

文章编号: 1000-0747(2017)03-0398-09 DOI: 10.11698/PED.2017.03.09

安岳气田龙王庙组气藏地质特征与开发技术政策

李熙喆¹, 郭振华¹, 万玉金¹, 刘晓华¹, 张满郎¹, 谢武仁¹, 苏云河¹,
胡勇¹, 冯建伟², 杨炳秀³, 马石玉¹, 高树生¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 河北廊坊 065007; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 3. 中国石油勘探与生产分公司, 北京 100007)

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“深层油气藏开发关键技术”(2014E-3203)

摘要: 综合地震、钻井、测井、生产动态等资料, 针对四川盆地安岳气田磨溪区块下寒武统龙王庙组储集层特征与展布、气水分布等影响开发效果的关键地质问题开展研究, 确定开发技术对策。结果表明: ①磨溪区块垂向发育 4 期颗粒滩体, 平面呈现“两滩一沟”格局; ②储集层可分为溶蚀孔洞、溶蚀孔隙和基质孔隙 3 种类型, 有效储集层以溶蚀孔洞和溶蚀孔隙型为主; ③储集层基质物性较差, 受高角度构造缝影响, 整体表现为低孔、中—高渗特征; ④气藏由西向东, 气水界面逐渐降低, 呈“三段式”结构, 建产区统一气水界面为-4 385 m。在气藏地质特征认识基础上, 结合数值模拟结果与国内外相似气田开发经验, 确定开发技术政策: 以颗粒滩主体发育区作为优先建产目标区; 在构造高部位集中布井, 延缓边水非均匀推进速度, 延长气田稳产期; 部署水平井, 提高单井产能; 确定气井合理配产和调峰气井产量, 提升气藏开发效果。图 12 表 2 参 11

关键词: 安岳气田; 磨溪区块; 龙王庙组; 碳酸盐岩气藏; 地质特征; 开发技术政策

中图分类号: TE344

文献标识码: A

Geological characteristics and development strategies for Cambrian Longwangmiao Formation gas reservoir in Anyue gas field, Sichuan Basin, SW China

LI Xizhe¹, GUO Zhenhua¹, WAN Yujin¹, LIU Xiaohua¹, ZHANG Manlang¹, XIE Wuren¹, SU Yunhe¹,
HU Yong¹, FENG Jianwei², YANG Bingxiu³, MA Shiyu¹, GAO Shusheng¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China;

2. Geosciences School, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 3. CNPC Exploration and Production Company, Beijing 100007, China)

Abstract: Seismic, drilling, logging and production performance data were analyzed to study the key geological factors such as reservoir properties and gas/water distribution, which influence the development of the Lower Cambrian Longwangmiao reservoirs in the Moxi block, Anyue gas field, Sichuan Basin, and the development strategies are established. The results indicate that: (1) Four stages of grain shoals developed longitudinally and two main shoals with one trench formed laterally in the development area; (2) Three types of reservoirs are identified, which are reservoir with millimeter sized dissolved vugs, reservoir with solution pores, and reservoir with inter-particle/inter-crystal pores; (3) Low matrix porosity but mid-to-high permeability affected by developed high-dip fractures; and (4) Three gas/water contacts (GWC) can be defined and step down from west to east, with a unique gas/water contact of -4 385 m in the target developing area. Based on geologic characterization, reservoir simulation and case study of similar gas reservoirs, the development strategies are made: to select the main grain shoal area as the prior production area; to locate wells on the structural high to delay edge water breakthrough and prolong stable production; to drill horizontal wells enhancing single well deliverability; to keep reasonable production of wells for improving the production effect.

Key words: Anyue gas field; Moxi block; Longwangmiao Formation; carbonate gas reservoir; geological characteristics; development strategies

引用: 李熙喆, 郭振华, 万玉金, 等. 安岳气田龙王庙组气藏地质特征与开发技术政策[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 398-406.

LI Xizhe, GUO Zhenhua, WAN Yujin, et al. Geological characteristics and development strategies for Cambrian Longwangmiao Formation gas reservoir in Anyue gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 398-406.

1 气藏概况

安岳气田磨溪区块位于四川省遂宁市、资阳市和重庆市潼南县境内(见图1),构造隶属于四川盆地川中古隆起平缓构造区的威远—龙女寺构造群,寒武系龙王庙组气藏探明天然气地质储量大于 $4\,400\times 10^8\text{ m}^3$ [1]。

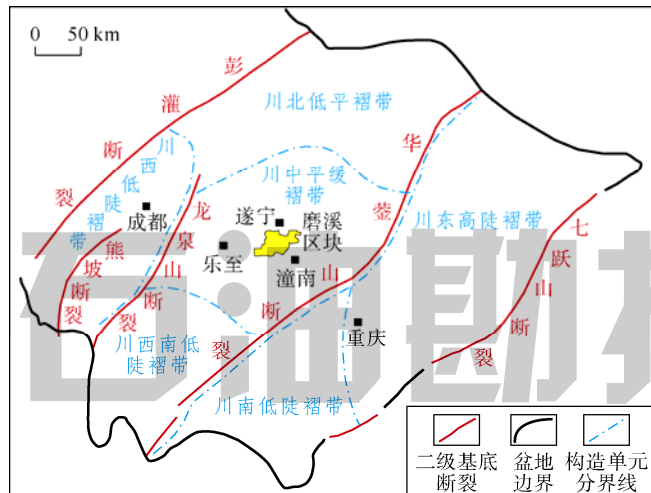


图1 四川盆地安岳气田磨溪区块构造位置图

自2012年9月W35井取得重大发现后,对龙王庙组气藏勘探评价力度大大加强。在沉积[1-2]、岩石类型[3]、储集空间类型、储集层成因[3-7]及气藏类型方面[3,8]取得了大量研究成果,认为储集层连续性好、储量规模大、气井产能高,是大型整装碳酸盐岩气藏。

随着评价井动态资料的增加,发现气藏也呈现出一定的复杂性,主要体现在:①储集层大面积连片分布,多数气井都具有很高的产能,但受沉积、成岩差异和裂缝发育程度的影响,不同部位气井产能差异大,储集层表现出较强的非均质性;②气藏具有多高点、气柱高度小、裂缝发育等特点,气水关系复杂,存在潜在的水侵风险。

