

鄂尔多斯盆地西北部奥陶系气源及其成藏规律

赵靖舟^{1,2},王大兴³,孙六一³,包洪平³,肖晖¹,吴伟涛¹,陈永波¹

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065; 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; 3. 中国石油 长庆油田分公司 勘探开发研究院,陕西 西安 710029)

摘要:为了分析鄂尔多斯盆地西北部奥陶系已发现气藏的气源,探讨该区奥陶系天然气藏的分布规律,综合利用地球化学实验分析与石油地质综合研究,对研究区天然气组分进行了分析。研究表明,研究区奥陶系天然气干燥系数在0.958~0.986。气源分析认为,奥陶系天然气主要为来自石炭系-二叠系煤系烃源岩生成的煤成气,但不排除有奥陶系海相气源的少量混入。奥陶系烃源岩分析结果亦支持这一结论。研究区奥陶系泥岩和碳酸盐岩的有机质丰度普遍不高。其中,泥岩有机碳含量以乌拉力克组为最高,平均为0.54%;其次是克里摩里组泥岩,平均0.52%;拉什仲组泥岩最低,平均为0.43%;灰岩有机碳含量3个组的平均值分别为0.35%,0.31%和0.25%。综合分析表明,鄂尔多斯盆地西北部奥陶系天然气藏的形成和分布主要受构造、储层、盖层、优质烃源岩及天然气运移通道5大因素控制,天然气主要富集在以下5要素的耦合处:斜坡高部位、溶蚀缝洞储层发育带、乌拉力克组-拉什仲组盖层分布区、优质烃源岩有利区及上古生界天然气“倒灌”运移通道发育区。

关键词:烃源岩;气藏形成;地球化学;奥陶系;天然气;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Origin of the Ordovician gas and its accumulation patterns in Northwestern Ordos Basin

Zhao Jingzhou^{1,2}, Wang Daxing³, Sun Liuyi³, Bao Hongping³, Xiao Hui¹, Wu Weitao¹, Chen Yongbo¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710029, China)

Abstract: In order to determine the source of natural gas and to reveal the factors controlling the accumulation and distribution of natural gas in the Ordovician reservoirs of the study area, we studied the composition of the natural gas through geochemical analysis and comprehensive geologic studies. The Ordovician gases are revealed to be entirely dry gas and their dryness indices range from 0.958 to 0.986. Geochemical analysis indicates that the Ordovician gases are mostly derived from the Carboniferous-Permian coal measure source rocks, whereas the marine Ordovician source is assumed to be a minor contribution. This is also supported by the Ordovician source rock analysis, which has revealed that the organic matter content of the mudstones and the carbonates is commonly not high. The average TOC of the mudstones in the Wulalike, Kelimoli, Lashizhong formations are only 0.54%, 0.52% and 0.43%, respectively, and that of the carbonates in the above three formations are 0.35%, 0.31% and 0.25%, respectively. Comprehensive studies suggest that the gas accumulation and distribution is principally controlled by structure, reservoirs, cap rocks, quality source rocks and migration pathways. Gases mainly enrich in places where the following 5 factors couple, namely structural highs of the slope, highly developed reservoirs with dissolution fractures and vugs, cap rocks of the Wulalike and Lashizhong formations, quality source rocks, and migration pathways for downward charging of gas from the Upper Paleozoic source rocks.

Key words: source rocks, gas accumulation, geochemistry, Ordovician, natural gas, Ordos Basin

研究区位于鄂尔多斯盆地天环坳陷的北部,西侧到达西缘逆冲带,东至定边—鄂托克旗一线,北部

收稿日期:2014-11-03;修订日期:2015-07-20。

第一作者简介:赵靖舟(1962—),男,教授,油气成藏地质学、非常规油气地质与勘探。E-mail: jzhaoh@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05007-004)。

与伊盟隆起相接,面积约 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。该区奥陶系钻揭地层包括下奥陶统三道坎组(O_1s)、中奥陶统桌子山组(O_2zh)、克里摩里组(O_2k)和上奥陶统乌拉力克组(O_3w)、拉什仲组(O_3l)。其中桌子山组为厚层状灰质白云岩和白云质灰岩;克里摩里组以深灰色-灰色泥晶灰岩夹薄层白云岩、黑色页岩、泥灰岩为主,夹有角砾灰岩、浊积岩等;乌拉力克组主要为黑色泥岩,灰黑色、灰绿色含硅质页岩、泥质云岩夹泥晶灰岩;拉什仲组主要为泥灰岩和页岩,含生物碎屑,产笔石。

鄂尔多斯盆地自1989年发现靖边气田以来,奥陶系的勘探工作和地质研究主要集中在位于盆地中部的靖边气田及其周围地区,对于盆地西部奥陶系的研究也多集中在构造、储层、烃源岩等方面,天然气气源特别是成藏方面的研究则很少。而且,靖边气田自发现起,其气源问题一直存在争议。进入本世纪以来,随着天然气地球化学资料和奥陶系烃源岩资料的日益丰富,对靖边气田奥陶系气藏气源问题的探讨不断深化。根据奥陶系天然气地球化学特征和气源对比分析,目前多数研究者认为,靖边气田为煤成气与油型气的混源气,以煤成气为主,气源主要来自上古生界煤系地层^[1-8]。但也有少数研究者认为该气田天然气主要为油型气,混有少量煤成气,气源主要为奥陶系海相烃源岩^[9-11]。还有研究者认为,靖边气田奥陶系天然气的

混源比例因不同地区乃至不同井区而异。如程付启等^[12]在确认靖边气田奥陶系天然气为混源气的同时,指出其不同井区煤成气与油型气的混合比例差异很大,反映成藏比较复杂。Li Xianqing等^[13]同样肯定靖边气田奥陶系风化壳气藏为混源气,但认为其中的煤成气主要产自气田东部地区,而油型气可能主要产于气田的北、西、南部地区。另有部分研究者从烃源岩和成藏研究的角度,得出靖边气田奥陶系天然气主要为奥陶系烃源岩生成的结论^[14-15]。这种认识的依据是,鄂尔多斯盆地中东部地区奥陶系烃源岩不发育^[16],而西部和南部盆缘地区中-上奥陶统平凉组-背锅山组发育有效乃至优质烃源岩^[14,17-22],另外盆地中央古隆起及其附近发现有奥陶系古油藏的存在^[15,22-23],由此认为靖边气田奥陶系天然气是来自盆地西部和南部奥陶系烃源岩生成的天然气或者/以及来自中央古隆起区古油藏形成的天然气,向东侧大规模运移形成的。近年来,又提出盆地中东部奥陶系马家沟组盐下(主要是马五段、马三段)发育有效烃源岩^[21-22],暗示其对靖边气田奥陶系气藏形成具有一定乃至重要贡献。但杨华等^[6]、姚泾利等^[24]认为,马家沟组盐下烃源岩单层厚度小(一般小于1 m)、有机质丰度低,与上古生界煤系烃源岩相比较,奥陶系海相烃源岩对成藏的贡献应当非常有限。可见,盆地中东部地区奥陶系马家沟组盐下是否发育足以形成较大规模天然气聚集的烃源岩仍不确定。在此情况下,盆地西部和南部奥陶系烃源岩的发育情况不仅对该地区天然气藏形成具有重要意义,而且对于分析盆地内部奥陶系天然气藏的形成也具有重要意义。

