

文章编号:0253-9985(2012)05-0785-06

川东北地区雷口坡组储层特征及其形成条件

秦伟军, 邹伟

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:四川盆地川东北地区中三叠统雷口坡组整体沉积环境以蒸发台地相为主, 沉积了以大套膏岩和白云岩为主的蒸发岩。雷口坡组可细分为雷四、雷三、雷二和雷一段。雷四段地震响应应表现为“弱波峰、较低频、较连续反射结构”的曲线特征。储层总体为Ⅲ类储层, 以低渗为主, 个别储层段表现为Ⅱ类储层。储集空间类型主要有溶洞、溶扩缝、构造缝, 为一套岩溶储层。研究认为, 雷口坡组雷四段储层发育与分布受沉积相和风化壳共同控制; 研究区发育的台地蒸发相、泻湖相形成的云岩, 在雷口坡组末期出露地表遭遇剥蚀形成风化壳, 并受大气淡水沿不整合面及裂缝的淋滤、溶蚀作用形成一套优质储层。

关键词:沉积相; 储层特征; 雷口坡组; 川东北地区

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Characteristics and genesis of Mid-Triassic Leikoupo Formation reservoirs, Northeastern Sichuan Basin

Qin Weijun and Zou Wei

(Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The overall sedimentary environment of the Mid-Triassic Leikoupo Formation in the Northeastern Sichuan Basin is dominated by evaporite platforms where a set of thick and wide-spreading evaporites predominantly of gypsums and dolomites were deposited. The Leikoupo Formation can be subdivided into four members. The seismic responses of the fourth member feature in weak amplitude, low frequency and relatively continuous reflection configuration. Most reservoir rocks within the fourth member are type-III of low permeability, some of them show characters of type-II. Their pore spaces are dominated by caverns, dissolution-widened fractures and structural fissures. The development and distribution of the reservoir rocks in the member were controlled by both sedimentary facies and weathered crust. Dolomites of platform evaporate facies and lagoon facies in the study area were exposed and eroded into weathered crust during the last period of the Leikoupo Formation deposition. In addition, the dolomites also experienced leaching and corrosion of meteoric water along unconformities and fractures, resulting in a set of high-quality reservoir rocks.

Key words: depositional facies, reservoir characteristics, Leikoupo Formation, northeastern Sichuan Basin

1 区域地质概况

研究区位于四川省巴中市境内, 包括元坝和龙岗勘探区块(图1)。构造位置处于川北坳陷腹部, 南邻川中隆起, 东邻川东褶皱带, 整体构造变

形较弱, 地层产状平缓^[1-5]。

川东北地区的构造演化与米仓-大巴山密切相关。加里东期—早海西期, 区域整体隆升, 志留系地层逐渐超覆于底部不整合面之上; 晚海西期—印支早期(飞仙关期)为区域拉张构造演化阶段, 长兴期—飞仙关期普遍发育一套碳酸盐岩台

收稿日期: 2012-01-17; 修订日期: 2012-08-13。

第一作者简介: 秦伟军(1964—), 男, 博士、教授级高级工程师, 油气地质与战略规划研究。

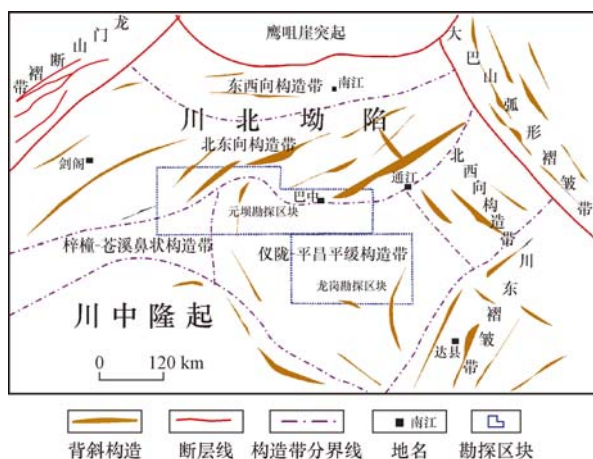


图1 研究区区域构造位置

Fig. 1 Location of the study area

地及台地边缘相沉积;印支中期(嘉陵江组—雷口坡组),上扬子板块北缘开始隆升,海水逐渐西退,在川东北地区形成嘉陵江组、雷口坡组泥膏岩沉积;印支中期末—燕山早、中期发育前陆盆地,整个川东北地区处于周围山系的挤压环境,沉积了一套近6000 m的山前红色内陆河湖相碎屑岩建造;燕山晚期—喜马拉雅期发育陆内造山运动,川东北地区构造变形形成现今的构造形态。

