

文章编号: 0253-9985(2009)05-0566-10

四川盆地寒武系储层特征及优质储层形成机理

黄文明, 刘树根, 张长俊, 王国芝, 徐国盛, 雍自权, 马文辛

(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: 通过岩心薄片观察、地球化学分析、及晶洞流体充填序列分析, 对四川盆地寒武系优质储层形成机理进行研究。研究表明, 滩相沉积相带是优质储层形成的基础, 膏溶、淡水岩溶与成岩早期大气淡水渗滤溶蚀是寒武系先存孔洞的主要形成机制, 而深埋过程中外源侵蚀性流体溶解作用则是扩溶先存孔洞或形成新孔洞的持久动力, 适宜的构造位置与弱的流体反应则为先存孔洞保存的先决条件。

关键词: 优质储层; 形成机理; 寒武系; 四川盆地

中图分类号: TE122.2 文献标识码: A

Reservoir characteristics and formation mechanism of the high quality Cambrian reservoirs in Sichuan Basin

Huang W erming Liu Shugen, Zhang Changjun, Wang Guozhi

Xu Guosheng Yong Ziquan, Ma Wenxin

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 100083, China)

Abstract: Based on core observation, thin section identification, geochemical analysis and analysis of inside geode fluid-filling sequence, this paper tries to discuss the formation mechanism of the high quality Cambrian reservoirs in Sichuan Basin. The following results are obtained: shoal facies tract is the foundation of high quality reservoir; gypsum dissolution, fresh-water karstification and meteoric water filtration and dissolution at the early diagenetic stage are the chief mechanisms of the pre-existing vugs in the Cambrian; dissolution of extraneous corrosive fluids in the process of deep burial is the persistent driving force of enlargement of the pre-existing vugs and the formation of new vugs; favorable tectonic position and weak fluid reaction are the prerequisite to the preservation of the pre-existing vugs.

Key words: high quality reservoir; formation mechanism; Cambrian; Sichuan Basin

四川盆地寒武系发育良好, 下寒武统烃源岩优良^[1-3], 远景资源量在下古生界占首位^[4]; 中—上寒武统碳酸盐岩厚度达千米, 局部井段孔洞层优质储集体发育^[1-3, 5], 是四川盆地天然气勘探的重要后备领域。然而, 近 40 余年来, 基本上以“加里东期古隆起有利于油气聚集”为勘探指导思想, 在盆地内钻达寒武系的井已有百余口, 却仅在威远构造的中寒武统龙王庙组、中—上寒武统洗象池

群发现有十几口达工业油气流的气井, 以及磨溪构造见气显示, 女基井或安平 1 井见到已沥青化的古油藏。同时, 在盆地边缘川东南地区 (黔中古隆起北斜坡) 中国石化 (以震旦系为目的层) 新钻两口重点探井 (2005 年钻丁山 1 井, 2007 年钻林 1 井), 在下寒武统清虚洞组也仅见有沥青化的古油藏。低勘探成功率促使石油地质学家分别从岩相古地理、沉积环境、储层发育特征、成藏特征等方

收稿日期: 2009-04-24

第一作者简介: 黄文明, 男 (1983—), 博士生, 石油地质学与储层地质学。

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

面对其作了细致研究^[1-20],认识到乐山—龙女寺古隆起控制了四川盆地下组合古油藏的分布,但乐山—龙女寺加里东古隆起为剥蚀型古隆起,其负面效应同样显著^[21]。寒武系气藏多为晚期调整气藏,寒武系发育优良的膏岩盖层^[4 5 12]。因此,在燕山期—喜马拉雅期全盆地寒武系保存条件均有一定程度破坏情况下,是否具有优质储层(保气中心)^[13]是制约勘探的重要因素。本文主要从区域性角度选取了 4 口井(高科 1 井、安平 1 井、合 12 井、丁山 1 井,从盆地隆起至凹陷带均有分布),通过岩心薄片观测、晶洞内充填物的岩石学与地球化学详细分析,以川中为重点,结合比较成熟地区(资阳及威远)储层研究成果,旨在对四川盆地寒武系储层特征及优质储层形成机理作更进一步探讨。

1 沉积相

在寒武系沉积期,整个四川盆地由西向东为滨岸相—浅海陆棚—局限(开阔)海台地相。早寒武世筇竹寺—沧浪铺期(川东南称之为牛蹄塘期—金顶山期)海水由东南方向入侵,底部发育海侵黑色页岩,向上变为浅海陆棚相碎屑岩夹少许碳酸盐岩,该期为寒武系区域性烃源岩发育时期。在龙王庙期,习水—石柱一线以西演变为局限海台地相白云岩;以东则为开阔海台地相;但在川中及川西南地区,高台组、龙王庙组、沧浪铺组出现陆源与海相沉积物混积特征,其碎屑物质主要由康滇古陆和黔中古陆提供^[14-16]。

