

文章编号: 0253-9985(2007)02-0280-07

鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳古油藏的确定及其意义

宁 宁¹, 陈孟晋², 孙粉锦³, 许化政³

(1. 中国矿业大学 资源与安全工程学院, 北京 100083)

(2. 中国石油天然气有限责任公司 石油勘探开发研究院 鄂尔多斯分院, 北京 100083)

(3. 中国石油天然气有限责任公司 石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北廊坊 065007)

摘要: 岩心观察与岩石薄片分析表明, 鄂尔多斯盆地中央隆起带奥陶系风化壳储层沥青含量丰富, 其光性特征显示为石油裂解的残余物, 是古油藏存在的直接证据, 沥青热演化程度高, 如旬探 1 井的沥青反射率为 2.35% ~ 3.15%, 换算成镜质华反射率为 1.85% ~ 2.35%。根据沥青充填特征、面积系数, 并结合电测资料确定的古油层的厚度一般为 10~22 m。TOC、有机地球化学和岩相分析表明, 西缘坳陷平凉组自东而西逐渐增厚的泥页岩含有机质丰富, 以咸水低等生物的有机质为特征, 是中央隆起带古油藏的可靠烃源岩。成藏史分析表明, J₂-K₁ 期的埋深加大和古地温升高, 导致古油藏石油裂解转化为古气藏; K₂-E 时期, 燕山运动致使鄂尔多斯盆地构造反转, 陕北斜坡形成, 古油藏被破坏, 一部分油气向浅部运移散失, 一部分向陕北斜坡高部位运移, 可能是盆地中部大气田的主要气源之一。

关键词: 沥青; 古油藏; 平凉页岩; 奥陶系; 风化壳; 中央隆起带; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE112.3

文献标识码: A

Detemination and its significance of ancient oil pools in Ordovician weathering crust Ordos basin

N ing N ing¹, Chen M engjin², Sun Fengjin³, Xu Huazheng³

(1. Resources and Safety Engineering School, China University of Mining & Technology, Beijing 100083)

(2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083)

(3. Langfang Division of the Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Langfang, Hebei Province 065007)

Abstract Core observation and thin-section analysis reveal that the Ordovician weathering crust reservoir with in the central uplift belt of Ordos basin is abundant in bitumen, which shows optical features of oil pyrolysis remnant—the direct evidence of the existence of ancient oil pools. The thermal maturity of bitumen is high, resulting in high bitumen reflectivities. For example, the reflectivity of bitumen from Xuntan-1 well ranges from 2.35% to 3.15% (1.85% ~ 2.35% of vitrinite reflectance). Based on the bitumen filling and area coefficient and well logging interpretation, the thickness of ancient oil pools is estimated to be 10~22 m. Analyses of TOC, organic geochemistry and petrographic facies suggest that the mudstone in Pingliang Formation gradually thickens from east to west in the western margin depression of the basin, contains rich organic matters of saline organisms of lower form, and can serve as reliable source rocks for the ancient oil pools in the central uplift belt. Pool-forming history indicates that the burial depth and palaeogeotherm of Ordos basin were increased during the Middle Jurassic-Early Cretaceous time, resulting in the pyrolysis of ancient oil pools into ancient gas pools, and that the structural reversal of Ordos basin was caused by Yanshan Movement during the Later Cretaceous-Eogene time, resulting in the formation of the Shanbei slope and the destruction of the ancient oil pools. Part of oil and gas migrated and dissipated towards the shallower layers of Ordos basin, and part headed towards

收稿日期: 2007-03-26

第一作者简介: 宁宁 (1961—), 男, 高级工程师, 博士后, 油气勘探与油气地质

基金项目: 国家基础研究 (973) 项目 (2001CB209102)

upper part of Shanbei slope, becoming one of the important sources for major gas fields in the central part of the basin.

Key words bitumen; ancient oil pools; Pingliang formation shale; Ordovician; weathering crust; central uplift belt; Ordos basin

古油藏是指在地质历史时期的某个时段形成、但现已破坏殆尽的油藏。这类油藏已多有报道,如滇黔桂地区泥盆系和二叠系的生物礁古油藏^[1-2]和西藏羌塘盆地规模巨大的侏罗系古油藏^[3-4]。由于这类古油藏经历了多期构造运动,早期形成的古油藏因后期的构造变动而遭受破坏,古油藏中的油气因圈闭被破坏而散失^[5-6],表现为残留下难以运移的沥青。而对于鄂尔多斯构造相对稳定和持续沉降的地区而言,其古油藏的形成与变化有别于新构造运动强烈发育的地区,通过对其古油藏的研究,不仅可以探讨古油藏的形成演化历史,而且可以追踪由古油藏转化而来的新油气藏的形成与分布。

