

赵双丰, 张枝焕, 李文浩, 等. 川西坳陷什邡地区蓬莱镇组天然气藏特征及成藏过程分析[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 515-524.

Zhao Shuangfeng, Zhang Zhihuan, Li Wenhao, et al. Accumulation process and characteristics of gas reservoirs in the Penglaizhen Formation of Shifang area, Western Sichuan Depression[J]. *Geology in China*, 2015, 42(2): 515-524(in Chinese with English abstract).

## 川西坳陷什邡地区蓬莱镇组天然气藏特征 及成藏过程分析

赵双丰<sup>1,2</sup> 张枝焕<sup>1,2</sup> 李文浩<sup>3</sup> 刘杏<sup>1,2</sup> 姜丽娜<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;  
3. 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 川西坳陷什邡地区蓬莱镇组气藏属于浅层常规—致密砂岩次生气藏, 其形成机制不同于下伏须家河组储层的致密砂岩气。研究区内主要发育岩性圈闭, 天然气来自于下伏须家河组煤系烃源岩及部分受到调整和改造的须家河组原生气藏, 经长距离运移后在蓬莱镇组圈闭中聚集成藏。气层集中在蓬莱镇组中上部, 天然气干燥系数大, 以煤型气为主。流体包裹体分析表明, 研究区内蓬莱镇组共经历 3 期热流体活动, 前两期分别为液态烃充注及气液混合烃充注, 但并未形成规模油藏; 第 3 期为大规模天然气充注, 对应成藏时间为晚白垩世晚期至古近纪早期(78~34 Ma)。在此基础上, 结合地质构造演化、烃源岩生排烃期、储层致密化窗口及生储盖组合特征, 确定了蓬莱镇组天然气藏的形成过程及成藏特征: 蓬莱镇组下部储层在晚白垩世中期达到致密化, 已不利于天然气聚集成藏; 喜山运动时期, 下伏须家河组气藏受到调整和改造, 早期发育的深大断裂得以扩展, 大量深部气源沿断层向上运移至蓬莱镇组中上部, 形成了浅层次生气藏。

**关键词:** 川西坳陷; 什邡气田; 蓬莱镇组; 致密砂岩; 成藏期; 成藏过程

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号: 1000-3657(2015)02-0515-10

## Accumulation process and characteristics of gas reservoirs in the Penglaizhen Formation of Shifang area, Western Sichuan Depression

ZHAO Shuang-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-huan<sup>1,2</sup>, LI Wen-hao<sup>3</sup>, LIU Xing<sup>1,2</sup>, JIANG Li-na<sup>1,2</sup>

(1. *China University of Petroleum, Beijing 102249, China*; 2. *State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*; 3. *Research Institute of Unconventional Petroleum and Renewable Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China*)

**Abstract:** Gas reservoirs in the Penglaizhen Formation within Shifang area of Western Sichuan Depression are shallow sub-tight sandstone secondary ones, whose formation mechanism differs from that of tight sandstone gas reservoirs in the underlying Xujiache

收稿日期: 2014-12-28; 改回日期: 2015-01-30

基金项目: “十二五”国家科技重大专项(2011ZX05002-006)资助。

作者简介: 赵双丰, 男, 1982 年生, 博士生, 地质学专业; E-mail: 48567375@qq.com。

通讯作者: 张枝焕, 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 从事有机地球化学的科研和教学工作; E-mail: zhangzh3996@vip.163.com。

Formation. Lithologic gas reservoirs occur mainly in the study area. Gas is concentrated in the middle and upper Penglaizhen Formation with high dry coefficients. Gas is mainly from coal-measure source rock in the underlying Xujiache Formation, with a bit originating from the original reservoirs suffering from adjustment and transformation. Anyhow, it is dominated by coal-type gas. Fluid inclusion analysis shows that there are three stages of thermal fluid flow in the Penglaizhen Formation, with the first two stages being respectively liquid hydrocarbons and gas liquid mixture of hydrocarbons charge without large-sized reservoirs and the third being large-scale natural gas filling whose corresponding accumulation time was from late Cretaceous to early Paleogene (78–34 Ma). On such a basis and in combination with the tectonic evolution, the stages of hydrocarbon generation and expulsion, reservoirs densification and source-reservoir-cap assemblages, the authors determined the formation and accumulation characteristics of gas reservoirs in Penglaizhen Formation. The lower part reservoir of Penglaizhen achieved densification during the Late Cretaceous. During the Himalayan Movement, Xujiache gas reservoir was adjusted and renovated, and the earlier-formed deep faults were extended. A lot of deep gas source migrated upward to the upper part of Penglaizhen along faults, thus forming the shallow secondary gas reservoirs.

**Key words:** Western Sichuan Depression; Shifang gas field; Penglaizhen Formation; tight sandstone; pool-forming stages, accumulation process

**About the first author:** ZHAO Shuang-feng, male, born in 1982, doctor, majors in geology; E-mail: 48567375@qq.com.

**About the corresponding author:** ZHANG Zhi-huan, male, born in 1962, professor, supervisor of doctor candidates, engages in study and teaching of organic geochemistry; E-mail: zhangzh3996@vip.163.com.

什邡气田是川西地区新近重点勘探区块,位于孝泉—丰谷含气构造南部斜坡带,与新场和马井大中型气田相连,紧邻成都凹陷生烃中心(图1)。至2012年已探明天然气资源储量 $1038.72 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,勘探潜力巨大。什邡气田目前主力勘探层位为侏罗系蓬莱镇组,该套地层平均埋深1100~2400 m,储层孔隙度介于4.75%~14.86%,渗透率介于 $0.04 \times 10^{-3}$ ~ $1.80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于常规一致密砂岩气藏<sup>[1-5]</sup>。其形成机制不同于下伏须家河组储层的致密砂岩气。理清什邡地区蓬莱镇组天然气的分布特征及地球化学特征,明确气藏的形成过程,可为研究区天然气勘探提供地质-地球化学依据,有利于提高研究区内天然气的勘探开发效率。

本文在大量文献调研、岩心观察及实验数据分析的基础上,对什邡地区天然气的分布特征和地球化学特征进行了细致分析和总结。并选取了多个典型砂岩样品进行流体包裹体分析测试,对包裹体的特征及均一化温度进行详细对比分析,结合埋藏史和热演化史,确定了蓬莱镇组油气成藏期。在此基础上,结合研究区地质构造演化特征、烃源岩生排烃期和储层致密化时间,进一步明确什邡地区蓬莱镇组气藏的形成过程。

