

松辽盆地双坨子气田天然气汞含量特征

韩中喜^{1,2}, 王淑英², 严启团², 葛守国², 王春怡²

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007

摘要 为探讨松辽盆地双坨子气田天然气汞含量分布特征及其成因, 选取该气田7口气井作为研究对象, 在对采集的天然气进行汞含量检测的同时, 开展天然气组分和烷烃碳同位素分析。检测结果显示, 双坨子气田天然气汞含量介于11~29200 ng/m³之间, 平均为17600 ng/m³, 属于中、低汞天然气。双坨子气田天然气汞含量随产层深度的增加而增大, 深层天然气汞含量远高于中、浅层天然气, 天然气汞含量的分布特征明显受该盆地双层地质结构的控制。研究表明, 双坨子气田汞含量分布特征既与天然气类型有关, 也与气源岩热演化程度有关。双坨子气田深层天然气为煤型气, 中、浅层气则为油型气或油型气-煤型气的混合气。气源岩热演化程度的不同, 是造成双坨子气田与其邻近的长深气田天然气汞含量差异较大的根本原因。

关键词 松辽盆地; 双坨子气田; 长深气田; 天然气; 汞含量

中图分类号 TE121

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.18.006

Analysis of natural gas mercury content characteristics of Shuangtuozhi gas field in Songliao Basin

HAN Zhongxi^{1,2}, WANG Shuying², YAN Qituan², GE Shouguo², WANG Chunyi²

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development—Langfang, Langfang 065007, China

Abstract In order to study the natural gas mercury content characteristics and its origin in Shuangtuozhi gas field, the author carried out natural gas mercury content and alkane carbon isotope analysis of 7 gas wells in the field. The result showed that natural gas mercury content is among 11–29200 ng/m³, and the average value is 17600 ng/m³, which makes it belong to medium and low mercury containing natural gas. The natural gas mercury content increases with the rise of the production depth, and the deep zone has a far greater mercury content than the shallow and middle zones obviously controlled by the basin's double layers structure. Our research showed that the natural gas mercury content is both relevant to the type of the natural gas and the maturity of the source rocks. The type of natural gas from the deep zone is coal type gas and those from the middle and shallow zones are a mixed gas of coal type gas and oil type gas. Different source rocks' thermal evolution levels are the major reason that makes the natural gas mercury content of Shuangtuozhi gas field quite different from that of the neighbor Changshen gas field.

Keywords Songliao Basin; Shuangtuozhi gas field; Changshen gas field; natural gas; mercury content

汞是天然气中一种常见的重金属元素, 其含量变化范围很大。目前世界上已知的天然气汞含量最高可达 3×10^6 ng/m³^[1], 最低可小于10 ng/m³^[2]。天然气中汞的形成与天然气形成的地质条件密切相关。关于天然气中汞的成因存在两种说法,

一是有有机成因说, 即认为天然气中的汞主要来自于气源岩, 在气源岩热演化过程中, 汞随生成的烃类气体一起运移并进入气藏; 二是岩浆成因说, 即认为天然气中的汞来自于幔源岩浆的脱气作用。松辽盆地处于中国东部, 具有下断上拗的

收稿日期: 2015-04-21; 修回日期: 2015-06-17

基金项目: 国家重大科技专项(2011ZX05007)

作者简介: 韩中喜, 工程师, 研究方向为天然气地球化学, 电子信箱: hanzhongxi69@petrochina.com.cn

引用格式: 韩中喜, 严启团, 王淑英, 等. 松辽盆地双坨子气田天然气汞含量特征[J]. 科技导报, 2015, 33(18): 40-44.

