

文章编号:1009-9603(2022)02-0053-08

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2022.02.006

南苏丹 Melut 盆地 Ruman 潜山构造演化及其对油气成藏的控制作用

薛 罗¹, 马 轮¹, 史忠生¹, 赵艳军², 陈彬滔¹, 史江龙¹, 王 磊¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 西北分院, 甘肃 兰州 730020; 2. 中油国际尼罗河公司, 苏丹 喀土穆 10687)

摘要: Melut 盆地 Ruman 潜山经历了多期构造演化, 导致该区油气成藏规律复杂。为落实 Ruman 潜山构造演化对油气成藏的控制作用, 进一步探索油气勘探潜力, 综合利用地震、钻井及区域构造资料, 开展基于平衡剖面技术的构造演化分析, 并结合烃源岩生排烃史, 对 Ruman 潜山周缘油藏动态成藏过程进行剖析。结果表明: Ruman 潜山自白垩纪以来经历了 2 期规模较大的翘倾抬升; 白垩纪末期的翘倾抬升有利于潜山周缘地层-岩性圈闭的形成, 古近纪末期的翘倾抬升导致潜山暴露, 先期成藏的原生油藏遭受破坏, 形成次生型稠油油藏; 新近纪以来构造活动弱, 围绕 Ruman 潜山形成晚期成藏型白垩系 Galhak 组地层-岩性稠油油藏以及新近系 Jimidi 组构造-岩性稠油油藏, 二者均具有较大的勘探潜力。

关键词: 构造演化; 排烃史; 稠油油藏; Ruman 潜山; Melut 盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Tectonic evolution and its influence on hydrocarbon accumulation of Ruman buried hill in Melut Basin, South Sudan

XUE Luo¹, MA Lun¹, SHI Zhongsheng¹, ZHAO Yanjun², CHEN Bintao¹, SHI Jianglong¹, WANG Lei¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou City, Gansu Province, 730020, China; 2. CNPC International Nile Limited, Khartoum, 10687, Sudan)

Abstract: The Ruman buried hill in the Melut Basin has experienced multi-stage tectonic evolution, resulting in complex hydrocarbon accumulation modes in this area. To reveal the role of the tectonic evolution of the Ruman buried hill in controlling hydrocarbon accumulation and further explore the exploration potential in this area, this paper combined seismic, drilling, and regional tectonic data for structural evolution analysis based on the balanced cross-section technique. Moreover, based on the hydrocarbon generation and expulsion history of source rocks, the dynamic accumulation process of reservoirs around the Ruman buried hill was analyzed. The results show that the Ruman buried hill has experienced two large-scale tilting uplift activities since the Cretaceous. The tilting uplift in the late Cretaceous was beneficial to the stratigraphic-lithologic traps around the buried hill, and those in the late Paleogene led to the exposure of buried hills, which destroyed the primary reservoirs that formed earlier, leading to secondary heavy oil reservoirs. In addition, the tectonic activity has been weak since the Neogene. It results in the stratigraphic-lithologic heavy oil reservoirs of the Cretaceous Galhak Formation and the structural-lithologic heavy oil reservoirs of the Neogene Jimidi Formation in the late accumulation around the Ruman buried hill, and both the reservoirs show great exploration potential.

Key words: tectonic evolution; hydrocarbon expulsion history; heavy oil reservoirs; Ruman buried hill; Melut Basin

南苏丹 Melut 盆地是中非重要的含油气盆地, 中国石油于 2000 年进入并主导该区的勘探工作。

在盆地北部, 针对 Yabus-Adar 组主力储盖组合, 先后发现了 Palogue 和 Moleeta 等亿吨级油田^[1-2], 有效

收稿日期: 2021-05-11。

作者简介: 薛罗 (1988—), 男, 陕西绥德人, 工程师, 硕士, 从事盆地模拟及油气成藏研究工作。E-mail: xueluo@petrochina.com.cn。
基金项目: “十三五”中国石油集团公司重大科技项目“海外重点战略大区勘探技术研究与应用”(2019D-4306)。

地支撑了中国石油“海外大庆”的建设。但经过十多年的勘探,主力产层剩余构造圈闭逐渐减少、面积变小,勘探工作须向新区、新层系、新类型转移。而北部地区唯一尚未开展规模勘探的Ruman地区则是潜在的增储上产区域,目前该区Ruman潜山在多套层系发现稠油油藏,且油藏类型多样,与区域“厚层砂岩(Yabus组)+区域泥岩(Adar组)”主力储盖组合不同^[3],油气的形成与分布明显受Ruman潜山构造演化影响^[4],成藏规律复杂,前人尚未针对该区的构造演化与油气成藏关系开展研究;而中外多个盆地的油气勘探也证实潜山的构造演化与其周围的油气成藏密切相关^[5-7]。因此,笔者利用平衡剖面技术,通过Ruman潜山构造演化恢复,结合烃源岩生排烃史,系统分析潜山构造演化对不同沉积时期油藏的控制作用,以期为研究区下步油气勘探提供地质理论依据,同时对于Melut盆地南部遭受多期构造抬升的广大低勘探程度区也具有一定的借鉴意义。

