

鲁卜哈里盆地古生界油气藏成藏期分析

郑磊^{1,2},金之钧²,周瑾²,吕雪雁²,刘志强²,Javed Ismail³,李艳华²(1. 中国石油大学 地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083;
3. Saudi Aramco Upstream Ventures,Dhahran 31311)

摘要:综合运用烃源岩生排烃史模拟、流体包裹体均一温度测定以及储层自生伊利石测年等方法确定了鲁卜哈里盆地古生界油气藏的主要成藏期次。中央凹陷区 S2 井生排烃史模拟结果表明中心凹陷区志留系源岩在三叠纪和白垩纪进入生排烃高峰。斜坡区 A2 井生排烃史模拟结果表明斜坡区志留系源岩在早白垩世进入生排烃高峰。流体包裹体均一温度结果表明中央凹陷区 S2 井古生界储层样品包裹体均一温度分布多为两期,个别样品有 3 期;结合热史分析认为这 3 期分别对应三叠纪、早白垩世和晚白垩世。斜坡区 A2 井古生界储层包裹体均一温度分布主要为两期,表明该井区奥陶系储层至少发生过 2 次重要的油气充注活动。结合热史分析认为这 2 期分别为早白垩世和晚白垩世。储层自生伊利石测年方法测试结果表明中央凹陷区 S2 井古生界成藏期为晚三叠世和晚侏罗世—早白垩世。综合分析认为,鲁卜哈里盆地古生界存在 3 期油气成藏:第一期为三叠纪,第二期为早白垩世,第三期为晚白垩世。其中第一期主要分布于中央凹陷区,第三期主要分布于斜坡区,第二期在中央凹陷区和斜坡区都有分布。

关键词:自生伊利石;生排烃;成藏期;流体包裹体;鲁卜哈里盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Timing of hydrocarbon accumulation of the Paleozoic reservoir in Rub Al Khali Basin

Zheng Lei^{1,2}, Jin Zhijun², Zhou Jin², Lu Xueyan², Liu Zhiqiang², Javed Ismail³, Li Yanhua²

(1. School of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Upstream Ventures, Saudi Aramco, Dhahran 31311, Saudi Arabia)

Abstract: In order to determine the main stages of the hydrocarbon accumulation of the Paleozoic reservoir in Rub Al Khali Basin, four key methods are applied in this paper including hydrocarbon generation and expulsion history simulation, measurements of fluid inclusions homogenization temperature and Illite K-Ar dating. The simulation of hydrocarbon generation and expulsion history of Well S2 shows that hydrocarbon generation and expulsion of the Silurian source rocks in the central depression peaked in the Triassic and Cretaceous. The simulation of hydrocarbon generation and expulsion history of Well A2 shows that the hydrocarbon generation and expulsion of the Silurian source rocks in the slope zone peaked in the Early Cretaceous. The analysis of homogenization temperature of fluid inclusions of Well S2 shows that most of the samples can be divided into two main stages and only some samples can be divided into three stages. In combination with the geothermal history, these three stages are the Triassic, Early Cretaceous and Late Cretaceous respectively. In contrast, the homogenization temperature of fluid inclusions of Well S2 in the slope zone can be separated into two stages, indicating that at least two periods of oil and gas charging occurred in the Ordovician. In combination with the geothermal history, the two periods are in the Early Cretaceous and Late Cretaceous respectively. The result of Illite K-Ar dating shows that the hydrocarbon accumulation in the Paleozoic of Well S2 in the central depression occurred mainly in the Triassic and Late Jurassic-Early Cretaceous. A comprehensive analysis indicates that the hydrocarbon accumulation of the Paleozoic reservoir in Rub Al Khali Basin mainly occurred in three periods. The first one is the Triassic, the second one is the Early Cretaceous and the last one is the Late Cretaceous. The hydrocarbon accumulations formed in the first stage are mainly distributed in the central depression, and that in the third stage are mainly distributed in the slope zone, and that in the second stage occurred in both the central depression and slope zone.

Key words: authigenic illite, hydrocarbon generation and expulsion, accumulation stage, fluid inclusion, Rub Al Khali Basin

收稿日期:2014-11-03;修订日期:2015-05-15。

第一作者简介:郑磊(1967—),男,博士研究生,油气地质。E-mail:zhlei_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05031-002,2011ZX05031-001-001)。

油气藏形成的早晚及聚散动态特征对现今所发现的圈闭中烃类的赋存状态和富集程度有很大影响。只有在聚多散少的动态过程中方能形成具工业价值的油气流。聚散过程发生的时间主要受生烃高峰、圈闭形成期以及后期保存条件制约。本文主要用各种控烃因素在时间上的匹配关系分析及储层成岩矿物组合法来确定油气藏形成时间。

