

文章编号:1001-6112(2012)01-0071-07

鄂尔多斯盆地东部上古生界 不同含气组合天然气地球化学特征

李艳霞¹, 赵靖舟¹, 刘新社², 席胜利², 魏新善²

(1. 西安石油大学 油气资源学院, 非常规天然气研究中心, 西安 710065;

2. 中国石油 长庆油田 勘探开发研究院, 西安 710021)

摘要:通过对鄂尔多斯盆地东部上古生界 110 个天然气样品组分及碳同位素的分析, 认为下部含气组合本溪组、太原组及山西组气藏以干气为主, 具有甲烷含量高、重烃低、干燥系数大、非烃略高的特点; 中部含气组合盒 8 气藏以湿气为主, 干气为辅, 干燥系数具有 2 个主峰(0.93~0.94, 0.98~0.99), 重烃含量较高, 非烃含量低; 上部含气组合千 5 气藏天然气甲烷含量最高, 重烃含量略低, 干燥系数为 0.96~0.99, 非烃含量最低。不同含气组合中甲烷碳同位素值比较重, 乙烷、丙烷碳同位素具有典型的煤成气的特点。烃源岩干酪根碳同位素、烃源岩及盖层中脱附烃组分均表明, 气源岩具有典型的煤系烃源岩的特征, 不同含气组合中的天然气来自下伏煤系气源岩。

关键词:天然气; 碳同位素; 气源对比; 上古生界; 鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1⁺13

文献标识码:A

Geochemical characteristics of natural gas of different gas-bearing assemblages in Upper Paleozoic, eastern Ordos Basin

Li Yanxia¹, Zhao Jinzhou¹, Liu Xinshe², Xi Shengli², Wei Xinshan²

(1. Research Center of Unconventional Gas, School of Oil-Gas Resources, Petroleum University of Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: Based on gas molecular and stable carbon isotope analyses of 110 gas samples collected from the Upper Paleozoic in the eastern Ordos Basin, it has been concluded that the lower gas-bearing assemblages such as the Benxi, Taiyuan and Shanxi Formations mainly contain dry gas characterized by high methane content, low C₂₊ alkanes content, high dryness and relatively high non-hydrocarbon content. The He8 gas pools of the middle gas-bearing assemblages mainly contain wet gas characterized by 2 peaks for dryness (0.93-0.94, 0.98-0.99) as well as high C₂₊ alkanes content and low non-hydrocarbon content. The Qian5 gas pools of the upper gas-bearing assemblages are characterized by the highest methane content, relatively lower C₂₊ alkanes content, the lowest non-hydrocarbon content and the dryness ranges from 0.96 to 0.99. Carbon isotope values of methane are heavy among different gas-bearing assemblages and those of ethane and propane are in accordance with typical coal gas. Carbon isotopes of kerogen, desorption hydrocarbons of source rocks and cap rocks indicate that the source rocks have the characteristics of typical coal source rocks. Natural gas of different gas-bearing assemblages generates from underlying humic sources.

Key words: natural gas; carbon isotope; correlation of gas and source rock; Upper Paleozoic; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地上古生界自 20 世纪 50 年代勘探以来, 在多个地区及层系发现了天然气, 从 90 年代中期开始, 相继在榆林、乌审旗、苏里格庙和镇川堡、杭锦旗及塔巴庙等地区取得突破^[1-4]。随着天然气勘探的不断深入, 许多新的地质问题也不断出

现, 如上古生界气层在区域和层系上的分布差异问题; 平面上, 从天环地区向东部地区, 气层层位增多, 并有向浅部层位延伸的趋势。在盆地东部上古生界, 从本溪组、太原组、山西组、石盒子组到石千峰组基本上都有气层发现, 多个气藏在平面上复合

收稿日期: 2010-12-24; 修订日期: 2011-11-21。

作者简介: 李艳霞(1967—), 女, 博士, 副教授, 从事油气地球化学及石油天然气成藏地质学研究。E-mail: lyx4164@xsyu.edu.cn。

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2007D05)。

形成了榆林山2、子洲山2、米脂盒8及神木千5等大中型气田^[5-6],各气田均具有多层系复合含气特点,气藏均属岩性圈闭,规模大小不一。根据气藏岩性圈闭与烃源岩的关系,将上古生界划分出3个不同类型的含气组合^[7],即:下部含气组合(本溪组—山2段)、中部含气组合(山1段—盒5段)和上部含气组合(盒4段—千5段)。本文就不同含气组合天然气的地球化学特征及气源加以讨论。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地东部位于伊陕斜坡,范围北起乌拉庙—常家沟一线以南,南至老君殿—薛家峁一线以北,西临横山,东达吴堡—佳县—万镇,面积达 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,区内包括榆林气田、子洲气田、米脂气田、神木气田(图1)等上古生界气田。研究区上古生界为石炭系和二叠系。上石炭统本溪组,该组与下奥陶统平行不整合接触,底以铁铝岩之底为界,主要为灰黑色泥岩与砂岩互层,夹灰色泥晶灰岩。