研究区地表出露侏罗系、白垩系砂岩地层,其下地层齐全,地层层序正常,中三叠统雷口坡组又可细分为雷(雷口坡组)四、雷三、雷二和雷一段。川东北部分地区雷四段被剥蚀殆尽,但研究区保存完整,平均厚度为400~900 m。

中生界发育多套储-盖组合。以往主要是在下三叠统飞仙关组海相碳酸盐岩为储层、嘉陵江-雷口坡组泥膏岩为盖层的储-盖组合中,以及在须

家河组陆相碎屑岩为储层、须家河组泥岩为盖层的储-盖组合中发现规模工业气藏。近年雷口坡组在元坝、龙岗地区取得重大突破,如元坝4井、龙岗22井分别获得日产气 $68.37 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $15.22 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业气流,发现雷口坡组为储层、须家河组一段泥岩为盖层的储-盖组合。雷口坡组展现为又一个有利的勘探层系。

2 储层特征

2.1 岩性特征

雷口坡组主要形成于潮间-潮上泥云坪相,主要岩性为黄灰、深灰、灰色白云岩、灰岩、泥质灰岩与膏盐岩互层,在元坝地区厚度为550~750 m,在龙岗地区厚度为420~870 m。雷四段储集岩岩石类型主要为泥-粉晶白云岩、泥-粉晶云质角砾岩、泥-粉晶砾屑灰岩以及白云质灰岩。该段根据沉积旋回可划分为上、下两个亚段;上亚段为深灰色灰岩、含膏灰岩,逐步演化为以白云岩为主的岩性,反映了雷四末期海水逐渐退出的过程,元坝22井、龙岗23井钻井岩心资料反映了该岩性变化特征(图2);下亚段的上部岩性为膏岩与白云岩、膏质云岩的互层,下部则为局限台地相的灰岩沉积,说明在雷四早期该区由局限海逐渐演化为蒸发台地相^[6-9]。

2.2 地震响应特征

雷口坡组波组品质相对较好,地层展布形态清楚。经过储层的标定及正演,识别出雷四段储

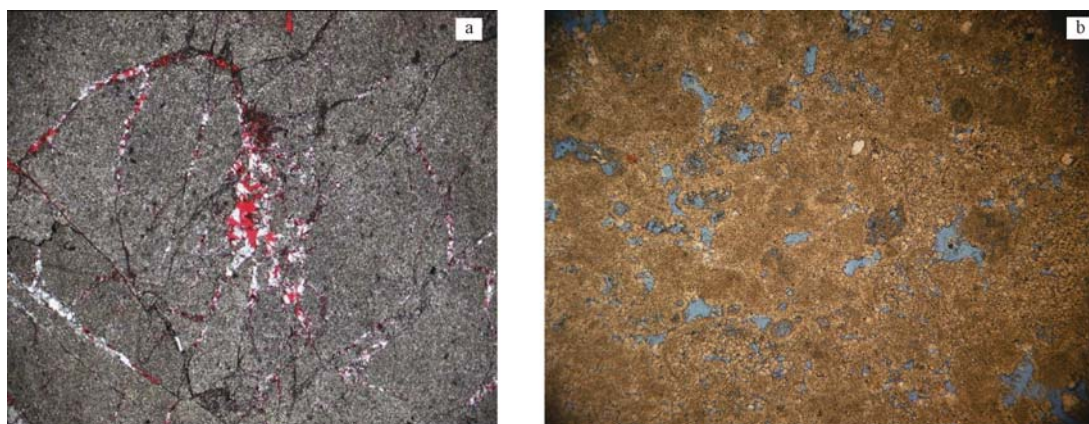


图2 元坝、龙岗地区雷四段白云岩岩心薄片分析

Fig. 2 Thin sections of dolomite cores from Member 4 of the Leikoupo Formation in Long gang and Yuanba areas

