

# 四川盆地含硫化氢气藏分布特征及硫化氢成因探讨

黄士鹏, 廖凤蓉, 吴小奇, 陶小晚

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**目前,四川盆地是我国发现含硫化氢气藏数目最多、储量最大的含油气盆地。该盆地产硫化氢的层位众多,从老到新分别有震旦系、石炭系、二叠系及三叠系等。平面上,川东气区硫化氢含量最高,其次为川西气区和川中油气区,川南气区硫化氢含量最低。纵向上,不同层位的含硫化氢气藏内硫化氢的含量存在较大差异。三叠系飞仙关组硫化氢含量最高,其次为二叠系长兴组和三叠系雷口坡组,二叠系茅口组气藏中硫化氢的含量最低。震旦系灯影组和石炭系黄龙组硫化氢含量比较稳定。嘉陵江组气藏中不同层段的硫化氢含量差别较大,其中嘉五段和嘉四段硫化氢含量最高。通过沉积相、埋藏史、热史、包裹体均一温度、硫同位素以及天然气组分等的分析,认为川东气区飞仙关组和长兴组高硫化氢型气藏、川东气区和川南气区的嘉陵江组气藏(除了嘉一段)、川南气区威远震旦系灯影组气藏、川西气区中坝气田雷口坡组气藏以及川中油气区磨溪气田雷口坡组气藏中的硫化氢为硫酸盐热还原反应(TSR)成因;川东气区石炭系黄龙组气藏和川南气区二叠系茅口组气藏硫化氢为含硫有机质热解成因。

**关键词:**硫化氢;气藏;分布特征;成因探讨;四川盆地

**中图分类号:**TE132

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-1926(2010)05-0705-10

## 0 引言

四川盆地是扬子准地台西部的一个呈北东向延展的菱形含油气盆地,面积约为  $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。四川盆地基底为前震旦系,局部地区还包括下震旦统。沉积盖层发育齐全,震旦系到中三叠统为海相沉积,以碳酸盐岩沉积为主,厚 4 000~7 000 m;上三叠统至第四系为陆相沉积,主要为一套碎屑岩,厚 2 000~5 000 m<sup>[1-2]</sup>。根据基底性质、沉积盖层、气藏(田)特征及天然气类型等,把四川盆地划分为 4 个油气聚集区(图 1):川东气区、川南气区、川西气区和川中油气区。1958 年四川盆地首次发现含硫化氢天然气<sup>①</sup>,近年来又在川东北地区发现一批大型、中型的三叠系飞仙关组和二叠系长兴组高含硫化氢气田,如普光、罗家寨、渡口河、铁山坡等。到目前为止,四川盆地是我国发现含硫化氢气藏数目最多、储量最大的含油气盆地(图 1)。四川盆地含硫化氢天然气的层位众多,从老到新分别为震旦系、石炭

系、二叠系及三叠系等。硫化氢为剧毒的酸性气体,不仅对人体以及环境构成严重威胁,而且会强烈腐蚀生产设备。四川盆地含硫化氢气藏是整个盆地天然气藏的重要组成部分,储量巨大,硫化氢气体的产生伴随含硫化氢天然气藏的成藏过程。因此,研究含硫化氢气藏的横向上以及纵向上的分布特征,探讨硫化氢的成因和控制因素,对预测含硫化氢气藏的分布以及促进四川盆地天然气的勘探有着重要的意义。

## 1 含硫化氢气藏的分布特征

### 1.1 平面分布特征

根据天然气中硫化氢气体的百分含量(体积分数)对硫化氢气藏进行分类。硫化氢含量小于 0.5% 的气藏为微(贫)硫化氢型气藏;硫化氢含量为 0.5%~2% 的气藏为含硫化氢型气藏;硫化氢含量为 2%~70% 的气藏为高硫化氢型气藏;硫化氢含量在 70% 以上的气藏为硫化氢型气藏<sup>[3]</sup>。根据上述分类

收稿日期:2010-07-15;修回日期:2010-08-30.

作者简介:黄士鹏(1984-),男,山东泰安人,博士研究生,主要从事天然气地质学与地球化学研究. E-mail:hspsk@163.com.

① 樊广锋. 中国硫化氢天然气研究. 中国石油勘探开发研究院,1991:1-91.

方案可知,四川盆地迄今为止发现的天然气中硫化氢的含量均未超过 70%,因此均不属于硫化氢型气藏,属于微(贫)—高硫化氢型气藏。

图 1 展示了四川盆地含硫化氢天然气藏的平面分布情况。含硫化氢天然气藏在四川盆地 4 个分区单元中均有分布,但是不同地区气藏的数量以及天然气中硫化氢的含量有着显著差别。含硫化氢天然气藏主要分布在川东气区和川南气区,川西气区和川中油气区硫化氢天然气藏稀少。

川东气区硫化氢的含量最高。川东北地区是典型的高硫化氢型气藏的分布区,尤其是开江—梁平海槽的东北侧和西南侧发现的三叠系飞仙关组天然气藏,其硫化氢平均含量超过 10%。东北侧发现的含硫化氢气藏数量以及储量规模都要比西南侧的多。另外,川东气区的东部硫化氢含量也很高,如卧龙河气田嘉陵江组气藏,高峰场飞仙关组气藏,大池干井飞仙关组气藏,均为高硫化氢型气藏。川东气区南部的嘉陵江组气藏的硫化氢平均含量在 0.5% 以上,有的将近 2%(铁厂沟气田),是一个微—含硫化氢型气藏分布区。川东气区西部硫化氢含量低,绝大部分为微硫化氢型气藏。

川南气区含硫化氢气藏数量众多,但是硫化氢含量低(威远气田除外),硫化氢的含量小于 1%,绝大多数气藏的硫化氢含量小于 0.5%。威远气田震旦系灯影组气藏硫化氢含量较高,平均含量为 1.1%,最大值达到 3.44%。因此,川南气区主要为微(贫)硫化氢型气藏分布区(威远气田震旦系灯影组气藏为含—高硫化氢型气藏)。川西气区中坝气田为高硫化氢型气藏,川中油气区的磨溪气田为含硫化氢型气藏。

总体上来看,川东气区(尤其是川东北地区)是四川盆地最主要的高硫化氢型气藏的分布区,硫化氢含量最高,其次为川西气区和川中油气区,川南气区硫化氢含量最低。

### 1.2 纵向分布特征

四川盆地含硫化氢天然气产出层位从老到新,分别有震旦系灯影组,石炭系黄龙组,二叠系茅口组、长兴组,三叠系飞仙关组、嘉陵江组、雷口坡组等。不同层位的含硫化氢气藏在平面上具有不同的分布特征。如震旦系灯影组气藏、二叠系茅口组气藏主要分布在川南气区;二叠系长兴组气藏和三叠系飞仙关组气藏则主要分布在川东北地区;石炭系黄龙组气藏主要分布在川东气区的中部;嘉陵江组气藏分布范围比较广,在川东气区和川南气区均有

