

鄂尔多斯盆地古隆起西侧奥陶系烃源岩评价及成藏模式

肖晖^{1,2},赵靖舟^{1,2},熊涛³,吴伟涛^{1,2},米敬奎⁴,刘素彤^{1,2}

(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 第五采油厂,陕西 西安 710200; 4. 中国石油 勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:基于鄂尔多斯盆地古隆起西侧奥陶系有效烃源岩评价,证实了在该地区斜坡低部位发育有源自奥陶系内部烃源岩的气藏新类型。根据11口钻井347块烃源岩样品分析,中上奥陶统台地边缘斜坡相带发育良好烃源岩。乌拉力克组和克里磨里组烃源岩有机质TOC含量高,泥灰岩TOC含量平均值分别为0.33%和0.39%,泥质岩类TOC含量平均值分别为0.51%和0.65%,有效烃源岩累计厚度分别在12~40 m和7~14 m,局部烃源岩厚层发育区,生气强度达 $(14.0 \sim 15.5) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,证实具有较好的生烃潜力。研究区奥陶系气藏主要经历两期成藏过程:早期为中侏罗世,奥陶系烃源岩生烃形成古油藏,晚期为晚侏罗世—早白垩世,古油藏裂解形成油型气。晚期气烃包裹体甲烷碳同位素平均值在-38.84‰,证实晚期具有油型气充注特征。古隆起西侧斜坡高部位普遍发育煤成气气藏,在克里磨里组斜坡低部位大量发育碎屑钙质角砾岩,与上覆中上奥陶统有效烃源岩近距离接触,侧向上远离奥陶系顶面风化壳,能够形成自生自储型气藏类型,如余探1井气藏。台缘斜坡带低部位发育的岩溶缝洞体,是寻找该类气藏的有利勘探目标区。

关键词:成藏模式;烃源岩;奥陶系;下古生界;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Evaluation of Ordovician source rocks and natural gas accumulation patterns in west flank of a paleo-uplift, Ordos basin

Xiao Hui^{1,2}, Zhao Jingzhou^{1,2}, Xiong Tao³, Wu Weitao^{1,2}, Mi Jingkui⁴, Liu Sutong^{1,2}

- (1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;
2. Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation of Shaanxi Province, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;
3. No. 5 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710200, China;
4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The existence of a new gas accumulation type sourced from the source rocks within the Ordovician was confirmed at the lower slope in the west flank of a paleo-uplift in Ordos Basin based on effective source rock assessment results. Analyses of 347 samples taken from the source rock intervals in 11 wells revealed high-quality source rocks developed in marginal slopes of the middle and upper Ordovician platform in the Basin. Measurements showed that the source rocks in the Wulalike and Kelimoli Formations had relative higher TOC values, with marlite TOC averaged at 0.33% and 0.39%, and mudstone TOC averaged at 0.51% and 0.65%, respectively. The accumulative effective thicknesses of source rocks of the two formations were 12 to 40 m and 7 to 14 m, respectively. Areas with thick source rocks were assessed to have a gas generation capacity of 14.0×10^8 to $15.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$. Gas accumulations in the Kelimoli Formation experienced two charging stages; the early stage in the Middle Jurassic, during which paleo-oil reservoirs were formed; and the late stage in the Late Jurassic to Early Cretaceous, during which the paleo-oil reservoirs were cracked into petroliferous gas reservoirs. Carbon isotopes of gas-bearing inclusions from the later stage were measured to be -38.84‰ in average, indicating late petroliferous gas charging characteristics. Coal-derived gas reservoirs were distributed widely in the upper slope in the west flank of the paleo-uplift. The fact that the massive detrital calcareous berccias formed in the Kelimoli Formation at the lower slope had a close contact with the overlying effective source rocks of the Middle and Upper

收稿日期:2016-12-14;修订日期:2017-10-8。

第一作者简介:肖晖(1980—),男,博士,副教授,油气成藏地质学。E-mail: xiaohui@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41102082);陕西省科技厅研究发展计划项目(2012JQ5011);陕西省教育厅重点研究计划(17JS109)。

Ordovician and that they stretched away laterally from the top Ordovician weathering crust, made it possible for the formation of self-sourced gas accumulations, like Yutan1 gas reservoir in the area. Fractured-vuggy karst reservoirs developed in the lower slope of the platform margin were considered to be potential exploration targets for such kind of gas reservoirs.

Key words: accumulation pattern, source rock, Ordovician, Lower Paleozoic, Ordos Basin

中、晚奥陶世,鄂尔多斯西部位于中央古隆起西侧,是华北地台的西部边缘,西入贺兰海槽,也是祁连海域所能波及的最东边界。研究区位于现今鄂尔多斯盆地古隆起西侧斜坡、天环坳陷北部,面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。2010年于斜坡位置完钻余探1井,在奥陶系克里摩里组试气获 $3.46 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 天然气流,重新燃起了盆地西部海相碳酸盐岩油气勘探的热潮^[1]。油气成藏是石油地质学研究的核心,而成藏年代、油气成因及来源是建立勘探目标区成藏模式的关键^[2]。目前,有关鄂尔多斯古隆起西侧天然气成藏模式,普遍认为是源自上古生界煤系烃源岩,形成上生下储型气藏^[3-4],以往研究受限于样品数量和分布,对该地区奥陶系烃源岩的评价还不够全面,限制了对天然气成藏模式的整体认识。本文在前人研究的基础上^[5-11],通过对古隆起西侧斜坡区典型钻井奥陶系有效烃源岩评价,并从宏观和

微观角度对奥陶系天然气成藏期次和演化进行详细研究,论证该地区天然气成藏模式,以期对盆地中央古隆起西侧斜坡区天然气勘探选区提供依据。

1 地质概况

研究区内钻井揭示奥陶系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})以及拉什仲组(O_{3l})。早奥陶世,鄂尔多斯西缘和南缘经历了从被动陆缘缓坡台地向中—晚奥陶世主动陆缘弱镶边台地的演化^[8-9]。奥陶系三道坎组对应于盆地南缘和中东部华北海沉积体系马家沟组马一—马三段,主要以混积陆棚、滨岸及潮缘沉积为主,岩性为砂岩和灰岩不等厚互层,厚度0~50 m。桌子山组对应马家沟组马四—马