1 地质背景

鲁卜哈里盆地位于阿拉伯板块的中南部陆上和海域(图1)^[1-2],位于北纬 $16^{\circ}40' - 26^{\circ}50'$,东经 $43^{\circ}56' - 56^{\circ}44'$,地域上涵盖沙特阿拉伯、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 $875\,720\text{ km}^2$,陆上面积约占 89.8% ,超过 $500\,000\text{ km}^2$ 的面积被沙漠覆盖,盆地北接中阿拉伯隆起,西与阿拉伯地盾相邻,南靠 Hadramout 隆起,东以阿曼山为界。盆地被卡塔尔隆起的南部延伸部分(中央隆起带)分为东、西两个次盆。

1.1 地层特征

区域上,沿阿拉伯地盾边缘露头区,越往西地层越老,越往东地层越新,盆地地表大部分被第四系沙漠覆盖。纵向上,中生代地层以灰岩为主,夹有碎屑岩和蒸发岩。古生界除了上二叠统 Khuff 组为碳酸盐岩沉积以外,其余均为碎屑岩沉积(表1)。

1.2 古生界油气成藏条件

鲁卜哈里盆地古生代已经证实的烃源岩为下志留统 Qusaiba 段页岩,另外在盆地东南缘可能发育前寒

武的 Huqf 组烃源岩, Qusaiba 段上覆的 Sharawra 段页岩也是潜在的烃源岩,其中志留系 Qusaiba 段页岩为古生界油气藏的烃源岩。Qusaiba 段页岩根据有机质丰度可以划分为上下两段,下段为志留系底部的深色页岩,因富含有机质,测井曲线上自然伽马值高被称为“热页岩”,是一套黑色海相页岩,是古生界油气系统主要的烃源岩。一般自然伽马大于 150 API , TOC(有机质碳含量)大于 2% ,是一套优质的烃源岩。该套烃源岩区域分布广泛,但厚度变化较大。

以源岩为界,古生界可以划分成上、下两大套储盖组合。下部组合储层以奥陶系砂岩为主,其上部的志留系泥岩既为源岩层,也为盖层,为新生古储式组合;上部组合储层有多套,分别是志留系中部砂岩、石炭系-二叠系的 Unayzah 组砂岩,二叠系 Khuff 组碳酸盐岩,盖层为 Khuff 组上部的致密碳酸盐岩或三叠系 Sudair 组泥岩,组成了古生新储式组合。两套储盖组合各有利弊,下部组合紧邻烃源岩,但由于埋藏深,储层物性相对较差;上部组合储层物性好,厚度大,但是垂向上距离烃源岩远,尤其是中间有较厚的志留系泥岩封隔,油气要运移到上部储层中,需要有较好的运移通道连通。

目前发现的古生界圈闭类型以构造圈闭为主。但不同组合的圈闭类型不尽相同,下部组合以构造圈闭为主(背斜和断背斜),其次是地层-构造复合型圈闭;上部组合,特别是位于海西不整合面之上的 Unayzah 组,横向上沉积环境变化较大,圈闭类型以岩性和构造圈闭为主。

2 烃源岩生排烃史及圈闭发育史

2.1 生烃史

利用 Petromod 软件模拟中央坳陷区 S2 井古生界热页岩生烃演化见图2,单井热页岩的生烃总量为 $0.231 \times 10^6\text{ t}$ 。三叠纪时古生界热页岩 R_o (镜质体反射率)为 $0.7\% \sim 0.9\%$,大量生烃,生烃速率最高达 $12\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1}$,该期生烃量占总量的 40% ;侏罗纪时,由于源岩的成熟演化速率降低,虽然反映演化程度的 R_o 小于 1.0% ,处于成熟的生烃阶段,但生烃速率低,仅为 $0.1 \sim 0.8\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1}$,生烃量为占总生烃量的 10.91% ;白垩纪时,源岩 R_o 为 $1.0\% \sim 1.3\%$,演化速率加快,最高为 $R_o 0.011\%/\text{Ma}$,相应源岩的生烃速率也提高,最高至 $5.4\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1}$,该期生烃量占总生烃量的 43.64% ;古近纪至今, S2 井源岩的生烃速率逐渐降低,生烃量呈平缓趋势,生烃量仅占总量的 1.82% 。