作为中国单体规模最大的海相碳酸盐岩整装气藏,龙王庙组气藏在川渝地区,乃至在全国天然气资源供应中都具有重要的战略地位。为实现其平稳、高效开发,需要更加深入地认识气藏地质与开发特征,确定科学合理的开发技术政策,降低开发风险。本文综合地震、钻井、测井、生产动态等资料,针对储集空间类型、储集层展布、断层与裂缝发育程度、储集层物性、气水分布等影响开发效果的关键问题开展研究。在此基础上,结合数值模拟结果与国内外相似气田开发经验,确立相应的开发技术政策。

2 气藏地质特征

2.1 储集空间类型

前期研究表明:磨溪区块龙王庙组气藏储集空间

包括溶蚀孔洞、粒间孔、晶间孔和裂缝[9],而裂缝对储集层的贡献主要体现在有效沟通孔洞储集空间,起到改善储集层整体渗流能力的作用。因此,本文基于岩心精细描述、压汞、核磁共振、CT扫描成像及物性分析等成果,依据孔、洞发育程度,将储集空间划分为溶蚀孔洞、溶蚀孔隙和基质孔隙3种(见图2)。

溶蚀孔洞型:岩石类型主要为残余砂屑白云岩和中—细晶白云岩;溶蚀孔洞发育,CT扫描显示以大孔和小洞为主,小洞(洞径 $2\sim 5\text{ mm}$)占总洞数的86.6%;核磁共振谱呈现多峰形态;压汞曲线分析表明该类储集层中值孔喉半径一般超过 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。

溶蚀孔隙型:岩石类型为砂屑白云岩和细—粉晶白云岩;粒间溶孔和晶间孔发育,岩心上针状溶孔清晰可见,偶见溶洞;CT扫描显示以孔隙为主;核磁共振谱呈现多峰形态,孔径较溶蚀孔洞型储集层要小,储集层中值孔喉半径主要为 $0.05\sim 1.00\text{ }\mu\text{m}$,孔喉分选中等。

基质孔隙型:岩石类型为泥—粉晶白云岩、泥晶含砂屑白云岩;岩心观察未见孔洞,测井解释为有效储集层;CT扫描显示裂缝发育;核磁共振谱呈现多峰特征,但孔径明显小于溶蚀孔洞和溶蚀孔隙型储集层,孔喉分选较好,中值孔喉半径一般小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

溶蚀孔洞和溶蚀孔隙型储集层是该区产层的主要类型,孔隙度总体大于4%。岩心描述溶蚀孔洞发育段心长 190.5 m ,占取心总长度的40.7%,孔隙度为6%~14%;溶蚀孔隙发育段心长 112.6 m ,占取心长度的24.0%,孔隙度为4%~8%。

2.2 沉积与储集层展布

海水深度和水动力条件的变化控制着颗粒滩沉积和滩体旋回的形成与演化。受控于乐山—龙女寺古隆起的持续抬升,磨溪区块寒武纪水体持续变浅。龙王庙组垂向可划分为4期向上变浅的旋回(见图3),发育4期加积颗粒滩,其中第II、第III期滩体最为发育。

4期滩体垂向叠置分布,在探明含气范围内呈现“两滩一沟”的展布格局(见图4),即在古地貌相对较高的W36—W11—W2井区和W35—W48井区两个区域,发育两个颗粒滩主体,岩石类型以砂屑白云岩、残余砂屑白云岩和中—细晶白云岩为主,主要发育溶蚀孔洞和溶蚀孔隙型储集层,孔隙度相对较高,平均5.8%;有效储集层(孔隙度大于2%)厚度与地层厚度比值一般在50%以上;储能系数较高,一般为2.2~3.2 m(见图4)。在古地貌相对较低(沉积期为沟槽)的W23—W16—W15井区,沉积形成砂屑白云岩、细—

