

鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏 天然气运移机制

李 军^{1,2}, 赵靖舟^{1,2}, 凡元芳^{1,2}, 曹 青^{1,2}, 王 倩^{1,2}, 胡维强^{1,2}

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院; 2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室 陕西西安 710065)

摘要:基于鄂尔多斯盆地上古生界主要产气层段天然气地球化学特征和运移基本地质条件的分析,对上古生界准连续型致密砂岩大气田的天然气运移特征进行了研究。研究表明,鄂尔多斯盆地上古生界准连续型致密砂岩大气田天然气组分和碳同位素组成在平面上的变化主要受烃源岩热成熟度控制,纵向上受到烃源岩热成熟度和天然气运移分馏作用的共同影响。结合运移动力和输导条件进一步分析认为,上古生界致密砂岩大气田主要为初次运移直接成藏和短距离二次运移近源成藏。运移的动力主要为异常高压和气体分子浓度差产生的扩散作用力,浮力作用弱或无。运移方式主要为异常高压驱动下的幕式涌流和扩散作用引起的扩散流。其中,位于生烃体系内的太原组、山2段主要为异常高压驱动下的幕式涌流运移;生烃体系外的山1段、盒8段及以上层段扩散作用引起的扩散流运移对于天然气的成藏具有重要贡献,苏里格气田天然气组分和碳同位素纵向上的规律变化就是其直接反映。

关键词:地球化学特征;运移动力;运移方式;准连续型气藏;上古生界;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Gas migration mechanism of quasi-continuous accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin

Li Jun^{1,2}, Zhao Jingzhou^{1,2}, Fan Yuanfang^{1,2}, Cao Qing^{1,2}, Wang Qian^{1,2}, Hu Weiqiang^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Based on the natural gas geochemical behaviors and basic geological conditions for gas migration, this paper studied the gas migration characteristics of the quasi-continuous tight sand gas field of the Upper Paleozoic in Ordos Basin. Laterally, the variations of gas components and carbon isotope composition are mainly controlled by thermal maturity of source rocks (R_o), while vertically, they are affected jointly by thermal maturity of source rocks and gas migration fractionation. Further analysis of the migration driving force and pathway conditions indicates that the large tight gas field of the Upper Paleozoic is characterized by near-source accumulation via primary migration and short-distance secondary migration. The principle driving force for migration are diffusion force generated by the gradient of gas molecule concentration and abnormal high pressure, while buoyancy force has little or no contributions to gas migration. There are two main migration styles: surge flow caused by overpressure and diffusion flow resulted from diffusion. The overpressure-driven surge flow is predominant in the Taiyuan Formation and the 2nd Member of Shaanxi Formation within source rock interval, while the diffusion-driven diffusion flow is predominant, in the 1st Member of Shaanxi Formation and the 8th Member of Xiashihezi Formation as well as reservoirs above them. The vertical regular variations of gas composition and carbon isotope are the direct responses to these gas migration patterns in Sulige gas field.

Key words: geochemical characteristics, driving force of migration, migration style, quasi-continuous gas accumulation, Upper Paleozoic, Ordos Basin

勘探表明,鄂尔多斯盆地是中国致密砂岩气资源最丰富的盆地之一。现已在盆地上古生界发现并探明了苏里格、榆林、乌审旗、子洲和大牛地5个储量均超

过 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的致密砂岩大气田(图1)。其中苏里格气田探明和基本探明储量截止2012年底已达到 $3.49 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。然而,有关鄂尔多斯盆地天然气成

收稿日期:2013-03-31;修订日期:2013-08-15。

第一作者简介:李军(1982—),男,讲师,油气成藏地质学、非常规油气地质与勘探。E-mail:lijun@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家大型油气田与煤层气开发项目(2011ZX05007-004);西安石油大学青年科技创新基金项目(2013BS018)。

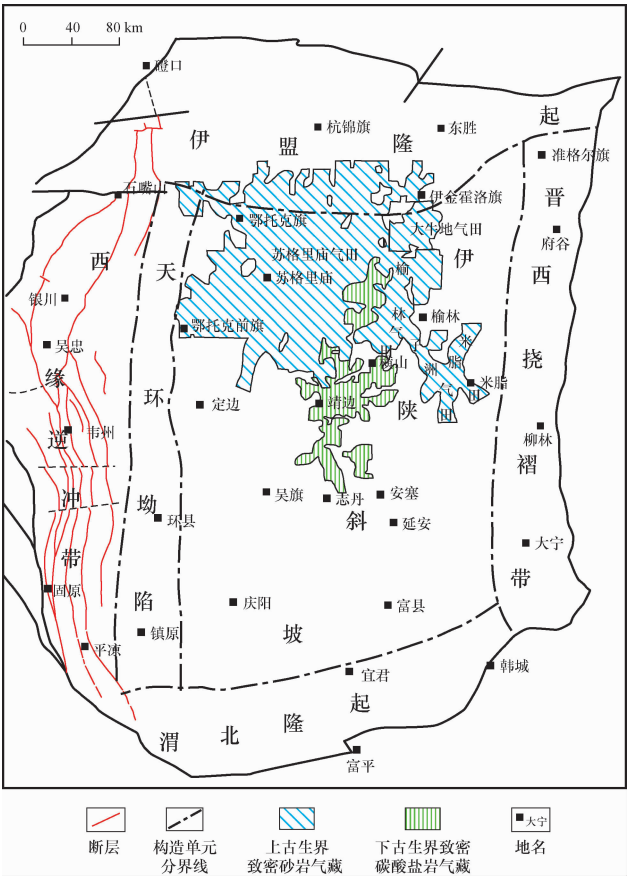


图1 鄂尔多斯盆地构造单元及气田分布图

Fig.1 Structural units and gas filed locations in Ordos Basin

藏模式和运移特征等问题的认识,还存在争议。其中对天然气成藏模式的认识,在经历了岩性气藏理论^[1-3]、深盆气(盆地中心气)理论^[4-6]和连续型油气聚集理论^[7-8]之后,赵靖舟等近年来提出了准连续型油气聚集理论^[9-11],并引起了学术界的广泛关注和逐渐认可。而对于上古生界天然气运移的认识,目前仍然存在以下3种观点:1)长距离侧向运移论。持这种观点的研究者主要为深盆气论者,因为按照典型的深盆气形成机理,天然气自生烃中心进入储层后,要通过持续长距离侧向运移才能将储层孔隙中的水以“活塞式”排驱至构造上倾部位,形成气水倒置面貌^[5-6];2)早期长距离运移,晚期近距离运移聚集。持这种观点的研究者主要以上古生界储层致密化的时间为界,认为储层致密前天然气存在大规模侧向运移,储层致密后则主要为就近运移成藏^[12];3)近距离运移论。这是目前最为流行的一种观点,许多研究者曾从天然气地球化学特征^[13-15]、运移动力^[16]等多方面对此观点进行了论证分析。为了搞清鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移规律,本文拟通过对鄂尔多斯盆地上古生界主要产气层段天然气的组分和碳同位素组成研究,结合运移动力、输导条件的分析,就该盆地上古生界致密砂岩大气田天然气的运移特征加以探讨。

