

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

陈践发,唐友军,徐立恒,李 玲,马广宇,赵兴齐

(中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249)

摘要:川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组气藏的天然气地球化学特征对比研究表明,该区天然气总体为高一过成熟的干气, C_2+ 含量普遍较低,其中二叠系长兴组—三叠系飞仙关组气藏的天然气相对石炭系黄龙组的天然气更加偏干。川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气中非烃气体含量相对明显偏高,分布范围介于0.1%~77.8%之间,以高含 H_2S 和 CO_2 为特点,而石炭系黄龙组天然气中非烃气体含量较低,其 H_2S 的含量分布范围在0.01%~4.8%之间,绝大部分天然气的 H_2S 含量在0.5%以下。川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组气藏的天然气重烃(C_4-C_{12})分布特征也具有明显差异。川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 CH_4 、 C_2H_6 的碳同位素组成相对石炭系黄龙组天然气偏重;二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 CH_4 、 C_2H_6 的碳同位素组成大部分为正序分布,而石炭系黄龙组的天然气 CH_4 、 C_2H_6 的碳同位素组成基本为反序分布。

关键词:地球化学特征;非烃气体;重烃; CH_4 和 C_2H_6 ;碳同位素组成

中图分类号:TE122.1⁺14

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2008)06-0741-07

四川盆地是我国主要的天然气聚集盆地之一,其中川东北地区是四川盆地重要的天然气富集区,也是目前四川盆地天然气勘探的主要地区。川东北地区发现的天然气藏分布于志留系到侏罗系等多个层位,但主要分布层位是石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组。

川东北地区石炭系自1977年在相18井获天然气至今,已发现五百梯、沙坪坝、大池干井、高峰场、卧龙河、铁山、云和寨、福成寨、张家寨等50多个气藏,探明储量在 $300 \times 10^8 m^3$ 以上的气田2个,储量在 $(100 \sim 300) \times 10^8 m^3$ 之间的气田5个,其天然气储量和产量均居四川盆地重要产气层之列。

川东北地区的二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气勘探从1963年石油沟构造巴3井发现开始,20世纪80年代,发现了福成寨、板东、黄草峡等飞仙关组气藏,但其气藏的探明储量规模均较小,且大部分为裂缝性气藏,虽然在90年代初发现了铁山

南飞仙关组鲕滩气藏,储层以鲕粒云岩为主,探明储量仅 $39.28 \times 10^8 m^3$,但仍未改变其兼探地位。从90年代中期以来在川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组海相碳酸盐岩中相继发现了渡口河、铁山坡、罗家寨、金珠坪、七里峡、正坝南、菩萨店、普光、毛坝等鲕滩整装气藏(田),其中普光气田为储量大于 $2500 \times 10^8 m^3$ 的大型气田,这些气田的发现实现了勘探的大突破,发展成为继石炭系之后储量和产量增长的重要层系^[1]。

对川东北地区天然气的地球化学特征、成因及来源,前人针对具体气藏和具体层位的天然气藏进行了较多研究,其主要成果概括为如下几个方面:①认为飞仙关组鲕滩气藏气源主要来自二叠系^[2],属于高成熟阶段的原油裂解气^[3-5];②认为石炭系的天然气主要来源于志留系烃源岩,也主要为高成熟阶段的原油裂解气^[6];③对该区高 H_2S 天然气的成因和成藏特征进行了探讨,认为该区高 H_2S 天然气藏

中 H_2S 主要与 TSR 作用有关^[7-9];④从天然气成藏体系来看石炭系与二叠系—三叠系分别属于不同的成藏体系。

在以往的研究中均未系统地对石炭系与二叠系—三叠系天然气地球化学特征进行对比分析。本文通过对川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组 2 个最重要成藏层系的天然气进行对比,剖析其天然气的地球化学特征,为该区天然气藏的成因和成藏提供科学解释。

1 石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气组成

天然气的化学组成可分为烃类气体与非烃气体 2 类,烃类气体主要指 CH_4 和 C_2^+ 重烃气;非烃气体常见的有 CO_2 、 N_2 、 H_2S 、 H_2 及 He、Ar 等稀有气体。天然气的组成一方面因天然气成因差异而不同,另一方面天然气形成后的运移、成藏过程中也将影响天然气的化学组成。通过对川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气组分对比分析表明,它们存在较明显的差异。

1.1 天然气烃类组分特征

川东北地区石炭系黄龙组、二叠系长兴组—三叠系飞仙关组气藏的天然气组成总体具有相似性,如以 CH_4 为主, C_2^+ 含量普遍较低等,但不同的产层也表现出一些特殊的地球化学特征,如 H_2S 、 CO_2 含量、天然气烃类相对组成差异等。