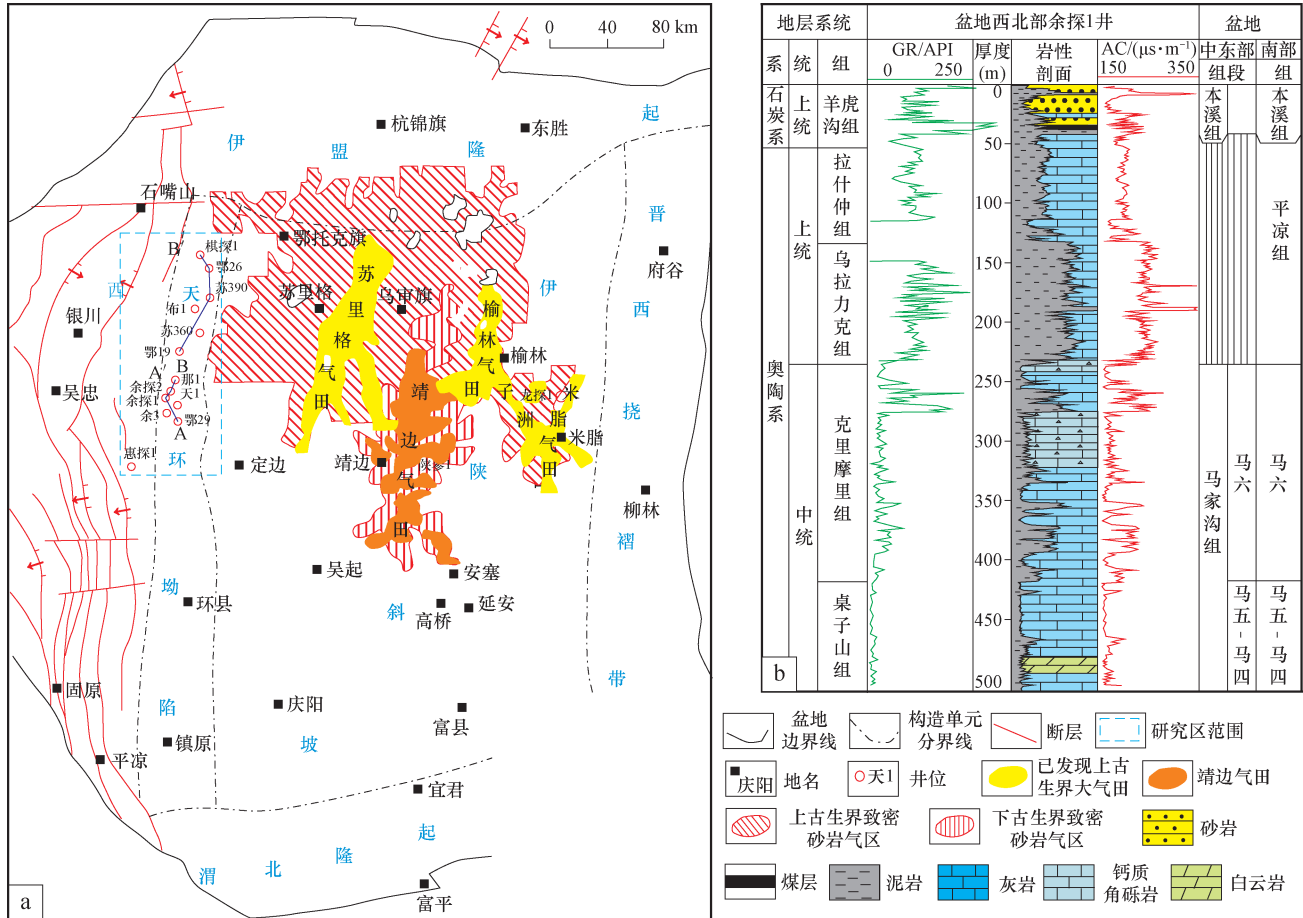


图1 鄂尔多斯盆地中央古隆起西侧位置及奥陶系综合柱状图

Fig. 1 Location of the west flank of the central paleo-uplift and comprehensive stratigraphic column of the Ordovician in Ordos Basin

五段沉积,以开阔台地相厚层灰岩和鲕粒灰岩为主,厚度达 50~800 m。克里摩里组与马六段相对应,主要为台地边缘斜坡相,岩性主要为灰岩、夹薄层白云岩、黑色页岩、泥灰岩,其中粒屑灰岩和碎屑流成因的钙质角砾岩,因后期溶蚀作用形成缝洞体系,为奥陶系天然气主要产层^[4]。中-晚奥陶世,贺兰海槽扩张,海平面上升,乌拉力克组主要发育斜坡-深水沉积,其岩性主要为灰泥岩类,其中暗色泥页岩有机质丰度高,多在 0.3%以上^[1],厚度 0~400 m,与盆地西南部的平凉组相对应,中东部则处于抬升剥蚀地区。晚奥陶世拉什仲组,沉积环境继承乌拉力克组,随着海退作用的发生,导致沉积范围减少,地层厚度自西向东逐渐减薄。

研究区奥陶系克里摩里组顶面构造特征整体为东西走向,东高西低,南北两侧低、中间高的鞍状特点,海拔高差最大超过 600 m。目前已发现的气藏除天 1 井气藏外,气藏圈闭类型均为岩性圈闭,主要含气层位为克里摩里组顶部,圈闭类型主要为岩溶缝洞型和滩相透镜体两类(表 1)。气藏顶面距离奥陶系顶部的厚度主要集中在 18~120 m,气藏主要分布在中央古隆起西侧的台缘浅滩及台缘斜坡带高部位,气藏天然气碳同位素显示出典型煤成气特征($\delta^{13}\text{C}_1$ 在 $-35.4\text{‰} \sim -33.29\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 $-27.28\text{‰} \sim -21.43\text{‰}$)^[3];余探 1 井气藏顶面距离奥陶系顶部的厚度在 222~265 m,处于克里摩里组台缘斜坡低部位,气藏天然气碳同位素显示出油型气特征($\delta^{13}\text{C}_1$ 在 $-38.92\text{‰} \sim -38.20\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 $-28.3\text{‰} \sim -27.17\text{‰}$)^[6]。研究区斜坡低部位是否存在源于奥陶系内部烃源岩气藏,首要问题在于斜坡区奥陶系内部有效烃源岩评价和生烃潜力。

2 奥陶系烃源岩评价

2.1 烃源岩有机地球化学特征及评价

中上奥陶统台缘斜坡带上的 11 口钻井 347 块烃源岩样品的分析表明(表 2;图 1),烃源岩干酪根无定形组分含量占到 90.6%,镜质组含量为 6.65%,壳质组和惰质组含量很少,干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 $-26\text{‰} \sim -31\text{‰}$,干酪根类型以 I 型为主,II₁ 型次之;烃源岩 T_{max} 和 R_{ob} 值都表明有机质经历了主要生烃过程,已达到高成熟晚期阶段,因此有机质丰度(TOC)差异就成为评价该地区烃源岩生烃潜力的重要指标。

目前对海相碳酸盐岩有效烃源岩有机碳下限认识具不同观点。有学者根据世界海相大油气田统计结果,认为有效烃源岩 TOC 值一般大于 0.5%^[13-14],也有学者通过对国内西部主要海相油气田烃源岩模拟分析后认为,气源岩有机碳含量工业下限约为 0.25%~0.30%^[15-16]。孔庆芬等(2006)^[17]通过对鄂尔多斯西南平凉组低热演化样品模拟实验分析,认为当 R_o 值大于 2%时,TOC 含量小于 0.13%的样品生烃能力有限(生烃潜力 $S_1 + S_2$ 为 17.4 mg/g),当样品总有机碳 TOC 含量大于 0.3%时,生气量明显增高($S_1 + S_2$ 为 215.8 mg/g)。综合分析认为鄂尔多斯西北部海相碳酸盐岩烃源岩 TOC 下限值取 0.3%,泥岩 TOC 下限值取 0.4%较为合适。根据钻井烃源岩实测 TOC 统计(表 2),从拉什仲组到克里摩里组,泥灰岩 TOC 含量平均值分别在 0.24%,0.33%和 0.39%,其中有效烃

表 1 鄂尔多斯盆地中央古隆起西侧气藏圈闭特征及碳同位素数据对比

Table 1 Geological characteristics of traps and carbon isotopic composition of gasin the west flank of the central paleo-uplift, Ordos Basin

圈闭类型	储层类型	井号	地层层位	气藏埋深/m	距奥陶系顶面深度/m	试气产量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$			气体同位素数据来源
							C_1	C_2	C_3	
构造		天 1	O_2k	3 925.0~3 930.0	53	164 000	-34.26	-25.71	-20.45	文献[3]
			O_2k	4 040.0~4 040.5	222	34 555	-38.92	-27.17	-25.00	文献[6]
		余探 1	O_2k	4 083.0~4 085.0	265		-38.20	-28.30	-24.70	文献[12]
			岩溶缝洞型	3 938.6~3 988.2	120	11 565	-35.06	-25.14	-22.57	文献[3]
							-35.40	-25.80	-21.90	文献[12]
岩性		鄂 19	O_2k	3 938.4~3 947.2	37.3	52	-34.64	-27.28	-25.85	文献[3]
		灰岩	O_2k	4 013.0~4 016	53.4	1 149				
		滩相透镜体	白云岩	3 848.4~3 952.0	38	5 057	-33.32	-24.53	-22.94	文献[6]
				3 958.0~3 961.0	47					
		苏 360	O_2k	3 981.0~3 989.0	18	1 575	-33.29	-21.43	-24.51	文献[6]

