

鲁卜哈里盆地志留系 热页岩特征及成熟度演化史

郑磊^{1,2}, 金之钧², 周瑾²

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 根据钻井资料, 分析了鲁卜哈里盆地志留系底部热页岩在盆地内的发育状况。对岩心、岩屑样品进行了 TOC 测定、热解分析及镜质体反射率测定, 认为热页岩演化已达成熟—高成熟阶段, 有的甚至是过成熟阶段。对样品干酪根、沥青“A”及其族组分的碳同位素分析, 确定了有机质类型为 II 型。利用 PetroMod 盆地模拟软件, 对 3 口探井进行埋藏史、热史和成熟度史模拟, 并对对外合作区块热页岩进行成熟度演化史模拟, 认为该区块志留系底部热页岩由深凹至东部斜坡各阶段的演化时间依次变晚, 凹陷区热页岩在早二叠世均已进入成熟演化阶段; 而东部斜坡热页岩于早三叠世末—晚侏罗世末期才进入成熟演化阶段。

关键词: 成熟度; 生烃史; 热页岩; 志留系; 鲁卜哈里盆地

中图分类号: TE122.1⁺16

文献标识码: A

Characteristics and maturity evolution history of Silurian hot shales in Rub Al Khali Basin

Zheng Lei^{1,2}, Jin Zhijun², Zhou Jin²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. SINOPEC Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The geological conditions of hot shales at the bottom of Silurian in the Rub Al Khali Basin were studied based on well drilling data. The w (TOC) test, pyrolysis analysis and R_o test of core and cutting samples were made, indicating that the hot shales are in the mature-high-mature and even over-mature stages. Through the carbon isotopic analyses of kerogen, bitumen “A” and group composition, organic type was confirmed as type II. By means of PetroMod Basin simulation software, the burial history, thermal history and maturity history of 3 wells were simulated. The maturity history of hot shales in contract blocks was simulated as well. The simulation results can be concluded that the forming age of Silurian hot shales in the Rub Al Khali Basin becomes later from the deep sag to the eastern slope, and the hot shales in the deep sag have entered into mature period since the Early Permian; however, the hot shales on the eastern slope became mature from the end of the Early Permian to the end of the Late Jurassic.

Key words: maturity; hydrocarbon generation history; hot shale; Silurian; Rub Al Khali Basin

钻井揭示, 鲁卜哈里盆地志留系 Qalibah 组 Qu-saiba 段下部发育了一套暗色泥页岩, 据有机质丰度可分为上、下 2 段, 上段有机质丰度较低; 下段为通常所称的底部热页岩 (Hot Shale), 是公认的全盆地乃至中阿拉伯及北非诸盆地古生界最重要的油气源岩^[1-9]。据文献资料^[10], 这套热页岩是盆地西部 Hawtah 台地、北部 Ghawar 构造和南部古生界储层中油气的烃源岩。沙特对外合作 B 区块勘探表明,

热页岩厚 0~38 m, w (TOC) 为 2%~4.45%, 最高可达 8.65%。本文通过样品测试分析和软件模拟的方式对志留系热页岩特征及成熟度演化史进行分析, 旨在明确该套热页岩在地质历史时期中的演化。