近年来,鄂尔多斯盆地西北部奥陶系勘探取得了新突破,在天环坳陷北部钻探的余探1井、余探2井两口井获得日产天然气超过 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$,还有多口井获得低产气流或油气显示。发现的产气层位主要为克里摩里组,除此外个别井在拉什仲组、乌拉力克组、桌子山组也有产气发现。本文拟根据新获得的勘探资料和地质地球化学资料就研究区奥陶系的气源以及气藏的形成和富集规律加以探讨。

1 奥陶系气源

1.1 天然气组分特征对比

鄂尔多斯盆地西北部奥陶系天然气以烃类气体为主,占87.02%~98.94%,非烃气含量仅占1.058%~12.979%。非烃气的主要成分为 CO_2 、 H_2 和 N_2 ,几乎不含 H_2S (表1)。重烃组分 $\text{C}_2\text{—C}_4$ 占1.363%~1.962%,干燥系数在0.948~0.986,全为干气。而同区上古生

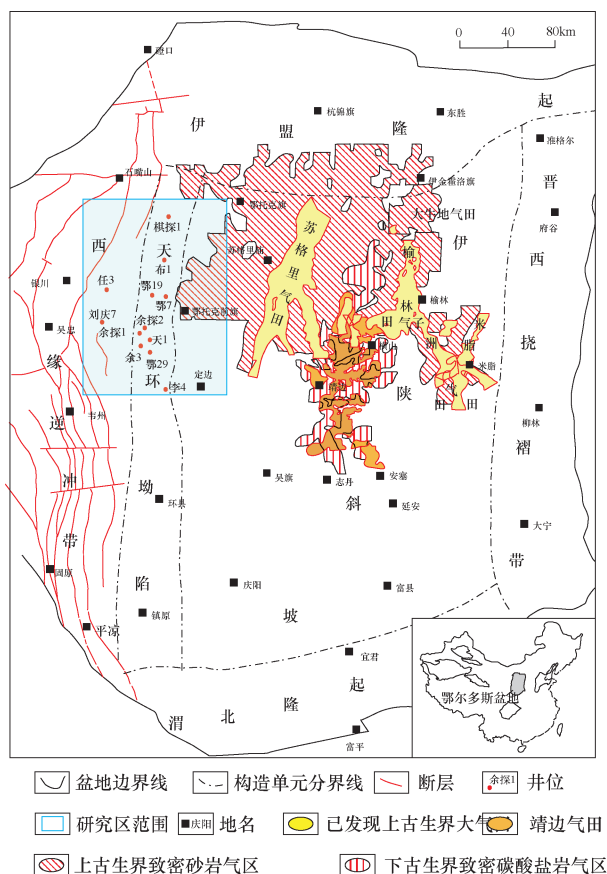


图1 鄂尔多斯盆地研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area in Ordos Basin

表1 鄂尔多斯盆地西北部奥陶系天然气组分特征

Table 1 Composition of the Ordovician gases in the northwestern Ordos Basin

井名	层位	深度/m	天然气组分含量/%								干燥系数
			CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄	nC ₄	CO ₂	H ₂	N ₂	
余探1	O ₃ w	3 936.5 ~ 3 979.0	84.968	1.777	0.218	0.025	0.021	8.396	0	4.583	0.976
余探1	O ₂ k	4 040.0 ~ 4 085.0	94.974	3.254	0.430	0.168	0.115	0.209	0.029	0.820	0.960
余探1	O ₂ k	4 040.0 ~ 4 045.0	96.224	1.233	0.130	0.000	0.000	0.913	0.019	1.481	0.986
余探2	O ₂ k	3 984.0 ~ 3 988.0	92.798	3.516	0.388	0.059	0.057	1.547	0.044	1.591	0.958
鄂29	O ₂ zh	4 245.0 ~ 4 250.0	94.014	4.369	0.567	0.000	0.000	0.207	0.020	0.825	0.950
李2	O ₂ k	3 966.3 ~ 4 016.0	91.002	4.331	0.631			2.482	0.198	1.356	0.948
苏357	O ₂ k	3 948.5 ~ 3 961.0	94.273	3.232	0.801	0.381	0.254	0.718	0.066	0.271	0.953
天1	O ₂ k	3 883.2 ~ 3 890.0	94.090	2.240	0.160	0.060	0.050	1.650	0.090	1.660	0.974

注: O₃w 为上奥陶统乌拉力克组; O₂k 为中奥陶统克里摩里组; O₂zh 为中奥陶统桌子山组。

界天然气组分中几乎全部为烃类气体, 占 97.46% ~ 99.75%, 非烃气含量极少, 仅占 0.245% ~ 4.863%; 烃类气体组分中甲烷占 90.41% ~ 97.44%, 重烃气占 2.068% ~ 8.698%, 干燥系数在 0.913 ~ 0.979, 反映上古生界天然气湿气和干气均有。可以看出, 研究区奥陶系较上古生界天然气组分总体偏干。

1.2 碳同位素特征对比

从鄂尔多斯盆地西北部天然气碳同位素分布(表2)可知, 无论是上古生界还是奥陶系, 绝大多数天然气样品都呈现出 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 的正序碳同位素分布特征(图2), 反映主体为单源单期原生气的特征。而且, 大部分样品 $\delta^{13}\text{C}_1 > -35\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2 > -28\text{‰}$ 。按照戴金星^[25]提出的判别标准($\delta^{13}\text{C}_2 < -28.5\text{‰}$ 为油型气, $\delta^{13}\text{C}_2 > -28\text{‰}$ 为煤成气, $\delta^{13}\text{C}_2$ 处于两者之间为混合气), 盆地西北部上古生界和奥陶系绝大部分天然气主要都属于裂解型煤成气。应用最新修订的 $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_3$ 判别图版^[26]进行判别, 同样能得出气源为煤成气的结论(图3)。只有少数样品, 如鄂16井(中二叠统下石盒子组 P_{2x})、鄂32井(P_{1t})、苏360井(O₂k)鄂29井(O₂zh)出现乙烷、丙烷碳同位素倒转的情况, 即 $\delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$, 反映可能为同源不同期天然气混合的结果。

另外, 还有两口井3个天然气样品比较特殊, 即色1井(中二叠统上石盒子组 P_{2s})和余探1井(O₂k, O₃w)气样。其中色1井石盒子组天然气甲烷碳同位素很重, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -32.9‰ , 属于煤成气; 而其 $\delta^{13}\text{C}_2$ 很轻, 为 -30.5‰ , 按照乙烷判别标准^[25]判定, 属于油型气。由此判断, 该天然气可能属于煤成气与油型气的混合气。

余探1井2个奥陶系气样的甲烷 $\delta^{13}\text{C}_1$ 分别为 -39.11‰ 和 -38.92‰ (PDB 标准, 下同), 明显比盆地西北部其它样品偏轻, 与盆地东北部子洲气田龙探1井奥陶系盐下天然气甲烷碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_1 =$

表2 鄂尔多斯盆地西北部古生界天然气碳同位素特征

Table 2 Carbon isotope composition of the Ordovician gases in the northwestern Ordos Basin