表 2 鄂尔多斯盆地中央古隆起西侧奥陶系烃源岩发育特征

Table 2 Organic characteristics of the Ordovician source rocks in the west flank of the central paleo-uplift, Ordos Basin

层位	岩性	厚度/m	TOC*/%	大于 TOC 下限 值样品比例*	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$R_{\text{oh}}/\%$	干酪根同位素/ ‰	干酪根 类型	发育环境	评价
O_2l	灰岩、泥灰岩	50~150	0.09~0.48/0.24(27)	14.30%	459~547	1.68~1.96	-29.0~-27.7	I—II ₁	前缘斜坡,水体 进退变化频繁	较差烃 源岩
	暗色灰泥岩	40~100	0.15~0.68/0.36(29)	27.6%						
O_2w	灰岩、泥灰岩	40~60	0.05~0.98/0.26(35)	25.7%	512~552	1.88~1.96	-30.1~-26.1	I—II ₁	深水斜坡—海 槽相	较好烃 源岩
	暗色灰泥岩	30~60	0.1~1.24/0.51(90)	43.3%						
O_2k	灰岩、泥灰岩	100~200	0.09~0.98/0.39(26)	30.77%	466~565		-31.2~-28.1	I—II ₁	灰坪—缺氧洼 槽—斜坡沉积	较好烃 源岩
	暗色灰泥岩	10~30	0.22~1.68/0.65(32)	50.00%						

* TOC:最小值~最大值/平均值(样品数)

源岩样品数比例分别占到 14.3%,25.7%和 30.8%;泥质岩类 TOC 含量平均值分别在 0.36%,0.51%和 0.65%,有效烃源岩样品数比例分别为 27.6%,43.3%和 50.0%。综合评价乌拉力克组、克里磨里组烃源岩为较好烃源岩;拉什仲组有效烃源岩样品比例较低,综合分析评价为较差烃源岩。该评价结论也与灰黑色笔石页岩分布特征^[8],克里磨里组顶部到乌拉力克组,再到拉什仲组沉积期海平面不断降低,沉积环境逐渐过渡到有氧环境,有机质丰度逐渐变差的规律的相符。

2.2 有效烃源岩厚度的确定

由于研究区烃源岩 TOC 实测样品数量有限,层位分布不均匀,为了更加全面反映有效烃源岩厚度展布特征,利用测井数据纵向信息分辨率高的特点,建立起测井资料与烃源岩 TOC 含量间的定量关系模型,计算出烃源岩段有效烃源岩厚度值^[18]。利用鄂 29、余探 1、余探 2 等 8 口 TOC 实测数据较多的钻井与不同系列测井数据进行拟合,选用相关系数大于 0.7 的 GR, AC, DEN 三条曲线结合 RT 数据进行多元回归,获得理论 TOC 计算公式,对这 8 口钻井有效烃源岩厚度进行确定。

烃源岩连井剖面显示(图 2,剖面线位置见图 1),有效烃源岩层段主要分布在克里磨里组上部和乌拉力克组泥质含量较高的层段。其中,乌拉力克组有效烃源岩累计厚度大,可达 12~40 m,单层厚度多在 7~20 m,尤其以顶部烃源岩最为发育,连续性好;克里磨里组有效烃源岩累计厚度在 7~14 m,单层厚度集中在 5~8 m,连续性较差。位于斜坡低部位的余探 1 井和棋探 1 井乌拉力克组和克里磨里组有效烃源岩累计厚度分别达到 50.2 m 和 54.7 m。采用如下公式对这两口井烃源岩生气强度进行计算:

$$Q = H\rho CK \tag{1}$$

式中:Q 为生气强度,10⁸ m³/km²;H 为气源岩厚度,m;

ρ 为气源岩密度,10⁸ t/km³;C 为有效 TOC 平均值,%;K 为生烃率,mL/g。其中,气源岩密度统一取值 2.65 g/cm³;生气率根据油田资料取值 225 mL/g。两口井奥陶系烃源岩生气强度达(14.0~15.5)×10⁸ m³/km²,证实具有较好的生烃潜力。

3 天然气成藏过程

3.1 储层沥青特征及来源

已有研究表明,在鄂尔多斯盆地古隆起周边及西部地区奥陶系岩心中普遍含有沥青^[19]。通过岩心及薄片观察,沥青集中赋存于溶蚀孔洞和裂缝中,多数呈半充填特征(图 3a,b);薄片中心沥青主要沿微裂缝、压溶缝分布(图 3c,d)以及在溶孔和晶间孔中充填^[12]。沥青的发育表明奥陶系在地质历史时期曾发生过液态烃运移和聚集过程。高含量的沥青多集中在溶蚀缝洞非常发育的层段,表明这些溶蚀孔隙和裂缝对液态烃运移起到很好的疏导作用。研究区内多口钻井储层段发现沥青,预示鄂尔多斯古隆起西侧斜坡曾发生过较大规模的油气运聚过程。

对鄂 29 井、苏 259 井奥陶系储层沥青进行抽提后,通过饱和烃色谱、色谱-质谱特征对储层沥青成因进行探讨。色谱图显示主碳峰为 C₁₇和 C₁₈,少数样品后移至 C₂₁—C₂₇;色谱峰以前高双峰型为主。轻重组分比 nC₂₁⁻/nC₂₂⁺在 1.52~11.34,平均为 4.23,以轻质组分为主。姥鲨烷与植烷比值(Pr/Ph)均小于 1,一般在 0.6~0.9,反映沉积和早期埋藏时处于还原环境。Pr/nC₁₇介于 0.4~1.84,主要分布在 0.4~0.99,Ph/nC₁₈介于 0.46~1.58,主体分布在 0.4~0.9,反映典型的海相沉积环境。奇偶优势(OEP)在 0.73~0.95,奇偶优势不明显,碳优势指数在 0.98~1.07,反映有机质成熟度较高。