川东北地区石炭系的天然气中烃类组分含量介于 89.9%~97.9%之间,其中 CH_4 含量介于 86.5%~97.4%之间,重烃(C_2^+)仅占 0.11%~2.2%。天然气干燥系数(C_1/C_2^+)为 41~803,是典型的干气,说明川东北地区石炭系黄龙组的天然气处于较高的演化阶段。

二叠系长兴组—三叠系飞仙关组气藏烃类气体组分含量介于 58.9%~100%之间,其 CH_4 含量介于 58.7%~99.8%之间。天然气干燥系数(C_1/C_2^+)介于 27~7 294 之间,也是典型的干气,这反映了川东北地区天然气整体上处于较高的演化阶段。

对比川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气烃类组分可知,总体上长兴组—飞仙关组的天然气比石炭系黄龙组的天然气更为偏干,且有相当部分的天然气重烃含量非常低(图 1)。单纯用热演化作用难以解释这一现象。

川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组鲕

滩天然气中 C_1/C_2^+ 值也具有一定的差别(图 2)。在低含 H_2S 天然气中, C_1/C_2^+ 值主要分布在 100~500 之间,而高含 H_2S 天然气则以大于 500 为主。笔者认为这并不意味着高含 H_2S 天然气的演化程度较高,造成这一现象的主要原因是由于高含 H_2S 天然气在储层中发生了热化学硫酸盐还原(TSR)作用。因为,天然气藏中 TSR 作用将优先消耗 C_2^+ 重烃而使天然气更加偏干。

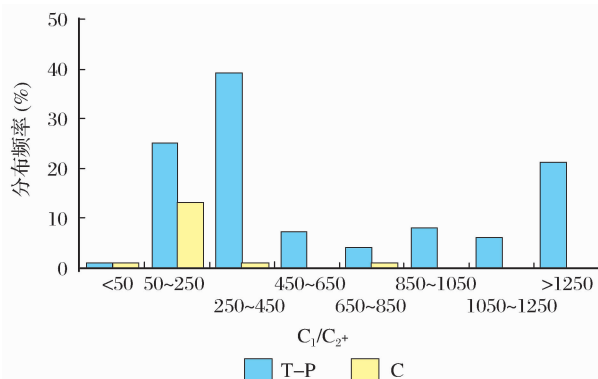


图 1 川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气 C_1/C_2^+ 分布特征

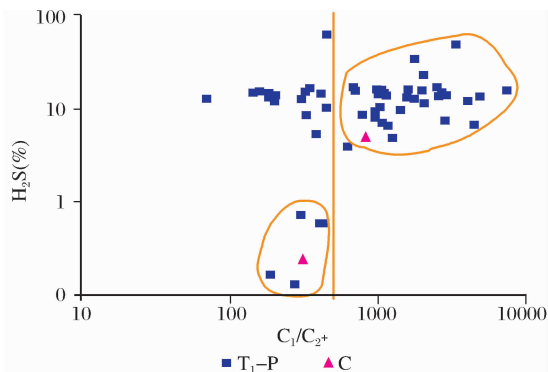


图 2 川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气 C_1/C_2^+ 值与 H_2S 含量关系

1.2 天然气非烃类组分特征

川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气中均含有一定量的非烃组分,主要为 CO_2 、 H_2S 和 N_2 。总体来看川东北地区石炭系黄龙组的天然气比二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气中非烃气体含量低。川东北地区石炭系黄龙组的天然气中非烃气体含量分布范围为 0.8%~12.8%,主要为 CO_2 、 H_2S ,其中 H_2S 含量介于 0.01%~4.8%之间;绝大部分天然气的 H_2S 含量在 0.5%以下(图 3)。同属于石炭系的天然气,不同区块的天然气藏其非烃含量也有一定的变化,其中七里场、蒲包山、云和寨、福成寨、张家场、月东气藏非烃气体含量相对较高(>3%),而相国寺和大

池干井天然气藏非烃气体含量相对较低($<1\%$)。

二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气中非烃气体含量介于 $0.1\% \sim 77.8\%$ 之间,以高含 H_2S 和 CO_2 为特点,长兴组—飞仙关组天然气中 H_2S 的含量分布范围为 $0.01\% \sim 62.2\%$,按含 H_2S 的高低可分为:①高 H_2S 天然气,其 H_2S 的含量分布在 $4\% \sim 62.2\%$ 之间,其中大部分分布在 $10\% \sim 20\%$ 之间;②低 H_2S 含量天然气,其 H_2S 的含量分布在 $0.01\% \sim 0.7\%$ 之间,其中大部分分布在 $0.01\% \sim 0.2\%$ 之间。天然气中 CO_2 含量分布范围为 $0.01\% \sim 32.3\%$ 。按含 CO_2 的高低可分为:①相对较高 CO_2 含量天然气,其 CO_2 的含量分布在 $5\% \sim 32.3\%$ 之间,其中大部分分布在 $5\% \sim 15\%$ 之间;②低 CO_2 含量天然气,其 CO_2 的含量分布在 $0.01\% \sim 4.2\%$ 之间,其中大部分分布在 $0.01\% \sim 1.0\%$ 之间(图 3)。

