

构造运动对扎格罗斯前陆盆地白垩系碳酸盐岩储层的影响 ——以Y油田为例

唐颖¹,樊太亮¹,张涛²,王喆³,郑元超¹

[1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083;

3. 西南石油大学地球科学与技术学院,四川 成都 610500]

摘要:以扎格罗斯前陆盆地东北部的Y油田白垩系碳酸盐岩储层为例,利用岩心、薄片样品、成像测井和三维地震资料,探讨构造运动对碳酸盐岩储层成岩作用、裂缝发育以及热液流体活动的影响。研究表明,晚白垩纪至全新世的构造运动对Y油田白垩系碳酸盐岩储层影响最重要。构造运动期间地壳抬升,地层遭受剥蚀、风化等作用从而发育不整合面,不整合面以下的储层受溶蚀作用改造显著。而阿拉伯板块与欧亚板块碰撞发生的褶皱作用和逆冲作用在储层内部生成大量裂缝,裂缝的密度和位置受褶皱、断层以及岩性的共同影响。裂缝主要发育在褶皱的轴部和翼的尾部以及断裂附近,白云岩的裂缝密度明显大于灰岩的。构造运动还控制了Y油田内热液流体活动,断层是热液流体进入Y油田的主要通道,热液白云化作用主要发生在靠近断裂或裂缝带的地堑内。探讨构造运动对碳酸盐岩储层的影响,有利于预测定位研究区的优质储层,优化油田的生产部署。

关键词:构造运动;溶蚀作用;裂缝;热液白云岩;白垩系;扎格罗斯前陆盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Influence of tectonic movement on Cretaceous carbonate reservoirs in the Zagros Foreland Basin: A case study of Y oilfield

Tang Ying¹, Fan Tailiang¹, Zhang Tao², Wang Zhe³, Zheng Yuanchao¹

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China]

Abstract: On the basis of drilling cores, thin sections, imaging logging and 3D seismic data, the study discusses the effects of tectonic movement on diagenesis, fractures development and hydrothermal fluid activities of carbonate reservoirs in Y oilfield of the northeastern Zagros Foreland Basin. Tectonic movements from the late Cretaceous to the Holocene have most significant effect on the Cretaceous carbonate reservoirs in Y oilfield. During this period, because of compressional uplift, target strata were heavily eroded and weathered, which leads to development of an unconformity surface. Reservoirs below the surface suffered from severe dissolution. With the collision between Arabian plate and the Eurasian plate, and resultant folding and thrusting induced formation of fractures within reservoirs. Density and location of fractures were influenced by the intensity of folding and faulting, but also related to lithology. Fractures were mainly developed in the area around faults, and along fold axis or the lower end of fold limbs. In terms of lithology, fracture density in dolomite is obviously higher than that in limestone. Tectonic movements also controlled the hydrothermal fluid activities in Y oilfield. The faults are the main pathways of hydrothermal fluid into Y oilfield. Hydrothermal dolomitization occurred in grabens close to faults or fracture zones. Discussing the influence of tectonic movements on carbonate reservoir is beneficial for predicting and locating high-quality reservoirs in the study area, and optimizing production deployment of the oilfield.

Key words: tectonic movement, dissolution, fracture, hydrothermal dolomitization, Cretaceous, Zagros Foreland Basin

扎格罗斯前陆盆地碳酸盐岩储层具有极其丰富的油气资源,其中可采储量超过 $6\,820 \times 10^4$ t的大油田有

32个^[1-2]。Y油田位于阿拉伯板块东北部扎格罗斯前陆盆地中的轻微褶皱带内,是一个典型碳酸盐岩背斜

收稿日期:2015-10-16;修订日期:2016-10-13。

第一作者简介:唐颖(1989—),女,博士研究生,碳酸盐岩储层地质学。E-mail: tangying330@126.com。

通讯作者简介:樊太亮(1961—),男,教授、博士生导师,层序地层学及隐蔽油气藏勘探理论与技术。E-mail: fantl@cugb.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05031-002)。

圈闭油藏,其白垩系储层为裂缝型和裂缝-孔隙型碳酸盐岩储层。从前寒武纪晚期阿拉伯板块基底克拉通开始,该油田经历了漫长但比较简单的演化史:古生代—三叠纪,阿拉伯板块处于被动陆缘环境;晚白垩世—古近纪渐新世,阿拉伯板块由被动陆缘转化为活动陆缘向欧亚板块俯冲,发生碰撞形成扎格罗斯前陆盆地;从古近纪中新世至今仍活跃的褶皱逆冲作用造就了现在的Y油田^[3-4]。不少学者认为构造运动对碳酸盐岩储层的影响是极其深刻且显著的。Saller 研究发现埋藏后的碳酸盐岩会因地壳抬升至地表,与不整合面伴生和与大气淡水接触后发生溶蚀作用^[5]。吕修祥认为,在海相碳酸盐岩储层中构造运动控制了与断层相伴生的裂缝的发育以及与断层关系密切的热液流体活动^[6]。然而,构造运动控制碳酸盐储层发育的机理是十分复杂的,其受岩性、断层、裂缝与构造样式等多方面因素相互作用和影响,需要进一步的思考和剖析。因此本文以Y油田为例,综合利用丰富的岩心、实验、测井和地震资料,以碳酸盐岩储层地质学和构造地质学等学科为指导,深入探讨构造运动对白垩系碳酸盐岩储层的影响,希望可以丰富深化碳酸盐岩储层地质学并为预测定位优质储层提供理论依据。