1 初次运移和二次运移

1.1 天然气运移地球化学特征

天然气的组分和碳同位素组成既与源岩母质类型有关,同时有机质的热演化程度以及天然气运聚成藏方式也对其有重要影响。在源岩母质类型相同的情况下,随着烃源岩成熟度的增加,天然气的甲烷含量、甲烷与乙烷含量比值(C_1/C_2)、干燥系数、碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值均增大^[17-19]。而随着运移距离的增加,甲烷含量、甲烷与乙烷含量比值(C_1/C_2)升高, $\delta^{13}C_1$ 却变轻, $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值减小^[20-24]。

图2为鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩大气田各主力产气层段的甲烷含量、干燥系数、 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值与上古生界烃源岩 R_o (镜质体反射率)相关图。从图中可以看出,盒8段、山1段、山2段和太原组天然气甲烷含量、干燥系数、 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值与上古生界烃源岩 R_o 均呈较好的正相关关系,表现在随着上古生界烃源岩成熟度(R_o)的增加,天然气甲烷含量和干燥系数变高、 $\delta^{13}C_1$ 变重、 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值增大。其中,山1段、山2段和太原组天然气甲烷含量、干燥系数、 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值与上古生界烃源岩 R_o 的正相关关系最好,尤其是 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值。盒8段天然气甲烷含量和干燥系数与上古生界烃源岩 R_o 相关性相对较差,但 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值与上古生界烃源岩 R_o 仍具有较好的相关性,可能主要是由于山1段、山2段和太原组紧邻上古生界烃源岩,盒8段垂向上距离上古生界烃源岩相对较远,天然气运移成藏过程对甲烷含量、干燥系数产生了一定的影响所致。此外,前人研究成果也显示鄂尔多斯盆地上古生界天然气成熟度与下伏源岩成熟度具有较好的一致性,差值均小于0.4%^[25]。由此可知,鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩大气田各主力产气层段平面上甲烷含量、干燥系数、 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值主要受其主力烃源岩热演化程度的控制,并非天然气侧向运移引起的运移分馏效应导致,反映天然气未经长距离或较大规模的侧向运移,天然气主要应为近距离运聚成藏。

Prinzhofer和Huc(1995)研究表明,天然气 $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值的分布规律可以综合反映天然气所经历的热演化和次生改造过程(主要是运移成藏过程)^[20](图3)。天然气未经次生改造过程或次生改造过程较弱时,组分和碳同位素组成的差异主要受烃源岩成熟度控制, $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值均随着烃源岩成熟度的增加而升高,即 $\ln(C_1/C_2)$ 与 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 呈良好的正相关关系,如琼东南盆地崖城气田^[26]和

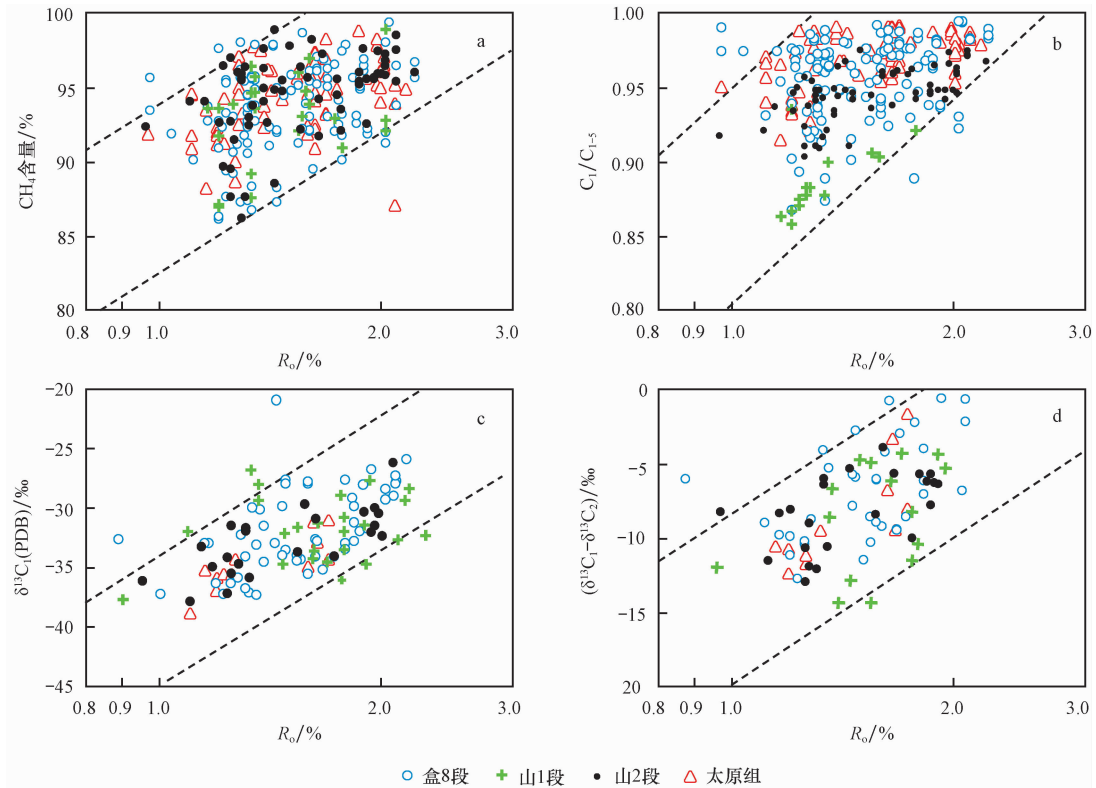


图2 鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩成熟度与天然气甲烷含量(a)、干燥系数(b)、甲烷碳同位素(c)和甲烷、乙烷碳同位素差值(d)相关图