总之,中—下寒武统为一套半深海—浅海相—滨浅海相沉积。岩石类型主要为细碎屑岩,即细砂岩、粉砂岩和页岩。上寒武统为开阔台地—局限台地相碳酸盐岩(图 1)。

2 储层特征

寒武系沉积格局决定不同时期沉积岩性。寒武系由下而上主要为一套泥页岩—粉砂质泥岩(夹泥质粉砂岩)—灰(泥)质白云岩—纯白云岩(图 1)。储集层岩石类型主要有粉—细晶白云岩或灰岩、粒屑白云岩或灰岩、碎屑岩等 3 类岩石(图 2a—f)。但主要为中—上寒武统洗象池组晶粒白云岩夹粒屑白云岩(图 2c d f),以及川西南地区高台组粒屑白云岩和鲕粒白云岩;龙王庙组细晶白云岩、粉晶白云岩和少量残余粒屑白云岩。

洗象池组取心段平均孔隙度值以古隆起斜坡带的合 12 井最高,达 3.12%,威远地区次之,斜坡带边缘高石梯与安平店构造处于盆地或凹陷带的丁山 1 井较差,平均孔隙度不到 1%;而渗透率以威远地区相对较好(但仍较致密,92%的样品的平均值小于 $100 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$),丁山 1 井次之,川中地区 3 口钻井均较差,平均渗透率几乎均未达 $10 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ (表 1)。测井孔隙度分析表明,龙王庙组储层优于洗象池组和高台组;威远地区高台组储层较川中地区发育。

总之,四川盆地寒武系储集岩基质孔隙度主要分布于 1%~2%,渗透率绝大多数小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低孔、低渗型^[19]。但寒武系可发育晶间溶孔、铸模孔和晶间溶孔等次生储集空间,面孔率达 0.2%~3%^[20]。此外,局部发育一套特殊优质储集岩性:孔洞状白云岩,孔隙度一般位于 4.62%~6.64%,渗透率 $0.07 \mu\text{m}^2$ ^[4];如合 12 井洗象池群上部 4 695.21 m~4 696.74 m 段见有一套深灰色针孔状白云岩,镜下薄片面孔率达 5%(图 2d)。

表 1 四川盆地寒武系取心段储层基质物性特征

Table 1 Matrix properties of the cored reservoir intervals in the Cambrian of the Sichuan Basin

层 位	川西南		川中地区						川东南缘	
	威远地区		高科 1井		安平 1井		合 12井		丁山 1井	
	Φ , %	K/ ($10^{-6} \mu\text{m}^2$)	Φ , %	K/ ($10^{-6} \mu\text{m}^2$)	Φ , %	K/ ($10^{-6} \mu\text{m}^2$)	Φ , %	K/ ($10^{-6} \mu\text{m}^2$)	Φ , %	K/ ($10^{-6} \mu\text{m}^2$)
洗象池组	1. 14	<100	0. 65	0. 20 ~420. 00	0. 80	6. 71	3. 12	5. 35	0. 90	46. 50
高台组	1. 38	182. 50	—	—	—	—	—	—	—	—
龙王庙组	1. 76	1 226. 80	—	—	—	—	—	—	—	—

注:“—”表示该段未取心,资料未获取到。

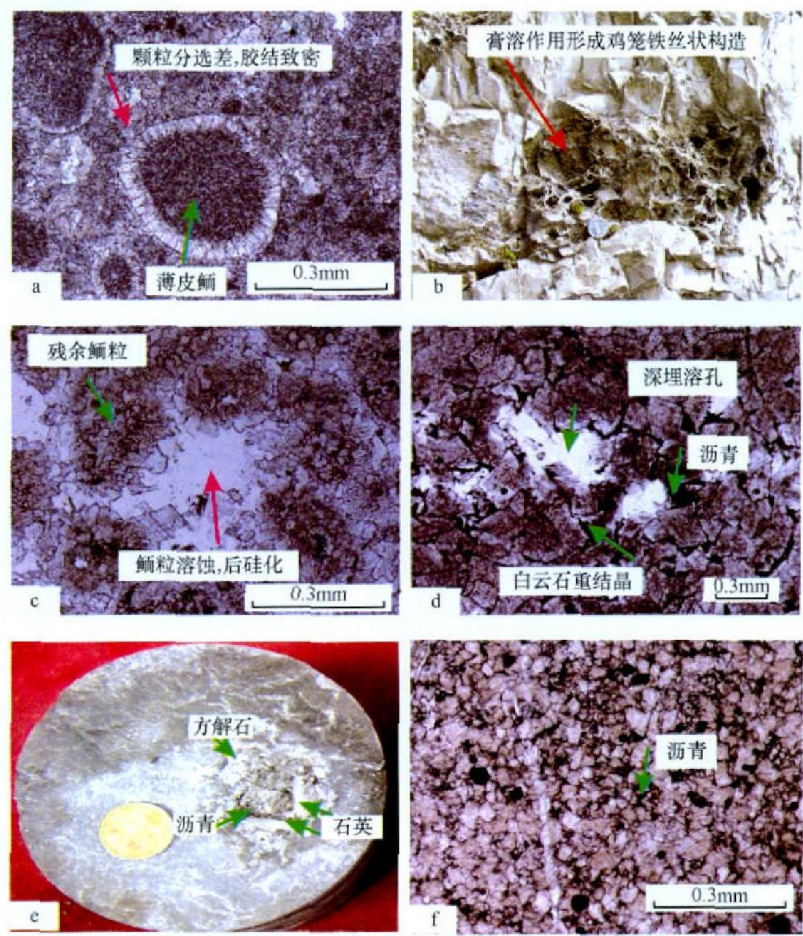


图 2 四川盆地寒武系优质储层形成机理

Fig. 2 Mechanism charts of the high quality Cambrian reservoirs in the Sichuan Basin