鄂尔多斯盆地从早寒武世—早奥陶世,其西缘和南缘是大华北陆表海的一部分,沉积了一套陆表海准同生白云岩、厚层块状灰岩和纹层—薄层微晶灰岩夹泥云岩、泥灰岩。生物化石组合及沉积构造均表明为浅水陆表海动荡沉积环境, TOC 从 0.10% ~ 0.34%, 平均 0.19%, 未出现有利烃源岩发育的沉积相带。

中奥陶世平凉期,鄂尔多斯本部与华北台盆区隆升为陆,而其西缘和南缘强烈沉降,形成祁连—贺兰坳拉槽、秦岭坳拉槽大型深水盆地,在其斜坡部位沉积了一套厚达 800 ~ 1 500 m 的含笔石页岩、深水碎屑岩和泥质碳酸盐岩地层,以反“L”型围绕鄂尔多斯古陆发育^[7]。通过对中央隆起带。

1 古油藏的辨识与确定

在鄂尔多斯盆地中央古隆起带上(图 1),许多探井在奥陶系风化壳储层内钻遇含沥青层段。这些沥青可通过制作光片观察到,常与泥质一起粘附在孔洞壁上或充填于孔洞中,或者断续分布在裂隙(包括缝合线)内。

1.1 沥青的光性和充填特征

本区沥青有 3 种类型,即原生沥青、运移沥青和油层沥青^[8]。原生沥青存在于致密岩石的缝合线、生物体腔或微晶孔内,呈孤立状、颗粒状、圆球

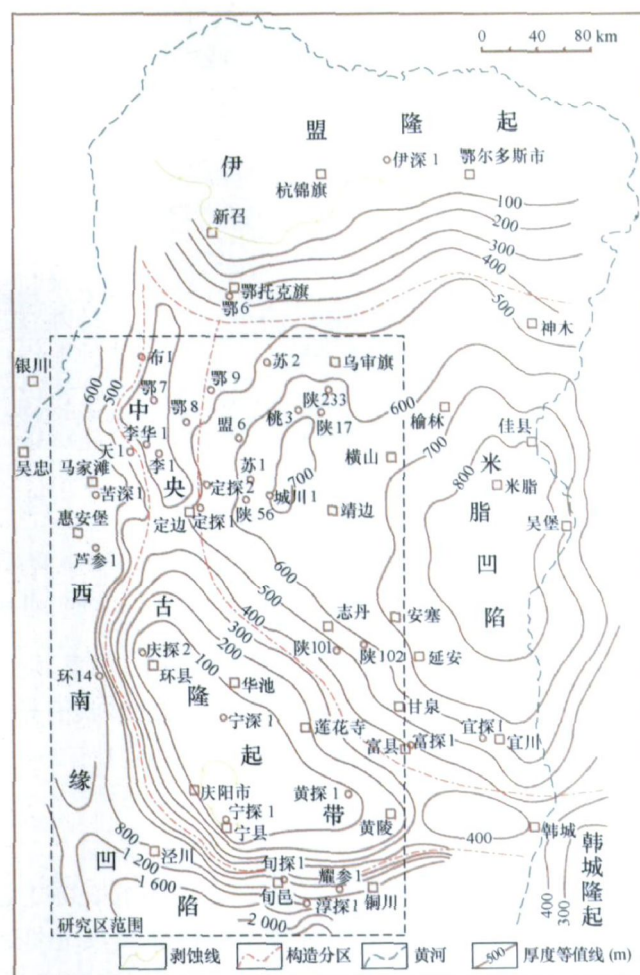


图 1 鄂尔多斯盆地奥陶系古构造与研究区位置图

Fig. 1 Ordovician paleostructure and study area location in Ordos basin

形,可能是碳酸盐岩本身生成的石油在小范围内的汇聚,后经热裂解形成的残渣。运移沥青主要产于溶蚀孔隙、裂隙及脉体中,其形态取决于孔、缝的形态,顺层分布,孤立分散,边缘有氧化环。油层沥青以固体次生半充填为主,多与泥质(少量自生石英、长石、方解石)伴生,主要有 4 种赋存方式: ①赋存于溶蚀缝洞中; ②赋存于晶间溶孔中; ③赋存于溶蚀扩大的缝合线中; ④呈浸染状分布于岩石中,且主要分布在晶间和近缝合线处(图 2)。油层沥青与运移沥青的区别主要是量的概念,前者沥青含量高,孔、缝中几乎都含充填状沥青,面积系数可达 3% ~ 5%,高者达 8% ~ 10%。

