

文章编号: 1000-0550(2007) 06-0831-09

四川盆地三叠系飞仙关组气藏储层成岩作用研究拾零¹

王一刚 文应初 洪海涛 夏茂龙 何颀婷 宋蜀筠

(中国石油西南油气田公司勘探开发研究院 成都 610050)

摘要 近年来在四川盆地三叠系飞仙关组鲕粒白云岩储层中发现的高含硫天然气三级储量已近 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。鲕粒白云岩储层集中分布在含蒸发岩的层序中, 储层中有残余石膏、硬石膏及它们的模孔、方解石铸模(假象)等, 表明白云石化流体与蒸发海水有关。白云石化由层间古暴露面向下增强的成岩层序说明这种白云石化是成岩早期发生的, 并可能有大气降水与蒸发海水混合的影响。白云岩样品各结构组分氧、碳同位素微区测试数据差别显著, 这说明采用岩石混合样做研究白云石化成因的地球化学分析可能导致误解。飞仙关组的白云岩中多数保存了原岩结构幻影、结构残余或原岩的全部结构说明白云石化过程是等体积交代。白云岩储层中的孔隙是各种溶蚀孔而非白云石化等摩尔交代的体积收缩孔。飞仙关组高含硫气藏储层中沥青和溶蚀孔的关系表明深埋晚期溶蚀孔最发育。在溶液中碳酸的电离常数大大高于氢硫酸, 飞仙关组高含硫气藏天然气组分中的 CO_2 相对于 H_2S 的质量亏损和储层中有富轻碳的高温方解石充填晚期溶孔、裂缝表明储层中的晚期溶解作用是由硫酸盐热还原过程(TSR)中生成的 CO_2 引起的。

关键词 四川盆地 飞仙关组 白云石化 次生孔隙 硫酸盐热还原(TSR) 氧、碳稳定同位素 CO_2

第一作者简介 王一刚 女 1954年出生 硕士 教授级高级工程师 油气勘探 E-mail wyg516688@163.com

中图分类号 P618.130.2 TE122.2⁺21 **文献标识码** A

1 引言

过去 10 年中四川盆地三叠系飞仙关组气藏勘探取得巨大成果, 探明可采储量达到数万亿 m^3 , 单个气藏的储量规模超过千亿 m^3 。这些储量的 95% 以上都是来自白云石化程度很高的层状一块状白云岩储层的高含 H_2S 气藏。这使得飞仙关组气藏储层的白云石化成因、孔隙演化模式、高含硫天然气成因等和储层形成过程有关的成岩作用研究成为热点, 已有许多研究成果公开发表。本文依托于国家“973”项目(2001GB209104)的研究, 对四川盆地三叠系飞仙关组高含硫气藏储层成岩演化研究的一些议题提出几点看法, 供同行参考、指正。

2 白云石化成因研究

在四川盆地三叠系飞仙关组储层的研究中鲕粒灰岩的白云石化成因无疑是讨论最多的问题。除岩石学的常规研究外, 地球化学研究、显微发光分析、包裹体研究、有序度测试等都有人投入大量工作, 但各自的结论却不尽相同。油公司的各种内部研究报告和公开发表的论文对这类气藏储层的白云石化成因也有多种解释, 有的强调渗透回流成因, 有的强调混

合水白云石化, 也有的强调埋藏白云石化。当然, 还有人认为是多种成因的^[1-6]。

四川盆地三叠系飞仙关组这些层状一块状白云岩储层的岩石结构变化很大。除比例较小的微晶白云岩外, 其他类型的白云岩的原岩几乎都是鲕粒灰岩, 因为这些白云岩中都残留有鲕粒结构的印迹。据此可以粗略地将它们划分为残留有鲕粒幻影的晶粒白云岩、鲕粒结构部分保存的残余鲕粒白云岩和原岩结构基本保存的鲕粒白云岩三种类型。白云岩储层岩石结构的复杂性可能是导致白云岩化成因解释多样化的原因。每一个解释模式都是研究者根据所取得的资料、样品等进行沉积学和岩石学研究、地球化学分析测试之后提炼出来的。沉积学和岩石学研究是地球化学解释的基础, 后者是对前者的佐证和补充。

2.1 飞仙关组鲕粒白云岩储层的成岩流体与蒸发海水有关

这一认识来自对四川盆地三叠系飞仙关组储层类型的宏观分布特征和储层内含蒸发矿物的微观特征的研究。即连片的层状一块状的鲕粒白云岩储层只分布在富石膏沉积的川东北碳酸盐蒸发台地和川西北碳酸盐蒸发台地相区(图 1), 并且在已发现的鲕粒白云岩气藏的储层中差不多都能见到残余的石膏、

¹ 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2001GB209104)资助

收稿日期: 2007-03-26 收修修改稿日期: 2007-06-25

硬石膏晶体、结核, 或它们的方解石假晶或它们的溶模孔(图 2)。在川东碳酸盐开阔台地相区则以鲕粒灰岩储层为主, 白云岩储层只在局部地区呈透镜状分布。海槽相区的层状一块状鲕粒岩几乎都是致密的

灰岩(图 1)。鲕粒白云岩储层的宏观分布特征和岩石学微观特征都十分有利于渗透回流白云石化作用的解释。但在这些鲕粒白云岩储层中也经常见到与古暴露面或大气渗流带共存的白云石化现象。