## 1 气藏分布及天然气地球化学特征

什邡地区紧邻成都凹陷生烃中心,其西南与马

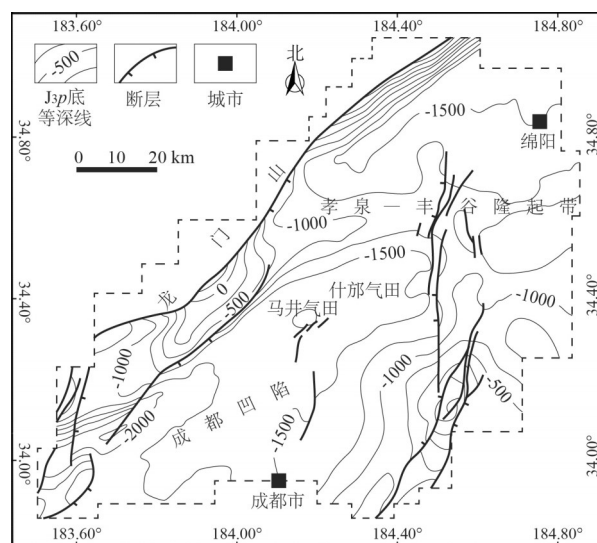


图1 什邡气田构造位置图  
Fig.1 Structural position of the Shifang gas field

井气田相邻,属于马井主体构造向北东方向的延伸。研究区内发育大量岩性圈闭,油气成藏条件好,天然气充注程度高,是川西地区近年重点勘探区块。什邡地区断层并不发育,在邻区马井构造高点东南翼发育有一系列逆断层,其中部分断层规模较大,向下延伸至中三叠统以下,向上断至侏罗系蓬莱镇组,总体上表现为由浅至深呈逐渐增强的趋势,这一系列断层对马井—什邡地区蓬莱镇组天然气的运聚成藏起到了重要作用。

### 1.1 天然气分布特征

侏罗系蓬莱镇组是什邡气田主力勘探目的层,现今埋深为1100~2400 m,沉积厚度800~1000 m,为三角洲—湖相沉积,主要含气储层发育在水下分流河道、河口坝等有利沉积微相砂体中。岩性以泥页岩与粉砂岩、砂岩互层为主,含少量砾岩,胶结类型多为孔隙式。由于分流河道的迁移、摆动,导致储集岩的岩性在纵横向上变化较大,非均质性较强,形成大量沿上倾方向尖灭的岩性圈闭。

蓬莱镇组自上而下可划分为蓬四段( $J_3p^4$ )、蓬三段( $J_3p^3$ )、蓬二段( $J_3p^2$ )、蓬一段( $J_3p^1$ ),分别对应着蓬一( $JP_1$ )、蓬二( $JP_2$ )、蓬三( $JP_3$ )、蓬四( $JP_4$ )4组气藏,各气藏纵向上相互叠置,每一段储层内均发育多套具有一定展布规模的砂组。录井资料显示,蓬莱镇组各段气藏总体含气性较好,地层中无明显气水界线,地层水主要分布于蓬四段以及蓬三段上部。气层主要集中在蓬莱镇组中上部,其中蓬四段 $JP_1^5$ ,蓬三段 $JP_2^2$ 、 $JP_2^3$ 、 $JP_2^4$ 、 $JP_2^5$ 以及蓬二段 $JP_3^{8+9}$ 等多套砂组相对发育,这几套砂组分布范围较广、物性条件好及含气性好,是什邡地区的主力产层(图2)。什邡2、什邡3、什邡5、什邡7等多口气井在上述产层经加砂压裂工艺改造后均获工业气流,预示着良好的勘探前景。

### 1.2 天然气地球化学特征

蓬莱镇组天然气主要由烃类气体和非烃类气体组成(表1),以烃类气体为主,其中甲烷含量占绝对优势,乙烷含量相对较低,一般小于3.00%,丙烷及丙烷以上重烃含量甚微。干燥系数基本在95.00%以上,为典型的干气特征。非烃气体含量不

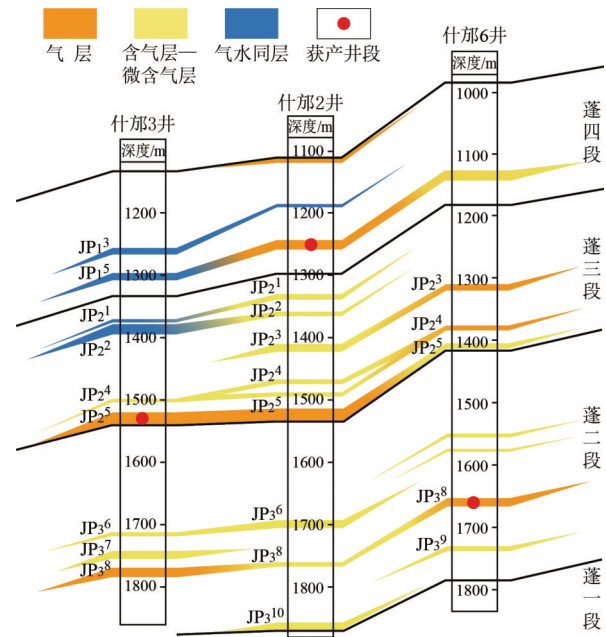


图2 什邡地区蓬莱镇组联井剖面  
Fig.2 Well-linking profile of Penglaizhen Formation in Shifang area

高,主要为 $N_2$ ,其他非烃气体如 $CO_2$ 、 $H_2$ 、 $He$ 等含量很低。

蓬莱镇组天然气烷烃碳同位素值 $\delta^{13}C_1$ 为 $-33.1\text{‰}$ ~ $-30.6\text{‰}$ , $\delta^{13}C_2$ 为 $-26.5\text{‰}$ ~ $-22.6\text{‰}$ , $\delta^{13}C_3$ 为 $-25.1\text{‰}$ ~ $-20.6\text{‰}$ , $\delta^{13}C_4$ 为 $-21.9\text{‰}$ ~ $-20.4\text{‰}$ 。与川西地区陆相天然气碳同位素平均值相比,研究区内天然气甲烷碳同位素相对偏重,而乙烷、丙烷、丁烷碳同位素相对偏轻。总体而言,蓬莱镇组天然气符合 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$ 的正碳同位素系列分布特征,表现为有机成因气的特征(表2),按戴金星<sup>[6]</sup>提出的中