1 晚白垩世至今的构造演化史

Y油田所在的扎格罗斯前陆盆地位于阿拉伯板块的东北边缘(图1),其从白垩纪至今所经历的构造运动有:在晚白垩世土伦期—古近纪始新世期间,阿拉伯板块东北边界开始向欧亚板块边界斜向俯冲,造成阿拉伯板块东北边缘的蛇绿岩和石灰岩推覆在大陆边缘

上和新特提斯洋逐渐闭合;在古近纪渐新世时,阿拉伯板块与亚欧板块的发生碰撞和汇聚;古近纪中新世,扎格罗斯褶皱开始上升,其后与板块碰撞事件相关并且活跃至今的褶皱作用和逆冲作用形成了现在的扎格罗斯前陆盆地^[7-8]。位于阿拉伯板块东北边界的前陆盆地自东北至西南可以划分为3条走向平行的构造单元,分别是推覆带、强烈褶皱带和轻微褶皱带,其中Y油田就位于轻微褶皱带内。褶皱带表现为一条条平行于板块碰撞边界的宽缓箱型背斜,长轴长度在5~30 km,并且被一条条狭窄且深的向斜隔开。这些背斜都是极好的油气聚集场所,加之轻微褶皱带深部发育多套烃源岩以及分布广泛稳定的盖层,使得该区域具有极其丰厚的油气蕴藏量和良好的勘探前景^[9]。

2 白垩系碳酸盐岩储层特征

扎格罗斯轻微褶皱带长期稳定的大地构造环境和完备的生储盖组合(图2)使得Y油田石油开采潜力巨大。上侏罗统的Sargelu组和Naokelekan组是油田的烃源岩。保存完好且分布稳定的中新世Lower Fars组的蒸发岩是油田的盖层^[10-12]。油田的储层位于白垩系,自上而下分为3个组。坎帕期—麦斯里希特期的Shiranish组,其岩性主要为浅灰色—深褐色灰岩和泥灰岩,沉积于较深水陆棚环境且因受到外部细粒陆源物质的影响,泥质含量较多(10%~20%)。该组的基质孔隙度低(孔隙度<3%)(图3),但裂缝发育程度高,主要储集空间是部分充填—未充填构造裂缝,日产油可达1 700 t。土伦期—桑托期的Komatan组,岩性主要为浅灰色—灰褐色泥晶灰岩,含多种浮游有孔虫,属于正常外陆棚较深水环境,岩性较纯,基质致密(孔隙度<3%)(图3),部分区域因遭受热液改造为白云岩,裂缝是该组主要的储集空间,日产油2 200 t。阿普第期—阿尔必期的Qamchuqa组,属于局限潟湖相沉积,这个组的岩性从下至上表现为白云岩、灰岩或泥灰岩与白云岩互层、白云岩,Qamchuqa组是Y油田白垩系储层中最重要的储层,储集空间主要包括裂缝、溶蚀作用形成的孔隙、铸模孔、粒内溶孔、粒间溶孔以及晶间孔等类型,这些储集空间孔隙度高(孔隙度范围是2%~25%,平均为12%)(图3),裂缝发育,属于孔隙—裂缝型储层,日产油可达2 600 t^[13]。