Fig. 2 Correlation diagram between maturity of source rocks (R_o) and CH_4 content (a), C_1/C_{1-5} (b), $\delta^{13}C_1$ (c) and $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ (d) of gases from the Upper Paleozoic in Ordos Basin

塔里木盆地依南2气田^[27]。天然气遭受散失作用,包括散失再运移成藏过程,特别是遭受强烈扩散散失作用时, $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值的分布会偏离正常成熟度演化趋势,表现为 $\ln(C_1/C_2)$ 值降低, $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值则相对升高,如四川盆地卧龙河气田^[28]。生物降

解作用成因甲烷的混合作用会导致 $\ln(C_1/C_2)$ 值升高, $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值则相对降低。

鄂尔多斯盆地上古生界致密大气田盒8段、山1段、山2段和太原组天然气 $\ln(C_1/C_2)$ 值变化范围较小,在2.5~5.5,而 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值变化较大,在-3‰~-15‰,总体上各主力产气层段天然气 $\ln(C_1/C_2)$ 值随着 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 值的增加而增加,呈较好的正相关关系(图3),分布趋势与Prinzhofer和Huc(1995)^[20]确定的未遭受较强次生改造作用天然气一致,表明平面上天然气组分和碳同位素组成的差异主要由上古生界烃源岩成熟度差异所致。这进一步说明鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩大气田的天然气未经长距离或较大规模的侧向运移,具有近距离运聚成藏的特征。

1.2 长距离侧向运移输导条件与动力

鄂尔多斯盆地构造稳定,区内断裂、不整合面等相对高效的运移输导体系不发育,石炭系-二叠系运载层又以海陆过渡相沉积及河流-三角洲沉积为主,横向岩性物性变化大,非均质性强,连通性差^[29]。因此,鄂尔多斯盆地上古生界实际上并不具备天然气大规模长距离侧向运移的输导条件。

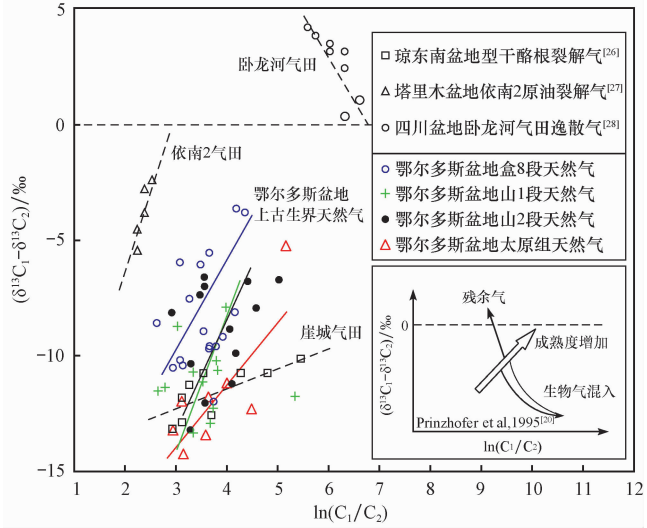


图3 中国主要含油气盆地天然气 $\ln(C_1/C_2)$ 与 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 相关图

Fig. 3 Plot of $\ln(C_1/C_2)$ vs. $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ for gases from the main petroliferous basins in China

另一方面,鄂尔多斯盆地上古生界致密气也不具备长距离侧向二次运移的动力条件。众所周知,油气二次运移的主要动力是浮力。但鄂尔多斯盆地上古生界天然气自早白垩世成藏以来地层极其平缓,且天然气主成藏期储层已经致密化^[15,30-33],其中仅存极其少量的地层水,因而不可能形成强大的浮力。现今上古生界气藏普遍缺乏边底水即是浮力作用受限的一个重要证据。另外,据计算,由于鄂尔多斯盆地上古生界气藏气层连续厚度一般小于10 m,地层倾角小于1°,因此气层厚度基本上代表了气柱高度,产生的浮力一般小于0.1 MPa,而上古生界这套低渗储集层一般在孔隙度为10%、渗透率为 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时排驱压力就达到了0.5 MPa,气柱产生的浮力难以突破排驱压力^[31-32,34-35]。

综合分析认为,鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气主要为初次运移直接成藏或经短距离二次运移而成藏,初次运移、垂向排驱、大面积充注是其运移成藏的主要方式。

2 天然气运移动力和方式

由前述分析可知,鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气主要为初次运移直接成藏。研究表明,其运移的动力主要有两个来源:一是烃源岩内因生烃而产生的超压,二是存在于源岩与储层间的烃浓度梯度。由超压引起的天然气运移主要表现为幕式涌流运移,而由烃浓度梯度造成的天然气运移即为扩散运移。

2.1 异常压力与幕式涌流运移

烃源岩生烃作用形成的异常压力在致密砂岩气运移成藏中的作用早在20世纪80年代就已经被人们广泛认识^[36-37]。

鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩存在古超压的现象已为不少研究者所揭示。如杨华等(2004)根据盆地模拟研究认为,山西组和太原组烃源岩在早白垩世末进入生排气高峰期,压力系数高达1.6~1.7^[38];李剑等(2005)采用流体包裹体 pVT 模拟方法研究认为,盆地中东部地区山2段在早白垩世末的古压力为34~46 MPa,压力系数为1.05~1.40,普遍大于1.20^[39]。赵靖舟等(2012)通过泥岩压实研究、包裹体古压力恢复以及盆地模拟分析也表明,鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩层段天然气主充注成藏期普遍都存在古超压,过剩压力幅度一般为5~30 MPa^[9]。

由于超压在鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩生烃高峰期时普遍存在,因而成为天然气自烃源岩向储集层运移的主要动力之一。在超压的驱动下,天然气主要

以涌流的方式进行运移。涌流式运移表现为流体沿裂缝的爆发式快速向外流动,是因生烃作用等形成的异常增压积聚到足够强大时,造成岩石破裂,其中的流体在强大的异常压力推动下向外快速涌流。流体自源岩释放后,其中的压力降低,裂缝闭合,源岩内的压力因生烃持续而重新积聚,直到新的破裂形成和涌流发生。因此,这种运移模式具有幕式、快速的特点。