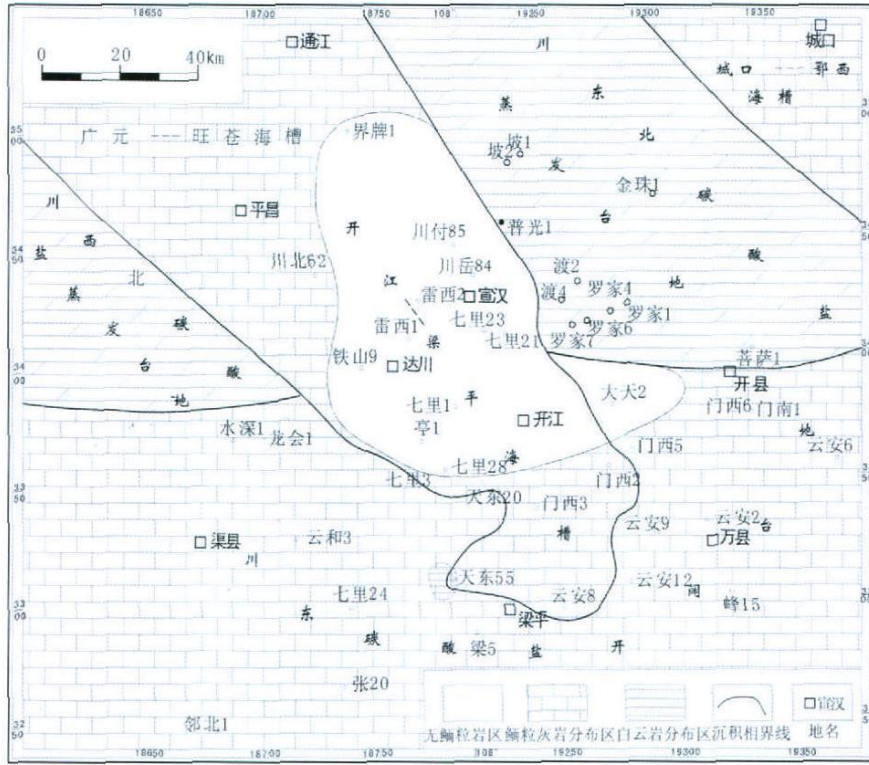


图 1 四川盆地北部三叠系飞仙关组鲕粒岩类分区略图

Fig 1 Sketch map showing distribution of oolitic dolomite and limestone of the Triassic Feixianguan Formation in north Sichuan Basin

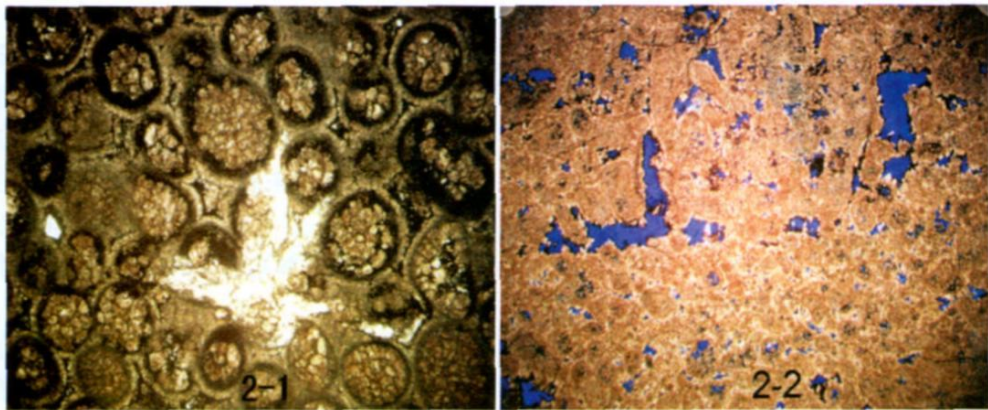


图 2 飞仙关组鲕粒白云岩储层中的硫酸盐矿物遗痕

Fig 2 Pseudomorph (2-1) and Moldic porosity (2-2) of anhydrite crystal in oolitic dolomite
2-1石膏结核的方解石假晶, L-9井 9# 单偏光, 边长 2.6mm;
2-2石膏模孔, L-9井 9# 蓝色铸体片, 单偏光, 边长 10mm

图 3 是川东北渡 4 井三叠系飞仙关组储层成岩层序中古暴露面的一组连续的岩石薄片显微照片。图 3-1 是储层古风化壳上的碎屑灰岩, 其中可见到未白云石化的单个破碎鲕粒和未白云石化的早期环边胶结物碎片, 以及少量破碎的白云石晶粒和大量细碎屑物杂乱混积, 反映了经早期胶结作用之后因大气暴露而被强烈改造的成岩组构特征。图 3-2 在图 3-1 之下 0.7 m, 岩石结构特征与图 3-1 相似, 但更粗, 具明显的角砾结构, 砾石都是鲕粒岩, 有的已白云石化, 有的仍为鲕粒灰岩, 砾间充填破碎的鲕粒、白云石晶粒、海底胶结物碎片及粉—泥级碎屑, 表现出风化面下部的特征。图 3-3 在图 3-2 之下 0.43 m, 为白云化程度已很高的、但基本保存着原岩结构的鲕粒白云岩。岩石中充填渗流物的“V”型裂缝发育, 渗流充填物中有破碎的云化鲕粒、破碎的白云石晶粒以及更细的渗流粉砂。图 3-4 在图 3-3 之下 1.50 m, 为结构基本未受影响的鲕粒白云岩, 但微溶缝中充填细碎屑白云石质渗流粉砂。图 3 四张照片清楚的表现出沿着

古风化面由上而下白云石化作用逐渐增强的岩石学特征。这说明飞仙关组鲕粒岩储层的白云石化是成岩早期阶段发生的, 同时也说明这类白云石化过程可能与混合水白云石化作用相关, 而不可能是埋藏期的。作者曾因此并根据渡 4 井鲕粒白云岩样品的碳、氧同位素值具有正相关的特征和低 Sr 低 Na 等微量元素分布特征认为它们是混合水白云石化成因的^[7,8]。放在川东北碳酸盐蒸发台沉积环境这个大的地质背景下, 这种混合水应当是浓缩后的蒸发海水与大气降水的混合, 其高镁钙比和低离子浓度的特点可能是粉、细晶粒白云石的成因。