a. 岩石为膏化泥-粉晶砂屑藻薄皮鲕粒含膏云岩,薄皮包壳或薄皮鲕,颗粒分选较差,为潮下鲕滩边缘沉积,丁山 1 井, 2 730.68 m,中寒武统石冷水组(E_2sh);b. 膏溶作用形成鸡笼铁丝状构造,川东南良村剖面,中-上寒武统娄山关群($\text{E}_{2+3\text{ls}}$); c. 亮晶鲕粒白云岩,早期遭受大气淡水淋滤作用形成鲕粒铸模孔,后期硅质充填,合 12 井,4 859.15 m,中-上寒武统洗象池组($\text{E}_{2-3\text{x}}$);d. 细晶针孔白云岩,针孔状构造(溶孔),合 12 井,4 695.00 m,中-上寒武统洗象池群($\text{E}_{2-3\text{x}}$);e. 中-上寒武统洗象池组($\text{E}_{2-3\text{x}}$),晶洞中充填的两世代矿物(第一世代:方解石+石英,第二世代:沥青),安平 1 井,4 551.30~4 551.50 m;f. 下寒武统清虚洞组(E_1q),粉晶白云石晶间孔充填有沥青,林 1 井,2 123.00 m

3 晶洞中流体多期充注

3.1 寒武系具有多期外源流体充注

在寒武系晶洞中充填矿物充填序列情况进行

总结的基础上,通过流体地球化学特征对比分析,寒武系内部充填序列恢复如表 2 所示。可见,寒武系内部具有明显的一期石油和三期盐水充注(第一世代白云石—第二世代白云石—第三世代方解石/石英—沥青)。

表 2 四川盆地寒武系孔洞充填序列

Table 2 Filling sequences of vugs in the Cambrian of the Sichuan Basin

层位井号	高科 1 井	安平 1 井	合 12 井	丁山 1 井	林 1 井	备 注
充填序列	第一世代白云石— 第二世代石英—沥青 第一世代白云石— 沥青	第一世代白云石— 第二世代方解石/方 解石+石英—沥青 (图 2e) 第一世代白云石— 沥青	第一世代白云石— 第二世代白云石—第 三世代石英或方解石 +沥青	第一世代白云石— 沥青;方解石(1)—沥 青;方解石(2)—沥 青;	方解石	两期方解 石地化特征 不同

第一世代白云石呈晶粒状,常具雾心亮边结构,高科 1 井与安平 1 井中未见包裹体。第二世代白云石较第一世代白云石干净,局部表面较脏,有时具雾边亮心结构,局部可见波状消光,解理弯曲或呈马鞍状;内部可见少量黄褐色单相有机包裹体,它表明其可能是在油气开始生成时,但还未达到生油高峰期前形成的。方解石或石英内部富含有机质包裹体,其丰度达 50%~80%,有机包裹体以棕色、棕黄色液相有机包裹体为主(图 3);所有这些特征均表明,这部分方解石-石英主要是形成于天然气生成的高峰期,由于它们形成于裂解沥青之后,所以其中富含液相甲烷(图 3 中部)。

另外,钻井与地表剖面寒武系围岩与充填物间的碳氧同位素差异,表明充注的流体与围岩间尚未达同位素地球化学平衡,所充注的流体应当是外来的流体,至少流体不是直接来自于相邻的围岩地层,具有外源特征。

3.2 寒武系流体具有跨层流动

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^[22]。因此,可用锶同位素比值来对流体来源进行示踪和对比。

合 12 井寒武系围岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.709 7~0.710 9 孔洞充填白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.709 5~0.711 7,明显高于世界范围内寒武系海水锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的值的范围为 0.708 0~0.709 3(图 4)^[23]。无论是围岩还是充填物的锶

同位素值均明显高于同期海水的锶同位素值,表明寒武系同样受到一种富锶流体的改造。因此,所充注的流体是一种富锶的流体,当它与具有海水锶同位素比值的围岩相互作用时,使围岩的锶同位素值增加,流体的锶同位素值降低。从碳氧同位素特征来看, $\Delta^{13}\text{C}_{\text{围岩-充填物}}$ (PDB) 介于 $-5.825\text{‰} \sim -0.017\text{‰}$, $\Delta^{18}\text{O}_{\text{围岩-充填物}}$ 介于 $-5.545\text{‰} \sim -0.725\text{‰}$,表明其中一个样品具有一种富碳氧同位素,而另一个则相反。

对于寒武系孔洞充填物样品(4 858.85 m)来说,它的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的值为 0.711 7,远大于同时代的海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的上限值 0.709 3,说明充注的流体是一种富锶的流体。同样,对于方解石脉岩样品(4 694.74 m),其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的值为 0.709 5,仅比同时代的海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的上限值 0.709 3 稍大;而对于围岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.710 9,也远大于同期海水的上限值。说明这种富锶的流体在围岩的孔隙中与围岩中的锶元素发生了一种平衡的作用,使围岩中的锶的含量上升,而脉或晶洞充填物中的锶元素含量下降。