已检测出的萜烷化合物有三环萜烷、四环萜烷及

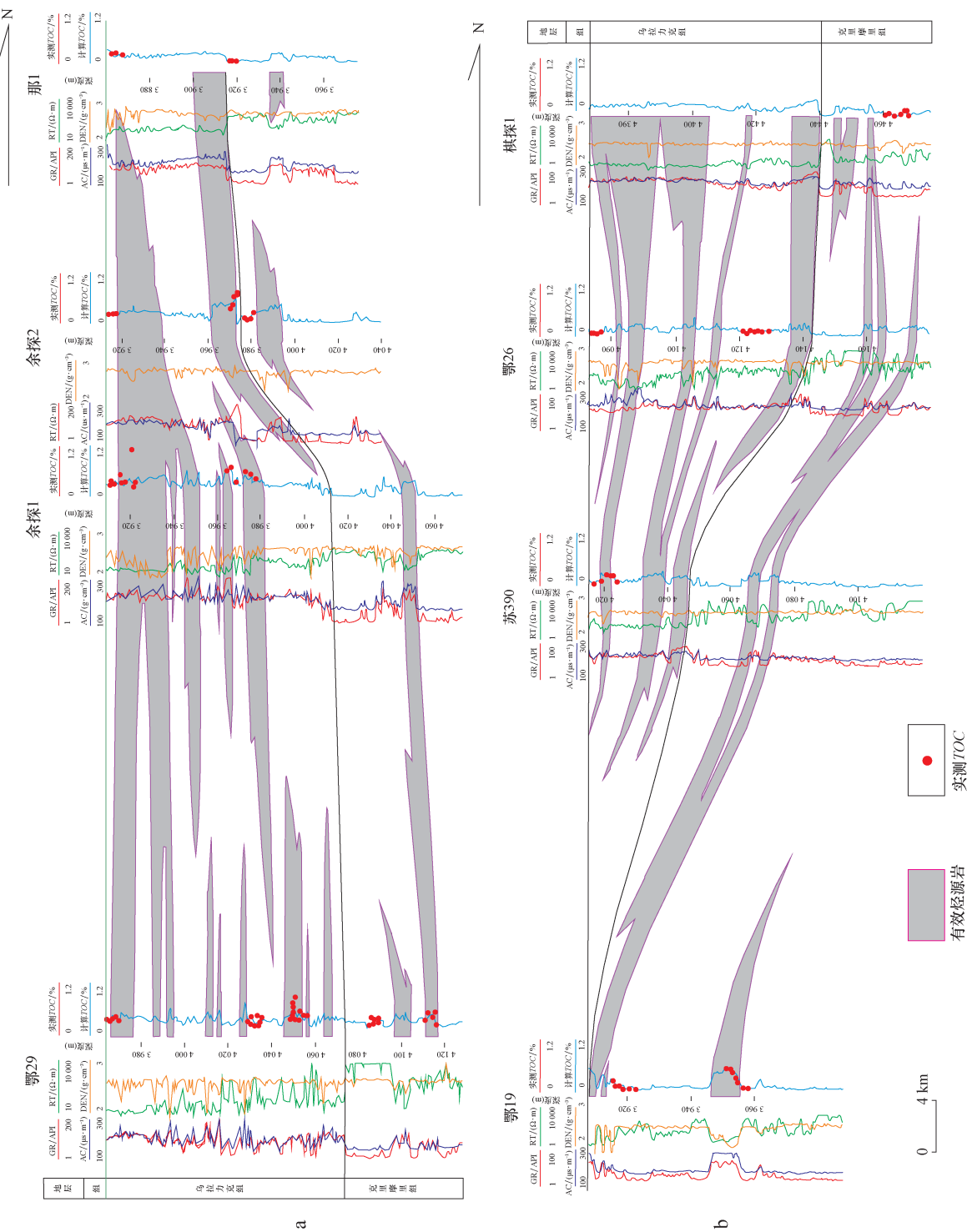


图2 鄂尔多斯盆地中央古隆起西侧奥陶系有效烃源岩连井剖面
a.A—A' 剖面;b.B—B' 剖面

Fig.2 Well-tie cross-section showing effective source rocks of the Ordovician in the west flank of the central paleo-uplift, Ordos Basin.

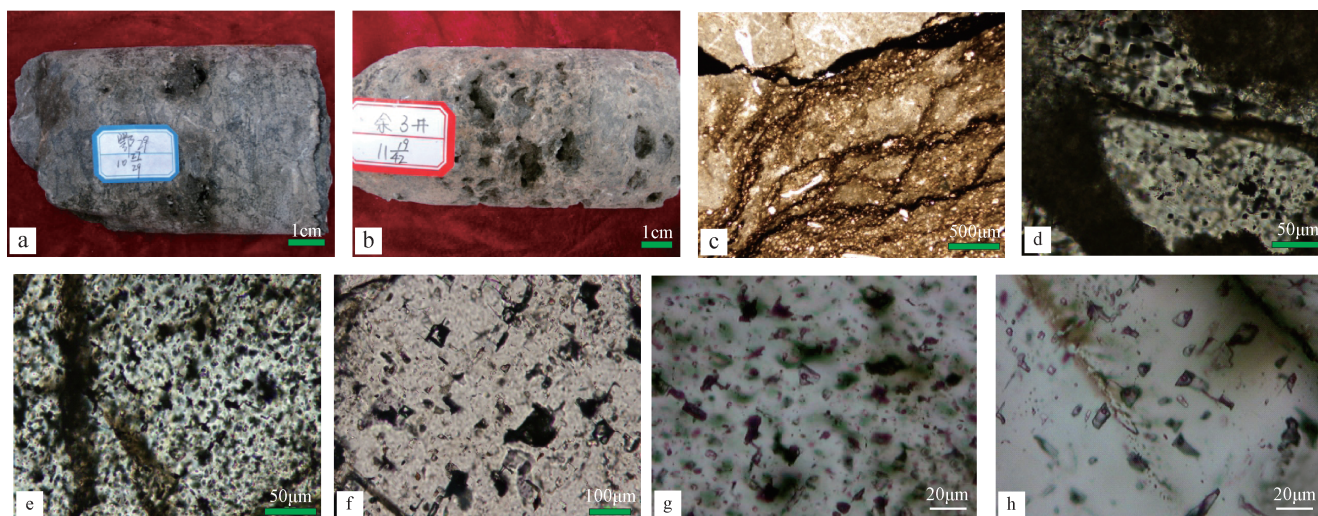


图3 鄂尔多斯盆地中央古隆起西侧奥陶系碳酸盐岩岩心和薄片中的沥青与烃类包裹体特征

Fig. 3 Characteristics of bitumen and hydrocarbon inclusions in cores and thin sections from the Ordovician carbonates in the west flank of the central paleo-uplift, Ordos Basin

a. 鄂29井,桌子山组,埋深4 253.2 m,褐灰色含灰细粉晶云岩,溶蚀孔洞内部分充填黑褐色沥青,岩心照片;b. 余3井,桌子山组,褐灰色粉晶灰岩,埋深4 333.1 m,溶蚀孔洞内部分充填黑褐色沥青,岩心照片;c. 棋探1井,克里摩里组,埋深4 554.5 m,泥晶灰岩微裂缝内充填深褐色沥青,透射单偏光;d. 余探2井,克里摩里组,埋深3 995.6 m,细晶粉晶灰岩溶孔充填方解石发育大量的沥青质和液烃包裹体,透射单偏光;e. 余探2井,克里摩里组,埋深4 008.2 m,溶蚀裂隙充填方解石发育大量的沥青包裹体和少量的盐水包裹体,透射单偏光;f. 余3井,克里摩里组,埋深4 143 m,岩溶角砾间方解石中成线形分布的液烃包裹体和伴生盐水包裹体,透射单偏光;g. 余探2井,克里摩里组,埋深3 996.1 m,方解石晶粒中发育的液烃包裹体、含气液烃包裹体,透射单偏光;h. 余3井,克里摩里组,埋深4 142.8 m,方解石脉中气液烃包裹体及伴生盐水包裹体,透射单偏光

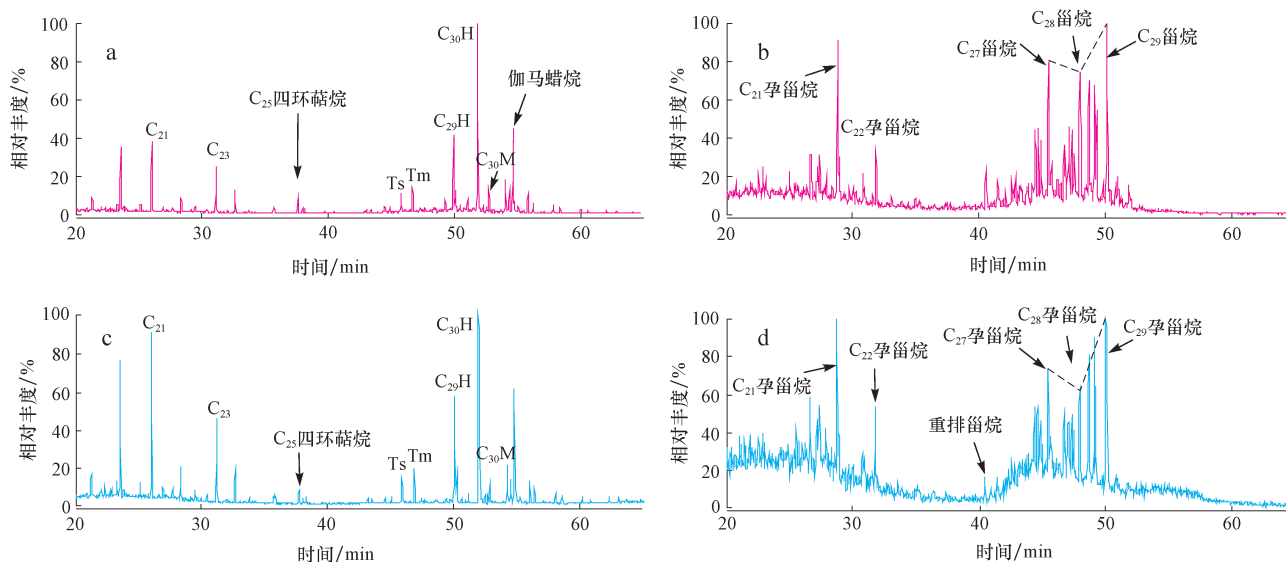


图4 鄂尔多斯盆地中央古隆起西侧奥陶系储层沥青萜烷和甾烷质量色谱

Fig. 4 Terpene and sterane mass chromatogram of asphalt from the Ordovician reservoir in the west flank of the central paleo-uplift, Ordos Basin

a. 鄂29井克里摩里组泥岩(埋深4 112.3 m)抽提物($m/z = 191$); b. 鄂29井克里摩里组泥岩(埋深4 112.3 m)抽提物($m/z = 217$); c. 苏359井乌拉拉克组泥岩(埋深3 986.5 m)抽提物($m/z = 191$); d. 苏359井乌拉拉克组泥岩(埋深3 986.5 m)抽提物($m/z = 217$)

