

文章编号: 1001-6112(2005)05-0479-05

沙特鲁卜哈利盆地古生界 石油地质特征及勘探潜力分析

吕雪雁

(中国石化石油勘探开发研究院 海外中心, 北京 100083)

摘要: 利用石油地质学、储层地质学、油气成藏等理论分析了沙特境内的鲁卜哈利盆地古生界石油地质特征和油气勘探潜力。分析结果认为, 鲁卜哈利盆地位于世界上油气最富集的波斯湾含油气区, 长期处于构造背景稳定的克拉通内裂谷和被动大陆边缘, 沉积层序齐全, 沉积厚度超过 10 km, 纵向上形成众多生储盖组合, 油气成藏条件优越。海西运动期间发生的挤压和隆升作用对盆地古生界圈闭的形成起了决定性作用, 这些背斜、断背斜以及构造岩性圈闭在扎格罗斯山形成的挤压作用中受到一定程度的改造, 到定型期基本早于志留系源岩油气大规模运移的时间, 二者具有良好的配置关系。鲁卜哈利盆地古生界目前处于勘探初期, 比较已经发现的储量和 USGS 统计的古生界中待发现储量, 类比盆地北部中阿拉伯地质省的勘探现状, 预示该盆地古生界有很好的油气勘探前景。

关键词: 天然气; 凝析油; 勘探潜力; 古生界; 鲁卜哈利盆地; 沙特

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

众所周知, 沙特是世界第一石油大国。据美国能源署统计, 2003 年石油探明储量为 $2\ 642 \times 10^8$ bbl (包括中立区), 超过世界总探明储量的 1/4, 天然气储量 6.513×10^{12} m³。2002 年的原油日产量为 850×10^4 bbl, 包括中立区 57.9×10^4 bbl, 原油剩余日产能是 $(150 \sim 200) \times 10^4$ bbl。

沙特国家石油公司成立 10 年后, 为了充分利用国外资金和技术, 沙特政府决定对外开放石油下游和天然气上游领域。2003 年 7 月, 位于鲁卜哈利盆地的 3 个古生界天然气风险勘探区块首次公开招标, 吸引了国际大石油公司的注意。因为鲁卜哈利盆地目前的勘探开发活动主要集中在中生界, 古生界属于勘探初期, 预计有很好的勘探前景。据 USGS 估计, 鲁卜哈利盆地古生界潜力巨大, 待发现储量约有油 16.6×10^8 t, 气 8.9×10^{12} m³ 和天然气液 33.3×10^8 t。

本文以 2003 年区块招标调研资料为基础, 广泛查阅其他公开发表文献或数据库, 利用石油地质学、储层地质学、油气成藏规律等理论分析了鲁卜哈利盆地古生界的石油地质特征, 并从盆地分析角度预测了勘探潜力。

1 盆地概况

鲁卜哈利盆地是波斯湾盆地的一个二级构造单

元, 位于阿拉伯板块的南部陆上和海域, 包括沙特阿拉伯、卡塔尔、阿拉伯联合酋长国、伊朗、阿曼和也门等国家的部分地区, 总面积 $739\ 260$ km², 陆上面积约占 87.8%, 大约 $500\ 000$ km² 的面积被沙漠覆盖, 从阿拉伯地盾的东边界一直绵延至阿曼, 从北部中阿拉伯穹隆延伸至南部的 Hadramout 隆起, 中间被卡塔尔大背斜的南部延伸部分分为东、西 2 个次盆 (图 1)。

2 盆地区域构造—沉积演化特征

鲁卜哈利盆地的形成及演化与整个阿拉伯板块的演化密切相关。阿拉伯板块主要经历了 5 个演化阶段^[1]:

1) 前寒武纪挤压阶段 (715 ~ 610 Ma), 板块增生形成基底。

2) 前寒武纪晚期—晚泥盆世克拉通内背景下的拉张阶段 (610 ~ 364 Ma), 西鲁卜哈利盆地受板块西南部的 NW—SE 向 Najd 裂谷左旋走滑作用影响, 开始形成并充填碎屑岩沉积。

3) 晚泥盆世—中二叠世弧后构造背景阶段 (364 ~ 255 Ma), 属于海西构造旋回, 形成鲁卜哈利盆地, 沉积海西造山期弧后背景下的碳酸盐岩和碎屑岩。

4) 晚古生代—中生代 (晚二叠世—中白垩世)

