

文章编号:0253-9985(2011)06-0867-06

## 川东北地区大中型气藏天然气特征及气源

王强<sup>1</sup>,徐立恒<sup>2</sup>,陈践发<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学 资源学院,湖北 武汉 430074; 2. 中国石油 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163712;  
3. 中国石油大学 地球科学学院,北京 102249)

**摘要:**四川盆地东北部下三叠统飞仙关组、上二叠统长兴组内发现了丰富的天然气资源,展现了良好的潜力。结合川东北地区烃源岩特征,对比分析长兴-飞仙关组天然气组分、同位素特征与石炭系气藏的异同,从而确定其主力烃源岩层;对长兴-飞仙关组储层进行密集采样,分析其有机碳值,进而定量评价储层沥青的含量;同时根据物质守恒原理,计算出普光古油藏裂解生成的天然气总量。研究发现,龙潭组烃源岩是长兴-飞仙关组气藏的主力烃源岩,干酪根裂解气超过原油二次裂解气的贡献,是气藏的首要气源类型;普光气藏的古油藏裂解生成天然气总量为 $3\,610\times 10^8\text{ m}^3$ ,其贡献不能满足普光大型气藏的形成,进一步验证了关于长兴-飞仙组气藏首要气源为干酪根裂解气的结论。

**关键词:**同位素;储层沥青;烃源岩;天然气;普光气藏;川东北

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

## Characteristics and origin of natural gas in large- and medium-sized gas reservoirs in northeast Sichuan Basin

Wang Qiang<sup>1</sup>, Xu Liheng<sup>2</sup> and Chen Jianfa<sup>3</sup>

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;  
2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163712, China;  
3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Abundant natural gas resources have been discovered in the Lower Triassic Feixianguan Formation and Upper Permian Changxing Formation in northeast Sichuan Basin, revealing good potential for natural gas exploration. Based on an analysis of the characteristics of hydrocarbon source rocks in northeast Sichuan Basin, we identify the major hydrocarbon source rocks by the comparison of the natural gas composition and isotope features of the Changxing and Feixianguan formations with that of the Carboniferous reservoirs. The Changxing and Feixianguan formations were densely sampled to measure their organic carbon contents and to quantitatively calculate bitumen contents of the reservoirs. Meanwhile, the total gas volume from oil-cracking in Puguang ancient oil reservoirs were calculated based on the principle of conservation of matter. The study shows that the Longtan Formation source rocks are the major source rocks for Changxing and Feixianguan formation gas reservoirs. The kerogen-cracking contributed more gas than secondary cracking of crude oil, thus gas from kerogen-cracking is the primary gas source. The total gas generated from oil cracking is 361 BCM in the Puguang gas pool, which is not large enough for the forming of the huge Puguang gas pool. This further proves the conclusion that the major gas for the Changxing and Feixianguan formation gas reservoirs comes from kerogen-cracking gas.

**Key words:** isotope, reservoir bitumen, source rock, natural gas, Puguang gas pool, northeast Sichuan Basin

近年来,在四川盆地东北部下三叠统飞仙关组、上二叠统长兴组内(简称长兴-飞仙关组)发现

收稿日期:2011-01-20。

第一作者简介:王强(1981—),男,博士研究生,石油地质。

基金项目:中国石油化工股份有限公司项目(G0800-06-ZS-138)。

了丰富的天然气资源,已经成为川东石炭系勘探的重要接替层系。相继发现了普光、罗家寨、渡口河、铁山坡、毛坝、铁山、天东、龙岗等一系列大中型天然气藏。区内具有巨厚的烃源岩系、良好的区域盖层、多套储集层,资源丰度高,具有形成大中型气田的基本地质条件<sup>[1-3]</sup>。

四川盆地发育了多套烃源岩,在经历多阶段生烃后,大部分烃源岩已进入高成熟或过成熟阶段,烃源层系在平面上相互叠置与交叉,使得大多气藏具有混源的特征;同时气藏后期经历了硫酸盐还原反应(简称TSR)等次生蚀变,导致油气系统错综复杂。因而,进一步明确天然气成因和来源,对本区的油气勘探具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

本文在对普光、罗家寨等长兴-飞仙关组气藏天然气化学成分和碳同位素组成等系统分析的基础上,剖析其地球化学特征及成因机制,并结合储层沥青的定量计算评价天然气储量,以新的角度分析、探讨其主力气源层,为类似这种多阶段生烃、混源聚集和后期遭受次生蚀变气藏的研究提供了一种研究方法。