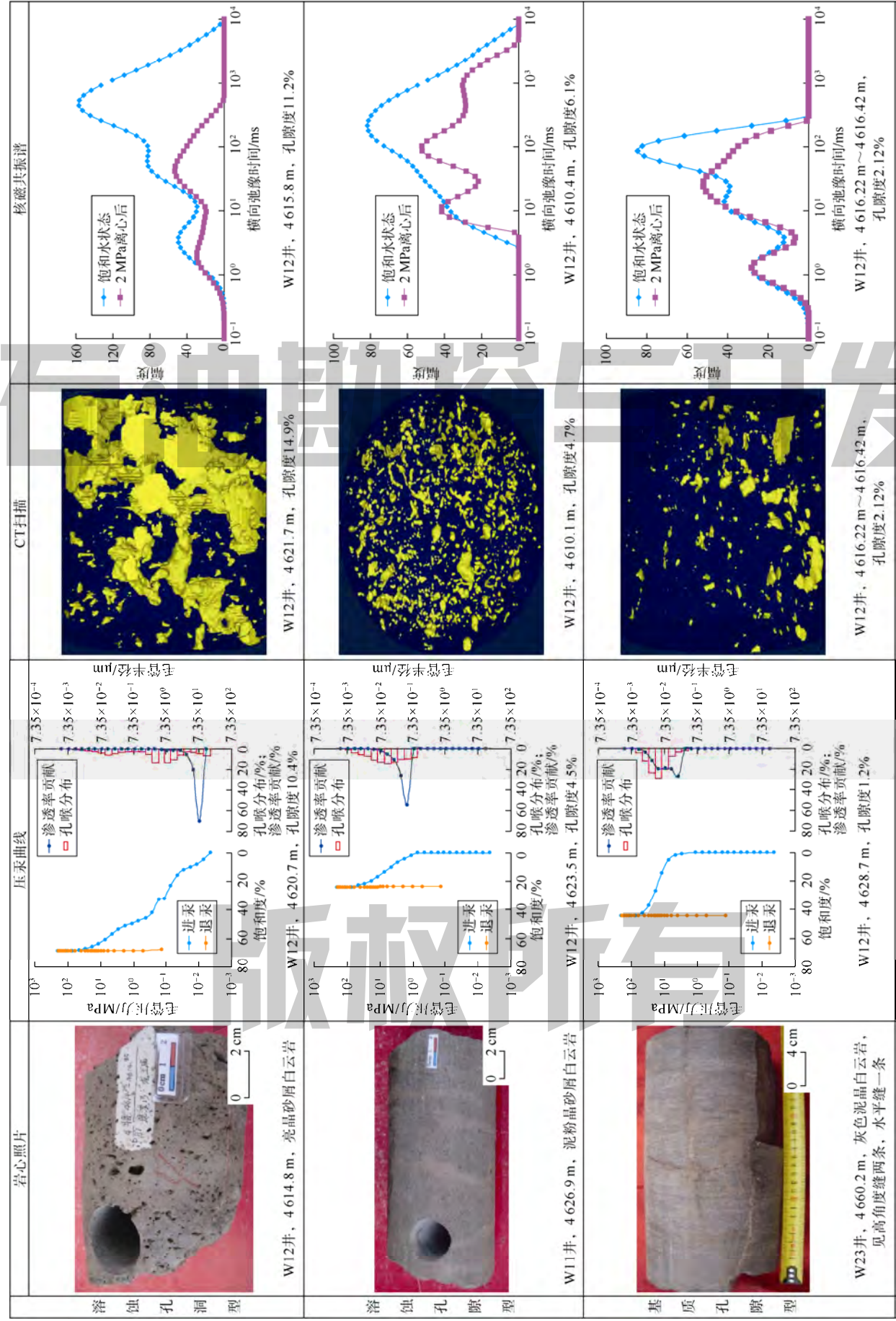


图2 3种类型储集层岩心照片、压汞曲线、CT扫描及核磁共振谱特征

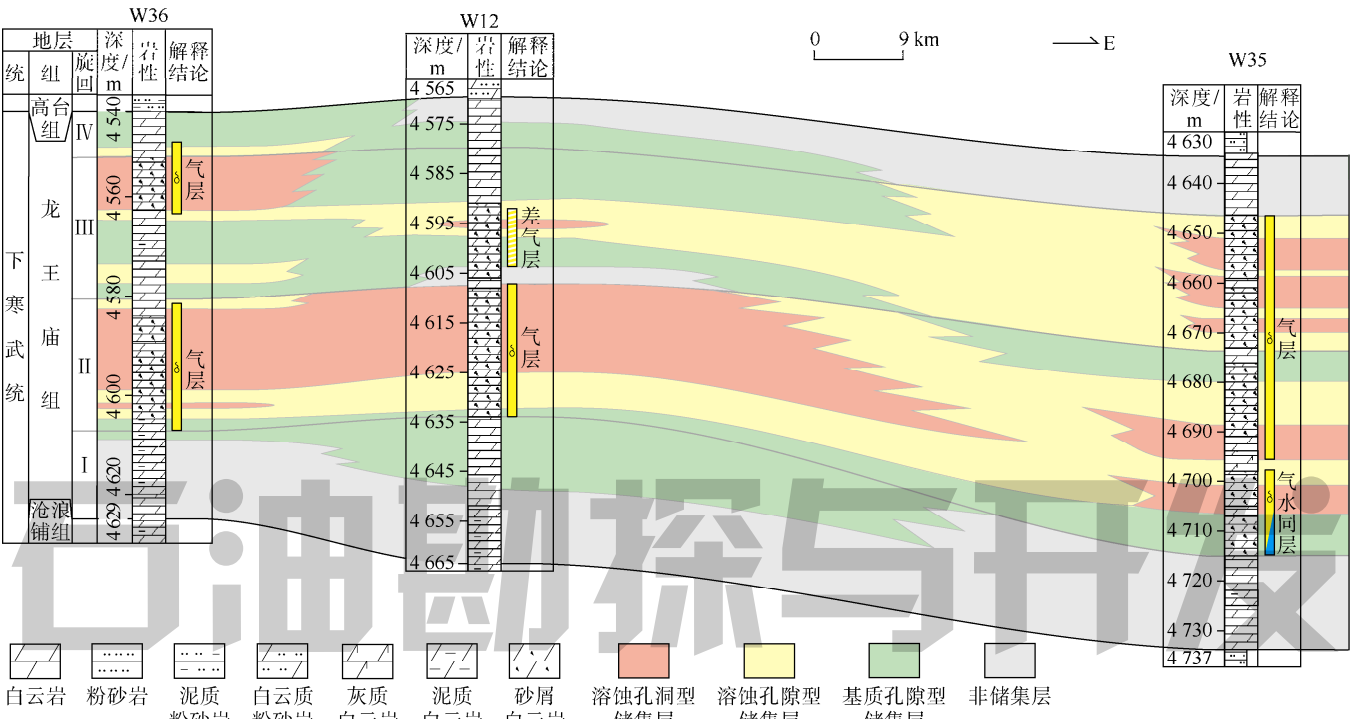


图 3 W36—W12—W35 井龙王庙组储集层对比图

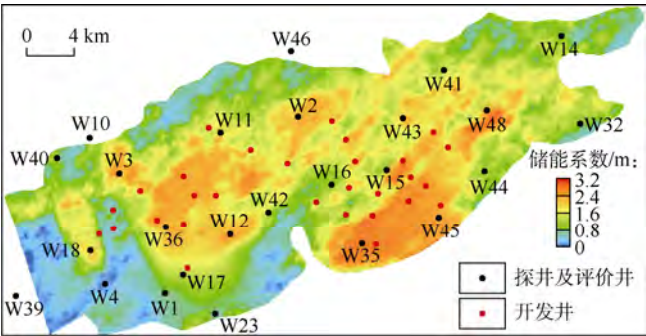


图 4 气藏探明储量区储能系数平面分布图

粉晶白云岩，为颗粒滩边缘，主要发育基质孔隙和溶蚀孔隙型储集层；孔隙度相对较低，平均 3.7%；有效储集层厚度与地层厚度比值为 12%~65%；储能系数一般低于 2.2 m。

2.3 断层与裂缝发育特征

在探明储量区范围内发育 5 条规模较大的断层（见图 5）。其中 F1 和 F2 断层是在前震旦纪裂谷上继承活动形成的同沉积断裂，长度均超过 100 km，控制高石梯—磨溪地区构造和沉积相带展布格局。F3、F4 和 F5 断层为喜马拉雅期北东—南西向挤压和华蓥山断裂右行走滑共同作用下派生出的北西向高角度走滑断层。