沥青在透射光下呈黑色,蓝光激发下不发光,

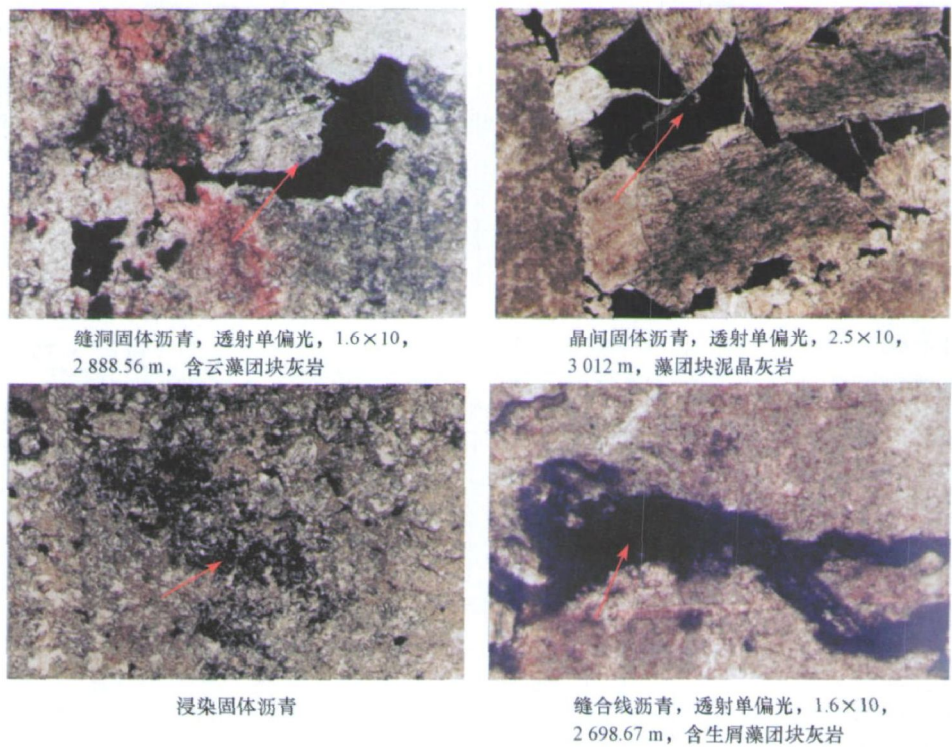


图 2 旬探 1 井奥陶系风化壳古油藏沥青赋存方式

Fig. 2 Bitumen occurrence in the ancient oil pools of Ordovician weathering crust in Well Xuntan-1

说明其演化程度已很高。在偏光显微镜下,沥青显示出不均一结构,旋转载物台,具明暗不同的波状消光。更高倍显微镜下还可看到沥青的贝壳状断口。

1.2 沥青的反射率特征

本区沥青主要赋存于碳酸盐岩储层或裂隙中,为石油裂解的残余物^[9],因碳化作用而具反光性,并随碳化率升高反射性能增强,因此可用来测定其成熟度。固体沥青的反射率很高,无各向异性,且遵守 Hilt 定律,说明沥青的形成非异常热所致(非构造破坏形成),而与埋深有关。沥青的光性结构对反射率影响较大,测定其反射率时采用随机抽样,而不采用最大和最小反射率。这样测得的反射率经换算后,可作为成熟度指标 R_o 使用^[10]。

旬探 1 井等的沥青反射率为 2.35% ~ 3.15%,换算成镜煤反射率为 1.85% ~ 2.35% (表 1)。

1.3 沥青的地球化学特征

1.3.1 有机质丰度与族组成

储层沥青的有机质丰度较高, TOC 为 0.25% (淳探 1) ~ 3.0% (耀参 1, 1 241.39 m)。旬探 1 井岩样 (O_2P 2 885.5m) 氯仿沥青“ A ”含量高达 0.104 4mg/g 但族组成以沥青质含量最高,达

表 1 研究区沥青反射率测定数据表

Table 1 Measured data of bitumen reflectivities in study area

井号	井深 /m	TOC , %	固体沥青 面积系 数, %	固体沥青 反射率, %	换算成镜 煤反射 率, %
旬探 1 井	2 694.00		4	2.35	1.85
旬探 1 井	2 698.67		1	2.41	1.88
旬探 1 井	2 855.36		2	2.56	1.98
旬探 1 井	2 888.56	0.5	3	2.58	1.99
旬探 1 井	3 012.00	0.6	3	2.69	2.06
淳探 1	2 554.00		3	2.76	2.14
富探 1	2 849.00		微	3.15	2.35

88.25%, 饱和烃含量 1.57%, 芳烃含量较低, 0.3%。饱和烃和芳烃含量低应该是热降解和挥发作用造成的, 而饱/芳 > 1 可能与沥青来源于水生生物有关^[11]。

1.3.2 生物标志物组成

由于成熟度高 (R_o 约为 2.0%), 本区沥青的生标信息已经非常有限, 热降解作用已经使许多分子或分子集团结构改变了, 在一定程度上失去了直接进行油气源对比的意义^[11]。但从旬探 1 井 2 885.5 m 亮晶砂屑灰岩抽提物 GC-MS 图上 (图 3), 仍可看出以下信息。