1 区域地质特征

南苏丹Melut盆地是在中非剪切带右旋走滑应力背景下形成的中生代陆内被动裂谷盆地,面积约为 $3.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[8-9],是中非陆内裂谷盆地中的第二大沉积盆地^[1,10-11]。其具有“五拗两隆”的构造格局,包括北部拗陷、东部拗陷、中部拗陷、西部拗陷、南部拗陷、Adar隆起和中央隆起;同时北部拗陷又发育Jamous凹陷、Moleeta凹陷及Ruman凹陷共3个构造单元(图1a,1b)。Melut盆地主要烃源岩为下白垩统Renk组,有机质丰度为0.62%~2.92%,生烃潜

量(S_1+S_2)最高达19.53 mg/g;有机质类型以II型干酪根为主,少量为I型干酪根^[1];镜质组反射率(R_o)普遍大于0.5%,拗陷中心处 R_o 值超过2.0%,为一套高丰度、高成熟度的优质烃源岩。烃源岩生排烃史模拟结果表明,Ruman拗陷从晚白垩世(距今103 Ma)开始生烃,有机质生油强度最高可达320 mg/g,在白垩纪末期(距今86 Ma)开始排烃,而在始新世区域盖层Adar组沉积时期(距今50 Ma)进入大规模排烃阶段,并持续至今,为Ruman拗陷的油气成藏提供了丰富的资源基础^[12]。同时,自白垩纪以来盆地沉积了4套储盖组合,分别为下白垩统Gayger+Renk组、上白垩统Galhak组、古近系Samma/Yabus+Adar组、新近系Jimidi+Miadol组。

Ruman拗陷位于Melut盆地北部拗陷最西端,面积约为500 km²,为西断东超的箕状拗陷,包括西部陡坡带、中央洼陷带、东部斜坡带和Ruman潜山共4个区带(图1c),Ruman潜山位于拗陷东部斜坡带东侧。目前油气发现分布在Ruman潜山及东部斜坡带;基岩、Gayger组、Galhak组、Yabus组及Jimidi组均有稠油油藏发现,其沿不整合分布,与Ruman潜山的构造演化密切相关。

2 构造演化特征

2.1 地震反射特征

Ruman潜山发育超覆不整合和削截不整合(图2)。一般而言,不整合是区域地壳运动及海(湖)平面升降等局部构造作用的结果,对于研究区沉积层序划分和构造演化具有重要意义^[13-14]。

Ruman地区的超覆不整合发育于晚白垩纪Gal-

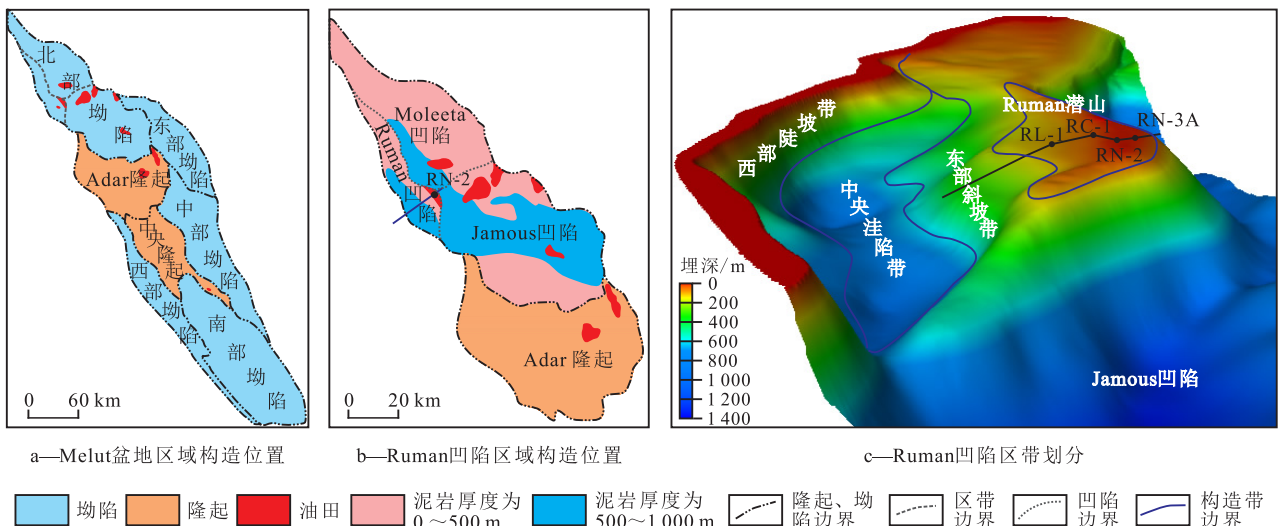


图1 Melut盆地Ruman拗陷区域构造位置及区带划分
Fig.1 Location and play division of Ruman Sag in Melut Basin