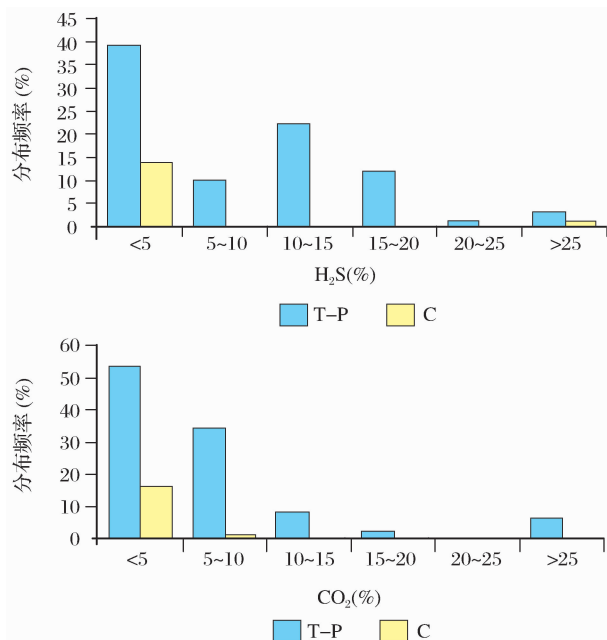


图 3 川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气 H_2S 和 CO_2 含量分布特征

在二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气中,高含 H_2S 天然气主要产自于飞仙关组,飞仙关组鲕滩储层的天然气藏大部分 H_2S 含量在 $5\% \sim 49\%$ 之间,多数含量在 $10\% \sim 20\%$ 之间,平均为 15% ,二叠系长兴组的天然气 H_2S 含量一般较低,在 $0.01\% \sim 2.2\%$ 之间,大多数小于 1% 。与四川盆地其他层位的天然气对比表明,川东北地区三叠系飞仙关组储层的天然气 H_2S 含量最高;其次是下三叠统嘉陵江组和中三叠统雷口坡组的天然气, H_2S 含量分布范围较宽,大部分在 $1.5\% \sim 10\%$ 之间,个

别含量可达 10% 以上,而其他层位的天然气 H_2S 的含量均较低,如上三叠统和侏罗系产层的天然气 H_2S 含量都小于 0.5% ,多数气藏的天然气几乎不含 H_2S ;震旦系灯影组的天然气 H_2S 含量在 $0.6\% \sim 1.06\%$ 之间,平均为 1.18% [10]。

从川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气中 H_2S 含量与 CO_2 含量关系图(图 4)可以看出,川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气中非烃组分 H_2S 和 CO_2 含量具有明显的正相关趋势,这说明二者应具有成因联系。

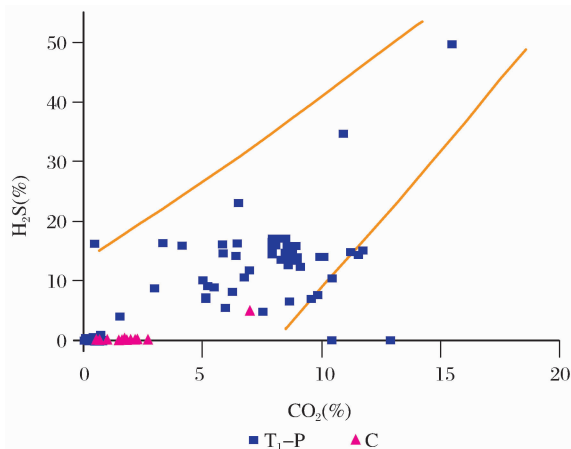


图 4 川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气 H_2S 和 CO_2 含量关系

1.3 天然气中重烃 C_6 — C_7 组分特征

在天然气中,尤其是湿气和凝析油气中含有丰富的 C_5 — C_7 重烃组分(在原油中称作轻烃组分),不同母质来源、不同热演化阶段生成的天然气,其 C_5 — C_7 组成具有明显差异。在高一过成熟天然气中,其 CH_4 的含量占绝对优势,有的甚至达到 99% 的干气中也有微量的 C_4 — C_7 重烃。