表1 什邡地区蓬莱镇组天然气组分特征

Table 1 Compositional characteristics of natural gas in Penglaizhen Formation of Shifang area

井号	深度/m	CH <sub>4</sub> /%	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /%	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> /%	iC <sub>4</sub> /%	nC <sub>4</sub> /%	iC <sub>5</sub> /%	nC <sub>5</sub> /%	CO <sub>2</sub> /%	N <sub>2</sub> /%	H <sub>2</sub> /%	干燥系数/%
什邡 31	-1246	94.09	3.32	0.82	0.18	0.21	0.07	0.05	/	1.18	/	95.29
什邡 20	-1335	94.24	2.49	0.51	0.09	0.09	0.05	0.02	0.14	1.64	0.71	96.65
什邡 10	-1359	95.81	2.27	0.49	0.11	0.10	0.04	0.02	0.09	1.04	0.02	96.92
什邡 17	-1414	94.81	2.23	0.44	0.08	0.08	0.03	0.00	0.14	1.84	0.35	97.06
什邡 9	-1460	95.86	1.50	0.33	0.05	0.09	0.02	0.02	/	1.97	/	97.95
什邡 16	-1767	93.57	2.48	0.45	0.08	0.08	0.03	0.00	0.07	3.25	/	96.77
马井 102	-1920	95.59	2.16	0.40	0.08	0.08	0.04	0.01	0.61	0.97	/	97.18
马井 103	-1965	95.44	2.22	0.44	0.09	0.08	0.04	0.02	0.42	1.11	/	97.06

表2 什邡地区蓬莱镇组天然气碳同位素分布特征  
Table 2 Distribution of carbon isotopes in Penglaizhen Formation of Shifang area

井号	深度/m	$\delta^{13}C_1/\text{‰}$	$\delta^{13}C_2/\text{‰}$	$\delta^{13}C_3/\text{‰}$	$i\delta^{13}C_4/\text{‰}$	$n\delta^{13}C_4/\text{‰}$
什邡 38	-770	-32.7	-26.5	-25.1	/	/
什邡 20	-1332	-33.1	-25.0	-22.0	-21.5	-21.0
什邡 10	-1359	-32.1	-25.0	-22.5	-21.9	-21.6
什邡 7	-1400	-31.6	-24.8	-22.9	/	/
什邡 17	-1447	-31.9	-23.8	-20.7	-21.4	-21.4
什邡 16	-1767	-32.5	-24.7	-21.7	-20.8	-21.0
什邡 23	-1818	-30.6	-22.6	-20.6	/	-20.4
川西陆相天然气碳同位素均值 (148 个数据)		-34.1	-23.9	-21.7		-20.4

国陆相地层天然气类型判别标准,属典型的煤型气。

前人研究表明,天然气在运移过程中,由于分子极性差别,会产生分馏效应,沿运移方向上分子量小且极性较弱的组分更容易运移。目前较常用的天然气运移参数包括甲烷碳同位素,气体干燥系数,  $N_2/C_2H_6$ ,  $iC_4/nC_4$ ,  $CO_2/CH_4$ 等<sup>[7-10]</sup>。对比蓬莱镇组天然气中上述各参数,发现其平均值在纵向上均呈规律性变化(图3)。随地层变新、埋深变浅,天然气中甲烷含量和干燥系数逐渐增加;同时,  $N_2/C_2H_6$ 和  $iC_4/nC_4$ 比值也随埋深变浅而增大,而甲烷碳同位素值则随埋深的变浅而逐渐变轻。上述数据均表明蓬莱镇组天然气是由下伏地层经过较长距离向上运移而来。前人研究成果证实,川西地区蓬莱镇组

天然气主要来自于下伏须家河组煤系烃源岩以及部分受到调整和改造的须家河组原生气藏<sup>[11-13]</sup>。

## 2 关键成藏要素分析

关于川西地区陆相天然气藏的形成时间、期次划分以及成藏过程,学术界仍存在一定争议<sup>[14-17]</sup>。本文选取多个什邡地区蓬莱镇组储层砂岩样品进行包裹体特征分析(表3),依据储层流体包裹体的分布特征及与烃类包裹体相伴生的盐水包裹体均一化温度,结合研究区地层构造演化条件,对蓬莱镇组天然气藏的成藏期进行了讨论。在此基础上,进一步分析了天然气成藏期与烃源岩生排烃期及储层演化之间的配置关系。

### 2.1 热流体活动期及天然气成藏期

蓬莱镇组砂岩包裹体样品分析表明,包裹体主要分布于环石英颗粒加大边内侧或石英颗粒的微裂隙中。部分样品砂岩粒间空隙中充填深褐色、黑褐色固体沥青,无荧光显示(图4-a)。根据油气包裹体形态特征及其与宿主矿物的关系,将包裹体分为3类(表3):

第1类油气包裹体发育于石英颗粒成岩次生加大早中期,发育丰度低( $GOI < 4\%$ ),均为环石英颗粒加大边内侧成带分布或沿切及石英颗粒次生加大边的微裂隙成线状/带状分布,为呈深褐色或灰褐色的液烃包裹体(图4-b),与烃类包裹体伴生的盐水包裹体均一化温度分布范围为 $55\sim 73^\circ\text{C}$ 。

第2类油气包裹体发育时间较第1类略晚,普

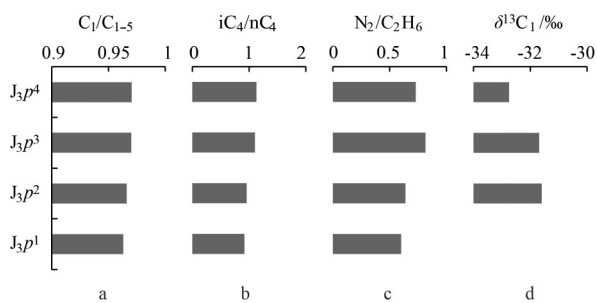


图3 什邡地区蓬莱镇组天然气中各组分含量及碳同位素平均值在纵向上的分布特征

Fig.3 Histogram showing content of each component and average ratio of carbon isotopes of natural gas in vertical direction

表3 什邡地区蓬莱镇组砂岩储层流体包裹体特征  
Table 3 Characteristic statistics of reservoir inclusions in Shifang area