该区构造裂缝十分发育。综合岩心观察、成像测井解释，认为本区总体发育高角度构造缝、低角度斜交缝、水平缝 3 种天然裂缝（见图 6、表 1），以 45°~90°的高角度构造缝为主。根据裂缝相互切割关系、裂

缝充填程度与充填物成分差异、裂缝边缘溶蚀程度、烃源岩演化与埋藏史的匹配关系进行分析，高角度构造缝又可分为充填高角度构造缝和未充填高角度构造缝两类：充填高角度构造缝一般充填泥晶白云岩、炭质泥岩或煤屑，部分半充填，并伴有沿裂缝扩溶现象，应形成于油气大规模充注之前或与油气充注相伴生，在磨溪地区西部 W36 井区较为发育；未充填高角度构造缝规模大、延伸长，常切穿其他类型裂缝，在全区分布，尤其发育于东部 W41 和 W43 井区（见图 5），走向与断层（F3、F4、F5）基本一致，且距断层越近裂缝发育程度越高。裂缝发育程度与储集层类型密切相关，在溶蚀孔洞发育部位，应力得以释放，高角度构造缝发育程度较弱，纵向上高角度构造缝主要发育于基质孔隙型储集层和非储集层段中（见图 6）。

2.4 储集层物性特征

储集层基质物性相对较差但构造裂缝相对发育，整体属低孔、中—高渗储集层。单井有效储集层段（岩心）平均孔隙度为 2.48%~6.05%，总体平均孔隙度为 4.81%（见图 7a）。受储集层溶蚀孔洞和裂缝非均匀发育的影响，不同尺度下储集层渗流能力差异较大，宏观渗透率明显高于样品分析渗透率。据小柱塞样物性分析，有效储集层渗透率主要分布于 $(0.01 \sim 1.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 样品仅占 34.5%，而全直径样品分析渗透率主要为 $(0.01 \sim 100.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ （见图 7b）。依据不稳定试井解释成果，受裂缝和溶蚀孔洞发

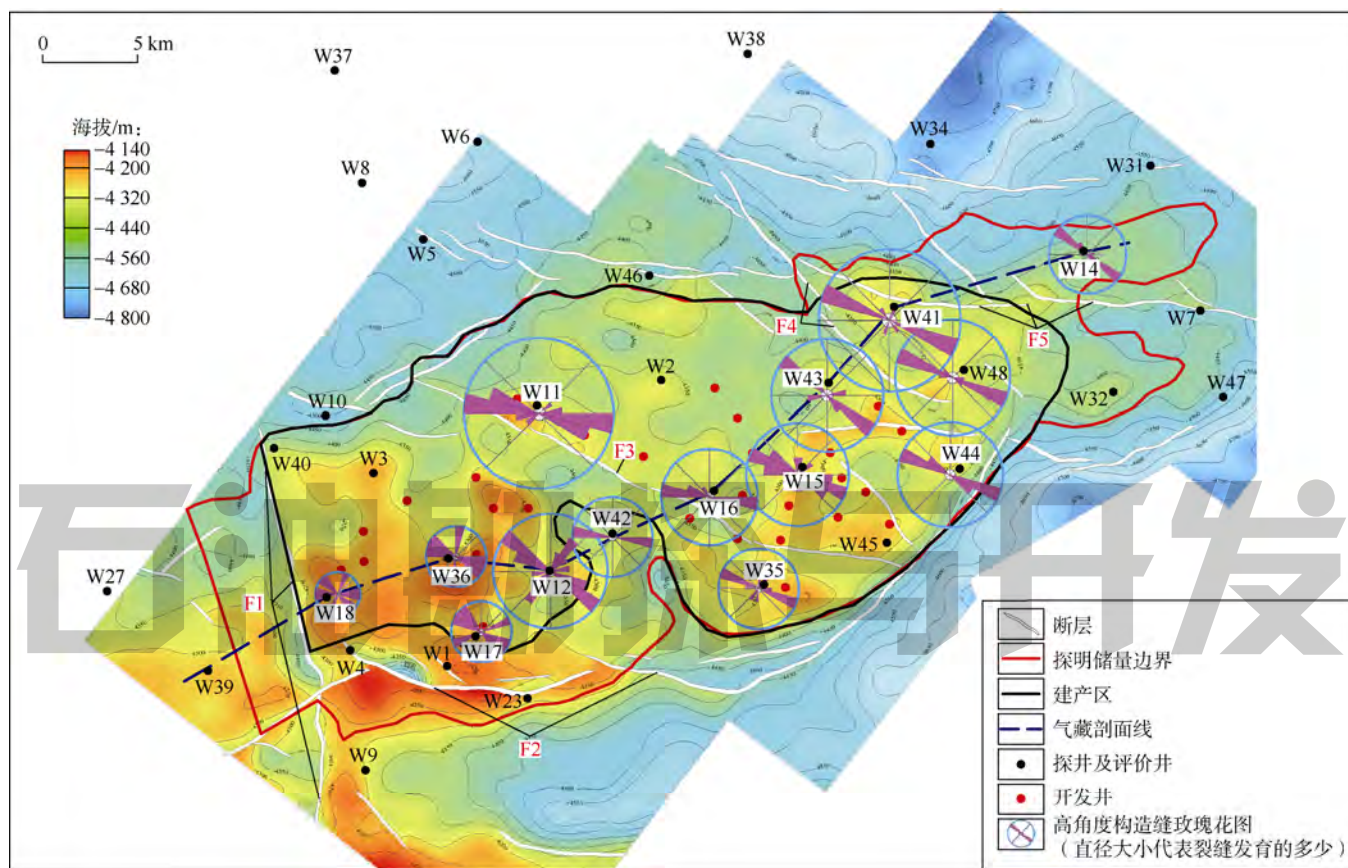


图5 断层与高角度构造缝平面分布图

育的影响,颗粒滩主体部位渗透率为 $(3.24\sim 613.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,普遍比岩心分析和测井解释渗透率高 $1\sim 2$ 个数量级;颗粒滩边缘部位裂缝欠发育,渗透率一般低于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与岩心分析和测井解释渗透率基本一致。