甾烷的 C_{27} 化合物占优势, $C_{27} \sim C_{29}$ 甾烷呈不

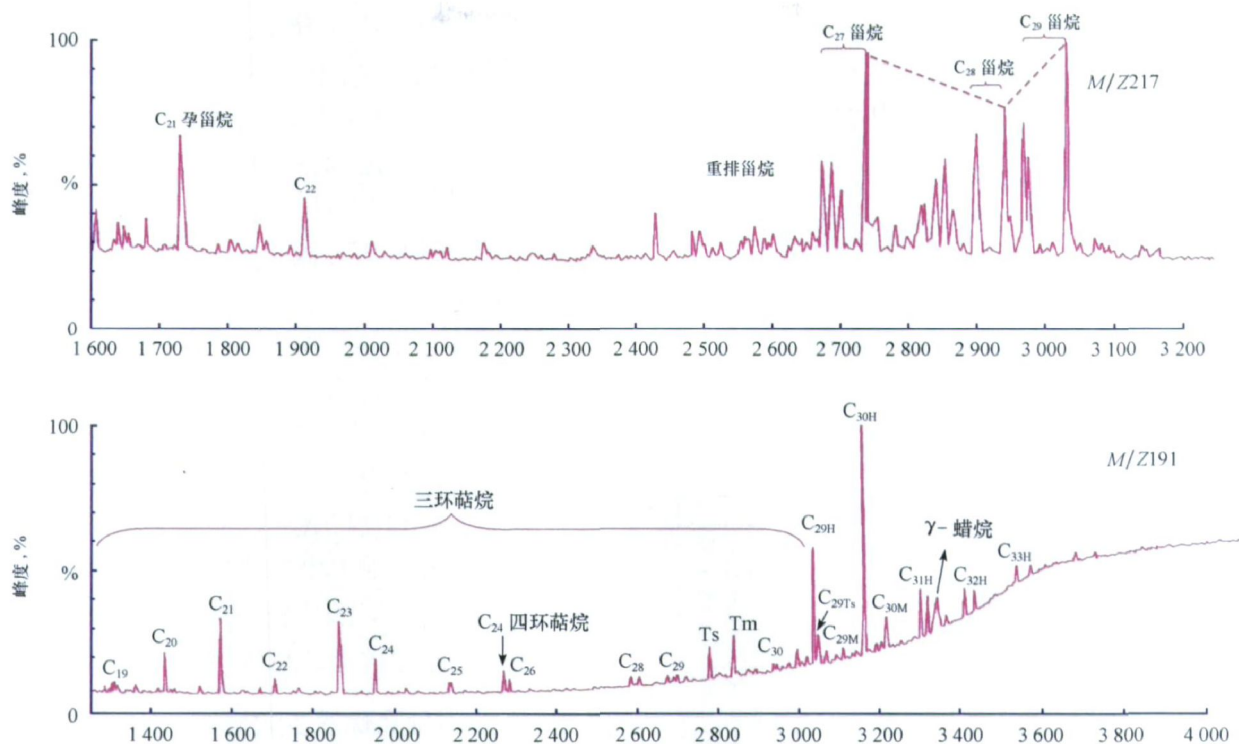


图 3 旬探 1 井碳酸岩储层沥青“A”GCMS 图 (O_2P 2885.5m, 岩样)

Fig. 3 GCMS plots of bitumen “A” in the carbonate reservoir in Well Xuntan-1

对称的“V”字型, $\alpha\alpha\alpha C_{27}/C_{29}$ 为 1.06 表明成油母质的来源以水生生物贡献较大。

萜烷含量较丰富,特别是三环萜烷含量高,以 C_{23} 为主峰。 T_m/T_s 为 1.7, $C_{31}H/(S/S+R)$ 为 0.55, $C_{30}M/H$ 为 0.13, γ -蜡烷/ C_{30} 藿烷为 0.24 均显示出以咸水低等生物为母源的有机质特征。

25-降藿烷的出现一般与氧化-降解原油有关^[9],表明古油藏经历了古构造聚油与后期遭受改造的历史。

1.4 古油层确定

研究区含沥青层一般溶蚀孔洞发育,是好的储集层。原油经热裂解后残留的沥青颗粒充填有限,常与自生石英、长石和方解石共生,半充填于孔隙内,表明油藏破坏后可能又经历了成岩作用。所以,确定古油层时,一般先进行电性解释,确定出储集层,然后对其进行密集取样和薄片鉴定,研究光片中沥青的充填特征、面积系数,并进行相关分析和确定古油层厚度。