a. 元坝22井,4657.09 m,粉晶白云岩;b. 龙岗23井,3668.62 m,粉晶白云岩

层呈现“弱波峰、较低频、较连续反射结构”的特征(图3)。通过地震属性提取与分析以及地震相分析描述地震特征的横向变化,推断沉积环境的变化,确定出有利储层沉积相带,再利用波阻抗、孔隙度反演精细刻画雷口坡组岩性圈闭的边界,结合地质上雷四段的残留厚度,可以识别出研究区雷四段岩性圈闭的分布^[10]。

2.3 电性特征

由元坝4井、元坝12井、龙岗22井储层段电性含气响应特征对比分析,雷四段储层电性特征3口井基本一致(表1),主要表现为:自然伽马值较低,电阻率曲线为中-低值齿化箱状,深、浅侧向电

阻率之间有较为明显的正幅度差,三孔隙度曲线具有较高声波时差及低密度的特点,具“挖掘效应”。雷四段储层电性特征明显。

2.4 物性特征

岩心样品统计显示,元坝地区雷四段孔隙性储层厚几米到十几米不等,孔隙度最大值为6.01%,最小值为1.40%,孔隙度主要分布在2%~5%,平均值为2.81%;渗透率主要分布在小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的区间,几何平均值为 $0.042 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;总体上为Ⅲ类储层,以低渗为主。

测井解释龙岗地区雷四段孔隙性储层厚几米到二十余米不等,孔隙度分布在3%~5%(表2),渗透

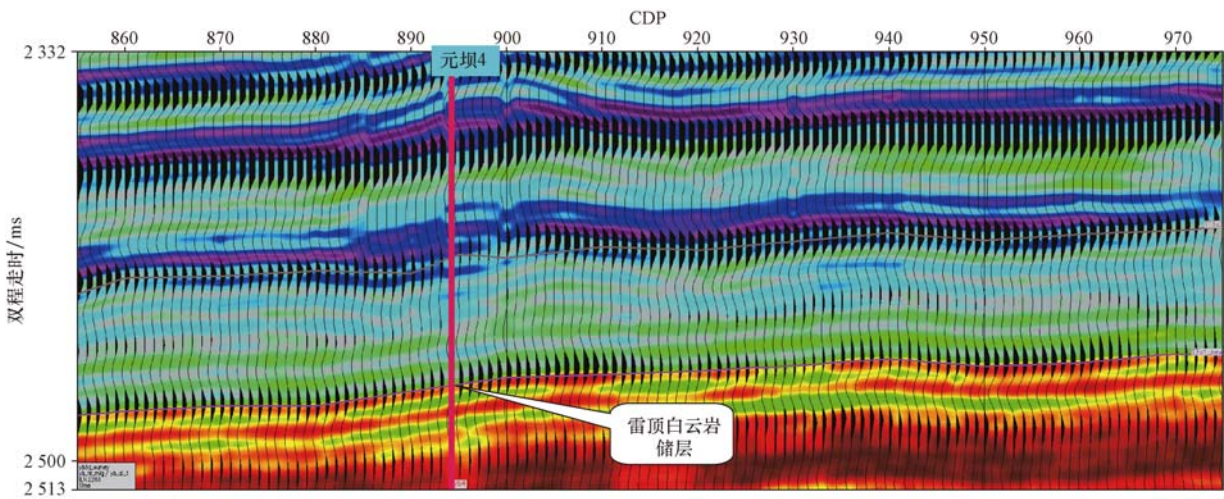


图3 元坝地区雷口坡组储层响应特征

Fig. 3 Seismic response features of the Leikoupo Formation reservoirs in Yuanba area
(弱振幅,中阻抗,中速。)

表1 元坝、龙岗地区雷四段储层测井电性特征(平均值)

Table 1 Logging electrical properties of reservoir rocks in Member 4 of Lekoupo Formation in Yuanba and Longgang areas							
井号	顶深/m	底深/m	自然伽马/API	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	声波时差/($\mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$)	岩石密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	补偿中子/%
元坝4井	4 988.9	5 089.5	45.5	808	56	2.69	9.0
元坝12井	4 960.5	4 050.2	47.8	766	53	2.71	8.8
龙岗22井	3 489.2	3 644.3	39.0	698	52	2.70	7.1

