

# 川西坳陷孝泉-新场地区陆相天然气 地球化学及运移特征

赵双丰<sup>1,2</sup>, 张枝焕<sup>1,2</sup>, 李文浩<sup>3</sup>, 闫红星<sup>4</sup>, 万甜甜<sup>1,2</sup>, 马玲<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;  
3. 中国石油大学非常规油气与新能源研究院, 山东青岛 266580; 4. 中国石油辽河油田勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010)

**摘要:** 天然气运移研究一直是油气地质领域中至关重要但又最为薄弱的环节, 选取甲烷碳同位素、气体干燥系数( $C_1/C_{1-5}$ )、 $iC_4/nC_4$ 、非烃气体组成等多项天然气运移示踪参数, 对孝泉-新场地区陆相天然气的运移特征进行分析。结果表明: 须家河组储层紧邻烃源岩, 天然气就近成藏, 二次运移特征不明显, 由于运移距离较短, 烃源岩生排烃与天然气的成藏几乎同期进行; 侏罗系天然气为次生气藏, 天然气以燕山晚期至喜山期形成的深大断裂带为运移通道, 由须家河组垂向运移至侏罗系储层, 并沿输导砂体由构造低部位向构造高部位侧向运移, 至适当圈闭中聚集成藏, 天然气大规模运移时期为晚白垩世末期-古近纪。

**关键词:** 川西坳陷; 孝泉-新场地区; 天然气; 蓬莱镇组; 次生气藏; 运移分馏

**中图分类号:** TE 122.1      **文献标志码:** A

**引用格式:** 赵双丰, 张枝焕, 李文浩, 等. 川西坳陷孝泉-新场地区陆相天然气地球化学及运移特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(2): 31-38.

ZHAO Shuangfeng, ZHANG Zhihuan, LI Wenhao, et al. Characteristics of natural gas geochemistry and migration in Xiaquan-Xinchang area, Western Sichuan Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 31-38.

## Characteristics of natural gas geochemistry and migration in Xiaquan-Xinchang area, Western Sichuan Depression

ZHAO Shuangfeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhihuan<sup>1,2</sup>, LI Wenhao<sup>3</sup>, YAN Hongxing<sup>4</sup>, WAN Tiantian<sup>1,2</sup>, MA Ling<sup>1,2</sup>

(1. College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Unconventional Petroleum and Renewable Energy in China University of Petroleum,  
Qingdao 266580, China;

4. Exploration & Development Research Institute, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin 124010, China)

**Abstract:** The weakest link in the field of petroleum geology has been the research on the natural gas migration. Methane carbon isotope, gas drying coefficient ( $C_1/C_{1-5}$ ),  $iC_4/nC_4$ , non-hydrocarbon gas composition and numbers of tracer gas migration parameters were applied to analyze the migration characteristics of the continental natural gas in Xiaquan-Xinchang area. The results show that the Xujiahe Formation is adjacent to source rocks where natural gas is accumulated nearby. The formation has unapparent secondary gas migration characteristic. Due to short migration distance, the hydrocarbon generation and expulsion of the source rocks and natural gas reservoir occurred almost at the same time. Jurassic aged gas is the secondary gas pool, whose migration channel is the deep fault belt in the Himalayan Formation. The gas migrated vertically from the Xujiahe Formation to the Jurassic reservoir, and then migrated laterally along the channel sand body from the low potential re-

收稿日期: 2014-09-21

基金项目: “十二五”国家科技重大专项(2011ZX05002-006)

作者简介: 赵双丰(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事有机地球化学研究。E-mail: 48567375@qq.com。

通讯作者: 张枝焕(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事有机地球化学的科研和教学工作。E-mail: zhangzh3996@vip.163.com。

gion of conformation to the high potential region of conformation, and reached the appropriate entrapment for accumulation. The dominating natural gas migration period is the end Late Cretaceous-Paleogene.

**Keywords:** Western Sichuan Depression; Xiaoquan-Xinchang area; natural gas; Penglaizhen Formation; secondary gas pool; segregative migration

天然气运移是一个伴随着物理-化学变化的动态过程,气体在输导体系中运移时,由于受到色层效应及各种水-岩反应的影响,其地球化学特征势必呈现出一定的规律性变化,正确分析这些变化趋势是研究天然气运移特征的重要方法。由于天然气分子组成相对简单,可用于示踪运移的特征参数相对较少,且相关影响因素繁多,天然气运移研究一直是油气地质领域中至关重要但又最为薄弱的环节<sup>[1-2]</sup>。对于川西地区天然气的运移特征,前人做了大量研究,并取得了一定的研究成果和认识,但均是针对川西地区天然气运移所具有的共性而展开的,并未具体分析各气田中天然气在运移上所具有的独立特征<sup>[3-4]</sup>。笔者在大量文献调研、岩心观察及实验数据分析的基础上,对川西坳陷孝泉-新场地区天然气的分布特征和地球化学特征进行细致分析和总结。结合前人研究成果及区域构造演化特征,选取多项运移示踪参数,探讨孝泉-新场地区天然气在垂向和侧向上的二次运移规律及路径。在此基础上,根据烃源岩生排烃史及油气藏成藏期研究,分析天然气发生大规模运移的时间窗,为后续油气资源的勘探开发提供理论依据。