如淳探 1 井 2 711.61~2 716.21m (O_1m_6) 取心段电测解释为气层,分段取样 15 个均发现沥青。其中 2 716.21 m 含沥青面积达 8%。结合电测资料确定古油层厚度为 6.5 m。对于没有取心

的层段,可分段取岩屑样进行沥青鉴定,结合电测资料确定古油层厚度。这样,淳探 1 井共做岩片样 651 件,发现沥青充填样片 155 件,平凉组和马六段共解释古油层厚度 22.5 m。

旬探 1 井平凉组和马六段 (2 691~3 396 m) 共制作岩石薄片 715 块,其中含有沥青的薄片为 258 块,解释古油层厚度 12 m。其他井解释古油层厚度如表 2 由这些井的资料所勾绘的古油藏分布区域如图 4 所示,奥陶系古油藏的分布主要在陕 56-陕 51 井区、莲 1 井区、陕 139-富探 1 井区,以及南部的旬探 1-淳探 1 井区,它们集中分布在盆地中部,大致呈南北向展布。

2 古油藏的油源

研究区围绕早古生代中央古隆起及其两翼发育了有利于形成烃源岩的一系列坳陷 (图 1),即米脂坳陷、西南缘坳陷和秦岭坳拉槽。综合研究表明,西南缘坳陷奥陶系平凉组可能是其主力烃源岩发育区。

2.1 西南缘坳陷烃源岩分布

平凉组的东部边界约在布 1 井-定探 1 井-

表 2 中央隆起带部分探井沥青层厚度表

Table 2 Bitumen layer thicknesses of some exploration wells in the central uplift belt

井号	层位	含沥青层厚度 /m	井号	层位	含沥青层厚度 /m
淳探 1	O ₂ P~O ₁ m ₆	22.50	莲 1	O ₁ m ₄₊₅	25.20
旬探 1	O ₁ m ₆	12.40	庆深 1	O ₁ m ₃	6.00
耀参 1	O ₁ m ₆	10.00	陕 67	O ₁ m ₅ ⁵	1.77
永参 1	O ₁ m ₆	10.60	陕 55	O ₁ m ₅ ⁵	7.50
富探 1	O ₁ m ₅	10.40	陕 51	O ₁ m ₅ ⁵	31.00
陕 139	O ₁ m ₅	10.90			

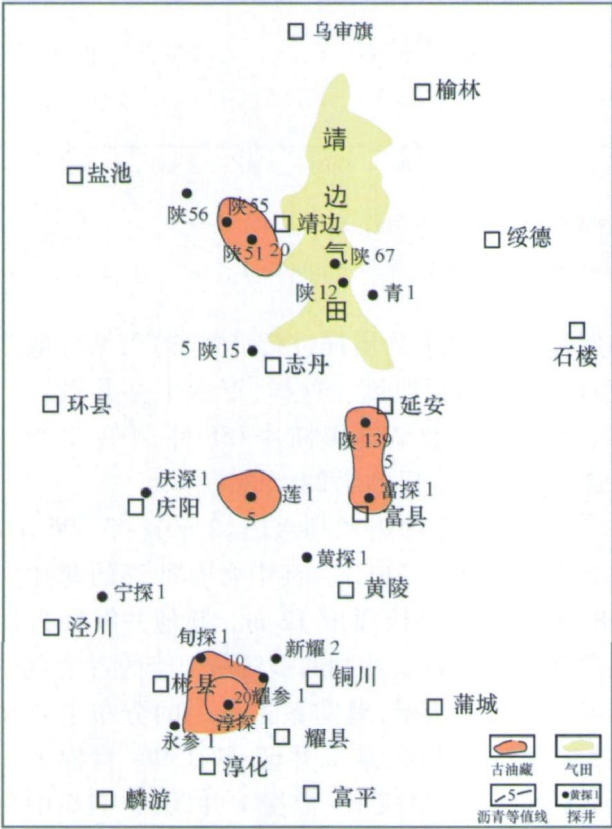


图 4 中央隆起带古油藏分布图
Fig. 4 Distribution of ancient oil pools in the central uplift belt

镇探 2 井一线, 以西存在东浅西深的古地理斜坡, 发育以颗粒白云岩、碳酸盐岩为主的碳酸盐陆棚, 宽约 30~50 km, 平凉组厚 0~332 m。

刘庆 7、任 3、环 14 等井中钻遇较厚的平凉组深灰-灰黑色含笔石页岩, 配合桌子山、石板沟、太统山桥头、银峒官庄、水泉岭、陇县龙门沟等露头剖面资料, 证实碳酸盐陆棚之外侧仍发育面积较大的深水斜坡相泥页岩和灰岩。