## 1 区域概况

研究区位于四川省东北部,是一个构造-岩性复合型大型气藏,其主要产层为长兴组-飞仙关组。相继发现了普光、罗家寨、渡口河、铁山坡、毛坝等含油气构造(图1)。

川东北地区烃源岩非常发育,在纵向上可划分出下寒武统( $\epsilon_1$ )、下志留统( $S_1$ )、下二叠统( $P_1$ )、上二叠统( $P_2$ )、上三叠统( $T_3$ )、下侏罗统( $J_1$ )等6套有效烃源岩,其中 $\epsilon_1, S_1, J_1$ 主要为泥质烃源岩, $P_1$ 主要为碳酸盐烃源岩, $P_2, T_3$ 主要为含煤泥质烃源岩。众多研究者认为,区内主力气源岩是上二叠统龙潭组和志留系,两套烃源岩生烃潜力巨大,目前有机质演化程度已达干气阶段<sup>[6-7]</sup>。

## 2 天然气组分及同位素特征

### 2.1 烷烃气

川东北长兴-飞仙关组气藏天然气中烃类气体占80%左右,其中以甲烷为主。天然气烃类组分中甲烷( $C_1$ )含量均大于95%, $C_2$ 以上的重烃很

少,几乎都低于1%;相应的干燥系数都在0.99以上(图2),高者几乎达到1.0,在双庙场、河坝气藏天然气干燥系数略低,但也达到0.987以上,表征高热演化程度,具有典型的干气特征,这说明该区的天然气来源于高成熟、过成熟烃源岩。

川东北地区长兴-飞仙关组天然气甲烷碳同位素较重,大多集中在 $-29.5\text{‰} \sim -33.0\text{‰}$ 范围,进一步说明天然气演化程度很高;相比之下,乙烷的碳同位素值分布范围相对较宽,重者达到 $-25.0\text{‰}$ ,轻者达到 $-35\text{‰}$ ,以现有数据看,主要

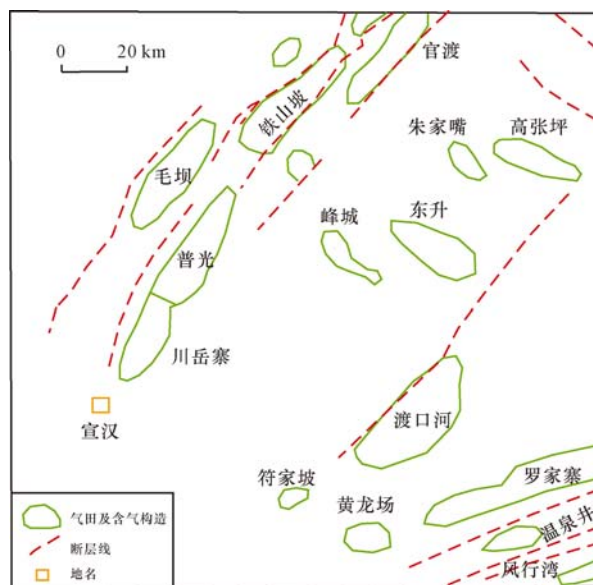


图1 川东北大中型气田构造特征

Fig. 1 Tectonic characteristics of the large- and medium-sized gas fields in northeast Sichuan Basin

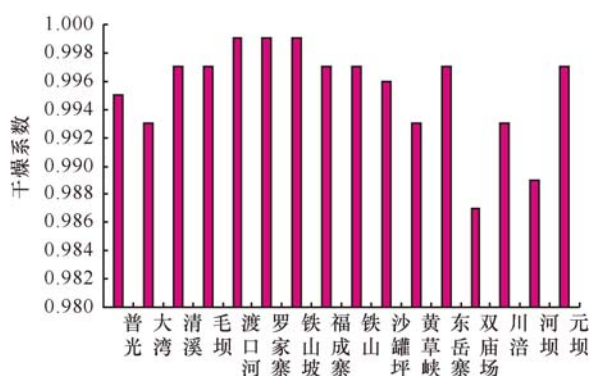


图2 川东北地区长兴-飞仙关组  
天然气平均干燥系数分布

Fig. 2 Column diagram showing the average drying coefficient of natural gas in the Changxing and Feixianguan formations in northeast Sichuan Basin

分布在  $-28\% \sim -33\%$  之间;部分样品烷烃气的碳同位素值呈反向变化(倒转),正常有机成因的天然气中呈  $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2$  分布,这一系列特征显示气藏具有多源、多期天然气混入<sup>[8-9]</sup>。