分布。三叠系雷口坡组气藏在川西气区和川中油气区均有分布。

不同层位的含硫化氢气藏硫化氢含量存在较大差异,即使是同一层位,不同层段内部的硫化氢含量也存在差异,这在嘉陵江组硫化氢气藏中表现的尤为明显(图 2)。震旦系灯影组硫化氢含量最大值为 3.44%,在威远气田威基井<sup>[3]</sup>,平均值为 1.1%;石炭系黄龙组硫化氢含量最高值在铁山气田铁山 2 井,为 0.93%<sup>[4]</sup>,平均值为 0.27%;二叠系茅口组硫化氢含量最高值在卧龙河气田卧 67 井,为 0.48%,平均值为 0.04%;长兴组气藏硫化氢含量最高值在普光气田普光 2 井,达 16%<sup>①</sup>,平均值为 9.19%;三叠系飞仙关组气藏硫化氢含量最高值在普光气田普光 3 井,达 58.34%<sup>[5]</sup>,平均值为 11.17%;嘉陵江组气藏硫化氢含量最大值在卧龙河气田卧 63 井,为 18.83%<sup>[6]</sup>,平均值为 1.25%;雷口坡组硫化氢含量最大值在中坝气田中 7 井,为 13.3%<sup>①</sup>,平均值为 2.19%。

由图 2 可知四川盆地 7 个碳酸盐岩产层中,三叠系飞仙关组气藏中硫化氢含量最高,其次为二叠系长兴组和三叠系雷口坡组,二叠系茅口组中的硫化氢含量最低。上述 4 个层系相同层位的气藏,在不同的分布位置,硫化氢的含量存在较大差别(图 2a)。威远气田震旦系灯影组气藏不同井产出的硫化氢含量差别不大,绝大部分分布在 1% 附近;石炭系黄龙组气藏硫化氢含量分布范围较窄,各气藏之间差别不大(图 2a);三叠系嘉陵江组气藏中的硫化氢含量差别较大,总体上嘉五段的硫化氢含量最高,其次为嘉四段,嘉一段的硫化氢含量最低(图 2b)。

## 2 油气藏中硫化氢的来源

### 2.1 硫酸盐还原菌还原硫酸盐生成硫化氢(BSR)

BSR 发生的温度在 0 到 60~80℃ 之间<sup>[7-8]</sup>,这一温度范围决定了 BSR 只能发生在较浅的地层中。BSR 通常是现代沉积物以及低温油气藏中硫化氢的来源,其生成硫化氢的量一般小于 5%<sup>[9]</sup>,BSR 生成的硫化氢以及固态硫的硫同位素值偏负,与硫酸盐的硫同位素值差别较大,BSR 形成的硫化氢的硫同位素比相应的硫酸盐硫同位素值低 20%~25%<sup>[10]</sup>,即 BSR 反应的硫同位素分馏效应明显。

### 2.2 含硫有机物裂解(TDS)

石油与腐泥型干酪根裂解形成碳残渣、水、二氧化碳和少量硫化氢。形成的硫化氢是由干酪根或原

① 戴金星,邹才能,张水昌,等.中国天然气成因及大气田形成机制.中国石油勘探开发研究院,2007.