2.5 气水分布特征

磨溪区块龙王庙组构造平缓,具有多个构造高点,与断裂系统共同作用,控制气藏的气水分布,呈现出构造边水气藏特征:①已证实产水井均处于构造较低部位(气藏外围W37、W38、W47井,气藏内部W40、W42、W43井,见图5);②F1、F2和F5断层对气藏具有分隔作用,由西向东气水界面逐渐降低,呈“三段”式结构(见图8):F1至F5断裂之间的建产区气藏连通性较好,具有统一气水界面 $-4385\text{ m}^{[10]}$;F1断层西侧气水界面为 -4309 m ,高出建产区气水界面 76 m ;F5断层东侧W14井气层底界海拔为 -4466 m ,低于建产区气水界面 81 m 。

在建产区东部的W43—W44井区,高角度构造缝相对发育,走向与断层(F3和F4)基本一致,距断层越近,发育密度越大,充填程度弱。目前已产水井主要集中在该区构造相对较低部位,其中两口井射孔底界高于气水界面,短期试采后产水,推测北西—南东

向展布的F3、F4断裂及其伴生高角度缝存在沟通外部水体的可能。

3 高效开发技术政策

磨溪区块龙王庙组气藏属低孔、中—高渗裂缝孔洞型构造边水气藏,高效开发面临2个重要问题:①气藏构造幅度低、气水过渡带面积大,储集层裂缝发育,存在水侵风险;②基质物性差,不同部位溶蚀孔洞、裂缝发育不均衡,储集层非均质性强,低渗部位气井产能较低,如何提高储量动用程度是关键。因此,需要在地质认识的基础上,充分研究气井产能主控因素,并根据气藏特征制定开发技术政策,规避潜在风险,以实现气藏的高效开发。

3.1 产能主控因素

结合地震储集层预测、岩心观察、成像测井解释成果以及气井产能分析研究,认为气井产能主要受控于以下3个因素。

3.1.1 裂缝发育程度

延伸规模大、充填弱的高角度构造缝,与“顺层”溶蚀形成的孔、洞匹配良好,可形成大型网状渗流系统,大幅提高储集层渗流能力,是影响气井产能的关键因

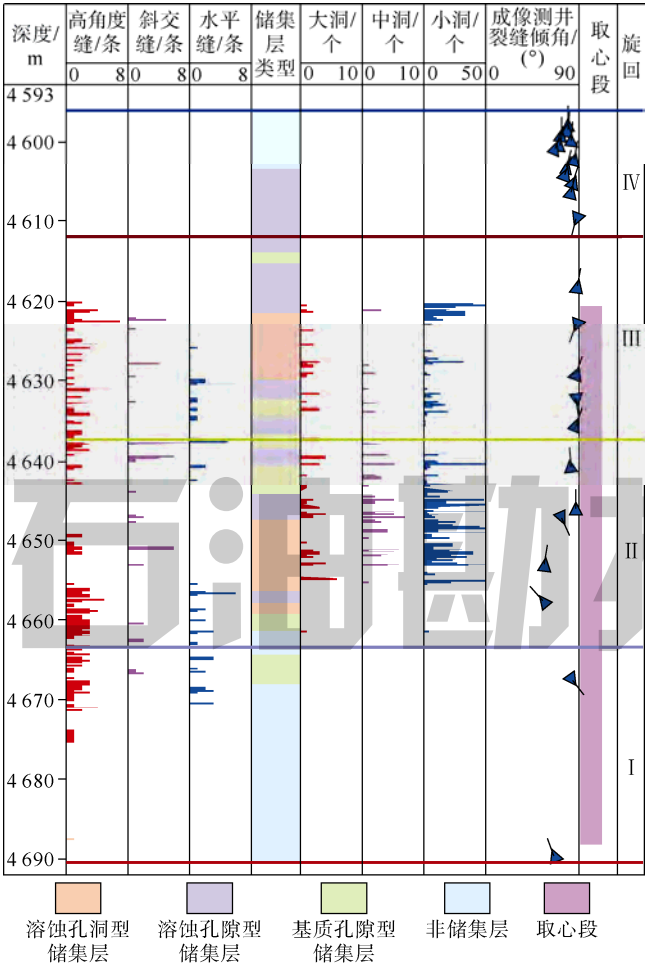


图 6 W11 井岩心描述与成像测井解释裂缝纵向分布

素。据气井无阻流量与岩心描述统计，气井无阻流量与高角度构造裂缝密度具有良好的正相关性（见图 9）。

3.1.2 优质储集层厚度

溶蚀孔洞型和溶蚀孔隙型储集层的孔隙度一般大于 4%，为该区优质储集层，其厚度是影响气井产能的

另一重要因素。无阻流量超过 $400\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的气井，优质储集层（孔隙度大于 4%）厚度比均大于 60%（见图 10），且两者呈明显的正相关关系。

3.1.3 储集层溶蚀方式

中志留世四川盆地开始抬升剥蚀，西北部地表水经由露头区或高台剥蚀区下渗补给，顺层流动并溶蚀改造颗粒滩储集层，形成“顺层”溶蚀孔、洞。在颗粒滩边缘，水动力相对较弱，沉积物以细—粉晶为主，残余粒间孔不发育，下渗地表水只能沿早期高角度裂缝流动，并溶蚀扩大，形成“垂向”溶蚀带。

相对来说，“顺层”溶蚀储集层发育的气井，连通范围广，气井产能明显高于“垂向”溶蚀发育的气井。岩心观察及测井解释成果表明：W41 井储集层物性参数好于 W44 井（见表 2），但 W41 井溶蚀孔、洞沿高角度缝分布，横向连通范围有限；而 W44 井表现出明显的“顺层”溶蚀特征，由此造成 W44 井测试的无阻流量是 W41 井的 16.5 倍。

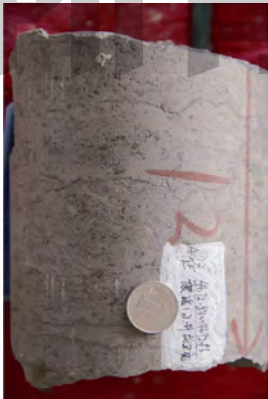
在气井产能主控因素认识的基础上，结合三维地质建模预测气井产能平面分布规律，优选以溶蚀孔洞型和溶蚀孔隙型储集层为主的颗粒滩主体发育区作为优先建产目标区，发挥主体区块的产能优势，确保气田高效开发。