混合水白云石化作用因缺乏现代实例在学术界一直有人置疑, 一些原解释为混合水成因的古代实例被重新研究后解释为其它成因^[9,10]。在分析川东北飞仙关组碳酸盐蒸发台地鲕粒白云岩储层中这类常与暴露面相伴生的成岩早期白云岩的成因时不应忽视有大气降水影响的可能。

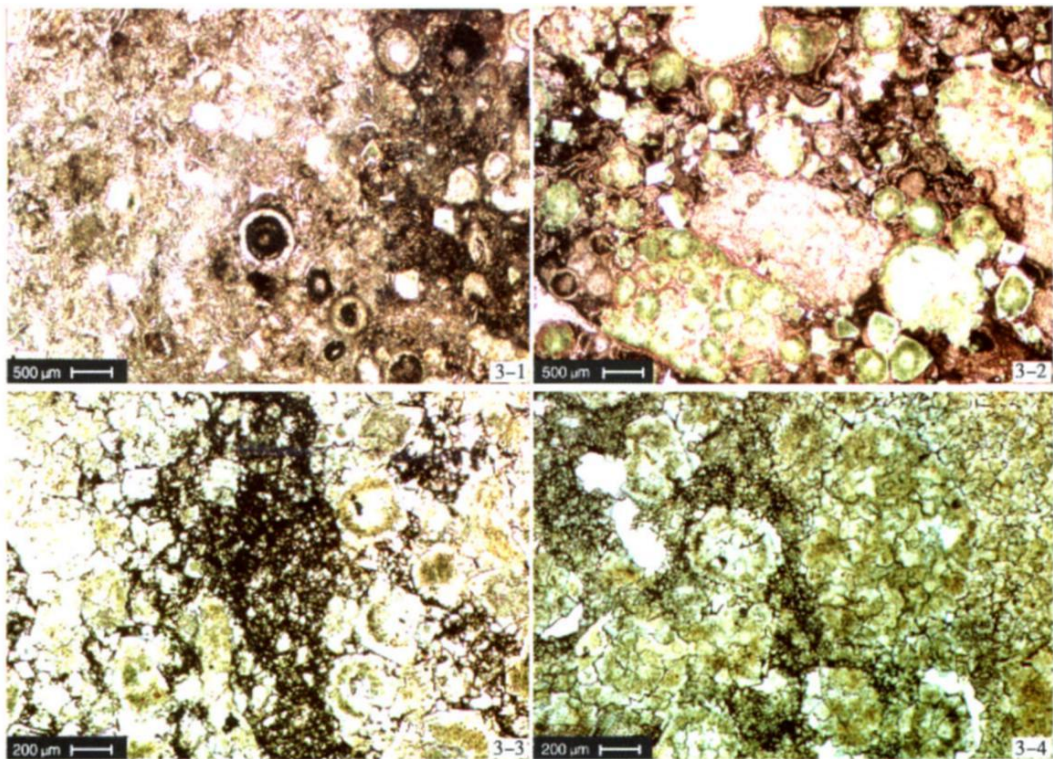


图 3 与暴露面有关的白云石化序列: 由上向下白云石化程度增加。渡 4 井, 4 224.14~4 227.04 m。染色薄片, 单偏光

Fig 3 Photomicrographs showing a dolomitization sequence related to exposure of oolitic dolostone. Well D4 4 224.14~4 227.04 m
3-1 碎屑灰岩。含破碎的鲕粒、早期胶结物、白云石晶体及微小碎屑。有的鲕粒有泥晶套或泥晶化的核。4 224.44m, 标尺: 500 μm ; 3-2 含砾碎屑鲕粒灰质白云岩。细砾及鲕粒大部分白云石化, 与破碎的鲕粒、白云石晶粒、胶结物混杂堆积。4 224.14 m, 标尺: 500 μm ; 3-3 残余鲕粒白云岩中充填渗流粉砂的“V”形溶缝。渗流物为破碎的白云石及暗色灰泥。残余鲕粒中保存有泥晶化的幻影。4 225.57 m, 标尺: 200 μm ; 3-4 残余鲕粒白云岩, 微溶缝中充填细碎屑白云石质渗流粉砂, 白云石化的鲕粒中有泥晶化的幻影。4 227.04 m, 标尺: 200 μm 。

2.2 氧、碳稳定同位素测试避免使用混合样

氧、碳稳定同位素组成是研究层状白云岩成因时最常用、最重要的地球化学测试资料。图 4 是四川盆地三叠系飞仙关组层状白云岩氧、碳稳定同位素分布图(数据来自中石油西南油气田公司勘探研究院勘探地质实验室)。分散的数据点很难被解释为某种白云石化模式。但这些数据来自全岩混合样,因此它们所传递的不仅仅是白云石化成因的信息,而是样品经历的所有成岩过程的信息。表 1 是几种不同结构的鲕粒白云岩薄片微区氧、碳同位素测试分析结果(即激光同位素取样测试分析),同时也列出了常规全岩样测试分析结果作对比。表中数据清楚表明白云岩各结构组分的氧、碳同位素测试值差别很大($\delta^{13}\text{C}$: $-18.36\text{‰} \sim -3.58\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $-10.41\text{‰} \sim -3.08\text{‰}$),而常规全岩混合样的测试值分布区明显减小($\delta^{13}\text{C}$: $-5.81\text{‰} \sim -2.29\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $-5.66\text{‰} \sim -3.25\text{‰}$)。多数样品各组分的算术平均值与混合样测试值相符,单组分样品二者基本相同。对比图 4 与表 1 不难看出 $\delta^{13}\text{C}$ 偏轻并不反映白云石化流体性