在天然气中可用来探讨天然气成因和成藏特征的重烃参数有很多,如甲基环己烷指数、庚烷值与异庚烷值、 C_7 烃($n\text{C}_7$ 、 MCC_6 、 DMCC_5)相对含量三角图、 C_5 — C_7 脂肪族烃组分相对含量三角图等,它们不仅可以反映天然气的成因类型、演化程度,用于气/气、气/源对比,还可用于判别油气成藏后是否遭受水洗、生物降解、热蚀变等的影响 [11-13]。

对川东北地区三叠系飞仙关组天然气 C_4 — C_7 重烃组分分析表明,其 C_6 — C_7 组分以正构烷烃占绝对优势,在 C_6 — C_7 的链烷烃、环烷烃和芳烃的相对组成中链烷烃占明显优势,其中链烷烃占 73.3% ,环烷烃占 18.5% ,芳烃占 8.2% ;在 C_7 组成中,正庚

烷为 66.5%，甲基环己烷为 26.2%，各种二甲基环戊烷为 7.3%^[3]。

刘光祥等^[14]对长兴组—飞仙关组的天然气 C₄—C₁₂ 重烃组分研究表明，其正构烷烃碳数分布呈前低后高的双峰形，前峰主峰碳为 nC₆，后峰主峰碳为 nC₁₀；苯系列化合物含量相对较高，以苯和甲苯占主导地位；环己烷系列、单支链烷烃也具较高的含量。石炭系产层天然气 C₄—C₁₂ 重烃组分以 C₄ 为前主峰，后峰主峰碳为 nC₁₂，正戊烷、正己烷、正庚烷、正辛烷及对应的支链烷烃、环烷烃含量均较低；苯系列、环己烷系列、单支链烷烃系列含量均较低，反映了石炭系产层天然气气源与上覆层系产层存在着差异。

另外，川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气中重烃组分中的 Mango 参数 (K₁ 值) 也存在明显差异，石炭系产层天然气 K₁ 值达 1.4 (建 28 井)，长兴组、飞仙关组的天然气 K₁ 值总体小于 1，最低为 0.7^[14]。

2 石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气组分同位素组成

2.1 烃类组分的碳同位素组成

天然气烃类组分的碳同位素组成是指示天然气成因、来源和成藏特征的重要参数之一。天然气中 CH₄ 碳同位素组成一方面与母质类型有关，同时也与演化程度密切相关，其碳同位素组成通常具有随演化程度增加而富集重同位素的趋势^[15-17]；而 C₂H₆ 碳同位素组成主要受母质类型的影响，因此，C₂H₆ 碳同位素组成是判识天然气成因类型的重要标志^[17-20]。

对川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 CH₄、C₂H₆ 的碳同位素组成对比表明，二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 CH₄、C₂H₆ 的碳同位素组成相对石炭系天然气偏重 (图 5)。二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 δ¹³C₁ 值主要分布于 -31‰~-29‰ 之间，石炭系黄龙组天然气值主要分布于 -33‰~-31‰ 之间；二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 δ¹³C₂ 值主要分布于 -33‰~-29‰ 之间，石炭系黄龙组天然气 δ¹³C₂ 值主要分布于 -35‰~-33‰ 之间。

川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气的碳同位素组成 δ¹³C₂—

δ¹³C₁ 值也存在明显差异。石炭系黄龙组天然气中 CH₄ 和 C₂H₆ 的碳同位素差 (δ¹³C₂—δ¹³C₁) 值分布范围为 -1.0‰~-6.2‰，基本上小于 -2.0‰，表明天然气中 CH₄ 相对 C₂H₆ 更富集重碳同位素，也就是说 CH₄、C₂H₆ 碳同位素发生了明显的倒转 (图 6)。