1 地质背景

鲁卜哈里盆地是波斯湾盆地的一个次级构造单元(图 1)^[1-2], 位于阿拉伯板块的中南部陆上和

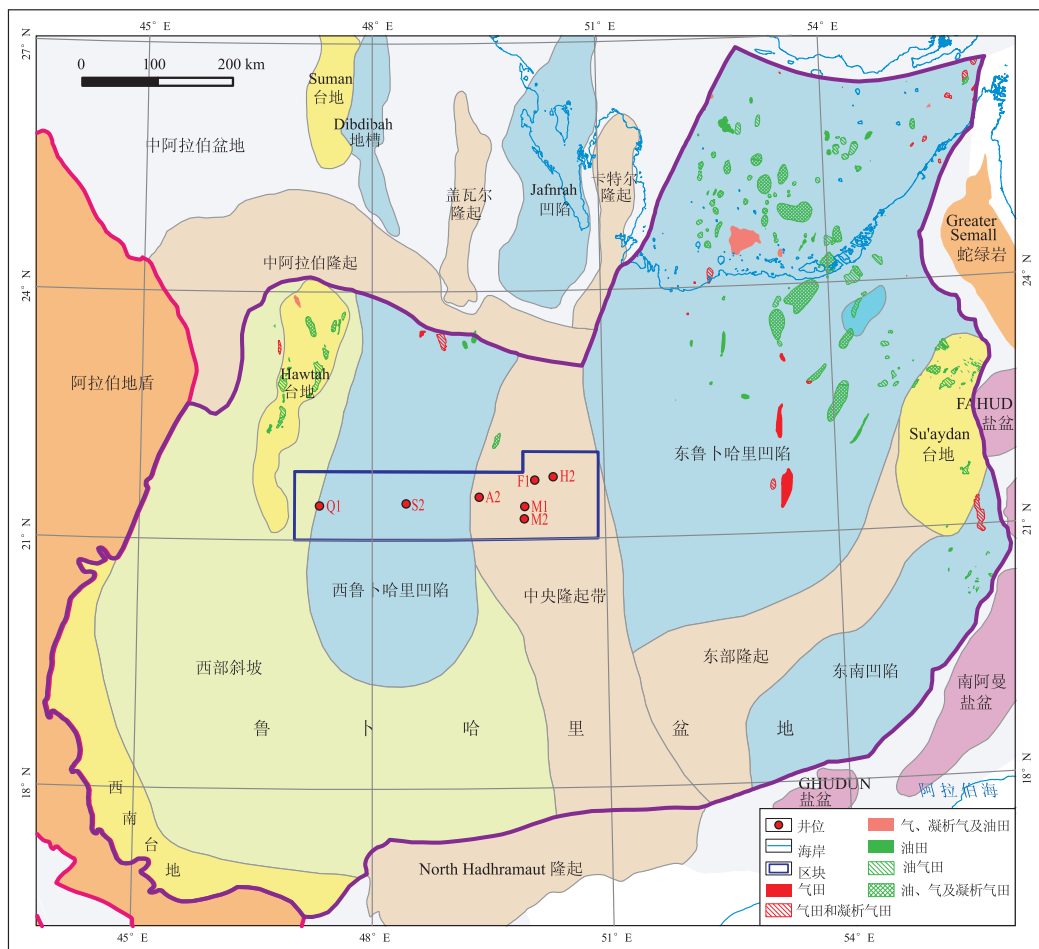


图1 鲁卜哈里盆地区域构造位置

Fig.1 Regional tectonic location of Rub Al Khali Basin

海域,介于北纬 16°40' ~ 26°50',东经 43°56' ~ 56°44'之间,地域上包括沙特阿拉伯、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 875 720 km²,陆上面积约占 89.8%,超过 500 000 km²的面积被沙漠覆盖,盆地之北为中阿拉伯隆起,西与阿拉伯地盾相邻,南靠沿亚丁湾北海岸线分布的 Hadramout 隆起,东为阿曼山,中间被卡塔尔大背斜的南部延伸部分(中央隆起带)分为东、西两个次盆,研究区位于盆地中部。

鲁卜哈里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^[11]。

2 热页岩特征

2.1 热页岩发育概况

2.1.1 热页岩划分标准

热页岩在测井曲线上的特征响应是:高GR值

(>150 API)及高电阻率和低密度。在区域范围内,下志留统 Qusaiba 页岩的 GR 和 $w(\text{TOC})$ 值间具有非常一致的变化关系,通常用 GR 曲线资料来反映有机质含量。在北非地区,如果志留系底部页岩 GR 值大于 200 API,就被视为热页岩,其对应的 $w(\text{TOC})$ 值基本上为 3%。同时,GR 值取 200 API 基本上可以将志留系高 GR 值及富有机质的页岩与有机质含量偏低的暗色泥页岩清楚地区分开。在阿拉伯地区,这套热页岩同样发育,其典型特征和有机地化指标相似。但是与北非地区不同的是,在定义这套热页岩时将 GR 值的下限值设为 150 API,对应的 $w(\text{TOC}) > 1\% \sim 1.5\%$ 。本文综合分析各井已钻遇热页岩的情况,将 GR 值的下限设为 150 API, $w(\text{TOC}) > 2\%$ 作为划分热页岩的标准。

2.1.2 热页岩发育特征

根据以上热页岩的判识标准,志留系底部热页岩在对外合作区块 7 口古生界钻井中有 6 口井钻遇热页岩,但厚度变化很大,从 1.8~37.8 m(表 1)。中阿拉伯地区钻井揭示的热页岩厚度也变化很大,

表 1 中阿拉伯隆起和鲁卜哈里盆地志留系底部热页岩厚度分布

Table 1 Thickness of hot shales at Silurian bottom in Middle Arabic Uplift and Rub Al Khali Basin

地区	井名	厚度/m	GR _{max} /API
对外合作区块	S2	7.0	700
	A2	4.0	389
	M2	2.4	215
	M1	37.8	329
	Q1	1.8	304
	F1	14.0	310

表明了盆地内热页岩具有广泛发育,但平均厚度不大,且表现出较强的不稳定性和志留系底部的热页岩存在多个沉积中心(厚度很大)的特点。

2.2 热页岩地球化学特征

2.2.1 有机质丰度

在对外合作区块新钻古生界探井的志留系 Qusaiba 段采集岩心、岩屑样品进行 TOC 测定及热解分析测试,同时结合区块内 M1 井的老井样品的测试资料进行对比分析(图 2)。

根据北非穆祖克盆地大量钻井证实,志留系(穆祖克盆地为 Tanezzuft 组,鲁卜哈里盆地为 Qali-

bah 组 Qusaiba 段)底部热页岩沉积于志留纪早期初次海浸时期,其分布受控于奥陶系顶面的古地貌特征,在地貌的相对低洼部位沉积较厚,而在地貌相对高部位沉积较薄,甚至缺失,在鲁卜哈里盆地热页岩也具有相似分布特征。

