

文章编号: 1000-0550(2006) 02-0300-09

# 川东北飞仙关组高含 $H_2S$ 气藏特征 与 TSR 对烃类的消耗作用

朱光有<sup>1</sup> 张水昌<sup>1</sup> 梁英波<sup>1</sup> 马永生<sup>2</sup> 周国源<sup>3</sup> 戴金星<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083 2 中国石油化工股份有限公司南方勘探开发分公司 昆明 650200

3 中国石油四川石油管理局川东钻探公司地质服务公司化验室 重庆 400021)

**摘要** 四川盆地川东北地区飞仙关组近年来发现了罗家寨、渡口河、铁山坡、普光等多个大、中型气田,它们均以高含硫化氢( $H_2S$ 在气体组分中占 10%~17%,平均为 14%)为最显著特征。深入研究后发现,虽然这些大型鲕滩气藏储量规模较大,单井产量高;但是这些气藏充满度普遍偏低(在 25%~91%之间),压力系数不高(大部分小于 1.2)。从成藏条件来看,该区鲕粒溶蚀孔隙发育,有效储层厚度大,二叠系龙潭组、志留系龙马溪组优质烃源岩十分发育,油气源充沛,而且由断层构成的疏导体系发育,泥岩及膏质岩类组成的盖层封盖性良好,因此气藏的低充满度现象,可能是圈闭中发生过大量烃类的损耗或消耗。由于川东北飞仙关组  $H_2S$  是烃类和硫酸盐在储层中发生热化学反应(TSR)形成的,气藏中硫化氢含量与压力系数、地层水矿化度、烃类含量等都存在反相关关系,因此飞仙关组高含硫化氢气藏压力系数小、充满度低,很可能是烃类被 TSR 大量消耗和储集空间增容所致。

**关键词** 硫化氢 地层压力 地层水 充满度 硫酸盐热化学还原反应(TSR) 下三叠统飞仙关组

**第一作者简介** 朱光有 男 1975 年出生 博士 高级工程师 石油地质学与地球化学

**中图分类号** P593 **文献标识码** A

## 1 引言

四川盆地川东地区北部(简称川东北)下三叠统飞仙关组是继石炭系气藏之后的又一重大发现,目前已在开江—梁平陆棚东侧发现了罗家寨、普光、铁山坡、渡口河等多个大、中型气田,这些鲕滩气藏的可采储量已超过千亿方<sup>[1]</sup>。最新在七里北构造完钻的七里北 1 井,完井测试日产气量达 80 万立方米,预测天然气储量为 420 多亿立方米(据中国石油网),显示出开江—梁平陆棚东侧良好的勘探前景。但是研究发现,这些高含硫化氢气藏压力系数不高,没有出现高压或超高压现象;充满度也普遍偏低,气藏都有底水或边水<sup>[2~4]</sup>,部分井为水井,因此一些学者认为导致此现象分别是由于鲕滩储层的分布和气源充注不充分所致。研究表明该区气源充足、储层孔渗性良好,盖层封闭性好,陆棚区又为异常高压区,因此不应该出现气藏充满度低、压力系数小的现象。由于以往的工作主要集中在储层的预测和硫化氢成因等方面,

对于气藏这种欠充满状态关注较少。本文试图通过对川东北地区地层水、地层压力以及硫化氢的形成和分布等方面的研究,为进一步认识川东北高含硫化氢气藏的成藏过程和硫化氢的形成机理,特别是对深入揭示 TSR 反应体系等提供有益的启示。

## 2 飞仙关组气藏的地质特征

川东北飞仙关组发现的高含硫化氢气田主要分布在陆棚东侧,属于岩性—构造复合圈闭气藏。其中川东北飞仙关组  $F_1 \sim F_3$  段发育鲕粒灰岩,后经白云化与溶蚀作用后形成的残余鲕粒(砂屑)云岩类构成了飞仙关组主力储层<sup>[5~10]</sup>,平均孔隙度在 9.0%左右,最高可达 27.0%,平均渗透率值为  $60 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,显示出具有高孔渗的优质储层特征。飞仙关组  $F_4$  段及其上覆的嘉陵江组和雷口坡组发育的致密泥灰岩、泥质云岩、膏质云岩、膏岩等,厚度大,区域上分布稳定,构成了鲕滩储层的良好盖层。虽然飞仙关组自身生烃条件差,但发育在开江—梁平陆棚相区内的

中国石油天然气股份公司科技项目(中国高含硫化氢天然气田资源分布与开发战略: 040502-10-01)和国家重点基础研究发展规划项目(2001CB209100)资助。

王一刚,杨雨,文应初,等. 四川盆地东北部地区长兴组—飞仙关组气藏成藏条件研究及勘探目标评价. 2000.

杨雨,魏小微,马波,等. 四川盆地东北部飞仙关组鲕滩储层分布规律研究及勘探目标选择. 2002.