### 1 天然气地球化学特征

孝泉-新场构造位于四川盆地西部梓潼凹陷与成都凹陷之间,其西部与龙门山前缘断褶带相连,向

东以低鞍的形式与罗江-合兴场构造相隔,是一个NEE向展布的大型复式背斜构造,具有相当规模的隆起幅度和圈闭面积。研究区紧邻成都凹陷生烃中心,气源充足,成藏条件十分有利,纵向上形成了多套生储盖组合。目前研究区内已发现新场和孝泉两个大中型气田,并在侏罗系蓬莱镇组、沙溪庙组及上三叠统须家河组等多个陆相地层获得天然气重大勘探突破,展现了巨大的勘探潜力。

研究区内各层位天然气主要由烃类气体和非烃类气体组成,以烃类气体为主,非烃气体含量较低。烃类气体中甲烷体积分数大于90%;乙烷体积分数相对较低,一般小于5%;丙烷及丙烷以上重烃含量甚微;干燥系数(C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub>)均大于0.92,最高可达0.99,其中上三叠统天然气干燥系数明显高于侏罗系天然气。非烃气体主要由N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>组成,其他非烃气体如H<sub>2</sub>S、H<sub>2</sub>、He等含量甚微。在上三叠统气藏中,非烃气体组成均表现为CO<sub>2</sub>含量高于N<sub>2</sub>含量;而在侏罗系气藏中则恰好相反,表现为CO<sub>2</sub>含量低于N<sub>2</sub>含量(表1)。造成这种现象的原因与天然气的热演化程度及运移分馏作用有关。

孝泉-新场地区各层位天然气中甲烷、乙烷、丙烷和丁烷碳同位素的分布特征,总体上符合δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub><δ<sup>13</sup>C<sub>2</sub><δ<sup>13</sup>C<sub>3</sub><δ<sup>13</sup>C<sub>4</sub>的正碳同位素系列分布规律,表现为典型的有机成因气的特征(表2)。

表1 孝泉-新场地区天然气组分特征

Table 1 Components characteristics of natural gas in Xiaoquan-Xinchang area

层位 (样品数)	天然气烃类组分/%				非烃组分/%		干燥系数 C <sub>1</sub> /C <sub>1-5</sub>
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
J <sub>3</sub> p(688)	93.08	3.56	0.79	0.18	1.51	0.43	0.95
J <sub>2</sub> s(48)	92.84	4.07	0.83	0.19	1.16	0.45	0.95
J <sub>2</sub> q(3)	93.32	4.18	0.87	0.20	0.88	0.21	0.94
J <sub>1</sub> b(4)	90.71	5.23	1.31	0.35	0.91	0.54	0.92
T <sub>3</sub> x <sup>5</sup> (1)	89.92	1.62	0.36	0.05	7.31	0.58	0.98
T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> (8)	93.67	2.64	0.46	0.08	1.14	1.77	0.97
T <sub>3</sub> x <sup>3</sup> (1)	97.25	0.94	0.08	0.01	0.60	1.04	0.99
T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> (39)	97.43	0.89	0.09	0.01	0.40	1.07	0.99

注:本文图表中所用天然气组分及同位素数据来源于中石化西南分公司,下同。

### 2 天然气成因类型

不同成因类型的天然气在组分特征和碳、氢同位素组成上往往具有较大差异,据此可以判识天然

气的成因类型。

#### 2.1 利用 C<sub>7</sub> 轻烃组成划分天然气类型

C<sub>7</sub> 轻烃系列化合物包括甲基环己烷(MCC<sub>6</sub>)、各种结构的二甲基环戊烷(ΣDMCC<sub>5</sub>)、正庚烷

( $nC_7$ )3类。甲基环己烷是反映陆源母质类型的良好参数,它的大量存在是煤型气伴生轻烃的一个特点;各种结构的二甲基环戊烷主要来自水生生物的一类脂化合物,它的大量出现是油型气伴生轻烃的一

个特点<sup>[5-6]</sup>。 $MCC_6$ 、 $\Sigma DMCC_5$ 和 $nC_7$ 的相对含量可以很好地区分伴生气的成因类型,孝泉-新场地区陆相地层轻烃中富含甲基环己烷,其含量普遍高于80%,表现为典型的煤型气特征(图1)。