西缘北部从任 3 井至黄河断裂以西, 南部从石板沟到平凉以西, 平凉组从 400 m 左右逐渐增厚至 900 m (环 14 井) 或 1 134 m^[12] (石门沟), 岩性发生了较大变化, 既有深水原地沉积的深灰色、灰黑色钙质泥页岩、泥晶灰岩, 又有等深流沉积的亮晶颗粒灰岩和重力流沉积的砾岩, 表现为碳酸盐台地向深水斜坡过渡的沉积环境。

在三关、同心及天景山地区, 平凉组厚达 3 000 m^[13], 主要由海底扇、海底平原相的砂岩、砾岩、含笔石的砂质页岩组成, 属深水斜坡向海底平原过渡的沉积组合^[14]。因此, 西缘地区自东而西存在宽缓的碳酸盐陆棚-深水斜坡-海底平原相带, 由环 14 井以钙质泥页岩和碳酸盐岩为主体, 过渡到青龙山、牛首山以砂质泥岩和砂岩为主, 中间可能发育厚度较大的高碳泥页岩 (图 5)。

2.2 平凉组发育优质生油岩

平凉组主要分布在天环向斜深部, 以及西缘复杂构造带内, 离现今油气富集区远, 露头及钻井揭露少, 认识程度低, 对其生油能力及对该地区油气资源的贡献研究较少。

目前大家都认为平凉页岩是生油岩, 但对其资源潜力的评价偏低, 主要原因如下:

厚度薄。露头和钻井剖面证实, 平凉页岩主要分布在下段, 根据颜色和岩性确定的生油岩厚度为: 桌子山地区为 33.1 m, 任 3 井处为 22.5 m, 任 4 井处为 11 m, 平凉山庄处为 30.1 m, 平凉桥头地区为 32.8 m, 石板沟地区为 20 m, 环 14 井处为 48 m。

有机质丰度偏低。目前获得的平凉组泥岩 TOC 以鄂 7 井最高, 5 块样品平均值为 2.17%, 其他钻井或露头剖面的 TOC 值为 0.6%~0.8% (表 3)。

成熟度差异大, 表明热演化历史复杂。桌子山地区平凉页岩 R_o 为 1.72%, 石板沟剖面为 0.71%, 平凉地区仅 0.51%。

对上述问题的认识需要从盆地角度考虑。目前看到的剖面仍然以碳酸盐岩性为主, 泥页岩中均含较高的碳酸盐, 灰质成分高达 17%~38%, 即是说, 它们尚未完全脱离碳酸盐台地相沉积环境。而且所取样品多为露头风化样, 并不能真实反映泥页岩的原始有机质丰度。预计桌子山-环 14 井以西, 平凉组中泥页岩比例会增大, 泥岩变纯和有机质丰度更高, 而至青龙山-牛首山以西地区, 演变为含笔石的砂质泥页岩。

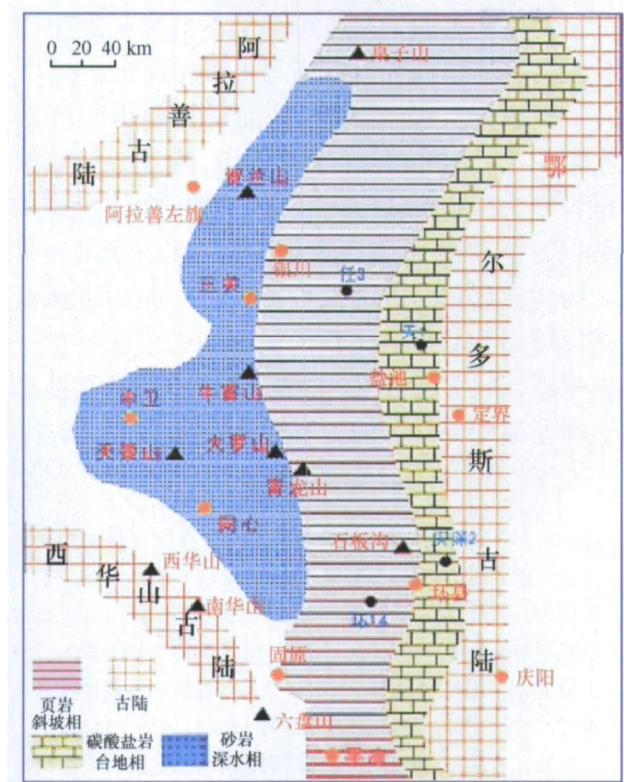


图 5 鄂尔多斯盆地西缘平凉期沉积岩相图

Fig. 5 Sedimentary facies map of Pingliang Formation in western margin of Ordos basin

3 古油藏成藏过程分析

在中央隆起带以西,平凉组沉积后,黄河断裂以西地区沉积了一套灰-深灰色的泥晶灰岩和泥页岩,厚 600~1 000 m,平行不整合于平凉组之上,称背锅山组(O₃b)^[15-16]。