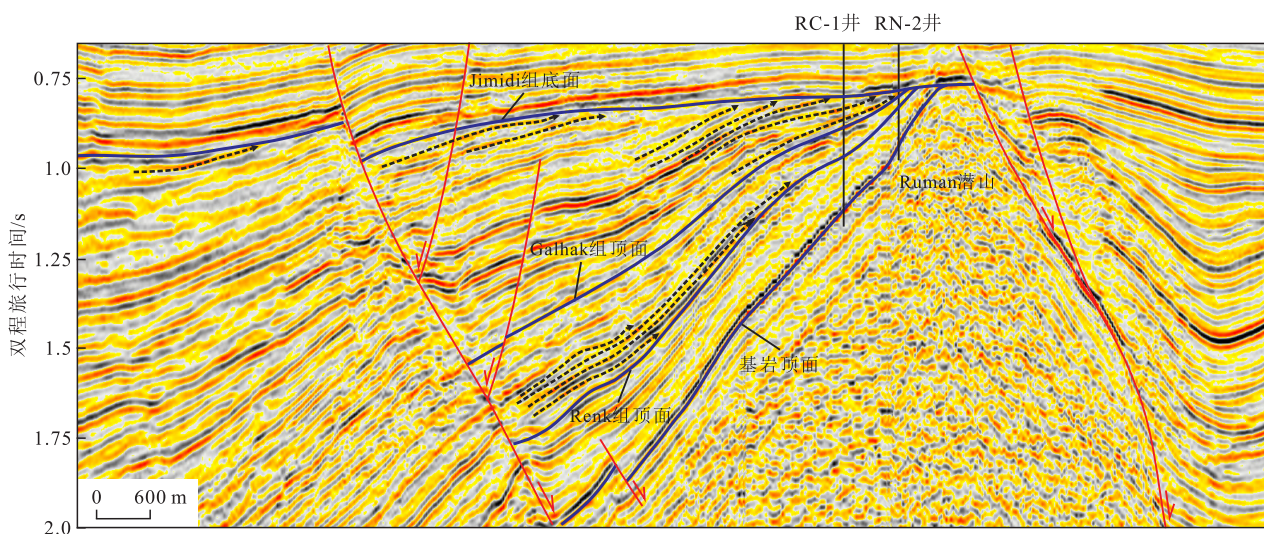


图2 Ruman潜山地震反射特征(剖面位置见图1c)

Fig.2 Seismic reflection characteristics of Ruman buried hill(See Fig.1c for profile position)

hak组沉积时期。Galhak组在地震剖面上是一套典型的楔形地层, Galhak组底面为一套较为连续的地震强反射轴, 内部地震反射轴大部分上超于Galhak组底面, 表现为一系列上倾尖灭现象, 由此可见, Galhak组底面不整合主要是由沉积作用造成的, 也反映出白垩纪Ruman潜山发生了构造抬升。而该区的削截不整合主要表现为古近系与白垩系地层削截终止于新近系Jimidi组底面, 有高角度不整合、微角度不整合, Jimidi组底面是大型不整合, 其地震反射特征整体表现为不连续弱反射, 局部发育地震强反射振幅。这种削截不整合是典型的构造不整合, 反映出在Jimidi组沉积之前, 该区发生了较大规模的抬升, 导致白垩系与古近系遭受不同程度剥蚀。而对于地层剥蚀厚度恢复、不同沉积时期潜山坡刻画, 则需对Ruman潜山的构造演化进行定量分析。

2.2 地层剥蚀厚度恢复

平衡剖面技术是目前较好的定量研究构造演化的方法^[15-16], 而该技术应用的核心参数之一为地层剥蚀厚度^[17]。地层剥蚀厚度恢复方法众多, 应用比较广的有泥岩声波时差法^[18]、磷灰石裂变径迹法^[19]、镜质组反射率法、地层厚度趋势法^[20]和波动分析法^[21]等。但这些方法都有各自的适用性且对基础资料的要求存在较大差异, 其中泥岩声波时差法及地层厚度趋势法仅需要原始测井及地震数据即可, 计算准确性也较高。

结合实际资料, 采用泥岩声波时差法对Ruman潜山顶面古近系的地层剥蚀厚度进行恢复。在声波时差曲线上, 不整合特征明显, Jimidi组底上覆及

下伏地层的声波时差曲线趋势差异大, 具有“两段性”特征。将声波时差取自然对数值, 拟合不整合之下深度-声波时差关系曲线的回归方程, 将该区地表声波时差 $650 \mu\text{s/m}$ 取自然对数($6.47 \mu\text{s/m}$), 代入回归方程, 计算剥蚀前古地表埋深, 其与不整合的埋深差值即为剥蚀厚度。利用该方法对研究区的典型井进行古近系地层剥蚀厚度恢复, 结果显示, Ruman潜山顶部地层在古近纪末期剥蚀范围广, 古近系地层剥蚀厚度均在百米以上, 例如RC-1和RN-2井古近系地层剥蚀厚度分别为157和179m(图3)。

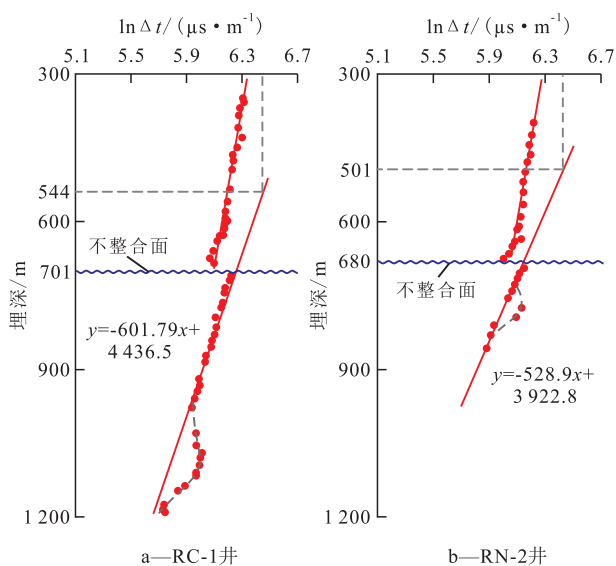


图3 单井泥岩声波时差法恢复古近系地层剥蚀厚度

Fig.3 Recovery of stratum erosion thickness by single well mudstone acoustic transit time method