收稿日期: 2005-02-16; 修订日期: 2005-08-17。

作者简介: 吕雪雁 (1972—), 女 (汉族), 山东莱阳人, 工程师, 主要从事沉积学及石油地质学研究。

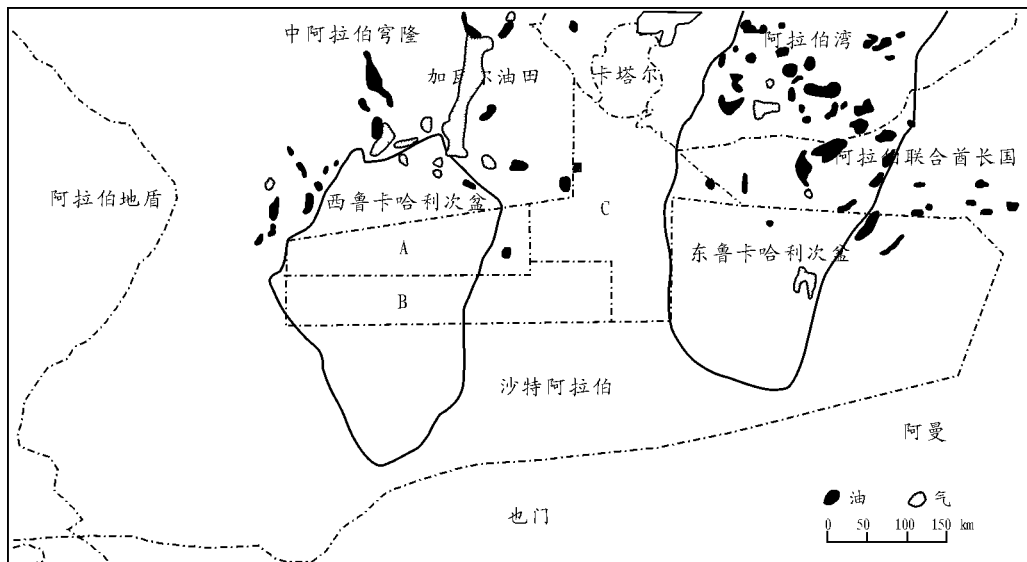


图 1 鲁卜哈利盆地构造区划

Fig. 1 Location and tectonic division of the Rub al Khali Basin

被动大陆边缘背景下的拉张阶段 (255 ~ 92 Ma), 盆地内沉积以海相碳酸盐岩为主, 其次为蒸发岩和碎屑岩。

5) 中生代晚期—现今挤压活动边缘阶段 (92 Ma—现今), 阿拉伯板块发生 NE 向的倾斜, 沉降中心从西鲁卜哈利次盆向东鲁卜哈利次盆转移, 沉积碳酸盐岩和蒸发岩。

3 盆地石油地质特征

3.1 地层特征

鲁卜哈利盆地是在前寒武纪末由裂谷作用形成的一个含盐地堑的基础上发育起来的, 整个显生宙不断下沉, 沉积了前寒武纪—第三纪地层, 局部地区沉积岩累计厚度超过 9 144 m, 其古生界以碎屑岩为主, 中生界和新生界则以碳酸盐岩为主 (表 1)。

3.2 烃源岩条件

鲁卜哈利盆地古生界已经证实的源岩是志留系阔里巴 (Qalibah) 组库塞巴 (Qusaiba) 段的热页岩, 是最大海侵时沉积的富含有机质、对应高 GR 响应 (> 150 °API) 的深水黑色泥岩, 厚度 3 ~ 75 m。这套热页岩以海相型干酪根为主, TOC 为 0.24% ~ 5.85%, 平均为 0.62% ~ 1.79%, 分布于鲁卜哈利盆地的中部和北部, 局部在海西期构造高部位被剥蚀 (例如, 中阿拉伯穹隆)。前人研究结果^[2]认为, 热页岩在早三叠世开始生油, 到老第三纪进入生油气阶段, 而油的排出在早白垩世晚期—中白垩世早期 (阿普提—阿尔必期, 100 ~ 120 Ma