在这种快速、幕式涌流运移的过程中,一方面,天然气不仅单组分以分子集群式运移,而且天然气整体也以多组分集群式运移,再加上运移速度较快,从而造成天然气组分和碳同位素很难发生显著的运移分馏作用,这在上古生界生烃体系内的太原组和山西组表现尤为典型。图4为鄂尔多斯盆地东部的榆林-子洲气田天然气组分与深度的关系图。这两个气田的主力气层为太原组、山2段以及下盒8段,山1段以及盒6-盒7段含气性较差。其中太原组、山2段属于生烃体系内的下部成藏组合,气源岩为本溪组、太原组和山2段;山1段、盒8段、盒6-盒7段则属于生烃体系外近源的中部成藏组合。可以看出,这两个气田的天然气 CH_4 含量、 C_2+ (乙烷及以上烷烃)含量、 $i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 以及干燥系数 $\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$ 在垂向上均无明显的变化规律,而表现出混杂分布的面貌,说明运移分馏作用不明显。这种组分的杂乱混合,可能正是天然气近距离、快速涌流式运移的反映。另外,由图4还可以得知,不管哪个含气层段,即使是同一层位,其天然气组分亦无明显变化规律,进一步说明鄂尔多斯盆地上古生界天然气不存在显著的侧向运移。

同时,考虑到鄂尔多斯盆地上古生界天然气组分和碳同位素的平面上差异受上古生界烃源岩成熟度的控制作用很强(图2),为了尽可能的降低上古生界烃源岩成熟度对纵向上各产气层段天然气组分和碳同位素变化规律的影响,本文在对天然气组分和碳同位素纵向变化规律(图4,图5)的分析时,尽量选取成熟度差异较小的样品。西部苏里格气田所选样品对应的石炭系-二叠系烃源 R_o 主要在1.6%~2.0%,东部榆林气田、子洲气田分析样品对应的石炭系-二叠系烃源岩除了少量样品成熟度较高, R_o 在1.4%~1.8%以外,其余地区 R_o 为1.2%~1.4%。

2.2 扩散作用与扩散流动移

理论上讲,鄂尔多斯盆地上古生界天然气具备较好的扩散运移条件。首先,该盆地上古生界储层与烃源岩大面积接触。其次上古生界地层非常平缓,地层倾角小于1°,且区内断裂、不整合面等相对高效油气运移输导体系不发育;加之储层在天然气主充注成藏期已经致密化,纵向上和横向上岩性物性变化大,非均

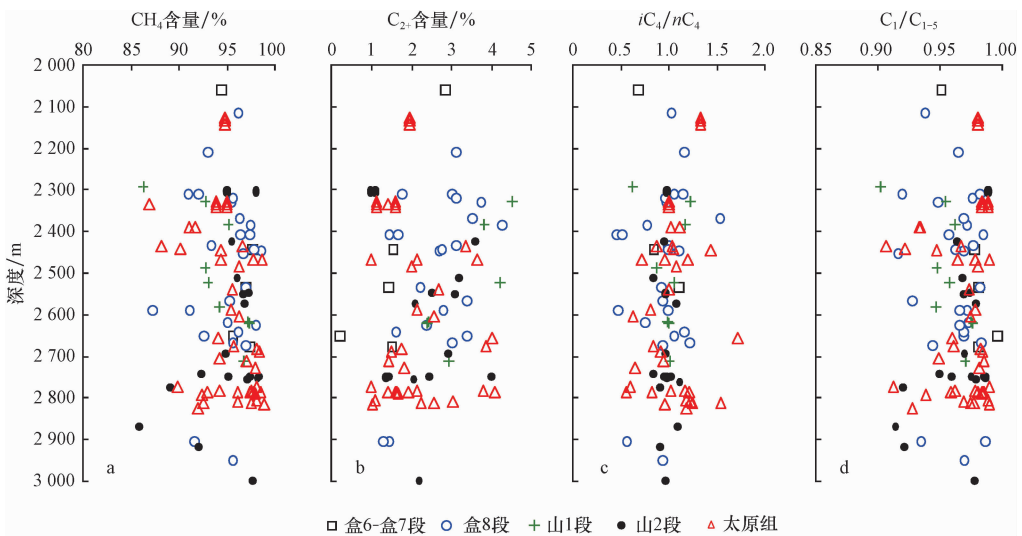


图 4 鄂尔多斯盆地榆林-子洲气田上古生界致密砂岩气层天然气组分垂向分布
Fig. 4 Vertical distribution of gas composition of the Upper Paleozoic tight sandstore gas reservoir in Yulin-Zizhou gas field, Ordos Basin

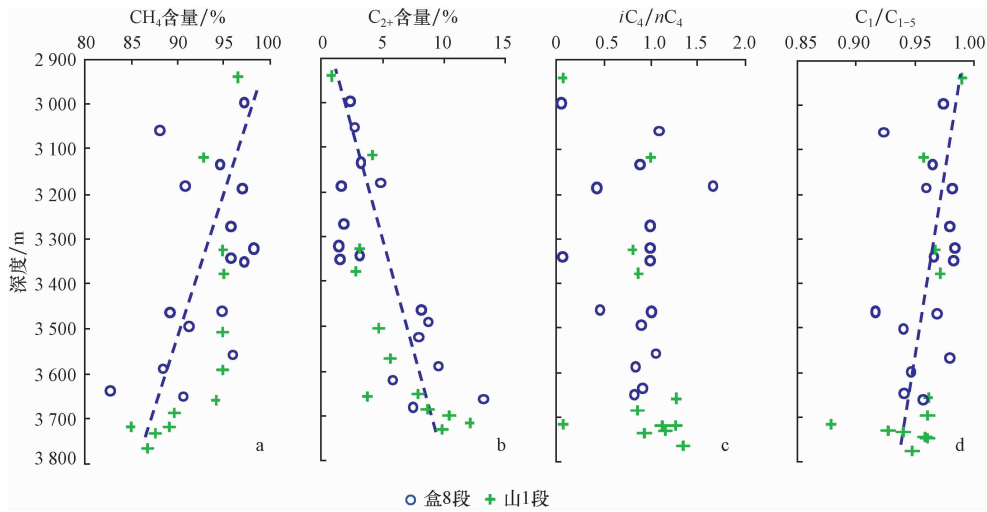


图 5 鄂尔多斯盆地苏里格气田上古生界致密砂岩气层天然气组分垂向分布图
Fig. 5 Vertical distribution of gas composition of the Upper Paleozoic tight sandstore gas reservoir in Sulige gas field, Ordos Basin