对于白垩系利用泥岩声波时差法难以恢复地层剥蚀厚度。在泥岩声波时差曲线上, 如RN-2井

Jimidi组底不整合之下的声波时差曲线连续,不存在明显的间断特征,而事实上 Galhak组顶部为 Yabus组,中间缺失 Samma组和 Melut组,反映出在白垩系 Galhak组沉积时期,该区地层剥蚀厚度较小,导致在声波时差曲线上特征不明显。相对泥岩声波时差法,地层厚度趋势法的应用范围较广,其原理为地层在一定产状下,由盆地中心向盆地边缘按一定趋势逐渐减薄直至尖灭为0。因此,以 Ruman潜山顶为剥蚀原点,利用距离 Ruman潜山剥蚀原点一定距离的未剥蚀地层的厚度变化趋势来确定剥蚀区白垩系沉积厚度是可行的。

采用地层厚度趋势法定量恢复 Galhak组厚度,结果显示,当 Galhak组地层厚度为0时,其与潜山顶面剥蚀原点的距离为 135 m,表明在 Galhak组沉积时期潜山顶面曾发生小范围的暴露,没有沉积 Galhak组(图4a);而下白垩统 Gayger组地层厚度恢复结果显示,在潜山顶面 Gayger组原始地层厚度约为 19 m,但现今无 Gayger组,应为晚白垩世潜山抬升暴露造成的(图4b)。

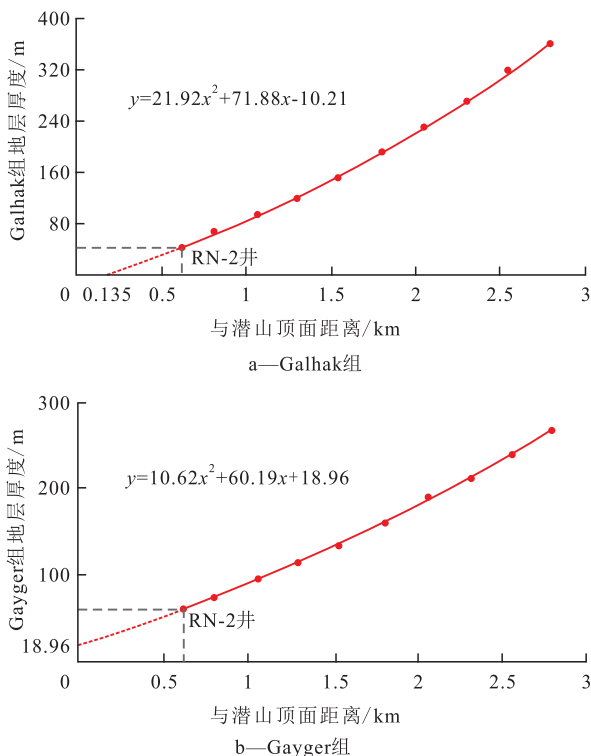


图4 地层厚度趋势法恢复古近系地层剥蚀厚度

Fig.4 Recovery of Paleogene stratum erosion thickness by stratigraphic thickness trend method

2.3 构造演化阶段划分

在对区域构造演化分析的基础上,结合地层剥蚀厚度参数,应用平衡剖面技术对 Ruman潜山所在的 Ruman 凹陷进行构造演化恢复。通过对 Ruman 凹陷的构造演化分析,进而明确 Ruman 潜山的构造

演化过程。从区域构造环境来看,Ruman 凹陷与所处的北部拗陷一样,都经历了“三裂一拗”的构造演化阶段(图5)。

裂陷 I 幕为盆地初始裂陷期,形成了凹陷最重要的 Renk 组烃源岩,同时 Ruman 潜山位于水下未暴露,潜山顶面有 Gayger 组和 Renk 组厚度约为 40 m 的沉积。

裂陷 II 幕初期为 Galhak 组沉积时期,凹陷裂陷强度大,潜山坡度由 11° 快速变为 22° ,最大沉降量为 1 300 m,伸展率达 4.2%(表 1),使得 Ruman 潜山在 Galhak 组沉积时期发生翘倾抬升,潜山露出水面。通过古地貌恢复,在 Galhak 组沉积时期,潜山暴露范围仅有几个平方公里,局部物源供应微弱;但西北长轴区域物源供应充足,平行于潜山走向沉积了多套滩坝砂,上倾尖灭岩性体非常发育,围绕潜山形成一系列地层-岩性圈闭^[4,22]。Melut 组和 Samma 组沉积时期,潜山持续暴露,直到裂陷 II 幕晚期,潜山再次位于水下,顶部沉积 Yabus 组,同时形成 Gayger 组不整合圈闭、基岩潜山风化壳裂缝圈闭。

裂陷 III 幕初期为 Adar 组沉积时期,凹陷再次发生强裂陷作用,Ruman 潜山翘倾抬升,凹陷沉积区域盖层 Adar 组厚层泥岩,Yabus 组形成构造-地层圈闭。而在 Lau 组沉积时期,凹陷继续裂陷,潜山再次翘倾抬升,同时由于区域构造运动,Melut 盆地整体发生抬升^[10],造成 Ruman 潜山的大规模暴露,先期在潜山顶面沉积的 Yabus 组和 Adar 组等地层均遭受剥蚀。

