

文章编号: 0253-9985(2011)03-0461-13

四川盆地奥陶系油气勘探前景

黄文明, 刘树根, 马文辛, 王国芝, 张长俊, 曾祥亮

(成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 在详细对比古隆起、斜坡地区奥陶系储层岩石学、水-岩流体活动特征基础之上, 应用岩相学和地球化学方法, 刻画奥陶系储层特征及其主控因素, 并从油气成藏角度探讨了四川盆地奥陶系油气勘探前景。研究表明, 奥陶系储层基质相对较致密, 川中地区储集空间类型主要为粒内溶孔-粒间溶孔-晶间孔组合, 川东南地区则是晶间孔和微裂缝组合, 储层发育明显受到原始沉积环境、古岩溶作用、原油充注和裂解及破裂作用控制。生油窗期、生气窗期保存条件相对较好, 形成了古油藏和古气藏; 燕山-喜马拉雅期以来的隆升, 使保存条件变差, 古气藏完全遭受破坏。在川南和川东地区, 红花园组 and 南津关组存在浅滩相颗粒白云岩或灰岩, 具备发育潜在优质储层的条件; 此外, 震旦系和寒武系古油藏原油裂解气是天然气成藏的重要气源, 为上覆的奥陶系油气成藏提供了气源保障。因此, 川南和川东地区应是四川盆地奥陶系有利的勘探地区。

关键词: 储层特征; 古油藏; 古气藏; 天然气; 奥陶系; 四川盆地

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Petroleum exploration potential of the Ordovician in the Sichuan Basin

Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, Wang Guozhi, Zhang Changjun and Zeng Xiangliang

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract Based on a detailed comparative study on reservoir petrology and fluid flow characteristics of water-rock between paleohigh and slope in the Sichuan Basin, the author characterized the features of the Ordovician reservoir and its major controlling factors by using petrographic and geochemical methods, and discussed the exploration potential of the Ordovician in the study area from the perspective of hydrocarbon accumulation. The matrix of the Ordovician reservoir is relatively tight. The reservoir spaces in central Sichuan Basin are dominated by intragranular dissolution pores, intergranular dissolution pores and intercrystalline pores, while that in southwestern Sichuan Basin are dominated by intercrystalline pores and microfractures. Reservoir development is significantly controlled by the initial sedimentary environment, paleo-karstification, oil charging and cracking and fracturing. The sealing conditions were relatively good during oil and gas generation, leading to the formation of paleo-oil/gas pools which were completely destructed later due to the uplifting since the Yanshanian-Himalayan period. Shallow shoal line or dolomitic grainstone occur in the Honghuayuan and Nanjungan Formations in southern and eastern Sichuan Basin, and are potential high-quality reservoirs. In addition, the gas from cracking of oil in the paleo-oil pools in the Sinian and Cambrian is an important gas sources for the gas accumulation in overlying Ordovician. Therefore, the southern and eastern Sichuan Basin may be the most favorable areas for oil and gas exploration in the Ordovician.

Key words reservoir characteristics; paleo-gas pool; paleo-oil pool; natural gas; Ordovician; Sichuan Basin

收稿日期: 2011-01-06

第一作者简介: 黄文明 (1983-), 男, 博士研究生, 石油地质。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 项目 (2005CB422106); 中国石化海相前瞻性项目 (PH08001)。

历经 40 余年勘探,四川盆地奥陶系仍未获得重大突破^[1-5],其中乐山-龙女寺古隆起区奥陶系曾被誉是为四川盆地下古生界天然气勘探的重要接替层位之一^[6-7]。虽然盆内钻达奥陶系的探井数量达数百口,但以奥陶系为完钻层位的井仅有 8 口,5 口沿古隆起区分布,却仅在威远地区有所发现。截止 2008 年 12 底,威远气田奥陶系共有 2 口井投入采气(威 97 井和威 72 井),累计采气 $0.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

勘探揭示,在古隆起周缘地区,如在安平店-高石梯构造,南津关组、宝塔组均见有沥青分布,表明上述地区存在奥陶系古油藏^[6-12],即古隆起区曾经具备良好的油气成藏条件,并且古油藏原油裂解气是叠合盆地天然气成藏的重要来源^[13-14]。因此,奥陶系具有形成中大型油气藏的“生、储、盖”油气地质条件,原油裂解气成藏率是制约天然气能否成藏和成藏规模的关键^[15-16]。同时,不同学者针对古隆起带奥陶系储层展开了较多研究^[8 17-19]。然而,对盆地其他地区奥陶系的研究却涉及甚少,而事实上,盆内不同地区奥陶系储层具有截然不同的岩性组合及水-岩作用,“生-储-盖”特征更是差异迥然,故岩溶斜坡-盆地地区奥陶系油气成藏特征与古隆起应具有显著差异,但未见相关的探讨。

因此,本文在详细对比古隆起、斜坡地区奥陶系储层岩石学、主要的水-岩流体活动特征基础上,刻画奥陶系储层特征及其主控因素。同时,从四川盆地海相油气成藏机理的共性入手,初步探讨奥陶系油气勘探前景。

1 地质概况

四川盆地是一个海相扬子克拉通盆地($Z-T_2$)和前陆盆地、坳陷盆地或构造盆地(T_3-N)相复合的叠合盆地^[1]。乐山-龙女寺古隆起为沉积剥蚀型古隆起,其在震旦纪末期便具雏形,总体向南西抬升、向东北方向倾没;加里东和海西旋回加剧了古隆起的进一步隆起和剥蚀,并最终定型^[20-21]。

下奥陶统主要由在寒武纪末期宽广的碳酸盐岩潮坪基础上发育的混积潮坪和开阔台地相的含

云泥岩、泥质白云岩以及含砂白云岩、砂岩等组成;中统为陆棚相的深灰色致密灰岩、瘤状灰岩及龟裂纹泥质灰岩;上统为斜坡-盆地相的黄灰色瘤状灰岩夹黑色炭质、含灰质及黑色含放射虫泥岩、泥灰岩(图 1)。

四川盆地奥陶系总厚 0~600 m,露头仅在华蓥山有出露,一般埋深 2 300 m~4 500 m,在深坳陷区奥陶系埋深可达 8 500 m。在古隆起,其厚度减薄,乃至缺失,与下伏的寒武系呈整合接触,与上覆下二叠统梁山组或中二叠统栖霞组呈假整合或低角度不整合接触。

2 储层特征

2.1 古隆起-斜坡区

2.1.1 岩石学特征

在古隆起核部,奥陶系遭受剥蚀作用较强,向斜坡地区,剥蚀作用逐渐减弱(图 1)。南津关组、分乡组、红花园组及宝塔组是奥陶系主要储层。南津关组和分乡组储层的主要岩石类型为晶粒白云岩、残余粒屑白云岩、生屑灰岩等,储集空间类型以粒内溶孔-粒间溶孔-晶间孔组合为主,孔隙中多充填有沥青。红花园组储层主要由鲕粒灰岩、砂屑灰岩和残余粒屑灰岩;宝塔组储层的主要岩石类型为(含)介形虫微晶灰岩、砂屑灰岩、细晶白云岩等,其中白云岩主要见于威远地区,川中地区仅见有灰岩类^[18]。