井号	层位	深度/m	$\delta^{13}\text{C}_1/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_2/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_3/\text{‰}$
余探1	O ₃ w	3 963.5 ~ 3 976	-39.11	-27.26	
余探1	O ₂ k	4 083.0 ~ 4 085.0	-38.92	-27.17	-25.00
余探2	O ₂ k	3 975.0 ~ 4 148.0	-35.06	-25.14	-22.57
天1	O ₂ k	3 934.0 ~ 3 940.4	-34.26	-25.71	-20.45
苏357	O ₂ k	3 948.5 ~ 3 961.0	-33.32	-24.53	-22.94
鄂19	O ₂ k	3 942.0 ~ 3 945.0	-34.64	-27.28	-25.85
苏360	O ₂ k	3 981.0 ~ 3 989.0	-33.29	-21.43	-24.51
鄂29	O ₂ zh	4 245.0 ~ 4 250.0	-27.88	-26.89	-28.87
鄂16	P _{2x} ⁸	3 923.0 ~ 3 926.0	-29.19	-22.44	-23.63
鄂32	P _{1t}	3 856.0 ~ 3 860.0	-31.62	-23.93	-25.68
鄂30	P _{1s} ¹	3 771.0 ~ 3 774.0	-33.23	-23.63	-23.94
苏363	P _{1t}	3 956.5 ~ 3 960.0	-34.82	-24.64	-23.79
苏361	P _{1s} ¹	3 692.0 ~ 3 710.0	-33.71	-24.48	-24.26
苏398	P _{1t}	3 929.9 ~ 3 931.0	-32.36	-24.91	-26.39

注: O₃w 为上奥陶统乌拉力克组; O₂k 为中奥陶统克里摩里组; O₂zh 为中奥陶统桌子山组; P_{2x}⁸ 为中二叠统下石盒子组八段; P_{1s}¹ 为下二叠统山西组一段; P_{1t} 为下二叠统太原组。

-39.26‰)相当。但其乙烷 $\delta^{13}\text{C}_2$ 分别为 -27.26‰ 和 -27.17‰ , 丙烷 $\delta^{13}\text{C}_3$ 为 -25‰ , 重烃碳同位素相对甲烷明显偏重。由于余探1井及盆地西北部古生界天然气的烷烃气系列碳同位素均呈正常序列, 不存在靖边气田那种甲烷、乙烷之间的碳同位素倒转现象, 且其 $\delta^{13}\text{C}_2 > -28\text{‰}$, 因此包括余探1井奥陶系在内的盆地西北部天然气主要都属于单源单期的原生天然气, 据乙烷碳同位素可以判定为煤成气。至于余探1井等甲烷碳同位素明显偏轻的现象, 本文分析认为主要可能与运移分馏作用有关, 但也不排除奥陶系气源贡献的可能(见后文讨论)。

1.3 奥陶系烃源岩评价

目前, 国内外特别是国内对高成熟海相碳酸盐岩烃源岩的评价标准认识分歧较大, 提出的有效烃源岩总

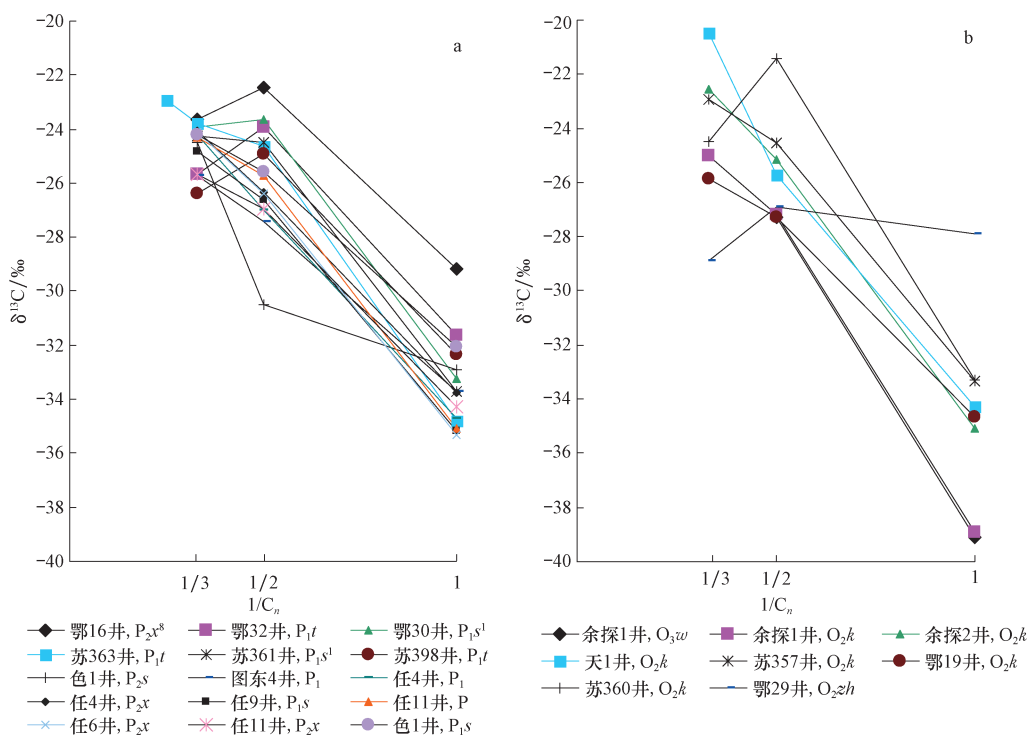


图2 鄂尔多斯盆地西北部上古生界和奥陶系天然气碳同位素分布对比

Fig. 2 Comparison of carbon isotope between the Upper Paleozoic and Ordovician gases from the northwestern Ordos Basin

a. 上古生界; b. 奥陶系

(P_2x^8 为中二叠统下石盒子组八段; P_1t 为下二叠统太原组; P_1s^1 为下二叠统山西组一段; P_2s 为中二叠统上石盒子组; P_1 为下二叠统; P_2x 为中二叠统下石盒子组; P_1s 为下二叠统山西组; O_2zh 为中奥陶统桌子山组; O_3w 为上奥陶统乌拉里克组; O_2k 为中奥陶统克里摩里组)

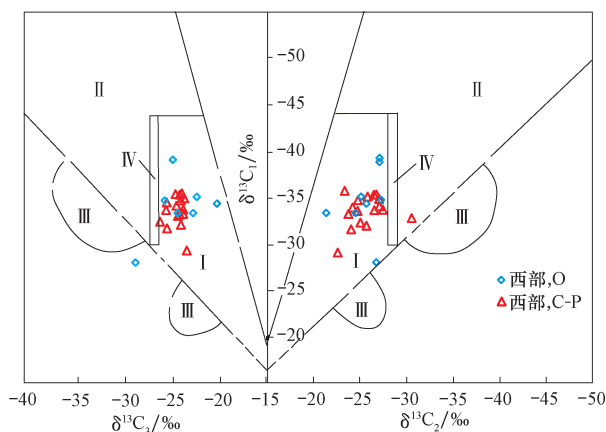


图3 鄂尔多斯盆地西北部古生界天然气成因

 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$ 鉴别图版Fig. 3 A diagnostic diagram of $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$ showing the

origin of natural gases from northwestern Ordos Basin

I. 煤成气区; II. 油型气区; III. 碳同位素系列倒转混合气区;

IV. 煤成气和(或)油型气区

有机碳含量 (TOC) 下限 0.1% ~ 0.5% 不等。金之钧和王清晨^[27]提出海相烃源岩 TOC 生烃下限为 0.5%。最近,郭彦如等^[22]对世界 54 个以碳酸盐岩为烃源岩的大油气田的源岩总有机碳统计表明,96% 的油气田的烃源岩平均 TOC 大于 0.5%, 仅有两个油气田的烃源岩 TOC 小于 0.5%, 最低值为 0.28%, 说明把