拗陷阶段,Ruman 潜山构造稳定,整体位于水下,顶部沉积了盆地广泛发育的 Jimidi 组河流相砂岩和 Miadol 组厚层泥岩,同时在 Jimidi 组底不整合之上,形成受不整合影响的 Jimidi 组构造-岩性圈闭。

因此,从构造演化来看,Ruman 潜山在晚白垩纪和晚古近纪存在 2 期规模较大的翘倾抬升,潜山顶面白垩系 Gager 组、Renk 组、Galhak 组和古近系 Yabus 组、Adar 组均遭受剥蚀,在新近纪拗陷阶段,潜山顶面沉积了 Jimidi 组和 Miadol 组储盖组合。

3 构造演化对油气成藏的控制作用

在潜山构造演化史研究的基础上,结合前人对研究区油气生排烃史的研究^[12],可重建潜山及周缘油气成藏过程。从目前潜山及周缘的油气发现情况来看,基岩、Gayger 组、Galhak 组、Yabus 组及

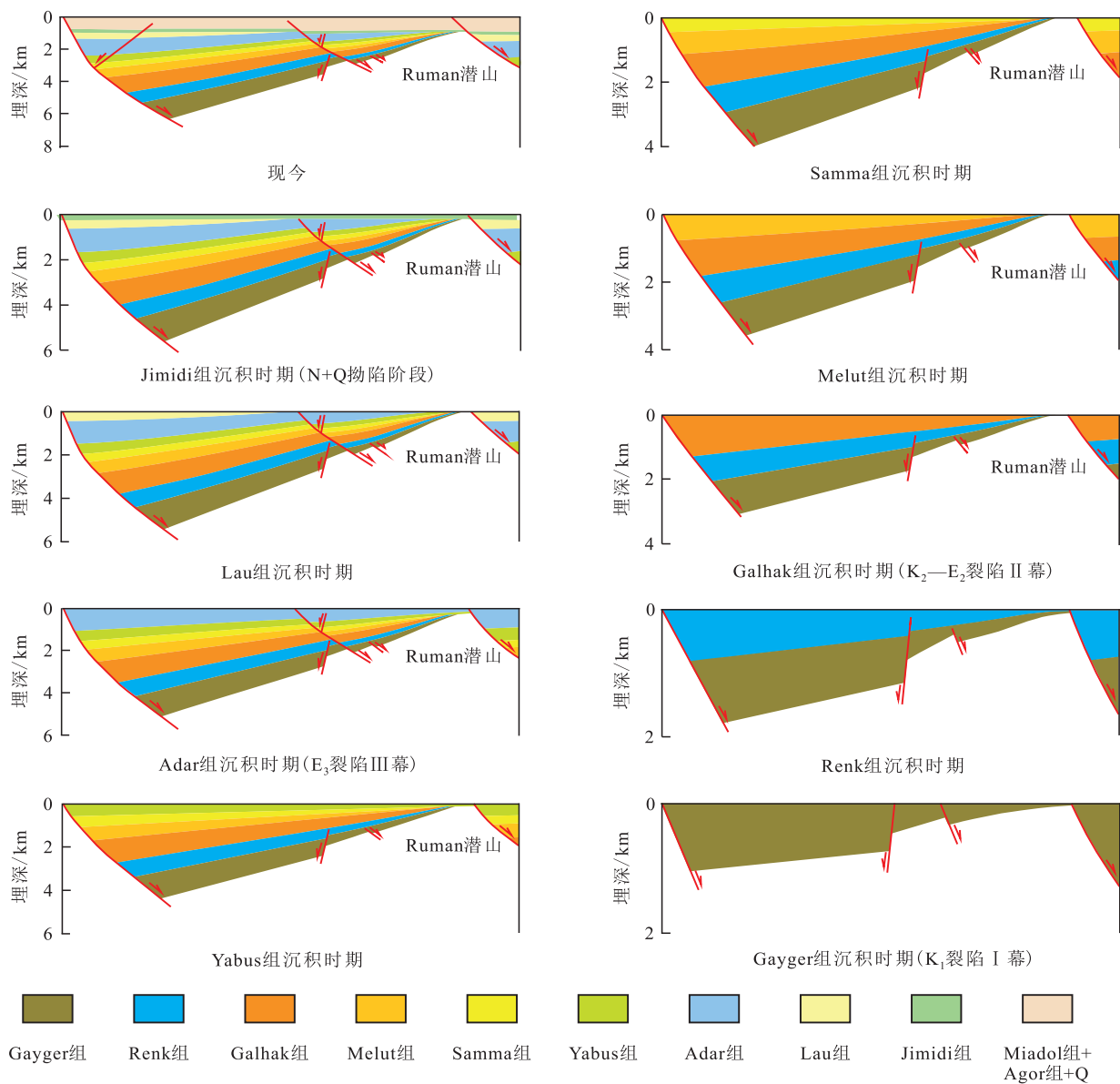


图5 Ruman凹陷构造演化史(剖面位置见图1b)

Fig.5 Tectonic evolution history of Ruman Sag(see Fig.1b for profile position)