朱光有等<sup>[10]</sup>认为铁山构造与普光、罗家寨、渡口河构造飞仙关组天然气气源一致,而铁山气藏天然气中几乎不含有  $\text{H}_2\text{S}$ ,没有发生 TSR 反应;而后者高含  $\text{H}_2\text{S}$ ,发生过 TSR 反应。比较二者的甲烷、乙烷碳同位素值认为 TSR 使甲烷碳同位素偏重幅度在  $2\%$  (PDB) 左右,乙烷的增重幅度在  $3.0\%$ ,因此 TSR 作用有可能使本来倒转的同位素分布调整成正序分布。针对高含  $\text{H}_2\text{S}$  气藏按此增重比例进行校正,可以得出气藏 TSR 改造前的甲烷、乙烷碳同位素分布特征。

从川东北长兴-飞仙关组(校正后)天然气甲烷、乙烷碳同位素分布图看到,只有铁山坡-罗家寨-渡口河气藏的少数几个测点的碳同位素分布特征与石炭系较为接近,介于  $-34.3\% \sim -37.7\%$ ,而大部分乙烷碳同位素比石炭系天然气重,二者相差  $3\%$  左右,可以认定二者具有不同气源(图3)。石炭系天然气来源于志留系泥岩已得到众多学者的认可<sup>[11-12]</sup>,因此除了铁山坡-罗家寨-渡口河气藏有石炭系天然气混入外,志留系泥岩对川东北长兴-飞仙关组气藏的贡献不大。

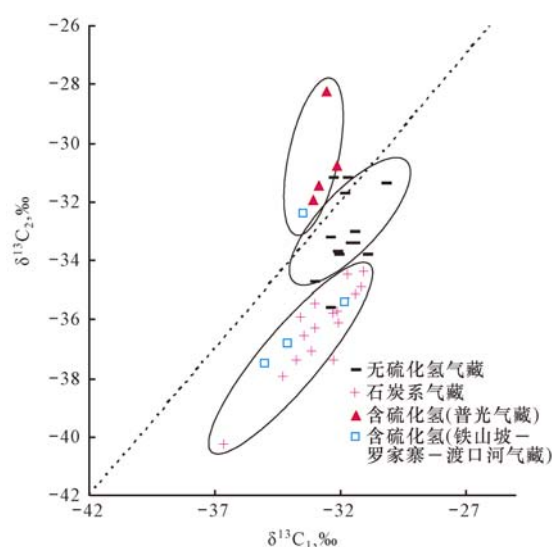


图3 川东北地区长兴-飞仙关组天然气  $\delta^{13}\text{C}_1$  与  $\delta^{13}\text{C}_2$  分布

Fig. 3 Scattergram showing  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{13}\text{C}_2$  of gas in the Changxing and Feixianguan formations in northeast Sichuan Basin

裂解气包括干酪根裂解气和原油裂解气,理论上两种裂解气在自然界都存在。在天然气演化过程中,干酪根裂解气  $\text{C}_1/\text{C}_2$  增加很快,而  $\text{C}_2/\text{C}_3$  却增加较慢、或基本不变(甚至可能变小);油的二次裂解气  $\text{C}_1/\text{C}_2$  增加较小或基本不变, $\text{C}_2/\text{C}_3$  比值却急剧增加。Behar 等<sup>[13]</sup>根据二者不同的演化特征建立图版(图4a),并根据该鉴别图版,安哥拉气田为干酪根裂解气(图4b),堪萨斯气田为油的二次裂解气(图4c)。这一研究成果与该区气源岩条件非常吻合,即安哥拉气源岩成熟度较低,有利于天然气初次裂解作用;而美国堪萨斯地区气源岩成熟度较高,已达到了天然气二次裂解的条件。

图5展示了川东北地区长兴-飞仙关组天然气  $\ln(\text{C}_1/\text{C}_2)$  与  $\ln(\text{C}_2/\text{C}_3)$  两个参数的分布,从图中可以清楚的看出,天然气  $\ln(\text{C}_1/\text{C}_2)$  主要介于  $4.0 \sim 8.0$  之间,随  $\ln(\text{C}_2/\text{C}_3)$  增加有降低趋势,而  $\ln(\text{C}_2/\text{C}_3)$  值变化介于  $0.5 \sim 4.5$  之间,二者均具有较大的变化范围;既不属于原油裂解气特征,也不符合典型干酪根裂解气的变化特征,说明川东北长兴-飞仙关组气藏为这两种类型气的混合,且从线型上看,更偏向于干酪根裂解气。初步认为,干酪根裂解气的贡献大一些,这与龙潭组烃源岩的性质相符,其干酪根类型属于  $\text{II}_2 - \text{III}$  型,在其演化过程中,油与气均可以生成,但更倾向于干酪根裂解生气。