表2 孝泉-新场地区天然气同位素特征

Table 2 Carbon isotope characteristics of natural gas in Xiaoquan-Xinchang area

地层(样品数)	$\delta^{13}C_1/\text{‰}$	$\delta^{13}C_2/\text{‰}$	$\delta^{13}C_3/\text{‰}$	$\delta^{13}C_4/\text{‰}$
J <sub>3</sub> (11)	-30.65 ~ -35.66	-22.22 ~ -25.59	-19.44 ~ -24.35	-19.34 ~ -20.76
J <sub>2</sub> (7)	-33.52 ~ -36.23	-22.20 ~ -23.84	-18.62 ~ -20.67	-18.32 ~ -20.55
J <sub>1</sub> (1)	-35.00	-22.14	-20.06	-20.30
T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> (2)	-33.43 ~ -33.72	-20.84 ~ -22.13	-20.56 ~ -20.63	-19.93
T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> (4)	-30.30 ~ -31.77	-24.94 ~ -27.06	-25.46 ~ -26.45	
平均值	-33.91	-22.81	-20.36	-19.91

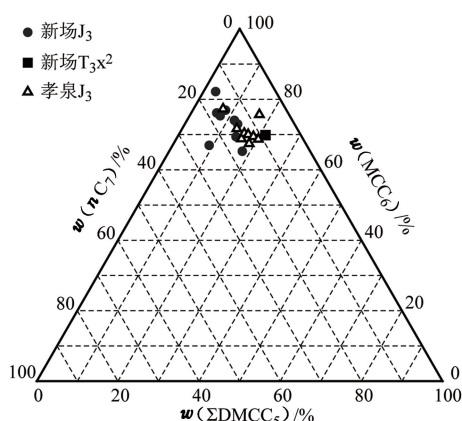


图1 孝泉-新场地区天然气伴生轻烃三角图

Fig. 1 Triangular diagram about light hydrocarbons in Xiaoquan-Xinchang area

## 2.2 利用同位素组成特征判断天然气成因类型

由于甲烷碳同位素值较易受到热成熟作用和运移分馏作用的影响,甲烷碳同位素作为判别天然气类型的指标,只在低演化阶段有效;乙烷碳同位素具有较强的母质类型继承性,能更有效地区分两类不同母质形成的天然气。中国前陆盆地天然气成因类型中,煤成气 $\delta^{13}C_2$ 值大于 $-26\text{‰}$ 、油型气 $\delta^{13}C_2$ 值小于 $-29\text{‰}$ , $-29\text{‰} \sim -26\text{‰}$ 是煤成气和油型气叠加或混合气的 $\delta^{13}C_2$ 分布区间<sup>[5,7]</sup>。依据这一标准,孝泉-新场地区陆相天然气以有机成因气为主,其中侏罗系和须家河组四段天然气表现为典型的煤型气特征;须家河组二段天然气的乙烷碳同位素为 $-24.94\text{‰} \sim -27.06\text{‰}$ ,介于油型气与煤型气之间,反映出混合成因气的特征,说明须二段气体中混有一定比例的油型气(表2)。

## 3 天然气运移特征分析

目前常用的天然气运移示踪参数包括甲烷碳同位素、气体干燥系数 $\varphi(C_1)/\varphi(C_{1-5})$ 、 $\varphi(iC_4)/$

$\varphi(nC_4)$ 、非烃气体组成等,综合利用多项示踪参数相互印证,可以更准确地反映天然气的运移特征。

### 3.1 天然气垂向运移

#### 3.1.1 根据烃类化合物参数示踪天然气垂向运移

由于甲烷相对于乙烷及乙烷以上重烃更易于运移<sup>[1,8]</sup>,导致在垂向运移过程中,天然气中甲烷含量升高,重烃含量降低,天然气干燥系数增大。从图2可以看出,孝泉-新场地区陆相天然气中甲烷含量及干燥系数随地层埋深的增加呈现出规律性变化。在埋深小于3000 m的侏罗系地层中,埋深越浅天然气中甲烷含量相对越高,随气层埋深增大,甲烷体积分数和干燥系数逐渐降低,表现出受运移分馏作用影响的特征;而在埋深大于3000 m的上三叠统地层中,天然气中甲烷含量和干燥系数均有随地层埋深的增加而增大的趋势,表明其主要是受热演化作用的影响,因为埋深越大的烃源岩成熟度越高,其生成天然气中甲烷含量也越高。

研究区内不同层位天然气伴生的轻烃组成也存在一定的差别。在通过断层向上运移的过程中,由于吸附性较强且更易溶于水的芳烃化合物相对于链烷烃具有更慢的迁移速率,因此随地层埋深变小,轻烃中芳烃化合物含量相对链烷烃逐渐降低。如图3所示,研究区内,随埋深变小,轻烃中 $w(\text{苯})/w(nC_6)$ 值逐渐减小,表明天然气存在自下而上垂向运移的特征。