质,而是晚期成岩流体影响的结果。

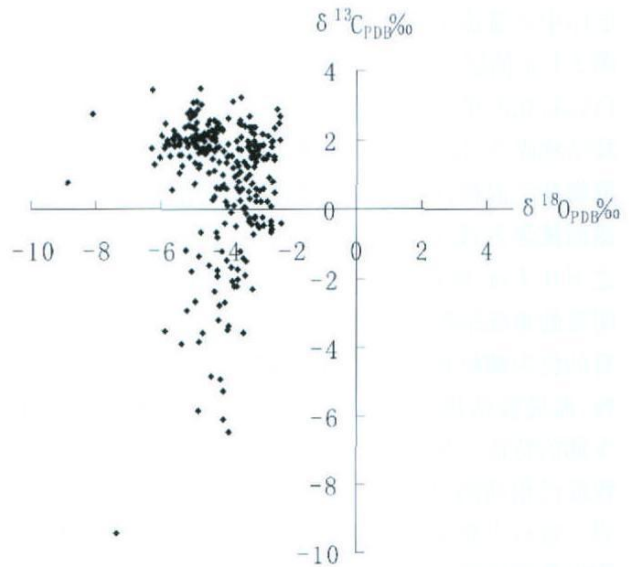


图 4 四川盆地东北部三叠系飞仙关组白云岩、氧同位素分布图

Fig. 4 $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ cross plot for dolomite reservoir of the Triassic Feixiangguan Formation in northeast Sichuan Basin

表 1 飞仙关组白云岩储层碳、氧同位素微区测试值对比

Table 1 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ comparison of structural constituent in oolitic dolomite reservoir rock and total rock in Sichuan Basin

样号	$\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$ 测试值 /‰				
	白云岩结构组分				混合样
	晶粒鲕粒	泥—微晶鲕粒	环边胶结物	溶孔充填方解石	
LJ-4		0.89 / -3.4	-1.41 / -6.93	-4.83 / -5.3	-0.08 / -3.84
LJ-59		1.15 / -4.26	1.18 / -3.96		1.25 / -3.63
LJ-77	-3.18 / -4.05			-18.36 / -6.11	-5.81 / -4.86
PG-16	2.96 / -4.20	-0.37 / -10.41	3.58 / -3.73		2.29 / -5.63
PG-31	1.92 / -5.26				2.06 / -5.66
PG-39	1.4 / -3.89		1.48 / -3.08		2.23 / -3.25
PG-5	5.85 / -3.4			2.31 / -6.6	3.44 / -6.29

因此,在研究飞仙关组层状白云岩储层的白云石化成因时采用混合样测试氧、碳同位素值是不合适的。由此可以联想到相关的地球化学分析测试都应采用微区测试方式而避免使用混合样。

3 鲕粒白云岩孔隙成因研究

3.1 飞仙关组气藏白云岩储层的孔隙中的深埋期溶蚀孔很显著

川东北三叠系飞仙关组储层的成岩过程复杂。

原生孔隙在烃类侵位前因成岩期各种胶结作用、充填作用、压实作用等基本消失。作为油气藏储集空间的孔隙几乎都是次生溶蚀孔(图 5)。这些孔隙包括各种粒内溶孔(主要是鲕粒内,少量晶粒内)、粒间溶孔(鲕粒间和晶粒间)、超大溶孔、沟状溶孔等。鲕粒白云岩储层中鲜见白云石晶粒间的多面体晶间孔,而且有原岩的结构或结构幻影保存,这些都意味着白云石化过程是等体积交代,而不是等摩尔交代,不会有伴随白云石化的体积收缩孔产生。

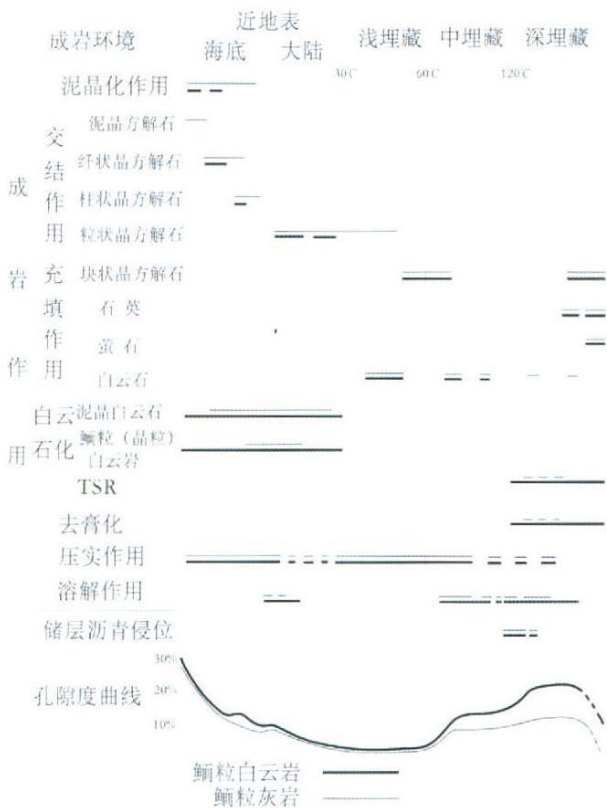


图 5 四川盆地三叠系飞仙关组鲕粒白云岩、
鲕粒灰岩储层成岩作用与孔隙演化对比图

Fig 5 Chart showing diagenesis and porosity evolutions of reservoirs of the Triassic Feixianguan Formation in Sichuan Basin