表2 龙岗地区雷四段储层参数统计

Table 2 Reservoir parameters of Member 4 of the Leikoupo Formation in Longgang area							
井号	顶深/m	底深/m	有效储层/m	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	含油(气)饱和度/%	解释结论
龙岗001-3	4 096.9	4 127.5	15.750	4.505	0.028 7	30.715	气层
龙岗8	4 573.5	4 609.2	8.875	3.480	0.007 9	25.484	含气层
龙岗9	4 110.2	4 154.3	19.250	3.947	0.019 3	37.901	气层
龙岗20	4 041.5	4 063.7	12.250	4.291	0.058 9	51.016	含水气层
龙岗21	3 747.5	3 797.5	22.575	4.476	0.069 0	32.907	气层
龙岗22	3 518.3	3 542.5	20.375	4.534	0.052 2	34.206	气层

率在 $0.02 \times 10^{-3} \sim 0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含水饱和度在 30% ~ 40%。平均渗透率大于岩心样品统计值。总体上看出, 雷四段储层横向具有较好的可比性, 大范围分布。

结合岩心分析资料统计, 研究区储集空间类型主要为溶洞、溶扩缝、构造缝, 约占总孔隙的 98% 以上; 仅存少量晶间孔, 约占总孔隙的 1% ~ 2%。

1) 构造缝

对取心岩心镜下观察发现, 雷四段储层整体裂缝非常发育, 部分被白云石、方解石、铁质、泥质等充填, 但是还是有一定数量的裂缝未被充填, 具有较强的储集性。

2) 溶扩缝

溶扩缝是由构造裂缝在地下流体的作用下进一步溶蚀扩大而形成的, 与构造裂缝相比具有更大的储集能力。

3) 溶洞

溶洞由溶扩缝和晶间孔溶蚀而来, 大小不一, 一般孔径在几毫米至几厘米左右, 常呈带状分布, 并具有较强的连通性^[11-16]。

4) 晶间溶孔

晶间溶孔是晶间孔因溶蚀扩大而形成的, 发育于泥-粉晶白云岩中。由薄片可以看出, 泥-粉晶白云岩中晶间溶孔较为发育, 但部分后期被方解石充填。雷口坡组储集层表现为岩溶储层特征。

2.5 含油气性特征

研究区雷口坡组油气显示主要集中在雷四段顶部, 表现为含气性好、气源条件好的特点。以元坝地区元坝 4 井为例, 在埋深 5 001 ~ 5 011 m 井段, 气测录井全烃由 1.96% 上升至 37.70%, 槽面针孔状气泡覆盖达 10%, 现场解释为气层。测井解释岩性为白云岩、灰质云岩, 三孔隙度曲线显示为尖刺状高孔隙度曲线形态特征, 综合解释为裂缝气层。完井对该层进行酸压测试, 9 mm 油嘴测试, 日产气量 $68.37 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

龙岗地区多井在雷四段显示油气异常, 其中龙岗 8、龙岗 9、龙岗 11、龙岗 12、龙岗 20、龙岗 21、龙岗 22 井显示最好。通过测试, 3 口井获工业气流, 2 口井微含气。其中, 龙岗 22 井在埋深 3 509 ~ 3 543 m 井段, 用 9 mm 油嘴测试, 日产气量 $15.22 \times$

10^4 m^3 , H_2S 含量低, 含量值为 0.029 g/m^3 。

3 形成条件

3.1 沉积演化过程

中三叠世雷口坡组沉积时期(安尼期)是川东北地区海相沉积的最后时期, 也是陆相沉积开始的前奏。整个四川盆地处在一个半封闭的环境中, 由于受江南古陆抬升剥蚀和龙门山岛链与康滇古陆持续下沉的影响, 四川盆地的沉积基底呈东高西低状, 由东向西沉积环境渐次加深。在川东北地区, 雷口坡组整体沉积环境以蒸发台地为主, 沉积了以大套膏岩和白云岩为主的蒸发岩。在雷三段沉积时期, 盆地内经历了一次海侵事件, 海水深度有所增加, 元坝-龙岗地区演变为局限海, 岩性以灰岩、泥灰岩为主夹少量的膏岩。雷四段由深灰色灰岩、含膏灰岩逐步演化为以白云岩为主的岩性, 反映了雷四末期海水逐渐退出的过程^[17-19]。雷四段沉积之后, 整个川东北地区沉积了一套近 6 000 m 的山前红色内陆河湖相碎屑岩构成区域盖层。