双层地质结构,并形成中、浅层和深层两套含油气组合。中、浅层以产油为主,含有少量的溶解气和气顶气。深层以产气为主,受幔源岩浆脱气的影响较为严重,部分气井含有较多的无机二氧化碳气^[3]。双坨子气田位于松辽盆地南部,产气层位既有深层又有中、浅层,查明该气田天然气汞含量特征不仅有助于加强气藏中汞的成因理论的认识,而且对认识该气田成藏机理具有指导意义。

1 地质背景

松辽盆地位于中国东部地区,是叠置于古生代基底上的大型中-新生代沉积盆地,盆地演化大体经历了断陷、拗陷和反转萎缩3个演化阶段^[4],在断陷阶段形成了众多的小断陷,发育了上侏罗统火石岭组、下白垩统沙河子组和营城组地层,地层分布仅局限于断陷内。在拗陷阶段发育了下白垩统登娄库组至上白垩统嫩江地层,在反转萎缩阶段发育了上白垩统四方台组及以上地层。根据断层的发育程度和油气生成特征,松辽盆地可划分为中、浅层和深层两部分。松辽盆地深层是指泉头组二段(K_{1q2})及其以下地层^[5],气源岩主要为沙河子组、火石岭组的煤和碳质泥岩,营城组和登娄库组的煤线和碳质泥岩也有一定的供气能力。中、浅层主要发育湖相暗色泥岩,有机质类型为腐泥型和腐殖腐泥型,热演化程度中等,以产油为主。双坨子气田位于松辽盆地南部,是吉林油田开发史上第一个整装具有100×10⁸ m³储量规模的纯气藏气田(图1)^[6],产气层位从登娄库组(K_{1d})至姚家组(K_{1y})均有分布。研究区位于松辽盆地中央拗陷区华字井阶地南部,整体表现为一被近南北向断层垂直切过的鼻状构造,深层介于长岭、伏龙泉断陷之间,浅层西为长岭凹陷,东为东南隆起区的登娄库背斜带,处于油气运聚的有利区带,石油地质条件优越^[7]。

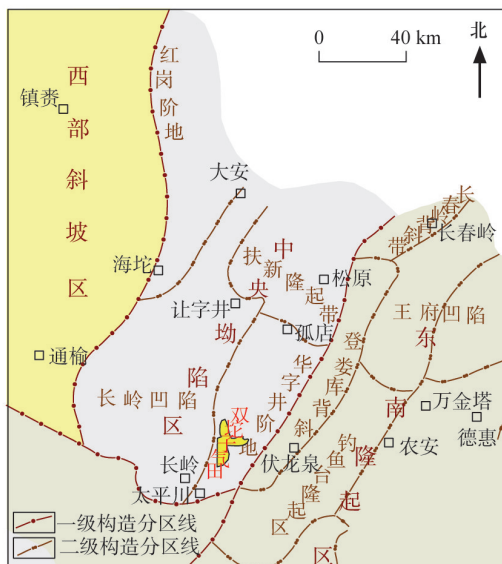


图1 松辽盆地南部双坨子气田位置示意
Fig. 1 Location of Shuangtuozizi gas field in the south of Songliao Basin

2 天然气汞含量特征

根据气田生产实际情况和研究的需要,选取了该气田当中的7口作为研究对象,其中,中、浅层气井2口,深层气井5口。在进行汞含量检测时,使用德国 Mercury Instruments 公司生产的 UT 3000 痕量测汞仪。该仪器检测精度高,抗干扰能力强,能够实现进样、加热和清洗的全部自动化过程。其基本工作原理是,当被测气体通过金阱时,气体中的汞会被金丝完全捕集,随后金丝会被迅速升温到700℃,这样捕集到金丝上的汞就会以气态的形式完全被解吸下来,最后在清洁气流的吹扫下被送入原子吸收光学单元,在273.7 nm波长处进行检测。由于大多数材料对汞均具有很强的吸附性,本次检测在取样时所使用的管线均为不锈钢和硅胶材料制成,采样袋薄膜为聚乙烯材料制成,尽可能避免了采样、运输和保存过程中汞的损失,以及对检测结果造成的不利影响。检测结果如表1所示,从表1中可以看出,双坨子气田不同气井天然气汞含量间具有很大差异,最低只有11 ng/m³,最高为29200 ng/m³,平均为17600 ng/m³。按照以往的划分标准,即低汞天然气小于5000 ng/m³,中含汞天然气介于5000~50000 ng/m³,高汞天然气大于50000 ng/m³^[8],双坨子气田属于中、低汞天然气田。