#### 3.1.2 根据非烃气体参数示踪天然气垂向运移

非烃气体也可以用于示踪天然气的运移方向, $CO_2$ 和 $N_2$ 是天然气中最常见的非烃组分,常与烃类气体相伴运移。与 $CH_4$ 相比, $CO_2$ 分子直径大、密度高且易溶于水,通常随运移距离增加天然气中 $CO_2$ 的含量逐渐降低, $CH_4$ 含量相对增高<sup>[9]</sup>。同理,

由于  $N_2$  分子直径比  $C_2H_6$  和  $C_3H_8$  小得多,在岩石孔隙中更易于扩散和运移,因此沿运移方向上  $\varphi(N_2)/\varphi(C_2H_6)$ 、 $\varphi(N_2)/\varphi(C_3H_8)$  值逐渐增大。在

孝泉-新场地区,随着地层埋深变浅,  $\varphi(CO_2)/\varphi(CH_4)$  值逐渐变小,而  $\varphi(N_2)/\varphi(C_2H_6)$  值逐渐变大(图4),表现其明显受垂向运移作用的影响。

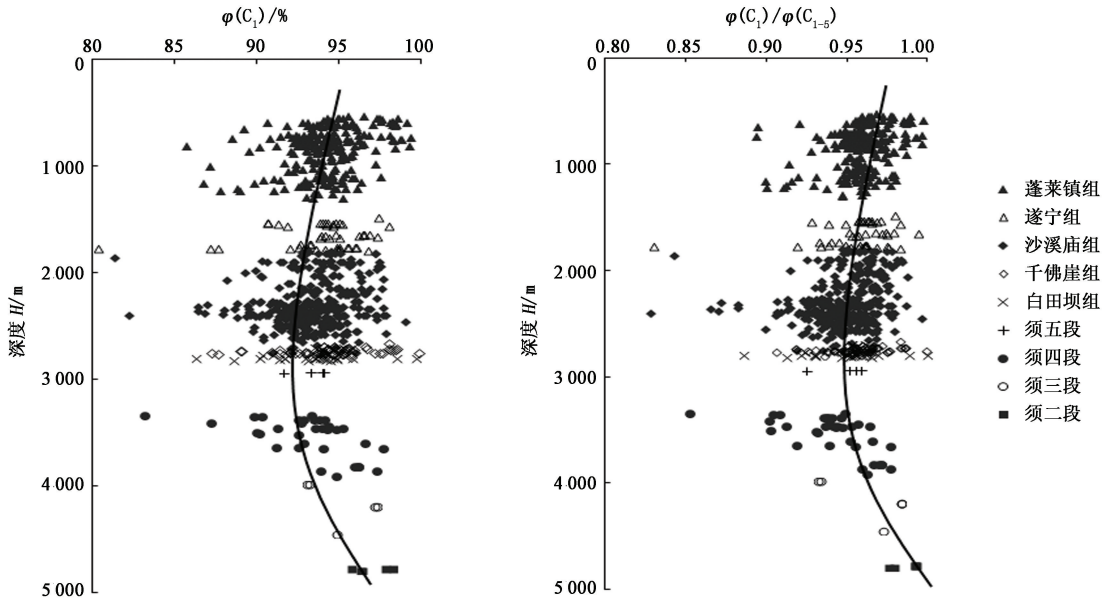


图2 孝泉-新场地区天然气甲烷含量及干燥系数随深度变化

Fig.2 Changes of methane content and aridity coefficient of natural gas with depth in Xiaoquan-Xinchang area

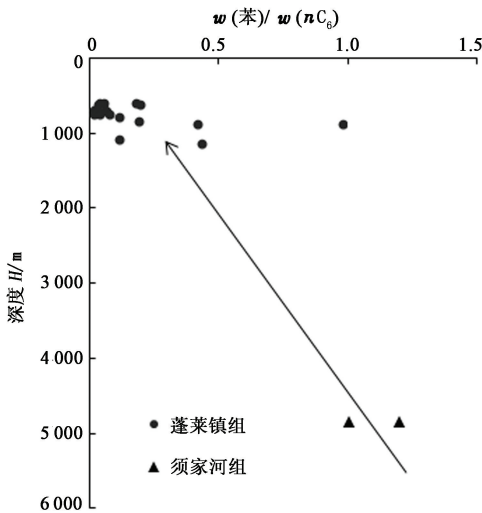


图3 孝泉-新场地区轻烃中  $w(苯)/w(nC_6)$  随深度变化

Fig.3 Ratio of Benzene/ $nC_6$  of light hydrocarbon changes with depth in Xiaoquan-Xinchang area