A2 井位于斜坡处,生烃演化见图2,该井源岩厚度仅 4.0 m ,地质演化过程中的总生烃量为 $0.144 \times 10^6\text{ t}$ 。

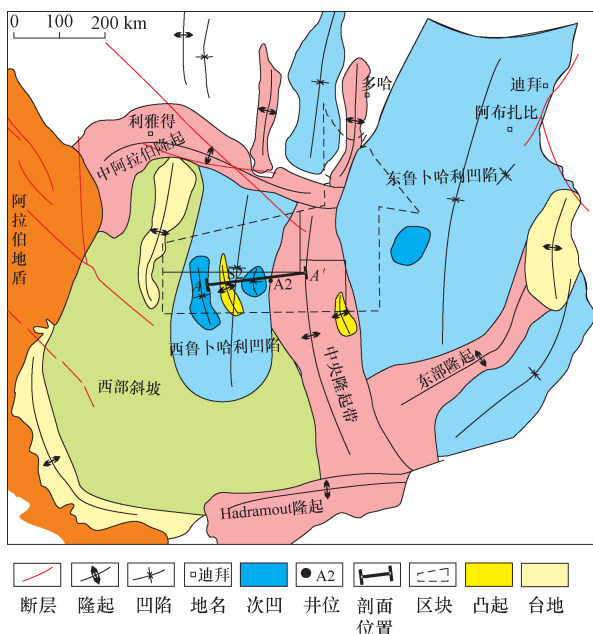


图1 鲁卜哈里盆地区域构造位置

Fig. 1 Structure location of Rub Al Khali Basin

表 1 鲁卜哈里盆地古生界地层单元

Table 1 The Paleozoic stratigraphy column of Rub Al Khali Basin

地层				岩性	沉积环境
系	统	组	段		
三叠系	下三叠统	Sudair			
二叠系	上二叠统	Khuff	A	石灰岩、白云岩、页岩和硬石膏	滨岸－浅海
			B		
			C		
			D		
			E		
	下二叠统	Unayzah	A	砂岩、粉砂岩和页岩	沼泽－三角洲平原
			B	砂岩夹砾岩层	河流－浅海
C					
石炭系	上石炭统	Berwath		砂岩、粉砂岩和页岩	陆相
中－下石炭统					
泥盆系	上泥盆统	Jubah		云母砂岩、泥岩	辫状河
	中泥盆统	Jauf		石灰岩、砂岩和粉砂质页岩	滨海相－内浅海
	下泥盆统	Tawil		石英砂岩、泥岩和水道砂岩	滨前带和潟湖
志留系	上志留统	Qalibah	Sharawra	云母砂岩、粉砂岩和泥岩	浅海
	下志留统		Qusaiba	笔石页岩和粉砂岩	开阔海
			Baq' a	砂岩、杂色泥岩	河流相
奥陶系	上奥陶统	Sarah		冰碛砾岩、砂岩和少量页岩	受冰川作用的河流三角洲
		Zarqa		冰碛岩、粉砂质泥岩和砂岩	冰川－陆相
	中奥陶统	Qasim	Quwarah	页岩、砂岩和少量粉砂岩	海相－陆相
			Ra' an		
			Kahfah		
			Hanadir		
	下奥陶统	Saq	Sajir	大型板状交错层理砂岩	辫状河流
上寒武统	Cruziana		泥页岩及泥质粉砂岩, 含三叶虫	浅海	
中寒武统	Risha		灰色含砾砂岩及粗砂岩	河流	
寒武系	下寒武统	Burj		薄层页岩、粉砂岩、灰岩	浅海
		Quweira		黄色粗砂岩、含砾砂岩	冲积平原
		Siq		高能块状砂岩、沿岸风成沙	浅海潮汐、河道
		前寒武系		基底	变质岩

早三叠世,源岩进入成熟门限开始生烃,但生烃速率仅为 $0.002\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{Ma}^{-1}$,三叠纪至侏罗纪的生烃量仅占总生烃量的3.125%;从早白垩世开始,源岩进入大量生烃阶段,生烃速率达到最大值为 $21\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{Ma}^{-1}$,该时期生烃量占源岩总生烃量的87.7%;晚白垩世源岩演化速率缓慢,生烃速率降低,为 $0.03\sim0.006\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{Ma}^{-1}$,该期生烃量仅占总生烃量的6.9%;古近纪至今,生烃量呈平缓趋势,生烃量仅占总生烃量的2.2%左右。

综上所述,Qusaiba段底部热页岩在志留系沉积后就开始了生烃过程,但生烃量和生烃速率都很低;直至早二叠世,随着源岩埋深的增加,凹陷区的源岩才逐渐进入成熟生烃阶段;三叠纪(生油为主)和白垩纪(生气和油为主)是源岩大量生烃的高峰时期,部分的热页岩达到成熟-高成熟的生烃阶段;晚白垩世之后,源岩生烃缓慢。因此凹陷处源岩有两期主生烃过程:三叠纪(生油为主)和白垩纪(生气和油为主)。斜坡处源