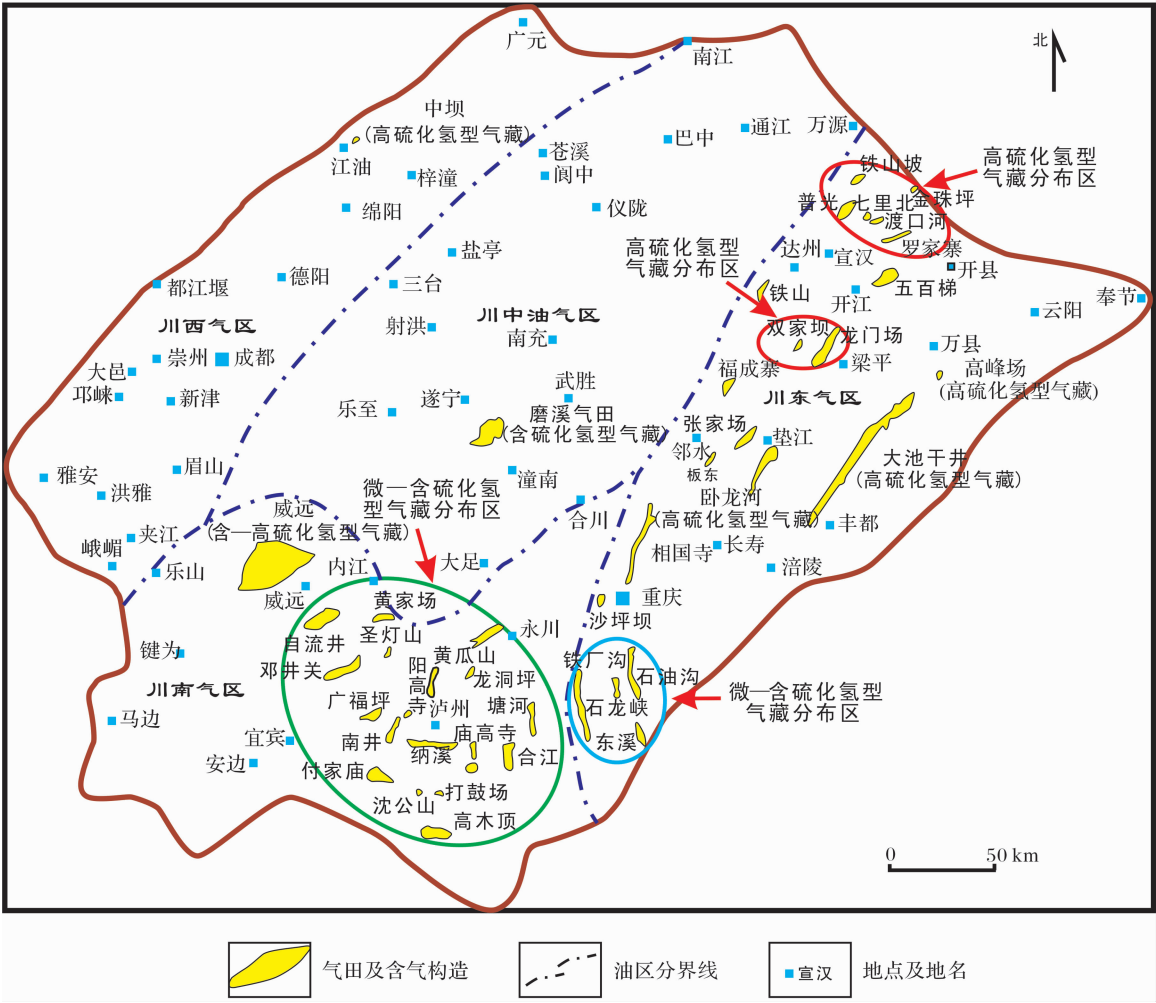


图 1 四川盆地含硫化氢气藏(田)分布

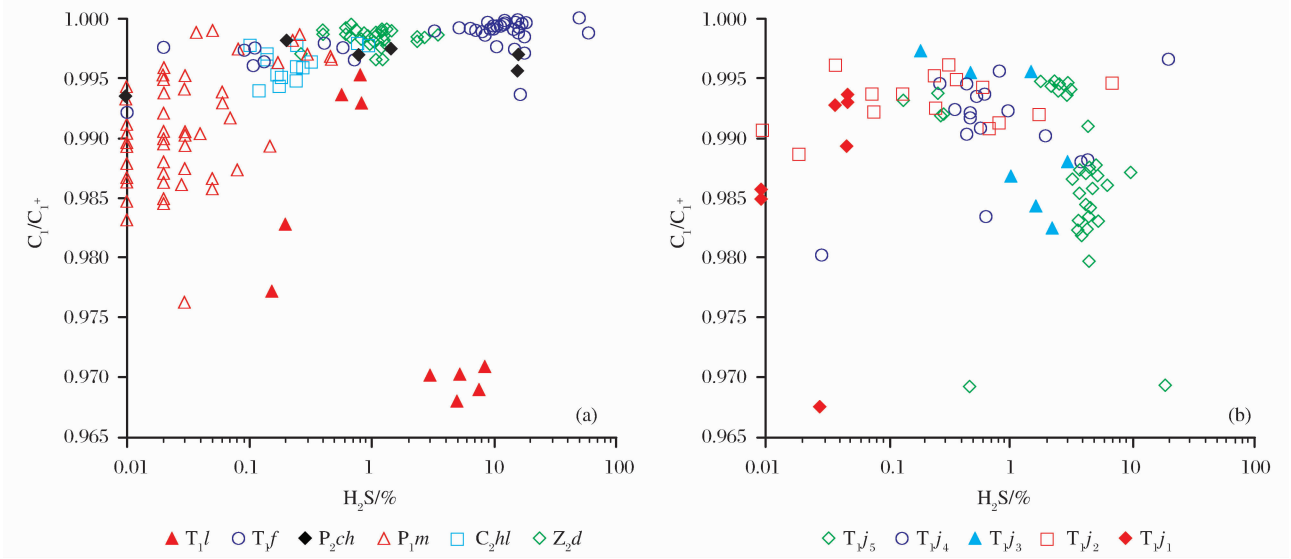


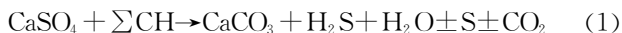
图 2 四川盆地不同层位硫化氢含量与干燥系数( $C_1/C_{1+}$ )相互关系(数据来源:文献①,②,文献[3-6,10-14],本文)

①戴金星, 邹才能, 张水昌, 等. 中国天然气成因及大气田形成机制. 中国石油勘探开发研究院, 2007.  
②四川省石油管理局地质勘探开发研究院. 四川盆地石油勘探数据汇编: 油、气、水部分(1965—1975). 1979.

油中有机硫化物经过受热,含有硫原子的官能团断裂形成。原油中硫的存在形式有硫醇、硫化物、噻吩类、苯并噻吩类及二苯并噻吩类等,主要存在于原油的重质组分胶质沥青质中<sup>[15]</sup>。由于有机物中的硫化物含量有限,远不及硫酸盐岩—碳酸盐岩地层组合中的丰富,所以此途径生成的硫化氢的量一般小于 3%<sup>[7]</sup>。该类成因开始较多释放出硫化氢的温度在 80℃ 以上,硫化氢大量生成在 120~150℃ 之间<sup>[16]</sup>。

### 2.3 硫酸盐还原反应(TSR)

TSR 是硫酸盐在烃类或有机质的参与下的高温化学还原反应,其反应式概括为<sup>[9]</sup>:



式(1)中 $\sum \text{CH}$ 为烃类。由式(1)可知,TSR 的发生必须有膏盐的存在以及烃类的参与,因此这种还原反应一般发生在碳酸盐岩—硫酸盐岩地层组合中。另外相对较高的温度也是 TSR 发生的必要条件。TSR 在地层中发生的温度一般在 100~140℃ 之间,但在某些地区可能更高一些<sup>[8]</sup>。TSR 是形成高浓度硫化氢天然气的唯一途径<sup>[7,17]</sup>。世界范围内众多高含硫气藏中的硫化氢均是 TSR 成因的<sup>[3, 6, 8-9, 12, 17-27]</sup>。烃类与硫酸盐发生 TSR 反应时,重烃相对于甲烷与硫酸盐发生 TSR 反应要相对容易一些<sup>[5, 19, 28-29]</sup>,因此发生 TSR 的气藏一般具有非常高的干燥系数。随着 TSR 反应的进行,剩余重烃的碳同位素由于分馏作用,其碳同位素值有变重的趋势<sup>[5-6, 11]</sup>。TSR 反应发生过程中会伴随次生方解石交代石膏的过程,由于次生方解石中的碳来源于烃类,所以其碳同位素值很轻<sup>[9, 11]</sup>。TSR 反应产生的硫化氢以及单质硫的硫同位素值与硫酸盐(石膏)的硫同位素值差别不大,反应程度越高,同位素分馏效应越小。

## 3 四川盆地不同气区硫化氢的成因探讨

四川盆地不同气区的硫化氢含量有着较为明显的差别,即使是在同一气区内,不同层位的气藏含有的硫化氢的量也有着显著差别。不同气藏的气源、气藏埋藏史和所受热史、储层沉积相带等地质因素的不同是造成这种差别的主要原因。准确地预测硫化氢在地下的分布需要一个详细的沉积相展布模式,了解盆地尺度上的埋藏史和热演化史,是用来预测高含硫化氢气藏的必要条件<sup>[23]</sup>。

### 3.1 川东气区

川东气区是四川盆地硫化氢含量最高的地区。石炭系黄龙组绝大部分气藏为微硫化氢型气藏。川东北开江—梁平海槽两侧飞仙关组气藏以及长兴组

气藏均为高硫化氢型气藏。嘉陵江组含硫化氢气藏的硫化氢含量变化较大。

#### 3.1.1 石炭系黄龙组气藏

石炭系在四川盆地内部大面积缺失,中石炭统黄龙组主要分布在四川盆地东部。川东气区黄龙组含硫化氢气藏,如在卧龙河气田、福成寨气田、五百梯气田、高峰场气田等,硫化氢含量较低,含量大多低于 0.5%,只有铁山气田黄龙组气藏部分井的硫化氢含量稍高,但也低于 1%。

川东地区黄龙组为一套碳酸盐岩沉积,沉积相以潮上带—潮间带为主。岩性以灰色白云岩、角砾状白云岩、角砾状灰岩为主,底部有时含有石膏。黄龙组角砾状云岩、角砾状灰岩发育,二叠系沉积前经历过较强的溶蚀作用,膏盐矿物易被溶蚀掉,形成次生孔隙。黄龙组一段孔隙不发育,黄龙组气藏主要的储集层段为黄龙组二段和三段,如卧龙河气田黄龙组气藏的储集层以黄龙组二段为主,呈层状分布;福成寨气田黄龙组气藏的主要储集层段为黄龙组三段,其次为黄龙组二段<sup>[1]</sup>。黄龙组气藏储集层内缺乏膏盐沉积,因此缺乏发生 TSR 反应的物质基础,硫化氢不是 TSR 成因。

黄龙组储集层不含膏盐沉积,且现今埋藏深度较深(大于 3 500 m),排除掉硫化氢的 TSR 成因以及 BSR 成因。黄龙组气藏的气源主要为志留系暗色泥岩<sup>[30-32]</sup>,因此黄龙组气藏中低含量的硫化氢主要是志留系暗色泥岩中含硫有机质受热分解的产物,即硫化氢是 TDS 成因。