## 2.2 非烃气

川东北地区长兴-飞仙关组气藏天然气中非烃气体含量较高,其主要为  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$ ;其它非烃气体如氮、氢、氦等含量则较低,均含量不超过  $3.5\%$ 。图6为川东北长兴-飞仙关组天然气  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  的含量分布图, $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$  含量占气体组份的  $10\% \sim 17\%$  和  $3\% \sim 10\%$  左右;且随着  $\text{H}_2\text{S}$  含量的增加, $\text{CO}_2$  的含量也呈增加趋势,体现出二者成因上具有相关性,属 TSR 成因。TSR 定义为:在热动力驱动下,烃类与硫酸盐岩发生化学反应,将硫酸盐矿物还原生成  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$  等酸性气体的过程,其本质是一个消耗烃类的过程。在 TSR 过程中,气藏中烃类的含量将会逐渐减少,而非烃类(酸性气体)含量增加,因此对已存在的油气田具有较强的破坏作用<sup>[12-13]</sup>。

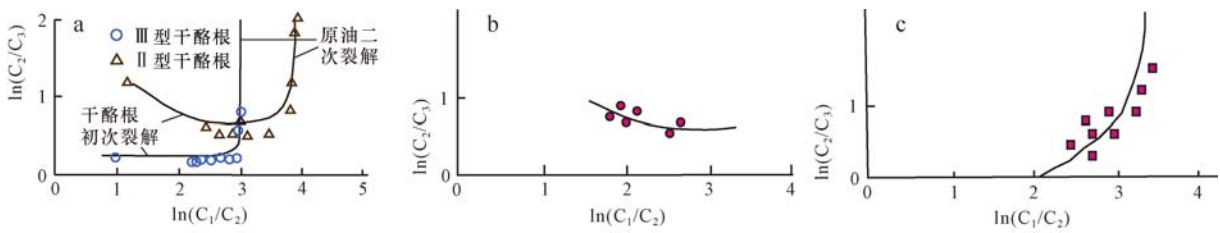


图4 干酪根裂解气与油的二次裂解气组分鉴别模式

Fig. 4 Mode chart for differentiation of kerogen-cracking gas and secondary oil-cracking gas

a. 鉴别版图; b. 安哥拉干酪根裂解气; c. 堪萨斯油的二次裂解气

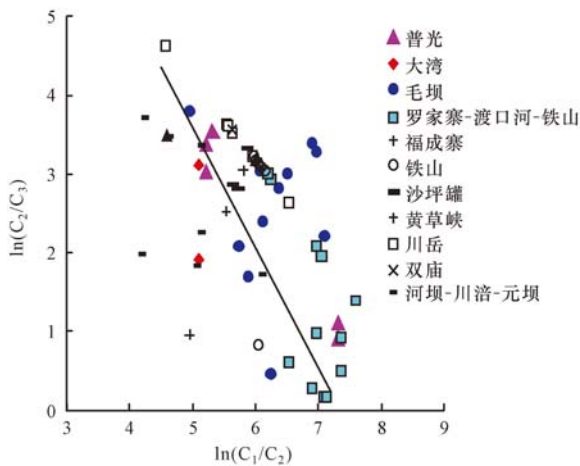
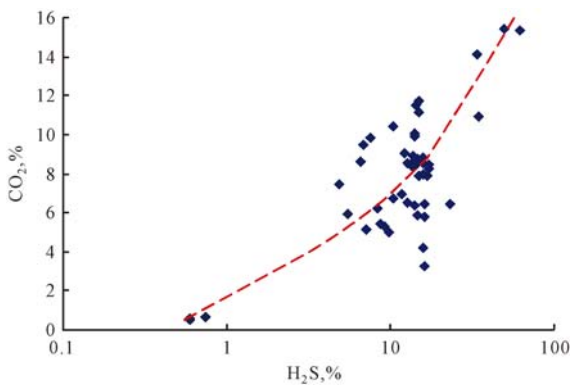
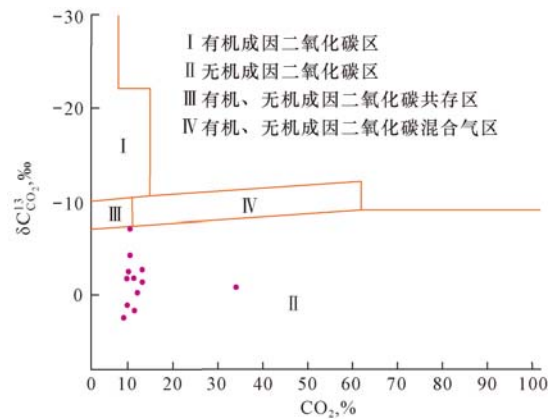
图5 川东北长兴-飞仙关组不同气藏天然气的  
 $\ln(C_2/C_3) - \ln(C_1/C_2)$  相关图Fig. 5  $\ln C_2/C_3 - \ln C_1/C_2$  correlation diagram of natural gas from different gas reservoirs in the Changxing and Feixianguan formations in northeast Sichuan Basin图6 川东北地区长兴-飞仙关组天然气  
 $H_2S$  与  $CO_2$  含量的关系Fig. 6 Relationship between  $H_2S$  and  $CO_2$  contents of natural gas in the Changxing and Feixianguan formations in northeast Sichuan Basin