表1 双坨子气田部分气井天然气汞含量数据表

Table 1 Natural gas mercury contents of some wells in Shuangtuozizi gas field

| 井号 | 层位 | 层段/m | 产层中深/m | 汞含量/(ng·m ⁻³) |
|-------|--------------------|---------------|--------|---------------------------|
| T3-10 | K _{2y2+3} | 610.2~611.6 | 610.9 | 11 |
| TA4-2 | K _{1q3} | 1224.0~1230.2 | 1227.1 | 54 |
| T113 | K _{1q1} | 1950.0~1955.0 | 1952.5 | 17400 |
| T106 | K _{1q1} | 1903.4~2060.8 | 1982.1 | 19100 |
| T17 | K _{1q1} | 2046.0~2061.0 | 2053.5 | 28200 |
| T103 | K _{1q1} | 2056.8~2073.0 | 2064.9 | 29000 |
| TS1 | K _{1q1} | 2060.0~2072.6 | 2066.3 | 29200 |

若将产层中深定义为生产层段的中部深度,将检测到的天然气汞含量与对应的产层中深作图可以发现,双坨子气田天然气汞含量随产层深度增加而不断增大(图2)。

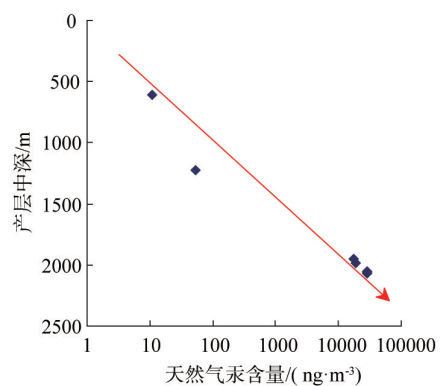


图2 双坨子气田不同气井天然气汞含量随产层中深变化趋势
Fig. 2 Natural gas mercury content trend with production layer depth for some wells in Shuangtuozizi gas field

两口井中、浅层气井天然气汞含量平均仅为 33 ng/m³, 深层气井天然气汞含量平均为 24600 ng/m³, 中、浅层天然气汞含量远低于深层天然气, 汞含量特征明显受松辽盆地双层地质结构的控制。

3 成因分析

为查明双坨子气田天然气中汞的成因, 在对天然气进行

汞含量检测的同时也对其天然气组成和烷烃碳同位素进行测定。

在天然气组成中(表 2), 双坨子气田二氧化碳含量很低, 最高仅为 0.13%; 氮气含量介于 3.27%~8.45%, 平均为 4.80%; 深层与中、浅层天然气干燥系数存在明显不同, 深层天然气干燥系数介于 0.91~0.93, 属于湿气, 中、浅层天然气干燥系数为 0.98, 属于干气。

表 2 双坨子气田天然气组成及烷烃碳同位素组成

Table 2 Natural gas composition and alkane carbon isotope in Shuangtuozhi gas field

| 井号 | 天然气组成/% | | | | | | | | | 干燥系数 | $\delta^{13}\text{C}/\%$ | | | |
|-------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| | N ₂ | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | C ₅ H ₁₂ | C ₆₊ | CH ₄ | | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | |
| T3-10 | 8.45 | 0.00 | 89.7 | 1.24 | 0.16 | 0.17 | 0.10 | 0.20 | 0.98 | -4.74 | -3.23 | — | — | |
| TA4-2 | 3.79 | 0.08 | 94.2 | 1.57 | 0.03 | 0.09 | 0.01 | 0.23 | 0.98 | -4.07 | -2.54 | — | — | |
| T113 | 5.61 | 0.05 | 87.4 | 3.79 | 1.45 | 0.98 | 0.36 | 0.41 | 0.93 | -2.84 | -2.43 | -2.15 | -2.28 | |
| T106 | 4.39 | 0.00 | 87.7 | 4.20 | 1.78 | 1.12 | 0.38 | 0.40 | 0.92 | -2.88 | -2.61 | -2.54 | -2.61 | |
| T17 | 3.27 | 0.00 | 89.3 | 4.01 | 1.61 | 1.00 | 0.36 | 0.46 | 0.92 | -2.96 | -2.65 | -2.58 | -2.62 | |
| TS1 | 4.34 | 0.00 | 87.7 | 4.28 | 1.78 | 1.11 | 0.37 | 0.41 | 0.92 | -3.04 | -2.70 | -2.62 | -2.66 | |
| T103 | 3.76 | 0.13 | 87.5 | 4.56 | 1.99 | 1.24 | 0.42 | 0.46 | 0.91 | -3.01 | -2.91 | -2.73 | -2.71 | |