(1)M1 井在 4 943.9~5 111.0 m 井段有 37.8 m 的热页岩烃源岩,自然伽马测井的 GR 值呈明显高起跳(150~330 API);有机碳含量平均 4.01%,最高值为 5.85%;S₁+S₂ 平均 1.65 mg/g,最大值 5.48 mg/g(图 3a)。

(2)S2 井在 5 685.1~5 692.1 m 段有 7 m 的热页岩烃源岩,自然伽马测井的 GR 值呈明显高起跳,最高值达 700 API;有机碳含量平均 3.15%,最高值为 4.39%;S₁+S₂ 平均 3.078 mg/g,最大值 4.75 mg/g(图 3b)。热解氢指数(I_H)平均值较上段岩屑样品值低,可能是成熟度较上段样品高所致。

(3)A2 井在 5 295.9~5 307.8 m 段有 4 m 的热页岩;其有机碳含量平均 4.45%,最高值 5.24%;S₁+S₂ 平均 0.35 mg/g,最大值 0.42 mg/g(图 3c)。

(4)M2 井在 4 952.4~4 954.8 m 段有 2.4 m 的热页岩,伽马值最高 215 API,起跳不明显;岩屑样品分析有机碳含量平均 2.06%,最高值为 2.73%;

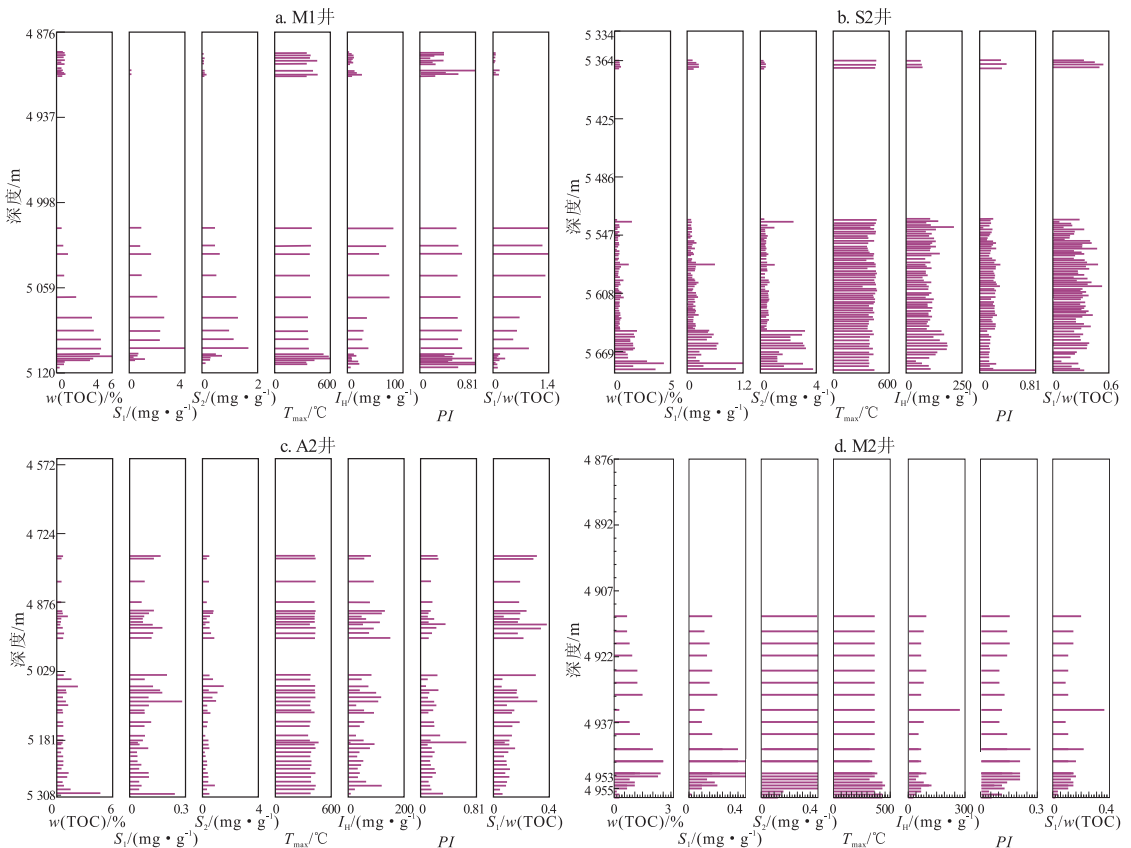


图 2 鲁卜哈里盆地对外合作区块钻井地球化学综合剖面

Fig.2 Geochemical comprehensive profile of wells in cooperation blocks in Rub Al Khali Basin