下二叠统包括太原组和山西组。太原组上部岩性为深灰色灰岩夹黑色泥岩,下部为灰黑色泥岩夹灰色细砂岩,中部夹厚煤层,为海相和海陆过渡相沉积,地层由东向西逐渐减薄。

山西组自下而上分为山2段和山1段。山2段为中厚层灰黑色泥岩夹灰白色中、细粒砂岩及薄煤层;山1段为中厚层浅灰色泥岩夹灰白色粗、中、细粒砂岩。

中二叠统包括下及上石盒子组;下石盒子组为

浅灰色细砂岩、灰白色中砂岩、含砾粗砂岩夹浅灰色泥岩,进一步从下向上分为盒8、盒7、盒6、盒5段;上石盒子组为厚层棕褐色、暗棕色泥岩夹浅灰色细砂岩。

上二叠统包括石千峰组,底部为砂岩,下部为厚层棕红色泥岩夹浅灰色细砂岩,上部为厚层棕红色泥岩夹浅肉红色细砂岩,进一步自下向上细分为千5、千4、千3、千2、千1段。

其中本溪组、太原组和山西组中发育的海陆过渡相的含碳质泥岩、煤层为主要的烃源岩,山西组(山2段)、下石盒子组(盒8段)为主要的储层,部分地区发育太原组及石千峰组(千5段)储层。

2 天然气组分特征

天然气组分可分为烃类气体与非烃气体2类。烃类气体主要指甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、异丁烷、正戊烷及异戊烷等重烃气,非烃气体常见的有 CO_2 、 N_2 、 H_2 、 H_2S 、He及Ar等稀有气体。

2.1 烷烃含量

通过对取自研究区上古生界气藏及含气层110个天然气组分的气相色谱分析资料,认为下部含气组合中本溪组、太原组甲烷含量高,气藏较干,其次是山西组山2₃气藏也较干,以干气为主,湿气少量出现。

本溪组气藏中甲烷含量在94.7%~97.2%(图2a),均值为96.2%(5个样),主频分布在97%~98%,干燥系数($C_1/\sum C_{1+}$)比较大,分布在0.98~1.0,均值为0.99,干燥系数大于0.95(图2b),气藏为干气,干燥系数有随深度增大而变大的趋势;重烃含量最低,分布范围在0.08%~4.16%,均值为1.06%,主频范围为1%~2%(图2c)。

太原组气藏甲烷含量在92.2%~98.8%,均值为96.04%(18个样),主频为95%~96%;干燥系数在0.94~1.0,均值为0.98,说明该气藏演化程度也较高;重烃含量比本溪组高,分布在0.06%~5.20%,均值为1.61%,主频为1%~2%。

山西组(山2)是下部含气组合中最重要的一套含气层,尤其是山2₃构成了榆林气藏和子洲气藏的主体含气层,也是整个鄂尔多斯盆地东部最主要的一套含气层。山2气藏中甲烷含量分布在92.18%~98.96%,均值为95.45%(51个样),主频为95%~96%,干燥系数变化较大,在0.93~0.99,主峰为0.96~0.7;重烃含量比太原组高,分布范围大,在0.34%~6.23%,均值为2.79%,主频为3%~4%,大多数样品重烃含量小于5%。