井号	深度/m	层位	粒间充填	期次	包裹体类型	GOI/%	均一化温度/%
什邡3	-1530	J <sub>3</sub> p <sup>3</sup>	固体沥青	2期	液烃包裹体	1±	62~73
					气烃包裹体	/	87~107
什邡2	-1250	J <sub>3</sub> p <sup>4</sup>	固体沥青	1期	液烃包裹体	2±	55~73
什邡5	-1504	J <sub>3</sub> p <sup>3</sup>	/	1期	(气)液烃包裹体	<1	78~91
什邡3	-1393	J <sub>3</sub> p <sup>3</sup>	固体沥青	2期	液烃包裹体	4±	65~69
					气烃包裹体	/	101~108

注:表中均一化温度为与烃包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度。

遍为环石英颗粒加大边内侧成带分布或沿切及石英颗粒的微裂隙成线状或带状分布。为呈淡黄色、黄色的液烃包裹体与呈灰色的气烃包裹体共生,其中液烃包裹体约占35%,气液烃包裹体约占65%。

UV激发荧光下,显示绿色、黄绿色荧光(图4-c)。包裹体发育丰度普遍较低,GOI<1%,与烃类包裹体伴生的盐水包裹体均一化温度介于78~91℃。

第3类油气包裹体发育于石英颗粒成岩次生加

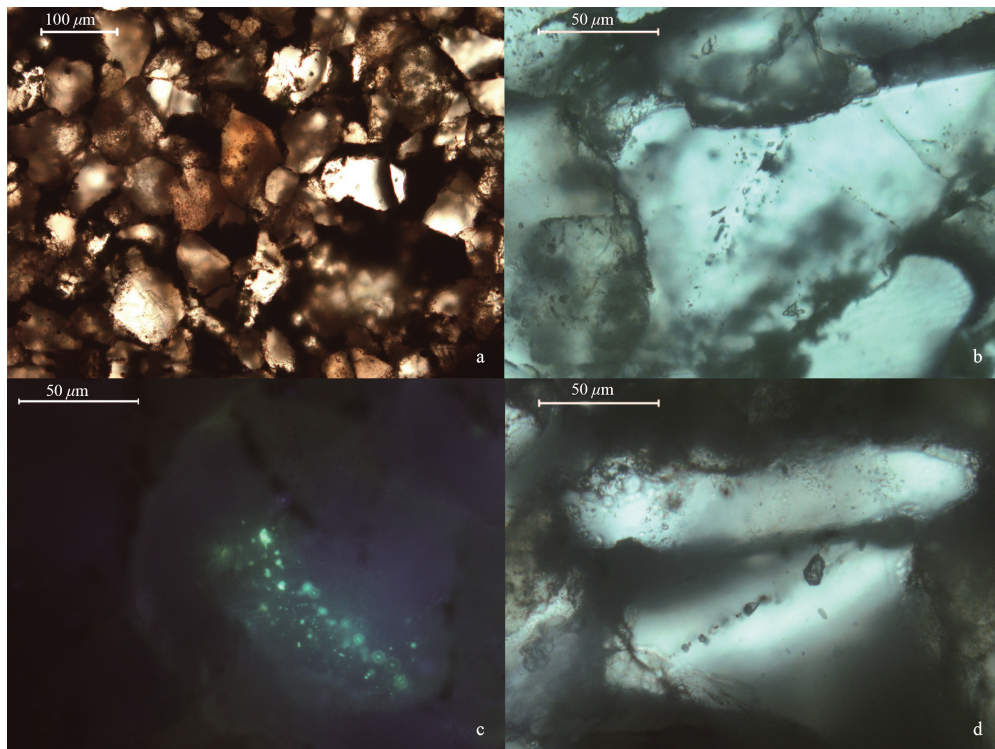


图4 储层包裹体单偏光照片

a—什邡2井-1250 m, 砂岩粒间空隙中普遍充填深褐色、黑褐色固体沥青, 无荧光显示; b—什邡3井-1530 m, 沿切穿石英颗粒的微裂隙成带分布、呈深褐色的液烃包裹体; c—什邡5井-1504 m(UV激发荧光照片), 沿切穿石英颗粒的微裂隙成带分布、呈淡黄色-灰色的(气)液烃包裹体, 显示绿色荧光; d—什邡3井-1530 m, 沿切穿石英颗粒的微裂隙成带分布、呈深灰色的气烃包裹体

Fig. 4 Photograph of reservoir inclusions (plainlight)

a—Shifang2—1250 m, sandstone gap filled with dark brown and dark brown solid bitumen, no fluorescence observed; b—Shifang 3—1530 m, dark brown liquid hydrocarbon inclusions in microcracks of quartz grains in a band profile; c—Shifang5—1504 m (UV excitation fluorescence), yellowish - gray (gas) liquid hydrocarbon inclusions in microcracks of quartz grains in a band profile, green fluorescence; d—Shifang 3—1530 m, gray gas hydrocarbon inclusions in microcracks of quartz grains in a band profile

大期后,均为沿切穿石英颗粒的成岩期后微裂隙成线状/带状分布,为呈深灰色的气烃包裹体或呈灰色的气烃+盐水包裹体(图4-d),盐水包裹体均一化温度分布范围87~108℃。单相气烃包裹体的出现,证明热演化已达到高过成熟阶段,经激光拉曼光谱分析表明,包裹体中烃类主要为甲烷(图5)。

在上述分析基础上,结合埋藏史和热演化史可知,蓬莱镇组存在3期热流体活动(图6~7),与烃类包裹体伴生的盐水包裹体均一温度分别为55~73℃、78~91℃、87~107℃。第一期为液态烃充注,对应时间为早白垩世晚期至晚白垩世早期(距今102~90 Ma);第二期为气液混合烃充注,对应时间为晚白垩世中期(距今86~75 Ma);第三期为大量气

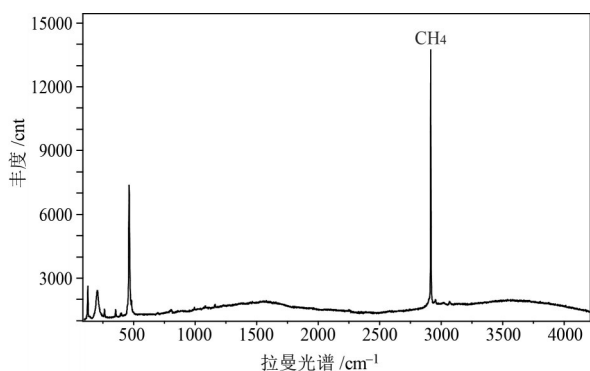


图5 什邡3井流体包裹体显微激光拉曼光谱图  
Fig. 5 Microscopic laser Raman spectra of fluid inclusions in Well Shifang 3