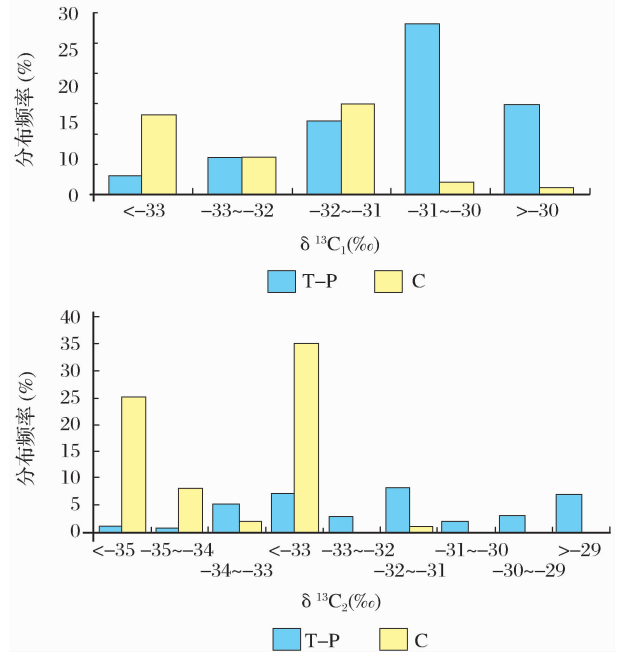


图 5 川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气 δ¹³C₁ 值和 δ¹³C₂ 值分布

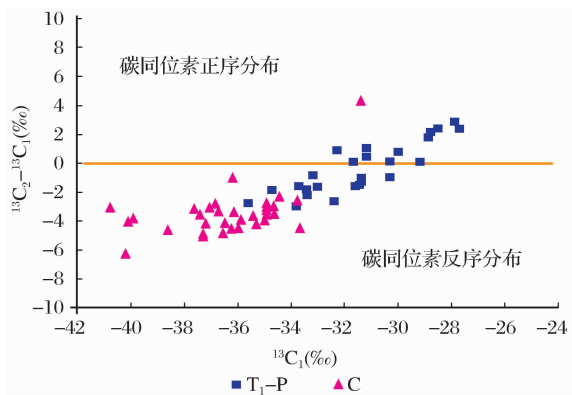


图 6 川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气 δ¹³C₁ 值与 δ¹³C₂—δ¹³C₁ 值关系

二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气中 CH₄ 和 C₂H₆ 的碳同位素差 (δ¹³C₂—δ¹³C₁) 值分布范围为 -2.9‰~5.9‰，大部分大于 0，表明多数天然气中 C₂H₆ 相对 CH₄ 更富集重碳同位素，也就是说绝大多数天然气的 CH₄、C₂H₆ 碳同位素组成具有正序分布的特征 (图 6)。

二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气中 CH₄ 的碳同位素组成 δ¹³C₁ 值与天然气的干燥系数具有明显的相关性，随着天然气干燥系数的增加天

然气 CH_4 碳同位素组成变重(图 7), 通常情况下这说明天然气的热演化程度对 CH_4 碳同位素组成具有明显的影响; 但在川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气中干燥系数较高的天然气 H_2S 含量也较高, CH_4 的碳同位素组成也明显偏重, 这也可能说明该区天然气藏中的 TSR(硫酸盐热化学还原)作用对天然气的组分和同位素组成均造成一定的影响。

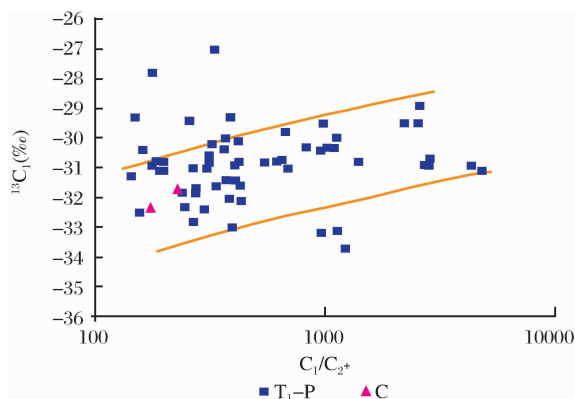


图 7 川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值与干燥系数关系

2.2 烃类组分的氢同位素组成特征

对天然气中烃类组分的氢同位素组成研究表明, 天然气中烃类组分的氢同位素组与沉积环境具有密切关系, 即随着沉积时水介质的盐度增大, 烷烃气的氢同位素组成变重; 其次是成熟度的影响, 即随有机质热演化程度的增高, 烷烃气有富集重氢同位素 D 的趋势。

Schoell M^[21] 对不同成因类型天然气的烷氢同位素组成进行研究发现, 由海相源岩生成的天然气比陆相源岩生成的天然气明显地富集重同位素, 陆相淡水环境生成的热成因 CH_4 的氢同位素组成小于 -190‰ , 海相环境生成的 CH_4 的氢同位素组成大于 -190‰ ; 同时热成因天然气中氢同位素组成随源岩热演化程度的增加变重。沈平^[22]、陈践发等^[20] 依据对我国主要沉积盆地天然气研究认为由湖泊、沼泽相的淡水—微咸水环境的源岩生成的天然气 $\delta\text{D}_1 < -200\text{‰}$, 海相、海陆交互相及半咸水环境的源岩生成的天然气 $\delta\text{D}_1 > -190\text{‰}$ 。Santos Neto 等^[23] 认为 $\delta\text{D}_1 > -190\text{‰}$ 为海相水体环境, $\delta\text{D}_1 < -190\text{‰}$ 为陆相水体环境。戴金星^[24] 研究表明, 热解成因烷烃气的 δD 值随烷烃气分子中碳数增加而呈增大趋势。

对川东北地区普光气田二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气氢同位素分析表明, 其 δD_1 值介于