3.2 沉积微相与风化壳形成

雷口坡组末期, 四川盆地发生大规模海退, 形成北东向的泸州-开江古隆起, 雷口坡组顶部地层开始出露地表遭受风化剥蚀, 残存厚度 400 ~ 900 m。沉积相研究表明, 雷四段顶部存在灰岩潟湖、灰质云岩潟湖、云岩潟湖和云岩蒸发台地 4 种沉积微相, 其中灰质云岩潟湖、云岩潟湖和云岩蒸发台地沉积微相形成的岩性易受淡水侵蚀, 溶蚀产生了大量的孔、缝, 对储集层物性改良起到了重要的作用。雷四段风化壳特征非常清楚, 在元坝-龙岗地区普遍发现与风化壳有关的角砾和渗流粉砂。如龙岗 39 井在雷四段顶部的样品中, 镜下可见垮塌角砾、溶缝切割和岩溶角砾(图 4); 龙岗 23 井雷四段顶部的样品中, 镜下可见渗流粉砂。

3.3 成岩作用与优质储层形成

研究区成岩作用类型主要有胶结作用、白云石化作用、溶蚀作用、压实压溶作用、构造裂缝作用和重结晶作用等。其中, 胶结作用、溶蚀作用以及构造裂缝作用对储层形成及储集性能的优劣起

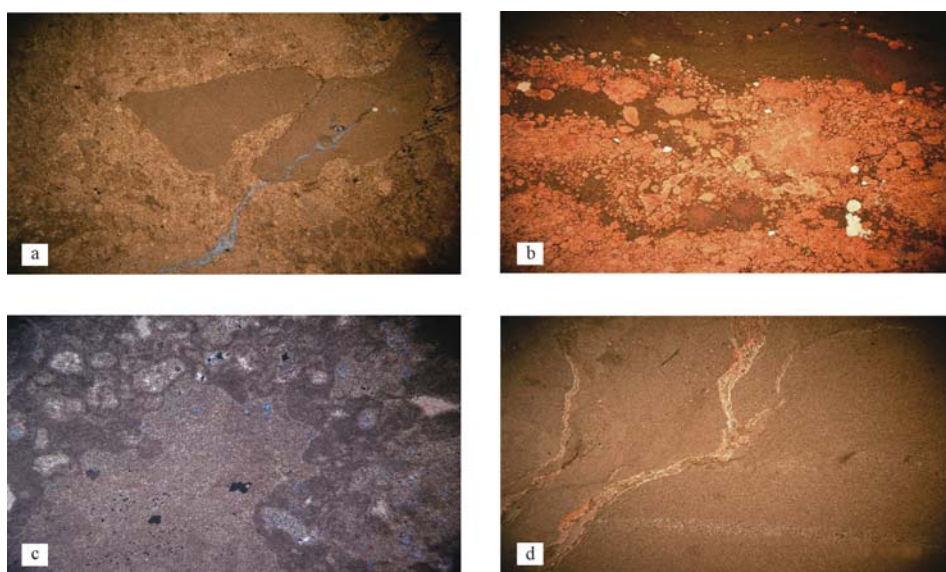


图4 龙岗地区雷口坡组与风化壳有关的岩溶特征

Fig. 4 Karst features related to the weathered crust in the Leikoupo Formation in Longgang area

a. 龙岗39井,雷四段,4 456.62 m,垮塌角砾,有溶缝切割;b. 龙岗39井,雷四段,4 497.01 m,岩溶角砾与泥晶云岩突变接触;c. 龙岗23井,雷四段,3 657.50 m,锦层组(藻类)中的渗流粉砂;d. 龙岗39井,雷四段,4 512.44 m,泥晶云岩,缝内为粘土充填,疑为古风化缝