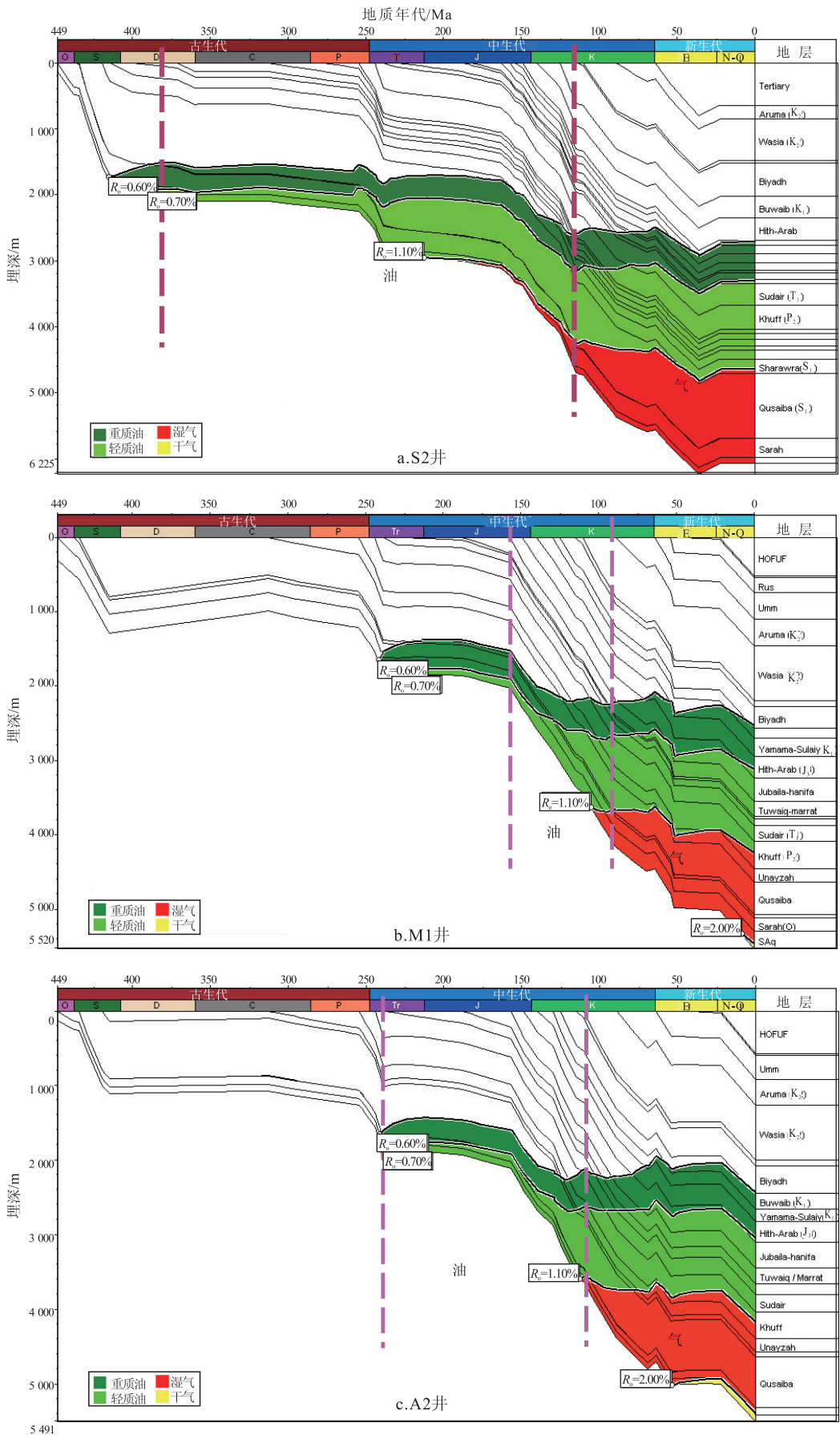


图3 鲁卜哈里盆地对外合作区块各井地层成熟演化史

Fig.3 Maturity evolution history of wells in cooperation blocks in Rub Al Khali Basin

表 2 鲁卜哈里盆地志留系底部热页岩(灰黑色页岩)有机质丰度及源岩评价

Table 2 Organic abundance and potential evaluation of hot shales (gray and black shales) at Silurian bottom in Rub Al Khali Basin

井名	钻井深度/m	样品类型	w(TOC)/%	GR/API	评价
M1	4 943.9~5 111.0	岩心/岩屑	4.01(24)/2.1~5.85	150~330	
S2	5 685.1~5 692.1	岩屑	3.15(4)/1.67~4.39	150~700	
A2	5 295.9~5 300.5	岩屑	3.02(2)/1.42~4.61	160±	优质
A2	5 306.6~5 307.8	井壁取心	4.45(4)/3.01~5.24	250±	烃
M2	4 952.4~4 954.8	岩屑	2.06(5)/1.41~2.73	215±	源
M1	5 202.4~5 233.2	井壁取心	3.22(8)/1.65~4.08	250±	岩
Q1	4 472.4~4 474.2	井壁取心	2.12	200±	
M1	5 472.7~5 477.3	岩屑	4.12(4)/2.87~4.68		