### 3.1.3 根据同位素组成示踪天然气垂向运移

许多学者通过模拟实验证实,天然气的垂向扩散运移将引起甲烷碳同位素的分馏效应——随地层埋深变浅天然气中甲烷碳同位素趋于变轻<sup>[1,8]</sup>。利用这一原理分析孝泉-新场地区陆相天然气碳同位素数据,却发现随地层埋深变浅,天然气碳同位素出

现了“重→轻→重”的变化趋势。在埋深大于2000 m 的地层中,随埋深变浅,天然气碳同位素平均值由  $-30.9‰$  降至  $-35.3‰$ ,偏负了  $4.4‰$ ,表现出明显的运移分馏效应;而在埋深小于2000 m 的蓬莱镇组地层中,随埋深变浅,天然气碳同位素逐渐变重,平均值由  $-35.3‰$  升至  $-33.8‰$ ,偏正了  $1.5‰$ (图5)。陈安定等<sup>[1]</sup>通过实验证实,碳同位素在运移过程中的这种“重→轻→重”的变化是由地层水引起的,孝泉-新场地区蓬莱镇组储层中存在大量地层水,部分天然气以水溶相存在,水溶气是导致甲烷碳同位素出现增重现象的主要原因。

### 3.2 天然气侧向运移

运移至储层中的天然气可以沿储层砂体继续进行侧向运移。从图6 连井剖面上可以看出,天然气组分中  $\varphi(CO_2)/\varphi(CH_4)$ 、 $\varphi(N_2)/\varphi(C_2H_6)$  以及  $\varphi(N_2)/\varphi(C_3H_8)$  等多组数据均存在规律性变化。在“新823井→新804井→新817井”上沙溪庙组连井剖面中,非烃气体含量存在明显变化,自东向西方向  $\varphi(CO_2)/\varphi(CH_4)$  值由0.40 降至0.21,而  $\varphi(N_2)/\varphi(C_2H_6)$ 、 $\varphi(N_2)/\varphi(C_3H_8)$  值分别由0.25 和1.40 升至0.54 和2.56,以上3组数据均反映了天然气沿储层砂体侧向运移的特点,运移方向为自东向西。

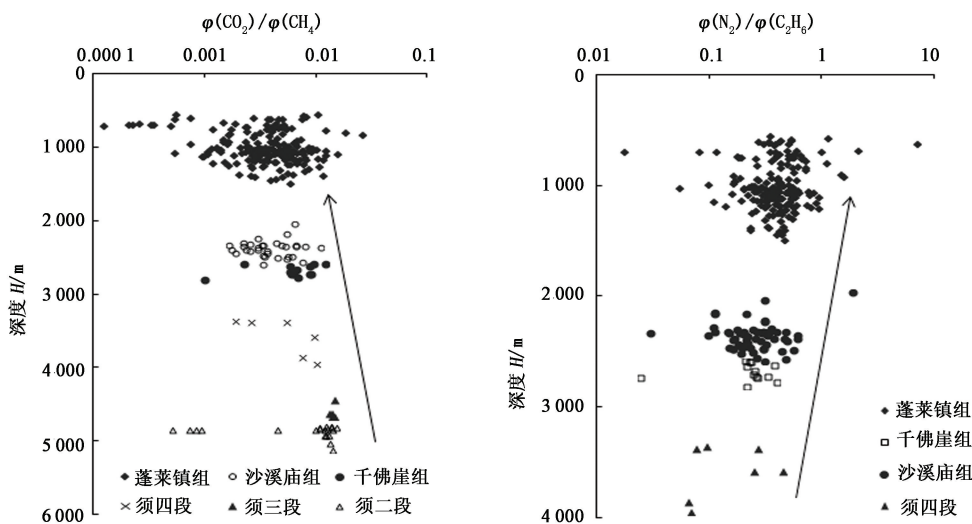


图 4 新场地区天然气中  $\varphi(\text{CO}_2)/\varphi(\text{CH}_4)$  与  $\varphi(\text{N}_2)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$  随深度变化

Fig. 4 Ratios of  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2/\text{C}_2\text{H}_6$  of natural gas change with depth in Xinchang area

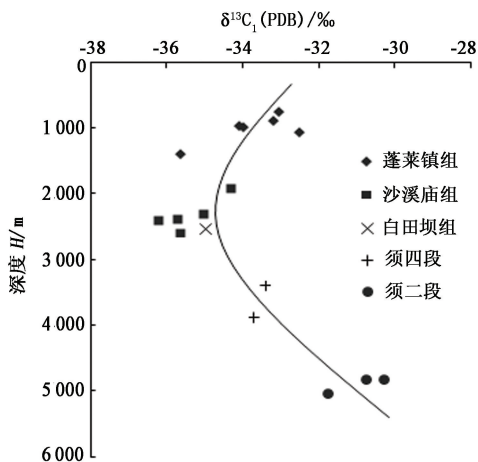


图 5 孝泉-新场地区天然气甲烷碳同位素随深度变化

Fig. 5 Methane carbon isotope of natural gas changes with depth in Xiaoquan-Xinchang area