收稿日期: 2005-01-11; 收修改稿日期: 2005-04-13

长兴组和飞仙关组底部的泥质碳酸盐岩,以及下伏的志留系、上二叠统龙潭组泥质岩类,有机碳含量都比较高,厚度大,演化程度较高,具备形成大中型气田的潜力,因此该区气源十分充沛<sup>[11,12]</sup>。陆棚相区和陆棚西侧开阔台地相区飞仙关组由于不发育膏质岩类,因此天然气中几乎不含硫化氢<sup>[12]</sup>。由于飞仙关组鲕滩储层是在大面积致密鲕粒灰岩背景下发育的储渗体,陆棚区属于深水部位,缺少暴露和淋滤过程,鲕粒灰岩的白云石化和溶蚀作用较弱,因此储层孔渗性较差,以裂缝性储层为主。陆棚西侧飞仙关组鲕粒灰岩发育程度不及陆棚东侧,且白云化作用和溶蚀作用也都没有陆棚东侧强,所以其孔渗性比陆棚东侧要差得多,气藏的储量规模也较小。目前这些气藏埋深在 3 500~4 500 m,部分埋深在 5 000~5 800 m 左右,储层的孔渗性均较好。因此有利的成烃、成储和成藏条件,是该区形成大中型气藏的主要因素。

### 3 鲕滩气藏的充满意度

川东北飞仙关组鲕滩气藏以构造—岩性组成的复合圈闭类型为主,虽然圈闭范围较大,但充满意度低,仅有 25%~91%<sup>[3]</sup>,不少井产水或气水同层。其中在陆棚东侧飞仙关组高含硫化氢区块测试产水井和解释有水层存在的井近 20 口,其中产水井有渡 5 井、罗家 8 井、紫 1 井、朱家 1 井和坡 1 井下部储层等井,特别是渡 5 和罗家 8 井等,优质鲕粒储层厚约 70 m,孔隙也十分发育,却无气或微气,产水;而最新完钻的七里北 1 井、渡 6 井、罗家 10 井等,储层较好,但在低部位均产水,符合高气低水的气水分异规律;由于圈闭高度远大于储层厚度,而鲕滩圈闭内的储层分布具有较好的连续性,因此气水界面的分布完全受构造控制,属于以构造控制的边水气藏。而川东北高含硫化氢大中型气藏普遍存在边水,表明这些气藏充满意度都不高。如渡口河气田,虽然渡 5 井储层没有渡 2 井、渡 3 井和渡 4 井发育,但依然有 40 m 的储层孔隙度大于 6%,部分在 10% 左右,是较好的储集层,但是该井位于低部位—气水界面以下,因此产水。

这些鲕滩气藏都分布在多套优质烃源岩的生烃强度中心附近,充足的气源是形成这些大中型气藏的必要条件。该区除了发育有川东各区都有的志留系、下二叠统、上二叠统龙潭组等多套优质烃源岩,特别是该区发育志留系龙马溪组和上二叠统龙潭组的泥质岩构成的优质源岩,厚度大,可能起到主力烃源的作用(精细的气源对比将另文论述),另外,还在陆棚

相区发育以上二叠统长兴组为主的含泥碳酸盐潮坪沉积<sup>[1]</sup>,由暗色泥页岩、泥质泥晶灰岩组成,有机质含量丰富,演化程度也较高。生烃过程形成压差便可使烃类近距离侧向运移,充注到飞仙关组台缘鲕粒滩储层圈闭中。另外,陆棚东侧发育多条北东、北东东向的轴向大断层,断距在数十米至上千米,倾角多大于 60°,切穿飞仙关组后向上多消失在嘉陵江组中<sup>[1]</sup>,而且目前发现的这些大气田都与这些断层有关,因此北东、北东东向的轴向逆断层很可能就是飞仙关组主要的供烃通道。另外,储层中广泛分布的沥青<sup>[13]</sup>,表明早期形成过古油藏,后随埋深增大,发生原油裂解,从而形成了多个可采储量超过 300 亿立方米的大型气田<sup>[8,14]</sup>,特别是普光气田和罗家寨气田,可采储量都超过 600 亿立方米,为四川气区储量前列。因此飞仙关组鲕滩储层充满意度低显然不是烃源供给不充分所造成的。从保存条件来看,盖层很好,即不仅有飞仙关组飞四段直接盖层的膏盐岩系、石灰岩及泥质岩,而且还有厚逾千米的嘉陵江组和雷口坡组的膏岩、膏质岩类组成的区域性盖层,这些盖层都未遭剥蚀,也无通天断层的破坏,保存条件极佳。因此飞仙关组鲕滩储层充满意度低与充注后烃类和储层之间的相互作用可能有关。

### 4 地层水质性

川东北飞仙关组地层水组分中以  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  等离子组成为主;矿化度在 20~119 g/L,普遍偏低。地层水以硫酸钠型 ( $Na_2SO_4$ ) 为主,其次是氯化钙型,还有少量属于碳酸钠型或碳酸氢钠型,但分布规律十分明显(图 1)。陆棚东侧高含硫化氢区块属于硫酸钠型地层水,矿化度较低,地层水中阴离子  $SO_4^{2-}$  含量很高,一般在 10 000 mg/L 以上,阳离子以  $Na^+$  和  $K^+$  占优;另外地层水中溶解有较高浓度的硫化氢,一般在 3 000 mg/L 左右。高含硫化氢区块的周围和陆棚及陆棚西侧为硫酸氢钠型或碳酸氢钠型等过渡型地层水特征;陆棚南侧普遍为氯化钙型水,矿化度最高,普遍大于 45 g/L,表明陆棚南区地层水封闭性较好。