#### 3.1.2 川东北地区飞仙关组气藏

近年来在开江—梁平海槽的两侧发现了一批三叠系飞仙关组高硫化氢型气藏,如海槽东北侧目前我国探明储量规模最大的海相气田——普光气田,以及铁山坡气田、罗家寨气田、渡口河气田等,西南侧的龙门场气田和双家坝气田等。另外,在开江—梁平海槽以南地区,发现有高峰场、大池干井等气田,这些气田的硫化氢含量也很高,均为高硫化氢型气藏。

开江—梁平海槽形成于晚二叠世期间的峨眉地裂运动,消失于早二叠世的飞仙关组沉积晚期<sup>[33]</sup>。该海槽的形成与演化对其周边地区,特别是浅水台地地区的沉积环境、成岩作用和储层特征有着明显的控制作用<sup>[34]</sup>。飞一段至飞三段是飞仙关组的主要储集层。飞一段中期至飞二段沉积相为台地边缘暴露浅滩相,沉积了较厚的鲕粒灰岩、鲕粒云岩、颗粒云岩、溶孔白云岩等,粒间孔广泛发育,海平面的旋回变化,也沉积了多层薄层膏盐;飞二段沉积末期

至飞三段沉积期沉积相演化为局限台地相,沉积物主要为灰质白云岩、粉晶白云岩、泥晶白云岩和膏盐<sup>[35-36]</sup>。由此可知,开江—梁平海槽两侧发育的碳酸盐岩地层中沉积有多层薄层的膏盐。

在早侏罗世以后飞仙关组进入油藏形成期,在晚侏罗世进入气藏成藏时期,大约在白垩纪超过 6 000 m 的最大埋深,推算其埋藏温度达到 200℃ 左右<sup>[5,11,22]</sup>,如图 3。储层内方解石中包裹体的均一温度集中分布在 120~180℃ 之间,也说明气藏经历了非常高的温度<sup>[22, 28]</sup>。

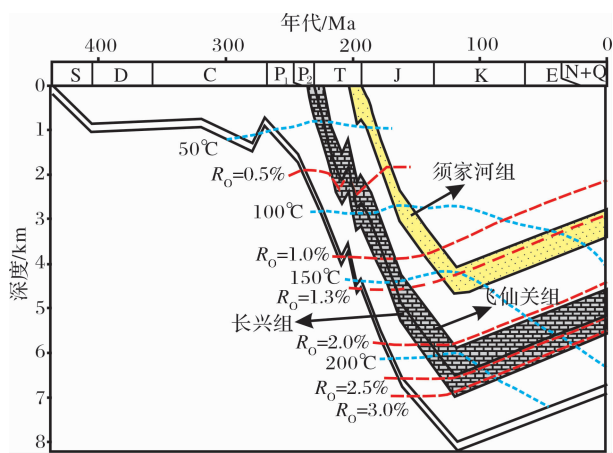


图 3 四川盆地川东北气区普光 2 井埋藏史和热演化史<sup>[5]</sup>

通过上述分析,四川盆地东北地区飞仙关组储层中发育多层膏盐沉积,并且白垩纪温度超过 150℃,具备了发生 TSR 反应的 2 个前提条件。飞仙关组气藏中的硫化氢平均含量超过 10%,这种高浓度的硫化氢含量,是 TSR 作用的结果。重烃气相对于甲烷,与膏盐发生 TSR 反应相对容易一些,因此会造成气藏中甲烷的比例越来越大,即干燥系数( $C_1/C_{1+}$ )变得很高。图 2 中川东北地区飞仙关组气藏的干燥系数绝大部分超过 0.995,天然气异常干,随着硫化氢含量的增高,干燥系数有变大的趋势。因此,除了热成熟作用对干燥系数的影响以外,TSR 反应对其也产生了重要的影响。

另外,不同研究者在飞仙关组储层中发现有次生方解石,以及大量的硫磺结晶体、黄铁矿等;并且对石膏、硫磺晶体、黄铁矿以及硫化氢等进行了硫同位素分析,对碳酸盐岩地层、次生方解石等进行了碳同位素分析。对比发现,硫磺晶体、硫化氢的硫同位素明显偏重,与石膏的硫同位素值分馏不大(含量大于 10%的  $\delta^{34}S_{\text{硫化氢}}$  与  $\delta^{34}S_{\text{石膏}}$  的差值小于 8‰);次生方解石的碳同位素显著偏负<sup>[11,22-23,37]</sup>,这些均是飞仙关组高硫化氢型气藏中发生过 TSR 反应的有力证据。

开江—梁平海槽两侧的沉积环境有着较大的区

别,海槽东北侧主体为一孤立台地环境,海槽西南侧则为一个连陆台地环境。东北侧鲕粒滩白云岩储层厚度大,储层质量好,而西南侧后期混合水白云石化和埋藏溶解作用并不强烈,储层质量较东北侧差,仅局部分布有大型透镜状鲕粒云岩储集体<sup>[34]</sup>。储集层的质量差异,导致开江—梁平海槽两侧发现的飞仙关组气藏的规模存在较大差别,因此同样是高硫化氢型气藏,东北侧发现的高硫化氢型气藏的数量和储量规模要大得多。

开江—梁平海槽区及川东腹地飞仙关组沉积时期主要沉积相为海槽及台地沉积,暴露较少,海水盐度正常,沉积物为泥晶及粉晶碳酸盐,石膏类矿物普遍较少,这些地区孔隙不发育,储集性能较差,因此硫化氢含量很少<sup>[37]</sup>。

### 3.1.3 二叠系长兴组气藏

二叠系长兴组气藏主要分布在川东气区。普光气田长兴组气藏中的天然气组分与飞仙关组十分相似,天然气异常干,且都具有很高的硫化氢含量(图 2a)。普光气田长兴组气藏中的硫化氢平均含量为 15.4%,为典型的高硫化氢型气藏。其他长兴组气藏,如在卧龙河气田、板东气田及铁山气田等,硫化氢含量很低,大部分低于 0.5%。

川东北地区长兴组为一套生物礁相和台地边缘滩相沉积,沉积有巨厚的白云岩、云质灰岩、灰质云岩、灰岩,白云岩孔隙度明显高于灰岩。由于长兴组储层内部缺乏石膏的沉积,因此长兴组气藏内部不可能发生 TSR 反应,即普光气田长兴组气藏中高含量的硫化氢不是长兴组内部发生 TSR 反应的结果。但是基于长兴组储层内硫化氢含量很高,其生成途径应该是 TSR 反应。普光气田飞仙关组高含量的硫化氢为 TSR 成因,飞仙关组的天然气在后期的构造运动过程中可以通过断层运移到长兴组储层中,使得长兴组天然气富含硫化氢。因此,普光气田长兴组气藏内的硫化氢也是 TSR 成因,只不过不是原地成因,而是由飞仙关组储层运移而来。

对于其他低含硫化氢的长兴组气藏而言,由于本身缺乏石膏沉积,缺乏发生 TSR 或 BSR 反应的条件。长兴组天然气的气源为上二叠统龙潭组和下志留统龙马溪组<sup>[38]</sup>,硫化氢应来源于上述 2 套烃源岩含硫有机质(干酪根或原油)的裂解。