五环三萜烷等。三环萜烷碳数分布在 C_{19} — C_{24} , 主要为 C_{20} , C_{21} 和 C_{23} 三环萜烷, 鄂29井、苏359井样品中以 C_{21} 为主峰, 且 $C_{21} > C_{23}$ 。有学者认为三环萜烷可能来源于某些藻类^[20], 这一认识与刘大锰等(2000)^[21]

对虾蛄热模拟研究结论类似, 这表明有机质主要为水生动物生源。样品中大量出现规则甾烷、重排甾烷、孕甾烷和升孕甾烷(图4)。鄂29井、苏359井中 C_{27} , C_{28} 和 C_{29} 甾烷呈倒“L”型分布, C_{27}/C_{29} 比值介于 0.3 ~

0.5, 表明低等生源有机质占优势^[22]。甾烷 $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 主要介于 0.4 ~ 0.5, 而甾烷 $C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 主要在 0.3 ~ 0.5, 反映样品有机质成熟度较高, 接近或达到异构化终点。这些参数均显示出腐泥型有机质特征^[22], 可进一步确认奥陶系储层沥青主要来自海相烃源岩。

3.2 烃类包裹体及成藏期次

流体包裹体是地层中记录地质历史时期成藏流体活动的直接载体, 通过对烃类包裹体的系统研究, 可以明确揭示油气成藏期次和成藏流体特征^[23-24]。本次研究流体包裹体样品采自余探 1 井、余探 2 井、余 3 井、鄂 29 井和惠探 1 井, 层位主要为克里摩里组顶部, 样品深度在 3 968 ~ 4 226 m。岩性主要为粉晶级以上灰岩及含脉灰岩。

包裹体薄片镜下观察显示烃类包裹体极其发育, 主要包括液态烃、沥青质和气液两相烃类包裹体。烃类包裹体在岩石中赋存产状主要有 3 种: ①溶蚀孔洞和微裂隙赋存液烃、气液烃包裹体。其中液烃包裹体多呈它形、半自形特征, 大小在 8 ~ 20 μm , 单偏光下多呈褐色、棕褐色(图 3d, e), 气液烃包裹体自形居多, 大小在 7 ~ 18 μm , 气液比主要在 10% ~ 25%; 其次发育少量沥青质包裹体, 包裹体因发生过破裂而多呈不规则形状, 发深褐色, 透光性差, 激光拉曼谱峰位置主要有 1 339, 1 368, 1 603 cm^{-1} 等, 表明其成分主要为固体碳。②晚期亮晶方解石脉中发育的气液烃包裹体(图 3g, h)。气液包裹体气液比多在 20 ~ 45%, 气烃包裹

体较为少见。利用激光拉曼技术对气液两相气烃包裹体进行成分鉴定, 气液烃包裹体液相部分几乎全部为 H_2O , 占液相总含量的 99%; 气相部分主要为有机 CH_4 , 占气相总成分的 63.3% ~ 100%。③钙质岩溶角砾间方解石中主要发育液烃和少量含烃盐水包裹体(图 3f)。

对以上 3 种产状的烃类包裹体进行均一化温度测定, 测定对象选择同期伴生盐水包裹体和含烃盐水包裹体。流体包裹体测温结果显示(图 5), 溶蚀孔缝充填方解石包裹体均一化温度较为宽泛在 123 ~ 167 $^{\circ}\text{C}$, 明显可分别两个峰值, 分别在 130 ~ 142 $^{\circ}\text{C}$ 和 152 ~ 162 $^{\circ}\text{C}$; 晚期亮晶方解石脉体包裹体均一化温度在 144 ~ 173 $^{\circ}\text{C}$, 集中分布在 152 ~ 168 $^{\circ}\text{C}$; 钙质角砾间方解石胶结物中包裹体均一化温度在 118 ~ 142 $^{\circ}\text{C}$ 。综合这三种产状流体包裹体测温结果, 均一化温度分布区间、形态与第一种产状的流体包裹体测温结果大体类似, 主要分为 122 ~ 142 $^{\circ}\text{C}$ 和 154 ~ 168 $^{\circ}\text{C}$ 两个峰值温度区间。

埋藏热演化史恢复以余探 1 井地质模型为基准, 现今地温梯度取 28 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 以天深 1 井最大古地温梯度 36 ~ 41 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 作为中生代晚期古地温场约束条件^[25], 应用声波时差法求得余探 1 井早白垩世末抬升剥蚀量大约在 960 m, 利用 Basinmod4.0 软件对余探 1 井埋藏热演化史进行 Easy% R_o 反演。在此基础上, 结合流体包裹体均一化温度结果, 恢复出鄂尔多斯西北部油气成藏期次可分为两期(图 6): I 期为均一化温度峰值在 122 ~ 142 $^{\circ}\text{C}$, 以液烃包裹体为主, 对应于中侏罗世源自奥陶系烃源岩烃类成藏过程, 形成古油藏; II 期为均一

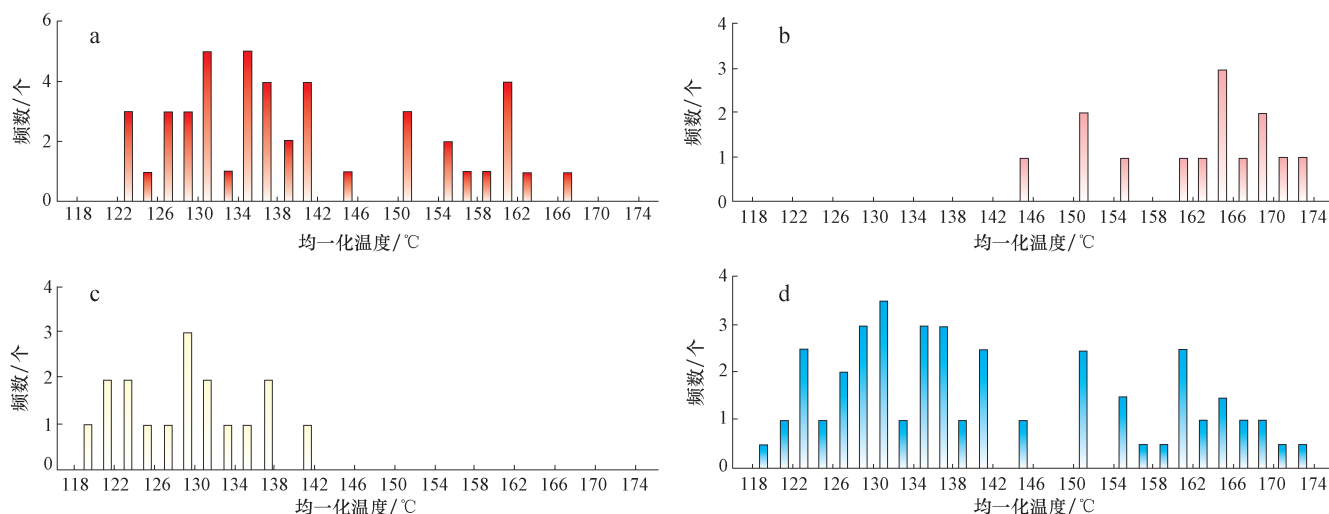


图5 鄂尔多斯盆地中央古隆起西侧奥陶系流体包裹体均一化温度统计直方图

Fig. 5 Histogram showing homogenization temperature of inclusions from the Ordovician in the west flank of the central paleo-uplift, Ordos Basin