3 构造运动对碳酸盐岩储层的影响

3.1 构造运动对成岩作用的影响

构造运动在Y油田区域十分活跃,地壳经常发生

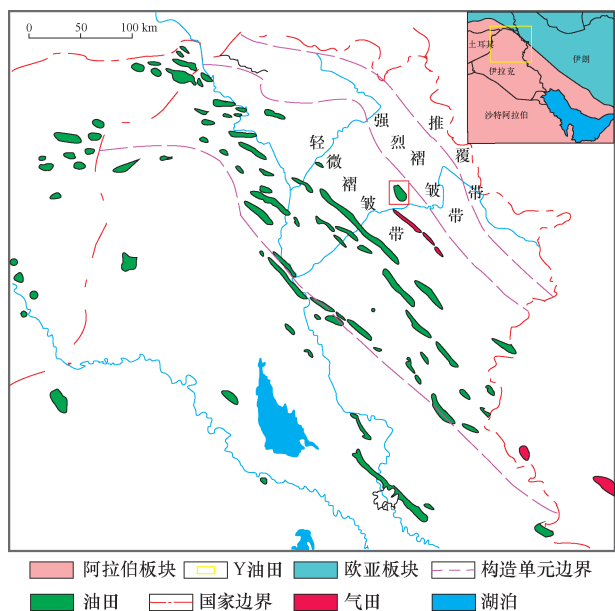


图1 扎格罗斯前陆盆地Y油田位置

Fig. 1 Location map of Y oilfield in the Zagros Foreland Basin

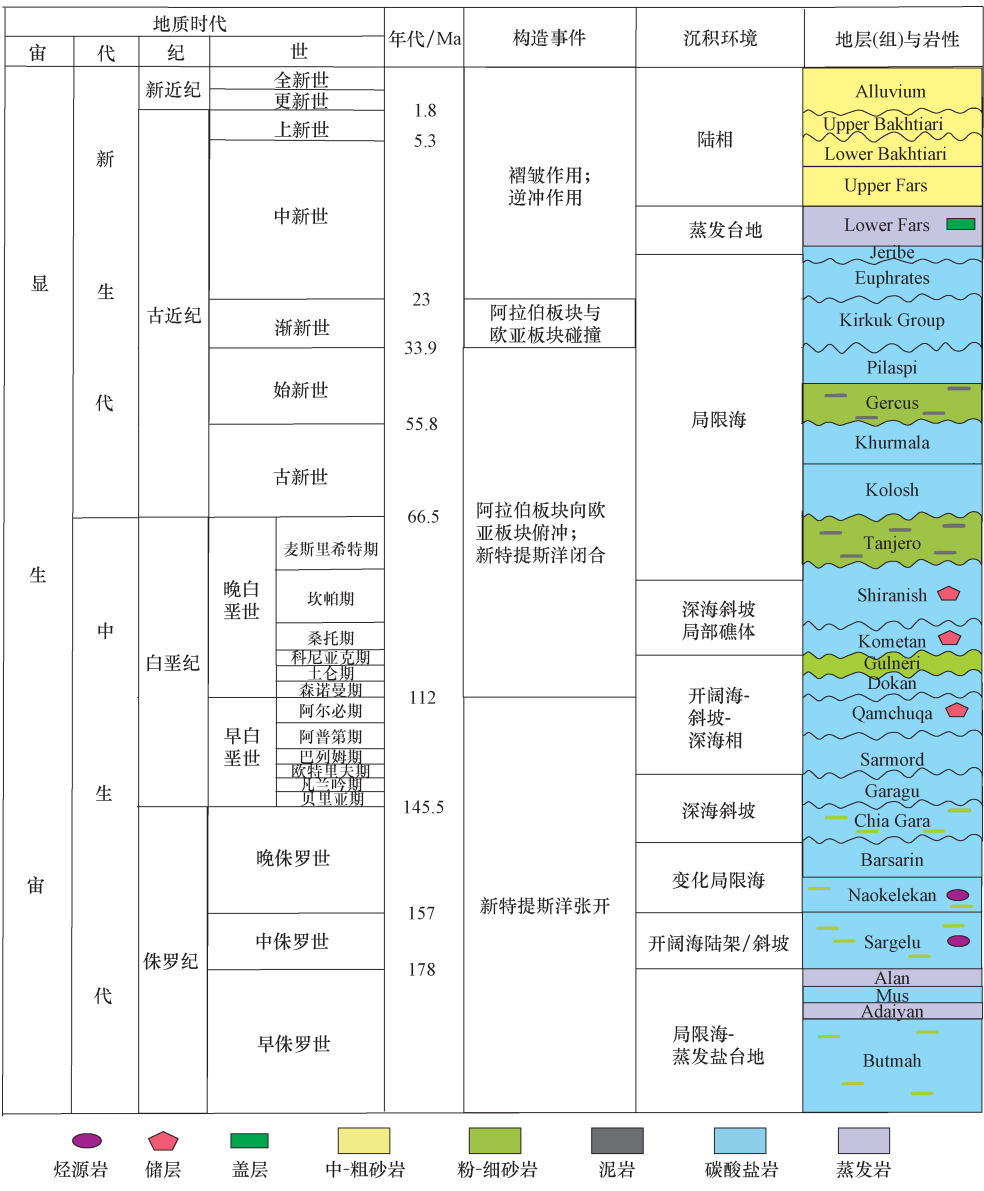


图 2 扎格罗斯前陆盆地 Y 油田地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of Y oilfield in the Zagros Foreland Basin

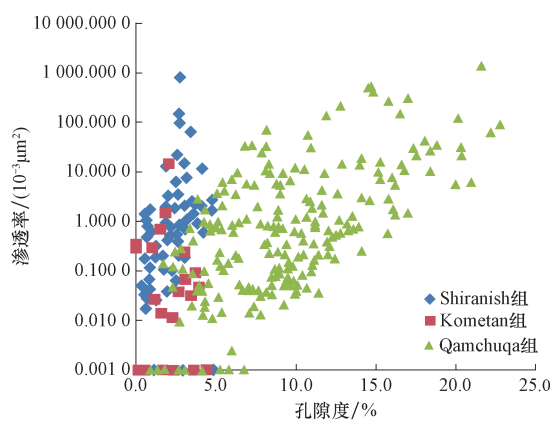


图 3 扎格罗斯前陆盆地 Y 油田白垩系碳酸盐岩储层物性特征

Fig. 3 Petrophysical properties of Cretaceous carbonate reservoirs in Y oilfield, the Zagros Foreland Basin