质性强,连通性差,以浮力驱动的天然多分子集群式运移受限。在此背景下,上古生界大面积接触的储层与烃源岩之间由于烃浓度的差异必然产生天然气分子自烃源岩向储层的扩散作用,特别是在烃源岩开始大量生烃到生排烃高峰期,由于烃源岩与储层砂岩之间烃浓度差异大,扩散速率较高,扩散量也应较大。

那么,鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气是否发生过显著的扩散运移呢?为了搞清这一问题,首先需要了解扩散作用对天然气组分的影响。研究表明,扩散作用作为天然气的一种单分子运移方式,一旦达到一定规模通常都会产生可识别的组分和同位素分馏效应^[17,20-22,40-42]。其中,天然气组分的分馏主要体现在甲烷含量和干燥系数随着运移距离的增加而增大。就天然气同位素的分馏而言,扩散作用对甲烷碳同位素

的影响主要体现在甲烷碳同位素的明显变轻,而乙烷和其它重烃的碳同位素变化相对较小^[20-22]。在一些充分经历扩散分馏作用的气藏, $\delta^{13}C_1$ 的变轻程度甚至可以达到生物气或细菌气的特征,为此 Prinzhofer 和 Pernaton (1997)^[21]专门撰文论述了两者的鉴别方法。

图 5 为苏里格气田天然气组分随深度的变化情况。首先需要说明,该气田位于鄂尔多斯盆地北部的西部,产气层位主要为生烃体系外的盒 8 段和山 1 段,而位于生烃体系内的山 2、太原组在本区含气性较差。由图 5 可以看出,苏里格气田天然气组分在纵向上具有较明显的的变化规律。表现在由深部到浅部,甲烷含量升高、干燥系数增大、重烃含量降低。前述分析表明,鄂尔多斯盆地内部十分稳定的构造背景和极好的保存条件决定了盆地内部天然气不可能发生广泛的次

生改造。那么,上述天然气组分自山1段到盒8段的明显变化,就只能解释为运移分馏效应。如前所述,浮力对鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移所起的作用十分有限,因而由此产生的体积流(达西流)不是盆地内天然气运移的主要方式;异常压力产生的幕式涌流(非达西流)又速度太快以致无法产生明显的运移分馏效应。因此,造成苏里格气田天然气组分垂向上发生有规律变化的最可能原因就是扩散作用。在扩散作用下,分子最小最轻的甲烷优先向上运移,造成甲烷含量向上增加,重烃含量相对升高,干燥系数变大。

鄂尔多斯盆地上古生界天然气碳同位素纵向上变化特征同样反映了扩散运移的存在(图6)。从图6中可以看出,位于盆地东部的榆林-子洲气田尽管其天然气组分在垂向上并无明显的变化规律,但其生烃体系外的山1段、盒8段和盒6-盒7段的天然气甲烷和乙烷碳同位素均向上呈变轻趋势。前已述及,天然气碳同位素特征主要受成气母质类型、成熟度和运移成藏过程的影响。而根据Katz(2002)研究成果^[43],鄂尔多斯盆地

东部榆林-子洲气田山1段、盒8段和盒6-盒7段天然气在 $1/C_n-\delta^{13}C$ 图版上的线性分布样式则表明其既不存在较大的成气母质差异,也不存在较大的成熟度差异,相反主要为同一成气母质在同一成熟阶段生成的同生天然气(图7a)。因此,纵向上天然气甲烷和乙烷的碳同位素的规律变化主要为运移分馏所致,同时鄂尔多斯盆地东部榆林-子洲气田与西部苏里格气田一样亦不存在浮力作用的条件,所以榆林-子洲气田山1段、盒8段和盒6-盒7段天然气纵向上甲烷和乙烷的碳同位素的规律变化主要为扩散运移分馏所致。

与东部的榆林-子洲气田不同,西部的苏里格气田天然气乙烷碳同位素虽然向上也呈变轻趋势,但甲烷碳同位素除了少数几个样品外,却总体呈向上变重的趋势(图6),这似乎与前述一些研究者得出的扩散造成的天然气甲烷碳同位素分馏效应正好相反。进一步的研究表明,苏里格气田天然气甲烷碳同位素总体呈向上变重的趋势也是天然气长期扩散运移的结果。同样是在 $1/C_n-\delta^{13}C$ 图版上,与榆林-子洲气田的线

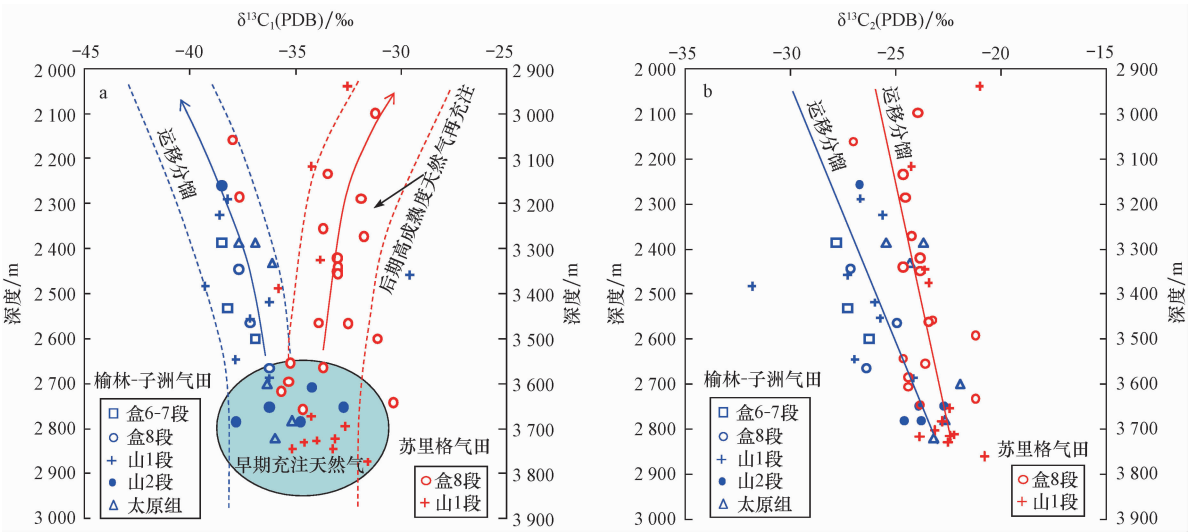


图6 鄂尔多斯盆地榆林-子洲气田与苏里格气田甲烷(a)、乙烷(b)碳同位素对比

Fig. 6 Comparison of $\delta^{13}C_1$ (a) and $\delta^{13}C_2$ (b) between Yulin-Zizhou gas field and Sulige gas filed, Ordos Basin