对于分子量相同而结构不同的组分,如  $i\text{C}_4$  与  $n\text{C}_4$ ,分子有效直径小的组分相对于有效直径大者更容易运移(由于极性弱,吸附作用力小),其扩散系数亦相对较大,因此在运移方向上呈增加趋势。 $\varphi(i\text{C}_4)/\varphi(n\text{C}_4)$  比值受散失作用和水溶作用影响较小,常被认为是示踪天然气运移的最佳指标<sup>[8]</sup>。

从图 7 可以看出,沿孝泉-新场背斜构造边缘向构造高点的砂体展布方向上,上沙溪庙组储层天然气中  $\varphi(i\text{C}_4)/\varphi(n\text{C}_4)$  呈自东向西逐渐增加的变化趋势,说明在上沙溪庙组地层中,天然气具有由构造边缘向构造高点侧向运移的趋势,运移方向为自东向西。

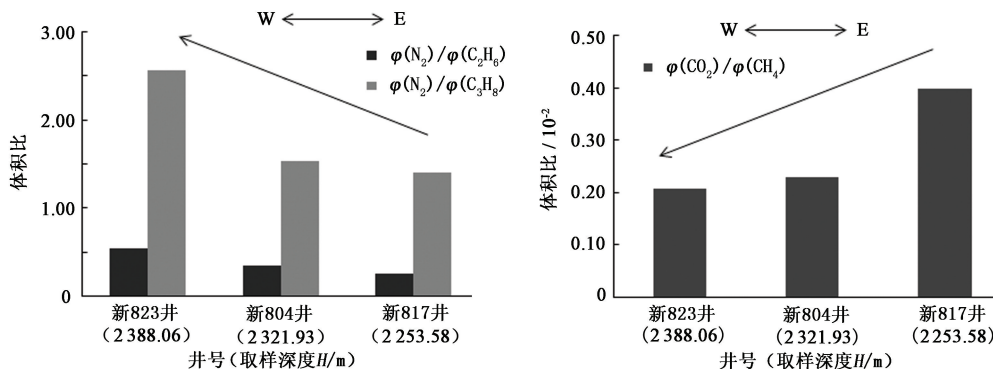


图 6 非烃气体含量变化示踪上沙溪庙组天然气侧向运移

Fig. 6 Lateral variation of non-hydrocarbon gas in Upper Shaximiao Formation in Xiaoquan-Xinchang area

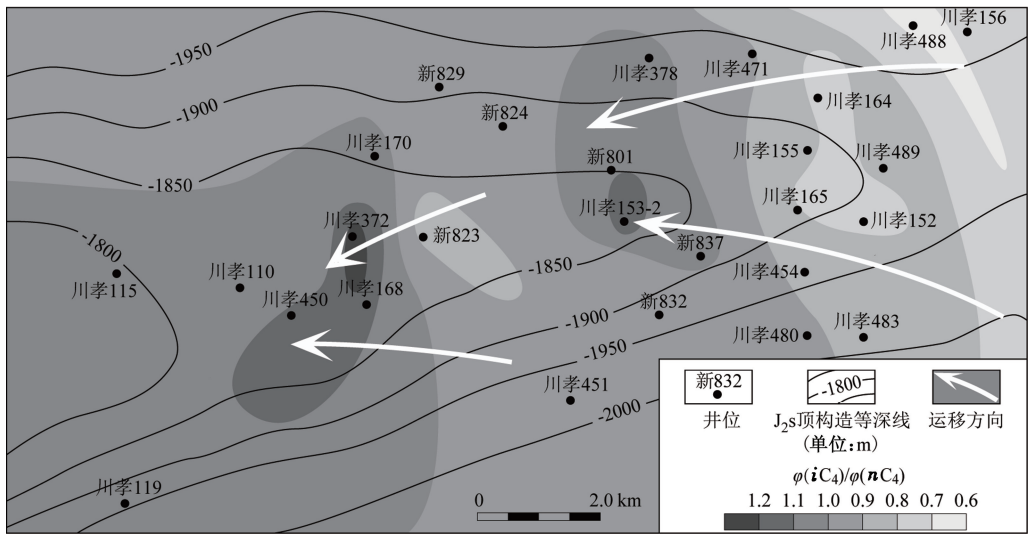


图7 孝泉-新场地区上沙溪庙组  $iC_4/nC_4$  比值示踪天然气侧向运移

Fig.7 Lateral variation of  $iC_4/nC_4$  in Upper Shaximiao Formation in Xiaoquan-Xinchang area