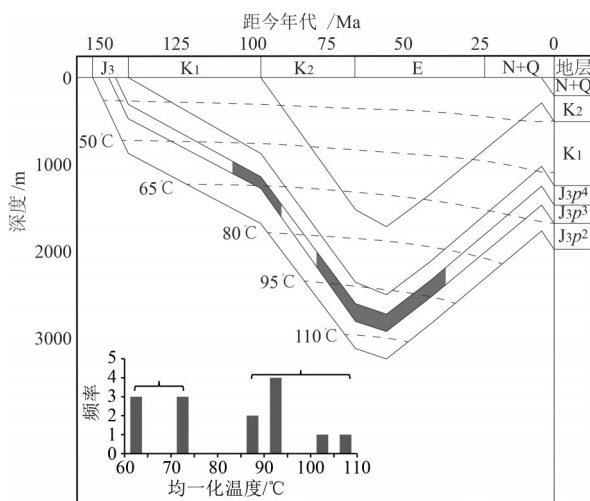


图6 什邡3井埋藏史及热演化史图  
Fig. 6 Burial history of J3p source rock in Well Shifang 3

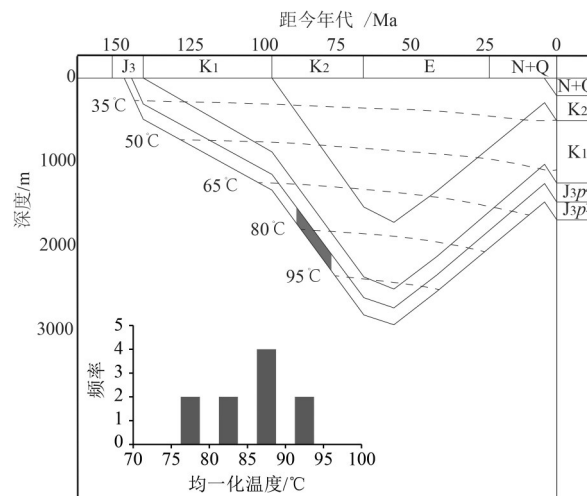


图7 什邡5井埋藏史及热演化史图  
Fig. 7 Burial history of J3p source rock in Well Shifang 5

态烃充注,对应时间为晚白垩世晚期至古近纪早期(距今78~34 Ma)。需要说明的是,由于前两期包裹体GOI丰度很低(普遍小于4%),在蓬莱镇组并未形成规模油藏,实际勘探中也未发现油藏,因此,可以认为什邡蓬莱镇组主成藏期仅有一期,即晚白垩世晚期至古近纪早期的大规模天然气成藏。

## 2.2 成藏期与生排烃期及储层演化的配置关系

### 2.2.1 烃源岩生排烃期

川西坳陷陆相地层主力烃源岩为以Ⅲ型干酪根为主的上三叠统须家河组煤系烃源岩及以Ⅱ型干酪根为主的上三叠统马鞍塘—小塘子组烃源岩,目前这两套烃源岩有机质热演化程度均较高,  $R_o$  值普遍大于2%<sup>[18-19]</sup>,处于干气生成阶段。

关于川西陆相烃源岩生排烃期的研究成果较多,多数学者认为上述两套烃源岩分别存在两个生烃高峰<sup>[19-21]</sup>。其中,马鞍塘—小塘子组烃源岩在须家河组沉积早期即开始生成少量油气,在须三段沉积末期达到生油高峰,并在蓬莱镇组沉积末期达到生气高峰,而须家河组烃源岩的两个生烃高峰期,分别为晚三叠世和晚侏罗世。马鞍塘—小塘子组烃源岩的排烃高峰期不晚于晚侏罗世,而须家河组烃源岩的排烃高峰出现在晚侏罗世至晚白垩世之间。

总体上来说,晚侏罗世至晚白垩世为川西地区陆相烃源岩的主要生排烃高峰期,此时,受燕山运动的影响,北部的孝泉—丰谷构造带持续隆升,什邡地区成为了有利的岩性圈闭发育带和油气运聚

指向区。由此可知,川西地区主力烃源岩的生排烃期与研究区内蓬莱镇组天然气大规模成藏时间(晚白垩世晚期至古近纪早期)匹配良好。

2.2.2 储层致密化时间

致密砂岩气是指赋存于低孔隙度和低渗透率砂岩储层中的非常规天然气,是非常规油气资源中的重要类型。国内学者普遍将孔隙度小于12%,且渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为致密砂岩储层的界定标准<sup>[2-5]</sup>。

什邡地区蓬莱镇组储层整体岩性致密,裂缝不发育,储集空间主要以原生孔隙为主。储层非均质性较强,孔隙度和渗透率变化范围较大,上部( $J_3p^4$ 与 $J_3p^3$ )储层孔隙度为9.00%~14.86%,渗透率为 $0.35 \times 10^{-3} \sim 1.80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;下部( $J_3p^2$ 与 $J_3p^1$ )储层孔隙度为4.75%~11.83%,渗透率为 $0.04 \times 10^{-3} \sim 1.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图8~9)。因此蓬莱镇组上部属于常规砂岩储层,而下部逐渐过渡为致密砂岩储层。此外,蓬莱镇组储层孔渗条件与含气级别具有很好的相关性,气层主要分布于孔隙度和渗透率相对较好的 $J_3p^4$ 与 $J_3p^3$ 储层中,而下部砂体储层总体含气性很差。

现今川西地区蓬莱镇组砂岩储层大部分已进入了晚成岩A期<sup>[22]</sup>。压实作用和胶结作用是下部储层( $J_3p^2$ 、 $J_3p^1$ )致密化的主要原因,同时自生矿物的沉淀对储层致密化也有重要的影响。结合埋藏史可知(图10),侏罗系沉积后,随即进入快速埋深压实阶段,砂岩储层中原生孔隙急剧降低;白垩纪后,蓬莱镇组埋深持续加大,在研究区内最大埋深

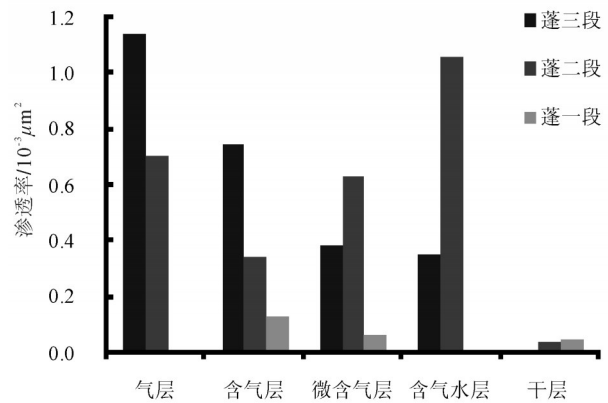


图9 什邡地区蓬莱镇组储层渗透率特征  
Fig. 9 Reservoir permeability characteristics of Penglaizhen Formation in Shifang area