### 3.1.4 嘉陵江组气藏

川东气区中部的卧龙河气田嘉陵江组气藏硫化氢含量高,平均值为 4.3%,为高硫化氢型气藏。川东气区南部的气田,如石油沟气田、铁厂沟气田、石



龙峡气田以及东溪气田等,硫化氢含量低于2%,为含硫化氢型气藏。

嘉陵江组主要为碳酸盐岩沉积,在整个盆地均有分布,在川东气区内均可分为5段。嘉一段发育大套泥晶粉晶灰岩,无膏盐岩沉积。其他层段膏盐十分发育,岩性主要为白云岩、灰岩,膏盐或夹于白云岩、石灰岩层之中,或与之呈互层状。嘉四段膏盐最为发育,为厚层硬石膏夹岩盐、灰色白云岩、石灰岩<sup>[1]</sup>。

嘉陵江组在白垩纪前最大埋深超过5 000 m<sup>①</sup>,四川盆地早白垩世末期至始新世期间古地温梯度为(3.2~4.8)°C/100m<sup>[39]</sup>,按此地温梯度计算,嘉陵江组的温度在白垩纪超过150°C。

通过上述分析说明,嘉陵江组气藏具备TSR反应的2个基本条件。卧龙河气田嘉陵江组膏盐十分发育,嘉三段—嘉五段的膏盐比嘉二段发育,其硫化氢含量也比嘉二段的高。嘉一段不发育膏盐岩,卧龙河气田嘉一段天然气微(不)含硫化氢(硫化氢含量小于0.05%),因此硫化氢的含量与膏盐的分布密切相关。同时,基于嘉陵江组硫化氢含量较高(平均含量超过4%),判断硫化氢主要为TSR成因。卧龙河气田嘉陵江组天然气中硫化氢的硫同位素值为22.2‰~31‰<sup>[6]</sup>,嘉陵江组硫酸盐硫同位素值为26.0‰~35.4‰<sup>[40]</sup>,两者相近,这也证明卧龙河气田嘉陵江组储层内部发生过TSR反应。

川东气区南部铁厂沟、石油沟、石龙峡、东溪等嘉陵江组气藏,硫化氢含量较高的层段主要为嘉四段,含量超过0.5%,最大者为1.95%<sup>②</sup>,其他层段硫化氢含量较少,小于0.2%,因此,硫化氢分布与膏盐岩的分布关系密切。石龙峡、同福场及铁厂沟等构造区附近最大埋藏古地温,都曾经大于140~150°C,这些高地温地区对应的硫化氢含量也较高<sup>[41]</sup>。基于膏盐分布与硫化氢含量的关系,以及埋藏古地温条件,认为这些气田的嘉陵江组四段硫化氢主要为TSR成因。

### 3.2 川南气区

川南气区产硫化氢的层位有震旦系灯影组、二叠系茅口组和三叠系嘉陵江组。震旦系储层集中分布在威远气田,茅口组和嘉陵江组气藏在川南分布较为广泛。威远气田震旦系灯影组所产天然气硫化氢含量较高,为含一高硫化氢型气藏。嘉陵江组硫化氢含量很低,除了少数几个气田,如圣灯山、邓井关、庙高寺等气田嘉陵江组储层中硫化氢含量较高

以外(最大值超过1%),其余气田的嘉陵江组储层硫化氢含量都在0.1%以下。茅口组是四川盆地硫化氢含量最低的层位,绝大部分硫化氢含量低于0.1%。茅口组气藏为贫硫化氢型气藏,嘉陵江组气藏为贫一含硫化氢型气藏。

#### 3.2.1 威远震旦系气藏

威远气田不仅是中国储集层最老(震旦系灯影组)和烃源岩最老(寒武系九老洞组)的大气田,而且也是世界上地质时代最古老的气藏之一<sup>[14]</sup>。威远气田是川南气区最大的气田,震旦系灯影组是其主要产层。灯影组在层位上位于上震旦统,据区域沉积相研究,威远地区的上震旦统属浅海碳酸盐岩台地的潮坪相沉积,沉积有粉—细晶白云岩夹藻屑白云岩、硅质云岩,另外还沉积有薄层的硬石膏<sup>[1]</sup>。

九老洞组烃源岩有机质开始成熟于志留纪末,二叠纪末达到生油高峰,侏罗纪末几乎全部裂解为天然气<sup>[14]</sup>。根据威2井的埋藏史模拟得知,威远震旦系储层在三叠纪温度超过140°C,侏罗纪末期达到180°C,白垩纪末期超过200°C<sup>[42]</sup>。威远气田震旦系储层中孔洞缝充填的与有机包裹体同期的盐水包裹体的均一温度,主要分布在120~150°C、160~190°C及190~220°C之间,运移时期分别对应为印支期、燕山期和燕山—喜马拉雅期<sup>[43]</sup>。埋藏史模拟和包裹体均一温度均表明在燕山期,威远气田内部天然气经历了较高的温度(>150°C)。

通过上述分析可知,威远气田上震旦统内部有薄层硬石膏,而且地质历史时期,特别是在燕山期经历了高温,结合上震旦统隐藻白云岩储层中较高的硫化氢含量,认为威远气田上震旦统储层内部的硫化氢是TSR成因。灯影组硫化氢的 $\delta^{34}\text{S}$ 值比灯影组储层中硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值偏低8‰,硫同位素分馏结果与国外著名TSR成因的高含硫化氢气藏——加拿大艾尔贝塔盆地上泥盆统气藏(硫化氢含量达31%)相比硫同位素分馏值(7‰)接近;黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与硫化氢的 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有相似性<sup>[42]</sup>,这些均证明了震旦系灯影组中硫化氢的TSR成因。

#### 3.2.2 二叠系茅口组气藏

川南气区茅口组储层岩性主要为生屑灰岩、泥晶灰岩,岩性致密,储集空间主要为岩溶缝洞,沉积相主要为碳酸盐岩内生屑滩相和碳酸盐岩台内深缓坡相<sup>[44]</sup>,生物化石丰富,缺乏膏盐沉积。

川南气区茅口组硫化氢的含量普遍低于0.1%,

① 李一平,等.四川盆地三叠系中下统油气资源评价报告,1983.

② 四川盆地石油勘探数据汇编:油、气、水(1965—1975).四川石油管理局地质勘探开发研究院,1979.

大部分都在 0.05% 以下(图 2)。茅口组储层埋深普遍超过 2 000 m,有的甚至达到 5 000 m 以上,另外茅口组缺乏硫酸盐岩,因此排除 TSR 和 BSR 生成硫化氢的可能性。茅口组的气藏主要来源于下二叠统栖霞组和茅口组碳酸盐岩以及志留系泥岩<sup>[45]</sup>,这种低含量的硫化氢应是下二叠统和志留系烃源岩中含硫杂原子官能团的干酪根(或后期生成的原油)受热裂解形成的,即属于 TDS 成因。

### 3.2.3 三叠系嘉陵江组气藏

根据硫化氢的含量可将川南气区三叠系嘉陵江组气藏分为 2 类:一类是硫化氢含量较高者,平均值超过 0.5%,最大值接近 2%,如庙高寺、圣灯山、邓井关等气藏;另一类是硫化氢含量甚微,低于 0.05%,如黄瓜山、沈公山、高木顶等气藏。