由古油藏演化而来的飞仙关组气藏的储层中大多含有储层沥青。根据溶蚀孔隙与沥青之间的关系有的可以区别出早、晚两期埋藏溶解孔。图 6-1 鲕粒白云岩的粒间溶蚀孔及粒内微溶蚀孔全部被沥青充填,表明这些孔隙是古油藏的有效储集空间,是早期埋藏溶蚀孔;图 6-2 中的晚期溶缝、溶沟切过充填沥青的孔隙系统。图 6-3 中较小的鲕粒间溶蚀孔内有沥青衬里,大的溶蚀孔中有的残留有小的沥青衬里(沥青环),表明古油藏裂解后残留的溶蚀孔被再次溶解扩大。图 6-4 中细碎的沥青碎片及白云石碎屑残积在扩大的粒间溶蚀孔中形成“示底构造”。图 6-5 中左半部较细小的孔隙系统被沥青全充填,右半部较大的溶蚀孔中有的下部有残积沥青碎片,显示大的溶孔是晚期形成的。图 6-6 中左边的鲕粒内的筛状溶孔全被沥青充填,右边的鲕模孔内有残积的沥青碎片“示底构造”,中部鲕粒的半模孔内无沥青,表明鲕粒内的大溶孔形成于古油藏破坏、沥青侵位之后,此外它也表明储层中的其它那些没有沥青存在的大溶

孔也可能是晚期形成的。

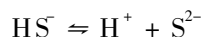
川东北飞仙关组气藏白云岩储层中的深埋藏期的溶蚀孔普遍存在,并且常形成一些较大的孔隙系统。了解这些孔隙系统的形成机制进而预测优质储层的分布,是寻找大中型气藏关键。

3.2 飞仙关组气藏鲕粒白云岩储层中的晚期溶蚀孔的形成主要与油气藏中硫酸盐热还原反应(TSR)产生的 CO_2 有关

以层状鲕粒白云岩为储层的飞仙关组气藏大都高含 H_2S ,特别是在川东北地区(表 2)。这些 H_2S 是在深埋高温(一般认为大于 120°C) 封闭条件下以油气藏中的烃类作为还原剂还原地层中的石膏等硫酸盐矿物(即 TSR)的结果^[11]。富含 H_2S 的鲕粒白云岩储层的孔隙度算术平均值达到 7.3%。与之成鲜明对比的是低含 H_2S 或不含 H_2S 的飞仙关组气藏的储层都是鲕粒灰岩,或以鲕粒灰岩为主,平均孔隙度 4%,差不多只有富 H_2S 气藏储层的一半。这使人很自然地想到气藏储层中的硫酸盐热还原过程(TSR)可能与这些储层中的晚期溶蚀孔形成相关。储层中的一些膏模孔可能是 TSR 过程的一种结果,但大量的晚期溶蚀孔并不具有膏模孔的特征,表明还存在其它的溶蚀白云岩骨架的机制。

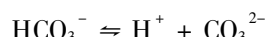
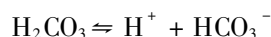
在深埋藏、地温高于 120°C 后,地层水中的有机酸开始分解,到 160°C 前地层水中有机酸浓度降至 $0^{[12]}$,因此深埋藏阶段有机酸的溶解作用是有限的。近年来一些研究成果提出高含硫气藏储层中的 H_2S 溶于地层水中成为氢硫酸,由氢硫酸对储集岩骨架的溶解是形成晚期溶孔、使高含硫气藏储层孔隙度明显提高的主要原因^[4, 13~16]。

H_2S 溶于水,在室温和一个大气压下 H_2S 的饱和水溶液的浓度约 0.1 M。 H_2S 溶于水后即成为氢硫酸,是弱的二元酸,在水中的电离分为二级,即



第一级电离常数 K_1 为 1.0×10^{-7} ,第二级电离常数 K_2 为 1.3×10^{-13} ,太小, K_2 可忽略。

TSR 过程在生成 H_2S 的同时,也有大量 CO_2 生成。 CO_2 溶于水后成为碳酸,即 H_2CO_3 。碳酸同样是一种弱的二元酸,它对碳酸盐矿物的溶解、沉淀,即钙、镁的质量传输有重要意义。碳酸在水中的二级电离为:



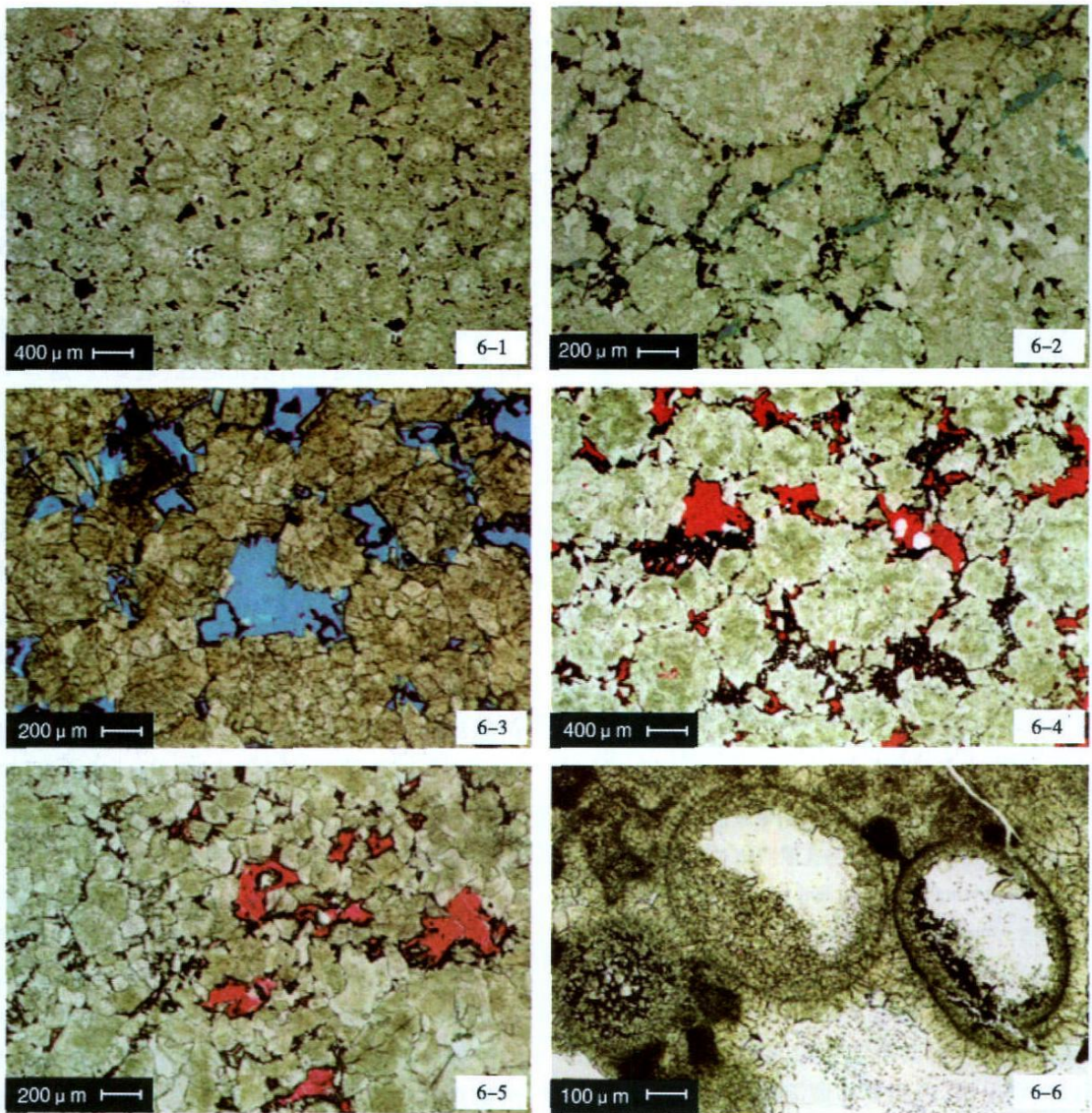


图 6 飞仙关组鲕粒白云岩储层中沥青与埋藏溶解孔

Fig 6 Photomicrographs showing the relation between bitumen and burial dissolution pore of oolitic dolomite reservoir
 6-1 鲕粒白云岩, 不规则溶孔被沥青全充填。D5 井, 4 799. 20 m, 红色铸体片, 单偏光; 6-2 鲕粒幻影白云岩, 无沥青的溶缝、溶沟切割充填沥青孔隙系统。T5 井, 2 856. 80 m, 蓝色铸体片, 单偏光; 6-3 残余鲕粒白云岩, 大溶孔中残留的沥青衬里。L2 井, 540#, 蓝色铸体片, 单偏光; 6-4 残余鲕粒白云岩, 大溶孔中残留的沥青碎屑具“示底”的显示。D3 井, 4 311. 80 m, 红色铸体片, 单偏光; 6-5 具鲕粒幻影的粉一细晶白云石, 前期埋藏溶孔小且为沥青强烈充填, 后期溶孔大, 有的有沥青碎屑“示底”。D1 井, 8#, 红色铸体片, 单偏光; 6-6 鲕粒白云岩, 左鲕粒内网状溶孔全充填沥青, 中右鲕粒内溶孔无沥青, 沥青碎屑呈“示底”。D5 井, 4 789. 40 m, 普通薄片, 单偏光。

表 2 渡口河气藏飞仙关组鲕滩气藏天然气分析汇总表

Table 2 Natural gas component of Dukouhe gas pool of Feixianguan Formation

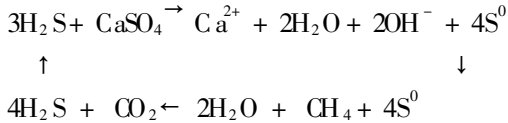
井号	天然气组分含量 %							单位体积重量			物理性质		
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	H ₂	He	H ₂ S	CO ₂	H ₂ S/(g/m ³)	CO ₂ /(g/m ³)	r	T _c /K	P _c /MPa
渡 1 _侧	76.7	0.04	0.04	0.42	0.116	0.014	16.21	6.46	231.925	9.02	0.661	220.4	5.322
渡 2	78.74	0.04	0.01	1.6	0.062	0.016	16.24	3.29	232.312	64.64	0.694	223	5.417
渡 3	73.71	0.06	0.05	0.79	0.048	0.014	17.06	8.27	244.051	162.157	0.743	230.7	5.573
渡 4	88.42	0.03	0.01	1.12	0	0	6.4	4	140.303	98.826	0.638	206.2	5.015
平均	79.39	0.043	0.028	0.983	0.057	0.011	13.98	5.51	212.15	83.66	0.684	220.08	5.332

其表观电离常数 K_1 为 4.2×10^{-7} , K_2 为 4.8×10^{-14} 。碳酸的 K_1 是氢硫酸的 4 倍。但实际上 CO_2 溶液中大部 CO_2 以结合较弱的水合分子形式存在, 只有部分生成 H_2CO_3 。实验测定在饱和 CO_2 水溶液中 H_2CO_3 的实际浓度计算碳酸的有效电离常数为 2×10^{-4} , 即为氢硫酸的 2 000 倍。而且由于地层水中碳酸的电离, H^+ 浓度明显增加会抑制氢硫酸的电离, 降低氢硫酸的影响。因此, 由储层中 TSR 过程产生的 CO_2 比 H_2S 对深埋期的溶解过程应当有更大的贡献。

川东北飞仙关组气藏白云岩储层中的情况明显支持上述认识。它表现为:

(1) 天然气组分中 CO_2 对 H_2S 有明显的质量亏损。

据 HeydariE (1997) 研究, 含硫气藏中的 TSR 存在自增强循环过程:



在地温足够高时, 整个气藏将演变成为 H_2S 、 CO_2 气藏。该循环式中左上、右下为 TSR 过程中的反应物, 右上、左下为反应的产物, 横箭头为反应方向, 竖箭头为循环方向。对比左侧上、下二式可见: TSR 循环过程中产生的 H_2S 和 CO_2 的摩尔量是相等的。但