0.5% 作为形成大油气田的海相烃源岩 TOC 一般性下限是合理的。本文据此对研究区奥陶系烃源岩进行评价。

研究区奥陶系烃源岩包括碳酸盐岩和泥岩两类, 主要分布于中统克里摩里组与上统乌拉里克组和拉什仲组。克里摩里组烃源岩主要为灰岩, 夹少量泥岩, 发育条件一般。乌拉里克组以大量出现灰黑色泥页岩、灰泥岩为主要特征, 是下古生界主要的烃源岩发育层段。拉什仲组碳酸盐岩和泥岩烃源岩均占一定比例。

根据对研究区奥陶系烃源岩样品实测结果统计分析(图4), 乌拉里克组烃源岩有机质丰度最高, 有机碳平均值为 0.49%, 大于 0.3% 的样品约占 55%, 大于 0.5% 的样品数超过 40%; 其次是克里摩里组, 平均为 0.46%, 超过 0.3% 的占到 53%, 大于 0.5% 的接近 30%; 拉什仲组最低, 平均为 0.39%, 小于 0.3% 的占到 43.8%, 小于 0.5% 的大约接近 80%。

对灰岩和泥岩实测结果分别进行统计, 拉什仲组灰岩有机质丰度以 TOC 小于 0.3% 为主, 占该组测试灰岩样品数的 64.3%; 其次是 TOC 为 0.3% ~ 0.5%, 占 28.6%; TOC 大于 0.5% 的仅占 7.1%; TOC 平均为 0.25%。乌拉里克组灰岩也以 TOC 小于 0.3% 为主, 占 60%; 其次是 TOC 为 0.5% ~ 1.0%, 占 28%; 平均

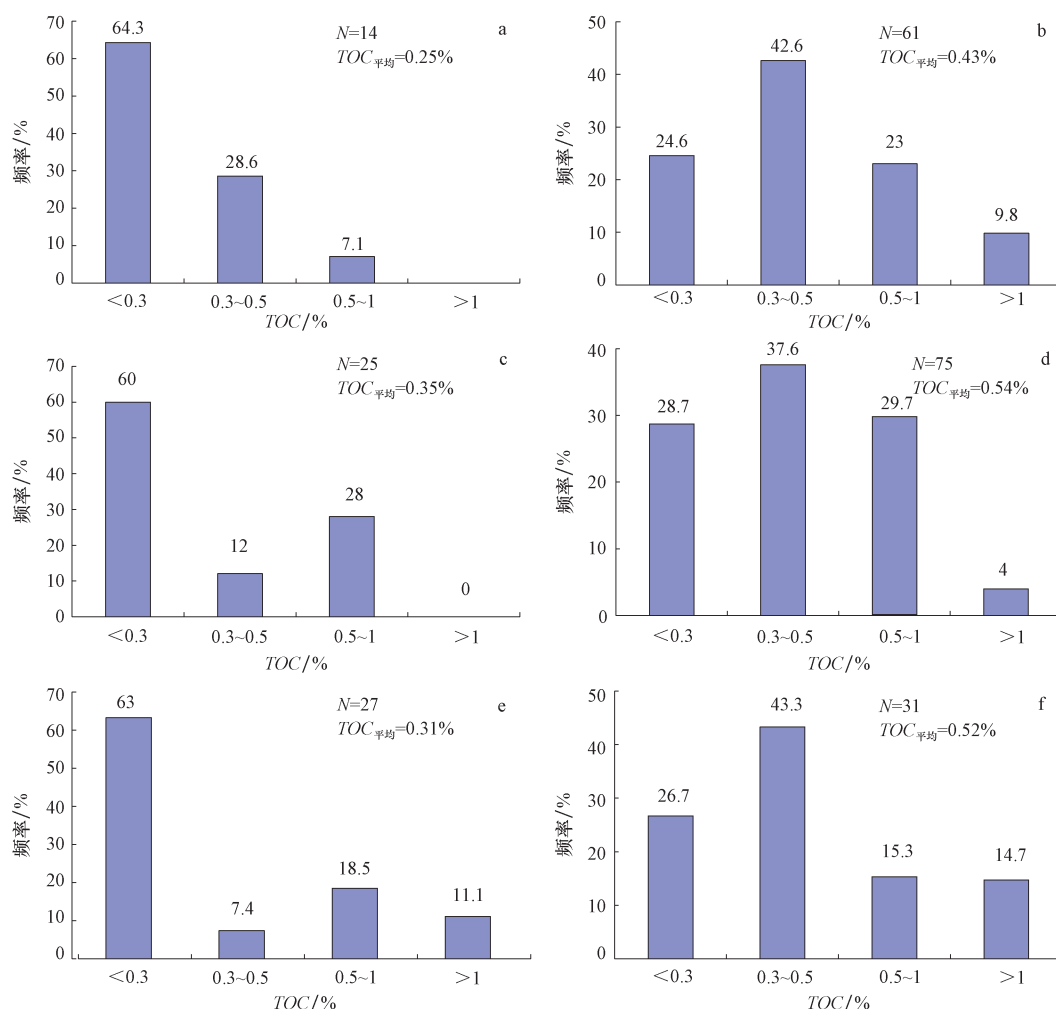


图4 鄂尔多斯盆地西北部奥陶系灰岩和泥岩烃源岩 TOC 含量分布直方图

Fig. 4 Histogram of TOC of the Ordovician source rocks in the northwestern Ordos Basin

a. 拉什仲组灰岩; b. 拉什仲组泥岩; c. 乌拉力克组灰岩; d. 乌拉力克组泥岩; e. 克里摩里组灰岩; f. 克里摩里组泥岩
(N 为样品数; TOC_{平均} 为平均有机碳含量。)

为 0.35%。克里摩里组灰岩同样以 TOC 小于 0.3% 为主, 占 60%; 其次是 TOC 为 0.5% ~ 1.0% 和 TOC 大于 1.0%, 分别占 18.5% 和 11.1%; TOC 平均为 0.31%;

而拉什仲组泥岩 TOC 以 0.3% ~ 0.5% 为主, 小于 0.5% 的占 67.2%, 平均为 0.43%。乌拉力克组泥岩 TOC 以 0.3% ~ 1% 为主, 小于 0.5% 的占 65.3%, 平均为 0.54%。克里摩里组泥岩 TOC 以 0.3% ~ 0.5% 为主, 小于 0.5% 的占 70%, 平均为 0.52%。

可见, 研究区烃源岩无论是灰岩还是泥岩, 其 TOC 均以乌拉力克组为最高, 其次为克里摩里组, 拉什仲组最低。亦即, 区内奥陶系烃源岩主要分布在克里摩里组与乌拉力克组。而且, 泥岩的有机碳含量明显高于泥灰岩的有机碳含量。其中乌拉力克组和克里摩里组泥岩和灰岩均有约 30% 的烃源岩样品 TOC 达 0.5% 以上, 说明其对奥陶系气藏的形成有可能产生一定贡献。但总的来看, 研究区奥陶系烃源岩的有机碳含量并不高, 反映其对奥陶系天然气藏形成的贡献比较有