抬升,地层暴露在地表,容易遭受剥蚀、风化及大气淡水淋滤作用,从 Shiranish 组到 Qamchuqa 组,地层之间

均存在不整合面(图 2)^[14]。不整合面以下的储集体均受到不同程度的改造(主要是溶蚀作用)。由于白云岩受大气水淋滤的特殊性影响,以 Qamchuqa 组顶部即不整合面以下 50 m 以内的储层遭受溶蚀改造最为明显,在镜下经常可以观察到不稳定的颗粒(白云岩、长石等)溶解后形成的次生孔隙,并且以溶蚀晶间孔和小溶洞(溶孔直径<5 mm)为主(图 4a,b)。溶蚀作用对碳酸盐岩的储集能力和渗流能力均有改善效果,Qamchuqa 组顶部的 Q1 小层储层孔隙度很高(图 4c),一般为 15%~20%,明显大于其下部的孔隙度,渗透率也较大,一般在 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.2 构造运动对裂缝的影响

渐新世至全新世期间发生的阿拉伯板块和欧亚板块的碰撞及其伴随的褶皱和逆冲作用对 Y 油田构造

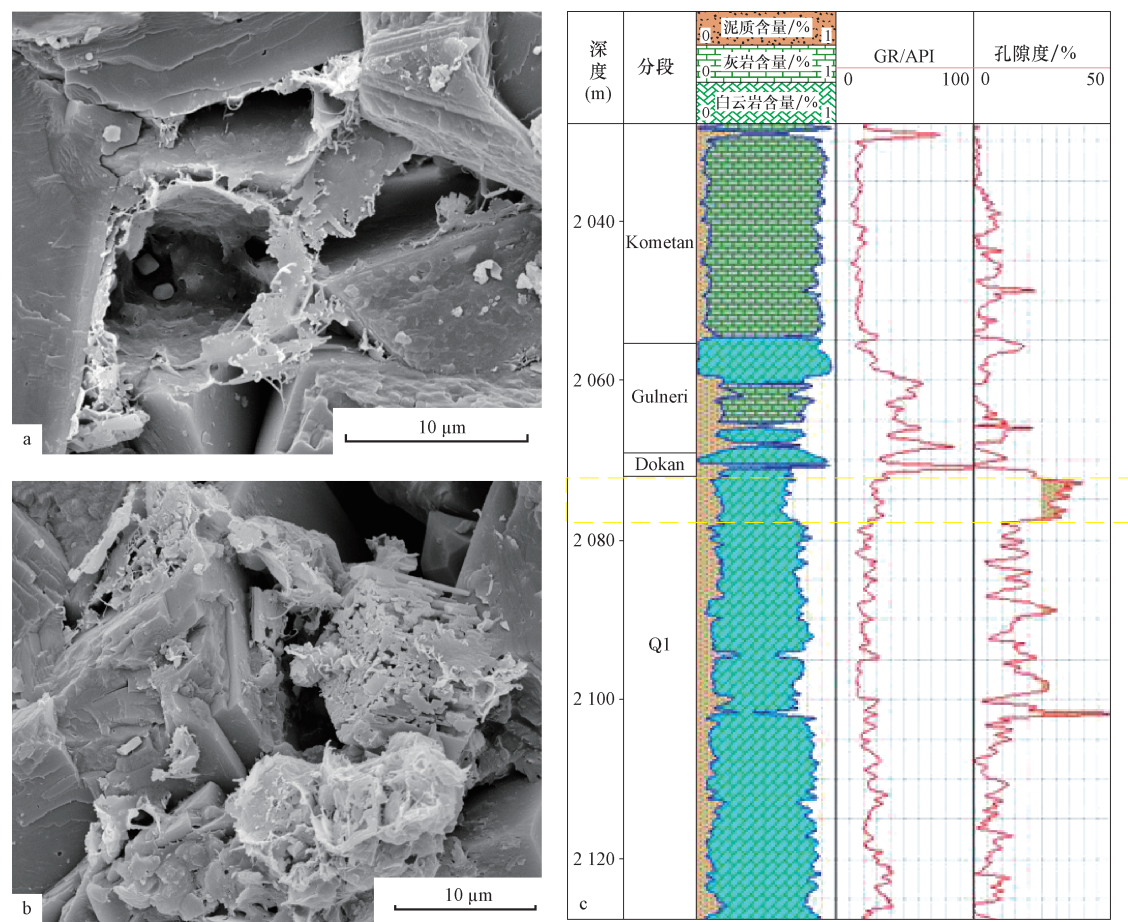


图 4 扎格斯前陆盆地 Y 油田溶蚀作用对 Qamchuqa 组顶部储层(Q1 小层)改造明显

Fig. 4 Figures showing the top of Qamchuqa Formation has undergone serious dissolution in Y oilfield,the Zagros Foreland Basin

- a. AA-05 井,埋深 2 030.48 m,Q1,颗粒几乎完全被溶蚀,形成次生大孔隙;b. AA-08 井,埋深 2 034.3 m,Q1,长石的部分溶解形成次生孔隙;
c. AA-07 井单井地层综合柱状图,Qamchuqa 组顶部储层的孔隙度明显比下部储层的大