表 3 平凉组不同岩性有机质丰度表

Table 3 Organic matter abundance in Pingliang Formation					
沉积相	取样位置	岩性	TOC, %	"A"/10 ⁻⁶	S ₁ +S ₂ /(mg·g ⁻¹)
陆棚	井下	石灰岩	0.10~0.42 0.18(29)		
		泥页岩	0.15~2.17 0.78(38)	163~1 280 820(4)	
	井下	泥灰岩	0.31(2)		
		灰岩	0.08~0.15 0.11(6)	89~93 91(2)	
斜坡	露头 (平凉、桌子山)	泥页岩	0.05~1.08 0.52(86)	183~815 523(5)	0.02~5.15 1.35(29)
		泥灰岩	0.12~0.44 0.35(9)		0.32~0.87 0.60(6)
		石灰岩	0.05~0.39 0.11(29)	28.7~183 105.8(3)	0.03~0.40 0.06(26)

注: 分子为范围值, 分母为平均值, 括号内为样品数

奥陶纪末,祁连-贺兰坳拉槽和鄂尔多斯地块一起隆升,剥蚀长达 1.5×10⁸ a,剥蚀、淋滤改善了中央古隆起带及其两侧不同时代碳酸盐岩的储集条件,以及油气的运移输导条件。

石炭-二叠纪时期,中央隆起带西侧沉积厚度 1 100~2 700 m,北厚南薄。中央隆起带 C-P 厚约 400 m,其东侧厚度为 800~1 000 m。经过这一阶段的填平补齐,中央隆起带古地理隆起渐趋消亡,但其地下隐伏构造仍然存在(图 6a)。

早一中三叠世时期,沉积古地理北高南低,中央隆起带两侧古地势差异不大,中下三叠统西侧厚 1 000~1 500 m,东侧厚 800~1 200 m,平凉组生油岩顶界埋深超过 2 500 m。

晚三叠-早侏罗世为中央隆起带古油藏形成阶段。西缘坳陷平凉组顶界埋深超过 3 000 m,全面进入生油阶段。中央古隆起隐伏地下,是油气运聚的中心,平凉页岩有条件向其供烃,并在其高部位风化壳中形成古油藏(图 6b)。

中侏罗-早白垩世为古油藏油气转化阶段。沉积造成古油藏埋深加大,以及次时期的构造-热事件,每百米古地温梯度高达 4.0~4.4℃^[17],中央隆起带奥陶系风化壳的古温度由 100℃(T₃)缓慢上升至 180℃以上(K₁),R_o由<1.0%上升至 2.0%~4.0%,古油藏在风化壳内近水平的构造环境中,持续遭受高热作用,原油逐渐裂解为气,古油藏转化为古气藏(图 6c)。

晚白垩世-第三纪为构造反转与古油藏破坏阶段。晚白垩世燕山运动Ⅳ幕自东而西的构造挤压形成晋西挠折带,以及西缘自西向东的挤压使西缘坳陷反转形成逆冲构造带,并掀动鄂尔多斯地块形成北东高、南西低的大型斜坡——陕北斜坡,古中央隆起带成为大型斜坡的一部分并位于斜坡低位处,中央隆起带聚集油气的优势被改造,一方面古油藏中油气向浅部运移散失,另一方面向陕北斜坡高部位运移,可形成较大规模的天然气藏(图 6d)。

在上述构造-沉积演化过程中,鄂尔多斯西缘一直是鄂尔多斯盆地的一部分。由早期的陆内克拉通(C₃-T₂)到晚期的陆内大型坳陷(T₃-K₁),西缘地区沉积范围虽有所缩小,但大型生油盆地长达 3 亿多年的继承性发育是不可忽视的。其地层层序和沉积厚度都比鄂尔多斯本部更全和更厚,除了平凉组外,下古生界的马六段(O_{1m6}),背

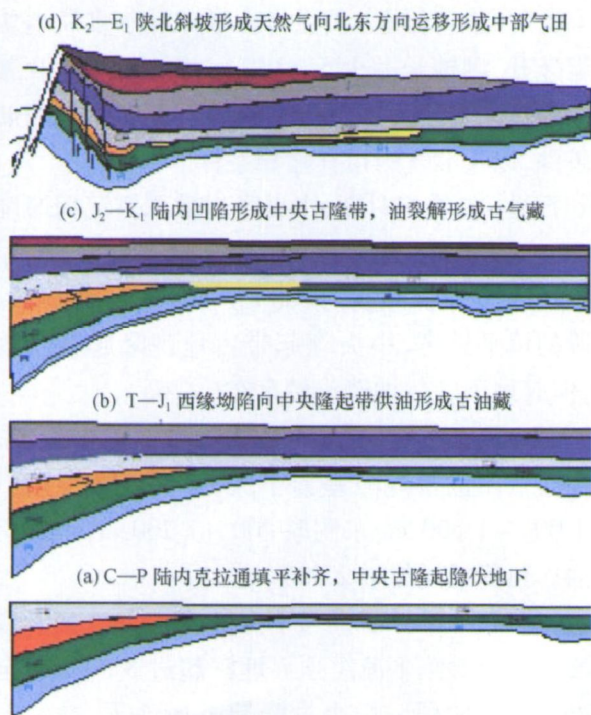


图 6 鄂尔多斯盆地 K_2 前构造演化与油气藏形成示意图

Fig. 6 Sketch map of pre- K_2 structural evolution and hydrocarbon accumulation in Ordos basin