3.2 井位部署原则

鉴于气藏在构造较低部位存在快速水侵的风险，通过调研大量国外相似气藏^[11]（法国拉克、麦隆等）的开发过程，针对气藏特征，基于“治”不如“防”的原则制定了在构造高部位集中布井的技术政策，以期达到延缓水侵的目的。

利用数值模拟方法，采用 3.06%采气速度，40 口直井开发，单井平均配产 $75\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ，研究布井方式

表 1 岩心观察天然裂缝类型、发育特征

未充填高角度构造缝	充填高角度构造缝	水平缝	低角度斜交缝
			
W15 井，4 635.87~4 636.09 m， 无充填，延伸长	W11 井，4 641.37~4 641.49 m， 充填、半充填，溶蚀扩大	W11 井，4 672.84~4 672.96 m，泥晶 白云岩、炭质泥岩及煤屑部分充填	W15 井，4 643.37~4 643.46 m， 沥青充填

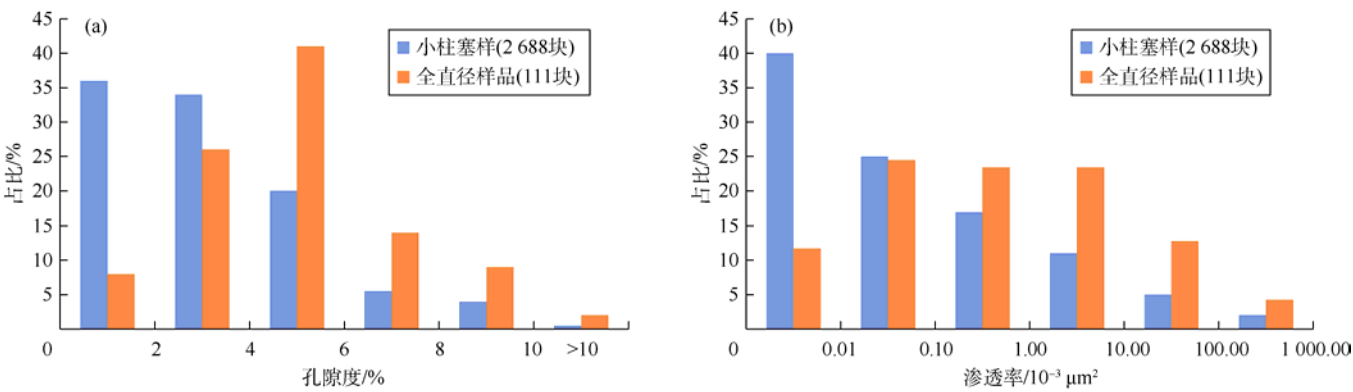


图7 岩心分析孔隙度(a)、渗透率(b)分布直方图

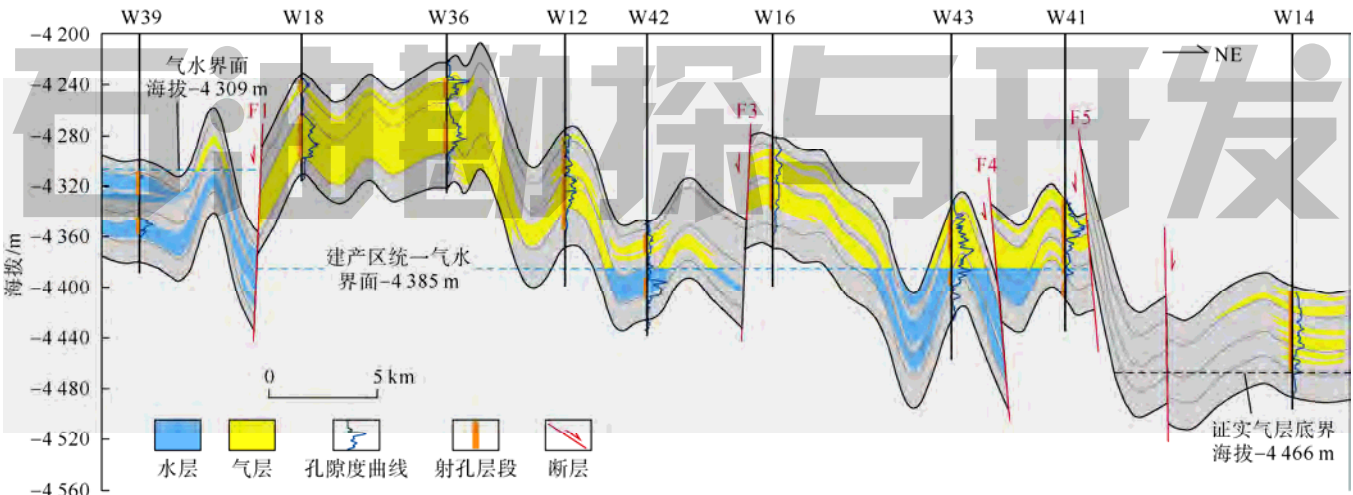


图8 W39—W14井连井气藏剖面

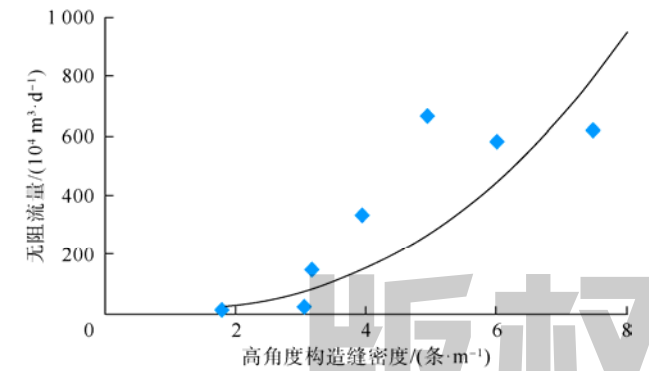


图9 无阻流量与岩心观察高角度裂缝密度关系图

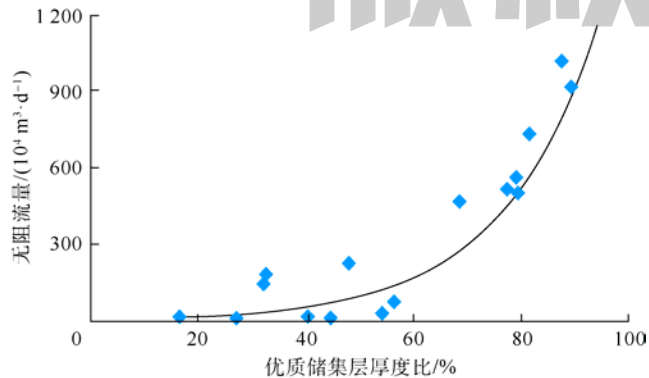


图10 无阻流量与优质储集层厚度比关系图

表2 W41与W44井储集层参数对比表

井号	气层厚度/m		孔隙度/%		裂缝密度/ (条 · m ⁻¹)	无阻流量/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)
	φ≥2%	φ≥4%	最大	平均		
W41	49.6	22.3	10.5	4.2	0.20	34.3
W44	48.4	10.9	9.1	3.2	0.18	567.6

注：φ—孔隙度，%

对开发效果的影响。结果表明，在裂缝和孔洞相对发育、储量丰度相对较高的构造高部位集中布井，气井远离边水，较在含气面积区域内均匀布井稳产时间延长4.5年（见图11），最终采收率提高了3.5%。

3.3 井型优选

受储集层非均质性影响，气藏不同部位气井产能差异较大。据裂缝分布特征、不稳定试井解释和全直径岩心垂向渗透率分析结果，气藏垂向连通性好，垂向与水平渗透率比值为0.1~1.0，平均0.31，适宜打水平井。数值模拟计算表明，水平段最佳长度为600~800 m，产能替代比（水平井产能与直井产能之比）为1.7~3.2，尤其储集层物性差部位水平井产能替代比更高（见图12）。