$-128\text{‰} \sim -111\text{‰}$ 之间, 平均值为 -118‰ , 所有样品 δD_1 值均大于 -190‰ , 指示其源岩应以海相腐泥型为主。谢增业等^[3] 对川东北地区飞仙关组高含 H_2S 和低含 H_2S 天然气对比研究表明二者的 CH_4 、 C_2H_6 的氢同位素组成基本相似, 其 δD_1 值和 δD_2 值分别分布于 $-122\text{‰} \sim -116\text{‰}$ 之间和 $-126\text{‰} \sim -111\text{‰}$ 之间。

图 8 为普光气田二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值和 δD_1 值关系图, 从图中可知普光气藏二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气均分布于热解成因的海相烃源岩 (TT. (m)) 范畴, 指示这些天然气应来自高过成熟 ($R_o > 4.0\%$) 的海相腐泥型源岩。

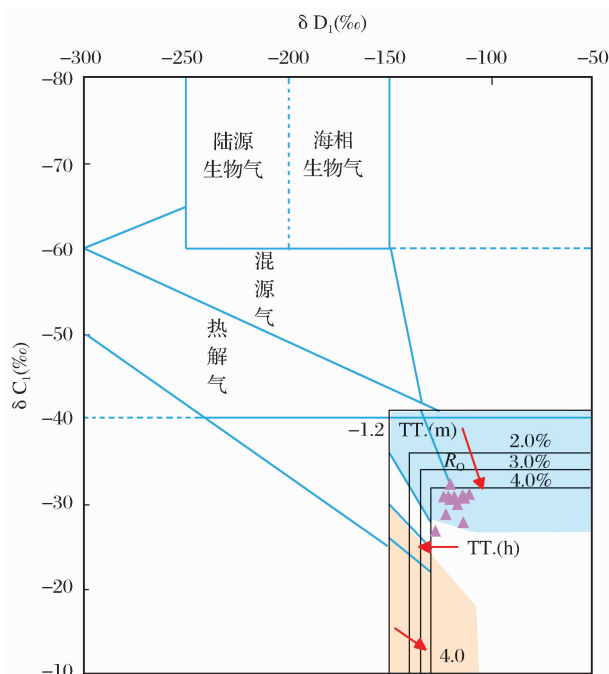


图 8 川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值与 δD_1 值关系

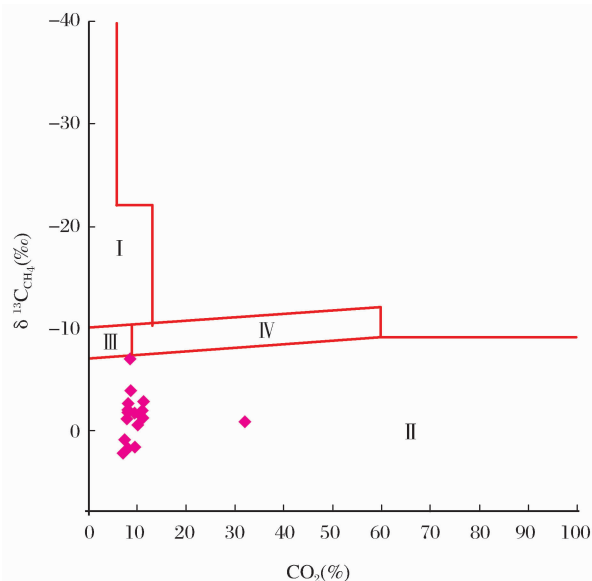
TT. (m) 海相腐泥型有机质; TT. (h) 陆相腐殖型有机质

2.3 CO_2 同位素组成

对含油气盆地 CO_2 碳同位素组成及成因近年来国内外许多学者开展了大量的研究工作, 取得了一系列的认识^[24-30]。综合前人研究成果, CO_2 可划分为有机和无机成因 2 种类型, 其中有机成因 CO_2 主要包括有机质经微生物降解、热降解、热裂解或被氧化所产生的 CO_2 , 无机成因又可分为地幔—岩浆成因和岩石化学成因 2 类, 其中地幔—岩浆成因 CO_2 又可进一步分为上地幔岩浆脱气和 中下地壳或消减带上地幔楔形体中的岩石熔融脱气。岩石化学成因包括碳酸盐岩热分解成因和岩石中的碳酸盐

岩矿物的热分解成因 2 种。利用同位素组成可较好地划分 CO_2 成因类型,有机成因的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} < -10\text{‰}$,主要为 $-30\text{‰} \sim -10\text{‰}$;无机成因的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} > -8\text{‰}$,主要为 $-8\text{‰} \sim +3\text{‰}$ 。无机成因 CO_2 中,由碳酸盐岩热变质形成的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近于碳酸岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,为 $-3\text{‰} \sim +3\text{‰}$;火山—岩浆成因和幔源 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大多介于 $-8\text{‰} \sim -4\text{‰}$ 之间。