岩生烃较晚,早三叠世开始生烃,早白垩世为生烃高峰期,之后生烃缓慢。所以斜坡处只有一期主生烃过程为早白垩世。

2.2 排烃史

源岩排烃史与源岩生烃过程及构造运动密切相关,烃源岩在生烃的同时,也进行大量的排烃。单井排烃模拟显示,总体上,大量排烃时间略滞后于源岩大量生烃时间,S2井热页岩大量排烃开始于早三叠世末(约240 Ma),一直持续至现今。其中三叠纪和白垩纪是源岩排烃的高峰期,侏罗纪源岩缓慢生烃,排烃量相对较低(图3)。单井模拟该井的总排烃量占总生烃量的68.76%。A2井处烃源岩大量排烃始于早白垩世(约125 Ma)(图3),源岩大量生烃的同时也是大量排烃的时期,因此白垩纪是该井烃源岩的主要排烃期。

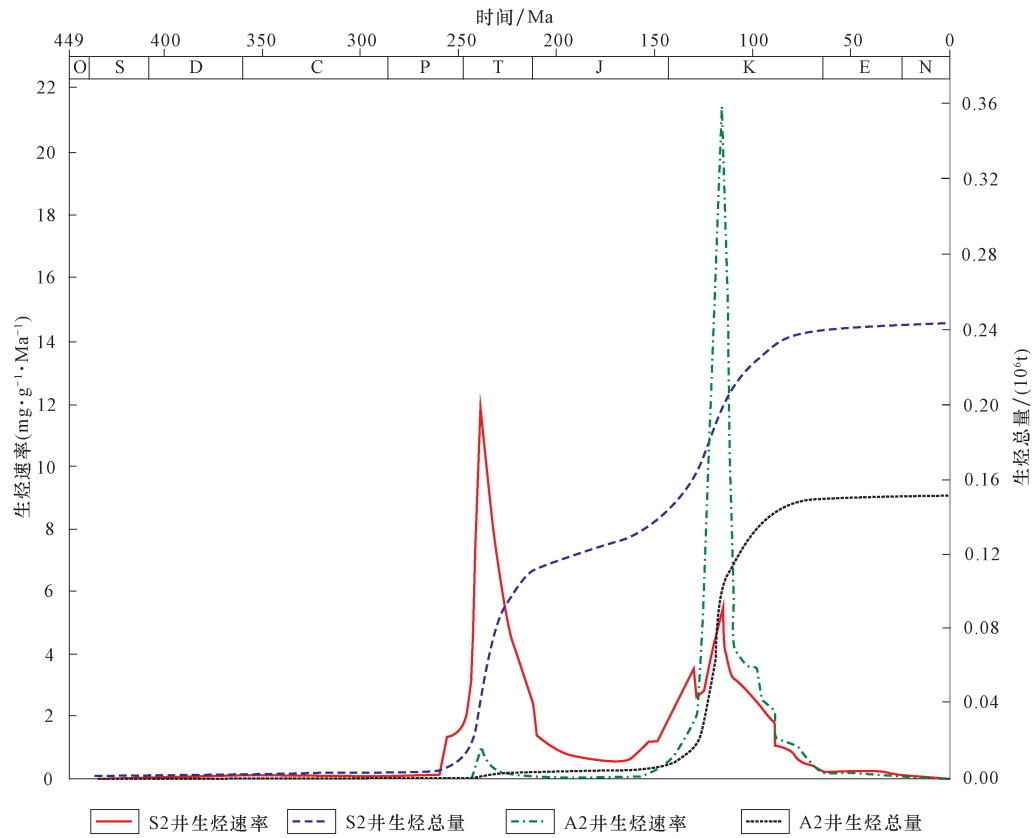


图 2 鲁卜哈里盆地古生界源岩生烃模拟

Fig. 2 Hydrocarbon generation simulation of the Paleozoic source rocks in Rub Al Khali Basin