庙高寺气藏产硫化氢的主要层段为嘉二段,圣灯山气藏和邓井关气藏为嘉三段—嘉四段,根据前述可知,嘉陵江组除嘉一段以外,其余各段膏盐层均十分发育,尤其是嘉四段。可知,这些气藏较高含量的硫化氢与膏盐分布有着密切关系。川南气区嘉陵江组白垩纪温度超过 135℃<sup>[45]</sup>,这个温度达到了 TSR 反应所要求的温度。因此,这些嘉陵江组气藏的硫化氢应是 TSR 反应生成。

沈公山气田、高木顶气田、打鼓场气田以及纳溪气田等嘉二段—嘉四段气藏中的硫化氢含量大部分低于 0.05%,这些气藏中的硫化氢有可能也是 TSR 反应形成的。嘉陵江组含硫化氢气藏在地质历史时期,尤其是在白垩纪埋藏最深,经历了较高温,嘉陵江组储层(除了嘉一段)中的天然气普遍发生过 TSR 反应。但是,在早喜马拉雅运动时期,四川盆地从震旦纪至早第三纪的沉积盖层全面褶皱,早先形成的嘉陵江组气藏被次生改造,天然气重新聚集成藏。硫化氢具有较强的化学活性,由 TSR 形成的硫化氢,由于再次运移时的地层水的溶解作用以及与其他金属离子发生不同程度的反应,使得现今不同区域的嘉陵江组气藏中的硫化氢含量存在较大差异。

黄瓜山气田、太和场气田、纳溪气田等嘉一段储层中的硫化氢,含量低于 0.05%,其主要是干酪根(原油)裂解形成的。另外我们注意到,高木顶、塘河、黄瓜山等构造,嘉陵江组现今的埋藏深度较浅,很多井位钻遇嘉陵江组的深度都不到 1 000 m,如高木顶构造高 1 井嘉陵江组埋深只有 600 多米。如此浅的埋深,且嘉陵江组硫酸盐岩发育,为 BSR 反应创造了条件。因此,这些埋深较浅的嘉陵江组气藏中低浓度的硫化氢有可能也有 BSR 的贡献。

### 3.3 川西气区中坝雷口坡组气藏

中坝气田位于四川江油县(图 1),属龙门山山前褶皱带的一个低背斜。主要产气层位有中三叠统雷口坡组 and 上三叠统须家河组。雷口坡组由大套白云岩组成,顶、底部含膏质或有硬石膏夹层,并含泥质。雷口坡组可分为 5 个岩性段,主要产气层为雷三下亚段。

川西凹陷自晚三叠世到早白垩世末以稳定的沉降为主,在晚侏罗世末或早白垩世达到最大埋深,此时除东坡的老关庙地区以外,大部分地区的底部埋深超过了 6 000 m<sup>[46]</sup>。四川盆地早白垩世末期至始新世期间古地温梯度为(3.2~4.8)℃/100m<sup>[39]</sup>,按照此古地温梯度计算,雷口坡组气藏在早白垩世的温度超过了 180℃。

中坝气田雷口坡组气藏硫化氢含量较高,最大值为 13.3%,平均值为 7.10%。雷口坡组雷三下亚段白云岩储层内部沉积有膏盐夹层,并且早白垩世的温度超过 180℃,具备了 TSR 反应的 2 个基本条件。根据中坝气田雷口坡组富含硫化氢的特征,认为硫化氢是储层内部天然气与膏盐发生 TSR 反应的结果。

### 3.4 川中气区磨溪雷口坡组气藏

磨溪气田位于四川盆地中部平缓构造区(图 1),紧邻加里东期形成的龙女寺古隆起。雷口坡组气藏主要储集层为中三叠统雷口坡组一段。雷一段为灰、深灰色薄至中厚层泥质白云岩、白云岩夹页岩、硬石膏。包裹体分析资料表明,寄宿在晶洞、裂缝和方解石等矿物中的包裹体温度在 125~150℃ 以上,表明雷一段第一小层储层经历过较高的古地温<sup>[10]</sup>。

磨溪雷口坡组气藏硫化氢含量为 0.83%~1.32%,属于含硫化氢型气藏。雷口坡组雷一段的沉积环境以及埋藏历史说明,雷一段储层具有发生 TSR 反应的基础条件。四川中部地区雷口坡组中石膏和硬石膏的  $\delta^{34}\text{S}$  值为 25.0‰~30.6‰<sup>[40]</sup>,磨溪气田雷口坡组气藏硫化氢的  $\delta^{34}\text{S}$  值为 13.3‰~17.7‰<sup>[6]</sup>,两者硫同位素值相差 13‰ 左右,差别并不大,硫同位素分馏值证明磨溪气田雷口坡组内部发生过 TSR 反应。磨溪雷口坡组气藏硫化氢含量明显低于中坝雷口坡组气藏,原因应该是磨溪气田雷口坡组埋藏深度较中坝气田浅,发生 TSR 反应程度较低,导致硫化氢含量比较低。

## 4 结论

(1) 四川盆地含硫化氢层位众多。到目前为止,四川盆地是我国发现含硫化氢气藏数目最多、储

量最大的含油气盆地。

(2) 平面上,川东气区硫化氢含量最高,其次为川西气区和川中油气区,川南气区硫化氢含量最低。

(3) 纵向上,不同层位的含硫化氢气藏内硫化氢的含量存在较大差异。三叠系飞仙关组硫化氢含量最高,其次为二叠系长兴组和三叠系雷口坡组,二叠系茅口组中的硫化氢含量最低。震旦系灯影组和石炭系黄龙组的硫化氢含量差别不大。各嘉陵江组气藏的硫化氢含量差别较大,嘉五段和嘉四段的硫化氢含量最高。

(4) 川东气区飞仙关组高硫化氢型气藏、普光气田长兴组高硫化氢型气藏、川东气区和川南气区的嘉陵江组气藏(除了嘉一段)、川南气区威远震旦系灯影组气藏、川西气区中坝气田雷口坡组气藏以及川中油气区磨溪气田雷口坡组气藏中的硫化氢为硫酸盐热还原反应(TSR)成因;川东气区石炭系黄龙组气藏和川南气区二叠系茅口组气藏硫化氢为含硫有机质(或原油)裂解成因(TDS)。