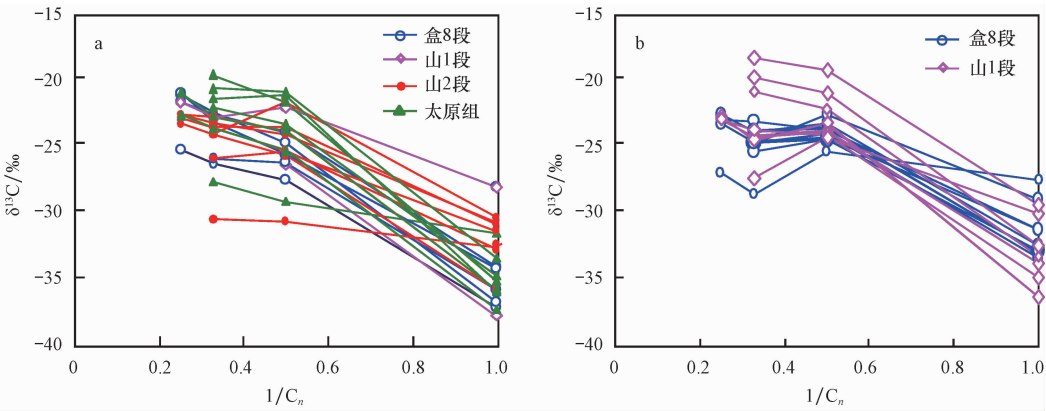


图7 鄂尔多斯盆地榆林-子洲气田(a)和苏里格气田(b)天然气 $1/C_n-\delta^{13}C$ 图版

Fig. 7 Plate of $1/C_n-\delta^{13}C$ for gases from Yulin-Zizhou gas filed(a) and Sulige gas filed(b), Ordos Basin

性分布样式不同,苏里格气田山1段、盒8段天然气丙烷碳同位素均出现明显的倒转现象,表现为在 C_2-C_4 段呈下凹分布样式(图7b)。据Katz(2002)研究^[43], $1/C_n-\delta^{13}C$ 图版上 C_2-C_4 段呈下凹分布主要由生物降解作用或早期较低成熟度天然气与后期大量高成熟度天然气的混合作用造成。显然,鄂尔多斯盆地上古生界并不存在生物降解作用的条件。而扩散作用只要有烃浓度差异就会发生,而且浓度差异越大扩散作用越强烈,因此对于天然气的扩散运移来讲,实际上是一个漫长而且逐渐加强的过程。苏里格气田所在的鄂尔多斯盆地西部,石炭系-二叠系烃源岩成熟度除了西北部较低外,其他地区 R_o 普遍大于1.6%,局部地区 R_o 甚至在2.0%以上。而且随着成熟度的不断增高,生气量变大,烃源岩与山1段、盒8段储层之间的烃浓度差也逐渐增大,因此后期必然有大量高成熟度天然气充注进入储层与早期低成熟度天然气混合。除此之外,甚至在生烃期外的盆地抬升期还可能会有大量吸附在煤系烃源岩中的高成熟度天然气解吸之后扩散进入储层中。但同时天然气碳同位素又是随着成熟度的增加而变重的。因此,本文认为苏里格气田天然气甲烷碳同位素总体呈向上变重的趋势正是天然气长期扩散运移的佐证。

可见,无论是苏里格气田山1段和盒8段,还是榆林-子洲气田的山1段、盒8段以及盒6-盒7段均存在明显的天然气扩散运移现象。事实上,对于生烃体系外的致密砂岩气藏来说,天然气的扩散运移成藏可能是一种普遍存在的重要运移方式。但不同类型的天然气碳同位素分馏效应存在差异。对于同生天然气而言,由于气源碳同位素差异很小,随着运移距离的增加,天然气甲烷、乙烷碳同位素均呈变轻的趋势,这与前人研究的成果是一致的,如榆林-子洲气田。而对于具有较高成熟度且持续或连续供烃气源的致密砂岩气而言,由于后期高成熟度、具有较重甲烷碳同位素的天然气具有重要贡献,甲烷的运移分馏效应可能主要表现为变重的趋势,乙烷碳同位素由于受烃源岩成熟度影响较小,可能仍然表现为变轻的趋势,如苏里格气田。

2.3 扩散运移贡献估算

那么,扩散作用对鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气藏形成的贡献究竟有多大呢?目前普遍的看法是,扩散运移在油气初次运移和排烃中仅居于次要地位。但也有研究认为,对于天然气而言,扩散作用是初次运移的一种有效方式,其所造成天然气自源岩向外的排出速度足以形成商业性的气田。如Leythaeuser等(1982)对西加拿大盆地中生界高成熟倾气型烃源

岩的研究表明,扩散作用在0.54 Ma的时间内造成 $1\,000\text{ km}^2$,200 m厚的烃源岩排出了 $15\times 10^8\text{ m}^3$ 的甲烷,即扩散的速度为 $1.389\times 10^4\text{ m}^3(\text{m}\cdot\text{km}^2\cdot\text{Ma})$ ^[40]。照此速度,粗略的计算可知,苏里格气田也可通过扩散作用而形成。如前所述,苏里格气田目前探明和基本探明的地质储量为 $3.5\times 10^{12}\text{ m}^3$,含气面积 $4\times 10^4\text{ km}^2$,储量丰度 $0.87\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ 。根据烃源岩和生烃史研究,该气田区上古生界烃源岩也为Ⅲ型干酪根,生烃高峰期自晚侏罗世持续到早白垩世(160~100 Ma)。烃源岩中煤岩厚度在8 m左右,暗色泥岩厚度40 m左右,如果将煤岩生烃能力按照10倍暗色泥岩保守估计,折合成泥岩的烃源岩总厚度在120 m左右。按此计算,在 $4\times 10^4\text{ km}^2$ 的面积内,通过扩散作用可在60 Ma(烃源岩排烃高峰期持续时间)中排出约 $4\times 10^{12}\text{ m}^3$ 的天然气,这与苏里格气田目前发现的储量比较接近。考虑到天然气进入储层聚集后,一方面会通过盖层发生扩散损失,另一方面又有通过烃源岩在生烃高峰期后继续发生缓慢扩散而带来新的天然气的补充,那么上述计算结果反映扩散作用同样可以形成大气田。