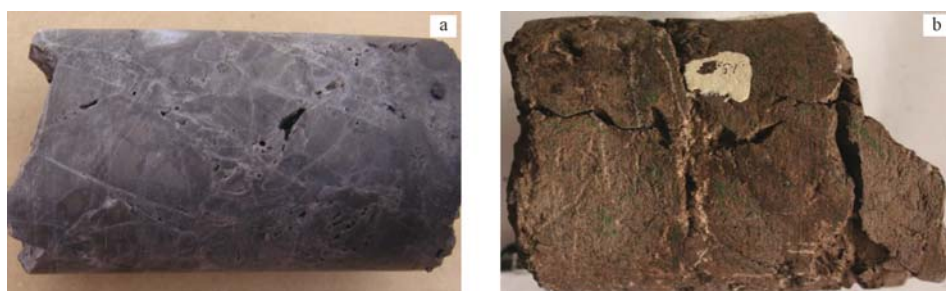


图5 元坝地区雷口坡组岩石类型及储集空间类型

Fig. 5 Rock and pore space types of the Leikoupo Formation reservoirs in Yuanba area

a. 元坝12井,4 657.09 m,溶洞;b. 元坝12井,4 580.02 m,构造缝

到了决定性作用^[20]。胶结作用导致储层孔隙度明显降低;溶蚀作用和构造裂缝作用则对储层的形成及对储集性能的改良起到了决定性作用。

本地区由于溶蚀作用形成了优质白云岩岩溶储层。燕山期—喜马拉雅期的构造裂缝,是该区气层高产的基础。溶蚀作用包括由晶间孔经溶蚀作用形成晶间溶孔,由溶扩缝和晶间孔经溶蚀作用形成溶洞(图5),及由构造裂缝在地下流体的作用下进一步溶蚀扩大形成溶蚀缝等。从本区多口井取得的岩心看,溶蚀作用对岩石储、渗性能改善较大,溶蚀缝非常发育,大大改善了储层的物性。因此,雷口坡组雷四段储层发育与分布受沉积相和风化壳共同控制。

4 结论

1) 中三叠世雷口坡组沉积时期,由于受东南侧江南古陆抬升剥蚀和西侧龙门山岛链与康滇古陆持续下沉的影响,川东北地区雷口坡组整体沉积环境以蒸发台地为主,沉积了以大套膏岩和白云岩为主的蒸发岩,为该区储层的形成奠定了基础。

2) 位于雷口坡组顶部的雷四段储层,储层岩石类型主要为泥-粉晶白云岩、泥-粉晶云质角砾岩、泥-粉晶砾屑灰岩以及白云质灰岩。雷四段地震响应表现为“弱波峰、较低频、较连续反射结构”的曲线特征。储层总体为Ⅲ类储层,以低渗为主,

个别储层段表现为Ⅱ类储层。储集空间类型主要有溶洞、溶扩缝和构造缝。雷四段含油气性好,多口井完井获高产工业气流。

3) 雷口坡组雷四段储层发育与分布受沉积相和风化壳共同控制。该区台地蒸发相、潟湖相形成的云岩,在雷口坡组沉积末期出露地表遭遇剥蚀形成风化壳,并受大气淡水沿不整合面及裂缝的淋滤、溶蚀作用,形成一套优质储层。