如前所述川东北地区天然气的 CO_2 含量均不高,一般小于 20%,该区石炭系黄龙组天然气中 CO_2 含量均较低($<5\%$),基本上未进行 CO_2 的碳同位素分析;长兴组—飞仙关组天然气藏的 CO_2 碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-22.3\text{‰} \sim 2.4\text{‰}$,其中大部分相对偏重(重于 -8‰)。根据 CO_2 鉴别图(图 9)可知 CO_2 基本分布于无机成因的范畴。



I 有机成因二氧化碳区 II 无机成因二氧化碳区
III 有机、无机成因二氧化碳区 IV 有机、无机成因二氧化碳混合区

图 9 川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组
天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与 CO_2 含量关系

与大多数低含 CO_2 的天然气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值($-10\text{‰} \sim -25\text{‰}$)相比,川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气中的 CO_2 碳同位素明显偏重。通过对 CO_2 碳同位素组成与 H_2S 的含量比较发现,川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气中的 CO_2 的碳同位素组成与 H_2S 的含量具有明显的正相关关系,天然气中 H_2S 含量高其对应 CO_2 的碳同位素相对较重,而 H_2S 含量低的样品中相对较轻(图 10),从前面讨论的天然气的非烃组分特征可知(图 4)随着 H_2S 含量的增加, CO_2 的含量也呈增加趋势,二者具有正相关的关系。这可能说明气藏中的 CO_2 与 TSR 作用有联系。

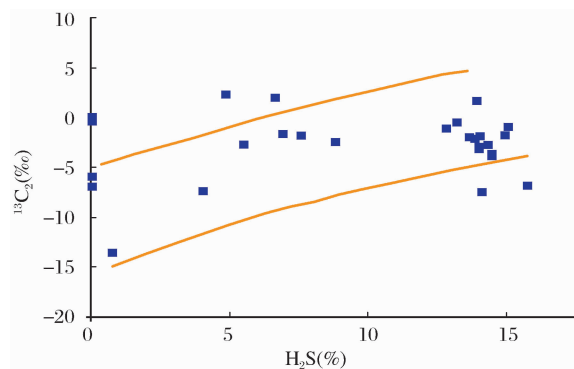


图 10 川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组
天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与 H_2S 含量关系

3 主要认识和结论

(1) 川东北地区石炭系黄龙组与二叠系长兴组—三叠系飞仙关组气藏的天然气总体均为高过成熟的干气, C_2+ 含量普遍较低,由于 TSR 作用使得二叠系长兴组—三叠系飞仙关组气藏的天然气相对石炭系黄龙组的天然气更加偏干。

(2) 川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气以高含 H_2S 和 CO_2 为特点,其中 H_2S 的含量分布范围为 $0.01\% \sim 62.2\%$,大部分分布在 $10\% \sim 20\%$ 之间。川东北地区石炭系天然气中 H_2S 的含量相对明显偏低,其分布范围为 $0.01\% \sim 4.8\%$,绝大部分天然气的 H_2S 的含量在 0.5% 以下。

(3) 川东北地区二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 CH_4 、 C_2H_6 的碳同位素组成相对石炭系黄龙组天然气偏重。二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值主要分布于 $-31\text{‰} \sim -29\text{‰}$ 之间,石炭系天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值主要分布于 $-33\text{‰} \sim -31\text{‰}$ 之间;二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值主要分布于 $-33\text{‰} \sim -29\text{‰}$ 之间,石炭系天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值主要分布于 $-35\text{‰} \sim -33\text{‰}$ 之间。

(4) 二叠系长兴组—三叠系飞仙关组的天然气 CH_4 、 C_2H_6 的碳同位素组成大部分为正序分布,而石炭系黄龙组的天然气 CH_4 、 C_2H_6 的碳同位素组成基本均为反序分布。

参考文献:

- [1] 沈平,赵佐安,曾云贤,等. 川东北部飞仙关组鲕滩气藏的发现及气藏特征[J]. 西南石油大学学报,2007,29(1):1-4.
- [2] 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讨论[J]. 沉积学报,2002,20(2):349-353.
- [3] 谢增业,李剑,胡国艺,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):567-573.
- [4] 赵文智,汪泽成,王一刚. 四川盆地东北部飞仙关组高效气藏