前) 开始。现今在鲁卜哈利盆地的大部分地区库塞巴段热页岩已进入生气成熟阶段, 在东鲁卜哈利次盆的深部位可能已经过成熟。

油源对比 (生物标记化合物、碳同位素) 研究

表 1 鲁卜哈利盆地地层特征

Table 1 Stratigraphic characteristics of the Rub al Khali Basin

界	系	统	岩相	生油岩	储层	板块位置
新生界	第三系		白云岩、膏岩、鲕粒灰岩			活动大陆边缘
中生界	白垩系	上统	泥岩、灰岩			被动大陆边缘
		下统	鲕粒灰岩、砂岩、泥灰岩			
	侏罗系	上统	灰岩、鲕粒灰岩、石膏			
		中统	灰岩、鲕粒灰岩			
		下统	砂岩			
	三叠系	上统	砂岩			
		中统	白云岩、泥岩			
		下统	泥岩			
古生界	二叠系	上统	灰岩、白云岩			弧后
		下统	砂岩、泥岩			
	石炭系	中上统	砂岩			
		中下统	泥岩为主, 夹砂岩			
	泥盆系	上统	砂岩			克拉通
		中下统	砂岩、砂岩与碳酸盐岩互层			
	志留系	上统	泥岩			
		下统	泥岩、砂岩薄层			
	奥陶系	上统	砂岩、砾岩			
		中统	泥岩、砂岩			
下统		砂岩				
寒武系			砂岩、砾岩			

表明，库塞巴段热页岩是沙特中部地区发现的古生界原油的生油岩，同时也是鲁卜哈利盆地古生界凝析油和天然气的烃源岩。

B 区块 (图 1) 内 Mukassir 1 井志留系库塞巴段泥岩的有机地化分析 (表 2) 表明，库塞巴段底部的热页岩 (5 069~5 107 m) 有机碳含量高， $TOC > 3.75\%$ ，其上部泥岩的有机碳含量亦多 $> 0.5\%$ ，氢指数多 > 23 ，属于品质较好的烃源岩。

3.3 储层特征

鲁卜哈利盆地古生界目前主要在石炭—二叠系欧奈宰 (Unayzah) 组砂岩和二叠系库夫 (Khuff) 组碳酸盐岩中发现约 68×10^6 t 的凝析油和 1.2×10^{12} m³ 的气。类比北部中阿拉伯地质省的勘探结果，该盆地可能还存在泥盆系昭夫 (Jauf) 组砂岩，志留系库塞巴中亚段砂岩，下志留统巴卡 (Baq) 组砂岩以及奥陶系萨拉 (Sarah)、萨克 (Saq) 组砂岩等 5 套潜在储层。这些古生界砂岩主要储集轻质油和富含凝析油的天然气。

3.3.1 石炭—二叠系欧奈宰组砂岩储层

该砂岩储层是盆地北部中阿拉伯地质省的主要油气及凝析气储层，在 A 区块 (图 1) 的 Tukhman 2 井中发现 1.4×10^6 t 凝析油和 85×10^8 m³ 天然气。岩性上，该储层由一套河流相、冲积相和风成沉积的陆相碎屑岩组成，自上而下分为欧奈宰 A、欧奈宰 A2、欧奈宰 B 和欧奈宰 C 等 4 段，厚度一般在 30~300 m 以上，净厚度 6~100 m，孔隙度 0.3%~26.0%，渗透率 $(0 \sim 200) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属于低孔低渗或中孔低渗储层，个别层段属于中孔中渗储层。

通常欧奈宰砂岩中的天然气发现位于 3 000 m

表 2 Mukassir 1 井志留系库塞巴段烃源岩分析数据
Table 2 Source rock geochemical data of the Qusaiba Member of Qalibah Formation in the well Mukassir 1

深度/m	TOC, %	S ₁ (HC RK) / (mg · g ⁻¹)	S ₂ (HC RK) / (mg · g ⁻¹)	H 指数 HC TOC / (mg · g ⁻¹)	T _{max} /
149~5 017	0.53	0.75	0.43	81	386
158~5 029	0.60	0.74	0.40	67	377
168~5 035	1.14	1.55	0.61	54	365
183~5 051	0.66	0.85	0.48	73	376
198~5 066	1.60	1.83	1.16	73	370
213~5 081	3.75	2.46	1.29	34	348
219~5 090	3.28	1.82	0.93	28	345
226~5 096	4.12	1.27	0.96	23	340
230~5 102	4.43	3.85	1.63	37	352