在川东北飞仙关组高含硫气藏中 CO_2 的质量数较 H_2S 明显的低 (表 2)。

(2) 储层中有 CO_2 参与反应的产物而缺乏 H_2S 参与反应的产物。

在川东北飞仙关组高含硫的气藏储层中, 特别是在气藏边部或低部位常见有充填晚期溶蚀孔或裂缝的粗晶一块状晶方解石。这些方解石所含两相流体包裹体的均一温度集中在 $130 \sim 170^\circ\text{C}$ (图 7), 而且具有明显偏负或非常偏负的碳同位素值 (如表 1, LJ-4, LJ-7 号样品)。这就表明这些方解石的物质来源与储层中发生的 TSR 过程产生的 CO_2 和储层岩石骨架的溶解过程有关。即系统中 TSR 过程使地层水中 CO_2 浓度增加、 CO_2 分压增大时 HCO_3^- 浓度增加, 地层水溶解、接纳 Ca^{2+} 能力增强。当这种流体迁移至某种不同环境如地层压力降低处等便会有这种含高温流体包裹体、富轻碳同位素的方解石从溶液中析出。相反, 在储层中从未见到过氢硫酸的钙盐, 即 CaS 。 CaS 微溶于水但易水解。硫酸钙是含硫钙盐中最稳定的, 但在气藏的深埋条件下 CaS 是不可能转变为 CaSO_4 的。因此在高含硫气藏 TSR 过程中产生的 CO_2 可能是产生晚期溶蚀作用使高含硫气藏储层孔隙度增高的主要原因。

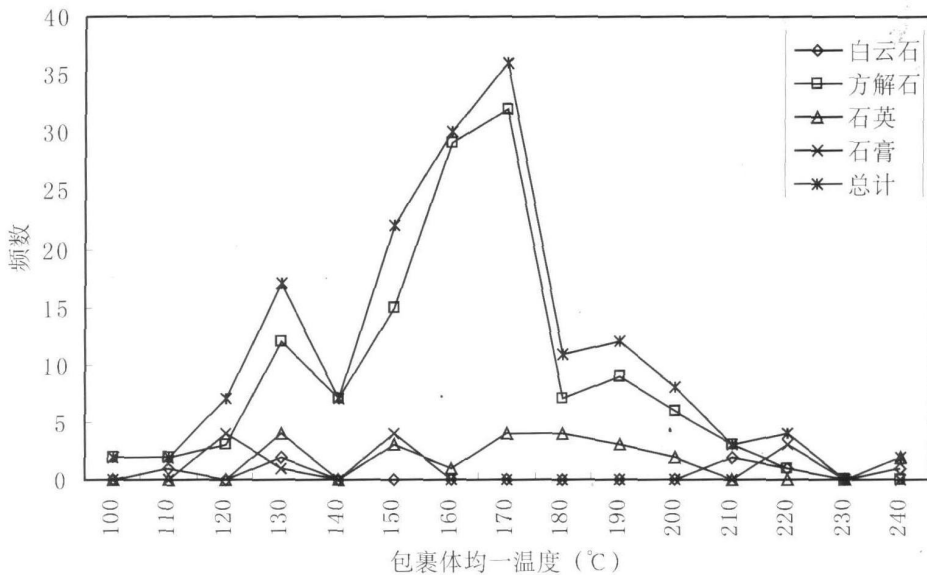


图 7 四川盆地三叠系飞仙关组鲈滩储层自生矿物包裹体均一温度分布图

Fig 7 Histogram of homogeneous temperature of fluid inclusion in authigenic mineral of dolomite reservoir of the Triassic Feixianguan Formation in north Sichuan Basin

4 小结

以上论述说明:

(1) 四川盆地川东北地区飞仙关组鲕粒岩的白云石化是成岩早期的, 其白云石化流体来自蒸发海水, 包括可能在一定程度上被大气降水稀释的蒸发海水。

(2) 在研究白云石化机理时采用混合样来做氧、碳同位素分析以及其它地球化学分析是不恰当的, 应采用地球化学的微区测试技术。

(3) 川东北飞仙关组白云石交代方解石的过程主要是等体积交代, 而非等摩尔交代, 白云岩储层的孔隙主要是次生溶蚀孔而非体积收缩孔。

(4) 飞仙关组气藏鲕粒白云岩储层中的深埋期溶蚀孔发育, 它们可以根据储层中孔隙与储层沥青的关系来识别。

(5) 飞仙关组气藏鲕粒白云岩储层中的深埋期溶蚀作用主要与气藏 TSR 过程中产生的 CO_2 有关, 与 H_2S 有关的溶解作用缺乏证据。

参考文献 (References)