2.1.2 物性特征

川中地区奥陶系的基质物性总体较差,属特低孔低渗型储层。孔隙度平均值仅为 0.96%;孔隙度值小于 1% 的样品频率占主体,达 74%。渗透率介于 $3 \times 10^{-5} \times 10^{-3} \sim 1.96 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,各层系渗透率分布呈倒卧“L”型分布,渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品率仅为 0~6.7% (图 2)。

孔隙度、渗透率值分布明显具有 3 个区域,分别为孔隙较为发育的储层(I)、与裂缝相关的储层(II)和特低孔低渗型储层(III)(图 2)。总体上,鲕粒白云岩、砂屑白云岩,和粉晶-细晶白云岩具有相对较高的孔渗值,局部层段孔洞或微裂隙发育。

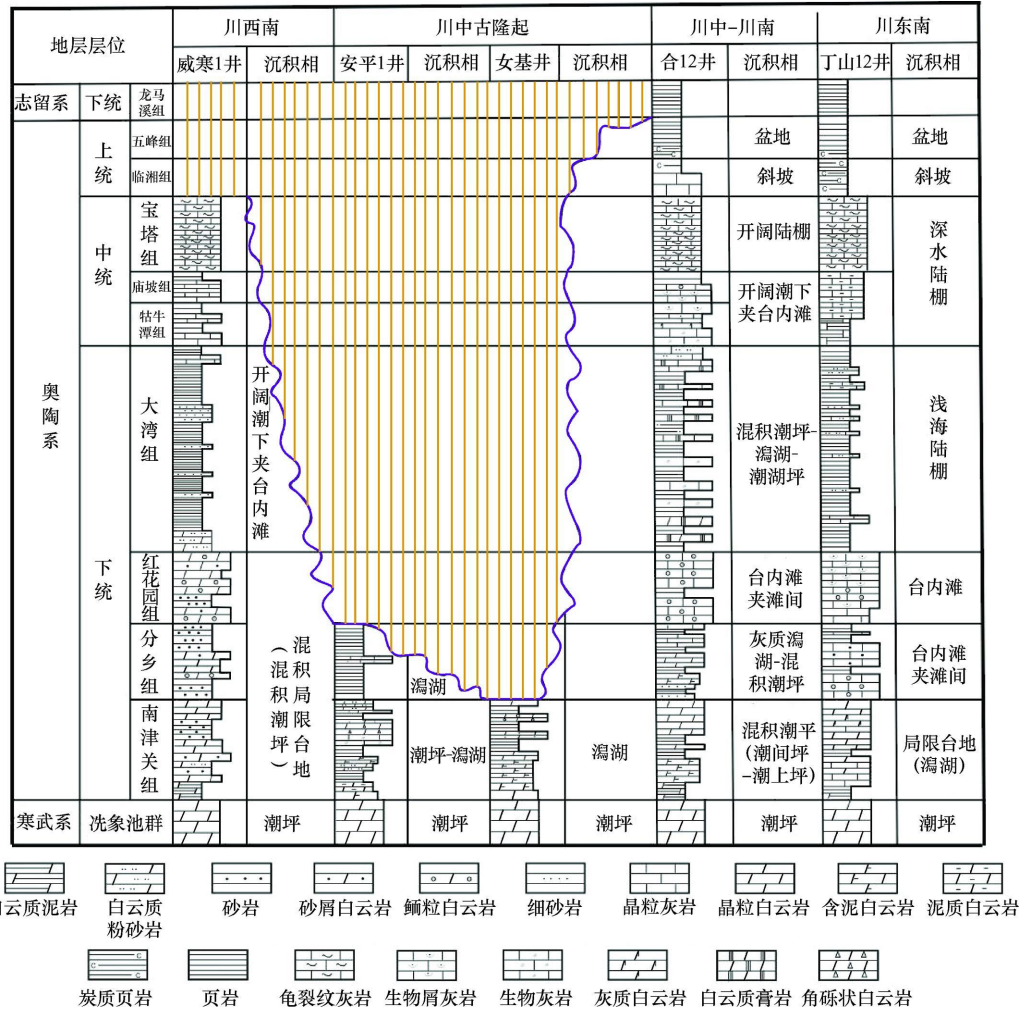


图 1 四川盆地奥陶系地层展布及沉积相

Fig. 1 Stratigraphy distribution sedimentary facies of the Ordovician in the Sichuan Basin

2.2 川东南凹陷区

2.2.1 岩石学特征

川东南奥陶系与川中-川南地区岩性差异较大。桐梓组(相当于南津关组和分乡组)储层主要由微晶灰岩、微-粉晶白云岩及砂屑灰岩组成,红花园组主要的储集岩类型则为亮晶砂屑生物屑灰岩及微晶灰岩,普遍具有白云岩化和弱硅化。宝塔组则与川中地区一样,同样为缓坡相的龟裂纹灰岩。

2.2.2 物性特征

川东南奥陶系为特低孔低渗型储层。涧草沟组(临湘组)、宝塔组和庙坡组(十字铺组)基质孔隙度小于 1% 的样品占 90%,仅宝塔组有 9% 的样

品位于 1% ~ 2% 区间。南津关组和大湾组孔隙度位于 2% ~ 3% 区间样品比率在 33.33% ~ 50%,大于 4% 的样品比率在 50% ~ 66.67%。红花园组具有相似的特征。奥陶系渗透率具有宽缓的“V”字型分布特征,并且渗透率明显高于川中地区,但向增大方向递减迅速,显示出裂缝型储层的分布特征(图 2)。