**致谢:**戴金星院士对本文给予了细心的帮助和指导,在此表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] Zhai Guangming. Petroleum Geology of China: Vol. 10[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989. [翟光明. 中国石油地质志: 卷十(四川油气区)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.]
- [2] Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Chen Jianping, *et al.* A discussion on gas sources of the Feixianguan Formation H<sub>2</sub>S-rich giant gas fields in the northeastern Sichuan basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(supplement 1): 86-94. [张水昌, 朱光有, 陈建平, 等. 四川盆地川东北部飞仙关组高含硫化氢大型气田群气源探讨[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 1): 86-94.]
- [3] Dai Jinxing. Distribution, classification and origin of natural gas with hydrogen sulphide in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(4): 109-120. [戴金星. 中国含硫化氢天然气分布特征、分类及成因探讨[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 109-120.]
- [4] Li Jian, Xie Zengye, Dai Jinxing, *et al.* Geochemistry and origin of sour gas accumulation in the northeastern Sichuan basin, SW China[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(12): 1703-1716.
- [5] Hao Fang, Guo Tonglou, Zhu Yangming, *et al.* Evidence for multiple stages of oil cracking and thermochemical sulfate reduction in the Puguang gas field, Sichuan basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(5): 611-637.
- [6] Cai Chunfang, 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[J]. Chemical Geology, 2003, 202: 39-57.
- [7] Orr W L. Geologic and geochemical controls on the distribution of hydrogen sulfide in natural gas[C]// Campos R, Goni J. Advances in Organic Geochemistry. Madrid, Spain, Oxford: Pergmon Press, 1977: 571-597.
- [8] Machel H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights[J]. Sedimentary Geology, 2001, 140: 143-175.
- [9] Worden R H, Smalley P C. H<sub>2</sub>S-producing reactions in deep carbonate gas reservoirs: Khuff Formation, Abu Dhabi[J]. Chemical Geology, 1996, 133: 157-171.
- [10] Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, *et al.* Stable sulfur isotopic composition of hydrogen sulfide and its genesis in Sichuan basin[J]. Geochimica, 2006, 35(4): 432-442. [朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地 H<sub>2</sub>S 的硫同位素组成及其成因探讨[J]. 地球化学, 2006, 35(4): 432-442.]
- [11] Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, *et al.* Distribution of high H<sub>2</sub>S-bearing natural gas and evidence of TSR origin in the Sichuan basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(8): 1208-1218. [朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地高含 H<sub>2</sub>S 天然气的分布与 TSR 成因证据[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1208-1218.]
- [12] Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Liang Yingbo, *et al.* Probe into formation mechanism of H<sub>2</sub>S and high-quality reservoirs of Puguang large gas field in Sichuan basin—The new cognition after reading professor Ma's paper "Discovery of the large-scale gas field in the Sichuan basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting"[J]. Geological Review, 2006, 52(2): 230-235. [张水昌, 朱光有, 梁英波, 等. 四川盆地普光大型气田 H<sub>2</sub>S 及优质储层形成机理探讨——读马永生教授的“四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示”有感[J]. 地质评论, 2006, 52(2): 230-235.]
- [13] Li Denghua, Wang Zecheng, Li Jun. Origin of reversal of  $\delta^{13}\text{C}$  series and component of biogenic alkane gas in Moxi gas field of central Sichuan[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(6): 699-703. [李登华, 王泽成, 李军. 川中磨溪气田烷烃气组分和碳同位素系列倒转成因[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(6): 699-703.]
- [14] Dai Jinxing. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan gas field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(5): 473-480. [戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 473-480.]
- [15] Sun Guida, Yan Fushan. Introduction of Petrochemical Catalysis[M]. Beijing: Sinopec Press, 2000: 1-178. [孙桂大, 闫富山. 石油化工催化作用导论[M]. 北京: 中国石化出版社, 2000: 1-178.]
- [16] Fan Guangfeng, Dai Jinxing, Qi Houfa. Study on the H<sub>2</sub>S-bearing natural gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 1992, 3(3): 1-10. [樊广锋, 戴金星, 戚厚发. 中国硫化氢天然气研究[J]. 天然气地球科学, 1992, 3(3): 1-10.]
- [17] Orr W L. Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation; Study of the Big Horn Basin Paleozoic oils[J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(11): 2295-2318.



- [18] Dai Jinxing, Hu Jianyi, Jia Chengzao, *et al.* Suggestions for scientifically and safely exploring and developing high H<sub>2</sub>S gas fields [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(2): 1-4. [戴金星, 胡见义, 贾承造, 等. 科学安全勘探开发高硫化氢天然气田的建议[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(2): 1-4.]
- [19] Machel H G, Krouse H R, Sassen R. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction [J]. *Applied Geochemistry*, 1995, 10: 373-389.
- [20] Worden R H, Smalley P C, Barclay S A. H<sub>2</sub>S and diagenetic pyrite in North Sea sandstones: Due to TSR or organic sulphur compound cracking [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 487-491.
- [21] Manzano B K, Fowler M G, Machel H G. The influence of thermochemical sulphate reduction on hydrocarbon composition in Nisku reservoirs, Brazeau river area, Alberta, Canada [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(7/8): 507-521.
- [22] Wang Yigang, Dou Lirong, Wen Yingchu, *et al.* Origin of H<sub>2</sub>S in Triassic Feixianguan Formation gas pools northeastern Sichuan basin, China [J]. *Geochimica*, 2002, 31(6): 517-524. [王一刚, 窦立荣, 文应初, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组富含硫气藏 H<sub>2</sub>S 成因研究[J]. *地球化学*, 2002, 31(6): 517-524.]
- [23] Cai Chunfang, Xie Zengye, Worden R H, *et al.* Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation east Sichuan basin, China: Towards prediction of fatal H<sub>2</sub>S concentrations [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21: 1265-1279.
- [24] Desrocher S, Hutcheon I, Kirste D, *et al.* Constraints on the generation of H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> in the subsurface Triassic, Alberta basin, Canada [J]. *Chemical Geology*, 2004, 204: 237-254.
- [25] Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Liang Yingbo, *et al.* Geochemical characteristics of the Zhaolanzhuang sour gas accumulation and thermochemical sulfate reduction in the Jixian sag of Bohai Bay basin [J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36: 1717-1730.
- [26] Zhu Guangyou, Dai Jinxing, Zhang Shuichang, *et al.* Generation mechanism and distribution characteristics of hydrogen sulfide-bearing gas in China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(2): 166-170. [朱光有, 戴金星, 张水昌, 等. 含硫化氢天然气的形成机制及分布规律研究[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(2): 166-170.]
- [27] Chen Anding, Li Jianfeng, Dai Jinyou. Geological conditions of generating hydrogen sulphide [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(4): 24-34. [陈安定, 李剑锋, 代金友. 论硫化氢生成的地质条件[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(4): 24-34.]
- [28] Du Chunguo, Hao Fang, Zou Huayao, *et al.* Effect of thermochemical sulfate reduction upon carbonate gas reservoir: An example from the northeast Sichuan basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(1): 119-126. [杜春国, 郝芳, 邹华耀, 等. 热化学硫酸盐还原作用对碳酸盐岩气藏的化学改造——以川东北地区长兴组—飞仙关组气藏为例[J]. *地质学报*, 2007, 81(1): 119-126.]
- [29] Ding Kangle, Li Shuyuan, Yue Changtao, *et al.* Study on the genesis of H<sub>2</sub>S-bearing natural gas in carbonate reservoirs [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(4): 535-538. [丁康乐, 李术元, 岳长涛, 等. 碳酸盐岩储集层含 H<sub>2</sub>S 天然气成因研究[J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(4): 535-538.]
- [30] Chen Zongqing. Sedimentary facies during Huanglong stage of Mid-Carboniferous in eastern Sichuan and its correlation with oil and gas [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(1): 71-80. [陈宗清. 川东中石炭世黄龙期沉积相及其与油气关系[J]. *沉积学报*, 1985, 3(1): 71-80.]
- [31] Wang Lansheng, Li Zongyin, Shen Ping, *et al.* On the hydrocarbon generation conditions of the large and middle scale gas fields in eastern part of Sichuan basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(6): 567-571. [王兰生, 李宗银, 沈平, 等. 四川盆地东部大中型气藏成烃条件分析[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(6): 567-571.]
- [32] Hu Anping, Chen Hanlin, Yang Shufeng, *et al.* Origin of natural gas and main controlling factors of reservoirs in Wulonghe gas field [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(5): 643-649. [胡安平, 陈汉林, 杨树峰, 等. 卧龙河气田天然气成因及成藏主要控制因素[J]. *石油学报*, 2008, 29(5): 643-649.]
- [33] Yang Yu, Zeng Yunxian, Liu Wei. Control of the Feixianguan Formation facies on the distribution of the oolitic shoal, northeastern Sichuan basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2002, 25(1): 1-9. [杨雨, 曾云贤, 刘微. 川东北部地区飞仙关组沉积相对鲕滩储层分布的控制[J]. *天然气勘探与开发*, 2002, 25(1): 1-9.]
- [34] Yang Xingzhi, Zhang Fan, Jiang Zhibin, *et al.* A study of Feixianguan reservoir in northeast Sichuan basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 117-122. [王兴志, 张帆, 蒋志斌, 等. 四川盆地东北部飞仙关组储层研究[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 117-122.]
- [35] Cai Liguang, Rao Dan, Pan Wenlei, *et al.* The evolution model of the Puguang gas field in northeast of Sichuan [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(5): 462-467. [蔡立国, 饶丹, 潘文蕾, 等. 川东北地区普光气田成藏模式研究[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(5): 462-467.]
- [36] Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, *et al.* The formation mechanism of high-quality dolomite reservoir in the deep of Puguang gas field [J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2007, 37(supplement II): 43-52. [马永生, 郭彤楼, 赵雪凤, 等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2007, 37(增刊 II): 43-52.]
- [37] Jiang Xingfu, Xu Renfen, Huang Jianzhang. Distribution characteristics of H<sub>2</sub>S in Feixianguan Formation gas pool, northeast Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(2): 24-27. [江兴福, 徐人芬, 黄建章. 川东地区飞仙关组气藏硫化氢分布特征[J]. *天然气工业*, 2002, 22(2): 24-27.]
- [38] Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Guo Tonglou. The controlling factors of oil and gas charging and accumulation of Puguang gas field in the Sichuan basin [J]. *China Science Bulletin*, 2007, 52(supplement I): 149-155. [马永生, 蔡勋育, 郭彤楼. 四川盆地普光大型气田油气充注与富集成藏的主控因素[J]. *科学通报*, 2007, 52(增刊 I): 149-155.]
- [39] Wu Damao, Wu Nailing, Gao Jianjun. Study on the paleotemperature and its geological significance, Sichuan basin [J]. *Ac-*