圈闭和裂缝的形成至关重要。Y 油田受到 WE-SW 向的挤压作用使其表现为一个两翼不对称的 NW-SE 走向的背斜,并且在背斜顶部发育了数条平行于背斜轴部走向(NW-SE)的张性大断层,剖面呈地垒-地堑构造样式。背斜的两翼各被一条大的逆断层所截断(图 5),这两条逆断层对 Y 油田白垩系内油气侧向运移起到了封堵作用,加之上部发育有分布稳定的 Lower

Fars 组蒸发岩,使得 Y 油田成为具有一个条件良好的背斜构造圈闭^[15-16]。在褶皱受到挤压的过程中,在褶皱内还生成了与最大水平地应力方向(NE-SW)平行的张性缝,这些裂缝主要分布于断层附近和背斜的轴部和端部。裂缝是 Y 油田重要的储集空间和流体的运移通道,尤其在岩性致密的 Shranish 组和 Kometan 组,裂缝分别能提供 100%和 88%以上的产量^[11]。因此研究 Y 油田内裂缝密度、发育位置与走向等特征,对指导油田开发生产有重要意义。

Y 油田的裂缝按发育规模可以分为大小两个级别。大级别裂缝(即裂缝带和断层),间隔从数百米到几公里,与区域构造应力有关,裂缝可以贯穿储层甚至整个油藏,具有高渗透特征,可以作为流体运移通道。小级别裂缝以弥散状的离散裂缝的形式存在于储层中,间隔从几厘米到几米。小级别的缝又可以分为构造缝和非构造缝。构造缝是本文研究的重点,其形成完全受构造运动和构造应力的影响,分布规律性较好,与断层的相对距离、褶皱与岩性关系密切;而非构造缝不受构造运动和构造应力的影响,分布规律性差,且极易被方解石等充填成为无效的充填缝。Y 油田是典型