注:表中 w(TOC)中的分式意义为:平均值(样品数)/最小值~最大值。

S_1+S_2 为 0.13~0.17 mg/g(图 3d)。

根据所有岩心、岩屑样品 TOC 测定及热解分析结果(表 2),鲁卜哈里盆地志留系底部热页岩有机碳含量为 2.06%~4.45%,平均 3.47%,属于富烃源岩或很好烃源岩^[12]。热页岩 S_1+S_2 值较低,平均 1.37 mg/g,是成熟度较高所致,同时反映有机质转化率较高。

2.2.2 有机质类型

区域上阿拉伯隆起区热页岩的有机质类型为 II 型。本文根据干酪根、沥青“A”及其族组分的碳同位素分析结果(表 3)认为,盆地内对外合作区块 S2 井志留系 5 357.5~5 365.6 m 处样品有机质类型基本上是 II 型,与区域相同。

2.2.3 有机质成熟度

据沙特阿美公司 Mahdi Abu-Ali 等的研究,鲁卜哈里盆地古生界志留系以 II 型有机质为母质类型的烃源岩演化: $R_o < 0.6%$,源岩处于未成熟阶段; $R_o = 0.6% \sim 1.1%$ 为成熟的生油阶段(其中 $R_o = 0.6% \sim 0.7%$ 生烃为重质油,0.7%~1.1%生烃为轻质油); $R_o = 1.1% \sim 2.0%$ 为成熟、高成熟的湿气阶段; $R_o > 2%$ 为过

成熟的干气阶段。根据上述成熟度划分标准, Qusaiba 段烃源岩的演化都达到成熟—高成熟阶段,底部热页岩甚至达到成熟阶段(表 4)。

3 热页岩成熟度演化史

3.1 典型探井热页岩的成熟度演化史

目前盆地内已有数口古生界探井,其中对外合作区块基本位于盆地沉积中心。根据实钻 7 口探井的测井温度资料,计算对外合作区块单井的今地温梯度。中央凹陷 S2 井今平均地温梯度为 2.09 °C/hm,往东 A2 井为 2.6 °C/hm, M1 井为 2.8 °C/hm, H2 井为 2.94 °C/hm。对外合作区块现今地温梯度为 2~3 °C/hm,呈现中地温场特征,且具有隆起区地温梯度高而凹陷区地温梯度低的特征。鲁卜哈里盆地也呈现中地温场特征,现今地温梯度总体呈北高南低,东高西低的趋势。

3.1.1 热页岩成熟速率分析

位于中央凹陷的 S2 井 Qusaiba 底的热页岩成熟演化见图 3a。凹陷区在古生代是沉降中心和沉积中心,地层的持续沉积加厚,使得志留系底部的

表 3 鲁卜哈里盆地 S2 井志留系源岩有机质类型判别

Table 3 Organic matter types of Silurian source rocks from well S2, Rub Al Khali Basin

项目	干酪根	沥青“A”	饱和烃	芳香烃
$\delta^{13}C_{PDB}/\%$	-25.5~ -27.98	-28.59~ -29.07	-28.6~ -29.32	-27.19~ -28.81
有机质类型	II ₂ 腐泥腐殖型	II ₁ 含腐殖腐泥型	II ₁ 含腐殖腐泥型	II ₁ 含腐殖腐泥型

注:样品深度为 5 357.5~5 365.6 m。

表 4 鲁卜哈里盆地对外合作区古生界地层实测 R_o 数据Table 4 Measured R_o data of Paleozoic in cooperation blocks in Rub Al Khali Basin

井名	样品类型	位置	埋深/m	地层	$R_o/\%$
S2	岩心	中央坳陷区	5 364.8	Qusaiba	1.424
M1	岩心	Hadidah 隆起西斜坡	5 109.2	Qusaiba Hot Shale	1.92
F1	岩屑	Hadidah 隆起西斜坡	4 960.4~4 961.9	Qusaiba	1.51

热页岩热演化进程明显早于隆起区,在热页岩沉积后约 40 Ma (志留纪沉积末),即进入低成熟门限 ($R_o=0.6\%$),成熟阶段持续时间约 278 Ma, R_o 演化速率为 $1.8 \times 10^{-3}\%/Ma$ 。早白垩世(约 119 Ma)进入高成熟的湿气演化阶段,目前模拟结果 R_o 在 1.75% 左右。进入高成熟阶段至今的持续时间约 117 Ma,高成熟阶段的 R_o 演化速率为 $5.13 \times 10^{-3}\%/Ma$ 。