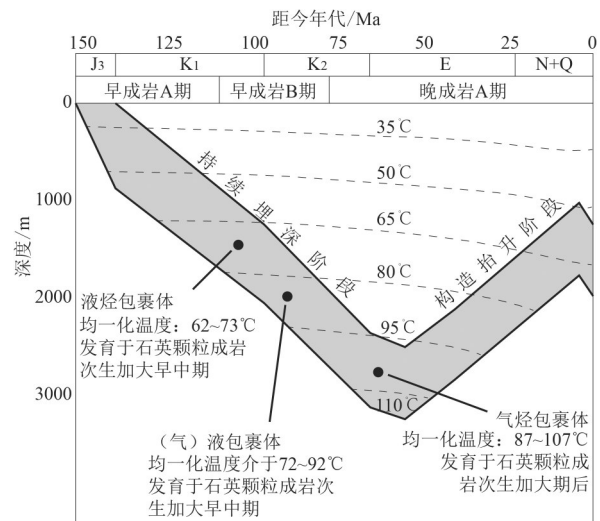


图10 什邡地区储层成岩演化史与埋藏史关系图  
Fig.10 The relationship between diagenetic evolution history and burial history

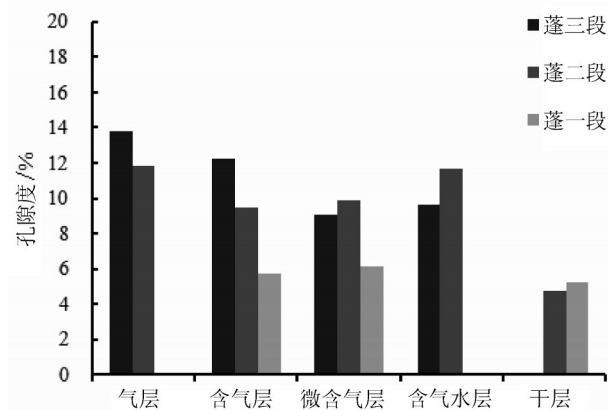


图8 什邡地区蓬莱镇组储层孔隙度特征  
Fig. 8 reservoir porosity characteristics of Penglaizhen Formation in Shifang area

3300 m,四川盆地较高的古地温大大提高了砂岩的压实速率<sup>[23]</sup>。机械压实和胶结作用导致储层孔隙度进一步缩减,蓬莱镇组下部储层致密化程度达到最大;晚白垩世中期后,进入晚成岩A期,蓬莱镇组储层在这一阶段先后经历了两期溶蚀作用,对储层物性具有一定的改善效应。由此可知,在天然气大规模成藏之前,蓬莱镇组下部 $J_3p^2$ 与 $J_3p^1$ 已经形成了致密化储层,而下伏须家河组烃源岩生成的天然气向上运移至蓬莱镇组后,只能选择物性相对较好的

$J_3p^4$ 与 $J_3p^3$ 储层聚集成藏,这是什邡地区获产气层多分布于蓬莱镇组上部的主要原因。

### 3 成藏过程分析

在上述分析基础上,结合什邡地区构造地质背景及天然气运移特征<sup>[24-28]</sup>,确定了蓬莱镇组气藏的形成过程(图11~12)。

下伏上三叠统烃源岩在晚三叠世末期即开始生烃,烃类以未熟—低熟油气为主。此时受构造挤压作用的影响,孝泉—丰谷背斜构造带开始逐渐隆升,什邡地区发育的大量岩性圈闭成为油气聚集的有利指向。烃源岩生成的油气在满足自身吸附和孔隙水溶解后,运移至须家河组砂岩储层中聚集成藏。实验分析数据证实,研究区内德阳1井须四段储层液烃包裹体GOI高达8%,说明在须家河组储层中确实存在过古油层。

蓬莱镇组沉积末期,在强烈的逆冲作用下,马井构造高点东南翼形成了一系列逆断层,断裂沟通了须家河组原生油气藏与浅层侏罗系圈闭。下伏须家河组部分古油藏受到断裂破坏,少部分原油沿断层向上运移,但由于油源不充足,在蓬莱镇组并未形成大规模油气聚集。

进入白垩纪后,上三叠统烃源岩逐渐达到生排气高峰,古油藏中残留的原油也在高温作用下不断裂解生成原油裂解气,并在须家河组储层中形成了大量原生气藏。此时,随着地层埋深持续加大,在机械压实和胶结作用共同影响下,蓬莱镇组储层孔

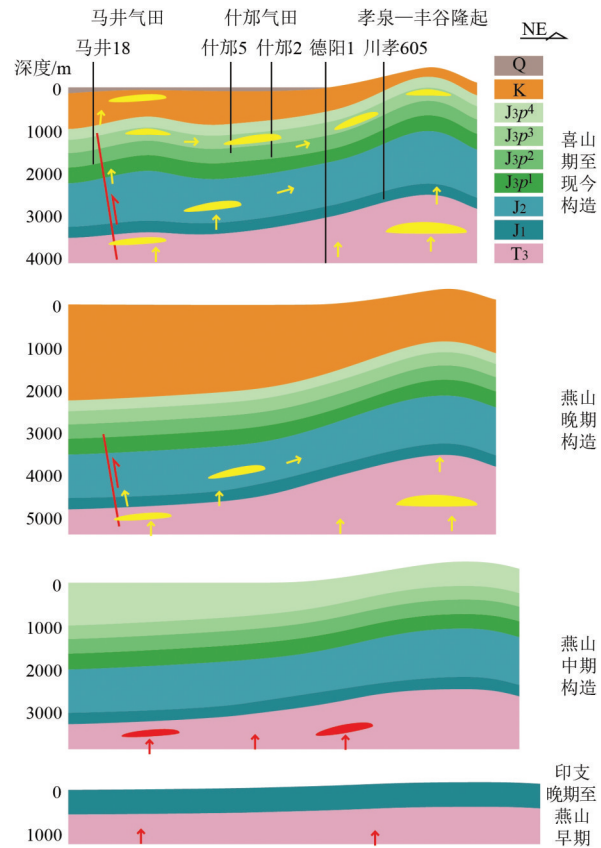


图12 蓬莱镇组天然气成藏模式图  
Fig. 12 Schematic diagram showing accumulation process of Penglaizhen Formation in Shifang area