- ta Petrolei Sinica, 1998, 19(1): 18-23. [伍大茂, 吴乃苓, 郜建军. 四川盆地古地温研究及其地质意义[J]. 石油学报, 1998, 19(1): 18-23.]
- [40] Lin Yaoting. Study on sulfur isotopes of Trias marine deposit gypsum and brines in the Sichuan basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2003, 11(2): 1-7. [林耀庭. 四川盆地三叠纪海相沉积石膏和卤水的硫同位素研究[J]. 盐湖研究, 2003, 11(2): 1-7.]
- [41] Li Yanjun, Liu Lin, Liu Chen, *et al.* Genetic of sour gas reservoir in lower Triassic series Naxi-Tanghe area, south of Sichuan basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 732-736. [李延钧, 刘麟, 刘臣, 等. 四川盆地南部纳溪—塘河地区下三叠统嘉陵江组含硫气藏成因[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 732-736.]
- [42] Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, *et al.* The genesis of  $H_2S$  in the Weiyuan gas field, Sichuan basin and its evidence[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(23): 2780-2788. [朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地威远气田硫化氢的成因及其证据[J]. 科学通报, 2006c, 51(23): 2780-2788.]
- [43] Tang Junhong, Zhang Tongwei, Bao Zhengyu, *et al.* Study of organic inclusions in the carbonate reservoirs bed of the Weiyuan gas field in the Sichuan basin[J]. Geological Review, 2004, 50(2): 210-214. [唐俊红, 张同伟, 鲍征宇, 等. 四川盆地威远气田碳酸盐岩中有机包裹体研究[J]. 地质论评, 2004, 50(2): 210-214.]
- [44] Chen Zongqing. Exploration for natural gas in Middle Permian Maokou Formation of Sichuan basin[J]. Exploration Strategy, 2007, 5: 1-11. [陈宗清. 四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探[J]. 勘探战略, 2007, 5: 1-11.]
- [45] Li Qirong, Wang Tingdong, Li Yanjun, *et al.* Determination of the reservoir formation stages of the Jialingjiang Formation in Luzhou palaeohigh[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(7): 8-10. [李其荣, 汪廷栋, 李延钧, 等. 泸州古隆起嘉陵江组油气成藏期的确定[J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 8-10.]
- [46] Zheng Chaoyang, Guo Dixiao, Luo Qiuxia. A modeling on the formation of natural gas pools in the west Sichuan depression of the Sichuan basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1993, 15(2): 115-127. [郑朝阳, 郭迪孝, 罗秋霞. 四川盆地川西凹陷天然气成藏过程模拟[J]. 石油实验地质, 1993, 15(2): 115-127.]

## Distribution Characteristics of Hydrogen Sulphide-bearing Gas Pools and the Genesis of Hydrogen Sulphide in Sichuan Basin

HUANG Shi-peng, LIAO Feng-rong, WU Xiao-qi, TAO Xiao-wan

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** At present, Sichuan basin is a petroliferous basin which has the biggest number of  $H_2S$ -bearing gas reservoirs and of which the  $H_2S$ -bearing gas reserves is also the biggest in China. Reservoirs producing  $H_2S$ -bearing natural gas are distributed in Sinian, Carboniferous, Permian, and Triassic. Transversely, the East Gas District(EGD) has the highest content of  $H_2S$ , followed by the West Gas District(WGD) and the Middle Oil-Gas District(MOGD), and the South Gas District(SGD) has the least. Vertically, the content of  $H_2S$  is various among the different reservoirs and even in different members of the same strata or well. The  $H_2S$  content of natural gas in Triassic Feixianguan Formation is the highest, followed by those in the Permian Changxing Formation and in the Triassic Leikoupo Formation, and that in the Permian Maokou Formation is the least. The differences of the  $H_2S$  content among different wells in the Sinian Dengying Formation are slight, and the similar phenomenon also exists in Carboniferous Huanglong Formation. Significant  $H_2S$  content differences have been observed in the natural gas from different members of Jialingjiang Formation, in which the gas from the fifth and the forth members have the highest  $H_2S$  content. According to the comprehensive analysis of the sedimentary facies, burial history, thermal history, homogenization temperature of the fluid inclusions, as well as the sulfur isotope ratios and the components of the natural gas, it can be concluded that the  $H_2S$  of the Feixianguan Formation and the Changxing Formation in EGD, the Jialingjiang Formation(except the first member) in EGD and SGD, the Dengying Formation gas pool of Weiyuan gas reservoir in SGD, the Leikoupo Formation gas pool of Zhongba gas reservoir in WGD and the Leikoupo Formation gas pool of the Moxi gas reservoir in MOGD were generated by the thermochemical sulfate reduction(TSR), while that in the Huanglong Formation in EGD and the Maokou Formation in SGD were generated by the cracking of the organic matter(kerogen or oil) which contains sulfur.

**Key words:** Hydrogen sulphide; Gas pool; Distribution characteristics; Genesis; Sichuan basin.