埋深以下，纯油藏或具气顶的油藏的埋深则相对较浅。欧奈宰储层中的气富含凝析油。

1) 储层岩石学特征

欧奈宰组储层岩性特征为中粗粒岩屑石英砂岩、石英砂岩，部分细至粉砂岩。本组地层岩心中偶见裂缝存在。

欧奈宰组沉积时气候为干旱环境，岩石成分比较复杂。但是由于碎屑沉积物的物源主要为盆地西部的结晶基底风化碎屑物质，沉积物还是以石英为主，即使在岩屑砂岩中，石英碎屑的含量也在 70%；长石石英砂岩较少。

2) 储层成岩作用特征

欧奈宰组砂岩的成岩作用有：风化作用、硅质和钙质的结核作用、溶蚀作用、胶结作用、压实作用、压溶作用和自生矿物的形成作用等，其中溶蚀作用是形成优质储层的主要成岩作用。

3) 储集空间类型

薄片观察结果表明，储集空间以次生孔隙为主，主要是粒间溶蚀孔隙，还有极少量的粒内溶蚀孔隙和结核内孔隙。粒间溶蚀孔隙中被溶物质几乎全为泥质杂基，薄片统计的面孔率为 2%~17%，一般为 7%~10%。粒内溶蚀孔隙主要为长石粒内溶孔，部分长石被溶，长石粒内溶孔较为少见，面孔率不超过 2%，结核内孔隙类型也比较少见，面孔率 2%左右。欧奈宰组的孔隙组合主要是粒间溶蚀孔隙组合，以及少量粒间和粒内溶孔组合。

4) 物性特征

欧奈宰组储层岩心分析孔隙度为 0.3%~26.0%，平均为 6.6%；渗透率为 $(0.1 \sim 2 976.6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $87.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。测井解释孔隙度为 7.01%~15.13%，平均为 10.26%；渗透率为 $(1.707 \sim 36.75) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $10.73 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

5) 测井响应特征

测井解释气层、含气层 GR 最低 17.96°API，最高 83.45°API，平均 45.55°API；中子密度最低 2.29 g/cm³，最高 2.65 g/cm³，平均 2.51 g/cm³；AC 最低 199.08 μs/m，最高 286.25 μs/m，平均为 233.86 μs/m；RRT 最低为 0.69 ·m，最高为 62.62 ·m，平均为 14.22 ·m。

3.3.2 二叠系库夫组碳酸盐岩储层

该储层是北部阿拉伯地质省的主要产气层，在鲁卜哈利盆地已经发现 66×10^6 t 凝析油和 1.2×10^{12} m³ 气。

1) 储层岩石学特征

库夫组是研究区勘探目的层中唯一的由碳酸盐岩组成的地层, 岩性特征主要是在能量较弱的环境中沉积的以微晶结构为主的碳酸盐岩, 为薄层浅灰绿色泥质云岩、灰白色块状白云岩及灰色灰岩。白云岩中垂直裂缝发育, 并有高角度缝合线, 偶见石膏斑块。岩石类型有: 微晶灰岩、含砂屑微晶灰岩、生物碎屑微晶灰岩、砂屑微晶灰岩、微亮晶生物碎屑灰岩、球粒微晶灰岩、微晶云岩、针孔粉晶云岩、微亮晶砂屑云岩, 以及它们之间的过渡类型。

2) 储层成岩作用特征

库夫组碳酸盐岩的成岩作用特征主要有以下几种: 白云石化作用、膏化作用、胶结作用、溶蚀作用、重结晶作用、压溶作用、黄铁矿化作用和破裂作用。

其中, 粉晶白云石化作用和溶蚀作用对库夫组储层的发育具有建设性作用。破裂作用所形成的裂缝基本上全为方解石充填, 对储集性能的贡献不大。

3) 储集空间类型

根据薄片观察和鉴定, 库夫组碳酸盐岩的储集空间类型可以分为: 晶间孔、晶间溶孔、粒间孔、粒间溶孔、生物碎屑溶孔和大的溶蚀孔。孔隙组合类型可以分为晶间孔和晶间溶孔组合、粒间孔和粒间溶孔组合, 以及生物碎屑溶孔和粒间溶孔组合。