参 考 文 献

- [1] 曾德铭,王兴志,康保平. 川西北雷口坡组储层原生孔隙内胶结物研究[J]. 天然气地球科学,2006,17(4):459-462.
Zeng Deming, Wang Xingzhi, Kang Baoping, et al. A study on cement in primary pore of the Leikoupo Formation reservoir in the northwest of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(4):459-462.
- [2] 郭彤楼. 川东北地区飞仙关组鲕滩储层成岩作用——以宣汉-达县及元坝区块为例[J]. 石油与天然气地质,2010,31(5):620-631.
Guo Tonglou. Diagenesis of the Feixianguan oolitic shoal reservoirs in the northeastern Sichuan Basin—examples from Xuanhan-Daxian and Yuanba areas[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5):620-631.
- [3] 陈勇. 川东北元坝地区长兴组生物礁储层预测研究[J]. 石油物探,2011,50(2):173-180.
Chen Yong. Prediction on reef reservoir in Changxing group of Yuanba area, Northeast Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(2):173-180.
- [4] 胡文瑄,陈琪,王小林,等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. 石油与天然气地质,2010,31(6):810-818.
Hu Wenxuan, Chen Qi, Wang Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):810-818.
- [5] 王强,徐立恒,陈践发. 川东北地区大中型气藏天然气特征及气源[J]. 石油与天然气地质,2011,32(6):867-872.
Wang Qiang, Xu Liheng, Chen Jianfa. Characteristics and origin of natural gas in large- and medium-sized gas reservoirs in northeast Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6):867-872.
- [6] 范菊芬. 川西坳陷雷口坡组气藏勘探远景区预测[J]. 石油物探,2009,48(4):417-422.
Fan Jufen. Prediction of exploration potential area of Leikoupo formation in Western Sichuan Depression[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(4):417-422.
- [7] 王兴志,穆曙光,方少仙,等. 四川盆地西南部震旦系白云岩成岩过程中的孔隙演化[J]. 沉积学报,2000,18(4):549-553.
Wang Xingzhi, Mu Shuguang, Fang Shaoxian, et al. Evolution of porosity in the process of Sinian dolostone diagenesis in Southwest Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4):549-553.
- [8] 郭旭升. 川西地区中、晚三叠世岩相古地理演化及勘探意义[J]. 石油与天然气地质,2010,31(5):610-619,631.
Guo Xusheng. Litho paleogeographic evolution in the Middle-Late Triassic in western Sichuan Province and its significance for petroleum exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5):610-619,631.
- [9] 齐中山,王汝珍,敬朋贵,等. 川东北地区膏盐岩影响下的储层成像技术与效果分析[J]. 石油物探,2011,50(6):607-611.
Qi Zhongshan, Wang Ruzhen, Jing Penggui, et al. The imaging techniques of reservoirs influenced by saline deposit in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(6):607-611.
- [10] 王兴志,穆曙光,方少仙,等. 四川资阳地区灯影组滩相沉积及储集性研究[J]. 沉积学报,1996,14(1):47-54.
Wang Xingzhi, Mu Shuguang, Fang Shaoxian, et al. The bank facies deposits and the reservoir characteristics in Dengying Formation, Ziyang, Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(1):47-54.
- [11] 曾德铭,王兴志,张帆,等. 四川盆地西北部中三叠统雷口坡组储层研究[J]. 古地学报,2007,9(3):253-257.
Zeng Deming, Wang Xingzhi, Zhang Fan, et al. Study on reservoir of the Leikoupo Formation of Middle Triassic in northwestern Sichuan Basin[J]. Acta Paleogeographic Sinica, 2007, 9(3):253-257.
- [12] 郭彤楼. 川东北地区碳酸盐岩系孔隙型与裂缝型气藏成藏差异性[J]. 石油与天然气地质,2011,31(3):311-317,326.
Guo Tonglou. Differences in reservoir forming between porous and fractured gas pools in carbonates, the northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3):311-317,326.
- [13] 赵安坤,周文,赵冠军,等. 四川盆地北部下三叠统飞仙关组储层控制因素[J]. 石油地质与工程,2011,25(4):19-24.
Zhao Ankun, Zhou Wen, Zhao Guanjin, et al. Controlling factors of the Lower Triassic Feixianguan Formation in the North Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(4):19-24.
- [14] 何治亮,魏修成,钱一雄,等. 海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J]. 石油与天然气地质,2011,32(4):489-498.
He Zhiliang, Wei Xiucheng, Qian Yixiong, et al. Forming mechanism and distribution prediction of quality marine carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4):489-498.
- [15] 魏水建,冯琼,冯寅,等. 川东北通南巴地区三叠系膏盐岩盖层预测[J]. 石油实验地质,2011,33(1):81-86.