以上分析表明,寒武系中孔洞的形成,主要与一种外来富锶的侵蚀性流体的溶蚀作用相关。地球化学剖面上看,寒武系-奥陶系,碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 具有从 0.710 9 向上逐渐减小为 0.709 1 特征,孔洞充填的方解石或白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 也是从 0.711 7 逐渐降低为 0.709 0。现今寒武系和奥陶系碳酸盐岩和孔洞充填物高于同期海水的锶同位素值,寒武系-奥陶系锶同位素降低特征,都暗示着下组合中的流体具有从下向上垂向跨层流动的特征,侵蚀性流体可能来自于下伏地层。该流体具有富锶的特征,在其向上运移的过程中,对围岩进行溶蚀,流体与围岩相互作用后,侵蚀能力向上减弱,受向上围岩原始锶同位素降低的影响,富锶流体与之作用,使原始碳酸盐岩的锶同位素增加、溶解下来的物质被迁移到其上部后其锶同位素值也相应的降低,从而使现今储层中碳酸盐岩和孔洞充填物具有从下到上锶同位素整体降低的趋势。

安平 1 井寒武系白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.709 8~0.710 2 孔洞中所充填的白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.709 5~0.709 9 所充填方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.710 3。无论是围岩还是充填物, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 明显地高于同期海水的锶同位素,表明寒武系白云岩受到了富锶流

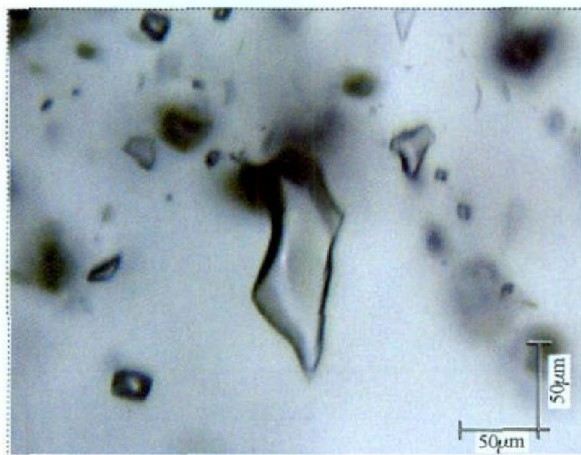


图 3 安平 1 井寒武系晚期充填的方解石中的溶解态甲烷有机包裹体

Fig. 3 Dissolved methane inclusions in the late calcite infilling in the Cambrian from well Anping 1