图7 为川东北长兴-飞仙关组天然气中  $\delta C_{CO_2}^{13}$  -  $CO_2$  含量分布图,川东北地区长兴-飞仙关

图7 有机和无机  $CO_2$  鉴别图Fig. 7 Chart for differentiation of organic and inorganic  $CO_2$ 

组的天然气中的  $CO_2$  碳同位素分布范围为  $-1.1\text{‰} \sim -7.4\text{‰}$ , 根据二氧化碳鉴别图判断为无机成因。这与大多数低含  $CO_2$  的天然气  $CO_2$  碳同位素值 ( $-10\text{‰} \sim -25\text{‰}$ ) 相比明显偏重, 这一系列特征可能与 TSR 作用有关。

### 3 古油藏裂解生气量估算

川东北地区长兴-飞仙关组气藏中发现一定数量的固体沥青, 如普光气藏、渡口河气藏、罗家寨气藏、铁山坡气藏等。前人<sup>[14-16]</sup> 对这类沥青已做过一些研究, 其沥青的甾萜类生物标志物分布正常, 认为它们是古油藏原油经热降解的演化产物, 属焦沥青类。

随着温度升高, 石油的演化趋势为: 油—油 + 气体—油 + 气 + 固体沥青—液体沥青 + 固体沥青 + 气体—气体 + 固体沥青—甲烷 + 固体沥青<sup>[17-19]</sup>。现今普光气藏演化为终极产物——甲烷和固体沥青; 且含有较高的  $H_2S$  (平均约 11%) 和  $CO_2$  (平均约 9%), 天然气中高含硫化氢及二

氧化碳被认为是气藏中发生硫酸盐热化学还原作用所致,其中涉及到碳元素和氢元素的转移与守恒。因此只要清楚储层中固体沥青的量,通过物质守恒原理,就可估算出古油藏裂解生气量。

本次选用普光构造带普光2井和普光6井长兴-飞仙关组碳酸盐岩剖面,间隔1~2 m进行连续取样,共计137块样品,送往中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室进行全岩有机碳分析。长兴组的平均有机碳值为17%,飞仙关组的有机碳值为0.29%,反映长兴组储层丰度不如飞仙关组大。

设储层单位面积内古原油质量为 $X_0$ ;单位面积甲烷质量为 $X_G$ , $H_2S$ 质量为 $X_{H_2S}$ , $CO_2$ 质量为 $X_{CO_2}$ ;现今储层单位面积沥青的有机碳总质量为 $TOC_{\text{沥青}}$ ,上述单位都为 $\text{t}/\text{m}^2$ 。

根据碳元素与氢元素守恒原则,列方程组:

$$\begin{cases} X_0 A = TOC_{\text{沥青}} + \frac{3}{4} X_G + \frac{3}{11} X_{CO_2} \\ X_0 B = \frac{1}{4} X_G + \frac{1}{17} X_{H_2S} \\ X_G : X_{H_2S} : X_{CO_2} = 16V_1 : 34V_2 : 44V_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A$ 为原油中碳元素的质量分数; $B$ 为原油中氢元素的质量分数。根据海相原油的平均值,取 $A=0.71$ , $B=0.13$ 。 $V_1$ , $V_2$ , $V_3$ 分别为 $CH_4$ , $H_2S$ , $CO_2$ 在普光气藏中的体积分数, $V_1$ 取80%, $V_2$ 取11%, $V_3$ 取9%。

$$TOC_{\text{沥青}} = \sum TOC_{\text{沥青}i} = 10^3 \rho \sum (1 - F_i) H_i (TOC_i - 0.1) \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为碳酸盐岩的密度值,取值为 $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;  $TOC_i$ 为本次所测得的储层不同深度的有机碳含量,%; $H_i$ 为相应有机碳含量分布的厚度,m; $F_i$ 为储层不同深度对应的岩石孔隙度,%。取普光气藏圈团面积为 $50 \text{ km}^2$ 。