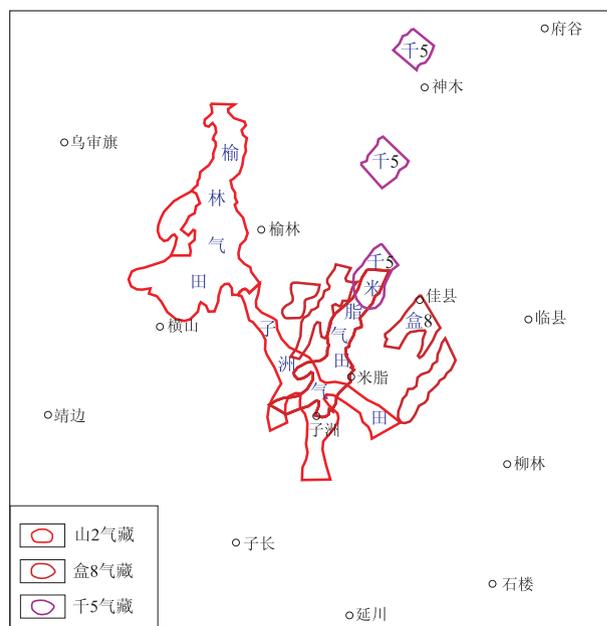


图1 研究区位置及气田的分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of gas fields

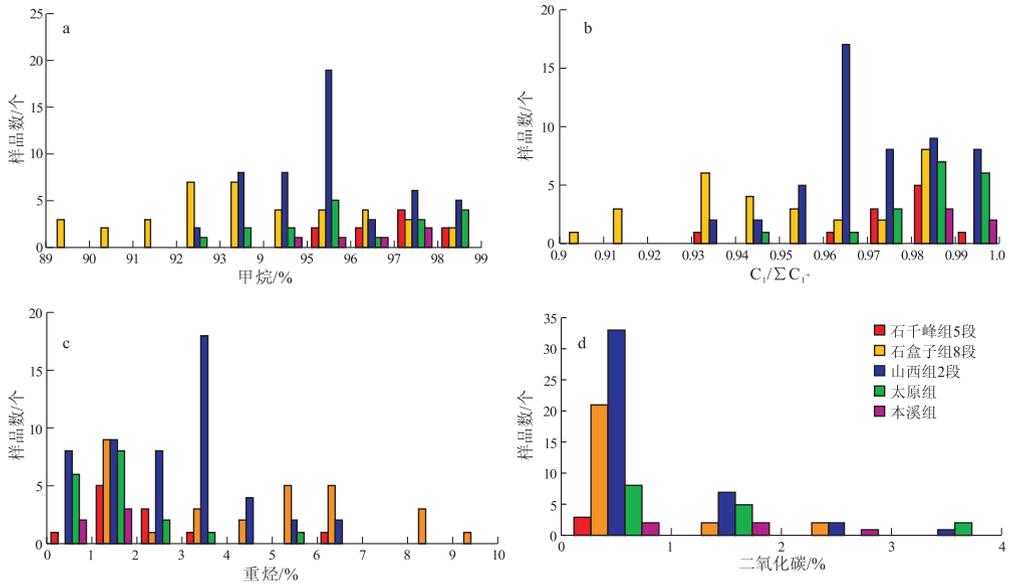


图 2 鄂尔多斯盆地东部不同含气层系天然气组分频率分布

Fig. 2 Frequency histogram of gas composition for different gas-bearing assemblages in eastern Ordos Basin

组分特征反映山 2 气藏以干气为主,湿气为辅。

中部含气组合下石盒子组(盒 8—盒 5)也是主要的含气层段,其中盒 8 是气藏的主要产层,甲烷含量比下部山 2 气藏略低,展布范围宽,分布在 89.85% ~ 98.05% (图 2a),均值为 94.20% (29 个样),主频有 2 个,分别为 92% ~ 94%, 96% ~ 97%,部分气藏以干气为主,另一部分以湿气为辅,干燥系数变化略大,在 0.91 ~ 1.0 (图 2b),主峰范围为 0.93 ~ 0.94, 0.98 ~ 0.99;重烃含量分布范围较山 2 宽,主要在 0.92% ~ 9.39%,均值为 4.44%,主峰为 1% ~ 2%, 5% ~ 7% (图 2c),大多数样品重烃含量小于 5%。气藏以湿气为主,干气为辅。

石千峰组含气层作为上部含气组合最高的一个层系,气藏主要集中在研究区的最东部(图 1)。千五段气层甲烷含量在 95.32% ~ 98.71% (图 2a),均值为 97.16% (10 个样),个别样品甲烷含量也较低,在 87% ~ 91% 之间,甲烷含量大于 95% 样品,占整个样品的 85%,干燥系数也较大,分布在 0.96 ~ 1.0 (图 2b);重烃含量较低,除个别样品(盟 5 井)重烃为 6.68% 较重外,其它多数样品分布在 0.69% ~ 3.5% (图 2c),均值为 2.03%,主峰为 1% ~ 2%。石千峰组气藏基本为干气。

2.2 非烃含量

东部不同含气组合中非烃气体主要为 CO₂ 和 N₂,含量在 1% ~ 7% 之间变化,下部组合中本溪组和太原组,含量较低,其中本溪组非烃分布在 1.73% ~ 4.04% (图 2d),均值为 2.71% (5 个样);太原组非烃分布在 0.017% ~ 4.87%,均值为

1.96% (18 个样),非烃含量比本溪组略低。

本溪组和太原组气藏中,CO₂ 含量较高,其中本溪组 CO₂ 的分布范围为 0.15% ~ 2.11%,均值为 1.17%;太原组 CO₂ 为 0.08% ~ 3.85%,均值为 1.31%,CO₂ 含量比本溪组略高。本溪组 N₂ 含量最高,分布范围为 0.40% ~ 3.89%,均值为 1.86%,比较高,一般认为 N₂ 是高成熟阶段的产物;太原组 N₂ 为 0.02% ~ 3.45%,均值为 1.15%,N₂ 含量比本溪组低。山 2 气藏中非烃含量变化大,分布范围为 0.05% ~ 5.81%,均值为 1.72% (51 个样),90% 样品非烃含量小于 4%;CO₂ 较低,比本溪组和太原组气藏中的 CO₂ 含量范围宽,分布范围为 0.07% ~ 3.12%,均值为 0.9%;N₂ 含量略高,比太原组的 N₂ 高。

中部含气组合中盒 8 气藏中非烃含量变化不大,与山 2 气藏范围相似,非烃的分布在 0.186% ~ 4.94% (图 2d),均值为 1.305% (29 个样),93.5% 样品非烃含量小于 4%,少数大于 5%;CO₂ 含量较低,分布范围为 0.03% ~ 2.2%,均值为 0.63%,其含量比山 2 低;N₂ 含量较低,均值为 0.99%。