在烷烃碳同位素组成中, 随着烷烃分子碳数的递增, 若 $\delta^{13}\text{C}$ 依次递增($\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4$)或递减($\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$)则说明烷烃气为原生烷烃气, 凡 $\delta^{13}\text{C}$ 依次递增者称为正碳同位素系列, 凡 $\delta^{13}\text{C}$ 依次递减者为负碳同位素系列。具有正碳同位素系列的烷烃气为有机成因原生烷烃气, 具有负碳同位素系列的烷烃气基本为无机成因原生烷烃气。烷烃气碳同位素的倒转存在 4 种原因, 即有机烷烃气和无机烷烃气的混合、煤成气与油型气的混合、“同型不同源”或“同源不同期”气的混合^[9]。双坨子气田烷烃碳同位素组成整体呈正碳同位素系列, 但深层天然气样品中的丁烷相对于丙烷碳同位素略显重(图 3), 这说明该气田在形成过程中存在不同气的混合现象。由于该气田二氧化碳含量很低, 其为无机烷烃气混入的可能性很小。

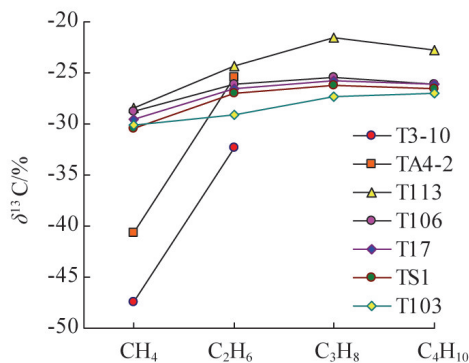


图 3 双坨子气田不同气井天然气烷烃碳同位素系列

Fig. 3 Natural gas alkane carbon isotope series of different wells in Shuangtuozhi gas field

在有机气当中, 天然气碳同位素组成既与源岩母质类型有关, 又受源岩热演化程度、运移距离等外部因素控制^[10]。一般认为甲烷碳同位素组成主要受气源岩的热演化程度的影

响, 演化程度越高甲烷碳同位素值越大, 而乙烷碳同位素既与母质类型有关, 又受气源岩热演化程度的影响, 因此可以用甲、乙烷碳同位素来共同判断天然气类型。双坨子气田中、浅层甲烷碳同位素介于-4.74%~-4.07%, 深层介于-3.04%~-2.84%; 乙烷碳同位素中、浅层介于-3.23%~-2.54%, 深层介于-2.91%~-2.43%, 深层气与中、浅层气碳同位素之间存在较大差异(表 2), 表明深层气与中、浅层气在天然气类型和热演化程度方面存在很大不同。将双坨子气田甲、乙烷碳同位素投射到黄汝昌关于甲烷、乙烷碳同位素对天然气进行分类的图版^[11]上可以发现: 双坨子气田泉一段天然气类型为煤型气, 泉三段为煤型气和油型气的混合气, 姚家组 2+3 段为油型气(图 4)。这一结果与双坨子气田油气地质特征相一致, 该气田姚家组天然气则来自于上覆嫩江组和下伏青山口组的气源岩, 气源岩类型为腐泥型; 泉三段储层则同时受到上覆

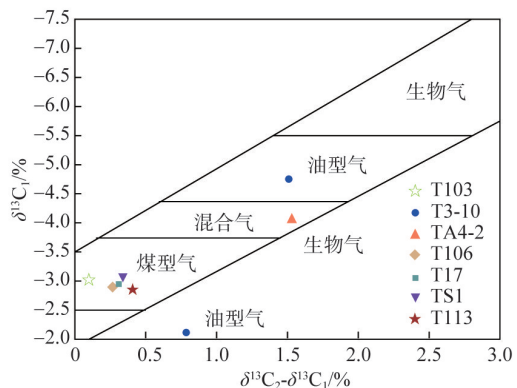


图 4 甲、乙烷碳同位素图版法划分双坨子气田不同气井天然气类型

Fig. 4 Identification of natural gas type in Shuangtuozhi gas field by the method of methane and ethane carbon isotope chart