- 形成机理[J]. 地质论评, 2006, 52(5): 708-718.
- [5] 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 858-865.
- [6] 王兰生, 陈盛吉, 杨家静. 川东石炭系碳酸盐岩气藏地球化学特征[J]. 海相油气地质, 2000, 5(1-2): 133-144.
- [7] 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_2S 成因研究[J]. 地球化学, 2002, 31(6): 517-524.
- [8] 朱光有, 张水昌, 梁英波. 川东北地区飞仙关组高含 H_2S 天然气 TSR 成因的同位素证据[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(11): 1037-1046.
- [9] 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, 2007, 92(5): 611-637.
- [10] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地高含 H_2S 天然气的分布与 TSR 成因证据[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1208-1218.
- [11] 王廷栋. 根据油(凝析油)中 C_4-C_7 轻烃特征和天然气碳同位素组成共同判断气源[J]. 西南石油学院学报, 1989, 11(1): 1-6.
- [12] 廖永胜. 天然气成因类型及气源岩对比[M]//林王子. 轻烃技术在天然气勘探中的应用. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 144-154.
- [13] 王顺玉, 明巧, 贺祖义, 等. 四川盆地天然气 C_4-C_7 烃类指纹变化特征研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 11-14.
- [14] 刘光祥, 蒋贵勇, 潘文蕾, 等. 干气中浓缩轻烃分析及应用——以川东北、川东区天然气气/源对比研究为例[J]. 石油实验地质, 2003, 25: 586-589.
- [15] 戴金星, 戚厚发, 郝石生. 天然气地质学概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 30-71.
- [16] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(2-3): 1-40.
- [17] 徐永昌. 天然气成因理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [18] 戴金星, 宋岩. 煤成油的若干有机球化学特征[J]. 石油勘探与开发, 1987, (5): 38-44.
- [19] 张士亚, 周瑾. 我国天然气的成因分类[M]//石油与天然气地质文集. 北京: 地质出版社, 1994.
- [20] 陈践发, 李春国, 沈平, 等. 煤型气烃类组分的稳定碳、氢同位素组成研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(2): 59-69.
- [21] Schoell M. Multiple, origin of methane in the earth[J]. Chemical Geology, 1988, 1(3): 1-10.
- [22] 沈平. 轻烃中碳、氢同位素组成特征[J]. 中国科学: B 辑, 1993, 23(11): 1216-1225.
- [23] Santos Neto E V, Hayes J M. Use of hydrogen and carbon stable isotopes characterizing oils from the Potiguar basin (on-shore), northeastern Brazil [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(3): 496-518.
- [24] 戴金星, 宋岩, 戴春森, 等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [25] Wycherley H, Fleet A, Shaw H. Some observations on the origins of large volumes of carbon dioxide accumulations in sedimentary basins [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(6): 489-494.
- [26] 朱岳年. 二氧化碳地质研究的意义及全球高含二氧化碳天然气的分布特点[J]. 地球科学进展, 1994, 12(1): 26-31.
- [27] 杜建国. 中国天然气中高浓度二氧化碳的成因[J]. 天然气地球科学, 1991, 2(5): 203-208.
- [28] 陶士振, 刘德良, 杨晓勇, 等. 无机成因二氧化碳气的类型分布和成藏控制条件[J]. 中国区域地质, 1999, 18(2): 218-222.
- [29] 郭占谦, 王连生, 刘立, 等. 大庆长垣伴生气中二氧化碳的成因研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 48-50, 54.
- [30] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 中国东部及近海陆架盆地 CO_2 成因及运聚规律与控制因素研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 42-47.

Comparison of Geochemical Characteristics of Carboniferous and Permian-Triassic Natural Gas in Northeast Shichuan

CHEN Jian-fa, TANG You-jun, XU Li-heng, LI Ling, MA Guang-yu, ZHAO Xing-qi

(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: This paper studies the geochemical characteristics of natural gas in Carboniferous Huanglong Formation and Permian Chanxing Formation-Triassic Feixianguang Formation in the area of Northeast Sichuan. The results show that the natural gas belongs to high-mature dry gas, C_2^+ content is low, and the natural gas in Permian Chanxing Formation-Triassic Feixianguang Formation is drier than that in Carboniferous Huanglong Formation. The content of non-hydrocarbon gas of Permian Chanxing Formation-Triassic Feixianguang Formation is relatively high ranging 0.1%~77.8% and characterized by high H_2S and CO_2 contents, but the non-hydrocarbon gas of Carboniferous Huanglong Formation is relatively low and the H_2S content is 0.01%~4.8%, most below 0.5%. The distributing characteristics of heavy hydrocarbons (C_4-C_{12}) are also obviously different. The carbon stable isotope compositions of CH_4 and C_2H_6 in Permian Chanxing Formation-Triassic Feixianguang Formation are heavier than in Carboniferous Huanglong Formation, and they are distributed positively in Permian Chanxing Formation-Triassic Feixianguang Formation and reversely in Carboniferous Huanglong Formation.

Key words: Geochemical characteristic; Non-hydrocarbon gas; Heavy hydrocarbon; CH_4 and C_2H_6 ; Carbon isotope composition.