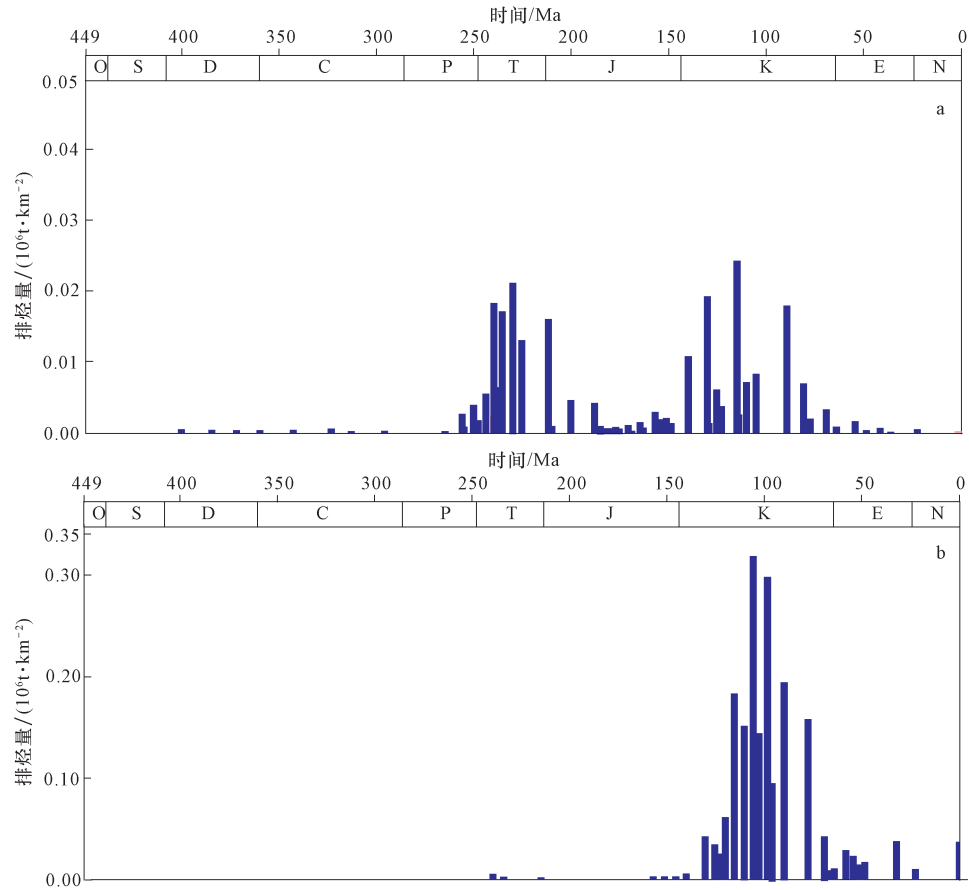


图 3 鲁卜哈里盆地古生界源岩排烃模拟

Fig. 3 Hydrocarbon expulsion simulation of the Paleozoic source rocks in Rub Al Khali Basin

a. S2 井; b. A2 井

2.3 圈闭发育史

鲁卜哈里盆地古生界构造圈闭形成较早,多与早期基底隆起有关,在志留纪就有雏型,后期受石炭纪、侏罗纪、白垩纪和古近纪-新近纪的多期运动的影响,有不同程度的改造。主要的构造增长期有3期,即石炭纪海西运动、晚白垩世、新生代构造挤压和褶皱作用,这3次构造作用导致了构造增长、断裂形成及复活,这3个时期也成为了重要的构造圈闭形成和改造期。其中石炭纪海西构造运动,不仅导致板块的挤压褶皱,加强了原构造,形成新构造,同时板块抬升导致大量地层剥蚀,形成了海西期不整合;白垩纪构造挤压作用使构造圈闭再一次增强,对油气聚集十分有利;新生代的构造运动使得阿拉伯板块整体调整为向东倾斜,对原来油气分布有一定的调整作用并最终形成现今的构造格局和油气分布。

综上所述,Qusaiba段底部热页岩大量生烃的高峰时期为三叠纪和白垩纪,源岩排烃期稍滞后于生烃高峰期,主要排烃期亦为三叠纪和白垩纪,这与圈闭形成期具有良好的匹配关系,排烃期亦是圈闭成藏期。

3 包裹体均一温度分布

流体包裹体记录了孔隙原始流体被捕获时的物理、化学特征,因而被广泛用于地下流体运聚和成矿作用的研究^[3-8]。烃类流体包裹体只记录了油气成藏的主要过程,并不能记录全部过程,且烃类流体包裹体记录的主要是早期成藏过程^[9-10]。

在中央坳陷S2井古生界共采集了7个岩心样品,其中Khuff组白云岩1块,Unayzah组砂岩和细砂岩样品2块,Jauf组砂岩1块,Sarah组砂岩样品3块,采样深度为3 923~5 690 m,测定了50个包裹体均一温度

数据。在A2井共采集分析了包括Qusaiba段和Sarah组8个样品,深度为5 182 m至5 472 m,共测定113个包裹体均一温度数据(表2),包裹体均一温度均测自气液比≤10%的盐水溶液包裹体。

1) S2井

储层样品包裹体均一温度分布多为2期,个别样品有3期(表2),表明S2井所处构造构造至少发生过2~3次的油气注入。

下部组合奥陶系Sarah两期包裹体的古地温均低于今地温,根据各期古地温及盆地古地温模式和储层埋藏史判别(图4),从三叠纪中期就有油气向奥陶系储层中充注,早白垩世油气发生第二次充注,但各时期油气的充注强度还应依据烃包裹体的发育程度来判断。目前由于包裹体数据限制,仅从均一温度分析S2井所处构造奥陶系主要存在两期油气充注:第一期为三叠纪,第二期为早白垩世。此外晚白垩世还可能存在第三期油气充注。