限。前述气源对比表明研究区气藏主要为来自上古生界煤系烃源岩的煤成气, 也从另一个侧面说明奥陶系烃源岩对气藏的形成可能贡献不大。

2 天然气成藏主控因素与富集规律

综合分析表明, 研究区奥陶系天然气藏的形成和分布主要受构造、储层、盖层、烃源岩及天然气运移通道 5 大因素控制, 天然气主要富集在以下 5 要素的耦合处: 斜坡高部位、溶蚀缝洞储层发育带、乌拉力克组-拉什仲组盖层分布区、烃源岩有利区及天然气“倒灌”运移通道发育区。

2.1 斜坡高部位

由鄂尔多斯盆地西北部奥陶系克里摩里组顶面现今构造图可以看出(图 5), 研究区克里摩里组顶面现今构造表现为“中间凸起、南北两侧凹陷”的构造格局。中部鄂 31 井—李华 1 井为相对高的台地, 由此向

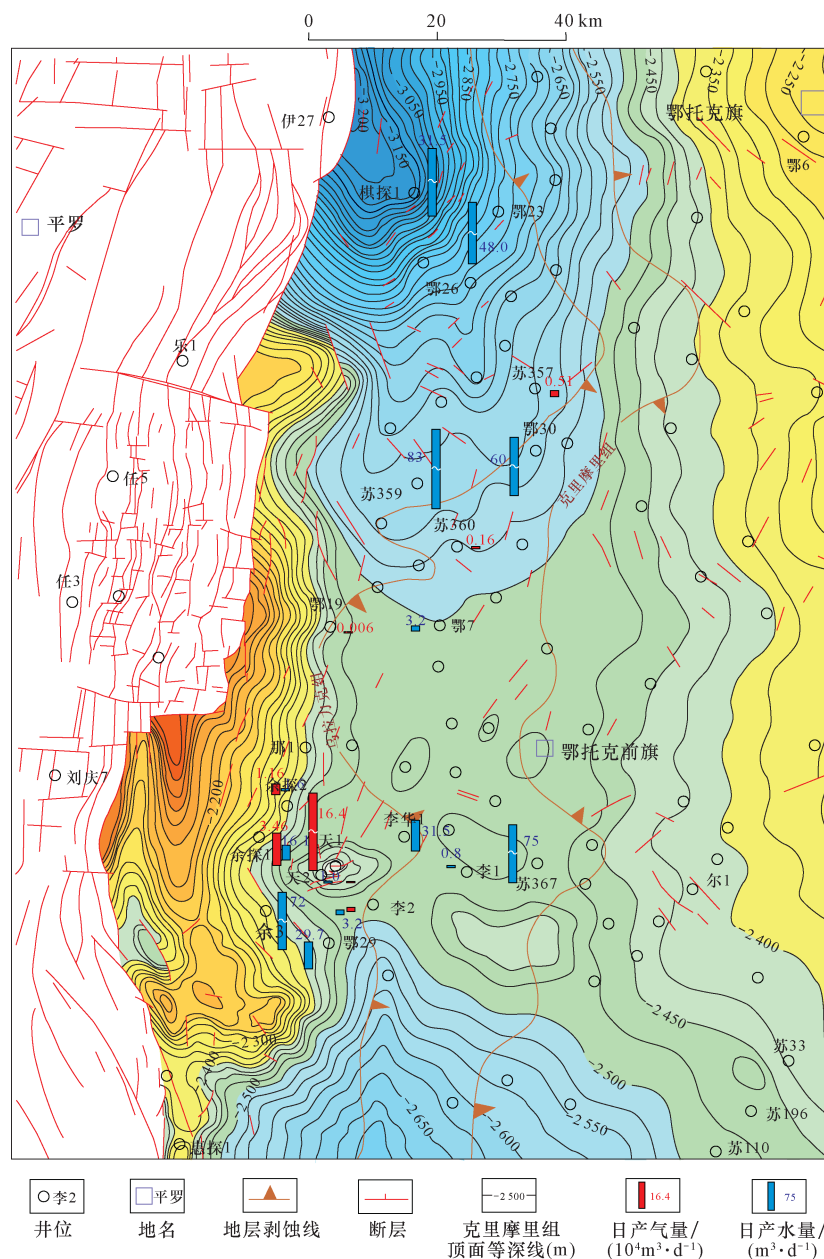


图5 鄂尔多斯盆地西北部奥陶系气-水分布平面图

Fig. 5 Map showing distribution of gas-water contact in the northwestern Ordos Basin

南北两侧逐渐过渡为凹陷,形成马鞍状构造格局。而在此台地东西方向上,克里摩里组又表现为西厚东薄,向东逐渐超覆尖灭。

由构造演化分析以及奥陶系分布情况可知,上述构造面貌在奥陶纪末即已形成,现今构造面貌为奥陶纪末古构造的继承,只是在盆地西缘受到后期较强烈的改造。

研究区奥陶系已发现的8口出气井全部位于斜坡高部位(图5)。其中日产 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上的3口井(余探1、余探2、天1井)均位于古今斜坡的中部以上较高部位。

相反,构造最高部位和斜坡低部位至凹陷中心部位均不利于成藏。如研究区马鞍形构造的中部台地区是除西缘外构造最高的部位,迄今尚未有一口井日产 $1\,000 \text{ m}^3$ 以上的气。鄂19井虽然见有气显示,但试气

仅日产 52 m^3 。成藏条件最差的是凹陷中心附近的构造低部位,其目前所钻的探井无一见有气产出,而几乎全部产水。如靠近南部凹陷中心的李4井、余3井、鄂29井和北部凹陷中心附近的棋探1井、鄂26井,试气结果均只产水,日产水量 $48 \sim 315 \text{ m}^3$ 不等。其中棋探1井日产水 315 m^3 ,为北部凹陷之最;李4井日产水 240 m^3 ,为南部凹陷之最。

研究区奥陶系天然气之所以主要聚集在斜坡高部位,是由于一方面该部位靠近气源,另一方面是由于斜坡高部位岩溶储层相对比较发育,另外其保存条件也往往较好。

前面气源对比分析表明,研究区奥陶系气藏的气源主要为上古生界煤系烃源岩,其生成的天然气只能通过“倒灌”方式向其下伏的奥陶系运移和充注,运移

的动力为上古生界烃源岩在晚侏罗世—早白垩世时期大量生烃所产生的异常高压。那么,随着运移深度的增加,运移的动力将逐渐减弱,直到运移到一定的构造低部位时,运移的动力将不足以将构造低部位储层中的水所驱替,从而形成构造低部位富水、斜坡高部位富气的气水分布格局。而且,斜坡高部位比低部位更有利于碳酸盐岩储层的淋滤和溶蚀;而低部位由于是地层水流动的滞流区,因而不仅古岩溶作用变弱,而且是斜坡上部溶蚀物质向下搬运沉淀的场所,故其储层条件一般较差,从而不利于天然气的富集。

2.2 岩溶缝洞储层发育带

截止2013年底,研究区共有8口井产气,14口井产水。产气井分别为苏357井、苏360井、鄂19井、李2井、余探1井、余探2井、天1和鄂29井。产气井中,除鄂29井为桌子山组产气(试气获日产量为 $1\,592\text{ m}^3$)外,其余7口井均是克里摩里组产气,占到气层总井数的87.5%;且8口产气井中,只有天1井、余探1井、余探2井三口井日产气超过 $1\times 10^4\text{ m}^3$,其产气层位均为克里摩里组。而拉什仲组和乌拉力克组分别仅在余探2井、余探1井发现气层,且日产气量较小,分别为 298 m^3 和 $2\,605\text{ m}^3$ 。可见,克里摩里组为研究区的主要产气层位,而拉什仲组、乌拉力克组和桌子山组仅在个别井获得天然气流。