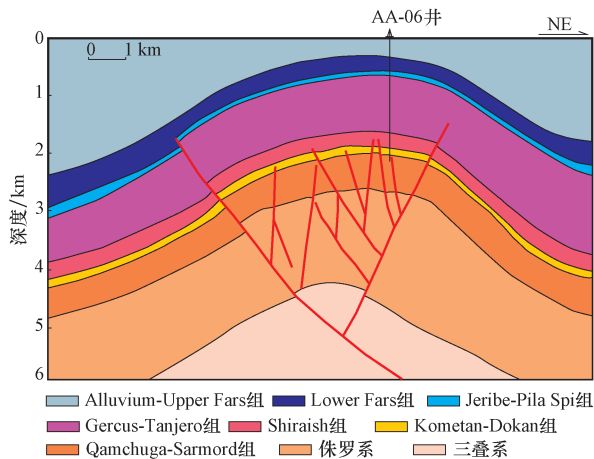


图 5 扎格斯前陆盆地 Y 油田油藏构造剖面示意图

Fig. 5 Structural section of Y oilfield in the Zagros Foreland Basin

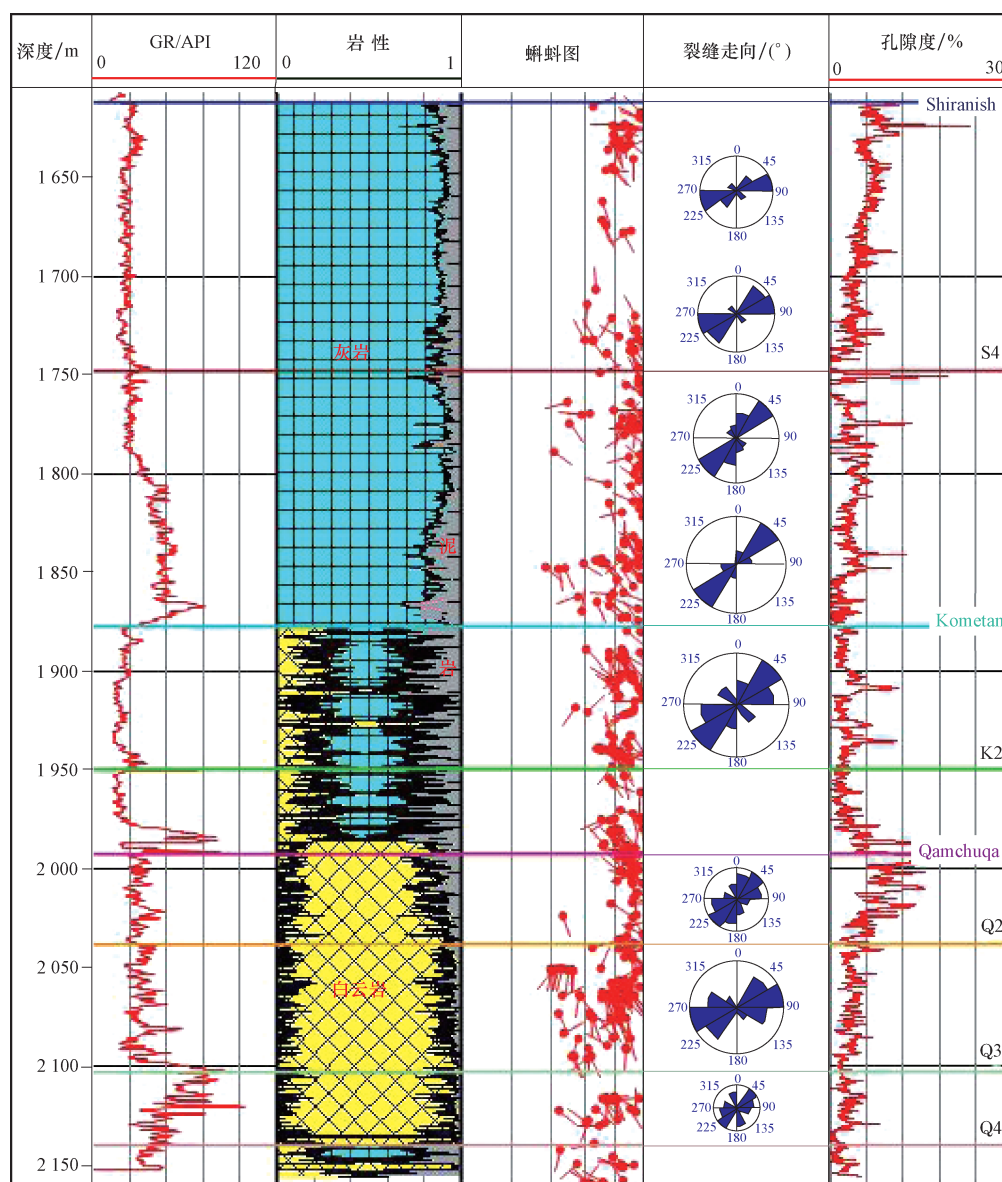


图6 扎格罗斯前陆盆地Y油田AA-11井成像测井解释结果

Fig. 6 Imaging logging interpretation of AA-11 well in Y oilfield, the Zagros Foreland Basin

的背斜构造,构造缝以垂直缝($75^{\circ} \sim 90^{\circ}$)为主,特别在背斜轴部均发育垂直的张开缝;纵向裂缝向背斜翼部逐渐过渡为高角度斜交缝($45^{\circ} \sim 75^{\circ}$)和低角度斜交缝($15^{\circ} \sim 45^{\circ}$),水平缝($0^{\circ} \sim 15^{\circ}$)的发育在构造缝当中相对较弱(图6)。

断层、褶皱与岩性对构造缝发育的控制非常明显。利用 Murray 的曲率法研究构造裂缝,发现在越靠近断层区域发育的裂缝数量越多,并且发现其走向与断层走向大致平行(图5c,图7a,图7b),说明裂缝的力学性质与邻近的断层的力学性质类似,都受控于同一应力场^[17-18]。褶皱对裂缝发育程度的控制表现为在应力集中的构造弯曲部位(构造主曲率较大部位),易生成裂缝,因此褶皱的轴部和端部发育的裂缝数量明显比翼部的多(图7a-c)^[19]。对Y油田有裂缝测井数据的井进行统计(图7d)发现,裂缝密度发育最多的层

段是 Qamchuqa 组,其次是 Kometan 组和 Shiranish 组,裂缝密度随深度逐渐变大,这一方面是因为从 S 层向下断层逐渐变多(图5),而断裂附近区域应力扰动活跃通常是裂缝发育带,裂缝的密度与断层的数量呈正比;另一方面是因为脆性组分高的岩石比脆性组分低的岩石在构造活动中更容易发生破碎,从而具有更高的裂缝密度。Qamchuqa 组本身就是一大套以白云岩为主,偶见与灰岩互层的储层;Komatan 组以灰岩为主,只有受到热液改造的区域才出现白云岩;Shiranish 组为一大套岩性致密的含泥灰岩。而白云岩与灰岩比脆性更强,在应力的挤压下更容易发生破碎,统计不同岩性内的裂缝密度也证实了这一点(图7e)^[20-21]。构造运动中地应力对构造缝走向控制明显,裂缝有两组走向:一组以 NE-SW 向与最大水平应力方向平行的裂缝为主,多为张开缝(图7f);另一组则是与最小水