特别值得关注的是,陆棚东侧的高含硫化氢气藏,地层水水型均属于硫酸钠型,且矿化度较低,多数在 20~40 g/L。按传统观点, $Na_2SO_4$  水型反映保存条件差<sup>[15]</sup>,表征了与地表连通的静水压力系统;另外该区流体的压力系数较低(后面讲),这一现象很容易使人产生该区封闭条件差的结论。事实上,该区硫化

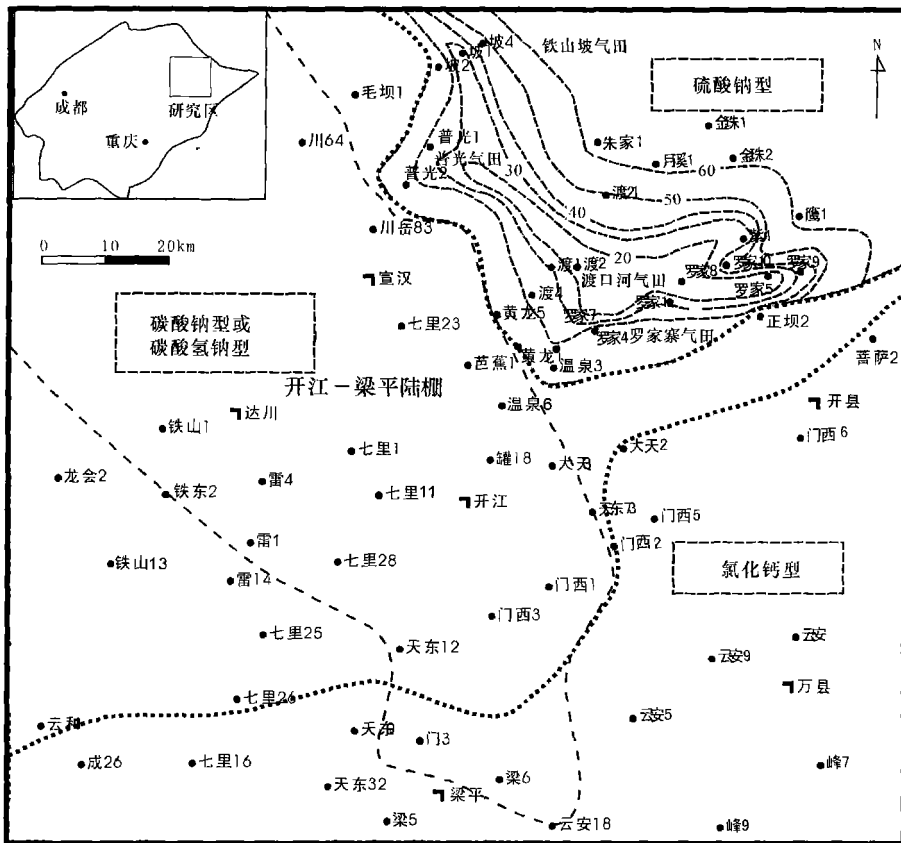


图 1 飞仙关组地层水类型及陆棚东侧硫酸钠型地层水矿化度等值线图

(川东北飞仙关组地层水类型呈现出三个区带有规律性的分布: 陆棚东侧为硫酸钠型, 南部为氯化钙型, 陆棚及其西侧属于碳酸钠型或碳酸氢钠型。其中陆棚东侧高含硫化氢区块地层水矿化度较低, 在 20~60g/L 之间 (图 1), 该区虚线为硫酸钠型地层水矿化度等值线。图中中间红线范围内为陆棚相。)

Fig 1 The formation water type and the isoline diagram showing the reservoir water salinity of sodium sulfate type in east side of continental shelf

in the Feixiangguan Formation in the northeastern Sichuan basin, the types of formation water distribute regularly across three areas, i.e., the water in the east side of continental shelf belongs to sodium sulfate type, while that in the south being calcium chloride type, and that within and in the west side of continental shelf being sodium carbonate or sodium bicarbonate types

Among them, the reservoir water salinities of the area which with high  $H_2S$  contents and distributes in the east side of continental shelf relatively lower and ranging from 20~60g/L. The broken lines of this area refer to the reservoir water salinity isoline of sodium sulfate type

The scope bounded by red lines in the central diagram represents the facies of continental shelf

氢含量为四川盆地之最, 而众所周知硫化氢的保存比烷烃气要求条件更苛刻, 如果飞仙关组地层水后期遭受地表水淡化, 地表水带来的重金属离子 (如 Fe, Cu, Ni, Co, Pb, Zn 等离子) 将很快消耗掉  $H_2S$  生成金属硫化物<sup>[16]</sup>, 气藏中就不会见到如此之高的硫化氢含量, 因此认为气藏封闭性差显然与这一事实相悖。另外, 该区上覆嘉陵江组气藏为高矿化度的氯化钙型水 (矿化度平均为 110 g/L), 该区下伏石炭系黄龙组为低矿化度的氯化钙型水 (矿化度平均为 30 g/L), 也反映了飞仙关组地层水的封闭性是良好的。而有趣的是, 地层水矿化度与硫化氢含量有密切关系 (图 1

图 2), 即硫化氢含量越高, 地层水的矿化度也越低, 因此地层水矿化度可能与硫化氢的形成有关。

### 5 气藏压力特征

陆棚东侧气藏的地层压力系数不高, 多数在 1.07 ~ 1.19<sup>[2,4]</sup>, 陆棚西侧属于轻超压—超压, 地层压力系数在 1.22~1.45。陆棚相区压力系数较高, 绝大部分大于 1.5 主要分布在 1.7~1.9 属于异常高压 (图 3)。