克里摩里组之所以成为研究区奥陶系的主要含气层位,与其岩溶储层发育有关。奥陶纪克里摩里期,在盆地西北部发育近南北展布的台缘斜坡相带,岩性主要为石灰岩。晚加里东运动时期,盆地中央古隆起处于继承性隆升状态,奥陶系抬升遭受风化剥蚀以及淋滤溶蚀作用。其中西侧斜坡相带的石灰岩地层具有相对较高的溶解速度,加之大气降水的垂向渗入和地下径流作用,导致在奥陶系形成区域型顺层溶蚀和局部性溶蚀两种主要岩溶作用。

位于研究区中部凸起的克里摩里组剥蚀区,直接接受大气水的淋滤、溶解和沉淀等作用,形成风化壳储层。而在其南北两侧沉积的奥陶系乌拉力克组、拉什仲组泥灰岩、泥页岩等难溶岩类地层,阻挡了克里摩里组的垂向溶蚀,而只能沿着其地层展布方向进行顺层岩溶,形成由东部到西北部、中部到南部和北部顺层展布的溶蚀孔洞系统。

显然,与局部性缝洞体系相比,这种顺层分布的区域性溶蚀孔洞发育带是最有利的天然气运移通道和成藏区带,可形成大中型气藏。表现在其储层物性相对较好,如克里摩里组储层的平均孔隙度和平均渗透率分别为1.86%和 $1.78\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$;而拉什仲组储层的平均孔隙度为1.2%,平均渗透率为 $0.43\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$;

乌拉力克组平均孔隙度为1.0%,平均渗透率为 $0.16\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。

由于上述原因,在研究区奥陶系各层位中,克里摩里组成为含气最普遍的层位,也是迄今唯一产出工业气流的层位。

2.3 乌拉力克组—拉什仲组盖层分布区

研究区邻近鄂尔多斯盆地西缘前陆褶皱冲断带构造活动相对比较强烈,特别是在晚侏罗世—早白垩世奥陶系气藏形成后,盆地西缘强烈的构造挤压对气藏的形成和调整均具有重要影响。因此,良好的保存条件特别是相对稳定的构造位置(斜坡区)和高质量的盖层是西北部奥陶系气藏形成与富集不可缺少的条件之一。

研究发现,本区奥陶系主力气层克里摩里组上覆直接盖层存在两种情况:一是奥陶系乌拉力克组—拉什仲组致密灰岩和泥岩,以乌拉力克组盖层条件为最优;另一种则是石炭系—二叠系(图6)。其中乌拉力克组—拉什仲组致密灰岩和泥岩的封盖条件相对较好,而石炭系—二叠系直接盖层在本区封盖条件相对较差。因此,已发现的产气井几乎全部位于乌拉力克组—拉什仲组盖层分布区,包括日产过 $1\times 10^4\text{ m}^3$ 的余探1井、余探2井和天1井以及日产超过 $5\,000\text{ m}^3$ 的苏357井。

相反,在乌拉力克组—拉什仲组缺失区,克里摩里组由于暴露古地表,且与上古生界烃源岩直接接触,理应既具有良好的储集条件,又具有“近水楼台先得月”的优越气源供给条件,但实际上却成藏较差。在克里摩里组暴露区(奥陶系顶面)共钻遇的27口井中,仅在李2井($1\,149\text{ m}^3/\text{d}$)、鄂19井($52\text{ m}^3/\text{d}$)和苏360井($1\,575\text{ m}^3/\text{d}$)获得低产气流。对克里摩里组气层和水层的孔隙度和渗透率分析表明(表3),克里摩里组古暴露区的鄂7井、苏259井、苏361井和苏365井的储层物性实际上比古埋藏区的余探1井和余探2井克里摩里组气藏的储层还要好,后两者的孔隙度和渗透率分别仅为3.83%、0.95%和 0.05×10^{-3} 、 $0.04\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。这说明,造成克里摩里组暴露区成藏差的原因不是储层条件,而主要是盖层条件差,缺失乌拉力克组—拉什仲组优质盖层。事实上,克里摩里组的古暴露区恰恰正是上古生界烃源岩生成的天然气向奥陶系的供烃区或“供烃窗口”。而与之相邻的乌拉力克组—拉什仲组优质盖层发育区应是研究区天然气藏形成和富集的有利地区。

另外,乌拉力克组—拉什仲组也是自身气藏的良好盖层。如余探1井乌拉力克组气藏和余探2井拉什仲组气藏。这也是这两个层位能够形成气藏的重要因素之一。

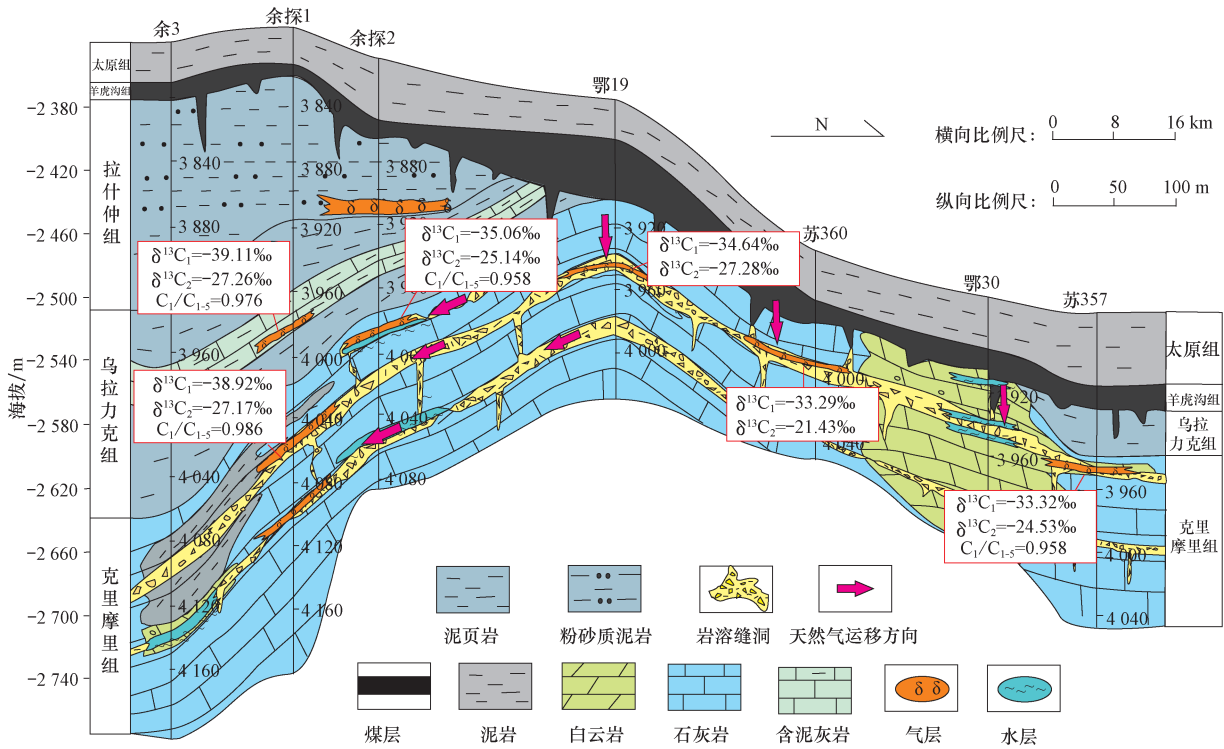


图6 鄂尔多斯盆地西北部南北向奥陶系天然气运移剖面

Fig. 6 North-south cross section showing the migration of Ordovician natural gas in the northwestern Ordos Basin