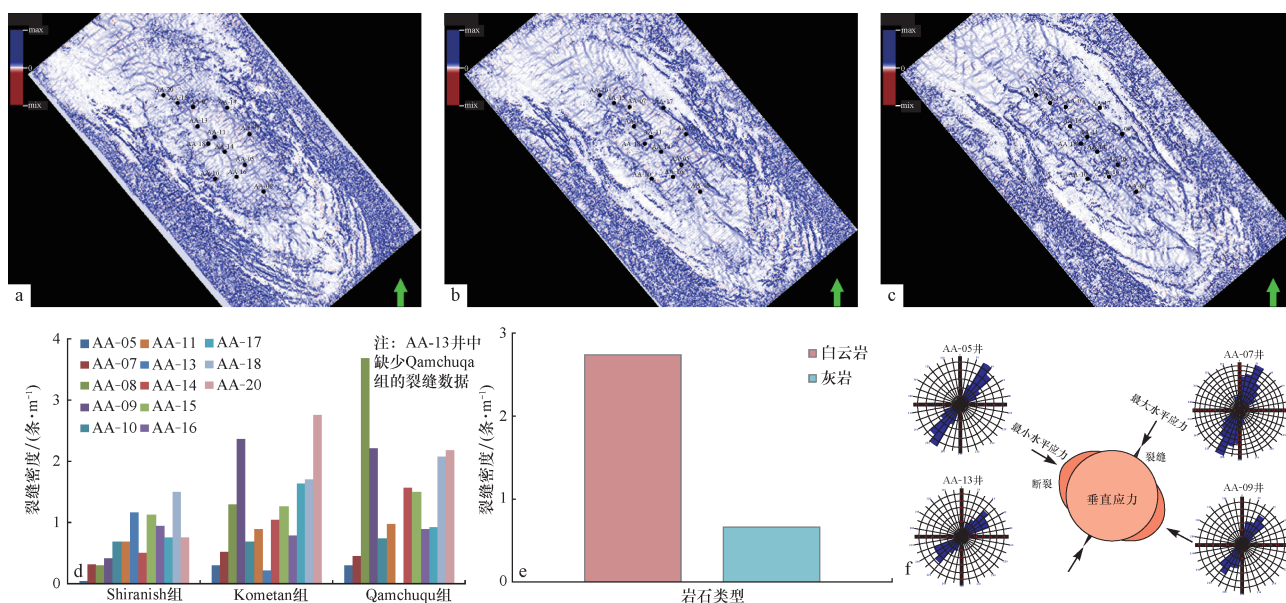


图7 扎格斯前陆盆地Y油田储层裂缝发育部位、密度及玫瑰花图

Fig. 7 Location, density and rose diagram of reservoirs fracture in Y oilfield, the Zagros Foreland Basin

a. Shiranish 组顶面主曲率图; b. Kometan 组顶面主曲率图; c. Qamchuqa 组顶面主曲率图;

d. S, K 和 Q 组内各井的裂缝密度; e. 白云岩和灰岩中的裂缝密度; f. 地应力方向控制构造缝走向

平应力方向平行的 NW - SE 向裂缝, 与背斜轴部走向、大断层发育的方向一致。

3.3 构造运动对热液流体活动的影响

构造运动对 Y 油田的热液流体活动也有一定的影响, 在 Kometan 组靠近生长断层或裂缝带分布的地堑内, 会发现致密灰岩被热液流体改造为低孔白云岩 ($0 < \text{孔隙度} \leq 5\%$) 或中孔白云岩 ($5\% < \text{孔隙度} \leq 10\%$) 的痕迹。这种白云岩的流体包裹体的均一温度在 $85 \sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$, 明显高于 Kometan 组经历的最高温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 证实了白云岩是热液成因的^[12]。热液流体活动与生长断层的活动关系十分密切。张涛通过地堑和地垒内的钻井资料来计算生长断层的生长指数, 认为生长断层的活动时间主要发生在 Shiranish 组沉积期的早期, 即白垩纪的中晚期, 这个时期作为热液流体通道的断裂体系呈张性或张扭性, 断层的活动时间也正是热液流体活动的时间^[22-23]。在岩心上观察热液白云岩表现为充填裂缝的粗晶白云岩 (图 8a), 且在白云岩上局部会发育一些小孔洞 (图 8b)。在显微镜下表现为孔 - 缝充填具有尖顶的鞍形白云石晶体 (图 8c), 这种鞍形白云石是热液白云岩的标志型矿物之一^[24]。另外, 在镜下经常可以看到被白云石充填的呈现网络形态的裂缝 (图 8d), 也说明裂缝是热液流体运移的通道之一。

大量文献和实例表明, 热液流体大规模运移以及由此引起的一系列地质作用都与活跃的构造运动有关^[25-27]。通过查阅前人研究和大量岩心、镜下观察, 可以推断 Y 油田的热液白云岩化的模式 (图 9)。在古

近纪时期, 阿拉伯板块与亚欧板块之间发生碰撞, 随后发生的大量的褶皱, 与逆冲作用, 使得 Y 油田白垩系油藏内部发育了数条贯穿油藏的断层和大量的裂缝。白垩纪中晚期生长断层开始活动, 断层和裂缝成为流体运移的良好通道, 油藏深部热液流体通过这些通道上涌, 热液进入致密的灰岩中, 并且在发育断裂和裂缝处发生了白云化作用。热液流体可以反复向通道里充注, 形成了白色纯净的马鞍状白云石^[28]。热液流体对于 Kometan 组储层质量的改造具有非常重要的积极作用: 一方面热液白云岩中发育的裂缝密度高于致密的宿主灰岩的裂缝密度, Kometan 组储层的渗流能力大大提高; 另一方面热液白云石的晶间孔隙明显大于灰岩的晶间孔隙, 储层的储集空间也会增大 (热液白云岩孔隙度平均值可比灰岩的孔隙度平均值大 8%)。

4 结论

1) 扎格斯前陆盆地是经过漫长多期的构造运动形成的。对于其内部的 Y 油田而言, 晚白垩纪至全新世期间的构造运动, 对 Y 油田白垩系碳酸盐岩储层的成岩作用、裂缝主要发育的部位和密度以及热液流体活动都有显著影响。