泉四段至青一段腐泥型气源岩及下伏地层腐殖型气源岩共同供气的影响,天然气类型具有混合气的特征;泉一段气源为泉一段及其下伏营城组和沙河子组的腐殖型气源岩^[12,13]。

根据此前的研究,煤型气汞含量总体高出油型气一个数量级^[14]。这是因为成煤的腐殖质具有很强的吸聚能力,腐殖质胶体吸附量平均值3~4 g/kg,在相同地质环境中比其他一切胶体的吸附量都高,如腐殖泥汞含量高达1000 μg/kg以上,而一般淡水沉积物只有73 μg/kg左右^[1]。天然气类型的不同是造成双坨子气田深层与中、浅层天然气汞含量差异较大的一项重要原因。

但双坨子气田深层天然气汞含量相对于其邻近的长深气田要低的多(表3),这很可能与气源岩的热演化程度有关。为查明气源岩在不同温度下的释汞能力,开展了煤在不同温度下的热释汞实验。在实验过程中,首先将煤粉碎成10~18目大小的颗粒,装入直径为6 mm,长为18 cm的石英管中,两端用脱脂棉封堵,制得煤粉管。对煤粉管加热,每个温度点恒温20 min,煤粉所释放的汞蒸气在氮气吹扫下通过装有金丝的石英管(图5)。之后,捕集汞的石英管被加热到800℃,汞蒸气从金丝表面解析下来,并在清洁空气的吹扫下进入测汞仪测定。检测结果如图6所示,可以看出,温度越高,煤释放的汞越多,但在250℃之前释放的汞所占比例不高,主要释汞阶段集中在250~450℃。

表3 松辽盆地长深气田部分气井天然气汞含量和烷烃碳同位素组成

Table 3 Natural gas mercury content and alkane carbon isotope of some wells in Changshen gas field in Songliao Basin

| 井号 | 层位 | 深度/m | 汞含量 (ng·m ⁻³) | δ ¹³ C _i /‰ | | | |
|-------|------------------|-----------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | | | | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ |
| 长深1 | K _{1yc} | 3566~3651 | 187000 | -2.32 | -2.44 | — | — |
| 长深103 | K _{1yc} | 3468~3732 | 245000 | -1.92 | -2.80 | -3.07 | -3.34 |
| 长深1-1 | K _{1yc} | 3701~3753 | 227000 | -2.48 | -2.84 | -3.09 | -3.35 |
| 长深平1 | K _{1yc} | 3624~4359 | 171000 | — | — | — | — |

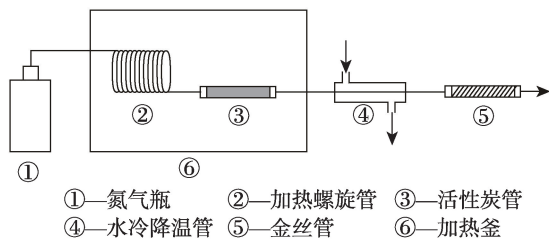


图5 煤粉加热吸汞、释汞实验装置

Fig. 5 Diagram of coal powder thermal adsorption and desorption experiment instrument