虽然从川东北全区来看, 异常高压区均为裂缝性储层 (如陆棚区的沙罐坪、高峰场等飞仙关组气藏),



岩性以泥粉晶灰岩为主,是陆棚两侧鲕滩储层的有效源岩,且分布在陆棚区;陆棚东西两侧虽然都发育有鲕滩孔隙型储层,但压力系数存在一定差异,即陆棚西侧压力系数较东侧高。研究表明陆棚东侧溶孔鲕粒云岩储层厚大较西侧大,孔渗性也比西侧好,因此这可能与陆棚两侧鲕粒滩储层发育程度有一定关系<sup>[2]</sup>,即地层压力系数与良好的鲕滩储层及较大的地下储集空间呈对应关系,储层性质的不同及空间展布可能是造成飞仙关组地层压力分布差异的一个原因。但是进一步观察陆棚东侧气藏便会发现:硫化氢含量越高的地方,地层的压力系数越低(图 2 图 3),二者具有良好的相关关系(图 4)。由此看来,造成飞仙关组地层压力系数分布悬殊的主控因素不仅仅是储层的发育状况,与硫化氢含量高低的相关性表明,二者间必然存在一定的成因联系。

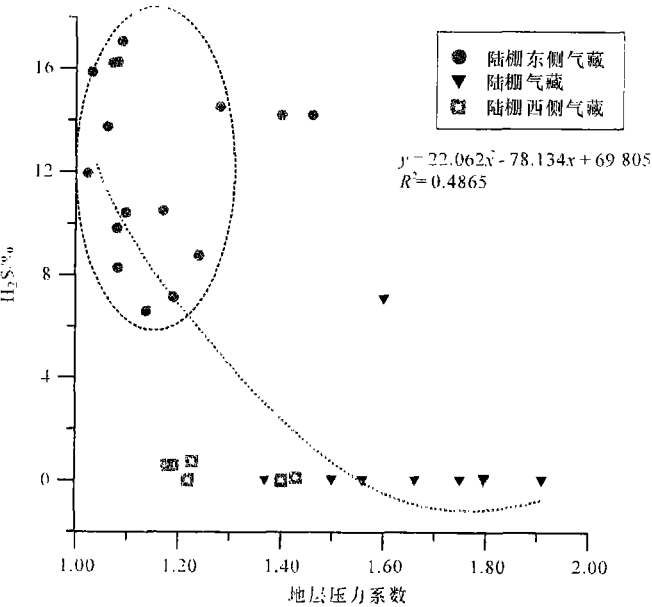


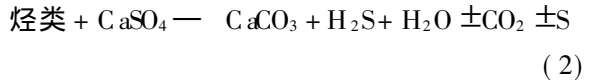
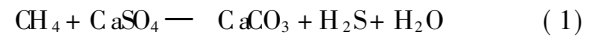
图 4 川东北飞仙关组地层压力系数与硫化氢含量的关系  
Fig. 4 The relationship between the formation pressure coefficients and the H<sub>2</sub>S contents within the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan basin

## 6 成因探讨

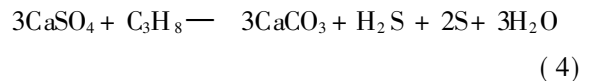
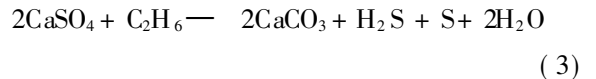
从上述分析来看,川东北飞仙关组陆棚东侧气藏充满度低显然不是成藏条件不充分所致,而地层水矿化度、地层压力系数等与硫化氢含量的相关关系表明,这些气藏的“三低”现象(较低的充满度、较低的地层水矿化度、较低的地层压力)都与硫化氢的形成过程有一定联系。研究表明,川东北飞仙关组陆棚东

侧鲕滩储层中发育了薄层膏质岩类,且储层在侏罗纪中期至白垩纪末期经历过较高的温度(120~180°C),以及充足的烃源等,使该区具备发生硫酸盐热化学反应(TSR)的条件<sup>[17]</sup>,并有大量证据表明该区硫化氢属于 TSR 成因<sup>[18~22]</sup>;而气藏中如此之高的硫化氢含量也只有 TSR 成因才能达到<sup>[23~26]</sup>,这是由于硫化氢对微生物的毒性<sup>[27]</sup>和岩石中含硫化化合物的数量<sup>[28,29]</sup>决定了生物成因(BSR)和含硫化化合物热裂解(TDS)形成的硫化氢浓度一般不会超过 3%,因此,川东北飞仙关组陆棚东侧鲕滩储层中的硫化氢是 TSR 形成的。而 TSR 的本质是一个消耗烃类的过程,所以气藏充满度低和地层压力系数小都可能与 TSR 对烃类的消耗有关。

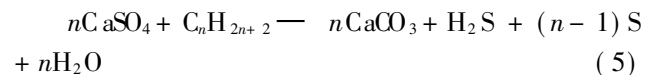
通常情况下,人们用简单的方程式(1)来表示 TSR,或用相对规范的通式(2)来表示:



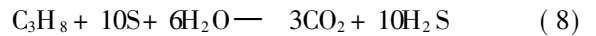
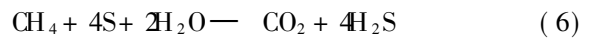
然而实际上,TSR 远比上面方程要复杂得多,不仅是其反应中间产物硫磺(S)和 CO<sub>2</sub>的问题,而且反应中还涉及到各种烃类参与的反应,可能发生的反应有<sup>[30~32]</sup>:



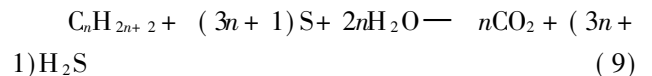
.....