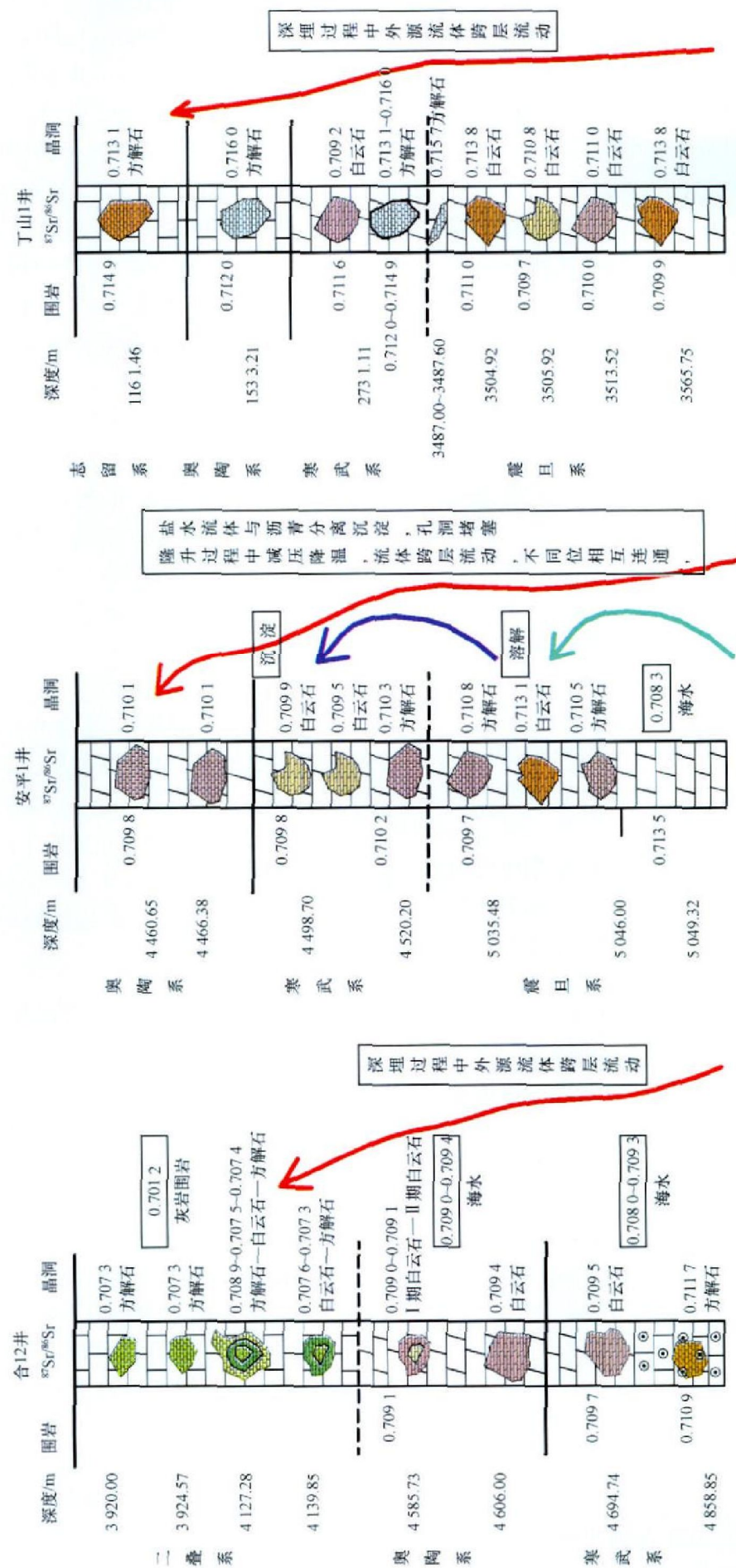


图4 四川盆地川中合12井—安平1井—川东南丁山1井锶同位素地球化学剖面(井位置见图1)

Fig.4 Strontium isotopic geochemistry profile crossing well He 12- Anping 1 in the central Sichuan Basin and well Dingshan 1 in the southeast Sichuan Basin (see Fig.1 for well location)

体的改造。其孔洞中所充填白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与下伏震旦系白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值相近,而且下伏震旦系白云岩普遍富铯,说明寒武系孔洞中所充填的白云石,主要来自于下伏富铯震旦系白云岩的溶解。当它向上运移到寒武系中时,与围岩发生水-岩反应,形成孔洞和在孔洞中沉淀,使孔洞中充填的白云石具有富铯特征。同样,由于受到来自于下伏震旦系富铯流体的改造,使寒武系中的铯同位素增加。从而造成无论是围岩还是充填物均较同期海水铯同位素高的特征。

丁山1井寒武系中白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.7116,灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.7120~0.7149,所充填白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.7092,方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 介于0.7131~0.7160。除一个白云石样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与同期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相近外,其余样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均大大地高于同期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,说明寒武系同样受到富铯流体的改造。虽然其中一个白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7092)与同期海水相近,但该白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与围岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7116)差异较大,表明形成该白云石的流体不是直接来自于围岩。它的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与下伏震旦系充填物相去甚远,说明形成白云石的流体直接来自于寒武系,但不是围岩本身。

志留系(S_1sh)与奥陶系(O_2b)裂缝中所充填的方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分别为0.7131和0.7160,它与下伏震旦系隆升过程中所形成的方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相近(0.7157)。表明在隆升过程中奥陶系与震旦系中的流体通道是相互连通,震旦系或深部流体被释放,具有跨层向上流动的特点^[24]。

综上所述,四川盆地震旦系—志留系在埋藏早期,流体仅在层内或相邻层系间流动,但是在中—晚侏罗世系原油裂解后,以及在区域构造隆升过程中,川中地区—川东南地区震旦系—下古生界流体体系多已完全连通,受到外源流体跨层溶蚀—沉淀作用改造。

4 优质储层形成机理

4.1 先存孔洞的形成机制

4.1.1 淡水岩溶作用

加里东运动使龙门山及盆地中西部剧烈抬升,绵阳—资阳地区为岩溶高地,达县—合川—泸

州一带为岩溶斜坡,均遭受广泛剥蚀^[4,25],如威远103井孔洞发育层累计厚度3.43 m,威寒1井累计厚7.48 m^[5]。川中安平1井洗象池群上部见有累计厚度10.66 m的孔洞发育层。另外,从川中地区磨深1井、女深5井古风化壳情况来看,风化面有油气聚集现象。如女深5井南津关组残厚仅11 m,中、上寒武统顶部溶蚀缝发育,溶洞以椭圆形为主,见岩溶角砾白云岩,产气720 m³/d;磨深1井中、上寒武统见溶蚀孔洞,产气4220 m³/d^[25];威寒6井下寒武统龙王庙组岩溶洞穴层孔隙度达5.43%~9.45%。

此外,早期大气渗流成岩环境可导致浅滩颗粒遭受溶蚀,形成溶孔状白云岩(图2d)。如中—上寒武统后坝组岩石孔隙度一般4.62%~6.64%,渗透率0.07 μm^2 ,厚度37 m^[6]。可见,寒武系表生岩溶作用与成岩大气淡水渗流淋滤作用有利于优质储层发育。

4.1.2 膏溶作用

寒武系中先存的晶孔、晶洞大多顺层展布,且多与膏溶作用相关。寒武系储层发育段的原始沉积环境主要为潮坪沉积,其中可以见到成层的膏盐。现存成层中的晶洞可能是原来的膏盐溶蚀后留下的空洞^[19],在剖面露头上所见到鸡笼铁丝状构造,从另一个侧面也能证实这种作用的存在(图2b)。