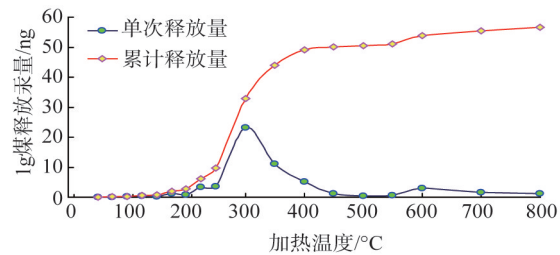


图6 煤在不同温度下汞释放量

Fig. 6 Amount of released mercury from coal at different temperature points

双坨子气田气源岩经历的最高地层温度很难直接测定。因为现今气源岩所处的地层温度并不代表其经历的最高地层温度,且所选取的气源岩不一定具有代表性。但由于天然气甲烷碳同位素与气源岩成熟度有关,可以通过甲烷碳同位素的研究间接确定气源岩经历的最高地层温度。戴金星^[9]研究了有机成因甲烷碳同位素和气源岩成熟度的关系,提出了煤成气回归方程

$$\delta^{13}C_1 \approx 14.12lgR_o - 34.39 \quad (1)$$

油型气回归方程

$$\delta^{13}C_1 \approx 15.80lgR_o - 42.2 \quad (2)$$

式中,δ¹³C₁为甲烷碳同位素值;R_o为气源岩成熟度。

Baker^[15]认为在影响沉积物有机质成熟度的两个因素——温度和时间中,加热时间的影响有限,并且在地质时间尺度内,在达到最高温度之后,加热时间的作用相对快且短暂。据此提出,气源岩成熟度是其经历的最高温度的单一函数,加热时间可以忽略。基于上述认识Baker和Pawlewicz^[16]提出了气源岩成熟度与最大温度之间的回归关系式:

$$R_o = \exp(0.0078T_{max} - 1.2) \quad (3)$$

式中,T_{max}为气源岩经历最高地层温度,℃。

根据以上方程,可以大体计算出气源岩经历的最高温度(表4)。

表4 由甲烷碳同位素计算的双坨子和长深气田气源岩成熟度和经历的最高温度

Table 4 Source rock maturities and maximum temperature experienced of Shuangtuozzi and Changshen gas fields calculated according to methane carbon isotope

| 天然气类型 | 井号 | δ ¹³ C ₁ H ₄ /‰ | R _o /% | T _{max} /℃ |
|-------|-------|--|-------------------|---------------------|
| 油型气 | T3-10 | -4.74 | 0.47 | 57 |
| | T113 | -2.84 | 2.66 | 279 |
| | T106 | -2.88 | 2.49 | 271 |
| | T17 | -2.96 | 2.18 | 254 |
| 煤型气 | TS1 | -3.04 | 1.92 | 237 |
| | T103 | -3.01 | 2.01 | 244 |
| | 长深1 | -2.32 | 6.20 | 388 |
| | 长深103 | -1.92 | 11.90 | 471 |
| | 长深1-1 | -2.48 | 4.77 | 354 |

从表4中可以看出双坨子气田中、浅层气源岩经历的最高温度为57℃,深层气源岩经历的最高温度在237~279℃,平均为257℃。由热释汞实验可以看出,双坨子气田深层气源岩刚刚进入快速释汞阶段,有一定的释汞量,但只有20%左右的汞被释放出来,大量汞滞留在气源岩中。而长深气田气源岩经历的最高温度介于354~471℃,平均为404℃,此时煤中的汞基本已经释放完毕。根据以往研究,煤在250℃之前和之后生成的气量几乎各占总生气量的1/2。因此可以认为,煤在整个热演化过程中生气阶段与释汞阶段的不匹配,造成了两个气田天然气汞含量差异较大的现象。

4 结论

1) 双坨子气田天然气汞含量总体不高,11~29200 ng/m³,属中、低含汞天然气。

2) 双坨子气田天然气汞含量随产层深度的增加而增大,深层天然气要远高于中、浅层天然气,天然气汞含量的分布特征明显受该盆地双层地质结构的控制。

3) 双坨子气田汞含量分布特征既与天然气类型有关,也与气源岩热演化程度有关。双坨子气田深层天然气为煤型气,中、浅层气则为油型气或油型气-煤型气的混合气。气源岩经历的最高地层温度的不同是造成双坨子气田与其邻近的长深气田天然气汞含量差异较大的根本原因。

参考文献(References)