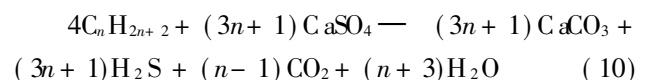
由于硫磺化学活性较强,很容易与烃类发生持续反应,形成 CO<sub>2</sub>:



.....



通过方程式合并,可将中间产物硫磺(S)去掉,并建立反应通式:



如果知道了是哪些烃类参与 TSR 反应,便可从方程式(10)中求出生成一定体积硫化氢需要消耗的

烃类。而事实上,哪些烃类参以反应或起主要作用也是十分难以确定。根据川东北、华北高含硫化氢天然气气藏特征、勘探结果和作者的系统研究,发现甲烷可能很难参与 TSR 反应,TSR 过程中消耗的烃类主要是乙烷以上的重烃类<sup>[33]</sup>。根据方程式(10)可知,每消耗 1mol 的乙烷,可形成 7mol 的  $H_2S$ ;消耗 1mol 的丙烷,可形成 10mol 的  $H_2S$ ;消耗 1mol 的丁烷,可形成 13mol 的  $H_2S$ ……

虽然准确计算川东北飞仙关组在形成硫化氢过程中烃类的消耗量比较困难,但是可以粗略估算出其消耗量。可以近似以每消耗 1 体积的烃类,形成 3 倍体积的  $H_2S$  来计算;天然气中 17% 的硫化氢至少需要消耗 5.7% 的烃类。由于硫化氢保存下来的量仅是其生成量的下限,在形成和聚集成藏的过程中要有大量的硫化氢被消耗,地层水中的重金属离子也要消耗掉大量的硫化氢,另外硫化氢在水中溶解量也很大,换句话说也就是说硫化氢需要将储层中的重金属离子耗掉形成稳定的金属硫化物,也需要在地层水中溶解饱和后才能呈现出游离状态,因此硫化氢的消耗量是很大的。综合各种因素来看,川东北飞仙关组高含硫化氢气藏至少消耗了 10% 以上的烃类,所以气藏充满足度也至少降低了 10% 以上。

飞仙关组高含硫化氢气藏充满足度降低、压力系数减小除了 TSR 过程中烃类被大量消耗影响外,还与储集空间扩容有关。TSR 的发生,首先需要硫酸盐类溶解提供  $SO_4^{2-}$ ,其次硫化氢对碳酸盐岩储层的具有强烈的溶蚀改造作用,促使大型孔洞的发育和优质储层的形成,这也是高含硫化氢天然气普遍发育优质储层的原因。因此膏质岩类的溶解和硫化氢对储层的溶蚀作用使储集孔隙得到大幅度改善,加上 TSR 对烃类的消耗和硫化氢聚集过程中的损耗(烃类损耗的体积大于生成的非烃类体积),从而导致地层压力下降和气藏充满足度降低。

而较低的地层水矿化度,可以从两个主要方面来查找原因。由于飞仙关组储层是鲕粒灰岩在早期白云化基础上而形成的,沉积早期白云化程度对后期优质储层的形成具有重要控制作用,也就是说,早期暴露淋滤溶蚀越强,后期储层性质相对也会越好。鲕粒灰岩沉积后受海平面升降而频繁遭受暴露淋滤和溶蚀等作用,孔隙水在表生期就受到大气降水的稀释,含盐量降低,在后期成岩过程中一直未能浓缩。其次从 TSR 反应方程式(10)可以看出,TSR 过程中能够生成大量水,它们势必会对地层水产生稀释作用,因此

这两方面的综合作用,导致目前飞仙关组储层中的地层水矿化度较低。

总之,从川东北飞仙关组气藏的形成演化过程来看,早期鲕粒灰岩的白云化和溶蚀阶段,发育在台地边缘的鲕滩沉积物,随着海平面的升降而发生混合水白云石化作用,经过同生期溶蚀作用和埋藏溶蚀作用改造后形成的孔隙性储层是陆棚东侧的主力储集体,平均孔隙度为 9%,部分在 20% 以上,因此白云岩化是储层形成的基本条件;鲕滩的暴露淋滤,必然受到大气降水的影响,孔隙中充填地层水的矿化度可能会比海水含盐量(32.13g/L)低,因此早期的成岩过程,一方面为储层形成了良好的孔隙,同时保存了矿化度较低的表生期地层水。中期经历了古油藏的形成阶段,特别是储层中广泛分布的沥青为飞仙关组气藏由古油藏裂解而来提供了佐证。中后期为古气藏和硫化氢的形成阶段,这是飞仙关组气藏经历的最重要事件,此时古油藏中的液态烃逐渐裂解成气,体积迅速膨胀,压力增大,部分地层水被排除;同时随着埋深增大和古地温升高,在气水或油水界面附近烃类和硫酸盐类溶解后的  $SO_4^{2-}$  发生了热化学反应(TSR),部分烃类被消耗,特别是重烃类大量被消耗,形成硫化氢、二氧化碳、水和次生方解石等<sup>[34,35]</sup>。由于膏质岩类的溶蚀和硫化氢对储层的溶蚀作用使储集孔隙进一步得到改善,而烃类损耗的体积大于生成的非烃类体积,从而导致地层压力下降。喜山运动使地层抬升,并对古气藏进行了调整和定型,使每个气藏都具有独立的气水界面和压力系统;同时由于地层温度降低和重烃类被耗尽,TSR 也就基本停止。因此气藏曾经经历过一个较高的古压力过程,后由于 TSR 的发生,消耗了烃类,扩大了储集空间,从而导致气藏充满足度降低、压力系数变小;而飞仙关组鲕粒灰岩沉积后由于海平面的升降而多次遭受暴露淋滤和溶蚀等作用,孔隙水在表生期就受到大气淡水稀释,含盐量降低,并且后期受到 TSR 反应生成水的稀释作用,所以目前飞仙关组储层中的地层水矿化度较低。