宝塔组储层明显集中分布在第 III 区,而涧草沟组为与微裂隙相关的储层,桐梓组、红花园组和湄潭组则孔隙较为发育型储层(图 2)。

2.3 储层发育主控因素

2.3.1 有利沉积相带

川中-川东南地区南津关组整体上为一套局限潮坪相含砂白云岩或白云岩,往东方向,陆源含

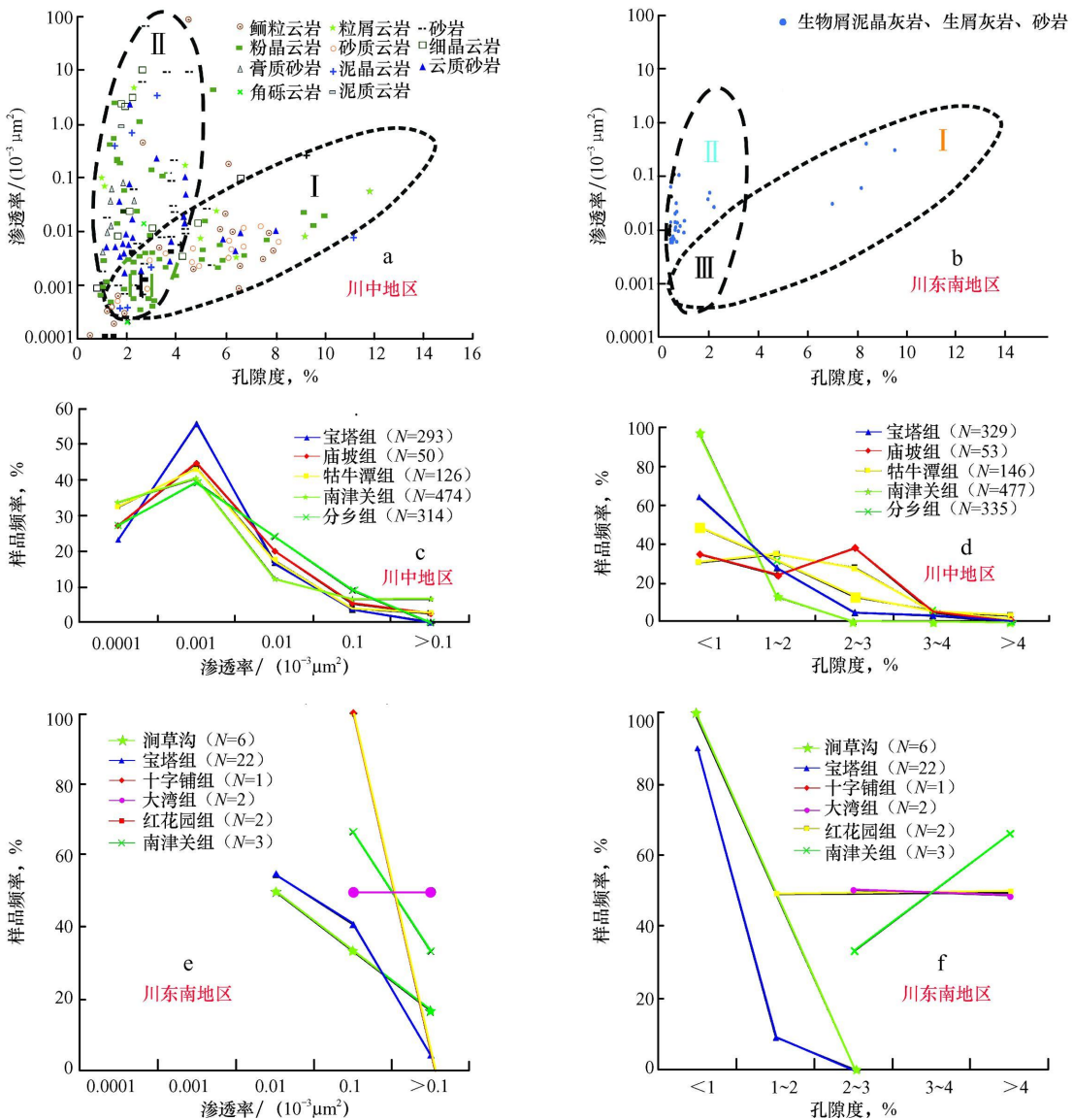


图 2 四川盆地川中-川东南地区奥陶系储层物性分布特征

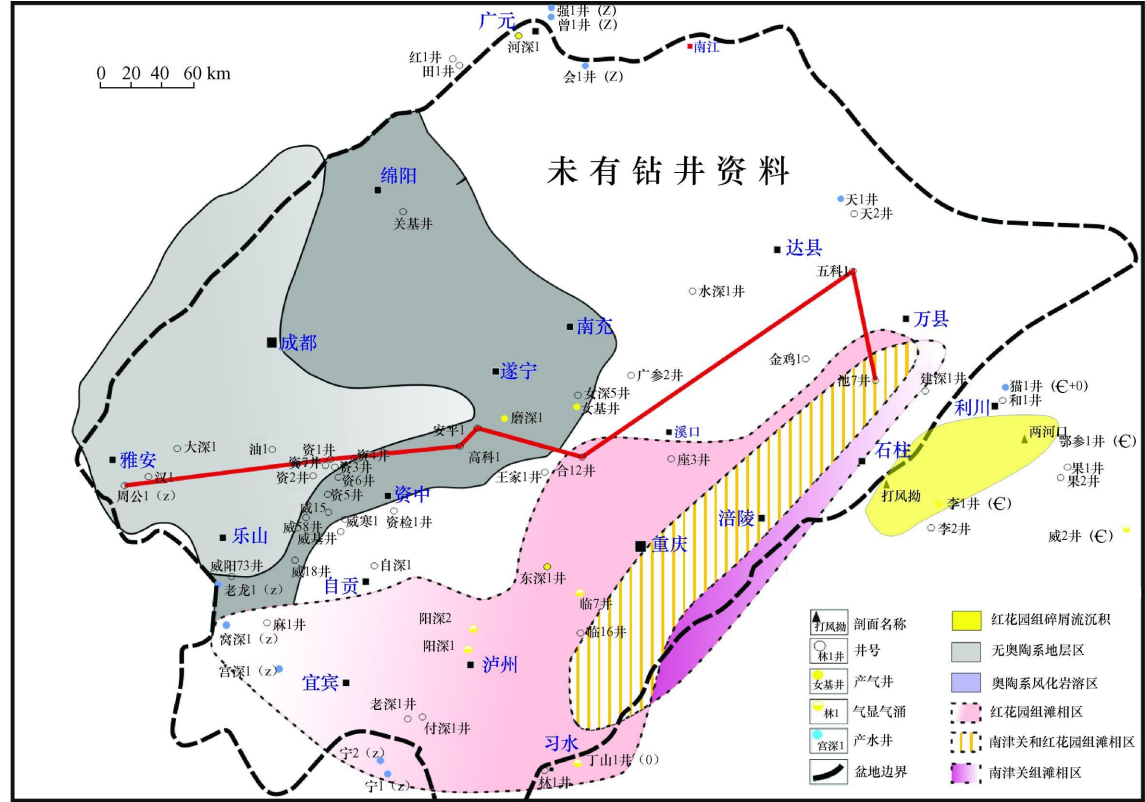
Fig. 2 Physical property distribution of the Ordovician reservoirs in central and southeasten Sichuan Basin (N 为样品数)