4) 物性特征

库夫组储层岩心分析孔隙度为 0.1% ~ 29.9%, 平均孔隙度为 5.5%; 渗透率为 (0.1 ~ 2.926) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 70.2 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。测井解释孔隙度为 5.71% ~ 8.16%, 平均为 6.90%, 渗透率为 (0.33 ~ 0.80) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 0.50 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。岩心分析的物性可能由于部分样品失真, 孔渗性偏大, 仅作参考。

5) 测井响应特征

测井解释气层、含气层 GR 最低 10.85° API, 最高 62.32° API, 平均 30.8° API, 中子密度最低 2.32 g/cm³, 最高 2.84 g/cm³, 平均 2.67 g/cm³; AC 最低 150.10 $\mu\text{s}/\text{m}$, 最高 288.42 $\mu\text{s}/\text{m}$, 平均为 188.55 $\mu\text{s}/\text{m}$; RRT 最低为 2.93 ·m, 最高为 160.53 ·m, 平均为 31.87 ·m。

3.4 盖层特征

区域盖层有库塞巴段泥岩、库夫组底部的膏岩和库夫组的致密碳酸盐岩、页岩。

上奥陶统卡赛目 (Qasim) 组和下志留统阔里巴组储集层的盖层为组内页岩。昭夫组的顶部盖层为 D₃b 标志层, 为一套海进页岩层系。库夫组的致密碳酸盐岩、页岩和蒸发岩构成了欧奈宰储集层的

顶部盖层, 该组的蒸发岩则构成了库夫组碳酸盐岩储集层的盖层。

3.5 含油气系统

盆地内主要发育库塞巴页岩—库夫/欧奈宰含油气系统。该含油气系统纵向上有 4 套储集层, 从上至下分别为二叠系库夫组碳酸盐岩、石炭—二叠系欧奈宰组砂岩、志留系库塞巴段中部砂岩—粉砂岩、志留系底部巴卡砂岩和奥陶系萨拉组和萨克组砂岩。志留系库塞巴段热页岩可能与奥陶系萨拉组和萨克组砂岩形成新生古储, 与志留系库塞巴段中部的砂岩—粉砂岩、底部的巴卡砂岩形成自生自储, 与石炭—二叠系欧奈宰组砂岩和二叠系库夫组碳酸盐岩形成古生新储的油气组合。其中萨拉组和欧奈宰组分别于 B 区块的穆卡萨构造、A 区块的塔克曼构造钻遇, 并获得气显示和油气藏; 库塞巴段和巴卡砂岩目前尚未获明显油气显示。

主要圈闭类型有背斜、断背斜、地层上倾尖灭的岩性圈闭和与不整合面有关的地层圈闭。

区域盖层有库塞巴段泥岩、库夫组底部的膏岩和库夫组致密碳酸盐岩、页岩。

根据古生界库塞巴段热页岩的演化分析, 从深凹到穆卡萨台地, 源岩在二叠纪末—老第三纪早期依次进入主生油期, 三叠纪末期以来进入主生气期, 目前基本进入生干气—湿气的阶段。局部构造演化研究表明, 古生界圈闭雏形形成受前寒武纪裂谷作用的影响, 为受基底古隆起控制的披覆构造, 海西晚期得到改造和加强, 晚白垩纪进一步加强并定型。尽管对 B 区块内不同区带的古生界圈闭来说, 由于所处位置源岩演化不尽相同, 圈闭形成与油气运聚在时间上的匹配有一定的差异, 但是圈闭形成时间都早于油气大量运移时间, 二者匹配关系好 (图 2)。

4 勘探潜力分析

鲁卜哈利盆地位于世界上油气最富集的波斯湾含油气区, 长期处于构造背景稳定的克拉通内裂谷和被动大陆边缘, 沉积层序齐全, 沉积厚度超过 10 km, 除海西运动期间发生过挤压和剥蚀作用外, 多以海平面升降运动控制沉积过程, 纵向上形成众多生储盖组合, 油气成藏条件优越^[5]。

鲁卜哈利盆地北部的中阿拉伯地质省面积为 493 225 km², 目前古生界已发现 12.89 $\times 10^8$ t 原油, 71.60 $\times 10^8$ t 凝析油和 49 $\times 10^{12}$ m³ 天然气, 类比鲁卜哈利盆地, 古生界处于勘探初期, 面积