上部含气组合石千峰组含气层中非烃含量较低,为 0.14% ~ 1.42%,均值为 0.47% (图 2d),多数样品非烃含量小于 1%,少数在 1% ~ 2% 之间。千 5 气藏中 CO₂ 含量最低,分布范围为 0.34% ~ 0.74%,均值为 0.56%;N₂ 含量最低,分布范围为 0.03% ~ 0.62%,均值为 0.19%。

3 烷烃气系列碳同位素

烷烃气系列碳同位素是指天然气中甲、乙、丙、

丁烷碳同位素组成的关系。随碳数增加,不同类型的天然气,其烷烃气系列碳同位素组成具有不同特征,煤成气的烷烃系列碳同位素较重,而油型气的烷烃系列碳同位素较轻,混合气处于二者之间。应当指出的是,尽管煤成气母质类型都属腐殖型母质,但显微组分组成不同、演化程度不同,再加上不同的成藏机制,天然气碳同位素特征也会有一定差异。

3.1 烷烃气体碳同位素

3.1.1 甲烷碳同位素($\delta^{13}C_1$)

一般甲烷 $\delta^{13}C_1$ 在 $-43\text{‰} \sim -10\text{‰}$ 都属于煤成气的范围^[8-10]。太原组气藏的 $\delta^{13}C_1$ 值为 $-36.10\text{‰} \sim -31.04\text{‰}$,频率主峰组值(包括主峰和其紧邻的次主峰)为 $-33\text{‰} \sim -31\text{‰}$, $-37\text{‰} \sim -36\text{‰}$ (图 3a)。山 2 气藏中的 $\delta^{13}C_1$ 值为 $-33.05\text{‰} \sim -26.53\text{‰}$,主峰组值为 $-33\text{‰} \sim -32\text{‰}$, $\delta^{13}C_1$ 的主峰值较下部太原组轻。盒 8 气藏的 $\delta^{13}C_1$ 值为 $-35.05\text{‰} \sim -28.05\text{‰}$,主峰组值为 $-35\text{‰} \sim -34\text{‰}$, $\delta^{13}C_1$ 主峰值较下部山 2 气藏轻, $\delta^{13}C_1$ 值分布范围较下部山 2 气藏宽。千 5 气藏的 $\delta^{13}C_1$ 值为 $-36.16\text{‰} \sim -38.89\text{‰}$,主峰组值为 $-37\text{‰} \sim -36\text{‰}$, $\delta^{13}C_1$ 值分布范围最轻。

不同含气组合中甲烷碳同位素比较重,具有煤成气的特点。随成熟度增高,煤成气的 $\delta^{13}C$ 值增重。这是由于腐殖型母质中的 $^{12}C-^{12}C$ 键能比 $^{13}C-^{13}C$ 键能小,其在成熟度低的低温阶段成气,首先并主要是 ^{12}C 易从成气母质中分离出来,参与形成煤成气,因此,低成熟度阶段形成的煤成气 $\delta^{13}C$ 值就较轻。随着成熟度增大,作用于成气母质的热

能也日益增大,于是从成气母质分离出来的键能较大的 ^{13}C 逐渐增多,由其形成的煤成气所含 ^{13}C 随之增加,故其 $\delta^{13}C$ 值增重。

3.1.2 乙烷碳同位素($\delta^{13}C_2$)

不同含气组合中乙烷碳同位素比较重,太原组气藏的 $\delta^{13}C_2$ 值分布域为 $-31.37\text{‰} \sim -20.08\text{‰}$,展布范围最宽,主峰组值为 $-21\text{‰} \sim -20\text{‰}$ (图 3b),根据戴金星^[9-10]认为 $\delta^{13}C_2$ 大于 -27.5‰ 或王世谦^[11]认为 $\delta^{13}C_2$ 大于 -29.0‰ 的天然气是煤成气,太原组中 $\delta^{13}C_2$ 多数样品都大于 -27‰ ,说明太原组气藏中大多数井区聚集的为煤成气,但有少量井如榆 8 (-34.30‰)、榆 15 (-31.37‰) 和府 5 井 (-29.82‰) 太原组的样品中 $\delta^{13}C_2$ 值小于 -27‰ (-29.0‰),有油型气的混入,主要是太原组内部泥灰岩生成的原油裂解气。

山 2 气藏的 $\delta^{13}C_2$ 值为 $-32.39\text{‰} \sim -21.04\text{‰}$,主峰值有 2 个范围, $-26\text{‰} \sim -21\text{‰}$ 及 $-31\text{‰} \sim -30\text{‰}$,山 2 气藏大多数聚集的为煤成气,在子洲气藏的南部有少量井山 2 气藏的样品中 $\delta^{13}C_2$ 值小于 -27‰ ,有油型气的混入,主要也是太原组内部泥灰岩生成的油裂解气向上运移的结果。