- [1] 戴金星. 煤成气的成分及成因[J]. 天津地质学会志, 1984, 2(1): 16-18.
Dai Jinxing. Composition and its genesis of coal-typed gas[J]. Journal of Tianjin Institute of Geology, 1984, 2(1): 16-18.
- [2] 韩中喜, 李剑, 严启团, 等. 天然气汞含量作为煤型气和油型气判别指标的探讨[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 129-133.
Han Zhongxi, Li Jian, Yan Qituan, et al. Discussion of natural gas mercury content as an identification Index of coal type gas and oil type gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 129-133.
- [3] 鲁雪松, 宋岩, 柳少波, 等. 幔源CO₂释出机理、脱气模式及成藏机制研究进展[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 293-302.
Lu Xuesong, Song Yan, Liu Shaobo, et al. Progress in the studies of mantle-derived CO₂ degassing mechanism, degassing model and pool-forming mechanism[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(6): 293-302.
- [4] 冯志强, 张顺, 付秀丽. 松辽盆地姚家组—嫩江组沉积演化与成藏响应[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 78-88.
Feng Zhiqiang, Zhang Shun, Fu Xiuli. Depositional evolution and accumulation response of Yaojia-Nenjiang Formation in Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 78-88.
- [5] 贾承造. 松辽盆地深层天然气勘探研讨会报告集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
Jia Chengzao. Collection of symposium reports about natural gas exploration in the deep zone of Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [6] 王殿军, 李文革. 井下节流工艺技术在双坨子气田开发中的应用[J]. 特种气藏, 2005, 12(1): 70-73.
Wang Dianjun, Li Wenge. Application of downhole choke technique in the development of Shuangtuozhi gas field[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2005, 12(1): 70-73.
- [7] 景成杰, 牛世忠, 黄玉欣. 松辽盆地红岗地区浅层气地球化学特征研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 53-56.
Jing Chengjie, Niu Shizhong, Huang Yuxin. Geochemical characteristics of shallow gas in Honggang region, Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(1): 53-56.
- [8] 韩中喜, 严启团, 王淑英, 等. 辽河坳陷天然气汞含量特征简析[J]. 矿物学报, 2010, 30(4): 508-511.
Han Zhongxi, Yan Qituan, Wang Shuying, et al. Characteristics of natural gas mercury content in Liaohe depression, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(4): 508-511.
- [9] 戴金星. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 1-5.
Dai Jinxing. Significance of the study on carbon isotopes of alkane gases [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 1-5.
- [10] 李小娟, 陈义才, 王波, 等. 苏里格地区石盒子组天然气地球化学特征[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(1): 184-189.
Li Xiaojuan, Chen Yicai, Wang Bo, et al. Shihezi formation natural gas geochemistry characteristics in Sulige region[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 184-189.
- [11] 黄汝昌. 中国低熟油及凝析气藏形成与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
Huang Ruchang. Formation and distribution regularity of low maturity and condensed gas pools in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [12] 李宏建, 李生业, 张妍, 等. 浅谈松辽盆地南部双坨子地区深层地质特征[J]. 录井工程, 2005, 16(1): 57-59.
Li Hongjian, Li Shengye, Zhang Yan, et al. Deep zone geology characteristics of Shuangtuozhi region in the south of Songliao basin[J]. Mud Logging Engineering, 2005, 16(1): 57-59.
- [13] 张枝焕, 吴聿元, 俞凯, 等. 松辽盆地南部长岭地区青山口组原油的地球化学特征及油源分析[J]. 现代地质, 2002, 16(4): 389-397.
Zhang Zhihuan, Wu Jinyuan, Yu Kai, et al. Geochemical characteristics and source analysis of oils from Qingshankou group in the Changling region, the Songliao basin[J]. Geoscience, 2002, 16(4): 389-397.
- [14] 李剑, 韩中喜, 严启团, 等. 中国气田天然气中汞的成因模式[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 413-419.
Li Jian, Han Zhongxi, Yan Qituan, et al. Genesis of mercury in natural gas of Chinese gas fields[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 413-419.
- [15] Barker C E. Influence of time on metamorphism of sedimentary organic matter in liquid-dominated geothermal systems, western North America [J]. Geology, 1983, 11(7): 384-388.
- [16] Barker C E, Pawlewicz M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter[M]//Paleogeothermics. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1986: 79-93.

(编辑 田恬)