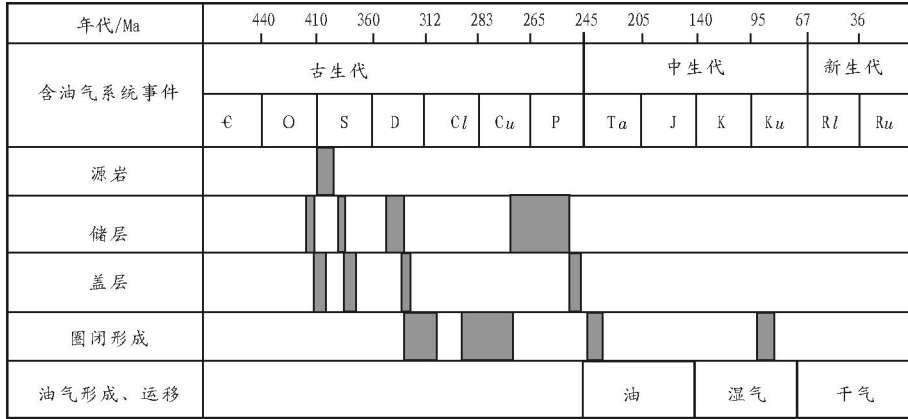


图 2 鲁卜哈利盆地库塞巴页岩—库夫/欧奈库含油气系统事件图

Fig. 2 Qusaiba Shale- Khuff/ Unayzah petroleum system chart of the Rub al Khali Basin

表 3 鲁卜哈利盆地古生界待发现资源量统计

Table 3 Undiscovered resources in Paleozoic of the Rub al Khali Basin

储量	F95	F50	F5	均值
油/10 ⁸ t	2. 64	13. 90	39. 44	16. 60
气/10 ¹² m ³	2. 16	8. 10	18. 20	8. 90
天然气液/10 ⁸ t	7. 65	29. 50	71. 99	33. 30

739 260 km²，目前仅发现 68 ×10⁶ t 凝析油和 1. 2 × 10¹² m³ 气。由于 2 个地质单元构造地质演化经历相似，预示鲁卜哈利盆地古生界勘探前景很好。另外，类比鲁卜哈利盆地目前发现的古生界储量和 USGS 对该盆地古生界待发现资源量的统计结果（表 3），也可以预见该盆地的资源潜力。

参考文献

- 1 Sharland P R, Archer R, Casey D M, et al. Arabian plate sequence stratigraphy: GeoArabia special publication 2 [M]. Manama: Gulf PetroLink, 2001. 18
- 2 Abur-Ali M A, Rudkiewicz J L, Mc Gillivray J G, et al. Paleozoic petroleum system of Central Saudi Arabia [J]. GeoArabia, 1999, 4(3): 321~336
- 3 Mahmoud M D, Vaslet D, Hussein M I. The Lower Silurian Qalibah Formation of Saudi Arabia: an important hydrocarbon source rock [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76: 1 491~1 506
- 4 Cole G A, Abur-Ali S M, Aoudeh W J, et al. Organic geochemistry of the Paleozoic petroleum system of Saudi Arabia [J]. Energy and Fuels, 1994, 8: 1 425~1 442
- 5 史丹妮, 王 骏, 张艳秋等. 论新形势下海外油气勘探开发方向 [J]. 石油实验地质, 2002, 24 (5): 474~479

PETROLEUM GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND EXPLORATION POTENTIAL IN THE PALEOZOIC OF RUB AL KHALI BASIN, SAUDI ARABIA

L üXueyan

(Overseas Research Center, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Petroleum geological characteristics and exploration potential have been analyzed in the Rub al Khali Basin with the theory of petroleum geology, reservoir geology and petroleum entrapment. The Rub al Khali Basin is located in the most prolific hydrocarbon accumulation region, developing multiple reservoirs, sources and seals during the open and close of Paleo and new Tethyan oceans. The Hecynian movement plays an important role in the formation of Paleozoic traps in this basin, which in general include anticlines, faulted anticlines and structural-stratigraphic type occasionally. Although these Paleozoic traps to some degree reactivate during the formation of Zagros Mountain, they develop earlier than the main hydrocarbon migration time. Thus between them there exist better charging relationship. The Rub al Khali Basin now is in the immature exploration stage, with great potential in the Paleozoic.

Key words: natural gas; condensate oil; exploration potential; Paleozoic; the Rub al - Khali Basin; the Saudi Arabia