## 7 结论和结束语

川东北飞仙关组陆棚东侧已发现的罗家寨、渡口河、普光、铁山坡等大中型气藏,普遍具有较低的充满足度、较低的地层水矿化度、较低的地层压力和较高的

朱光有. 四川盆地高含硫化氢天然气的形成与分布. 中国石油勘探开发研究院博士后出站报告. 2005

硫化氢含量的特点,气藏的“三低一高”与硫化氢的形成过程有关。

川东北飞仙关组硫化氢是 TSR 在储层中形成的。烃类在同硫酸盐发生热化学反应的过程中,随着石膏的溶蚀 ( $\text{SO}_4^{2-}$  参与反应)和烃类向非烃类转化,储集空间增大和烃类损耗(烃类损耗量至少在 10% 以上),从而导致气藏充满度降低和压力系数减小。

鲕滩早期的暴露淋滤,使溶蚀孔隙中保存了较低矿化度的硫酸钠型水,后期又受到 TSR 产水的进一步稀释的影响,故地层水现今呈现出较低的矿化度。因此硫酸钠型地层水、较低的矿化度、较低的地层压力,不是气藏封闭性差或气源不充分原因造成的,而与早期成储(鲕滩云化)和气藏后期的次生蚀变(TSR)作用有关。

虽然目前人们还没有完全认识 TSR 的发生机制,TSR 对地层水的稀释作用、对各种烃类的消耗作用和对储层的改善作用等研究都刚刚起步或处于争论之中,需要有更多的研究实例去总结归纳和探讨发现,但本文提出的这些地质现象无疑为 TSR 的进一步研究提供有益的启示。

致谢 本研究工作得到西南油气田分公司勘探开发研究院王一刚教授、中国石化南方勘探开发分公司、四川石油管理局川东钻探公司化验室等同志的帮助,在此深表感谢!

### 参考文献 (References)

- 王一刚,文应初,洪海涛,等.川东北三叠系飞仙关组深层鲕滩气藏勘探目标.天然气工业,2004,24(12):5~9[Wang Yigang Wen Yingchu Hong Haitao. Exploration target of the deep oolitic beach gas reservoir of the Triassic system Feixianguan Formation in northeast part of sichuan basin. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 5~9]
- 江兴福,左安云,徐人芬,等.川东地区飞仙关组地层压力分布特征.天然气勘探与开发,2003,26(2):1~5[Jiang Xingfu Zuo Yunan Xu Renfen et al. The distribution characteristics of the formation pressure within the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan basin. Natural Gas Exploration & Development, 2003, 26(2): 1~5]
- 汪泽成,赵文智,张林,吴世祥.四川盆地构造层序与天然气勘探.北京:地质出版社,2002,27~94[Wang Zecheng Zhao Wenzhi Zhang Lin Wu Shixiang. The Structural Sequence of the Sichuan Basin and the Natural Gas Exploration. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002, 27~94]
- 华永川.川东北飞仙关组鲕滩气藏气水界面预测方法.天然气工业,2004,24(8):76~77[Hua Yongchuan. Prediction method of gas-water interface for oolitic beach reservoir of Feixianguan group in northeast Sichuan. Natural Gas Industry, 2004, 24(8): 76~77]