M1 井 Qusaiba 段底部的热页岩成熟演化见图 3b。由于古生代地层的沉积速率总体低于凹陷区,且受海西构造隆升的影响,地层抬升,所以位于 Qulibah 底部的热页岩的演化进程远晚于凹陷区的热页岩,该热页岩沉积后经历了 267 Ma 后,在晚侏罗世时期才进入成熟阶段,成熟持续时间约 77 Ma, R_o 演化速率为 $6.49 \times 10^{-3}\%/Ma$;晚白垩世(约 91 Ma)时进入高成熟的湿气阶段,高成熟演化阶段持续了约 91 Ma,演化速率为 $7.69 \times 10^{-3}\%/Ma$ 。

A2 井各阶段的演化持续时间及成熟演化速率介于 S2 井和 M1 井之间(图 3c,表 5),热页岩成熟阶段持续 134 Ma, R_o 演化速率为 $3.73 \times 10^{-3}\%/Ma$;高成熟阶段持续了 107 Ma, R_o 演化速率为 $8.41 \times 10^{-3}\%/Ma$ 。

总体上,对外合作区块从凹陷至隆起区,热页岩进入成熟阶段和高成熟阶段的时期依次变晚。从热页岩演化速率分析,在成熟阶段,斜坡上演化速率约是凹陷中的 2~3.6 倍;高成熟阶段,斜坡上演化速率约是凹陷的 1.64 倍。

3.1.2 热页岩成熟门限分析

根据上述模拟结果,统计了鲁卜哈里盆地古生界探井热页岩的成熟演化(表 6)。志留系底部热页岩进入成熟的门限深度为 1 408~1 620 m,门限温度约为 81~103 °C,热页岩进入成熟门限的时间由区块凹陷向东部隆起区依次变晚。S2 井区热页

表 5 鲁卜哈里盆地对外合作区块单井古生界热页岩演化特征对比

Table 5 Comparison of evolution characteristics of Paleozoic hot shales among different wells in cooperation blocks in Rub Al Khali Basin

演化阶段	$R_o/\%$	S2 井(凹陷)		A2 井(斜坡)		M1 井(斜坡)	
		持续时间/Ma	成熟速率/ ($10^{-3}\% \cdot Ma^{-1}$)	持续时间/Ma	成熟速率/ ($10^{-3}\% \cdot Ma^{-1}$)	持续时间/Ma	成熟速率/ ($10^{-3}\% \cdot Ma^{-1}$)
未成熟	<0.6	40		194		267	
成熟	0.6~1.1	278	1.8	134	3.73	77	6.49
高成熟	1.1~2.0	117	5.13	107	8.41	91	7.69

表 6 鲁卜哈里盆地古生界 Qusaiba 组底部热页岩成熟演化

Table 6 Maturity evolution of hot shales at Qusaiba bottom in Rub Al Khali Basin

井名	项目	参数								
S2	$R_o/\%$	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.71
	时间/Ma	387	254	166	124	119	108	99	82	0
	地质时期	D ₂	P ₂ 早	J ₂	K ₁	K ₁	K ₁	K ₁ 末	K ₂	现今
	古地温 /°C	91	111	117	136	145	152	157	164.5	149
	古埋深/m	1 551	1 896	2 710	3 802	4 121	4 424	4 683	5 066	5 679
	总生烃转化率/%	<1	4	51	70	76	85	89	94	98
A2	$R_o/\%$	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	1.92
	时间/Ma	241	171	118	112	106	95	85	71	0
	地质时期	P ₂ 末	J ₂	K ₁	K ₁	K ₁	K ₂ 早	K ₂	K ₂ 末	现今
	古地温 /°C	103	95	136	142	147	160	168	174	174
	古埋深/m	1 620	1 837	3 243	3 411	3 588	4 006	4 295	4 568	5 290
	总生烃转化率/%	<1	3	49	72	79	91	95	97	98
M1	$R_o/\%$	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.6	1.75
	时间/Ma	186	132	104	96	91	74	52	18	0
	地质时期	J ₂ 早	K ₁	K ₁	K ₁ 末	K ₂	K ₂	E	N	现今
	古地温 /°C	81	108	134	143	147	155.5	165	161	173
	古埋深/m	1 408	2 414	3 252	3 509	3 665	3 967	4 569	4 694	5 114
	总生烃转化率/%	1	3	46	69	78	88	92	95	95

岩在中泥盆世(约 387 Ma)进入成熟,A2 井区热页
岩在晚二叠世沉积末期(约 241 Ma)进入成熟,M1
井区热页岩在中侏罗世早期进入成熟门限,F1 井
Qusaiba 底部地层在早白垩世进入成熟门限。热页
岩生烃转化率随演化程度而提高,现今热页岩总的
转化率都在 95%以上,生烃转化率高。

综合以上分析,坳陷区热页岩的演化具有进入
门限早、演化进程慢、成熟时窗长、成熟速率低的
演化特征,对应热页岩具有生烃时间早、生烃持续
时间长、生烃较缓的特征。而隆起区热页岩演化具有