a. 溶蚀孔缝充填方解石中的包裹体; b. 方解石脉中的包裹体; c. 钙质角砾间方解石胶结物中的包裹体; d. 所有包裹体

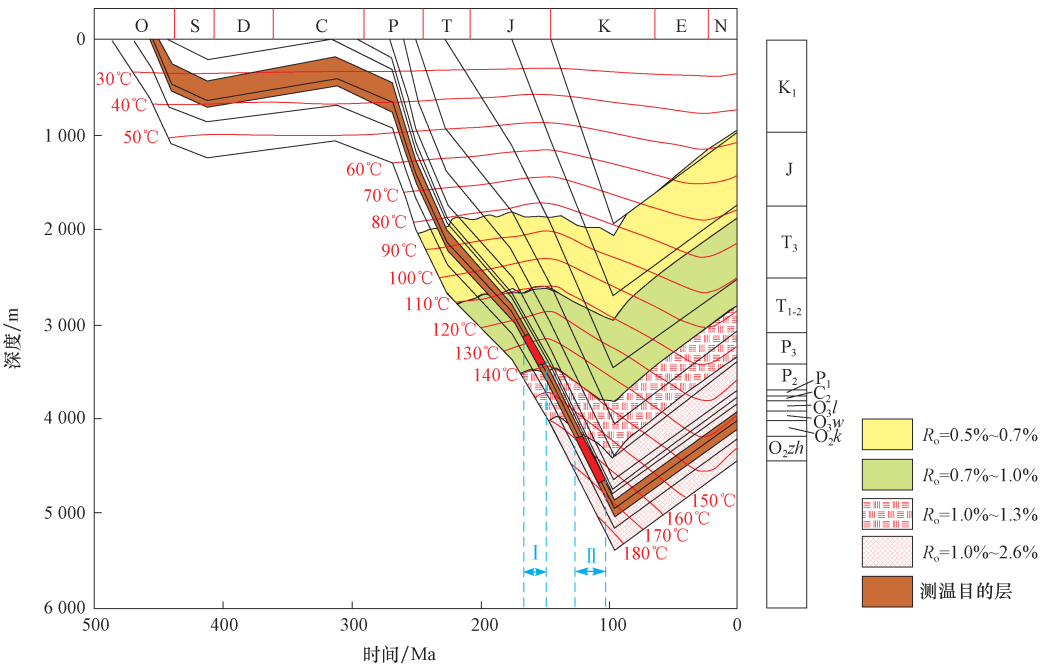


图 6 鄂尔多斯中央古隆起西侧中 - 上奥陶统埋藏 - 热演化史

Fig. 6 Burial-thermal history of the Middle-Upper Ordovician in the west flank of the central paleo-uplift, Ordos Basin

化温度峰值在 154 ~ 168 ℃,以气液烃包裹体为主,对应于侏罗世末—早白垩世天然气成藏过程。

研究区发育上、下古生界两套气源岩,因此对于Ⅱ期气液烃包裹体既有可能记录了古油藏裂解生成的天然气,也有可能捕获来源于上古生界煤系地层热裂解成因天然气。本次研究尝试对宿主矿物烃类包裹体进行气烃碳同位素分析,探讨晚期油气成藏流体特征。

3.3 烃类包裹体甲烷碳同位素

包裹体流体地球化学性质被广泛应用于油气源对比研究^[26-29]。本次研究样品来自 3 口井 4 块灰岩样品,方解石晶粒取自溶蚀孔洞中,样品深度在 3 987 ~ 4 260 m,层位来自桌子山组和克里摩里组含气层段,距离奥陶系顶面距离在 120 ~ 200 m,由于上覆有 100 多米的泥岩盖层,受上古生界天然气影响相对较小。

本次实验采用包裹体机械破碎法获取释放气体并同时测试碳同位素数值,测试单位为中国石油勘探开

发研究院,详细实验方法和实验条件见文献^[30]。实验结果显示(表 3),包裹体气烃成分中主要为甲烷,含量占到 98% ~ 99% 以上,由于乙烷以上气烃成分含量很少,本次测试结果主要为甲烷碳同位素值,每个样品同时测试两次,两次分析误差在 5‰ 以内。包裹体气烃甲烷碳同位素在 -40.29‰ ~ -36.52‰,平均值在 -38.84‰,乙烷碳同位素只测得的一个数值为 -31.67‰。从气体碳同位素平均值上看, $\delta^{13}C_1$ 值为 -38.84‰ 整体反映了油型气特征,这个结果也与余探 1 井天然气甲烷碳同位素值相近(表 1),可以证实气液烃包裹体成分主要来自油型气,即古油藏热裂解成因天然气,这一认识也与前人研究结论类似^[29]。

4 奥陶系气藏成藏模式

4.1 储盖发育特征

目前盆地古隆起西侧奥陶系天然气主要聚集在克

表 3 鄂尔多斯盆地中央古隆起西侧奥陶系气烃包裹体中的有机成分及碳同位素地球化学特征

Table 3 Organic components and carbon isotopic composition of gaseous hydrocarbon inclusions from the Ordovician in the west flank of the central paleo-uplift, Ordos Basin

井号	层位	深度/m	总烃含量/%	CH ₄ /%	C ₂ H ₆ /%	C ₂ H ₄ /%	C ₃ H ₈ /%	C ₃ H ₆ /%	$\delta^{13}C_1$ /‰	$\delta^{13}C_2$ /‰
余 3	克里摩里组	4 138	32.46	0.992 964	0.004 97	0.001 224	0.000 984	0	-39.07	-39.57
余 3	桌子山组	4 334	46.92	0.992 844	0.005 317	0.000 696	0.000 624	0.000 562	-40.08	-40.29
余探 2	克里摩里组	3 987	70.68	0.984 297	0.013 823	0.000 329	0.001 192	0.000 31	-36.68	-36.52
鄂 29	桌子山组	4 260	16.42	0.982 682	0.006 316	0.004 397	0.002 658	0.004 065	-39.05	-39.49

里磨里组。岩相古地理特征研究表明^[8],研究区由东向西,依次发育台地边缘浅滩、台地边缘斜坡和广海陆棚沉积环境。台地边缘浅滩紧邻古隆起西侧,沉积物以亮晶颗粒灰岩、灰泥质颗粒灰岩为主,颗粒主要为沙屑、藻屑和少量生屑,厚层灰岩为晚期的溶蚀创造了有力条件。加里东晚期—早海西期克里磨里组顶部地层遭受长期风化淋滤作用,颗粒间经胶结作用形成亮晶方解石,同时形成大量晶间孔和晶间溶孔,沿着地层倾向顺层溶蚀,形成滩状透镜体储层。亮晶颗粒灰岩与上部石炭系底部煤系地层、上奥陶统泥质岩形成储盖组合,有利于天然气藏后期保存,鄂19井、苏360井奥陶系气藏便属于此类型(图7)。台地边缘斜坡带以中—薄层灰泥石灰岩和中—薄层泥岩、泥页岩不等厚互层为主。深水相灰泥岩和泥页岩中,还大量发育块状碎屑流沉积,并在斜坡—斜坡角处大堆积^[8]。由于碎屑流钙质胶结和围岩结构的差异,加里东晚期构造抬升剥蚀风化期地下水优先溶解钙质胶结,形成顺层状的岩溶洞穴^[31],晚期洞穴垮塌,形成溶蚀缝洞型储集体。该类储集体主要发育在斜坡低部位,上覆200~300 m厚层泥质盖层,受剥蚀区风化淋滤作用的影响较小,易于天然气藏后期保存,如余探1、余探2井奥陶系气藏(图7)。