a c d. 川中地区; b e f. 川东南地区

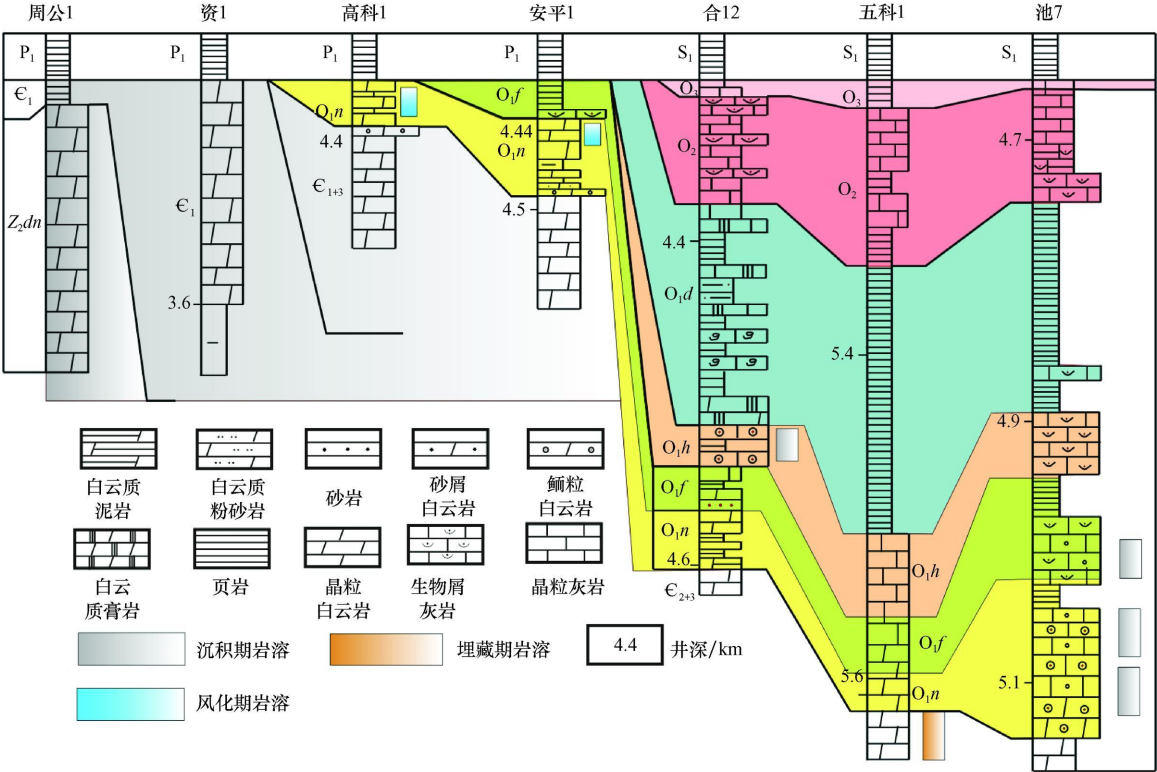
量降低, 逐渐演变为局限台地相沉积环境 (图 1, 图 3)。潮坪相有利于沉积灰泥在同生期- 准同生期便发生白云岩化, 较之灰岩, 更加有利于微孔隙 (如晶间孔) 的发育; 早期的滩相颗粒岩类不仅能够保存较好的微孔隙, 而且有利于沉积期岩溶作用的发育^[22]。如合 12 井南津关组- 分乡组发育三个沉积期岩溶段, 在井深 4 599.16~ 4 601.80 m 段发育有半充填的溶洞, 以浅滩和潮坪相岩石更为发育岩溶作用。因此, 潮坪和浅滩相是奥陶系优质储层发育的最有利的沉积相带。

2.3.2 岩溶作用和白 云岩化作用

南津关组古风化带呈环带状围绕古隆起展开, 主要分布在威远- 磨溪一带, 为一套潮坪泥晶、砂屑白云岩夹灰岩, 经过强烈地风化剥蚀, 岩溶孔洞十分发育 (图 3)。如在安平 1 井南津关 41.54 m 岩心段中, 孔洞大小一般在 50 mm × 15 mm 至 12 mm × 6 mm, 孔洞累计厚度可占取心段的 34.21%^[8]。根据岩相学资料, 奥陶系储层共可区分沉积期岩溶、褶皱期及风化期 3 种岩溶^[8 18-19]。



a. 四川盆地奥陶系潜在优质储层平面展布



b. 古隆起核部-盆地地区奥陶系联井对比剖面

图 3 四川盆地奥陶储层发育展布特征^[8] (修改)

Fig 3 Distribution of the Ordovician reservoirs in the Sichuan Basin

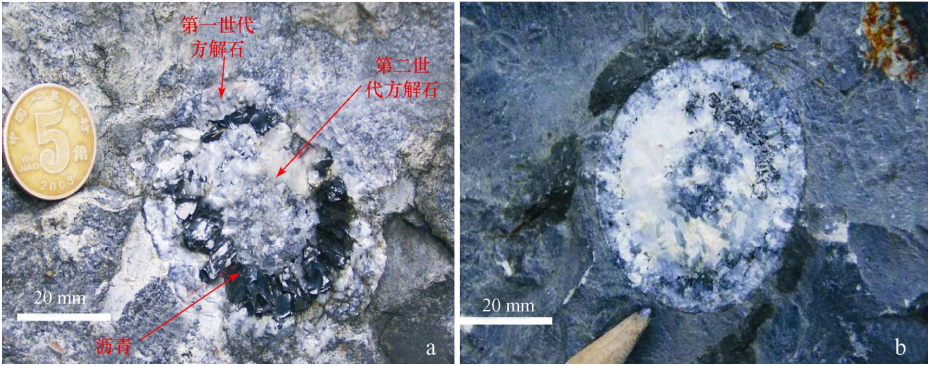


图 5 四川盆地东南缘-鄂西渝东地区奥陶系宝塔组沥青产状特征

Fig. 5 Bitumen occurrence of the Ordovician Baota Formation in southeast margin of Sichuan Basin, western Hubei and eastern Chongqing

a. 直角石体腔晶洞内部充填有沥青, 沥青含量相对丰富, 重庆綦江观音桥剖面, 宝塔组 (O₂b); b. 直角石体腔晶洞内部充填有沥青, 含量相对较少, 恩施两河口剖面, 宝塔组 (O₂b)。

2.3.5 原油热裂解作用

由烃类侵位过程可知, 早期烃类充注抑制住了胶结作用和沉淀作用的进一步发生, 延缓了储层致密化过程^[24]。但随着地层持续沉降, 油气温度、压力升高, 当温度达到 120℃时, 原油开始裂解成沥青和天然气, 而当温度超过 150℃时间, 原油基本上全部裂解。模拟实验研究揭示, 原油裂解是一个由液态转化为气态和固态的过程, 即气体体积、固体体积增大, 液体体积减少的化学反应。经计算, 假若在一个封闭的储层孔洞中, 原油体积含量为 10%, 经完全裂解成天然气和碳质沥青, 孔洞中碳质体积仅为原油体积的 6.6%, 即有 3.4% 的净增加的孔隙空间。

同时, 由于原油裂解产生相当于本身 664~740 余倍天然气^[25-26], 因此, 油气相态大规模转变会导致圈闭体积发生调整^[27]。模拟实验揭示^[15], 开放条件的油藏较封闭条件下的油藏更有利于裂解气藏的原地保存, 即更多的储集空间为气体充注, 有效地保存下来; 而封闭的油藏则遭受破坏, 原油藏为沥青所充填的剩余空间为盐水流体充注, 在随后的地质历史过程中胶结作用或充填作用致使孔隙空间完全堵塞, 有效储层遭受破坏。