隙空间进一步缩减,至晚白垩世沉积中期,储层致密化程度达到最大,蓬莱镇组下部形成的致密砂岩储层,已不利于天然气聚集成藏。

喜山运动时期,须家河组部分原生气藏受到调整和改造,早期发育的深大断裂得以扩展,大量深部气源沿断层向上运移至蓬莱镇组中上部砂岩储层中,形成了大规模浅层次生气藏,对应成藏时间为晚白垩世晚期至古近纪早期。

实钻证实,研究区内蓬莱镇组上覆白垩系以砂泥互层为主,平均厚度约1000 m,其间含有分布广泛的大段泥岩层,具有极好的封盖性能,为蓬莱镇组气藏提供了良好的保存条件。

### 4 结 论

什邡地区蓬莱镇组砂岩储层物性条件较差,上部( $J_3p^4$ 、 $J_3p^3$ )为常规砂岩储层,下部( $J_3p^2$ 、 $J_3p^1$ )为致密砂岩储层。蓬莱镇组储层致密化时间发生在天然

地质年代/Ma	T <sub>3</sub>	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	K	E	N
	200		150		100	50	
构造运动	印支期		燕山期			喜山期	
孝泉—新场构造背斜演化	初始发育		持续隆升			最终定型	
断裂发育	—————						
成藏期	—————						
盖层发育	—————						
有效圈闭			—————			$J_3p^3 + J_3p^4$ $J_3p^1 + J_3p^2$	
储层发育			—————				
生烃高峰期	—————				—————		
烃源岩发育	—————						

图11 什邡地区蓬莱镇组气藏关键成藏要素匹配关系  
Fig. 11 Matching relation of key reservoir elements in Penglaizhen Formation of Shifang area



气大规模充注之前,因此下部致密砂岩储层不利于天然气聚集成藏,气层集中在蓬莱镇组中上部。

蓬莱镇组天然气主要来自于下伏须家河组煤系烃源岩及部分受到调整和改造的须家河组原生气藏。天然气以煤型气为主,烃类组分含量高,干燥系数大,CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>等非烃气体含量较少。

蓬莱镇组储层共经历了3期热流体活动,伴生的盐水包裹体均一温度分别为55~73℃、78~91℃、87~107℃。前两期分别为液态烃充注及气液混合烃充注,但测试包裹体GOI丰度均很低,说明并未形成规模油藏;第3期为大量气态烃充注,对应成藏时间为晚白垩世晚期至古近纪早期(距今78~34 Ma)。

**致谢:**感谢审稿专家及编辑部杨艳老师对论文提出的宝贵修改意见!

#### 参考文献(References):

- [1] 杨克明, 庞雄奇. 致密砂岩气藏形成机制与预测——以川西坳陷为例[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
Yang Keming, Pang Xiongqi. Formation Mechanism and Prediction of Tight Sandstone Gas Reservoir: A Case of West Sichuan Depression[M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese with English abstract).
- [2] 关德师, 牛嘉玉. 中国非常规油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.  
Guan Deshi, Niu Jiayu. Unconventional Petroleum Geology of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995(in Chinese).
- [3] Stephen A Holditch. Tight gas sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 2006, 58(6): 86–93(in Chinese with English abstract).
- [4] 杨晓宁, 张惠良, 朱国华. 致密砂岩的形成机制及其地质意义——以塔里木盆地英南2井为例[J]. 海相油气地质, 2005, 10(1): 31–36.  
Yang Xiaoning, Zhang Huiliang, Zhu Guohua. Formation mechanism and geological implication of tight sandstones: A case of Well YN-2 in Tarim Basin[J]. Marine origin Petroleum Geology, 2005, 10(1): 31–36(in Chinese with English abstract).
- [5] 姜振学, 林世国, 庞雄奇. 两种类型致密砂岩气藏对比[J]. 石油实验地质, 2006, 28(3): 210–219.  
Jiang Zhenxue, Lin Shiguo, Pang Xiongqi, et al. The comparison of two types of tight sand gas reservoir[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(3): 210–219(in Chinese with English abstract).
- [6] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(2/3): 1–40.  
Dai Jinxing. Characteristics of stable carbon and hydrogen isotopes of natural gas and identification of various natural gases[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(2/3): 1–40(in Chinese with English

- abstract).
- [7] 陈安定, 李剑锋. 天然气运移的地球化学指标研究[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(4): 38–67.  
Chen Anding, Li Jianfeng. The geochemical index study of natural gas migration[J]. Natural Gas Geoscience, 1994, 5(4): 38–67(in Chinese with English abstract).
- [8] 陈践发, 沈平, 黄保家, 等. 油气组分及同位素组成特征在莺琼盆地油气二次运移研究中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 91–95.  
Chen Jianfa, Shen Ping, Huang Baojia, et al. Application of contents of chemical components and isotopic composition of oil-gas to research on the secondary migration of Ying-qiong basin in China[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2000, 24(4): 91–95(in Chinese with English abstract).
- [9] 傅宁, 李友川, 刘东, 等. 东海平湖气田天然气运移地球化学特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 34–37.  
Fu Ning, Li Youchuan, Liu Dong, et al. Geochemical characteristics of natural gas migration in Pinghu gas field, East China Sea[J]. Petroleum Exploration & Development, 2005, 32(5): 34–37(in Chinese with English abstract).
- [10] 金之钧, 张发强. 油气运移研究现状及主要进展[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 263–268.  
Jin Zhijun, Zhang Faqiang. The research status and major progress of oil and gas migration[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 263–268(in Chinese with English abstract).
- [11] 沈忠民, 刘涛, 吕正祥, 等. 川西坳陷侏罗系天然气气源对比研究[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 577–582.  
Shen Zhongmin, Liu Tao, Lv Zhengxiang, et al. A comparison study on the gas source of Jurassic natural gas in the western Sichuan Depression[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 577–582(in Chinese with English abstract).
- [12] 蔡开平, 廖仕孟. 川西地区侏罗系气藏气源研究[J]. 天然气工业, 2000, 20(1): 36–41.  
Cai Kaiping, Liao Shimeng. A research on the gas source of Jurassic gas reservoirs in west Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(1): 36–41(in Chinese with English abstract).
- [13] 秦胜飞, 陶士振, 涂涛, 等. 川西坳陷天然气地球化学及成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 34–38.  
Qin Shengfei, Tao Shizhen, Tu Tao, et al. Characteristics of natural gas geochemistry and accumulation in western Sichuan Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 34–38(in Chinese with English abstract).
- [14] 张世华. 川西坳陷须三须四段含油气系统生排烃过程与主要成藏期关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(3): 252–255.  
Zhang Shihua. Relation between the main accumulation stage and the process of generation and expulsion of hydrocarbon in T<sub>3</sub>x<sup>3</sup>–T<sub>3</sub>x<sup>4</sup> petroleum system of Upper Triassic in the west Sichuan depression[J]. Journal of Chengdu University of Technology