2) A2井

A2井包裹体均一温度均测自气液比小于5%的盐水溶液包裹体,温度见表2,主要发育两期包裹体,表明该井区奥陶系储层至少发生过两次重要的油气充注活动,结合储层热埋藏史分析(图5),两期烃类充注运聚时期为早白垩世和晚白垩世。

4 储层自生伊利石测年

利用储层自生伊利石矿物同位素年代结果判断流体运聚至储层的时间,其基本原理是:储层中伊利石是在富钾水介质环境中形成的,当油气大量进入砂岩储层后,由于介质条件的改变,储层中伊利石的形成就会终止。所以自生伊利石K-Ar年龄将会记录油气注入事件的发生时间并代表圈闭构造形成的最大年

表2 鲁卜哈里盆地古生界包裹体实测温度数据
Table 2 Measured temperature data of the Paleozoic inclusions in Rub Al Khali Basin

井名	层位	岩性	采样深度/m	盐水包裹体温度/℃			现今温度/℃
				一期	二期	三期	
S2	Khuff	白云石夹页岩	3 924.3	包裹体不发育,未找到可测温的包裹体			
	UNYZ A	泥岩、细砂岩	4 023.3	包裹体不发育,未找到可测温的包裹体			
	UNYZB + C	砂岩	4 091.6	112.3~121.5(117.7)	131.5~144.8(138.4)		109.57
	Jauf	砂岩	4 266.4	104.8~130.4(119.0)	143.2~148.3(145.3)		113.49
	Sarah	砂岩	5 689.8	108.9~120.4(115.2)	139.6~148.6(143)		149.19
	Sarah	砂岩	5 691.0	100.4~121.0(111.6)	133.2~141.3(136.7)	157.39 (1个数据)	149.58
	Sarah	砂岩	5 691.6	105.3~109.2(107.3)	133.2~141.3(135.8)		150.37
A2	Qusaiba	泥岩/粉砂岩	5 188.4	98~112(102)	137~163(155)		
	Sarah	砂岩	5 425.3	110~119(125)	126~141(166)		
	Sarah	砂岩	5 473.7	140~153(149)	162~179(173)		

注:盐水包裹体温度为最小值~最大值(平均值)。

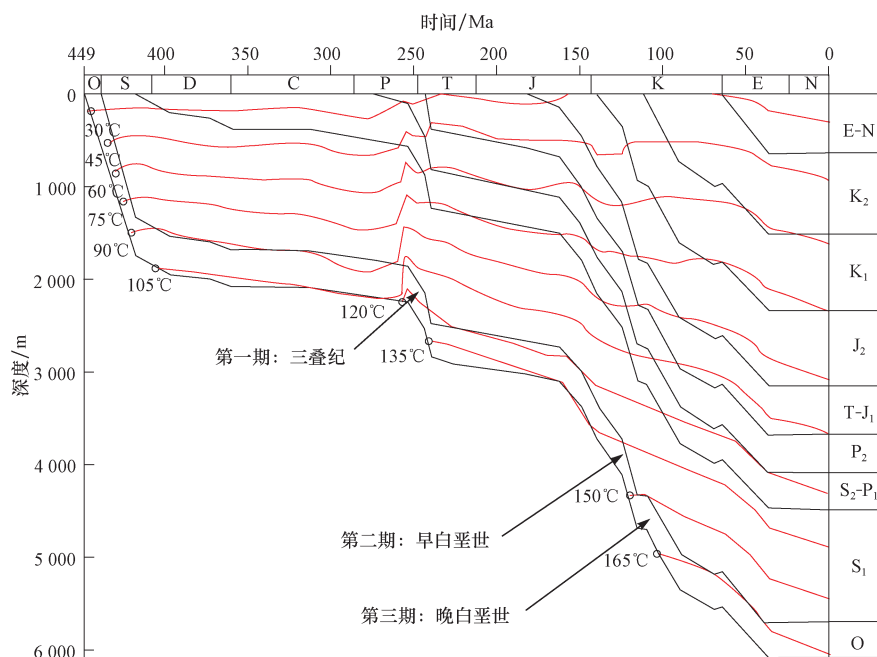


图4 鲁卜哈里盆地 S2 井古地温演化与包裹体测温分布关系

Fig. 4 Relationship between the distribution of inclusions' temperature and paleogeotemperature evolution in Well S2 in Rub Al Khali Basin