以上分析表明,尽管由生烃作用产生的异常高压及其产生的快速涌流是鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移和成藏的主要动力和运移方式,但扩散作用及其产生的扩散流对上古生界准连续型大气田的形成也很重要,尤其是对以生烃体系外的致密砂岩为主力产层的大气田的形成就更为重要。

3 结论

1) 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏既不存在长距离侧向运移产生的地球化学分馏效应,也不存在长距离侧向运移的动力和通道条件,主要为初次运移直接成藏或经短距离二次运移成藏。

2) 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏就近运移成藏的动力主要为气源层在生气高峰期形成的异常高压和广泛存在的烃浓度差异所引起的扩散作用力,浮力作用弱或无。

3) 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏天然气在位于生烃体系内的太原组、山2段主要为异常高压驱动下的幕式涌流运移,从而导致了榆林-子洲气田天然气组分和碳同位素纵向上的杂乱分布;生烃体系外的山1段、盒8段及以上层段扩散作用引起的扩散流运移对于天然气的成藏具有重要贡献,苏里格气田以及榆林-子洲气田山1段及以上层段天然气组分和碳同位素纵向上的规律变化就是其直接反映。

致谢:本文依托的研究工作得到国家大型油气田

与煤层气开发项目(课题编号 2011ZX05007-004)的资助,以及中国石油长庆油田公司的大力支持,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 杨俊杰,李克勤,宋国初,等. 中国石油地质志(卷十二)[M]. 北京:石油工业出版社,1992:490.
Yang Junjie, Li Keqin, Song Guochu, et al. Petroleum geology of China(Volume 12)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992:490.
- [2] 杨华,傅锁堂,马振芳,等. 快速高效发现苏里格大气田的成功经验[J]. 中国石油勘探,2001,6(4):89-94.
Yang Hua, Fu Suotang, Ma Zhenfang, et al. The successful experience of discovering Sulige large gas field quickly and efficiently[J]. China Petroleum Exploration, 2001, 6(4): 89-94.
- [3] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社,2002:228.
Yang Junjie. Tectonic evolution and petroleum distribution of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:228.
- [4] 闵琪,杨华,付金华. 鄂尔多斯盆地的深盆气[J]. 天然气工业,2000,20(6):11-15.
Min Qi, Yang Hua, Fu Jinhua. Deep basin gas in Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(6): 11-15.
- [5] 马新华. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆气特点与成藏机理探讨[J]. 石油与天然气地质,2005,26(2):230-236.
Ma Xinhua. Discussion on characteristics and reservoiring mechanism of deep basin gas in Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 230-236.
- [6] 王涛. 中国深盆气田[M]. 北京:石油工业出版社,2002:296.
Wang Tao. Deep basin gas fields in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:296.
- [7] 邹才能,陶士振,袁选俊,等. 连续型油气藏形成条件与分布特征[J]. 石油学报,2009,30(3):324-331.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 324-331.
- [8] 邹才能,陶士振,侯连华,等. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社,2011:310.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011:310.
- [9] 赵靖舟,付金华,姚泾利,等. 鄂尔多斯盆地连续型致密砂岩大气田成藏模式[J]. 石油学报,2012,32(增刊1):37-52.
Zhao Jingzhou, Fu Jinhua, Yao Jingli, et al. Quasi-continuous accumulation model of large tight sandstone gas field in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 32(S1): 37-52.
- [10] 赵靖舟,白玉彬,曹青,等. 鄂尔多斯盆地连续型低渗透-致密砂岩大油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质,2012,33(6):811-827.
Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing, et al. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: a new pattern for large tight sand oilfields in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 811-827.
- [11] 赵靖舟,曹青,白玉彬,等. 论致密砂岩大油气田成藏模式(摘要)[J]. 高校地质学报,2013,19(增刊):590-591.
Zhao Jingzhou, Cao Qing, Bai Yubin, et al. On the petroleum accumulation models in tight sandstones (abstract) [J]. Journal of Higher Education Geology, 2013, 19(S1): 590-591.
- [12] 杨智,何生,邹才能,等. 鄂尔多斯盆地北部大牛地气田成岩成藏耦合关系[J]. 石油学报,2010,31(3):373-378.
Yang Zhi, He Sheng, Zou Caineng, et al. Coupling relationship between reservoir diagenesis and natural gas accumulation of Daniudi Gas Field in the north Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 373-378.
- [13] 付金华,魏新善,黄道军. 鄂尔多斯大型含煤盆地岩性气藏成藏规律与勘探技术[J]. 石油天然气学报,2005,27(1):137-141.
Fu Jinhua, Wei Xinshan, Huang Daojun. Law of reservoir formulation and exploration techniques of natural gas lithologic reservoir in Ordos Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(1): 137-141.
- [14] 杨华,魏新善. 鄂尔多斯盆地苏里格地区天然气勘探新进展[J]. 天然气工业,2007,27(12):6-11.
Yang Hua, Wei Xinshan. New progress achieved by natural gas exploration in Sulige area[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(12): 6-11.
- [15] 刘新社,周立发,侯云东. 运用流体包裹体研究鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏[J]. 石油学报,2007,28(6):37-42.
Liu Xinshe, Zhou Lifa, Hou Yundong. Study of gas charging in the Upper Paleozoic of Ordos Basin using fluid inclusion[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 37-42.
- [16] 李仲东,郝蜀民,惠宽洋,等. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏与深盆气藏成藏机理之辨析[J]. 矿物岩石,2009,29(1):86-92.
Li Zhongdong, Hao Shuming, Hui Kuanyang, et al. Discussion on relation of gas accumulation mechanism between deep basin and Upper Paleozoic in the Ordos Basin[J]. Journal of Mineral Petrology, 2009, 29(1): 86-92.
- [17] Lorant F, Prinzhofer A, Behar F, et al. Carbon isotopic and molecular constraints on the formation and the expulsion of thermogenic hydrocarbon gases[J]. Chemical Geology, 1998, 147(3-4): 249-264.
- [18] Chung H M, Sackett W M. Use of stable carbon isotope compositions of pyrolytically derived methane as maturity indices for carbonaceous material[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43(12): 1979-1988.
- [19] Chung H M, Gormly J R, Squires R M. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environment; theoretical considerations of carbon isotope distribution [J]. Chemical Geology, 1988, 71(1-3): 97-103.
- [20] Prinzhofer A, Huc A Y. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases[J]. Chemical Geology, 1995, 126(3-4): 281-290.
- [21] Prinzhofer A, Pernaton E. Isotopically light methane in natural gas: bacterial imprint or diffusive fractionation [J]. Chemical Geology, 1997, 142(3-4): 193-200.
- [22] Prinzhofer A, Mello M R, Takaki T. Geochemical characterization of natural Gas: a physical multivariable approach and its applications in maturity and migration estimates[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(8): 1152-1172.
- [23] Zou Y R, Wang L Y, Shuai Y H, et al. Easy delta: a spreadsheet for kinetic modeling of the stable carbon isotope composition of natural gases[J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(1): 811-819.
- [24] Pernaton E, Prinzhofer A, Schneider F. Reconsideration of methane signature as a criterion for the genesis of natural gas: influence of mi-