盒 8 气藏的 $\delta^{13}C_2$ 值为 $-26.33\text{‰} \sim -21.86\text{‰}$,主峰组值为 $-24\text{‰} \sim -23\text{‰}$,次峰为 $-25\text{‰} \sim -24\text{‰}$, $\delta^{13}C_2$ 值基本大于 -29‰ ,均为煤成气,盒 8 气藏的 $\delta^{13}C_2$ 范围比山 2 窄,但分布范围集中。

千 5 气藏的 $\delta^{13}C_2$ 值为 $-28.08\text{‰} \sim -24.72\text{‰}$,主峰组值为 $-29\text{‰} \sim -27\text{‰}$,气藏内均为煤成气,天然气经过运移分馏,变得比较轻。

3.1.3 丙烷碳同位素($\delta^{13}C_3$)

不同含气组合中丙烷碳同位素比较重,太原组的 $\delta^{13}C_3$ 数值分布域为 $-34.30\text{‰} \sim -17.47\text{‰}$,展布范围最宽,频率主峰组值为 $-21\text{‰} \sim -20\text{‰}$ (图 3c)。太原组中多数样品 $\delta^{13}C_3$ 都大于 -27‰ (-29.0‰)^[7,8-10],说明太原组大多数井区聚集的为煤成气,但有少量井如榆 8 (-34.30‰)、榆 15 (-31.37‰) 和府 5 井 (-29.82‰) 太原组的样品中 $\delta^{13}C_3$ 值小于 -27‰ (-29.0‰),说明有油型气的混入。

山 2 气藏的 $\delta^{13}C_3$ 值为 $-21.04\text{‰} \sim -32.39\text{‰}$,分布范围比太原组小,主峰值为 $-26\text{‰} \sim -21\text{‰}$,山 2 中多数样品 $\delta^{13}C_3$ 都大于 -25.5‰ (-27.0‰),说明山 2 气藏大多数聚集的为煤成气。同样, $\delta^{13}C_3$ 值也揭示出在子洲气藏的南部的井如榆 86 (-30.63‰)、榆 82 (-32.39‰) 有油型气的混入。

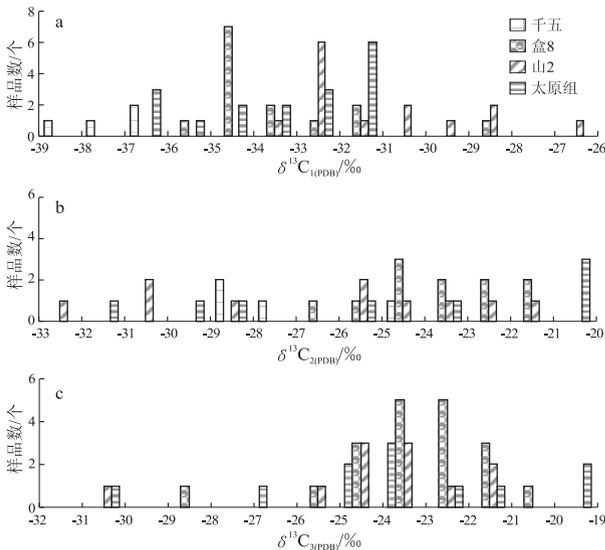


图 3 鄂尔多斯盆地东部不同含气层系中烷烃气碳同位素频率分布

Fig. 3 Frequency histogram of alkane carbon isotopes for different gas-bearing assemblages in eastern Ordos Basin

盒 8—盒 6 气藏的 $\delta^{13}C_3$ 值为 $-26.33\% \sim -21.86\%$, 主峰组值为 $-24\% \sim -23\%$, 次峰为 $-26\% \sim -24\%$, 基本上为煤成气。千 5 气藏的 $\delta^{13}C_3$ 值为 $-28.08\% \sim -23.08\%$, 主峰组值为 $-25\% \sim -23\%$, 为煤成气, 天然气经过运移分馏, 变得比较轻。

3.2 烷烃气碳同位素连线类型及倒转

不同含气组合的天然气烷烃气 $\delta^{13}C$ 值呈趋势基本一致的连线束, 但其间也有差别。太原组含气层中大部分烷烃气 $\delta^{13}C$ 值连线束呈 L 型 (图 4a), 具有 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$ 的正碳同位素系列特征, 说明烷烃气是原生型有机成因气。少数样品出现 $\delta^{13}C_1$ 与 $\delta^{13}C_2$ 相近, 如榆 15 井, $\delta^{13}C_1 = -31.24\%$, $\delta^{13}C_2 = -31.37\%$; 或者 $\delta^{13}C_1$ 与 $\delta^{13}C_2$ 相差不大 (榆 8 井)。

山 2、山 1 含气层中大多数烷烃气 $\delta^{13}C$ 值连线束呈 L 型 (图 3b), 少数样品出现 $\delta^{13}C_1$ 大于 $\delta^{13}C_2$, 即 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 = \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$, 碳同位素具有统一的倒转。子洲气田的榆 82 及榆 86 井在山 2 中存在 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2$ 的单项性碳同位素倒转 (图 3c), 说明烷烃气受到次生改造。