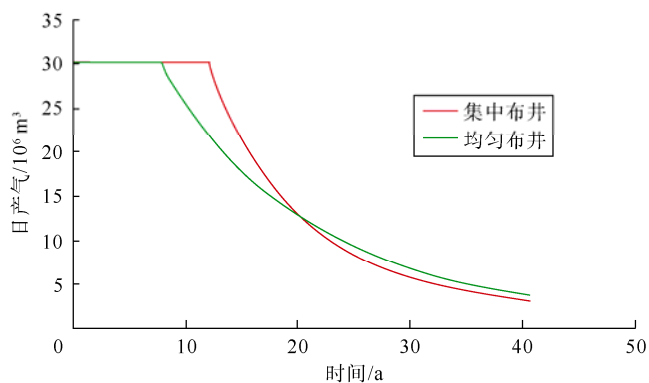


图 11 集中布井和均匀布井稳产时间对比图

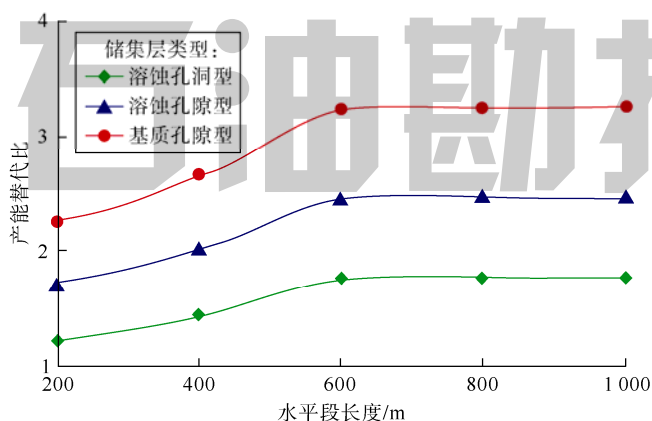


图 12 不同类型储集层水平段长度与产能替代比关系

3.4 单井合理产量与调峰能力

大型气田是气区平稳供气的主力，承担着季节性用气调峰的作用。作为探明储量超 $4\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大型气田，龙王庙组气藏的产能规模对川渝地区的稳定供气起着至关重要的作用。因此，通过对气井所处构造位置、储量丰度及无阻流量进行分析，论证单井合理技术界限，优选远离边水、储量丰度大、无阻流量高的 37 口气井作为调峰井，平稳供气时设计单井配产 $(60 \sim 120) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，平均 $81.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，供气高峰时单井配产 $(80 \sim 150) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，平均 $105.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，使气田具备 $900 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的调峰能力。一方面可以缓解季节性供需矛盾，另一方面有利于正确认识气藏潜力，从根本上解决西南地区天然气调峰难题。

4 结语

磨溪区块龙王庙组气藏含气面积广、探明储量大、气井无阻流量高，是一个大型整装碳酸盐岩气藏。气藏构造幅度较低，断裂发育，呈现出构造边水气藏特征；储集层基质物性较差，构造裂缝发育，不同尺度下储集层渗流能力差异大，水侵将是制约气藏开发效

果的最大风险。通过优选建产区域，制定了在构造高部位集中布井降低水侵风险，采用水平井提高单井产能，选择调峰井确定合理产量与高峰产量的技术政策，来提升开发效果。在气藏开发过程中，应及时跟踪开发动态，加强水侵动态监测，明确外围水体与气藏连通关系，评价井区储量及水侵活跃程度，制定相应的治水对策；还需深入论证单井合理技术界限，控制生产压差，合理配产，最终实现气藏平稳高效开发。