表1 Ruman凹陷构造演化参数
Table1 Tectonic evolution parameters of Ruman Sag

沉积时期	潜山坡 度/(°)	伸展 率/%	最大沉 降量/m	沉降速率/ (m·Ma ⁻¹)
Jimidi组沉积时期	38	0.3	200	33
Lau组沉积时期	37	1.2	300	21
Adar组沉积时期	35	3.7	1 050	81
Yabus组沉积时期	31	0.75	550	39
Samma组沉积时期	28	0.94	400	36
Melut组沉积时期	25	1.5	750	38
Galhak组沉积时期	22	4.2	1 300	93
Renk组沉积时期	11	2.1	900	41
Gayger组沉积时期	6	2.8	1 100	44

Jimidi组均为潜在的勘探对象。但其发现的油藏类型各不相同,基岩为裂缝油藏,Gayger组和Yabus组为受不整合控制形成的地层不整合油藏,Galhak组为受岩性控制形成的上倾尖灭岩性油藏,而Jimidi组为构造-岩性油藏。研究表明,各类油藏的形成受构造演化影响,是一个动态的成藏过程,油气成藏关键时期分别为区域盖层Adar组沉积之后(区域盖层形成及大规模排烃阶段)和Lau组沉积之后(潜山顶部暴露剥蚀,油藏受到调整改造)。

3.1 原生油藏形成阶段

裂陷III幕初期区域盖层Adar组沉积之后,潜山高部位Yabus组垂向及侧向封堵条件好,形成构造-地层圈闭,同时烃源岩已处于大规模排烃阶段,凹

陷中心 Renk 组生成的油气向上运移至 Galhak 组和 Melut 组等富砂地层,进而侧向运移至潜山高部位。因此在 Adar 组沉积之后,潜山高部位 Yabus 组构造-地层圈闭油气充注程度高,在潜山高部位发育大型构造-地层油藏。而对于基岩,由于 Galhak 组沉积时期的翘倾抬升作用,曾发生局部暴露,易形成风化壳与基岩裂缝,同时其侧向一边与 Gayger 组相邻,一边对接 Adar 组,上覆与 Yabus 组不整合接触,因此 Adar 组沉积之后,基岩与西侧 Gayger 组可整体成藏,基岩形成潜山风化壳/裂缝油藏,而 Gayger 组为不整合油藏(图 6a)。

bus 组、Gayger 组和基岩油藏均遭受破坏,油气向上逸散,经构造破坏和调整改造,以及水洗、氧化等作用,原生油藏逐渐稠化,形成地层不整合稠油油藏。而此时对于 Tean 断裂带东斜坡潜山周缘 Galhak 组地层-岩性圈闭,Ruman 凹陷中心油气侧向运移至 Tean 断裂带西侧 Galhak 组及上覆富砂地层,然后向潜山高部位运移,难以运移至 Tean 断裂带东斜坡潜山低部位的 Galhak 组地层-岩性圈闭,而 Tean 断裂带附近 Renk 组烃源岩尚未成熟,因此在 Lau 组沉积时期,Galhak 组地层-岩性圈闭依靠原地烃源岩成藏的概率很低(图 6b)。

3.3 现今多类型稠油油藏并存

在区域拗陷阶段,新近纪之后,Ruman 潜山构造稳定,整体位于水下,潜山顶部沉积了盆地广泛发育的 Jimidi 组河流相砂岩和 Miadol 组厚层泥岩,形成 Jimidi-Miadol 组储盖组合,而 Jimidi 组底为区域不整合面,东侧为 Moleeta 凹陷边界断裂,均为 Jimidi 组油气成藏提供了良好的油气运移通道。因此,一方面东侧 Moleeta 凹陷生成的油气可沿大断裂向上运移至 Jimidi 组;另一方面 Jimidi 组下伏稠油油藏向上逸散,沿不整合运移至 Jimidi 组成藏,但由于 Jimidi 组整体埋深为 600~700 m,埋藏浅,受水洗作用及生物降解作用影响,油藏也易变得稠化,因此 Jimidi 组油藏成因为次生型晚期成藏,为受不整合、边界断裂及砂体展布多因素影响的构造-岩性油藏。目前勘探发现 Jimidi 组构造-岩性油藏单井产量较高,最高日产原油量达数十吨,且油藏展布面积广、勘探潜力大。

而对于 Galhak 组沉积末期,已钻井揭示 Tean 断裂带东斜坡围绕潜山形成地层-岩性圈闭,其储层的泥岩顶板与底板厚度均在 10 m 以上,封堵条件较好;且在拗陷阶段,构造稳定,油气成藏后不易受生物、氧化等作用影响,已发现的稠油油藏应为低成熟原油运移成藏。利用 EASY% R_o 模型模拟烃源岩热演化史发现,对 Tean 断裂带东斜坡地层-岩性圈闭有贡献的烃源岩在距今 10 Ma 进入成熟门限,现今烃源岩 R_o 基本在 0.7% 之下,其生成的低成熟-未成熟原油经垂向及侧向短距离运移至东斜坡 Galhak 组地层-岩性圈闭,形成上倾尖灭地层-岩性油藏,因此 Galhak 组稠油成因为原生型,且为晚期成藏。研究发现围绕 Ruman 潜山,在低成熟烃源岩生油窗内 Galhak 组发育多个地层-岩性圈闭,勘探面积大,是潜在的有利勘探领域。同时在拗陷阶段,经 Lau 组沉积时期调整改造的 Yabus 组、Gayger 组和