### 3.3 天然气运移通道

孝泉-新场地区陆相地层中深层(须家河组)与浅层(侏罗系)断裂系统发育程度具有明显差异,深部须家河组发育多组走向近南北和北西向的逆断层。这些逆断层断距较小,断层规模也不大,仅沟通上下相邻的地层,是须家河组天然气近源成藏的重要通道(图8)。由于储层致密,且与烃源岩层直接接触,因此须家河组属于自生自储型气藏,天然气成藏过程中的二次运移特征并不明显。

带,该组断裂带形成于燕山晚期,定型于喜山期,断距超过 100 m,规模较大,连通性很好,是浅部侏罗系储层与下伏须家河组烃源层沟通的重要通道<sup>[10]</sup>(图8)。下部天然气沿着这组断裂带向上运移,在运移过程中如遇良好储层,便可驱替地层水聚集成藏。由油气差异聚集原理可知,天然气会首先选择距离断裂带最近,溢出点最低的圈闭聚集成藏,因此深大断裂发育带附近的储层更易成为有效圈闭。

孝泉-新场构造为继承性发育的古隆起,其圈闭形成时间较早,运移至蓬莱镇组的天然气,在势场作用下,可以沿输导砂体由构造低部位的高势区侧向运移至构造轴部的低势区,并在有利圈闭中富集成藏。需要说明的是,虽然侏罗系砂岩储层物性条件差,砂体致密,但在研究区地层中普遍存在异常高压,地层压力差和浮力是保障天然气持续运移的原动力<sup>[4,9]</sup>。

### 4 天然气运聚成藏时间

孝泉-新场地区陆相天然气主要来自于上三叠统须家河组煤系烃源岩及马鞍塘-小塘子组烃源岩,目前这两套烃源岩的有机质热演化程度均较高( $R_o$  值普遍大于 2%),均处于干气生成阶段<sup>[11,12]</sup>。许多学者研究认为中侏罗世至晚白垩世为川西地区上三叠统烃源岩的主要生排烃高峰期<sup>[11-13]</sup>,这一时期连通浅部蓬莱镇组的深大断裂带尚未形成,上三叠统天然气以自生自储为主,就近储集于须二段与须四段储层圈闭中,形成大量原生气藏。由于运移距离较短,须家河组内部烃源岩生排烃与天然气的成藏几乎同期进行。

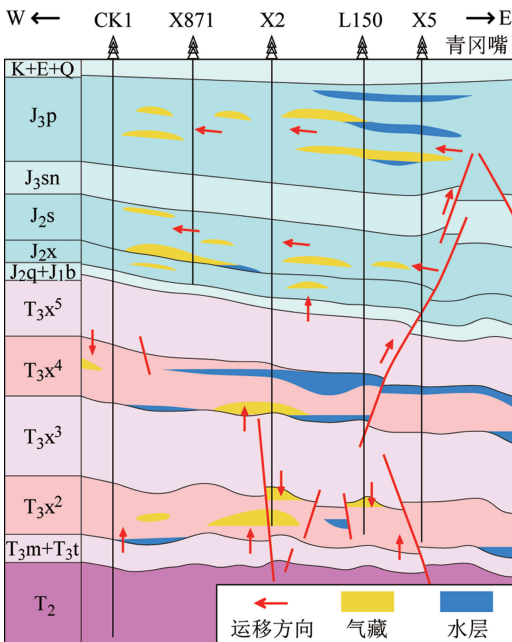


图8 孝泉-新场地区天然气运移示意图

Fig.8 Migration of natural gas in Xiaoquan-Xinchang area

随地层埋深变浅,断层数量急剧减少,仅在新场气田东部青冈嘴地区发育一组近南北向的深大断裂

燕山运动晚期至喜山运动早期,在逆冲作用下,孝泉-新场地区部分须家河组原生气藏受到调整和改造,同期形成的深大断裂沟通了上三叠统与浅层侏罗系地层,使大量深部天然气可以大规模向上运移至侏罗系圈闭中,聚集形成浅层次生气藏。由此可知,研究区须家河组天然气大规模向侏罗系运移的时间窗是晚白垩世末期至古近纪。前人研究表明,孝泉-新场地区侏罗系天然气主成藏期为古近纪至新近纪<sup>[13-14]</sup>,这一结论与天然气的规模运移时间以及烃源岩的主要生排烃期均匹配良好。

## 5 结 论

(1) 孝泉-新场地区陆相天然气主要由烃类气体和非烃类气体组成,以烃类气体为主。烃类气体中甲烷占绝对优势,含量普遍大于90%;乙烷以上重烃含量较低。非烃气体主要由 $N_2$ 和 $CO_2$ 组成,其他非烃气体如 $H_2S$ 、 $H_2$ 、He等含量甚微。