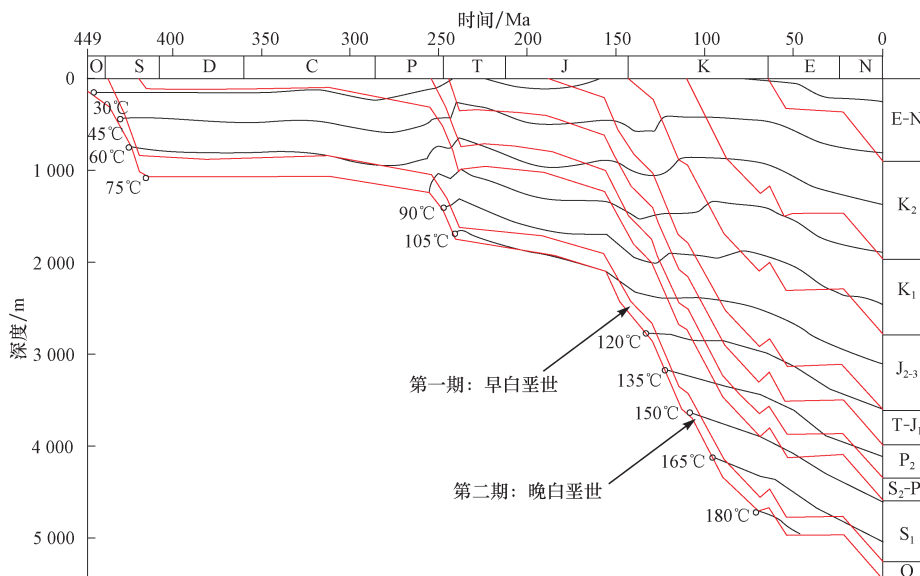


图5 鲁卜哈里盆地 A2 井古地温演化与包裹体测温分布关系

Fig. 5 Relationship between the distribution of inclusions' temperature and paleogeotemperature evolution in Well A2 in Rub Al Khali Basin

龄^[9]。自生伊利石测年得到的油气注入时间应该是最早的油气注入时间,而对以后的其它期次则反映不出来。由于自生伊利石在碎屑岩储层中普遍存在,所以很多学者都利用这种方法分析油气成藏期^[11-13]。

自生伊利石同位素年龄测试的难度大,特别是伊利石选矿时难以将搬运来的伊利石剔除,以至测试结果要加以分析才能应用。S2 井研究选取了 2 块样品,A2 井研究选取了奥陶系 1 块样品,进行自生伊利石同位素测年(表 3),其中 S2 井一块样品的泥质含量高,结果供参考。一般认为最小粒级样品的测年结果更准。测试结果 S2 井奥陶系 Sarah 组 5 689.6 ~ 5 690.2 m 样品同位素地质年龄是 208 ~ 212 Ma,为晚

三叠世 Minjur 沉积期,是油气进入储层开始成藏的年代。S2 井 4 022.3 m 晚石炭世—早二叠世 Unayzah A 组样品的同位素年龄是 127.42 ~ 138.28 Ma,为早白垩世。

A2 井奥陶系 5 472.3 ~ 5 472.5 m 样品同位素地质年龄是 132.37 ~ 124.79 Ma,为早白垩世,反映油气大量进入储层的时期,与该井包裹体测温确定的油气充注时期相当。

5 结论

1) 烃源岩生排烃史模拟结果表明,Qusaiba 段底

表3 鲁卜哈里盆地 K-Ar 自生伊利石
测年确定的成藏开始时期

Table 3 Start time of hydrocarbon accumulation from
K-Ar dating of authigenic illite in Rub Al Khali Basin

井号	井深/ m	层位	岩性	样品粒级/ μm	年龄/ Ma	最早运聚 时期
S2	4 022.3	Unayzah A	泥岩、 细砂岩	0.30 ~	127.42 ±	早白垩世
				0.15	2.84	
				<0.15	138.28 ±	早白垩世
	5 689.5 ~ 5 690.2	Sarah	砂岩	0.30 ~	207.99 ±	晚三叠世末
				0.15	2.18	
				<0.15	211.62 ±	晚三叠世末
A2	5 472.3 ~ 5 472.5	Sarah	砂岩	0.30 ~	124.79 ±	早白垩世
				0.15	1.7	
				<0.15	132.37 ±	早白垩世

部热页岩在凹陷部位大量生烃的高峰时期为三叠纪和早白垩世,在斜坡带的生烃高峰期为早白垩世。源岩排烃期稍滞后于生烃高峰期,凹陷部位主要排烃期为三叠纪和白垩纪,斜坡带的主要排烃期为白垩纪。圈闭形成于三叠纪之前,且在白垩纪构造挤压作用中再一次增强,说明源岩生排烃期与圈闭形成期具有良好的匹配关系,排烃期亦是圈闭成藏期。