综上, 奥陶系优质储层的形成主要与原始沉积相、古岩溶作用、白云岩化作用、破裂作用、石油充注和热裂解作用及圈闭封闭度密切相关。

3 储层孔、洞、缝充填物特征

3.1 流体充注期次

四川盆地震旦系-志留系流体活动复杂, 孔洞充填物世代众多, 有学者根据矿物充填的世代关系, 结合流体包裹体特征和显微镜下各世代矿物的光学特征, 建立起四川盆地震旦系-志留系孔洞缝内矿物充填序列: ①沥青; ②细晶白云石; ③粗晶白云石; ④粗晶-巨晶白云石; ⑤沥青; ⑥方解石+石英/方解石/石英^[12-22]。第一世代沥青是加里东期古油藏被破坏发生生物降解作用的产物, 细晶白云石则是成岩早期产物, 粗晶白云石或粗-巨晶白云石形成于油气生成时期(油窗期); 第五世代沥青则为石油热裂解产物(气窗期); 第六世代矿物为燕山-喜马拉雅期构造隆升阶段流体释放的产物^[12-26]。

川中地区安平 1 井和合 12 井受加里东期风化岩溶作用的影响, 奥陶系取心段岩溶孔洞发育, 充填物为白云石和方解石; 丁山 1 井奥陶系宝塔组发育与裂缝相关的溶洞, 为黄褐色粗晶方解石完全充填(表 1)。

方解石中存在较多的气-液两相包裹体和棕黄色-棕色单相有机包裹体(图 5), 表明方解石应当是在生油高峰期或石油裂解阶段(油气混合)形成的。经分析, 包裹体均一温度主要介于 175~180℃和 185~190℃, 完全达到石油的裂解温度, 因此方解石的形成时间应是在石油裂解高峰期形成, 方解石充注晚于液态石油, 结合丁山 1 井油气

成藏史分析^[10], 对应时期为晚三叠世至早中侏罗世。

3.2 流体来源及保存条件

地质历史中海水的锶同位素组成是时间的函数, 因而任一时间全球范围内的海水锶元素在同位素组成上都是一致的^[28]。不同时代海相碳酸盐岩具有不同的碳、氧同位素组成^[29]。因此, 可用锶、碳和氧同位素比值来对流体来源进行示踪和对比(图 6)。

安平 1 井孔洞中充填的方解石为生气窗(石油热裂解阶段)矿物, 所充填方解石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 为 0.710 1。奥陶系白云岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 为 0.709 8 早

奥陶世海水的锶同位素值则在 0.709 0 ~ 0.709 4^[30]。南津关组围岩与晶洞充填物碳、氧同位素值差异较大, 特别是氧同位素具有明显的负偏(负偏程度达 5.689‰)。可见, 奥陶系晶洞内方解石的流体源不是来自于围岩本身, 是一种富锶的外源流体。丁山 1 井宝塔组中充填的第六世代方解石也表现相似的特征。

综上, 并结合王国芝等^[12]对川中地区震旦系-志留系保存条件研究揭示, 可知, 生油窗之前, 川中地区下组合内部的流体相互连通, 下组合内部的泥质岩和膏质岩对下伏流体不具有封隔能力; 生油窗期、生气窗期保存条件相对较好, 形成了古油藏和古气藏。古油藏热裂解成古气藏过程

表 1 取心井段晶洞和裂缝中充填矿物世代关系统计
Table 1 Generation relationship of minerals filled in geodes and fractures in the cored intervals

井位	深度 /m	地层时代	晶洞充填物	围岩	备注
安平 1	4 455.49~4 458.23	O ₁	白云石	白云岩	晶洞充填
	4 458.23~4 460.25	O ₁	白云石→沥青	白云岩	晶洞充填
	4 464.78~4 466.85	O ₁	白云石→方解石→沥青	白云岩	晶洞充填
合 12	4 583.13~4 585.76	O ₁	细粒-粗粒白云石, 晚方解石	白云岩	晶洞充填, 中空
	4 585.76~4 588.70	O ₁	晚期(?)方解石	白云岩	斑块状
	4 636.69~4 639.35	O ₁	白云石	白云岩	斑块状
丁山 1	1 531.71~1 533.53	O ₂	晚期方解石	灰岩	裂缝充填

注: “→”表示充填顺序。

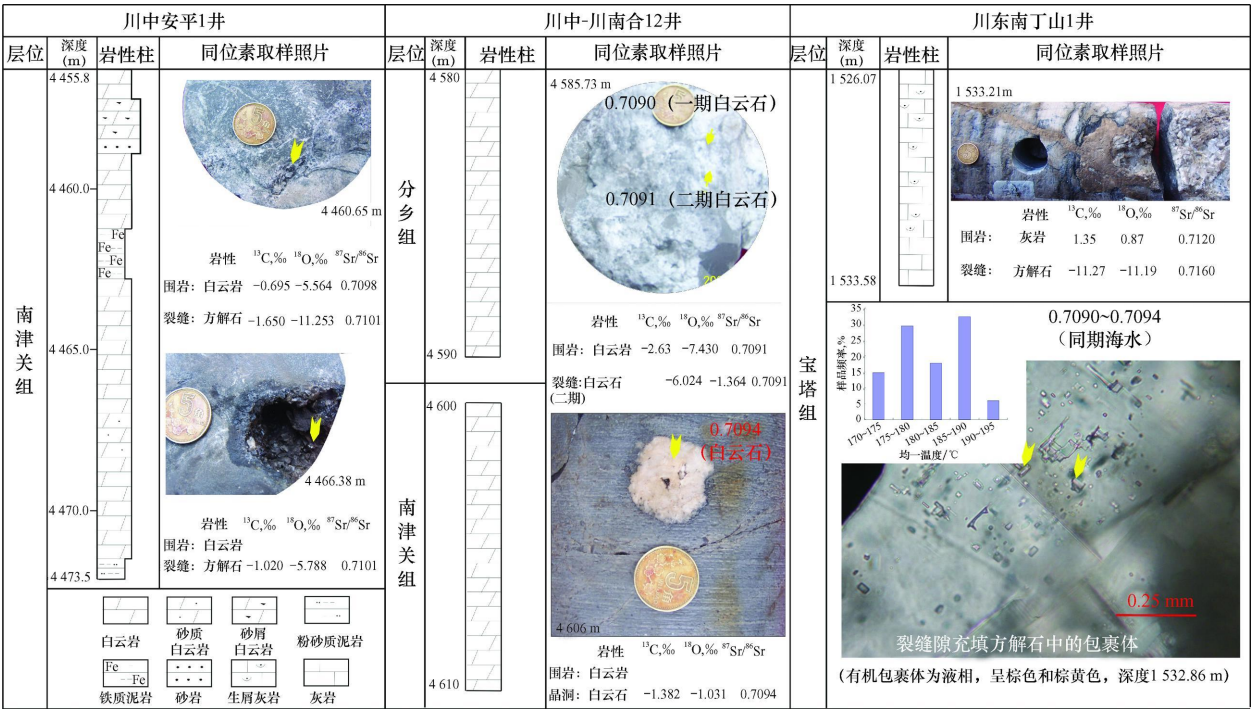


图 6 安平 1 井-合 12 井-丁山 1 井奥陶系流体活动特征
Fig. 6 Fluid characteristics in the Ordovician in Anping 1, He12 and Dingshan 1 wells

中, 部分热裂解气溶于水形成水溶性气藏; 燕山 – 喜马拉雅期以来的隆升, 使保存条件变差 (第六世代外源流体方解石沉淀), 古气藏完全遭受破坏。而上述流体充注表明川东南地区奥陶系未形成古油藏或大规模成藏, 但第六世代方解石的出现, 同样表明在燕山 – 喜马拉雅期奥陶系储层保存条件同样遭受了破坏。