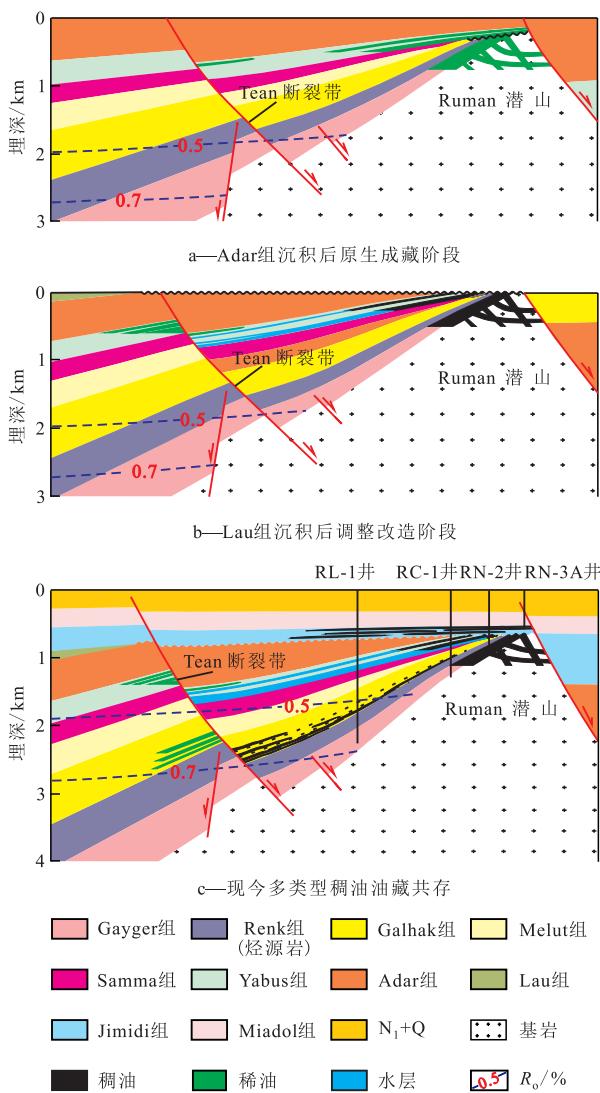


图6 Ruman 潜山及周缘油气成藏演化过程

Fig.6 Evolution process of hydrocarbon accumulation around Ruman buried hill

3.2 油藏调整改造阶段

裂陷Ⅲ幕末期 Lau 组沉积时期,Ruman 潜山大规模暴露。潜山顶部沉积的 Gayger, Renk, Galhak, Yabus 和 Adar 组均遭受不同程度剥蚀;Lau 组顶面形成区域不整合,导致先期在潜山高部位形成的 Ya-

基岩油藏,现今均变为残留型稠油油藏,其勘探潜力有限(图6c)。

4 结论

Ruman潜山构造演化过程中经历了2期规模较大的翘倾抬升。白垩纪末期Galhak组沉积时期的翘倾抬升导致潜山暴露,但剥蚀范围有限,围绕Galhak组底面不整合形成一系列地层-岩性圈闭;古近纪末期Adar-Lau组沉积时期的翘倾抬升造成潜山暴露面积大、剥蚀范围广,潜山周缘高部位在Adar组沉积时期形成的Yabus组、Gayger组和基岩原生油藏被破坏,现今为地层不整合残留稠油油藏;在拗陷阶段形成了Galhak组晚期成藏原生型地层-岩性稠油油藏及Jimidi组晚期成藏次生型构造-岩性稠油油藏,这2类油藏勘探潜力较大,是该区下一步主要的勘探方向。