计算结果如表1所示,普光圈团长兴-飞仙关组古油藏原油总量为 $5.01 \times 10^8 \text{ t}$ ,古油藏裂解累积生成的天然气总量为 $3610 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

虽然古油藏裂解成天然气是在已有圈团中进行,构造运动平缓,嘉陵江组上部及雷口坡组内的膏盐岩盖层已形成,保存条件具备,但是由于成藏时间较早(约在160 Ma)<sup>[27]</sup>,其所生成的天然气有一定的散失(水溶、吸附、扩散),而且经历了强烈的TSR反应消耗,初步估计其所剩天然气不足50%;截止2006年底,普光气田探明天然气地质储量已达到 $3560.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,而且随着勘探程度的提高,其储量会不断提高,因此单靠古原油裂解气的贡献不能满足普光大型气藏的形成<sup>[20]</sup>。综合前面天然气组分及同位素特征分析的结果,认为龙潭组烃源岩干酪根裂解气对普光气藏贡献超过油的二次裂解的贡献,是普光气藏的首要气源类型。

## 4 结论

1) 川东北长兴-飞仙关组气藏天然气甲烷、乙烷碳同位素分布与石炭系天然气分布不同,认定二者具有不同气源。石炭系气藏已被证实来源于志留系泥岩,因此,志留系泥岩对川东北长兴-飞仙关组气藏的贡献不大;

2) 川东北长兴-飞仙关组气藏天然气属于干酪根裂解气与原油裂解气混合而成,且干酪根裂解气的贡献大一些,这正与干酪根类型为Ⅱ<sub>2</sub>-Ⅲ型的龙潭组烃源岩性质相符;

3) 通过元素物质平衡法,估算出古油藏裂解累积生成的天然气总量为 $3600 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,综合研究认为龙潭组烃源岩干酪根裂解气对普光气藏贡献超过油的二次裂解气的贡献,是普光气藏的首要气源类型。

表1 川东北普光气藏长兴-飞仙关组油气量计算值

Table 2 Calculated oil/gas volume of the Changxing and Feixianguan formations in Puguang gas pool in northeast Sichuan Basin

储层	古原油量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	油裂解生气量 ( $\text{CH}_4$ )/( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ )	圈团面积/ $\text{km}^2$	普光古原油总量/ ( $10^8 \text{ t}$ )	天然气(甲烷) 总量/( $10^8 \text{ m}^3$ )	2006年底天然气探明地质 储量/( $10^8 \text{ m}^3$ )
飞仙关组	8 015.6	4 168.1		4.06	2 917.3	
长兴组	1 875.7	975.3	50	0.95	682.7	3 560.7
总计	9 891.3	5 143.5		5.01	3 600.0	