4.2 深埋过程中孔洞的形成与保存机制

4.2.1 外源侵蚀性流体溶蚀作用

与烃源岩相伴生的酸性流体对储层具有一定的溶蚀或改造作用,提高储集物性。如合12井洗象池群上部4695.21~4696.74 m见有一层深灰色针孔状白云岩,显微镜下,针孔主要为细晶白云石晶间溶孔,呈港湾状,为深埋溶蚀作用产物,镜下面孔率可达5%(图2d)。五科1井中、上寒武统岩心段中,可见到10段深埋溶孔、溶洞段,累计长度有5.15 m;溶洞型白云岩连通孔隙度平均为4.84%,孔隙度最高达9.84%,渗透率平均为 $0.935 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[25]。另外,通过上述铯同位素研究分析,四川盆地地下组合流体具有自下而上,下部溶解、上部沉淀的特征(图4)。因此,在流体路径下部可形成良好孔洞,深埋过程中外源侵蚀性流

体对储集层有良好的改造作用。

4.2.2 适宜构造位置与弱的流体反应

研究表明,寒武系遭受过至少 3 期盐水与 1 期烃类充注,导致那些因岩溶作用形成的先存孔洞(发育程度从岩溶斜坡—岩溶盆地逐渐减弱),在成岩过程中遭受严重破坏,处于靠近或处于斜坡带的合 12 井与丁山 1 井残留孔洞率为 10%,靠近古隆起带安平 1 井与高科 1 井则高达 50% ~ 85%,可见流体源处于或近于斜坡带(图 5)。

高科 1 井与安平 1 井孔洞充填序列相似,地化研究表明第一世代白云石(相当于合 12 井第二世代白云石)为下伏震旦系中白云石,但第二世代方解石与石英则是来自外源流体(非震旦系),形成于燕山末期区域性流体上升阶段。而合 12 井中第一世代白云石为成岩中期形成,同样处于斜坡地带的丁山 1 井充填的白云石为非本层寒武系内部流体。

可见,构造高部远离流体房,充填程度低,流体混合度也不及斜坡—凹陷带合 12 井与丁山 1 井,有利于先存孔洞的保存。

4.2.3 石油热裂解作用及热硫酸盐还原反应

随着埋藏深度的增加,温度相应地升高,石油将发生裂解形成天然气^[26-27]。1 体积的油全部裂解后将转化成 534.3 体积的气,如果是在一个封闭体系中,这种转化将会形成超压。超压引起的破裂致使压力的释放和气体的丢失^[27]。如果储集体保持为一个开放体系,原来充填的油转化成气后,为了维持静水压力,大约有 75% 的气体被丢

失或者储集岩的体积将在大小上有一个有效的增加或者气水界面下移^[27],从而抑制矿物从流体中沉淀出来而堵塞孔隙。因而,可以观察到某些岩心段孔洞(如川中高科 1 井)特别发育但是明显缺少孔洞充填。在寒武系部分井段见有较丰富的沥青(图 6),甾萜类生物标志物分布正常,未检测到标志降解、水洗等作用的 25-降藿烷,但富含金刚烷,表明其是石油热裂解产物,虽然石油热裂解作用可以形成超压抑制矿物在孔洞中的沉淀,但与此同时,石油热裂解过程中同时会形成大量的沥青,从而使先存孔隙被不同程度的堵塞。

硫酸盐热还原反应(TSR)可能是深层优质碳酸盐岩储层形成的重要机制。四川盆地深层碳酸盐岩优质储层(如普光气田、威远—资阳气田)的形成也被归结为 TSR 的结果^[28]。中、上寒武系石膏层的存在,寒武系孔洞充填物富含液态甲烷包裹体,以及寒武系底界埋深曾达 8 000 m,均表明寒武系具有 TSR 反应所发生的 3 项基本条件。值得提出的是,由 TSR 反应所形成的 H_2S 也由于与金属阳离子的结合形成硫化物矿物(尤其是黄铁矿),从而使 TSR 反应所形成的 H_2S 对碳酸盐岩的溶蚀能力大大地降低,相反由于 TSR 反应还会造成方解石或白云石沿先前早已存在晶洞的内壁结晶生长,从而使有效孔隙降低。同样地,通过热裂解作用所形成的 H_2S 也由于与金属阳离子的结合,而使 H_2S 的溶蚀能力被改变。另一方面,热裂解作用也产生了大量的固态沥青,从而使先存的孔隙被完全或部分堵塞,使储层的质量下降。寒武系储层沥青与黄铁矿对晶间孔隙的封堵,也佐证了此点。