- 1 苏立萍, 罗平, 胡社荣, 等. 川东北罗家寨气田下三叠统飞仙关组鲕粒滩成岩作用. 古地理学报, 2004, 6(2): 182-190 [Su Liping, Luo Ping, Hu Shierong *et al.* Diagenesis of oolitic bank of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in Luojiashai Gas Field, Northeastern Sichuan Province. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(2): 182-190]
- 2 魏国齐, 杨威, 张林, 等. 川东北飞仙关组鲕粒滩白云石化成因模式. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 162-166 [Wei Guoqi, Yang Wei, Zhang Lin *et al.* Dolomitization genesis of Feixianguan Group oolitic beach reservoir in northeast Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(2): 162-166]
- 3 陈更生, 曾伟, 杨雨, 等. 川东北部飞仙关组白云石化成因探讨. 天然气工业, 2005, 25(4): 40-41 [Chen Gengsheng, Zeng Wei, Yang Yu *et al.* Discussion on dolomitization genesis of Feixianguan Formation in northeast Sichuan. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(4): 40-41]
- 4 杨晓萍, 赵文智, 曹宏, 等. 川东北三叠系飞仙关组鲕粒滩气藏有利储集层的形成与分布. 石油勘探与开发, 2006, 27(1): 17-21 [Yang Xiaoping, Zhao Wenchi, Cao Hong *et al.* Formation and distribution of Triassic Feixianguan oolitic bank favorable reservoir in the NE Sichuan basin. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 27(1): 17-21]
- 5 黄思静, 郝雨, 裴昌蓉, 等. 川东三叠系飞仙关组白云岩镧含量、镧同位素组成与白云石化流体. 岩石学报, 2006, 22(8): 2123-2132 [Huang Sijing, Hao Yu, Pei Changrong *et al.* Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids in the Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan of China. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2123-2132]
- 6 Wen zhi Zhao, Ping Luo, Gengsheng Chen, *et al.* Origin and reservoir rock characteristics of dolostones in the Early Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, China: Significance for future gas exploration. *Journal of Petroleum Geology*, 2005, 28(1): 83-100
- 7 王一刚, 张静, 刘兴刚, 等. 四川盆地东北部下三叠统飞仙关组碳酸盐蒸发台地沉积相. 古地理学报, 2005, 7(3): 357-372 [Wang Yigang, Zhang Jing, Liu Xinggang *et al.* Sedimentary facies of evaporative carbonate platform of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in northeastern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(3): 357-372]
- 8 王一刚, 文应初, 张静, 等. 四川盆地东北部下三叠统飞仙关组鲕粒白云岩的混合水白云石化. 见: 罗平, 贾爱林主编. 中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室论文集. 北京: 石油工业出版社, 2001, 215-224 [Wang Yigang, Wen Yingchu, Zhang Jing *et al.* Mixing-zone dolomitization related to exposure surface in Triassic Feixianguan Formation, Northeastern Sichuan Basin, China. In Luo Ping, Jia Ailin (eds). Paper Volume of CNPC Key Lab for Oil and Gas Reservoirs. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001, 215-224]
- 9 Allan JR, Wiggins W D. Dolomite Reservoirs. AAPG Continuing Education Course Note Series# 36, 1993
- 10 Luczaj JA. Evidence against the Dorag (mixing-zone) model for dolomitization along the Wisconsin arch: A case for hydrothermal diagenesis. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1719-1738
- 11 王一刚, 窦立荣, 文应初, 等. 四川盆地东北部三叠统飞仙关组高含硫气藏 H_2S 成因研究. 地球化学, 2002, 31(6): 517-524 [Wang Yigang, Dou Lirong, Wen Yingchu *et al.* Origin of H_2S in Triassic Feixianguan Formation gas pools, Northeastern Sichuan Basin, China. *Geochimica*, 2002, 31(6): 517-524]
- 12 Sudran R C, Crossey L J, Hagen E S *et al.* Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23
- 13 张水昌, 朱光有, 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. 石油勘探与开发, 2006(a), 33(2): 161-166 [Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Liang Yingbo. Formation mechanism and distribution prediction of high-quality marine reservoir in deeper Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 2006(a), 33(2): 161-166]
- 14 朱光有, 张水昌, 马永生, 等. TSR (H_2S) 对石油天然气工业的积极性研究—— H_2S 的形成过程促进储层次生孔隙的发育. 地学前缘, 2006(b), 13(3): 141-149 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Ma Yongsheng *et al.* Effectiveness of thermochemical sulfate reduction on oil and gas industry: a H_2S formation accelerating development of the secondary pores in reservoirs. *Earth Science Frontiers*, 2006(b), 13(3): 141-149]
- 15 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR 对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式. 岩石学报, 2006(c), 22(8): 2182-2194 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo *et al.* Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 2006(c), 22(8): 2182-2194]
- 16 朱光有, 张水昌, 梁英波. 四川盆地普光大型气田 H_2S 及优质储

层形成机理探讨. 地质论评, 2006, 52(2): 230-235 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo. Probe into formation mechanism

of H_2S and high-quality reservoirs of Puguang large gas field in Sichuan basin. Geological Review, 2006, 52(2): 230-235]

Diagenesis of Triassic Feixianguan Formation in Sichuan Basin, Southwest China

WANG Ying-gang WEN Ying-chu HONG Hai-tao XIA Mao-long
HE Ting-ting SONG Shu-jun

(Southwest Oil and Gas Field Company Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Chengdu 610050)

Abstract The proved reserves of sour gas pools were up to $1 \times 10^{12} m^3$ from oolitic dolostone reservoirs of Feixianguan Formation in northeast Sichuan Basin, that are mainly distributed in the sedimentary sequence with evaporites. Remnant gypsum and anhydrite, the firmoidic pores or molds in the reservoirs indicate that the dolomitization was related to the evaporated seawater. Furthermore, in some diagenesis sequence of the reservoirs, the dolomitization extent increases with depth from ancient subaerial exposure surface downwards. This implies that the dolomitization of the oolitic limestone took place in the early stage of diagenesis, and was possibly influenced by mixing rain water and evaporated seawater.

For $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ values between structural constituents of the oolitic dolomite in the reservoirs, the difference is great, so the values of intermix sample of reservoir rock are not suited for dolomitization research.

In the reservoirs, the most oolitic dolostone preserved the remainder of oolitic fabric or original rock framework, the various pores of the dolostone are almost secondary dissolved pores and not shrinkage pores due to dolomite crystals shrink. The replacement process of dolomitization is a volume replacement for volume, not a mole for mole. The relationship between bitumen and secondary dissolved pores indicates that late burial dissolution pores are dominant in the reservoirs.

The ionization constant of H_2CO_3 is much higher than that of H_2S in the solution, whereas the mole of CO_2 is much lower than that of H_2S in the sour gas of Feixianguan Formation. The late period calcite cement, filled in the dissolved pores and fractures of the oolitic dolomite reservoirs, is characterized by low $\delta^{13}C$ (-18%) and high homogenization temperature ($130\sim 180^\circ C$), so the CO_2 related to thermochemical sulfate reduction in the reservoirs, causes mainly late burial dissolution.

Key words Sichuan Basin, Feixianguan Formation, dolomitization, secondary pores, TSR, C, O stable isotope, CO_2