(2) 天然气类型以有机成因气为主,其中侏罗系和上三叠统须家河组四段天然气具有典型煤型气的特征;须家河组二段天然气以煤型气为主,但混有一定比例的油型气。

(3) 孝泉-新场地区陆相天然气主要来源于上三叠统须家河组及马鞍塘-小塘子组烃源岩,其中须家河组储层紧邻烃源岩,天然气就近成藏,二次运移特征不明显,由于运移距离较短,烃源岩生排烃与天然气的成藏几乎同期进行;侏罗系天然气为次生气藏,天然气以燕山晚期至喜山期形成的深大断裂带为运移通道,由须家河组垂向运移至侏罗系储层,并沿输导砂体由构造低部位向构造高部位侧向运移,至适当圈闭中聚集成藏,天然气大规模运移时期为晚白垩世末期—古近纪。

## 参考文献:

- [1] 陈安定,李剑锋. 天然气运移的地球化学指标研究[J]. 天然气地球科学,1994,5(4):38-67.  
CHEN Anding, LI Jianfeng. The geochemical index study of natural gas migration[J]. Natural Gas Geoscience, 1994,5(4):38-67.
- [2] 金之钧,张发强. 油气运移研究现状及主要进展[J]. 石油与天然气地质,2005,26(3):263-268.  
JIN Zhijun, ZHANG Faqiang. The research status and major progress of oil and gas migration[J]. Oil & Gas Geology, 2005,26(3):263-268.
- [3] 沈忠民,张勇,刘四兵,等. 川西拗陷中段原、次生气藏天然气特征及运移机制探讨[J]. 矿物岩石,2011,31(1):83-88.  
SHEN Zhongmin, ZHANG Yong, LIU Sibing, et al. Characteristics of primary and secondary gas pool and transportation mechanism in Western Sichuan Depression[J]. Mineral Petrol, 2011,31(1):83-88.
- [4] 徐国盛,刘树根,李国蓉,等. 川西前陆盆地碎屑岩天然气跨层运移过程中的相态演变[J]. 成都理工学院学报,2001,28(4):383-389.  
XU Guosheng, LIU Shugen, LI Guorong, et al. Phase state evolution In the cross formational flow of natural gas in the West Sichuan foreland basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001,28(4):383-389.
- [5] 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):1-40.  
DAI Jinxing. Carbon and hydrogen isotopes characteristics of nature gas and the identification of various types of natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1993,4(2):1-40.
- [6] HU G Y, LI J, LI Z S, et al. Pre-liminary study on the origin identification of natural gas by the parameters of light hydrocarbon[J]. Science in China(Ser A), 2008, 51(1):131-139.
- [7] SONG Yan, DAI Jinxing, XIA Xinyu. Geneses and distributions of natural gases in foreland basins, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004,41(1/3):21-29.
- [8] 张同伟,王先彬,陈践发,等. 天然气运移的气体组分地球化学示踪[J]. 沉积学报,1999,17(4):627-632.  
ZHANG Tongwei, WANG Xianbin, CHEN Jianfa, et al. Chemical composition of gases as a geochemical tracer of natural gas migration[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999,17(4):627-632.
- [9] 黄志龙,柳广弟,郝石生. 东方1-1气田天然气运移地球化学特征[J]. 沉积学报,1997,15(2):66-69.  
HUANG Zhilong, LIU Guangdi, HAO Shisheng. Geochemical characteristics of the natural gas migration in the Dongfang 1-1 gasfield, South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997,15(2):66-69.
- [10] 杨克明,庞雄奇. 致密砂岩气藏形成机制与预测:以川西拗陷为例[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [11] 叶军. 川西拗陷马鞍塘组—须二段天然气成矿系统烃源岩评价[J]. 天然气工业,2003,23(1):21-25.  
YE Jun. Assessment of hydrocarbon source rocks in Xu-2 member, Ma'antang Formation, gas system in west Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2003,23(1):21-25.
- [12] 陈冬霞,黄小惠,李林涛,等. 川西拗陷上三叠统烃源岩排烃特征与排烃史[J]. 天然气工业,2010,30(5):

- 41-45.  
CHEN Dongxia, HUANG Xiaohui, LI Lintao, et al. The hydrocarbon expulsion characteristics and history of source rocks in Upper Triassic of west Sichuan depression[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(5):41-45.
- [13] 杨克明,叶军,吕正祥. 川西坳陷上三叠统成藏年代学特征[J]. 石油与天然气地质,2005,26(2):208-213.  
YANG Keming, YE Jun, LÜ Zhengxiang. Chronological characteristics of Upper Triassic reservoirs in western Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2005,26(2):208-213.
- [14] 金文正,万桂梅,崔泽宏,等. 四川盆地关键构造变革期与陆相油气成藏期次[J]. 断块油气田,2012,19(3):273-277.  
JIN Wenzheng, WAN Guimei, CUI Zehong, et al. Key tectonic change epoch and hydrocarbon accumulation periods of continental clastic reservoir in Sichuan Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012,19(3):273-277.

(编辑 徐会永)