(下转第795页)

- [13] 陈伟,段永刚,张小玲. 底水油藏水平井水脊突破时间预测[J]. 试采技术,2005,26(1):8-9,12.
Chen Wei, Duan Yonggang, Zhang Xiaoling. The prediction of horizontal well's water breakthrough time in bottom water[J]. Well Testing and Production Technology, 2005, 26(1): 8-9, 12.
- [14] 蒋平,张贵才,葛际江,等. 采用供给边界压力预测底水突破前水锥参数[J]. 油气地质与采收率,2006,13(6):76-78.
Jiang Ping, Zhang Guicai, Ge Jijiang. Making use of supply boundary's pressure to predict the water cone's parameters before water breakthrough[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(6): 76-78.
- [15] 蒋平,张贵才,何小娟. 底水锥进的动态预测方法[J]. 钻采工艺,2007,30(2):71-73.
Jiang Ping, Zhang Guicai, He Xiaojuan. A dynamic prediction method for bottom water coning[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(2): 71-73.
- [16] 刘昱,魏宏让. 缝洞型底水油藏见水时间预测方法研究[J]. 内蒙古石油与化工,2010,3:13-14.
Liu Yu, Wei Hongrang. Calculation Method of Water Breakthrough Time in Fractured-Vuggy Reservoir With Bottom Water[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 3: 13-14.
- [17] 吕爱民,姚军. 缝洞型底水油藏含水率变化规律研究[J]. 新疆石油地质,2007,28(3):343-347.
Lv Aimin, Yao Jun. The Variation of water cut in fractured-vug-

gy reservoir with bottom water[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(3): 343-347.

符号注释

- B_o 为原油体积系数, m^3/m^3 ;
 h_o, h_p 为油井钻遇储层厚度、储层打开厚度, m;
 K_1, K_2 为近井带、外围带平均渗透率, $10^{-3} \mu m^2$;
 $p_w(z), p_o(z)$ 为油水界面处油、水相压力, MPa;
 q 为油井日产量, m^3/d ;
 r_e, r_w, r_1 分别为泄流半径、井筒半径及近井带分布半径, m;
 t_{BT} 为底水突破时间, d;
 v_w 为油、水界面处水的运动速度, m/s;
 V_1, V_2 分别为近井均质带及外围均质带储层;
 α 为渗透率变异系数, 无量纲;
 β 为泄油半径比, 无量纲;
 Φ 为储层平均孔隙度, %;
 μ_w, μ_o 分别为地层水及地下原油粘度, $mPa \cdot s$;
 λ 为地下原油与地层水粘度比, 无量纲;
 η 为各向异性系数, 无量纲;
 z 为油水界面的深度, m。

(编辑 董立)

(上接第790页)

- Wei Shuijian, Feng Qiong, Feng Yin, et al. Prediction of Triassic gypsum cap rocks in Tongnanba region of Northeast Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 81-86.
- [16] 吴世祥,李宏涛,龙胜祥,等. 川西雷口坡组碳酸盐岩储层特征及成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 542-550, 559.
Wu Shixiang, Li Hongtao, Long Shengxiang, et al. A study on characteristics and diagenesis of carbonate reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 542-550, 559.
- [17] 魏国齐,刘德来,张林,等. 四川盆地天然气分布规律与有利勘探领域[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 437-442.
Wei Guoqi, Liu Delai, Zhang Lin, et al. The exploration region and natural gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(4): 437-442.
- [18] 秦建中,王杰,邱楠生,等. 反演南海相层系热史动态变化的新温标——磷灰石、锆石(U-Th)/He年龄和封闭温

度[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 277-287.

- Qin Jianzhong, Wang Jie, Qiu Nansheng, et al. New paleo-geothermometers for the inversion of dynamic thermal evolution history of marine sequences in South China—(U-Th)/He age and closure temperature of apatite and zircon[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 277-287.
- [19] 魏国齐,杨威,朱永刚,等. 川西地区中二叠统栖霞组沉积体系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 442-448.
Wei Guoqi, Yang Wei, Zhu Yonggang, et al. Depositional system of the Middle Permian Qixia Formation in the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 442-448.
- [20] 雷雪,李忠,翟中华,等. 川中地区中三叠统雷口坡组构造特征及解释方法探讨[J]. 石油物探, 2005, 44(2): 137-141.
Lei Xue, Li Zhong, Zhai Zhonghua, et al. Structure styles analysis of Leikoupo formation in Mid-Triassic in central Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(2): 137-141.

(编辑 李军)