锅山组 (O_3) 都有海相泥质烃源岩发育。这些烃源岩始终处于相对较低的构造部位, 埋藏深度较中央隆起带大, 因而可实现向中央隆起带的长期供烃, 形成古油藏。

到了晚白垩世, 特别是喜山运动中, 板块碰撞的远程效应波及到该地区, 西缘地区造陆成山, 盆地消亡, 导致中央隆起带及其西缘和南缘构造复杂带内部分古油气藏被破坏。

4 结论与认识

鄂尔多斯盆地中央隆起带奥陶系风化壳储层内沥青含量丰富, 可分为原生沥青、运移沥青和油层沥青。其热演化程度较高, 如旬探 1 井等的沥青反射率为 2.35% ~ 3.15%。有机地球化学分析表明沥青的族组成、甾类、萜类生标等显示其生源为以咸水低等生物为母源的有机质特征。

根据沥青的充填特征、面积系数, 并结合电测资料确定了古油层的厚度及分布, 一般厚 10 ~ 22 m, 其中陕 51 井厚达 31 m, 主要分布在中央古隆起带上, 反映了古油藏的分布。

通过对古油藏周缘生烃坳陷研究表明, 古油

藏的油源主要来源于西缘坳陷和秦岭坳拉槽中面积较大的平凉组深水斜坡相泥页岩和灰岩。

成藏史分析表明, 研究区前晚三叠世为埋藏压实与中央古隆起形成演化阶段, 晚三叠—早侏罗世为中央隆起带古油藏形成阶段, 中侏罗—早白垩世为沥青化和油气转化阶段, 晚白垩世—第三纪为构造反转与古油藏破坏阶段。其中古油藏的持续埋藏和高温演化致使其原油在中侏罗世—早白垩世转化为天然气, 除部分散失外, 可能是鄂尔多斯盆地中部气田的主要天然气来源。

参 考 文 献

- 1 陈学时, 耿忠霞. 广西十万大山盆地二叠统生物礁古油藏及隐伏礁预测 [J]. 地质学报, 1999, 73(4): 351~359
- 2 梅冥相, 李浩, 邓军, 等. 贵阳乌当二叠系茅口组白云岩型古油藏的初步观察与研究 [J]. 现代地质, 2004, 18(3): 353~359
- 3 王成善, 伊海生, 刘池洋, 等. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 139~143
- 4 伍新和, 王成善, 伊海生, 等. 西藏羌塘盆地烃源岩古油藏带及其油气勘探远景 [J]. 石油学报, 2005, 26(1): 13~17
- 5 冯乔, 柳益群, 张小莉, 等. 叠合盆地的热演化史与油气生成 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 65(3): 268~274
- 6 冯乔, 周立发, 柳益群. 多期次油气成藏与油气藏成因类型—以吐哈盆地为例 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2004, 34(6): 703~707
- 7 冯增昭, 鲍志东, 张永生, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶纪碳酸盐岩地层岩石岩相古地理 [M]. 北京: 地质出版社, 1998
- 8 吴征, 杨元初, 王新红. 鄂尔多斯盆地奥陶统原生—同层沥青分析 [J]. 天然气工业, 1999, 19(6): 14~17
- 9 陈安定, 刘德良. 寒武系烃源古油藏油裂解气特征及成藏条件 [J]. 海相油气地质, 2006, 11(2): 41~46
- 10 肖贤明, 刘德汉, 傅家谟, 等. 应用沥青反射率推算油气生成与运移的地质时间 [J]. 科学通报, 2000, 45(19): 2123~2127
- 11 彼得斯 K E, 莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南—古代沉积物和石油中分子化石的解释 [M]. 姜乃煌, 张水昌, 等译. 北京: 北京石油工业出版社, 1984, 100~101
- 12 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源 [M]. 陕西西安: 西安科学技术出版社, 1989
- 13 宁夏回族自治区地质矿产局. 宁夏回族自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1990
- 14 高振中, 罗顺北, 向幼斌. 鄂尔多斯西缘奥陶纪海底扇沉积体系 [J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 119~125
- 15 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
- 16 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003
- 17 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨 [J]. 地质学报, 2006, 80(5): 674~684

(编辑 高 岩)