- 王一刚,刘划一,文应初,等.川东北飞仙关组鲕滩储层分布规律、勘探方法与远景预测.天然气工业,2002,22(增刊):14~18[Wang Yigang Liu Huayi Wen Yingchu et al. Distribution law, exploration method and prospectiveness prediction of the oolitic beach reservoirs in Feixianguan Formation in northeast Sichuan basin. Natural Gas Industry, 2002, 22(Supp): 14~18]
- Zhao Wenzhi Luo Ping Chen Gengshen Cao Hong Zhang Bam in Origin and reservoir rock characteristics of dolostones on the early Triassic Feixianguan Formation NE Sichuan Basin China Significance for future gas exploration. Journal of Petroleum Geology, 2005, 28(1): 83~100.
- 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 LuoJiazhai Gas Field, northeastern Sichuan Province. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(2): 182~190]
- 杨雨,文应初.川东北开江—梁平海槽发育对  $T_1f$  鲕粒岩分布的控制.天然气工业,2002,22(增刊):30~32[Yang Yu and Wen Yingchu. Control of Kaijiang—liangping trough growing on  $T_1f$  oolite distribution in northeast Sichuan basin. Natural Gas Industry, 2002, 22(Supp): 30~32]
- 张静,王一刚.四川宣汉河口地区飞仙关早期碳酸盐蒸发台地边缘沉积特征.天然气工业,2003,23(2):19~22[Zhang Jing and Wang Yigang. Characteristics of carbonate evaporation tableland edge deposition in early Feixianguan epoch at Hekou region of Xuanhan in Sichuan. Natural Gas Industry, 2003, 23(2): 19~22]
- 魏国齐,陈更生,杨威,等.川北下三叠统飞仙关组“槽台”沉积体系及演化.沉积学报,2004,22(2):254~260[Wei Guoqi Chen Gengshen Yang Wei et al. Sedimentary system of platformal trough of Feixianguan formation of lower Triassic in northern Sichuan Basin and its evolution. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 254~260]
- 杨家静,王一刚,王兰生,等.四川盆地东部长兴组—飞仙关组气藏地球化学特征及气源探讨.沉积学报,2002,20(2):349~352[Yang Jiajing Wang Yigang Wang Lansheng et al. The origin of natural gases and geochemistry characters of Changxing reef and Feixianguan oolitic beach gas reservoirs in eastern Sichuan basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 349~352]
- 朱光有,张水昌,梁英波,等.川东北飞仙关组  $\text{H}_2\text{S}$  的分布与古环境的关系研究.石油勘探与开发,2005,32(4):65~69[Zhu Guangyou Zhang Shuichang Liang Yingbo et al. Study on relationship between palaeoenvironment and the distribution of  $\text{H}_2\text{S}$  in  $T_1f$  Formation of eastern Sichuan. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 65~69]
- 谢增业,魏国齐,李剑,杨威,等.川东北飞仙关组鲕滩储层沥青与天然气成藏过程.天然气工业,2004,24(12):17~19[Xie Zengye Wei Guoqi Li Jian Yang Wei et al. Feixianguan Formation oolitic beach reservoir bitumens and gas reservoiring process in northeast Sichuan. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 17~19]
- 陈京元,刘义成,郑伟,等.罗家寨气田飞仙关组气藏高产井培育

- 分析. 天然气工业, 2004, 24(4): 65~67 [Chen Jingyuan, Liu Yicheng, Zheng Weij, *et al.* Analysis of drilling high productivity well in Feixianguan gas reservoir of LuoJiazhai field. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(4): 65~67]
- 15 黄建章, 陈心胜, 周国源, 等. 川东石炭系气水理化性质与天然气富集关系. 石油与天然气地质, 1994, 15(4): 285~292 [Huang Jianzhang, Chen Xinseng, Zhou Guoyuan, *et al.* Physicochemical properties of Carboniferous gas and water in East Sichuan and its relation to natural gas enrichment. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(4): 285~292]
- 16 朱光有, 戴金星, 张水昌, 等. 中国含硫化氢天然气研究及勘探前景. 天然气工业, 2004, 24(9): 1~4 [Zhu Guangyou, Dai Jinxing, Zhang Shuichang, Li Jian, *et al.* Research on sour gas in China and its exploration prospects. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(9): 1~4]
- 17 朱光有, 戴金星, 张水昌, 等. 含硫化氢天然气的形成机制及其分布规律研究. 天然气地球科学, 2004, 15(2): 166~170 [Zhu Guangyou, Dai Jinxing, Zhang Shuichang, *et al.* Generation mechanism and distribution characteristics of hydrogen sulfide bearing gas in China. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(2): 166~170]
- 18 王一刚, 窦立荣, 文应初, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏 H<sub>2</sub>S 成因研究. 地球化学, 2002, 31(6): 517~524 [Wang Yigang, Du Lirong, Wen Yingchu, *et al.* Origin of H<sub>2</sub>S in Triassic Feixianguan Formation gas pool, northeastern Sichuan basin. *China Geochimica*, 2002, 31(6): 517~524]
- 19 Cai C F, Worden R H, Bottrell S H, *et al.* Thermochemical sulphate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China. *Chemical Geology*, 2003, 202(1): 39~57
- 20 沈平, 徐永昌, 王晋江, 等. 天然气中硫化氢硫同位素组成及沉积地球化学相. 沉积学报, 1997, 15(2): 216~219 [Shen Ping, Xu Yongchang, Wang Jinjiang, *et al.* Sulphur isotopic compositions of hydrogen sulphides in natural gases and the sedimentary geochemical facies. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(2): 216~219]
- 21 戴金星, 胡见义, 贾承造, 等. 关于高硫化氢天然气田科学安全勘探开发的建议. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 1~5 [Dai Jinxing, Hu Jianyi, Jia Chengzao, *et al.* Suggestions for scientifically and safely exploring and developing high H<sub>2</sub>S gas fields. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(2): 1~5]
- 22 Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo. Discussion on origins of natural gas with high hydrogen sulphide content in China. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(5): 697~708
- 23 Machel H G, Krouse H R, Sassen R. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Applied Geochemistry*, 1995, 10(4): 373~389
- 24 Orr W L. Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation: study of the big Horn basin Paleozoic oils. *AAPG Bulletin*, 1974, 50: 2295~2318
- 25 Krouse H R, Vau C A, Elik L S, Ueda A, Haks S. Chemical and isotopic evidence of thermochemical sulphate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs. *Nature*, 1988, 333(2): 415~419
- 26 Worden R H, Snalley P C. H<sub>2</sub>S-producing reactions in deep carbonate gas reservoirs. *Khuff Formation, Abu Dhabi Chemical Geology*, 1996, 133: 157~171
- 27 樊广锋, 戴金星, 戚厚发. 中国硫化氢天然气研究. 天然气地球科学, 1992, 3(3): 1~10 [Fan Guangfeng, Dai Jinxing, Qi Houfa. Study of H<sub>2</sub>S in China. *Natural Gas Geoscience*, 1992, 3(3): 1~10]
- 28 戴金星. 中国含硫化氢的天然气的分布特征, 分类及其成因探讨. 沉积学报, 1985, 4(4): 109~120 [Dai Jinxing. Distribution, classification and origin of natural gas with H<sub>2</sub>S in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(4): 109~120]
- 29 朱光有, 张水昌, 李剑, 等. 中国高含硫化氢天然气田的特征及其分布. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 18~21 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Li Jian, *et al.* Formation and occurrence of hydrogen sulfide bearing gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(4): 18~21]
- 30 Sassen R. Geochemical and carbon isotopic studies of crude oil destruction, bitumen precipitation and sulfate reduction in the deep Snackover Formation. *Organic Geochemistry*, 1988, 12(2): 351~361
- 31 Worden R H, Snalley P C, Oxtoby N H. The effects of thermochemical sulfate reduction upon formation water salinity and oxygen isotopes in carbonate reservoirs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 3925~3931
- 32 Heydari E. The role of burial diagenesis in hydrocarbon destruction and H<sub>2</sub>S accumulation. Upper Jurassic Snackover Formation, Black Creek Field, Mississippi. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(1): 26~45
- 33 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 硫酸盐热化学反应对烃类的蚀变作用. 石油学报, 2005, 26(5): 48~52 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, *et al.* The alteration of TSR to hydrocarbons gas. *Acta Petroli Sinica*, 2005, 26(5): 48~52]
- 34 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北地区飞仙关组高含 H<sub>2</sub>S 天然气 TSR 成因的同位素证据. 中国科学 (D 辑), 2005, 35(11): 1037~1046 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, *et al.* Isotopic evidence of TSR origin for natural gas bearing high H<sub>2</sub>S contents within the Feixianguan Formation of the northeastern Sichuan Basin, southwest China. *Science in China (D)*, 2005, 48(11): 1960~1971]
- 35 Shuichang Zhang, Guangyou Zhu, Yingbo Liang, *et al.* Geochemical characteristics of the Zhaokanzhuang sour gas accumulation and thermochemical sulfate reduction in the Jixian Sag of Bohai Bay Basin. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(12): 1717~1730.



