述沉积微相及砂体构型研究，通过对成岩环境分析，明确研究区成岩作用条件和控制因素；根据薄片、阴极发光、电子探针、碳氧同位素等分析资料，确定成岩作用、成岩阶段以及成岩序列，进而明确成岩相特征、类型以及分布。而成岩相大多由多种成岩作用综合而成，因此，其分类定名需要根据优势成岩相进行。

采用成岩系数这一定量参数来表征成岩相对砂岩储集性能的影响(表 3)，一般而言，该值越大，表明成岩作用对储集性能起建设性作用，成岩系数 = 100% × 面孔率/(视压实率 + 视交接率 + 视微孔隙率)，其中，视微孔隙率 = 100% × (孔隙度 - 面孔率)/孔隙度。

Table 3. Quantitative parameters of diagenetic facies of JS formation reservoir in Zhongjiang

表 3. 东坡沙溪庙组气藏储层成岩相定量参数表

成岩相	成岩系数	孔隙度%	渗透率 mD	面孔率%	孔隙直径 μm
方解石胶结相	<0.004	3.69~8.63	0.034~0.666	0.2~1	0~80
绿泥石胶结相	0.001~0.063	5.6~10.98	0.047~1.33	0.35~8	20~120
绿泥石胶结长石溶蚀相	>0.02	9.5~13.41	0.104~14.8	4~11.31	40~200

在砂体构型界面约束下，开展成岩相剖面对比。结果表明，绿泥石胶结长石溶蚀相和绿泥石胶结相发育的区域其储层孔径较大，物性较好，钻井产能也相对较高；而方解石胶结相发育的井区，气井产能较低。

3.5. 储层精细分类评价

通过沉积微相精细刻画，落实不同级别砂体展布；利用砂体构型刻画，明确曲流河道、稳定型、动荡型低弯度分流河道三种主要的砂体构型展布；结合成岩相落实不同类型成岩相分布；同时综合考虑储层物性、孔隙结构等因素，建立储层分类评价标准(表 4)，在此基础上，采用逐层递进的方式开展平面上细分区，纵向上细分层的储层分类评价。

Table 4. Reservoir classification and evaluation criteria of JS formation in Zhongjiang area

表 4. 中江地区沙溪庙组储层分类评价标准

分类	沉积微相	砂体构型	成岩相	岩性	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	排驱压力 (MPa)	中值压力 (MPa)	中值半径 (μm)	评价
I 类	三角洲前缘主分流河道	稳定性低弯度河道	绿泥石胶结长石溶蚀相	中-细粒岩屑长石砂岩	>11	>0.4	0.45~2.23	2.0~10.54	0.1~0.42	好储层
II 类	三角洲前缘、平原主分流河道	动荡性低弯度河道、心滩	绿泥石胶结相	中-细粒长石岩屑砂岩	9~11	0.14~0.4	0.72~3.2	6.68~13.03	0.06~0.1	中等储层
III 类	三角洲前缘次分流河道、河口坝、平原主分流河道	动荡性低弯度河道、废弃河道	方解石胶结相	细粒岩屑砂岩	7~9	0.04~0.14	1.2~4.59	12.25~29.4	0.04~0.06	差储层
IV 类	溢岸砂、席状砂等		粘土、方解石胶结相	细粒岩屑砂岩、粉砂岩	<7	<0.04	>4.59	>29.4	<0.04	非储层

在原来 800 m 厚的地层中准确认识到 JS₁¹、JS₂¹、JS₃¹、JS₃³⁻¹、JS₃³⁻²、JS₃³⁻³ 等小层是 I + II 类优质储层发育层段，平面上主要沿主河道中心呈条带状分布。结合断裂、古今构造等综合分析，进一步明确了开发潜力区，在此基础上采用水平井网进行开发；同时储层分类精细评价也大大提高了水平井的钻遇成功率，储层钻遇率近 100%，气层钻遇率达 85% 以上，有效支撑了气藏高效开发。

4 结论

1) 利用小层精细划分、沉积微相及砂体构型精细刻画、成岩相定量评价，结合储层孔渗等宏观特征及孔隙结构等微观特征，用逐层递进的方式，通过平面上细分区，纵向上细分层来对研究区进行储层精细分类评价。

2) 东坡沙溪庙组储层可以划分为 I~III 类 3 类，其中 I + II 类储层是优质储层，明确了 JS₁¹、JS₂¹、JS₃¹、JS₃³⁻¹、JS₃³⁻²、JS₃³⁻³ 等小层是 I + II 类优质储层发育层段，平面上主要沿主河道中心呈条带状分布。

3) 通过该方法明确了研究区优质储层展布规律，与高产富集规律相结合，准确落实了气藏富气区，在此基础上进行开发部署和建产工作，气藏年产气量超 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，实现了气藏高效开发。

基金项目

国家重大专项：川西中浅层致密复杂砂岩气藏富集规律研究及开发目标优选(2016ZX05048-004-001)。

参考文献

- [1] 杨升宇, 张金川, 黄卫东, 等. 吐哈盆地柯柯亚地区致密砂岩气储层“甜点”类型及成因[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 272-282.
- [2] Sakhaee-Pour, A. and Bryant, S.L. (2014) Effect of Pore Structure on the Producibility of Tight-Gas Sandstones. *AAPG Bulletin*, **98**, 663-694. <https://doi.org/10.1306/08011312078>
- [3] 刘吉余, 刘曼玉, 徐浩. 基于聚类分析的低渗透储层评价参数优选研究[J]. 石油地质与工程, 2009, 23(3): 104-108.
- [4] 刘吉余, 彭志春, 郭晓博. 灰色关联分析法在储层评价中的应用——以大庆萨尔图油田北二区为例[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(2): 13-15.
- [5] 董怀民, 孙建孟, 林振洲, 等. 基于 CT 扫描的天然水合物储层微观孔隙结构定量表征及特征分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2018, 42(6): 40-49.
- [6] 崔连训. 恒速压汞及核磁共振在低渗透储层评价中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 430-433.
- [7] 林铁锋, 康德江. 松辽盆地三肇凹陷扶余油层致密储层分类精细评价[J]. 石油实验地质, 2017, 39(5): 686-693.
- [8] 杨玉卿, 崔维平, 冯进, 等. 基于岩性相单元的低孔低渗碎屑岩储层质量精细评价——以珠江口盆地 HZ25-7 构造古近系文昌组为例[J]. 海相油气地质, 2017, 22(3): 85-94.
- [9] 谷江锐, 刘岩. 国外致密砂岩气藏储层研究现状和发展趋势[J]. 石油石化节能, 2009, 25(7): 1-5.
- [10] 王伟东, 彭军, 段冠一, 等. 致密砂岩气藏储层研究的进展及趋势[J]. 油气地球物理, 2012, 10(4): 33-38.
- [11] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 第 2 版. 北京: 地质出版社, 2013: 26-30.
- [12] 卜淘, 曹廷宽. ZJ 气田沙溪庙组储层微观孔隙结构及渗流特征研究[J]. 矿物岩石, 2018, 38(3): 104-112.
- [13] 卜淘. 川西坳陷东坡窄河道致密砂岩气藏储层孔喉特征[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(1): 97-102.
- [14] 蔡李梅, 付菊, 阎丽妮. 川西坳陷中江气田侏罗系沙溪庙组致密砂岩储层特征及主控因素分析[J]. 华南地质与矿产, 2017, 33(4): 383-393.
- [15] 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.
- [16] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [17] 曾焱, 黎华继, 周文雅, 等. 川西坳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.

[18] 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, 30(2): 91-101.

[19] 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): 7-13.