- gration on isotopic signature[J]. *Oil & Gas Science and Technology*, 1996, 51(5): 635–651.
- [25] 陈安定, 张文正, 徐永昌. 沉积岩成烃热模拟实验研究产物的同位素特征及应用[J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(2): 209–217.
Chen, An' ding, Zhang Wenzheng, Xu Yongchang. The sedimentary rock hydrocarbon generation thermal simulation experimental research on isotope characteristics of products and applications [J]. *China Science(Series B)*, 1993, 23(2): 209–217.
- [26] Hao F, Guo T L, Zhu Y M, et al. Evidence for multiple stages of oil cracking and thermochemical sulfate reduction in the Puguang gas field, Sichuan Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(5): 611–637.
- [27] Zhao W Z, Zhang S C, Wang F Y, et al. Gas accumulation from oil cracking in the eastern Tarim Basin: a case study of the YN2 gas field [J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(12): 1602–1616.
- [28] Cai C F, Worden R H, Bottrell S H, et al. Thermochemical sulphate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China [J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(1–2): 39–57.
- [29] 叶成林, 王国勇, 何凯, 等. 苏里格气田储层宏观非均质性——以苏53区块石盒子组8段和山西组1段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(2): 236–244.
Ye Chenglin, Wang Guoyong, He Kai, et al. Macro heterogeneity of reservoirs in Sulige gasfield—a case study of the 8th member of the Shihezi Formation and the 1st member of the Shanxi Formation in the Su53 Block [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(2): 236–244.
- [30] 付金华, 魏新善, 任军峰. 伊陕斜坡上古生界大面积岩性气藏分布与成因[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(6): 664–667.
Fu Jinhua, Wei Xinshan, Ren Junfeng. Distribution and genesis of large-scale Upper Paleozoic lithologic gas reservoirs on Yi-Shaan Slope [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(6): 664–667.
- [31] 赵文智, 汪泽成, 朱怡翔, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田低效气藏的形成机理[J]. *石油学报*, 2005, 26(5): 5–9.
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Zhu Yixiang, et al. Forming mechanism of low-efficiency gas reservoir in Sulige gas field of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 5–9.
- [32] 李仲东, 惠宽洋, 李良, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移特征及成藏过程分析[J]. *矿物岩石*, 2008, 28(3): 77–83.
Li Zhongdong, Hui Kuanyang, Li Liang, et al. Analysis of characteristics of gas migration and reservoir-forming in the Upper Paleozoic of northern Ordos Basin [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 2008, 28(3): 77–83.
- [33] 蒙晓灵, 张宏波, 冯强汉, 等. 鄂尔多斯盆地神木气田二叠系太原组天然气成藏条件[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(1): 37–41.
Meng Xiaoling, Zhang Hongbo, Feng Qianghan, et al. Gas accumulation conditions of the Permian Taiyuan Formation in Shenmu gas field, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(1): 37–41.
- [34] 王晓梅, 赵靖舟, 刘新社, 等. 苏里格气田西区致密砂岩储层地层水分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(5): 802–810.
Wang Xiaomei, Zhao Jingzhou, Liu Xinshe, et al. Distribution of formation water in tight sandstone reservoirs of western Sulige gas field, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(5): 802–810.
- [35] Berg R P. Capillary pressure in stratigraphic trap [J]. *AAPG Bulletin*, 1975, 59(4): 939–956.
- [36] Law B E, Dickinson W W. Conceptual model for origin of abnormally pressured gas accumulations in low-permeability reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(8): 1295–1304.
- [37] Spencer C W. Hydrocarbon generation as a mechanism for overpressuring in the Rocky Mountain region [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(4): 368–388.
- [38] 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*, 2004, 29(4): 413–419.
Yang Hua, Ji Hong, Li Zhenhong, et al. Characteristics of underpressured gas pool in Upper Paleozoic Shiqianfeng Formation of Eastern Ordos Basin [J]. *Journal of Earth Science*, 2004, 29(4): 413–419.
- [39] 李剑, 罗霞, 单秀琴, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏特征[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 54–59.
Li Jian, Luo Xia, Shan Xiuqin, et al. Natural gas accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 54–59.
- [40] Leythaeuser D, Schaefer R G, Yukler A. Role of diffusion in primary migration of hydrocarbons [J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(4): 408–429.
- [41] Xia X Y, Tang Y C. Isotope fractionation of methane during natural gas flow with coupled diffusion and adsorption desorption [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 77(1): 489–503.
- [42] Zhang T W, Krooss B M. Experimental investigation on the carbon isotope fractionation of methane during gas migration by diffusion through sedimentary rocks at elevated temperature and pressure [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(16): 2723–2742.
- [43] Katz B J. Gas geochemistry—a key to understanding formation and alteration processes [C] // *Proceedings, Indonesian Petroleum Association Twenty-Eighth Annual Convention & Exhibition (V1)*, 2001: 789–802.

(编辑 张亚雄)