盒 8 含气层中烷烃气 $\delta^{13}C$ 值连线束具有非常典型的 L 型 (图 4d), 部分井也存在 $\delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$ 的单项性碳同位素倒转 (图 4e)。

千 5 含气组合中大多数烷烃气 $\delta^{13}C$ 值连线束呈 L 型, 少数样品具有 $\delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$ 的单项性碳同位素倒转特征 (图 4f)。

碳同位素倒转的原因本区主要有 2 种^[12]: ①煤成气和油型气的混合; ②同型不同源气或同源不同期气的混合。在太原组含气层中, 虽然同位素不存在单项倒转, 但有部分井 $\delta^{13}C_2 < -29\%$, 有油型气的混入, 一方面, 太原组内部就有泥灰岩的发育, 混入油型气非常正常, 在子洲气田的南部, 榆 82、榆 86 井存在油型气的混入。在下部含气组合的太原组及山 2 其它井的同位素样品中, 基本上为煤型气。山 2 中存在碳同位素的单项倒转一般为同源不同期次的煤成气的供给。同样, 在中上部含气组合中存在的同位素倒转, 基本上也是同源不同期煤成气混合的结果。

从下部的太原组、山西组到中部的下石盒子组, 最后到上部的石千峰组中, 不同程度的存在烷烃气碳同位素的倒转, 说明烷烃气受到不同程度的次生改造。

4 气源讨论

4.1 天然气组份

不同层系天然气组成以烃类气体占绝对优势。

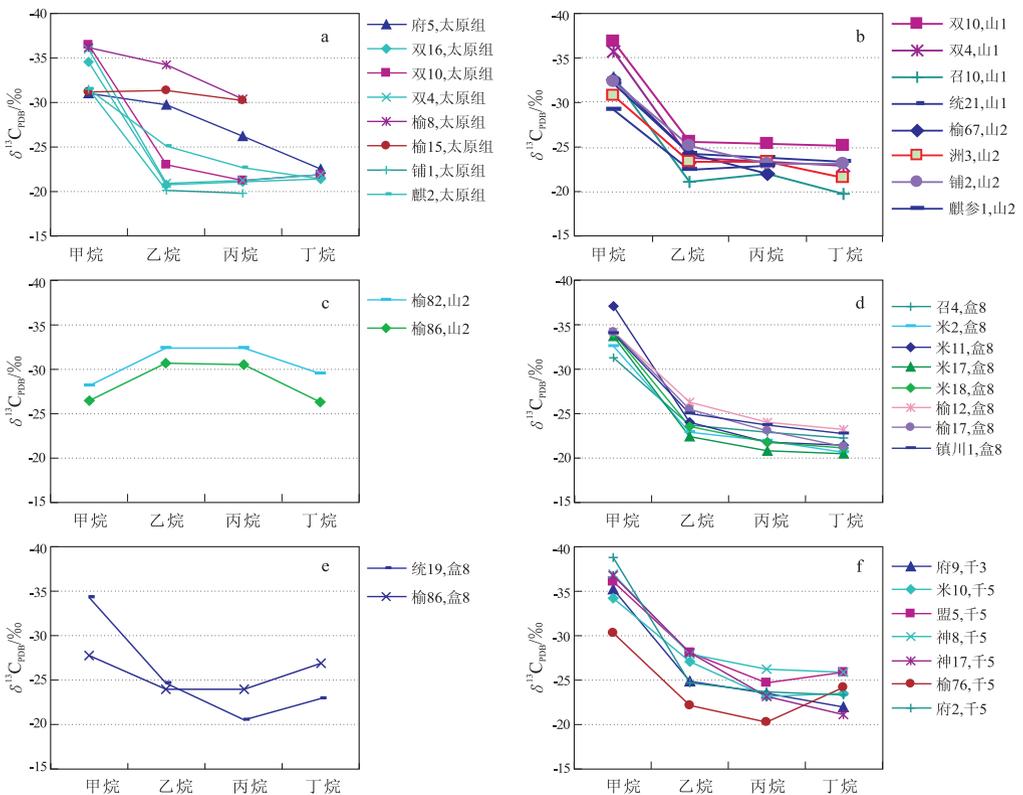


图 4 鄂尔多斯盆地东部不同层系天然气组分碳同位素连线特征

Fig. 4 Carbon isotope curves of gas composition for different gas-bearing assemblages in eastern Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地东部不同含气组合天然气组分

Table 1 Components of natural gas for different gas-bearing assemblages in eastern Ordos Basin