- (Natural Sciences), 2006, 33(3): 252–255(in Chinese with English abstract).
- [15] 刘四兵, 沈忠民, 吕正祥, 等. 川西坳陷中段须二段天然气成藏年代探讨[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(5): 523–529.  
Liu Sibing, Shen Zhongmin, Lv Zhengxiang, et al. The discussion of natural gas geological age in T<sub>2</sub>x<sup>2</sup> formation of west Sichuan depression[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Natural Sciences, 2009, 36(5): 523–529(in Chinese with English abstract).
- [16] 冷济高, 李书兵, 杨长清. 利用流体包裹体确定川西坳陷孝泉—丰谷构造带须家河组天然气成藏期[J]. 天然气工业, 2011, 31(8): 38–42.  
Leng Jigao, Li Shubing, Yang Changqing. Determination of the time of gas accumulation in the Xujiache Formation of Xiaquan – Fenggu structural belt in the Western Sichuan Depression through fluid inclusion analysis[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8): 38–42(in Chinese with English abstract).
- [17] 冯杰瑞, 冷济高, 朱丽, 等. 应用流体包裹体厘定合兴场地区须家河组天然气成藏期次[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(5): 38–42.  
Feng Jierui, Leng Jigao, Zhu Li, et al. Determine the accumulation period of nature gas in Xujiache formation of Hexingchang area by fluid inclusion[J]. Lithologic Reservoir, 2011, 23(5): 38–42(in Chinese with English abstract).
- [18] 叶军. 川西坳陷马鞍塘组—须二段天然气成矿系统烃源岩评价[J]. 天然气工业, 2003, 23(1): 21–25.  
Ye Jun. Assessment of hydrocarbon source rocks in Xu – 2 member, Ma’antang Formation, gas system in west Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(1): 21–25(in Chinese with English abstract).
- [19] 陈冬霞, 黄小惠, 李林涛, 等. 川西坳陷上三叠统烃源岩排烃特征与排烃史[J]. 天然气工业, 2010, 30(5): 41–45.  
Chen Dongxia, Huang Xiaohui, Li Lintao, et al. The hydrocarbon expulsion characteristics and history of source rocks in Upper Triassic of west Sichuan depression[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(5): 41–45(in Chinese with English abstract).
- [20] 曹烈, 徐殿桂, 黄川. 川西坳陷上三叠统一侏罗系烃源岩生烃史研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(12): 22–24.  
Cao Lie, Xu Diangui, Huang Chuan. The study of hydrocarbon generation history in Upper Triassic – Jurassic of west Sichuan depression[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(12): 22–24(in Chinese with English abstract).
- [21] 杨克明, 叶军, 吕正祥. 川西坳陷上三叠统成藏年代学特征[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 208–213.  
Yang Keming, Ye Jun, Lv Zhengxiang. Chronological characteristics of Upper Triassic reservoirs in western Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 208–213(in Chinese with English abstract).
- [22] 曾小英. 川西坳陷上侏罗统蓬莱镇组砂岩储层的成岩作用及对成藏的影响[J]. 矿物岩石, 1999, 19(4): 47–51.  
Zeng Xiaoying. Diagenesis of the Upper Jurassic Penglaizhen sandstones in the west Sichuan basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1999, 19(4): 47–51(in Chinese with English abstract).
- [23] 刘占国, 斯春松, 寿建峰. 四川盆地川中地区中下侏罗统砂岩储层异常致密成因机理[J]. 沉积学报, 2011, 29(4): 744–751.  
Liu Zhanguo, Si Chunsong, Shou Jianfeng. Abnormal dense formation mechanism in sandstone reservoir of middle – lower Jurassic in Sichuan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(4): 744–751(in Chinese with English abstract).
- [24] 李国新, 徐胜林, 陈洪德, 等. 川西坳陷中段中侏罗统上沙溪庙组层序岩相古地理及砂体展布特征[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 96–105.  
Li Guoxin, Xu Shenglin, Chen Hongde, et al. Sedimentary facies and sand body distribution of the Middle Jurassic Upper Shaximiao Formation in the middle segment of western Sichuan depression[J]. Geology in China, 2012, 39(1): 96–105(in Chinese with English abstract).
- [25] 刘焕, 彭军, 李丽娟, 等. 川西坳陷中段上三叠统须家河组砂岩特征及物源分析[J]. 中国地质, 2012, 39(5): 1271–1279.  
Liu Huan, Peng Jun, Li Lijuan, et al. Characteristics and provenance analysis of the Upper Tertiary Xujiache Formation sandstone in the middle part of West Sichuan depression[J]. Geology in China, 2012, 39(5): 1271–1279(in Chinese with English abstract).
- [26] 钱利军, 张成弓, 陈洪德, 等. 川西中段地区砂岩碎屑组分变化记录的沉积转型事件[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 517–528.  
Qian Lijun, Zhang Chenggong, Chen Hongde, et al. Jurassic sedimentary transformation event recorded by detrital components in the middle part of western Sichuan[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 517–528(in Chinese with English abstract).
- [27] 赖锦, 王贵文, 王书南, 等. 川中蓬莱地区须二段和须四段储层孔隙结构特征及影响因素[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 927–938.  
Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Shunan, et al. Pore structure characteristics and controlling factors of 2nd and 4th member reservoirs in Upper Triassic Xujiache Formation of Penglai area, central Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 927–938(in Chinese with English abstract).
- [28] 柳妮, 林良彪, 陈洪德, 等. 四川盆地川西北地区侏罗系自流井组大安寨段页岩气聚集条件[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1664–1672.  
Liu Ni, Lin Liangbiao, Chen Hongde, et al. Shale gas accumulation conditions in Daanzhai Member of lower Jurassic Ziliujing Formation in the northwest of Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1664–1672(in Chinese with English abstract).