进入门限晚、演化进程快、成熟时窗相对短、成熟速
率高的演化特征,对应热页岩具有生烃较晚、生烃
持续时间短、快速高效生烃的特征。

3.2 对外合作区块热页岩成熟度演化史

受资料限制,本次研究仅采用 PetroMod 三维
盆地模拟进行演化分析。通过古生界已标定探井的
拟合热参数,来进行区域的成熟演化史模拟。对外
合作区块不同地质时期热页岩的平面成熟演化见
图 4,各相带所对应的反射率值引用沙特阿美公
司(Mahdi Abu-Ali,2005)的划分。

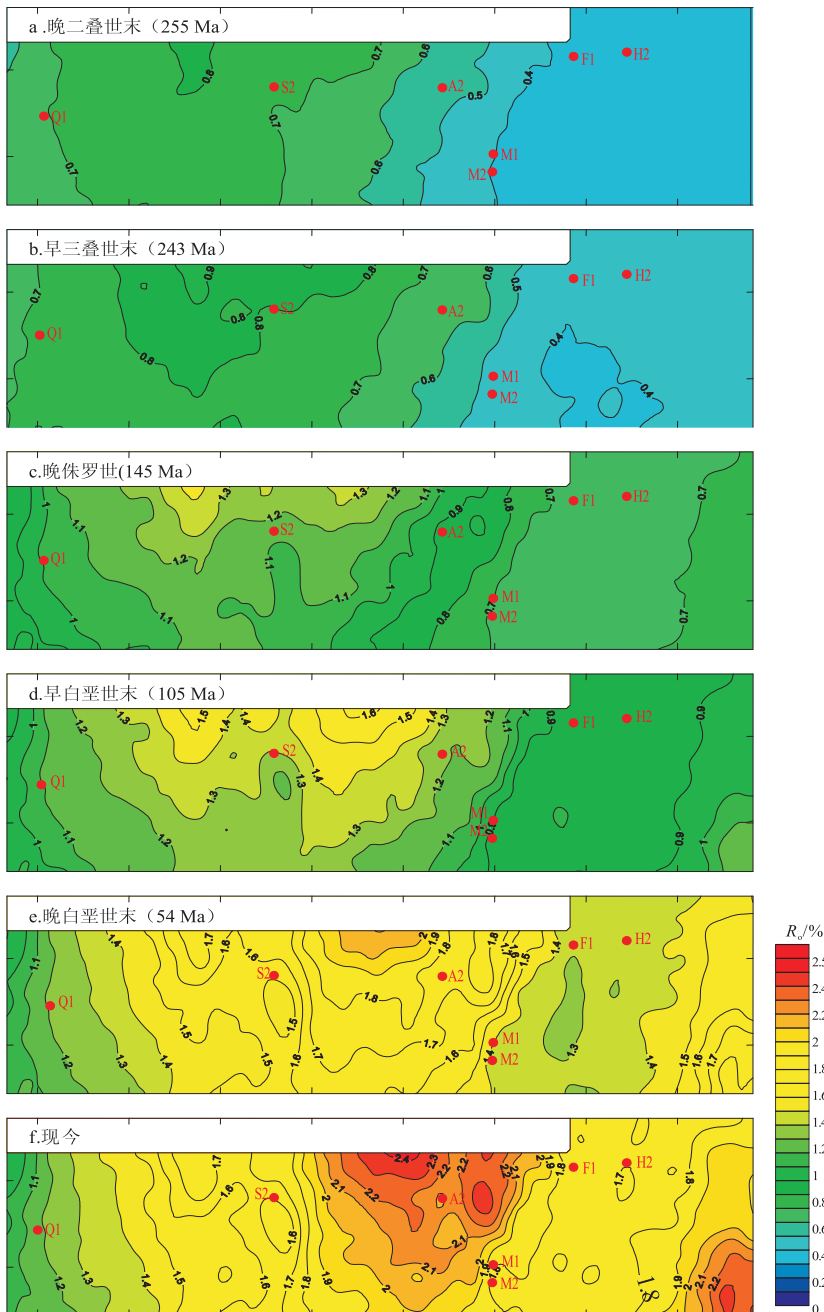


图 4 鲁卜哈里盆地对外合作区块 Qusaiba 底热页岩各时期 R_o 等值线位置见图 1。

Fig.4 R_o contours of hot shales at Qusaiba bottom during different stages in cooperation blocks in Rub Al Khali Basin

在晚二叠世沉积末,凹陷热页岩进入成熟门限, R_o 达0.6%以上(图4a),区块西斜坡大部分地区的热页岩也已进入成熟门限,区块东部的隆起区热页岩均未进入成熟阶段。

随着热页岩埋深加大,成熟范围逐渐扩大,至早三叠世沉积末(图4b),凹陷中热页岩 R_o 达0.7%~0.8%左右,西部斜坡区热页岩均进入成熟阶段,东部隆起区的西斜坡在A2井附近的热页岩进入成熟窗,而大部分地区热页岩还处于未成熟阶段。