# Characteristics of Gas Reservoirs with High Content of $H_2S$ in the Northeastern Sichuan Basin and the Consumption of Hydrocarbons due to TSR

ZHU Guang-you<sup>1</sup> ZHANG Shu-chang<sup>1</sup> LIANG Ying-bo<sup>1</sup>  
MA Yong-sheng<sup>2</sup> ZYOU Guo-yuan<sup>3</sup> DAI Jin-xing<sup>1</sup>

(1 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, China National Petroleum Corporation, Beijing 100083)

2 Institute of Southern Exploration and Development Division Company of SINOPEC, Kunming 650200;

3 East Sichuan Drilling Co Ltd, Sichuan Petroleum Administration, Chongqing 400021)

**Abstract** During the recent years, several medium and large-scale gas fields, such as the LuoJiazhai, Dukouhe, Tianshanpo and Puguang, etc., whose most remarkable features being the higher  $H_2S$  contents, have been discovered in the northeastern Sichuan basin. Their  $H_2S$  contents among the gas compositions account for 10 to 17 percent while the average being 14 percent. Based on the thorough study, it can be found that although these large-scale oolitic shoal gas reservoirs usually have rich reserves and high individual-well producing rate, their coefficients of fullness, which ranging from 25 to 91 percent, are generally rather low, also, their pressure coefficients are not high and mostly less than 1.2. According to their reservoir forming conditions, i.e., the abundant oolitic dissolution pores, the efficient reservoirs with huge thickness, the robust gas source, the well-developed transport systems, together with the excellent sealability of the caprocks constituted by shale and gypsumite, their lower coefficients of fullness were possibly due to a large quantity of hydrocarbons had been consumed or depleted within the traps. In the northeastern Sichuan basin, due to the  $H_2S$  contained within the Feixianguan formation was generated from the TSR reactions, which occurred within reservoirs, between hydrocarbons and sulfate, there exist negative correlations between the  $H_2S$  contents and the pressure coefficients, the reservoir water salinity together with the hydrocarbons contents, etc. Therefore, as far as the gas reservoirs with high  $H_2S$  contents of the Feixianguan formation was concerned, their lower pressure coefficients and coefficients of fullness are likely caused by both the hydrocarbons had been consumed greatly due to TSR and the volume of reservoirs had been expanded.

**Key words** hydrogen sulphide ( $H_2S$ ), formation pressure, formation water, coefficients of fullness, thermochemical sulfate reduction (TSR), the northeastern Sichuan Basin