参考文献：

- [1] 徐春春, 沈平, 杨跃明, 等. 乐山—龙女寺古隆起震旦系—下寒武统龙王庙组天然气成藏条件与富集规律[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 1-7.
XU Chunqun, SHEN Ping, YANG Yueming, et al. Accumulation conditions and enrichment patterns of natural gas in the Lower Cambrian Longwangmiao Fm reservoirs of the Leshan-Longnüsi Paleohigh, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 1-7.
- [2] 金民东, 谭秀成, 李凌, 等. 四川盆地磨溪—高石梯地区下寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J]. 古地理学报, 2015, 17(3): 347-357.
JIN Mindong, TAN Xiucheng, LI Ling, et al. Characteristics and distribution of grain bank of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin[J]. Journal of Paleogeography, 2015, 17(3): 347-357.
- [3] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 268-277.
DU Jinhu, ZOU Caineng, XU Chunqun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 268-277.
- [4] 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 等. 四川盆地震旦系—寒武系大气田形成条件、成藏模式与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 785-795.
WEI Guoqi, YANG Wei, XIE Wuren, et al. Formation conditions, accumulation models and exploration direction of large gas fields in Sinian-Cambrian, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 785-795.
- [5] 孟宪武, 朱兰, 王海军, 等. 川西南地区下寒武统龙王庙组储层特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 180-187.
MENG Xianwu, ZHU Lan, WANG Haijun, et al. Characteristics of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoir in Southwest Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(2): 180-187.
- [6] 姚根顺, 周进高, 邹伟宏, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J]. 海相油气地质, 2013(4): 1-8.
YAO Genshun, ZHOU Jin'gao, ZOU Weihong, et al. Characteristics and distribution rule of Lower Cambrian Longwangmiao grain beach in Sichuan basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013(4): 1-8.
- [7] 周进高, 房超, 季汉成, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩发育规律[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 27-36.

- ZHOU Jin'gao, FANG Chao, JI Hancheng, et al. A development rule of Lower Cambrian Longwangmiao grain beaches in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(8): 27-36.
- [8] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地高石梯—磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 257-265.
- WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhui, et al. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 257-265.
- [9] 周进高, 徐春春, 姚根顺, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 158-166.
- ZHOU Jin'gao, XU Chunchun, YAO Genshun, et al. Genesis and evolution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 158-166.
- [10] 马新华. 创新驱动助推磨溪区块龙王庙组大型含硫气藏高效开发[J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 1-8.
- MA Xinhua. Innovation-driven efficient development of the Longwangmiao Fm large-scale sulfur gas reservoir in Moxi block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(2): 1-8.
- [11] 孙玉平, 韩永新, 张满郎, 等. 全球碳酸盐岩气田开发调研报告[R]. 廊坊: 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 2013.
- SUN Yuping, HAN Yongxin, ZHANG Manlang, et al. Literature review and summary of world carbonate natural gas reservoir development[R]. Langfang: Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, 2013.
- 第一作者简介:** 李熙喆 (1966-), 男, 河北唐山人, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 现从事天然气开发综合研究工作。地址: 河北省廊坊市 44 号信箱, 中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 065007。E-mail: lxz69@petrochina.com.cn
- 联系作者:** 郭振华 (1979-), 男, 河南辉县人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 现从事天然气开发地质评价相关工作。地址: 河北省廊坊市 44 号信箱, 中国石油勘探开发研究院气田开发研究所, 邮政编码: 065007。E-mail: guozhenhua@petrochina.com.cn
- 收稿日期: 2016-04-07 修回日期: 2017-03-17
- (编辑 郭海莉)

(上接第 397 页)

- XIAO Li, FAN Xiaomin. Study on the method of evaluating fracture intensity from conventional logs calibrated imaging logs[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(4): 559-563.
- [11] 高楚桥, 谭廷栋. 用岩石导电效率识别碳酸盐岩储层类型[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 32-35.
- GAO Chuqiao, TAN Tingdong. Identifying types of carbonate reservoir based on electrical conduction efficiency[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 32-35.
- [12] 周红涛, 高楚桥. 塔河油田碳酸盐岩储层类型划分[J]. 石油物探, 2005, 44(1): 37-38, 57.
- ZHOU Hongtao, GAO Chuqiao. The types of carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(1): 37-38, 57.
- [13] LIU O Y. Stoneley wave-derived Δt shear log[R]. Houston: SPWLA Twenty Fifth Annual Logging Symposium, 1984.
- [14] 王冠贵. 斯通利波特特性及其应用[J]. 江汉石油学院学报, 1985, 9(2): 71-86.
- WANG Guangui. Characteristics and applying of Stoneley wave[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1985, 9(2): 71-86.
- [15] WINKLER K W, LIU H L, JOHNSON D L. Permeability and borehole Stoneley waves: Comparison between experiment and theory[J]. Geophysics, 1989, 54(1): 66-75.
- [16] TANG X M. Dynamic permeability and borehole Stoneley waves: A simplified Biot-Rosenbaum model[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1991, 90(3): 1632-1646.
- [17] TANG X M, CHENG C H. Fast inversion of formation permeability from Stoneley wave logs using a simplified Biot-Rosenbaum model[J]. Geophysics, 1996, 61(3): 639-645.
- [18] 边瑞雪, 邓少贵, 范宜仁, 等. 地层纵横波幅度与裂缝倾角及张开度的关系[J]. 测井技术, 1998, 22(5): 327-331.
- BIAN Ruixue, DENG Shaogui, FAN Yiren, et al. Relation between acoustic amplitude and fracture properties[J]. Well Logging Technology, 1998, 22(5): 327-331.
- [19] 赵军, 付海成, 张永忠, 等. 横波各向异性在碳酸盐岩裂缝性储集层评价中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 74-77.
- ZHAO Jun, FU Haicheng, ZHANG Yongzhong, et al. Application of shear wave anisotropy in fractural carbonate reservoir evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 74-77.
- [20] TANG X M. Imaging near borehole structure using directional acoustic wave measurement[J]. Geophysics, 2004, 69(6): 1378-1386.
- [21] TANG X M, PATTERSON D. Single-well S-wave imaging using multi-component dipole acoustic log data[J]. Geophysics, 2009, 74(6): 211-223.
- 第一作者简介:** 唐军 (1979-), 男, 湖北荆门人, 博士, 长江大学地球物理与石油资源学院副教授, 主要从事测井方面的教学与研究工作。地址: 湖北省武汉市蔡甸区大学路 111 号, 长江大学地球物理与石油资源学院, 邮政编码: 430100。E-mail: tangjun@yangtzeu.edu.cn
- 联系作者:** 章成广 (1963-), 男, 浙江宁海人, 长江大学教授, 主要从事岩石物理及声波测井方面的教学与科研工作。地址: 湖北省武汉市蔡甸区大学路 111 号, 长江大学地球物理与石油资源学院, 邮政编码: 430100。E-mail: zhangcg@yangtzeu.edu.cn
- 收稿日期: 2016-08-08 修回日期: 2017-04-26
- (编辑 黄昌武)