2) 包裹体均一温度分析结果标明 S2 井发育 3 期包裹体,A2 井发育 2 期包裹体,结合埋藏史分析认为,S2 井所处的构造经历 3 期油气充注:三叠纪、早白垩世及晚白垩世,A2 井所处的构造经历 2 期油气充注:早白垩世和晚白垩世。储层自生伊利石测年分析结果与包裹体均已温度分布分析结论一致,S2 井储层自生伊利石测年认为烃类最早充注时间为晚三叠世和早白垩世,A2 井储层自生伊利石测年认为烃类最早充注时间为早白垩世。

3) 利用烃源岩生排烃史模拟及其与圈闭发育史的匹配关系、包裹体均一温度分布和储层自生伊利石测年方法,所获得的油气成藏期次是一致的。即 S2 井所处的凹陷内有 3 期油气成藏:三叠纪、早白垩世和晚白垩世;A2 井所处的斜坡带有 2 期成藏:早白垩世和晚白垩世。

参 考 文 献

- [1] Ziegler M A. Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian plate and its hydrocarbon occurrences [J]. GeoArabia, 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 [J]. GeoArabia, 1998, 3(2): 273-302.
- [3] 金晓辉, 闫相宾, 孙冬胜, 等. 长岭断陷深层储层包裹体特征与油气成藏过程 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 609-613.

- Jin Xiaohui, Yan Xiangbin, Sun Dongsheng, et al. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon accumulation process of deep reservoirs in Changling rift, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 609-613.
- [4] 梁宇, 任战利, 王彦龙, 等. 鄂尔多斯盆地子长地区延长组流体包裹体特征与油气成藏期次 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 182-191.
- Liang Yu, Ren Zhanli, Wang Yanlong, et al. Characteristics of fluid inclusions and reservoiring phases in the Yangchang Formation of Zichang area, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 182-191.
- [5] 席伟军, 张枝焕, 徐新宇, 等. 流体包裹体技术在春风油田特超稠油成藏研究中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 350-358.
- Xi Weijun, Zhang Zhihuan, Xu Xinyu, et al. Application of fluid inclusion techniques to the study of super-heavy oil accumulation in Chunfeng oilfield, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 350-358.
- [6] 邢永亮, 张鼎, 张宝收, 等. 塔中 26-24 井区良里塔格组储层烃包裹体特征及成藏期次 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(54): 651-658.
- Xing Yongliang, Zhang Nai, Zhang Baoshou, et al. Characteristics of hydrocarbon inclusions and the timing of the hydrocarbon accumulation in the Lianglitage Fm in Tazhong 26-24 wellblock [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(54): 651-658.
- [7] Karlsen D A, Nedkvitne T, Larter S R, et al. Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: application to elucidation of petroleum reservoir filling history [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(15): 3641-3659.
- [8] 柳少波, 顾家裕. 包裹体在石油地质研究中的应用与问题讨论 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 8(4): 326-331, 342.
- Liu Shaobo, Gu Jiayu. Application of fluid inclusions to petroleum geological study and discussion [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 8(4): 326-331, 342.
- [9] 刘德汉. 包裹体研究—盆地流体追踪的有力工具 [J]. 地学前缘, 1995, 2(4): 149-154.
- Liu Dehan. Fluid inclusion studies—an effective means for basin fluid investigation [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(4): 149-154.
- [10] 陈建平, 查明, 周瑶琪. 有机包裹体在油气运移研究中的应用综述 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 61-64.
- Chen Jianping, Zha Ming, Zhou Yaoqi. Application of organic inclusion in oil-gas migration [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(1): 61-64.
- [11] 陈红汉, 吴悠, 丰勇, 等. 塔河油田奥陶系油气成藏期次及年代学 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 806-819.
- Chen Honghan, Wu You, Feng Yong, et al. Timing and chronology of hydrocarbon charging in the Ordovician of Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 806-819.
- [12] 陈刚, 徐黎明, 丁超, 等. 用自生伊利石定年确定鄂尔多斯盆地东北部二叠系油气成藏期次 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 713-719.
- Chen Gang, Xu Liming, Ding Chao, et al. Authigenic illite dating for the timing of oil-gas accumulation of the Permian reservoirs in north-eastern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 713-719.
- [13] 张有瑜, Horst Zwingmann, Andrew Todd, 等. 塔里木盆地典型砂岩油气储层自生伊利石 K-Ar 同位素测年研究与成藏年代探讨 [J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 637-647.
- Zhang Youyu, Horst Zwingmann, Andrew Todd, et al. K-Ar dating of authigenic illite and its applications to study of oil-gas charging histories of typical sandstone reservoirs, Tarim basin, Northwest China [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 637-647.

(编辑 张亚雄)