4.2 天然气成藏模式

中侏罗世,奥陶系烃源岩开始大量生烃,生成的烃

类沿碳酸盐岩溶蚀缝洞及颗粒灰岩储层运移,并在其中形成古油藏,储层沥青和早期液烃、沥青质包裹体记录了古油藏运移、充注过程;晚侏罗世—早白垩世,古油藏发生二次裂解生气,同时上古生界煤系烃源岩达到生气高峰。由于克里磨里组剥蚀区上古生界烃源岩生烃动力足[普遍在 $(16 \sim 20) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$]、充注强度大,因此靠近斜坡高部位储层普遍形成煤成气气藏,即上生下储型气藏类型。克里磨里组斜坡低部位,奥陶系烃源岩有机质丰度高,生烃动力相对增强,远离奥陶系顶部风化壳,晚期气烃包裹体碳同位素证实,曾大规模发生过油型气运移和充注过程。源自乌拉力克组和克里磨里组有效烃源岩生成的天然气就近进入岩溶缝洞体储层,形成自生自储型气藏。由于该时期地层整体为向西倾斜,天然气向东短距离运移,受上倾方向泥质岩类遮挡,有利于气藏保存(图7)。

自生自储型气藏成藏关键条件在于奥陶系有效烃源岩分布及其与碳酸盐岩岩溶缝洞型储层的配置关系。由于目前新钻井主要分布在斜坡部位,很难完整预测有效烃源岩的平面分布范围,但从现有钻井有效烃源岩分布情况来看,斜坡区余探1井—鄂29井、鄂26—棋探1井范围内中上奥陶统有效烃源岩厚度大,具有较好的生烃潜力,沿着该区带在斜坡低部位寻找岩溶缝洞体,是寻找该类气藏的有利勘探目标。

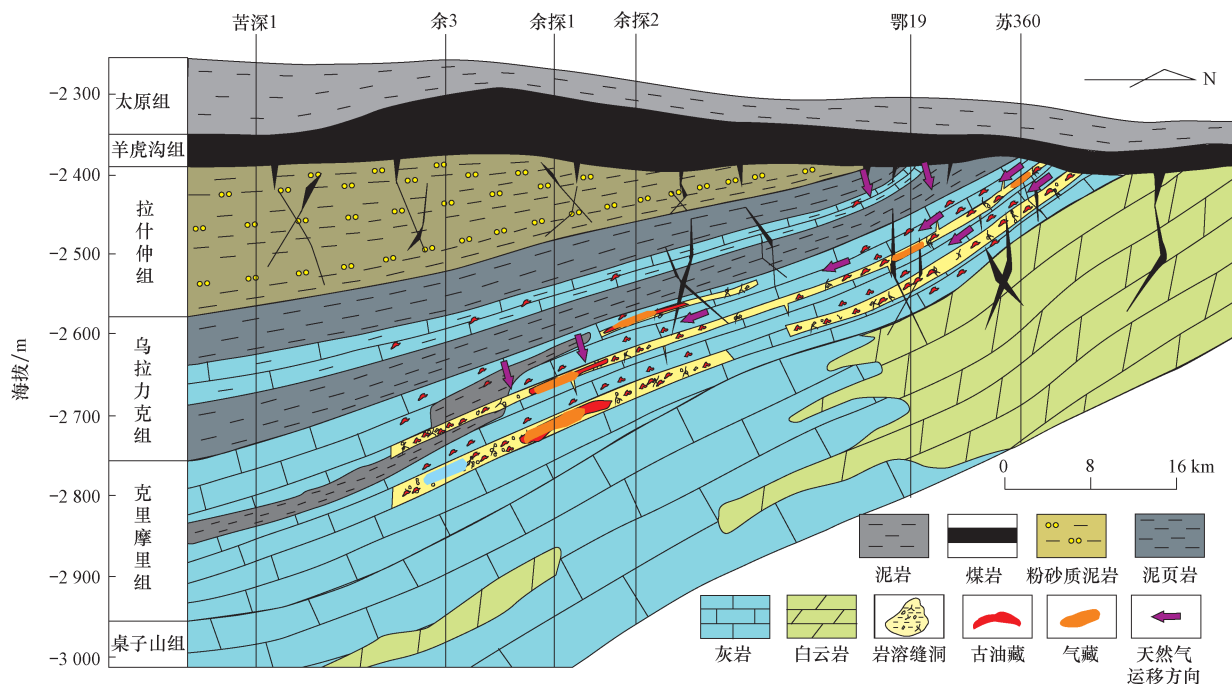


图7 鄂尔多斯中央古隆起西侧奥陶系天然气成藏模式示意图

Fig. 7 Gas accumulation patterns of the Ordovician reservoir in the west flank of the central paleo-uplift, Ordos Basin

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地古隆起西侧中上奥陶统台缘斜坡带烃源岩较为发育,干酪根类型以 I 型为主, II₁ 型次之,烃源岩 $T_{\max}$ 和 R_{ob} 值都表明有机质经历了主要生烃过程,已到达高成熟晚期生干气阶段。乌拉力克组和克里磨里组有机质 TOC 含量较高,泥灰岩 TOC 含量平均值分别在 0.33% 和 0.39%,其中有效烃源岩样品数比例分别占到 25.7% 和 30.8%;泥质岩类 TOC 含量平均值分别在 0.51% 和 0.65%,有效烃源岩样品数比例分别为 43.3% 和 50.0%,综合评价为较好烃源岩。

2) 按照海相碳酸盐岩烃源岩 TOC 含量下限值取 0.3%,泥岩 TOC 下限值取 0.4% 进行计算,中-上奥陶统台缘斜坡乌拉力克组有效烃源岩累计厚度大,可达 12~40 m,连续性较好;克里磨里组有效烃源岩累计厚度在 7~14m,连续性相对较差。局部烃源岩厚层发育区,生气强度在 $(14.0 \sim 15.5) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,具有较好的生烃潜力。

3) 从宏观及微观两个角度,对奥陶系储层内沥青地球化学特征、烃类包裹体特征及均一化温度、气烃包裹体碳同位素等开展详细研究工作,认为奥陶系储层主要经历两期成藏过程,早期为中侏罗世,奥陶系烃源岩生烃形成古油藏,晚期为晚侏罗世—早白垩世,古油藏发生裂解形成油型气。晚期气烃包裹体甲烷碳同位素平均值在 -38.84‰,证实后期具有油型气充注过程。

4) 克里磨里组在斜坡低部位大量发育碎屑钙质角砾岩,与上覆奥陶系有效烃源岩近距离接触,远离奥陶系顶面风化壳,能够形成自生自储型气藏类型,如余探 1 气藏。沿台缘斜坡带低部位寻找溶蚀缝洞体,是寻找该类气藏的有利勘探目标区。