表3 鄂尔多斯盆地西北部克里摩里组气层与水层孔-渗统计
Table 3 Correlation of porosity and permeability between the gas zone and water zone in the Kelimoli Formation in the northwestern Ordos Basin

井名	井段/m	孔隙度/%	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	试气成果
余探2	3 994.5~3 998.9	3.83	0.05	气层
余探1	4 049.0~4 056.0	0.95	0.04	气层
鄂7	4 017.4~4 132.5	4.09	0.12	水层
苏359	4 085.7~4 089.6	7.69	0.18	水层
苏361	3 836.0~3 844.0	1.81	0.49	水层
苏365	4 036.0~4 039.8	0.55	2.16	水层

2.4 上古生界烃源岩有利区与“倒灌”运移通道发育区

烃源岩评价表明,研究区发育石炭系-二叠系海陆过渡相煤系烃源岩与奥陶系海相碳酸盐岩和泥质岩两套烃源岩,以上古生界煤系烃源岩为最优。石炭系-二叠系煤系烃源岩在研究区的煤层厚度分布在4~12 m,暗色泥岩厚度介于70~90 m,生烃强度范围为(10~20)×10⁸ m³/km² [28]。而盆地西北部中、上奥陶统乌拉力克组和拉什仲组海相烃源岩的厚度分布在60~300 m,有机碳含量在0.3%~0.6%,生烃强度主要分布在(8~16)×10⁸ m³/km²。

气源对比结果证实,研究区奥陶系气藏的气源主要均为上古生界煤系烃源岩。因此,气藏的形成主要是来自上古生界烃源岩的天然气以“倒灌”的方式向

奥陶系储层充注的结果。“倒灌”运移的一个直接证据就是天然气甲烷碳同位素值的变化。由图6可以看出,由鄂19井向南到构造低部位的余探2和余探1井,随着距离的增大,甲烷碳同位素明显呈变轻之势,其主要产气层克里摩里组天然气甲烷的碳同位素值分别为-34.64‰,-35.06‰和-38.92‰,反映可能与运移分馏作用有关。当然,余探1井天然气甲烷碳同位素的明显变轻也不排除奥陶系气源存在少量混入的可能。

就烃源条件来看,上古生界煤系烃源岩由于在鄂尔多斯盆地具有广覆式分布的特点,其有效烃源岩分布十分广泛,且在本区其生气强度也比较高,超过了以往认为的致密大气田形成的生气强度下限10×10⁸ m³/km² [28-30]。因此,对本区奥陶系致密碳酸盐岩的成藏而言,除盆地西缘外,大部分地区烃源条件是比较有利的。那么,对奥陶系的成藏来说,关键就要看“倒灌运移”通道发育情况等其它条件如何了。

就“倒灌运移”的输导条件来看,研究区的“倒灌”运移通道主要存在顺层岩溶缝洞型输导体系和断裂型输导体系2种类型。前者主要构成上古生界天然气侧向运移的通道,主要分布在奥陶系克里摩里组的斜坡区和古剥蚀暴露区,其中古剥蚀暴露区与上古生界煤系烃源岩直接接触,构成了顺层“倒灌运移”的“供烃窗口”。而断裂型输导体系则构成上古生界天然气垂向运移的通道,分布在断裂发育区。由于沿碳酸盐岩地层倾斜方向容易形成较发育的溶蚀孔洞系统,因而

顺层岩溶缝洞输导体系是研究区最重要的天然气“倒灌”运移通道和大气田形成的主要模式。已发现的主要产气井除天1井位于断层发育区、为垂向运移成藏外,其余气井均分布于顺层“倒灌”运移通道的发育区,特别是余探1、余探2两口日产气上万方的探井,就位于克里摩里组顺层岩溶缝洞输导体系发育区。事实上,近年来在盆地中央古隆起东侧发现的奥陶系马家沟组中组合气藏,同样是来自上古生界煤系源岩的天然气经奥陶系古剥蚀暴露区进入中组合输导层进行顺层侧向运移聚集的结果^[6,31]。

可见,顺层侧向运移是鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩气藏形成的一种重要方式。

3 结论

1) 鄂尔多斯盆地西北部奥陶系天然气干燥系数在0.958~0.986,全为干气;烷烃气系列碳同位素普遍呈现出 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 的正序分布特征,且 $\delta^{13}\text{C}_2 > -28\text{‰}$ 。气源分析认为,研究区奥陶系天然气主要为来自上古生界煤系烃源岩的煤成气。其中余探1井奥陶系2个天然气样品的甲烷碳同位素虽然很轻, $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 $-39.11\text{‰} \sim -38.92\text{‰}$,可能与运移分馏作用有关。

2) 以往曾认为盆地西部是鄂尔多斯盆地奥陶系烃源岩最发育的地区,因此可能是该区天然气的重要来源。但本文所研究的盆地西北部奥陶系无论是碳酸盐岩还是泥质岩,其有机质丰度普遍不高,暗示奥陶系烃源岩对研究区天然气藏的形成可能贡献不大。研究区奥陶系天然气主要表现为煤成气的特征即证明了这一判断。

3) 综合研究表明,鄂尔多斯盆地西北部奥陶系天然气藏的形成和分布主要受构造、储层、盖层、优质烃源岩及天然气运移通道5大因素控制,天然气主要富集在以下5要素的耦合处:斜坡高部位、溶蚀缝洞储层发育带、乌拉力克组-拉什仲组盖层分布区、优质烃源岩有利区及上古生界天然气“倒灌”运移通道发育区。