含气组合	甲烷/%	重烃/%	干燥系数	非烃/%	氮气/%	iC_4/nC_4
上部	95.32 ~ 98.7	0.69 ~ 3.9	0.96 ~ 0.99	0.14 ~ 1.4	0.06 ~ 0.12	0.75 ~ 3.5
	97.16(10)	2.03(10)	0.98(10)	0.47(10)	0.197(10)	1.55(10)
中部	89.85 ~ 98.05	1.06 ~ 9.39	0.90 ~ 0.99	0.186 ~ 4.94	0.04 ~ 3.89	0.29 ~ 2.0
	94.20(29)	4.44(29)	0.95(29)	1.31(29)	0.99(20)	1.11(24)
山 2 段	92.18 ~ 98.96	0.34 ~ 6.26	0.93 ~ 1.0	0.05 ~ 5.81	0.01 ~ 4.6	0.50 ~ 2.0
	95.45(51)	2.79(51)	0.97(51)	1.72(51)	1.35(34)	1.04(44)
下部 太原组	92.2 ~ 98.8	0.29 ~ 5.2	0.95 ~ 0.99	0.017 ~ 4.87	0.02 ~ 3.45	0.5 ~ 1.5
	96.04(18)	1.61(18)	0.98(18)	1.96(18)	1.15(13)	1.01(13)
本溪组	94.65 ~ 97.2	0.74 ~ 13	0.98 ~ 0.99	1.73 ~ 4.04	0.4 ~ 3.89	1.0 ~ 2.0
	96.21(5)	1.06(5)	0.99(5)	2.71(5)	1.86(5)	1.35(4)

注:表中分式意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值(样品数)}}$ 。

下部含气组合中甲烷含量很高,本溪组均值达到 96.21%,太原组为 96.04%(表 1),二者相近,山 2 段略有降低,均值为 95.45%,也比较高;中部含气组合甲烷含量比山 2 略低,均值为 94.2%;上部含气组合甲烷含量最高,均值为 97.16%。甲烷含量在最低的下部层位和最上面层位均比较高,中间层位略低,在气藏内,所有层系甲烷均为干气,或以干气为主。在总烃含量一定的前提下,甲烷与重烃的含量是此消彼长。同样下部含气层系本溪组、太原组,重烃含量低,均值为 1.06% ~ 1.61%,山 2 重烃含量均值为 2.79%;中部含气组合重烃含量比下部含气组合略重,均值为 4.44%;上部含气组合重烃含量略低,均值为 2.03%。各层系非烃类含量基本上在 0 ~ 3% 之间,下部本溪组略高,为 2.71%,上部含气层系最低为 0.47%。

不同含气层系中甲烷含量的波动大体接近,下部组合的本溪组、太原组天然气组分偏干,主要与天然气成熟度高有关;上部含气组合天然气较干,与天然气的运移有关,主要是组分的运移分馏造成;中部含气组合下石盒子组的组分以干气为主,湿气为辅。

4.2 烃源岩干酪根碳同位素及脱附轻

下部含气组合的本溪组、太原组烃源岩的干酪根 $\delta^{13}C_T$ 分布在 $-23.8‰ \sim -23.2‰$,显示为具有河、漫沼泽相 III 型腐殖型干酪根的特征。另外,在太原组中也有较轻干酪根碳同位素 ($-27.6‰$),为湖沼相 II - III 型具腐泥腐殖型的特征,与其间产出的比较轻的甲烷、乙烷碳同位素值非常一致。

中部含气组合盒 8 段暗色泥岩中的 $\delta^{13}C_T$ 在 $-23.7‰ \sim -23.1‰$,同样显示具有河、漫沼泽相 III 型腐殖型的特征,其干酪根也是煤成气的主要母质来源。

在不同含气层 $\delta^{13}C_2$ 分布对比图上可以看到(图 3b),下部含气组合中太原组及山 2 气藏中的

$\delta^{13}C_2$ 有部分值小于 $-29‰$,存在有油型气的混入,大多数样品 $\delta^{13}C_2$ 值大于 $-27.5‰$,说明下部含气组合主体以煤成气为主;中上部含气组合盒 8 和千 5 气藏中 $\delta^{13}C_2$ 分布范围大于 $-27.5‰$,为煤成气。

不同含气层中正庚烷—甲基环己烷—二甲基环戊烷的相对百分含量图显示(图 5),本溪组黑色泥岩、太原组黑色碳质泥岩等样品点落在腐殖型生气范围内。同样在上覆泥岩盖层中,山 2、山 1 及盒 8 中的三端元组分也在腐殖型气范围内,说明山 2 含气层、盒 8 含气层中的天然气主要来自下部本溪组、太原组及山西组煤系烃源岩中形成的煤成气,然后扩散到上覆盖层中,显示天然气与烃源岩及盖层具有非常好的同源性。

5 结论

东部上古生界各个含气层系具有相同的气源,

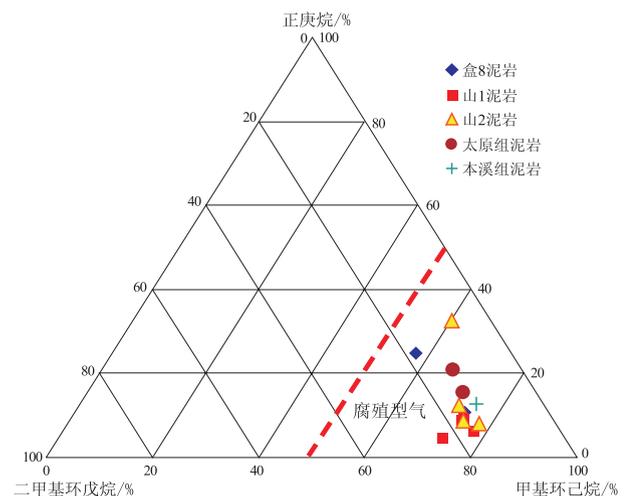


图 5 鄂尔多斯盆地东部本溪组—盒 8 泥岩热脱附轻烃的 C_7 三角图

Fig. 5 Triangle diagram of C_7 series of light fraction from thermal desorption of Benxi Formation-Xiashihezi (He8) Formation in eastern Ordos Basin