4 讨论

4.1 川东–川南地区为奥陶系重点勘探地区

基于以上奥陶系基础油气地质条件分析, 可见上五峰组及龙马溪组是最有利的烃源岩, 特别是川东和川南地区, 是成烃中心。在古隆起区, 奥陶系岩溶白云岩储层发育, 大量发育的储层沥青表明奥陶系在地质历史中形成过规模巨大的古油藏, 随后经历了古油藏裂解成古气藏、水溶气藏阶段, 但在燕山 – 喜马拉雅期古气藏遭受破坏。

储层研究表明, 南津关组滩相区位于涪陵 – 万县一带, 红花园组滩相完全覆盖整个川东南地区 (图 3)。滩相沉积环境不仅能够保存较好的微孔隙, 而且有利于沉积期岩溶作用的发育, 具有发育滩相优质储层的潜在条件。因此, 川东南地区南津关组和红花园组滩相叠合区域是奥陶系储层发育的有利地区 (图 3)。此外, 岩相古地理研究表明, 奥陶纪时四川盆地的沉积水体自西向东是逐渐加深的^[31]。如在重庆石柱打风拗剖面 and 湖北恩施两河口剖面 (图 7), 下奥陶统红花园组出现了

碎屑流沉积, 储集物性变差, 表明在奥陶纪红花园期时石柱和恩施一带已演变为陆棚 – 斜坡区沉积环境。因此, 下奥陶统优质储层在四川盆地内部比之更靠东的鄂西渝东地区更为发育。同时, 奥陶系的古岩溶作用也同样受到加里东古隆起和原始沉积高点的控制, 在古隆起、斜坡区比之向东的盆地区也更为发育岩溶储层。综上, 奥陶系油气勘探, 在川东和川南地区应着重于靠盆地方向的沉积高点 and 古地形高地。

4.2 震旦系–寒武系天然气跨层运移为奥陶系提供充足气源

值得说明的是, 由于川南 – 川东地区虽然奥陶系 – 志留系烃源岩相对发育, 但钻井过程中奥陶系少见与五峰组 – 龙马溪组烃源岩相关的天然气显示和古油藏。而且, 在川南地区, 二叠系和三叠系气藏存有志留系天然气^[32–33]; 在川东地区, 石炭系原油裂解气藏群烃源岩为志留系^[34–35]; 并且川南 – 川东地区现今为认为是志留系页岩气 (残存在烃源岩中游离和吸附态的天然气) 最为有利地区^[36]。根据上述特征可知, 奥陶系 – 志留系烃源岩主要为向上运移或残存在烃源岩内部, 并非奥陶系的主力烃源岩。

原油裂解气是天然气的重要来源^[14, 25–26]。相对古油藏原油来讲, 高演化的储层热裂解沥青生烃能力则相对较差, 最高产气率为初始原油产气率 12% 左右 (体积产率或质量产率), 若镜质体反射率高 ($R_o = 2.81\%$), 气产量较低 ($0.72\text{ m}^3/\text{t}$ 沥青), 镜质体反射率相对较低 ($R_o = 2.33\%$), 产气

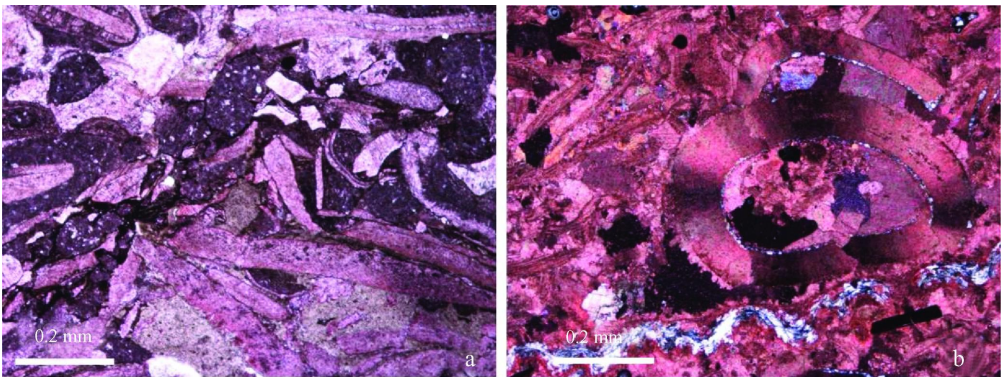


图 7 鄂西渝东地区奥陶系碎屑流沉积特征

Fig. 7 Characteristics of debris flow deposits in the Ordovician in western Hubei and eastern Chongqing

- a. 碎屑流成因生物碎屑灰岩, 红花园组 (O_1h), 鄂西渝东恩施两河口剖面, 单偏光;
- b. 碎屑流成因生物碎屑灰岩, 红花园组 (O_1h), 鄂西渝东石柱打风拗剖面, 正交偏光

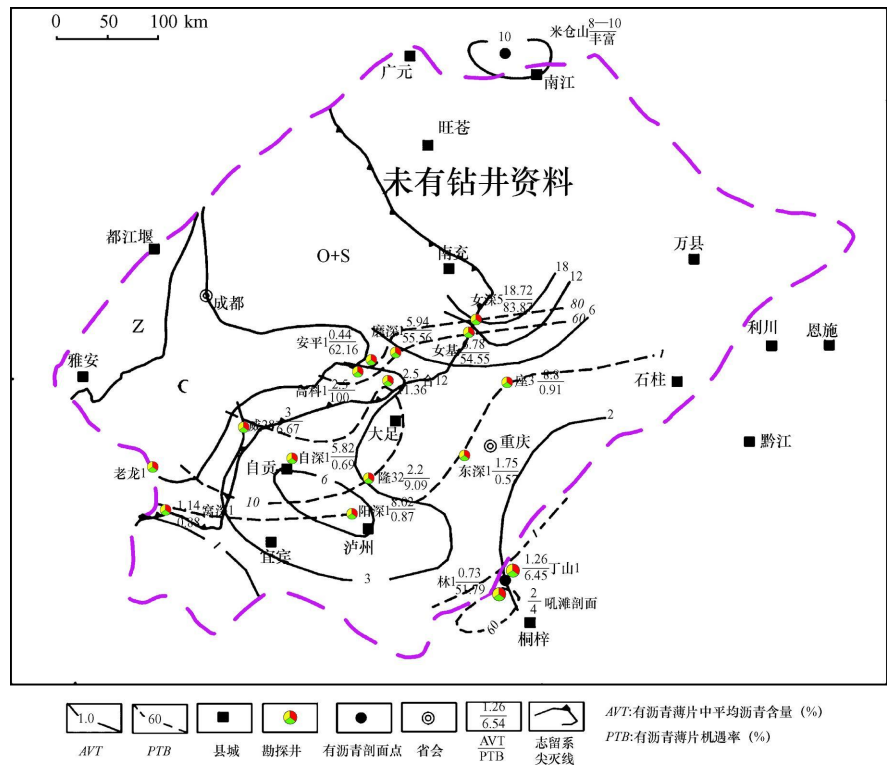


图 9 四川盆地寒武系古油藏分布图

Fig. 9 Distribution of the Cambrian paleo-oil pools in Sichuan Basin

伏地层的原油裂解气可向上运移至浅层聚集成藏。因此,在川南-川东地区,下伏震旦系和寒武系古油藏为上覆的奥陶系天然气成藏提供了气源,并且在川南-川东地区是奥陶系红花园组和南津关组滩相发育区,具备发育优质储层的潜在条件;同时,该区处于斜坡-盆地地区,构造活动相对较弱,流体活动不及古隆起强,保存条件亦相对较好。