参 考 文 献

- [1] Dai Jinxing, Li Jian, Luo Xia, et al. Stable carbon isotop compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(12): 1617-1635.
- [2] 戴金星, 李剑, 丁巍伟, 等. 中国储量千亿立方米以上气田天然气地球化学特征[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 16-23.
Dai Jinxing, Li Jian, Ding Weiwei, et al. Geochemical characters of accumulations with over one the giant gas hundred billioncubic meters reserves in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 16-23.
- [3] Zou Y R, Cai Y L, Zhang C C, et al. Variations of natural gas carbon isotope-type curves and their interpretation-A case study[J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38: 1398-1415.
- [4] 胡安平, 李剑, 张文正, 等. 鄂尔多斯盆地上、下古生界和中生界天然气地球化学特征及成因类型对比[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2007, 37(增刊II): 157-166.
Hu Anping, Li Jian, Zhang Wenzheng, et al. Chemical characteristics and origin of gases from the Upper, Lower Paleozoic and the Mesozoic reservoirs in the Ordos Basin, China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(S II): 157-166.
- [5] 杨华, 张文正, 咎川莉, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系盐下天然气地球化学特征及其对靖边气田气源再认识[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(1): 8-14.
Yang Hua, Zhang Wenzheng, Zan Chuanli, et al. Geochemical characteristics of Ordovician subsalt gas reservoir and their significance for reunderstanding the gas source of Jingbian Gasfield, East Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(1): 8-14.
- [6] 杨华, 包洪平, 马占荣. 侧向供烃成藏——鄂尔多斯盆地奥陶系膏盐岩下天然气成藏新认识[J]. *天然气工业*, 2014, 34(4): 19-26.
Yang Hua, Bao Hongping, Ma Zhanrong. Reservoir-forming by lateral supply of hydrocarbon: a new understanding of the formation of Ordovician gas reservoirs under gypsolyte in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(4): 19-26.
- [7] 米敬奎, 王晓梅, 朱光有, 等. 利用包裹体中气体地球化学特征与源岩生气模拟实验探讨鄂尔多斯盆地靖边气田天然气来源[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 859-869.
Mi Jingkui, Wang Xiaomei, Zhu Guangyou, et al. Origin determination of gas from Jingbian gas filed in Ordos basin collective through the geochemistry of gas from inclusions and source rock pyrolysis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 859-869.
- [8] 肖晖, 赵靖舟, 王大兴, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系原生天然气地球化学特征及其对靖边气田气源的意义[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 601-609.
Xiao Hui, Zhao Jingzhou, Wang Daxing, et al. Geochemical characteristics of primary gas in the Ordovician and their significance for the gas source of Jingbian gas field, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 601-609.
- [9] 陈安定. 论鄂尔多斯盆地中部气田混合气的实质[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 33-38.
Chen Anding. Feature of mixed gas in central gas field of Ordos basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(2): 33-38.
- [10] Liu Q Y, Chen M J, Liu W H, et al. Origin of natural gas from the Ordovician paleo-weathering crust and gas-filling model in Jingbian gas field, Ordos Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(1): 74-88.
- [11] 刘全有, 金之钧, 王毅, 等. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩层系天然气成藏研究[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 847-858.
Liu Quanyou, Jin Zhijun, Wang Yi, et al. Gas filling pattern in Paleozoic marine carbonate reservoir of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 28(3): 847-858.
- [12] 程付启, 金强, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳混源气成藏分析[J]. *石油学报*, 2007, 28(1): 38-41.
Cheng Fuqi, Jin Qiang, Liu Wenhui, et al. Formation of source-mixed gas reservoir in Ordovician weathering crust in the central gas-field of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(1): 38-41.

- [13] Li Xianqing, Hu Guoyi, Li Jian, et al. The characteristics and sources of natural gases Central Gas Field in the Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2008, 27(1): 109–120.
- [14] 王传刚, 王毅, 许化政, 等. 论鄂尔多斯盆地地下古生界烃源岩的成藏演化特征[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 38–45.
Wang Chuangang, Wang Yi, Xu Huazheng, et al. Discussion on evolution of source rocks in Lower Paleozoic of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 38–45.
- [15] 马春生, 许化政, 官长红, 等. 鄂尔多斯盆地中央隆起带奥陶系风化壳古油藏与靖边大气田关系[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2): 400–406
Ma Chunsheng, Xu Huazheng, Gong Changhong, et al. Paleo-oil reservoir and Jingbian natural gasfield of Ordovician weathering crust in Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2): 400–406.
- [16] 夏新宇. 碳酸盐岩生烃与长庆气田气源[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 1–112.
Xia Xinyun. Hydrocarbon generation of carbonate rock and the gas origin of Changqing Gas Field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 1–112.
- [17] 孔庆芬, 张文正, 李剑锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系烃源岩生烃能力评价[J]. 天然气工业, 2007, 27(12): 62–65.
Kong Qingfen, Zheng Wenzheng, Li Jianfeng, et al. Evaluation of hydrocarbon generation potential of Ordovician source rocks on the western of Ordos basin [J]. Natural gas industry, 2007, 27(12): 62–65.
- [18] 孙宜朴, 王传刚, 王毅, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统平凉组烃源岩地球化学特征及勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2): 162–168.
Sun Yipu, Wang Chuangang, Wang Yi, et al. Geochemical characteristics and exploration potential of Middle Ordovician Pingliang Formation in the Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(2): 162–168.
- [19] 杨华, 付金华, 包洪平. 鄂尔多斯地区西部和南部奥陶纪海槽边缘沉降特征与天然气成藏潜力分析[J]. 海相油气地质, 2010, 15(2): 1–13.
Yang Hua, Fu Jinhua, Bao Hongping. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential along margin of Ordovician trough in Western and Southern Parts of Ordos [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(2): 1–13.
- [20] 倪春华, 周小进, 王果寿, 等. 鄂尔多斯盆地南缘平凉组烃源岩沉积环境与地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 38–46.
Ni Chunhua, Zhou Xiaojin, Wang Guoshou, et al. Sedimentary environment and geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the Pingliang Formation southern margin of the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 38–46.
- [21] 金强, 黄志, 李维振, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系烃源岩发育模式和天然气生成潜力[J]. 地质学报, 2013, 87(3): 393–402.
Jin Qiang, Huang Zhi, Li Weizhen, et al. Sedimentary models of Ordovician source in Ordos basin and their hydrocarbon generation potential [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(3): 393–402.
- [22] 郭彦如, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩成藏特征与模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4): 393–403.
- Guo Yanru, Fu Jinhua, Wei Xinshan, et al. Natural gas accumulation and models in Ordovician carbonates, Ordos Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4): 393–403.
- [23] 张春林, 孙粉锦, 刘锐娥, 等. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系沥青及古油藏生气潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 668–673.
Zhang Chunlin, Sun Fenjin, Liu Rui'e, et al. Bitumen and hydrocarbon generation potential of paleo-reservoirs in the Ordovician, south Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 668–673.
- [24] 姚泾利, 包洪平, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(3): 1–12.
Yao Jingli, Bao Hongping, Ren Junfeng, et al. Exploration of Ordovician Subsalt natural gas reservoirs in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(3): 1–12.
- [25] 戴金星. 天然气烷烃气碳同位素研究的意义[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 1–6.
Dai Jinxing. Significance of the study on carbon isotope of alkane gases [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 1–6.
- [26] 戴金星, 倪云燕, 吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 257–264.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Wu Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257–264.
- [27] 金之钧, 王清晨. 中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1–381.
Jin Zhijun, Wang Qingchen. The generation, accumulation and distribution forecast of oil and gas of typical superimposed basins in China [M]. Beijing: Science Press, 2007: 1–381.
- [28] 曹青, 赵靖舟, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界连续型气藏气源条件[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 584–591.
Cao Qing, Zhao Jingzhou, Fu Jinhua, et al. Gas source conditions of quasi-continuous accumulation of the Upper Paleozoic in Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 584–591.
- [29] 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 models of large tight sandstone gas field in Ordos basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 32(S1): 37–52.
- [30] 赵靖舟, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地致密砂岩大油气田形成及分布规律[C]//李德生. 中国多旋回叠合盆地含油气盆地构造学. 北京: 科学出版社, 2012, 183–216.
Zhao Jingzhou, Fu Jinhua, Yao Jingli, et al. Forming and occurrence of giant tight sand oil and gas fields in the Ordos basin [C]// Li Desheng. Tectonics of multi-cycle superimposed petroliferous basins in China. Beijing: Science Press, 2012: 183–216.
- [31] 杨华, 包洪平. 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 11–20.
Yang Hua, Bao Hongping. Characteristics of hydrocarbon accumulation in the middle Ordovician assemblages and their significance for gas exploration in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 11–20.

(编辑 张亚雄)