## 参 考 文 献

- [1] 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.  
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.
- [2] 徐言岗,贺自爱,曾凡刚. 川东北天然气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2004,25(3):274-278.  
Xu Yangang, He Ziai, Zeng Fangang. Characteristics of gas accumulation in northeastern Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004,25(3):274-278.
- [3] 马永生,蔡勋育. 四川盆地川东北区二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望[J]. 石油与天然气地质, 2006,27(6):741-750.  
Ma Yongsheng, Cai Xunyu. Exploration achievements and prospects of the Permian Triassic natural gas in northeastern Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004,2006,27(6):741-750.
- [4] 谢增业,田世澄,李剑,等. 川东北飞仙关组鲕滩天然气地球化学特征与成因[J]. 地球化学, 2004,33(6):567-572.  
Xie Zengye, Tian Shicheng, Li Jian, et al. Geochemical characteristics and origin of Feixianguan Formation oolitic shoal natural gases in northeastern Sichuan basin[J]. Geochimica, 2004,33(6):567-572.
- [5] 朱光有,张水昌,梁英波,等. 四川盆地天然气特征及气源[J]. 地学前缘(中国地质大学), 2006,13(2):234-236.  
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. The characteristics of natural gas in Sichuan basin and its sources[J]. Earth Science Frontiers, 2006,13(2):234-236.
- [6] 秦建中,付小东,腾格尔. 川东北宣汉—达县地区三叠—志留系海相优质烃源层评价[J]. 石油实验地质, 2008,30(4):367-381.  
Qin Jianzhong, Fu Xiaodong, Teng. Evaluation of the excellent triassic to Silurian marine hydrocarbon source rocks in Xuanhan-Daxian area of Northeast Sichuan basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008,30(4):367-381.
- [7] 马永生. 普光气田天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 天然气地球科学, 2008,19(1):1-7.  
Ma Yongsheng. Geochemical characteristics and origin of natural gases from Puguang gas field on eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008,19(1):1-7.
- [8] 黄籍中. 干酪根的稳定碳同位素分类依据[J]. 地质地球化学, 1988,6(3):12-14.  
Huang Jizhong. Stable carbon isotopes of kerogen classification based on[J]. Geochimica, 1988,6(3):12-14.
- [9] 陈践发,唐友军,徐立恒,等. 川东北地区石炭系与二叠系—三叠系天然气地球化学特征对比研究[J]. 天然气地球化学, 2008,19(6):741-747.  
Chen Jianfa, Tang Youjun, Xu Liheng, et al. Comparison of geochemical characteristics of Carboniferous and Permian-Triassic natural gas in Northeast Shichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2008,19(6):741-747.
- [10] 朱光有,张水昌,梁英波,等. 天然气中高含 H<sub>2</sub>S 的成因及其预测[J]. 地质科学, 2006,41(1):152-157.  
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Genesis and prediction of high H<sub>2</sub>S in natural gas[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2006,41(1):152-157.
- [11] 刘树根,徐国盛,梁卫,等. 川东石炭系气藏含气系统研究[J]. 石油学报, 1997,18(3):13-21.  
Liu Shugen, Xu Guosheng, Liang Wei, et al. A study on gas system of Carboniferous gas pools in east Sichuan basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997,18(3):13-21.
- [12] 徐国盛,左友东,张文虎. 川东石炭系大气田成藏条件分析[J]. 矿物岩石, 2001,21(4):59-64.  
Xu Guosheng, Zu Youdong, Zhang Wenhui. Analysis of formation factors of carboniferous large scale gas pools in east Sichuan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001,21(4):59-64.
- [13] Behar F, Kressmann S, Rudkiewicz J L, et al. Experimental simulation in confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking[J]. Organic Geochemistry, 1991,19:173-189.
- [14] 林峰,王廷栋,代鸿鸣,等. 四川盆地碳酸盐岩储层中固体运移沥青的性质和成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1998,17(3):54-56.  
Lin Feng, Wang Tingdong, Dai Hongming, et al. The properties and genesis of solid migrabitumen of carbonate reservoirs in Sichuan Basin[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 1998,17(3):54-56.
- [15] 蔡勋育,朱扬明,黄仁春. 普光气田沥青地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2006,27(3):340-343.  
Cai Xunyu, Zhu Yangming, Huang Renchun. Geochemical behaviors and origin of reservoir bitumen in Puguang gas pool[J]. Oil & Gas Geology, 2006,27(3):340-343.
- [16] 秦建中,付小东,刘效曾. 四川盆地东北部气田海相碳酸盐岩储层固体沥青研究[J]. 地质学报, 2007,81(8):1065-1071.  
Qin Jianzhong, Fu Xiaodong, Liu Xiaozeng. Solid bitumens in the marine carbonate reservoir of gas field in the Northeast area of the Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007,81(8):1065-1071.
- [17] Heydari E. The role of burial diagenesis in hydrocarbon destruction and H<sub>2</sub>S accumulation, Upper Jurassic Smackover Formation, Black Creek Field, Mississippi[J]. American Association Petroleum Geology Bulletin, 1997,81:26-45.
- [18] 王涵宇,杨天宇. 原油热解成气模拟实验[J]. 天然气工业, 1982,(3):28-33.

(下转第881页)