综上,川南和川东地区应是奥陶系最有利的勘探地区,特别是应着重于对川南和川东地区奥陶系沉积高点和古地形高地的勘探和研究。

5 结论

1) 四川盆地奥陶系储集层主要分布在南津关组、分乡组、红花园组及宝塔组。川中地区储集岩类型主要为晶粒白云岩、残余粒屑白云岩,储集空间主要为粒内溶孔-晶粒孔组合。川东南地区储集岩类型主要为微晶白云岩、砂屑灰岩、砂屑生物屑灰岩。川中地区和川东南地区储集层均属特低孔低渗型储层,川中地区渗透率介于 $3 \times 10^{-5} \times 10^{-3} \sim 1.96 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,呈“L”分布。但川东南地

区渗透率具有明显的宽缓“V”字型,且明显高于川中地区,显示出裂缝型储层分布的特征。

2) 奥陶系储层发育明显受到原始沉积环境、古岩溶作用、原油充注和裂解及破裂作用控制。流体保存条件揭示,生油窗期、生气窗期保存条件相对较好,形成了古油藏和古气藏。古油藏热裂解成古气藏过程中,部分热裂解气溶于水形成水溶性气藏;燕山期-喜马拉雅期以来的隆升,使保存条件变差,古气藏完全遭受破坏。燕山期-喜马拉雅期以来的隆升剥蚀作用是导致现今奥陶系在古隆起区勘探未获得大突破的重要原因。

3) 在川南和川东地区,红花园和南津关组发育浅滩相颗粒白云岩或灰岩,具备发育潜在优质储层的条件。另外,震旦和寒武系在川南和川东地区发育古油藏,而古油藏原油裂解气是天然气成藏的重要气源,远远高于干酪根裂解气贡献值。因此,下伏层系原油裂解气可为奥陶系天然气成藏提供充足的气源,有利于奥陶系油气成藏。

参 考 文 献

[1] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1996 163-175

- Guo Zhengwu, Deng Kangling Han Yonghui et al Sichuan basin formation and development[M]. Bei jing Geological Publishing House 1996: 163- 175.
- [2] 金之钧, 蔡立国. 中国海相油气勘探前景、主要问题与对策 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(6): 722- 730.
Jin Zhijun, Cai Ligu. Exploration prospects, problems and strategies of marine oil and gas in China[J]. Oil & Gas geology, 2006 27(6): 722- 730.
- [3] 马立桥, 董庸, 屠小龙, 等. 中国南方海相油气勘探前景 [J]. 石油学报, 2007, 28(3): 1- 7
Ma Liqiao Dong Yong Tu Xiaolong et al Petroleum prospect of marine sequences in South China[J]. Acta Petrolei Sinica 2007 28(3): 1- 7
- [4] 赵文智, 汪泽成, 张水昌, 等. 中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带 [J]. 科学通报, 2007 52(增刊 II): 9- 18
Zhao Wenzhi Wang Zecheng Zhang Shuichang et al Analysis on forming conditions of deep marine reservoirs and their concentration belts in superimposed basins in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007 52(Supplement II): 9- 18
- [5] 刘树根, 汪华, 孙玮, 等. 四川盆地海相领域油气地质条件专属性问题分析 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 781- 792
Liu Shugen Wang Hua Sun Wei et al Analysis on special features of petroleum geological conditions of marine facies in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008 29(6): 781- 792
- [6] 徐世琦, 洪海涛, 师晓蓉. 乐山- 龙女寺古隆起与下古生界含油气性的关系探讨 [J]. 天然气勘探与开发, 2002 25(3): 10- 15.
Xu Shiqi Hong Haitao Shi Xiaorong Discussion on the relationship between the Leshan-Longnvsi Paleoruplift and the petroliferous of Lower Paleozoic[J]. Natural Gas Exploration & Development 2002 25(3): 10- 15
- [7] 徐世琦, 代宗仰, 蒋小光, 等. 古隆起区带寒武系洗象池群成藏条件与勘探前景分析 [J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(4): 4- 8
Xu Shiqi Dai Zongyang Jiang Xiaoguang et al Oil and exploration prospects of Cambrian Xixiangchi member in Paleoruplift zone[J]. Natural Gas Exploration & Development 2006 29(4): 4- 8
- [8] 汪泽成, 赵文智, 张林, 等. 四川盆地构造层序与天然气勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 2002 184- 220.
Wang Zecheng Zhao Wenzhi Zhang Lin et al Tectonic sequence and gas exploration in Sichuan Basin[M]. Beijing Geological Publishing House 2002: 184- 220
- [9] Liu Shugen Wang Hua Sun Wei et al Energy field adjustment and hydrocarbon phase evolution in Sinian-Lower Paleozoic Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Geosciences 2008 19(6): 700- 706.
- [10] 徐国盛, 袁海锋, 马永生, 等. 川中- 川东南地区震旦系- 下古生界沥青来源及成烃演化 [J]. 地质学报, 2007 81(8): 1143- 1152.
Xu Guosheng Yuan Haifeng Ma Yongsheng et al The source of Sinian and Lower Paleozoic bitumen and hydrocarbon evolution in the Middle and Southeast of the Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica 2007 81(8): 1143- 1152
- [11] 刘树根, 马永生, 蔡勋育, 等. 四川盆地震旦系下古生界天然气成藏过程和特征 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2009 36(4): 345- 354
Liu Shugen Ma Yongsheng Cai Xunyu et al Characteristic and accumulation process of the natural gas from Sinian to Lower Paleozoic in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009 36(4): 345- 354.
- [12] 王国芝, 刘树根. 海相碳酸盐岩区油气保存条件的古流体地球化学评价——以四川盆地中部下组合为例 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2009 36(6): 631- 644.
Wang Guozhi Liu Shugen Paleofluid geochemical evaluation of hydrocarbon preservation in marine carbonate rock areas taking Lower association central Sichuan Basin as example[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009 39(6): 631- 644
- [13] 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 油裂解生气是海相气源灶高效成气的重要途径 [J]. 科学通报, 2006 51(5): 589- 595.
Zhao Wenzhi Wang Zhaoyun Zhang Shuichang et al Oil cracking an important way for highly efficient generation of gas from marine source rock kitchen[J]. Chinese Science Bulletin 2006 51(5): 589- 595.
- [14] 马文辛, 刘树根, 黄文明. 古油藏及其对天然气藏的控制作用研究进展 [J]. 地质科技情报 2010 29(4): 89- 99.
Ma Wenxin Liu Shugen Huang Wenming Progresses on primary study of the paleo-oil reservoirs and its control on natural gas accumulation[J]. Geological Science and Technology Information 2010 29(4): 89- 99.
- [15] Tian Hui Xiao Xianming Ronald W T. et al New insights into the volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs Implications for the in situ accumulation of gas cracked from oils [J]. AAPG Bulletin 2008, 92(2): 181- 200
- [16] 刘树根, 马永生, 孙玮, 等. 四川盆地威远气田和资阳含气区震旦系油气成藏差异性研究 [J]. 地质学报, 2008 82(3): 328- 337
Liu Shugen, Ma Yongsheng Sun Wei et al Studying on the differences of Sinian natural gas pools between Weiyuan gas field and Ziyang gas-bearing area, Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica 2008, 32(3): 328- 337
- [17] 洪余刚. 乐山- 龙女寺古隆起奥陶系风化壳岩溶储层特征与地震预测研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2006.
Hong Yugang The karst reservoir characteristic and seismic prediction to the Ordovician stratum on the Leshan-Longnvsi Paleoruplift [D]. Chengdu Southwest Petroleum University 2006
- [18] 代宗仰, 徐世琦, 尹宏, 等. 乐山- 龙女寺寒武和奥陶系储层