参考文献

- [1] 童晓光,徐志强,史卜庆,等.苏丹迈卢特盆地石油地质特征及成藏模式[J].石油学报,2006,27(2):1-5,10.
TONG Xiaoguang, XU Zhiqiang, SHI Buqing, et al. Petroleum geologic property and reservoir-forming pattern of Melut Basin in Sudan[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 1-5, 10.
- [2] 窦立荣.苏丹迈努特盆地油气成藏机理和成藏模式[J].矿物岩石地球化学通报,2005,24(1):50-57.
DOU Lirong. Formation mechanism and model of oil and gas accumulations in the Melut Basin, Sudan[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(1): 50-57.
- [3] 史忠生,王天奇,薛罗,等.中非Melut盆地高砂地比地层成藏特征与富集规律[J].天然气地球科学,2017,28(2):262-271.
SHI Zhongsheng, WANG Tianqi, XUE Luo, et al. Reservoir characteristics and enrichment rule of highly sandy formation in Melut Basin, Central Africa[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(2): 262-271.
- [4] 陈彬滔,史忠生,薛罗,等.古潜山周缘滩坝沉积模式与岩性油藏勘探实践——以南苏丹Melut盆地Ruman地区Galhak组为例[J].岩性油气藏,2018,30(6):37-44.
CHEN Bintao, SHI Zhongsheng, XUE Luo, et al. Depositional models and lithologic reservoir exploration of sandy beach-bar around buried-hill: a case from Galhak Formation in Ruman region of Melut Basin, South Sudan[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(6): 37-44.
- [5] 束宁凯,汪新文,王金铸,等.义和庄地区潜山内幕构造演化特征及其控藏作用[J].油气地质与采收率,2017,24(3):25-29.
SHU Ningkai, WANG Xinwen, WANG Jinzhu, et al. Tectonic evolution characteristics of inner buried hills in Yihezhuang area and its controlling effect on the hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3): 25-29.
- [6] 文志刚,李威,窦立荣,等. Bongor盆地Baobab地区潜山油气成藏期次[J].石油学报,2018,39(8):869-875.
WEN Zhigang, LI Wei, DOU Lirong, et al. Buried-hill hydrocarbon accumulation stage of Baobab area in Bongor Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(8): 869-875.
- [7] 林会喜,熊伟,王勇,等.济阳拗陷埕岛潜山油气成藏特征[J].油气地质与采收率,2021,28(1):1-9.
LIN Huixi, XIONG Wei, WANG Yong, et al. Hydrocarbon accumulation in Chengdao buried hill of Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1): 1-9.
- [8] CHULL T J. Rift basins of interior Sudan: Petroleum exploration and discovery[J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(10): 1 128-1 142.
- [9] MCHARGUE T R, HEIDRICK T L, LIVINGSTON J K. Tectonostratigraphic development of the interior Sudan rifts, Central Africa[J]. Tectonophysics, 1992, 213(1/2): 187-202.
- [10] 叶先灯.苏丹Melut盆地构造、沉积和油气成藏研究[D].广州:中国科学院广州地球化学研究所,2006.
YE Xiandeng. Study on tectonics, sedimentology and reservoirs in Melut Basin, Sudan[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [11] 史忠生,方乐华,薛罗,等.中非Melut盆地与我国东部裂谷盆地的类比及意义[J].地球科学,2019,44(2):588-602.
SHI Zhongsheng, FANG Lehua, XUE Luo, et al. Analogy between Melut Basin of Central Africa and rifted basins of East China and implication[J]. Earth Science, 2019, 44(2): 588-602.
- [12] 薛罗,史忠生,马轮,等.南苏丹Melut盆地北部拗陷烃源岩热演化特征及油气地质意义[J].中国石油勘探,2020,25(6):79-86.
XUE Luo, SHI Zhongsheng, MA Lun, et al. Thermal evolution characteristics of source rocks and their petroleum geological significance in the Northern depression of Melut Basin, South Sudan[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 79-86.
- [13] 何松林,张小兵.塔里木盆地塔北地区T₇⁴不整合面古构造演变过程[J].断块油气田,2019,26(4):409-414.
HE Songlin, ZHANG Xiaobing. Paleostucture evolution process of T₇⁴ unconformity in Tabei area, Tarim Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(4): 409-414.
- [14] 何登发.不整合面的结构与油气聚集[J].石油勘探与开发,2007,34(2):142-149,201.
HE Dengfa. Structure of unconformity and its control on hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 142-149, 201.
- [15] 耿捷,冯阵东,程秀申,等.平衡剖面控制下古构造的恢复[J].断块油气田,2013,20(6):681-685.
GENG Jie, FENG Zhendong, CHENG Xiushen, et al. Restoration of paleostructure under control of balanced section[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(6): 681-685.
- [16] 林水清,王均红,张高源,等.伊犁盆地伊宁凹陷构造变形特征与主控因素分析[J].石油实验地质,2015,37(6):713-720.
LIN Shuiqing, WANG Junhong, ZHANG Gaoyuan, et al. Structural deformation and its controlling factors in the Yining Sag of Yili Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(6): 713-720.

- [17] 王明健,张训华,肖国林,等.南黄海盆地南部坳陷三叠纪以来的构造演化与油气成藏[J].天然气地球科学,2014,25(7):991-998.
WANG Mingjian, ZHANG Xunhua, XIAO Guolin, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation since Triassic of the southern depression in South Yellow Sea Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(7): 991-998.
- [18] 余朝华,肖坤叶,肖高杰,等.乍得 Bongor 反转裂谷盆地中生界剥蚀厚度恢复及勘探启示[J].中国石油勘探,2013,18(5):45-53.
YU Zhaohua, XIAO Kunye, XIAO Gaojie, et al. Mesozoic erosion thickness restoration and its implication to exploration in Bongor inverted rift basin, Chad [J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(5): 45-53.
- [19] 罗开平,杨帆,陆永德,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区关键构造期与二叠系致密气成藏响应[J].石油实验地质,2021,43(4):557-568.
LUO Kaiping, YANG Fan, LU Yongde, et al. Key structural periods and Permian tight gas accumulation response in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(4): 557-568.
- [20] 袁玉松,郑和荣,涂伟.沉积盆地剥蚀量恢复方法[J].石油实验地质,2008,30(6):636-642.
YUAN Yusong, ZHENG Herong, TU Wei. Methods of eroded strata thickness restoration in sedimentary basins [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 636-642.
- [21] 姜素华,王永诗,刘惠民,等.利用波动分析法研究惠民凹陷沙四段和孔店组的地层剥蚀厚度[J].油气地质与采收率,2008,15(1):6-9,13.
JIANG Suhua, WANG Yongshi, LIU Huimin, et al. Research on the denudation thickness of the fourth member of Shahejie Formation and Kongdian Formation by wave analysis method in Huimin Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1): 6-9, 13.
- [22] 王国林,史忠生,赵艳军,等.南苏丹 Melut 盆地北部地区岩性油藏成藏条件及勘探启示[J].岩性油气藏,2018,30(4):37-45.
WANG Guolin, SHI Zhongsheng, ZHAO Yanjun, et al. Lithologic reservoir forming conditions and its exploration implication in northern Melut Basin, South Sudan [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(4): 37-45.

编辑 邹淑滢