参 考 文 献

- [1] 杨华,刘新社,张道锋. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气成藏主控因素及勘探进展[J]. 天然气工业,2013,33(5):1-12.
Yang Hua, Liu Xinshe, Zhang Daofeng. Main controlling factors of gas pooling in Ordovician marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin and advances in gas exploration[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(5):1-12.
- [2] 金之钧. 中海相碳酸盐岩层系油气形成于富集规律[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(7):910-926.
Jin Zhijun. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate strata in Chinese sedimentary basins[J]. Science in China: Earth Sciences, 2011, 41(7):910-926.
- [3] 赵靖舟,王大兴,孙六一,等. 鄂尔多斯盆地西北部奥陶系气源及其成藏规律[J]. 石油与天然气地质,2015,36(5):711-720.
Zhao Jingzhou, Wang Daxing, Sun Liuyi, et al. Origin of the Ordovician gas and its accumulation patterns in Northwestern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5):711-720.
- [4] 张道锋,刘新社,高星,等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系海相碳酸盐岩地质特征与成藏模式研究[J]. 天然气地球科学,2016,27(1):92-101.
Zhang Daofeng, Liu Xinshe, Gao Xing, et al. Geological characteristics and accumulation model of Ordovician marine carbonate in western Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1):92-101.
- [5] 吴伟涛,赵靖舟,孙六一,等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系克里磨里组天然气成藏特征[J]. 天然气地球科学,2015,26(10):1862-1872.
Wu Weitao, Zhao Jingzhou, Sun Liuyi, et al. Accumulation characteristics of natural gas from the Ordovician Kelimoli Formation, western Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(10):1862-1872.
- [6] 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岩的意义[J]. 石油与天然气地质,2013,34(5):601-609.
Xiao Hui, Zhao Jingzhou, Wang Daxing, et al. Geological 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.
- [7] 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积特征于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 through in Western and Southern Parts of Ordos[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(2):1-13.
- [8] 马占荣,白海峰,刘宝宪,等. 鄂尔多斯西部地区中—晚奥陶世克里磨里组—乌拉力克组岩相古地理[J]. 岩相古地理,2013,15(6):751-764.
Ma Zhanrong, Bai Haifeng, Liu Baoxian, et al. Lithofacies palaeogeography of the middle-late Ordovician Kelimoli and Wulalike ages in western Ordos area[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(6):751-764.
- [9] 李文厚,陈强,李智超,等. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理[J]. 古地理学报,2012,14(1):85-97.
Li Wenhui, Chen Qiang, Li Zhichao, et al. Lithofacies palaeogeography of the early Paleozoic in Ordos area[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1):85-97.
- [10] 陈敬轶,贾会冲,李永杰,等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成因及气源[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2):205-209.
Chen Jingyi, Jia Huichong, Li Yongjie, et al. Origin and source of natural gas in the upper Paleozoic of the Yimeng uplift, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2):205-209.
- [11] 李军,王禹诺,赵靖舟,等. 鄂尔多斯盆地隆东地区上古生界天然气富集规律[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2):180-189.
Li Jun, Wang Yunuo, Zhao Jingzhou, et al. Accumulation patterns of natural gas in the upper Paleozoic in Longdong area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2):180-189.
- [12] 张春林,庞雄奇,田世澄,等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系古油藏油源对比与靖边气源[J]. 天然气地球科学,2014,25(8):1242-1251.
Zhang Chunlin, Pang Xiongqi, Tian Shicheng, et al. Oil-source correlation of Ordovician oil reservoirs in the western Ordos Basin and the Jingbian gas source[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(8):1242-1251.

- lation of paleo-reservoir in Ordovician and the gas source of Jingbian Gasfield, west Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25 (8): 1242 – 1251.
- [13] 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, 2007: 1 – 381.
- [14] 郭彦如,付今华,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.
- [15] 薛海涛,石涵,卢双舫,等. 碳酸盐岩气源岩有机质丰度分级评价标准研究 [J]. 天然气工业, 2006, 26 (7): 25 – 29.
Xue Haitao, Shi Han, Lu Shuangfang, et al. A study of classification evaluation criteria of TOC of carbonate gas source rocks [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26 (7): 25 – 29.
- [16] 彭平安,刘大永,秦艳,等. 海相碳酸盐岩烃源岩评价的有机碳下限问题 [J]. 地球化学, 2008, 37 (4): 415 – 422.
Peng Ping'an, Liu Dayong, Qin Yan, et al. Low limits of organic carbon content in carbon as oil and gas source rocks [J]. *Geochemic*, 2008, 37 (4): 415 – 422.
- [17] 孔庆芬,王可仁. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系烃源岩热模拟试验研究 [J]. 天然气地球科学, 2006, 17 (2): 187 – 191.
Kong Qingfen, Wang Keren. Thermal simulation of Ordovician source rock of foreland basin in western Ordos [J]. *Natural Gas Geosciences*, 2006, 17 (2): 187 – 191.
- [18] 朱光有,金强,王锐. 有效烃源岩的识别方法 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2003, 27 (2): 6 – 10.
Zhu Guangyou, Jin Qiang, Wang Rui. Identification methods for efficient source rocks [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2003, 27 (2): 6 – 10.
- [19] 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, 41 (4): 393 – 403.
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, 41 (4): 393 – 403.
- [20] Aquino Neto F R, Trendel J M, Restle A, et al. Occurrence and formation of tricyclic and tetracyclic terpanes in sediments and petroleum [M]. New York: In advances in organic geochemistry, 1983: 659 – 676.
- [21] 刘大锰,艾天杰,汤达权. 动物碎屑的光性变化及其研究意义 [J]. 地学前缘, 2000, 7 (3): 291 – 296.
Liu Dameng, Ai Tianjie, Tang Dazhen. Optical alteration of zooclast and its study significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 (3): 291 – 296.
- [22] 宁宁,陈孟晋,孙粉锦,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳古油藏的确定及其意义 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28 (2): 280 – 286.
Ning Ning, Chen Mengjin, Sun Fenjin, et al. Determination and its significance of ancient oil pools in Ordovician weathering crust, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28 (2): 280 – 286.
- [23] 肖晖,赵靖舟,杨海军,等. 塔北英买力低凸起奥陶系油藏充注历史的流体包裹体证据 [J]. 石油学报, 2012, 33 (3): 372 – 378.
Xiao Hui, Zhao Jingzhou, Yang Haijun, et al. Evidence of fluid inclusions of the hydrocarbon charging history of Ordovician reservoirs in Yingmaili low-uplift, northern Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 33 (3): 372 – 378.
- [24] 肖晖,赵靖舟,杨海军,等. 塔里木盆地哈拉哈塘凹陷奥陶系成藏流体演化 [J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 2012, 37 增刊: 163 – 173.
Xiao Hui, Zhao Jingzhou, Yang Haijun, et al. Fluid inclusion and Micro-FTIR evidence for hydrocarbon charging fluid evolution of the Ordovician reservoir of Halahatang depression, the Tarim Basin [J]. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37 (Suppl.): 163 – 173.
- [25] 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 69 – 72.
Ren Zhanli. Research on tectonic thermal evolution history in sedimentary basins of North China [M]. Beijing: Petroleum industry press, 1999: 69 – 72.
- [26] George S C, Krieger F W, Eadington P J. Geochemical comparison of oil-bearing fluid inclusions and produced oil from the Toro sandstone, Papua New Guinea [J]. *Org. Geochem.*, 1997, 26: 155 – 176.
- [27] George S C, Eadington P J, Lisk M. Geochemical comparison of oil trapped in fluid inclusions and reservoir oil in Blackback oilfield, Gippsland Basin [J]. *Australia Petrol. Explor. Soc. Austral. J.*, 1998, 26: 64 – 81.
- [28] Mi J K, Dai J X, Zhang S C, et al. The component and carbon isotope of the gases in inclusions in reservoir layers of Upper Palaeozoic gas pools in the Ordos Basin [J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37 (Suppl.): 97 – 103.
- [29] 胡国艺,单秀琴,李志生,等. 流体包裹体烃类组成特征及对天然气成藏示踪作用——以鄂尔多斯盆地西部奥陶系为例 [J]. 岩石学报, 2005, 21 (5): 1461 – 1466.
Hu Guo Yi, Shan Xiu Qin, Li Zhi Sheng, et al. The component and isotope characteristics of hydrocarbon in fluid inclusions and its affection on the gas reservoir formation: The case of Ordovician reservoir in the northwest area of Ordos basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21 (5): 1461 – 1466.
- [30] 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 field in Ordos basin collective through the geochemistry of gas from inclusions and source rock pyrolysis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28 (3): 859 – 869.
- [31] 王红伟,刘宝宪,毕明波,等. 鄂尔多斯盆地西北部地区奥陶系岩溶缝洞储层发育特征及有利目标区评价 [J]. 现代地质, 2011, 25 (5): 917 – 924.
Wang Hongwei, Liu Baoxian, Bi Mingbo, et al. Characteristics of Karst porous fractured reservoir and favorable target areas in Ordovician of Northwest Ordos basin [J]. *Geoscience*, 2011, 25 (5): 917 – 924.