类型研究 [J]. 西南石油大学学报, 2007, 29 (4): 16– 20.

Dai Zongyang Xu Shiqi Yin Hong et al Reservoir types of Cambrian and Ordovician in Leshan Longnvsi Paleoplift Area [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29 (4): 16– 20

[19] 庞艳君, 代宗仰, 刘善华, 等. 川中乐山—龙女寺古隆起奥陶系古岩溶发育地质因素分析 [J]. 重庆科技学院学报 (自然科学版), 2007, 9 (3): 1– 4.

Pang Yanjun, Dai Zongyang Liu Shanhua et al The Geological condition analysis of Ordovician Paleokastification of Leshan Longnvsi Paleoplift in Central Sichuan [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2007, 9 (3): 1–4.

[20] 刘树根, 曾祥亮, 黄文明, 等. 四川盆地页岩气藏和连续型-非连续型气藏基本特征 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2009, 36 (6): 578– 592

Liu Shugen Zeng Xiangliang Huang Wenming et al Basic characteristics of Shale and continuous-discontinuous transition gas reservoirs in Sichuan Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36 (6): 578– 592

[21] 黄籍中. 从四川盆地看古隆起成藏的两重性 [J]. 天然气工业, 2009, 29 (2): 12– 17.

Huang Jizhong The pros and cons of paleohighs for hydrocarbon reservoiring A case study of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (2): 12– 17.

[22] 刘树根, 马永生, 王国芝, 等. 四川盆地震旦系—下古生界优质储层形成与保存机理 [J]. 油气地质与采收率, 2008, 15 (1): 1– 5.

Liu Shugen Ma Yongsheng Wang Guozhi et al Formation and conservation mechanism of the high-quality reservoirs in Sinian Lower Paleozoic in Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15 (1): 1– 5.

[23] Brasher JE and Vagle K R. Influence of lithofacies and diagenesis on Norwegian North Sea chalk reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 1996, 80 (5): 746– 769.

[24] Scholle P A, Ulmer-Scholle D S A color guide to petrography of carbonate rocks grains textures porosity diagenesis [M] // AAPG Memoir 77 Oklahoma Tulsa 2003 70– 80.

[25] Barker C. Calculated volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74 (8): 1254– 1261.

[26] 赵孟军, 张水昌, 刘丰忠. 油藏演化的两个极端过程 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30 (5): 21– 23

Zhao Mengjun Zhang Shuichang Liu Fengzhong Two possible fates for paleo reservoir oils [J]. Petroleum Exploration and Development 2003, 30 (5): 21–23.

[27] 黄文明, 刘树根, 张长俊, 等. 四川盆地寒武系储层特征及优质储层形成机理 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30 (5): 566– 575

Huang Wenming Liu Shugen Zhang Changjun et al Reservoir characteristics and formation mechanism of the high quality Cambrian reservoirs in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30 (5): 566– 575.

[28] McArthur JM, Bumett J Hancock JM. Strontium isotopes at K / T boundary discussion [J]. Nature, 1992, 355– 28.

[29] Veizer J Alk D, Azmy K, et al $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. Chemical Geology 1991, 161: 59– 88

[30] Denison R E, Koepick R B, Burckw H, et al Construction of the Cambrian and Ordovician seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve [J]. Chemical Geology, 1998, 152 325– 340

[31] Liu Baojun, Xu Xiaosong Atlas of the lithofacies and paleogeography of South China [M]. Beijing Science press 1994.

[32] 朱光有, 赵文智, 梁英波, 等. 中国海相沉积盆地富气机理与天然气的成因探讨 [J]. 科学通报, 2007, 52 (增刊): 46– 57.

Zhu Guangyou Zhao Wenzhi Liao Yingbo et al Gas-rich mechanism and natural gas origin in Chinese marine sedimentary basin [J]. Chinese Science Bulletin 2007, 52 (Supplement): 46– 57.

[33] 王兰生, 邹春艳, 郑平, 等. 四川盆地地下古生界存在页岩气的地球化学依据 [J]. 天然气工业, 2009, 29 (5): 59– 63

Wang Lansheng Zhou Chunyan Zheng Ping et al Geochemical evidence of shale gas existed in the Lower Paleozoic Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (5): 59– 63.

[34] 张英, 单秀琴, 肖芝华, 等. 五科 1 井下古生界流体包裹体特征与天然气成藏期分析 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25 (1): 60– 65.

Zhang Ying Shan Xiqin Xiao Zhihua et al The characteristics of fluid inclusions in Lower Paleozoic system of the Well Wuke 1 and the analysis of the reservoir forming stage [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25 (1): 60– 65.

[35] 黄光辉, 张敏, 胡国艺, 等. 原油裂解气和干酪根裂解气的地球化学研究 (II)—原油裂解气和干酪根裂解气的区分方法 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38 (增刊 II): 9– 16

Huang Guanghui Zhang Min Hu Guoyi et al Geochemical study on the oil cracking and kerogen cracking gas (II)—distinguish method between oil cracking gas and kerogen cracking gas [J]. Science China D Series (Geoscience), 2008, 38 (Supplement II): 9– 16.

[36] 闫存章, 黄玉珍, 葛春梅, 等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源 [J]. 天然气工业, 2009, 29 (5): 1– 6

Yan Cunzhang Huang Yuzhen Ge Chunmei et al Shale gas Enormous potential of unconventional natural gas resources [J]. Natural Gas Industry 2009, 29 (5): 1– 6.

[37] 田辉, 肖贤明, 杨立国, 等. 原油高温裂解生气潜力与气体特征 [J]. 科学通报, 2009, 54 (6): 781– 786

Tian Hui Xiao Xianming Yang Liguang et al High temperature cracking of crude oil and gas characteristics of the potential [J]. Chinese Science Bulletin 2009, 54 (6): 781– 786.