晚侏罗世末期(图4c),拗陷区热页岩 $R_o > 1.1%$,进入高成熟演化阶段;斜坡上的热页岩均已进入成熟演化阶段。

早白垩世沉积期(图4d),凹陷中高成熟和成熟的范围不断扩大,斜坡以西热页岩的 $R_o > 1.0%$,M1井区周缘的热页岩仍处在成熟的演化阶段。

由于构造运动使得区块西部抬升,沉积中心逐步向东迁移,侏罗—白垩纪地层的快速沉积,使得斜坡上热页岩埋深增大,加速了斜坡区热页岩的演化进程。至晚白垩世沉积末(图4e),除最西部外,区块古生界热页岩均进入高成熟演化阶段;在拗陷区的东北部,热页岩进入了过成熟的演化阶段。

古近纪以来,由于构造掀斜作用,区块中西部地层抬升,西部热页岩演化基本停滞,凹陷区热页岩演化缓慢;而东部隆起区演化加快,现今斜坡上热页岩已达高一过成熟演化阶段(图4f)。

综上所述,鲁卜哈里盆地对外合作区块志留系底部热页岩由深凹至东部斜坡各阶段的演化时间依次变晚,凹陷区热页岩的演化史为:①早二叠世沉积时期,热页岩均已进入成熟演化阶段;②晚侏罗世末期,热页岩进入高成熟演化阶段;③晚白垩世末期,开始进入过成熟演化阶段;④现今,热页岩为高一过成熟演化阶段, R_o 最大为2.3%。东部斜坡热页岩的演化史为:①早三叠世末—晚侏罗世末期,热页岩为成熟演化阶段;②白垩纪,热页岩为高成熟演化阶段;③第三纪—现今,热页岩为高一过成熟演化阶段,现今 R_o 最高达2.2%。

4 结论

1) 根据钻井揭示,志留系底部热页岩在盆地内广泛发育,厚度变化很大,但平均厚度不大,且表现出较强的不稳定性,存在多个沉积中心,主要分布在古地貌相对低洼部位。

2) 志留系底部热页岩属于富烃源岩或很好烃源岩,有机质转化率较高。有机质类型基本上是II

型,现今演化已达到成熟—高成熟阶段,有的甚至是过成熟阶段。

3) 志留系底部热页岩在中央拗陷区演化特征为:进入门限早、演化进程慢、成熟时窗长、成熟速率低的演化特征,对应热页岩具有生烃时间早、生烃持续时间长、生烃较缓的特征。东部隆起区演化特征为:进入门限晚、演化进程快、成熟时窗相对短、成熟速率高的演化特征,对应热页岩具有生烃较晚、生烃持续时间短、快速高效生烃的特征。

4) 志留系底部热页岩由深凹至东部斜坡各阶段的演化时间依次变晚,拗陷区热页岩在早二叠世沉积时期均已进入成熟演化阶段;而东部斜坡热页岩于早三叠世末—晚侏罗世末期才进入成熟演化阶段。

参考文献:

- [1] Ziegler M A. Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian plate and its hydrocarbon occurrences[J]. *Geo Arabia*, 2001, 6(3): 445-504.
- [2] Wendor L E, Bryant J W, Dickens M F, et al. Paleozoic (Pre-Khuff) hydrocarbon geology of the Ghawar Area, Eastern Arabia[J]. *Geo-Arabia*, 1998, 3(2): 273-302.
- [3] Mahmoud M D, Vaslet D, Husseini M I. The Lower Silurian Qalibah Formation of Saudi Arabia: an important hydrocarbon source rock[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76: 1491-1506.
- [4] Abu-Ali M A, Rudkiewicz J L, Mc Gillivray J G, et al. Paleozoic petroleum system of Central Saudi Arabia[J]. *Geo Arabia*, 1999, 4(3): 321-336.
- [5] Cole G A, Abu-Ali S M, Aoudeh W J, et al. Organic geochemistry of the Paleozoic petroleum system of Saudi Arabia[J]. *Energy and Fuels*, 1994, 8: 1425-1442.
- [6] Ala M A, Kinghorn R R F, Rahman M. Organic geochemistry and source rock characteristics of the Zagros Petroleum Province, Southwest Iran[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1980, 3: 61-89.
- [7] Abu-Ali M, Littke R. Paleozoic petroleum systems of Saudi Arabia: a basin modeling approach[J]. *GeoArabia*, 2005, 10(3): 131-168.
- [8] Bordenave M L, Burwood R. Source rock distribution and maturation in the Zagros belt; provenance of the Asmari and Bangestan reservoir oil accumulations[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 6: 369-387.
- [9] McGillivray J G, Husseini M I. The Paleozoic petroleum geology of central Arabia[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76: 1473-1490.
- [10] Mahmoud M D, Vaslet D, Husseini M I. The Lower Silurian Qalibah Formation of Saudi Arabia: an important hydrocarbon source rock[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(10): 1491-1506.
- [11] 吕雪雁. 沙特鲁卜哈里盆地古生界石油地质特征及勘探潜力分析[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(5): 479-483.
- [12] 秦建中, 金聚畅, 刘宝泉. 海相不同类型烃源岩有机质丰度热演化规律[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(2): 177-184.