来自于本溪组和太原组及山西组的煤系烃源岩生成的煤型气,由于本溪组、太原组泥灰岩的存在,有部分油型气的生成混入下部含气组合中。下部组合的本溪组、太原组天然气组分甲烷含量高,气藏偏干,非烃总体含量较低,氮气含量略高,主要与天然气成熟度高有关;上部含气组合天然气较干,主要是组分的运移分馏造成;中部的含气组合的组分以湿气为主,干气为辅。天然气组分碳同位素比较重,多数天然气烷烃气 $\delta^{13}\text{C}$ 值连线束呈 L 型,少数样品单项性碳同位素倒转。

参考文献:

- [1] 孟军田,贾会冲. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区上古生界天然气地质特征与勘探前景[J]. 石油实验地质,2003,25(6):708-711.
- [2] 杨华,张文正,李剑锋,等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气的地球化学研究[J]. 沉积学报,2004,22(S1):39-44.
- [3] 薛会,王毅,徐波. 鄂尔多斯盆地杭锦旗探区上古生界天然气成藏机理[J]. 石油实验地质,2009,31(6):251-256.
- [4] 李贤庆,胡国艺,李剑,等. 鄂尔多斯盆地中东部上古生界天然气地球化学特征[J]. 石油天然气学报,2008,30(4):1-4.
- [5] 杨华,姬红,李振宏,等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界石千峰组低压气藏特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2004,29(4):413-419.
- [6] 张君峰,兰朝利. 鄂尔多斯盆地榆林—神木地区上古生界裂缝和断层分布及其对天然气富集区的影响[J]. 石油勘探与开发,2006,33(2):172-177.
- [7] 刘新社. 鄂尔多斯盆地东部上古生界岩性气藏形成机理[D]. 西安:西北大学,2008.
- [8] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学 B 辑,1992(2):185-193.
- [9] 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(2-3):1-40.
- [10] 戴金星. 中国煤成气研究二十年的重大进展[J]. 石油勘探与开发,1999,26(3):1-10.
- [11] 王世谦. 四川盆地侏罗系—震旦系天然气的地球化学特征[J]. 天然气工业,1994,14(6):1-5.
- [12] 戴金星,李剑,罗霞,等. 鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比[J]. 石油学报,2005,26(1):18-26.
- [8] Zhang Tongwei, Ellis G S, Wang Kangshi, et al. Effect of hydrocarbon type on thermochemical sulfate reduction[J]. Organic Geochemistry,2007,38(6):897-910.
- [9] 张建勇,刘文汇,腾格尔,等. 硫酸盐热还原作用模拟实验装置的材料选择[J]. 石油实验地质,2010,32(4):400-404.
- [10] 张建勇,刘文汇,腾格尔,等. 硫化氢形成与 C_2^+ 气态烷烃形成的同步性研究——几个模拟实验的启示[J]. 地球科学进展,2008,23(4):390-400.
- [11] 朱光有,张水昌,梁英波,等. 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.
- [12] Stahl W J, Carey B D. Source rock identification by isotope analyses of natural gases from fields in the Val Verde and Delaware basins West Texas [J]. Chem Geol,1975,16:257-267.
- [13] Schoell M. The Hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins [J]. Geochim et Cosmochim Acta,1980,44(5):649-661.
- [14] Faber E Z. Isotopengeochemical gasformiger kohlen wasserstoffe [J]. Erdgas & Koble,1987,103(5):210-218.
- [15] 戴金星,戚厚发. 我国煤成气气的 δC_1-R_o 关系 [J]. 科学通报,1989(9):690-692.
- [16] 沈平,徐永昌,王先彬,等. 气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1991:43-109.
- [17] 刘文汇,徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J]. 地球化学,1999,28(4):359-366.
- [18] 张建勇,刘文汇,腾格尔,等. 建南气田长兴组—飞仙关组天然气特征及气源分析[J]. 天然气地球科学,2010,21(6):1004-1013.
- [19] 戴金星,夏新宇,卫延召,等. 四川盆地天然气的碳同位素特征[J]. 石油实验地质,2001,23(2):115-121.
- [20] 刘光祥,陶静源,潘文蕾,等. 川东北及川东区天然气成因类型探讨[J]. 石油实验地质,2002,24(6):512-516.
- [21] 沈忠民,姜敏,刘四兵,等. 四川盆地陆相天然气成因类型划分与对比[J]. 石油实验地质,2010,32(6):560-565.

(编辑 黄娟)

(上接第 70 页)

(编辑 黄娟)