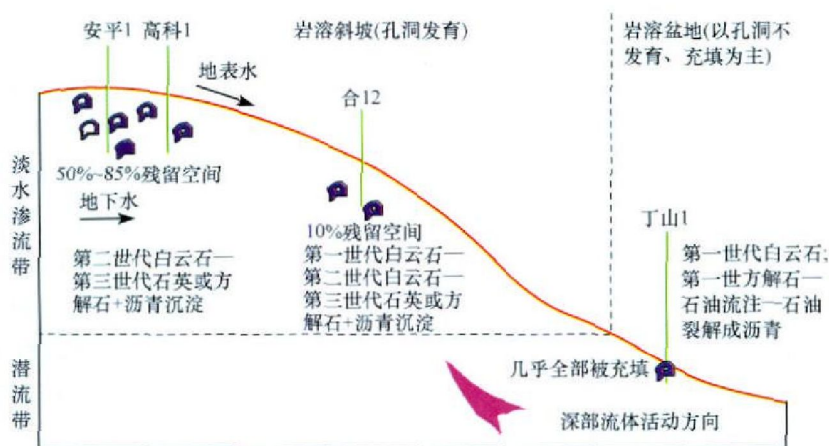


图 5 适宜构造位置与流体反应示意图

Fig. 5 Map showing favorable structure location and fluid reaction

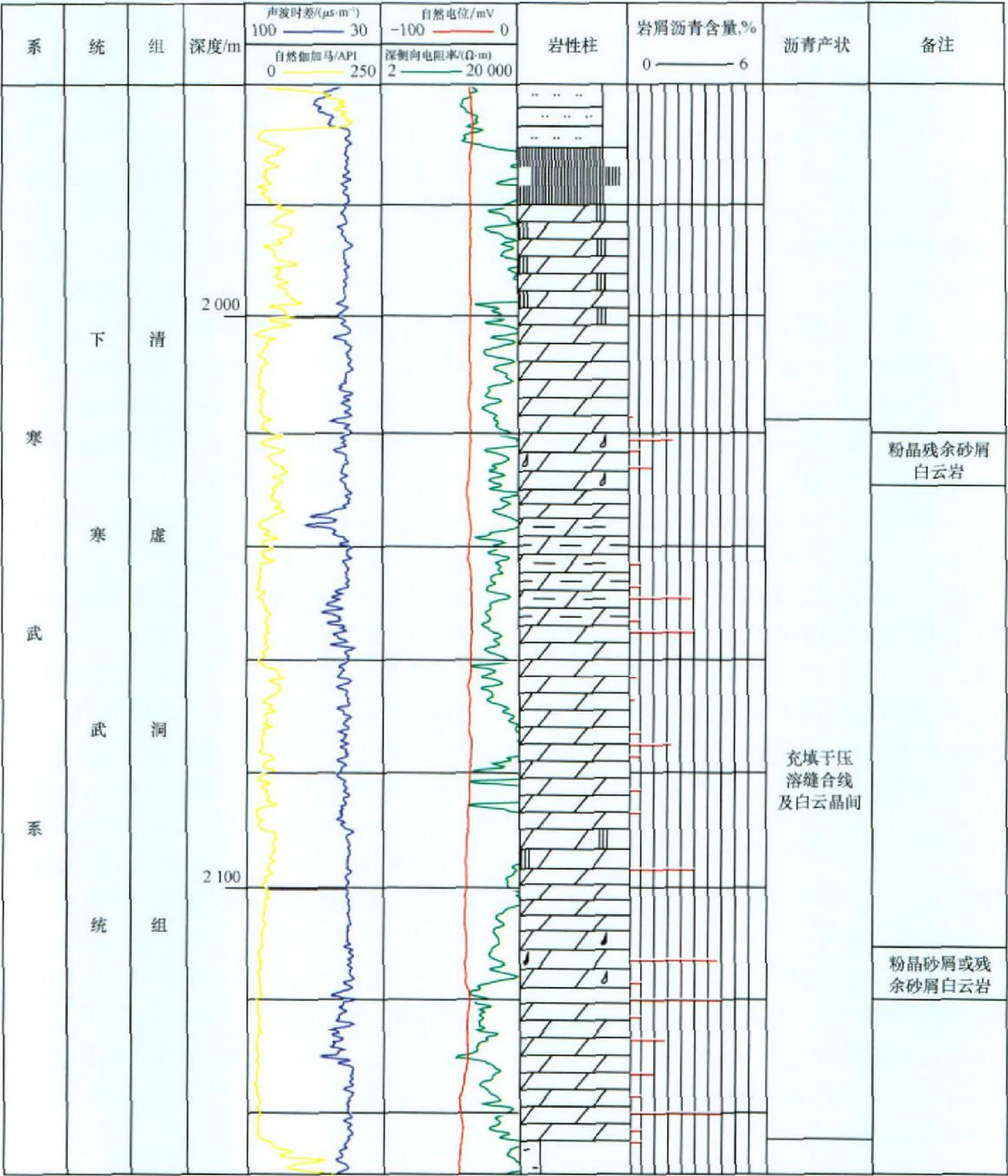


图 6 林 1 井下寒武统清虚洞组古油藏沥青含量分布 (井位置见图 1)

Fig 6 Distribution of bitumen content in the Cambrian Qingxudong Formation of well Lin 1

综上所述,下组合中虽然可能存在 TSR 作用,但这种 TSR 作用效应并不明显,TSR 作用不是寒武系储层中优质储层的主要机制。

4.3 隆升过程中孔洞的破坏机制

通过前述孔洞充填物的世代关系的研究表明,孔洞中在沥青充填后所沉淀的矿物方解石+石英—方解石—石英,形成于构造隆升过程中。由于构造隆升,油气藏上覆的地层受到剥蚀,减压降