- ences, 2009, 44 (1): 63–73.
- [33] 张震, 鲍志东. 松辽盆地朝阳沟油田储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 166–172.  
Zhang Zhen, Bao Zhidong. Development characteristics and controlling factors of reservoir fractures in Chaoyanggou Oil-field, Songliao Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (4): 166–172.
- [34] 王兴谋, 夏斌, 陈根文, 等. 中国东部地区新生代岩浆活动对区域性CO<sub>2</sub>形成时间的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 338–344.  
Wang Xinmou, Xia Bin, Chen Genwen, et al. Constraints on formation time of CO<sub>2</sub> from Cenozoic magmatism in Eastern China [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2004, 28(3): 338–344.
- [35] 向凤典. 珠江口盆地东部的气藏及其对油气聚集的影响[J]. 中国海上油气(地质), 1994, 8(3): 155–162  
Xiang Fengdian. The carbon dioxide gas reservoir of oil of the Pearl river Estuary Basin (east) and the effect to gas accumulation [J]. China Offshore Oil and Gas (geology), 1994, 8(3): 155–162.
- [36] 王杰, 刘文汇, 秦建中, 等. 苏北盆地黄桥CO<sub>2</sub>气田成因特征及成藏机制[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(6): 826–834.  
Wang Jie, Liu Wenhui, Qin Jianzhong, et al. Reservoir forming mechanism and origin characteristics in Huangqiao carbon dioxide gas field, North Jiangsu Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(6): 826–834.
- [37] 刘立, 高玉巧, 曲希玉, 等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机CO<sub>2</sub>气储层的岩石学与碳氧同位素特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 1861–1868.  
Liu Li, Gao Yuqiao, Qu Xiyu, et al. Petrology and carbon-oxygen isotope of inorganic CO<sub>2</sub> gas reservoir in Wuersun depression, Hailaer basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 1861–1868.
- [38] 何家雄, 刘全稳. 南海北部大陆架边缘盆地CO<sub>2</sub>成因和运聚规律的分析与预测[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1): 12–19.  
He Jiaxiong, Liu Quanwen. The analysis and discussion of the characters on generative cause, migration and distribution of CO<sub>2</sub> in YingQiong Basins, North of the South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(1): 12–19.
- [39] 王振峰, 何家雄, 张树林, 等. 南海北部边缘盆地CO<sub>2</sub>成因及充注驱油的石油地质意义[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 48–53.  
Wang Zhenfeng, He Jiaxiong, Zhang Shulin, et al. Genesis of carbon dioxide and geological significance for carbon dioxide infilling and oil displacement in the northern marginal basin of South China Sea [J]. Acta Petroli Sinica, 2004, 25(5): 48–53.
- [40] 高锡兴, 黄骥. 坳陷二氧化碳气与油气藏分布关系[J]. 石油实验地质, 1985, 7(3): 227–231.  
Gao Xixing. The distributional relationship between CO<sub>2</sub> gas and oil-gas pools in Huanghua Depression [J]. Petroleum Geology and Experiment, 1985, 7(3): 227–231.
- [41] 杜灵通, 王利. 济阳坳陷无机成因CO<sub>2</sub>气藏成藏条件[J]. 天然气工业, 2007, 27(10): 6–8.  
Du Lingtong, Wang Li. Conditions of abiogenetic CO<sub>2</sub> gas reservoiring in Jiyang Depression [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(10): 6–8.
- [42] 殷红. 下扬子区黄桥CO<sub>2</sub>气田流体特征分析[J]. 内蒙古石油化工, 2005, (5): 135–136.  
Yin Hong. The analysis of Huangqiao CO<sub>2</sub> reservoir in Lower Yangze Area [J]. Inner Mongolian Petrochemical Industry, 2005, (5): 135–136.
- [43] 杨会东, 刘立, 姚萍, 等. 松南无机成因天然气成藏输导体系识别[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(3): 18–21.  
Yang Huidong, Liu Li, Yao Ping, et al. Conducting system identification for inorganic gas reservoir formation in southern Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(3): 18–21.
- [44] 周荔青, 雷一心, 王红燕. 松辽盆地长岭断陷无机与有机油气共生组合类型及分布规律[J]. 石油实验地质, 2009, 31(4): 324–328.  
Zhou Liqing, Lei Yixin, Wang Hongyan. Play types and distribution features of coexistence of organic and abiogenic hydrocarbon in the Changling faulted depression of Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4): 324–328.

(编辑 董立)

(上接第872页)

- Wang Hanyun, Yang Tianyu. Gas oil pyrolysis simulation experiment [J]. Natural Gas Industry, 1982, (3): 28–33.
- [19] 王铜山, 耿安松, 孙永革, 等. 川东北飞仙关组储层固体沥青地球化学特征及其气源指示意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 340–345.  
Wang Tongshan, Geng Ansong, Sun Yongge, et al. Geochemical characteristics of solid bitumen in reservoir and their implication for the origin of natural gas of Feixianguan Formation in Northeastern Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 340–345.
- [20] 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1): 149–155.  
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Guo Tonglou. Puguang large gas field in Sichuan Basin and rich integrated oil and gas charging possession of the controlling factors [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 149–155.

(编辑 董立)