温作用明显。从该期充填的方解石的碳氧锶同位素特征表明,它们属于外来流体,流体具有跨层流动的特征(图 5)。正如前述该期所沉淀的方解石或石英中富含液相甲烷(图 4),因此流体具有明显的超压特征;由于隆升过程中的减压降温作用,使原先由甲烷所占据的孔隙为超压流体所占据,并发生沉淀,前期裂解过程中所形成的沥青与流体分离沉淀,从而使先期表生岩溶和深埋过程中所形成的孔洞被进一步堵塞。因而,隆升过程中

的减压降温作用,导致流体跨层流动和分离沉淀,对孔洞所起到的作用主要是破坏作用。

5 结论

1)四川盆地寒武系沉积相为局限—开阔海台地相—滨岸相,中、下统岩石主要为细碎屑岩,即细砂岩、粉砂岩和页岩;上统为开阔台地—局限台地相碳酸盐岩。

2)寒武系储集岩石类型众多,以晶粒白云石夹颗粒白云岩为主,属低孔低渗性储层,局部存在孔洞型优质储集层。

3)寒武系晶洞内部具有一期石油、三期盐水充注,流体具有跨层流动、区域性、外源等特征,流体运移方向为斜坡带至古隆起,斜坡带流体混合及反应强烈,孔洞充填强烈。第一期白云石形成于早成岩期,第二期白云石形成油气生成初期中成岩期,第三期方解石—石英形成于油气裂解后构造隆升阶段。

4)深埋过程中沉淀充填作用、石油热裂解作用以及隆升过程降压流体分异沉淀作用是孔洞的主要破坏机制。

5)流体跨层流体造成寒武系保存条件在一定程度上的破坏,川中地区与川东南地区二叠系地层已不具备对下伏寒武系的封堵能力。因此,处于岩溶盆地的川东区及鄂西渝东地区,其上覆盖有巨厚的中生代碳酸盐岩与碎屑岩地层,以上各机制导致寒武系可能发育有优质储层,以及存在后期改造形成的次生气藏。

参 考 文 献

- 肖开华,沃玉进,周雁,等.中国南方海相系油气成藏特点与勘探方向[J].石油与天然气地质,2006 27(3): 316~415
- 冉隆辉,谢姚祥,王兰生.从四川盆地解读中国南方海相碳酸盐岩油气勘探[J].石油与天然气地质,2006 27(3): 289~294
- 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
- 黄籍中,陈盛吉,宋家荣,等.四川盆地烃源岩体系与大中型气田形成[J].中国科学(D辑),1996 26(6): 504~510
- 徐世琦,代宗仰,蒋小光,等.古隆起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
- 李天生.四川盆地寒武系沉积成岩特征与油气储集性[J].矿物岩石,1992 12(3): 66~73
- 徐世琦.加里东古隆起震旦—寒武系成藏条件[J].天然气工业,1999 19(6): 7~10
- 徐世琦,张光荣,王欣.古隆起带寒武系洗象池群油气勘探前景分析[J].天然气勘探与开发,2004 27(4): 1~2 17
- 戴鸿鸣,王顺玉,王海清,等.四川盆地寒武系—震旦系含气系统成藏特征及有利勘探区块[J].石油勘探与开发,1999 26(5): 16~20
- 张帆,文应初,强子同.四川盆地寒武系洗象池群碳酸盐岩向上变浅沉积序列[J].矿物岩石地球化学通报,1999 18(1): 23~27
- 王庭斌.中国大中型气田成藏的主控因素及勘探领域[J].石油与天然气地质,2005 26(5): 572~583
- 郑和荣,胡宗全,周小进,等.中国前中生代海相储层发育的构造—沉积条件[J].石油与天然气地质,2008 29(5): 574~581
- 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
- 胡书毅,马玉新,田海芹.扬子地区寒武系油气藏地质条件[J].石油大学学报(自然科学版),1999 23(4): 20~25
- 冯增昭,彭勇民,金振奎,等.中国早寒武世岩相古地理[J].古地理学报,2002 4(1): 1~12
- 冯增昭,彭勇民,金振奎,等.中国中寒武世岩相古地理[J].古地理学报,2002 4(2): 1~11
- 冯增昭,彭勇民,金振奎,等.中国晚寒武世岩相古地理[J].古地理学报,2002 4(3): 1~10
- 梅冥相.上扬子区寒武系娄山关群白云岩层序地层格架及其古地理背景[J].古地理学报,2007 9(2): 117~135
- 刘树根,王国芝,黄文明,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
- 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
- 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
- McArthur J M, Bumett J, Hancock J M. Strontium isotopes at K/T boundary discussion[J]. Nature, 1992 355: 28
- 黄思静,石和,张萌,等.龙门山泥盆纪锶同位素演化曲线的全球对比及海相地层的定年[J].自然科学通报,2002 12(9): 945~951
- 刘树根,黄文明,陈翠华,等.四川盆地震旦系—古生界热液作用及其成藏成矿效应初探[J].矿物岩石,2008 41(3): 41~50
- 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
- Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence (2nd edition)[M]. Berlin: Springer-Verlag 1984. 699
- Tian H, Xiao X M, Wilkins R W T, et al. New insights to 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
- 朱光有,张水昌,梁英波.四川盆地深部海相优质储集层的形成机理及其分布预测[J].石油勘探与开发,2006 33(2): 161~165