2) 构造运动对 Y 油田碳酸盐储层成岩作用的影响表现在: 地壳抬升, 地层暴露受剥蚀、风化等作用形成不整合面。不整合面以下的储层受溶蚀作用明显, 孔隙空间和渗流能力均有提高。

3) 构造运动是 Y 油田内裂缝形成的主要原因。构造缝受构造运动和应力影响最明显, 其发育受褶皱、

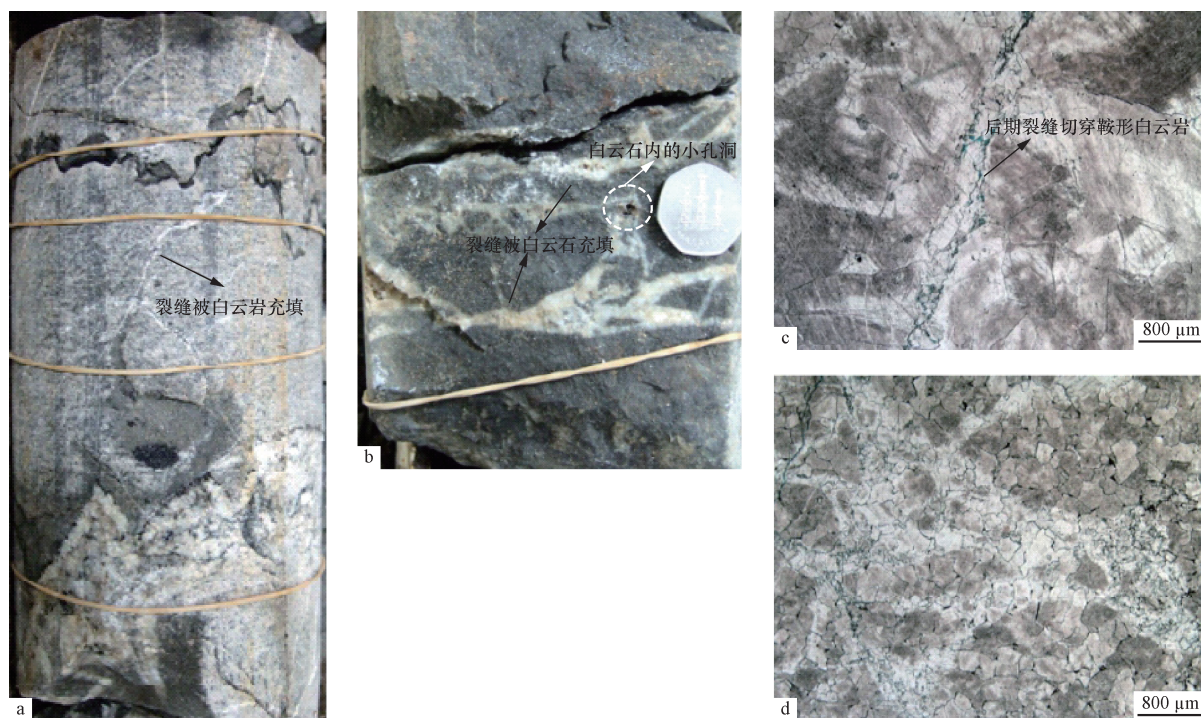


图 8 扎格斯前陆盆地 Y 油田 AA-09 井岩心和显微镜下观察到的热液白云岩

Fig. 8 Hydrothermal dolomite observed in drilling cores and microscope (well AA-09) of Y oilfield, the Zagros Foreland Basin

- a. K1 段, 埋深 1 991.15 m, 裂缝被粗晶白云岩充填; b. K1 段, 埋深 1 990.30 m, 裂缝被白云岩充填, 白云岩内有小孔洞;
c. K1 段, 埋深 1 991.20 m, 鞍形白云石晶体被后期裂缝切割; d. K1 段, 埋深 1 990.20 m, 被白云石充填的呈现网络形态的裂缝

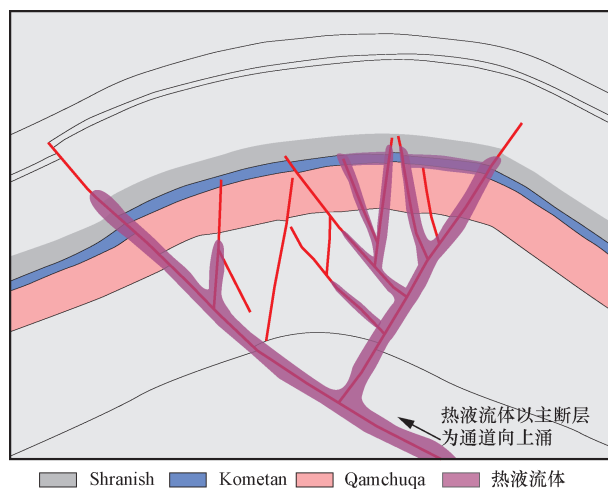


图 9 扎格斯前陆盆地 Y 油田热液白云岩的发育模式

Fig. 9 Genetic model of hydrothermal dolomitization in Y oilfield, the Zagros Foreland Basin

断层以及岩性的共同影响。构造缝主要发育在褶皱转折处以及断裂附近, 且随着 Shranish 组下部断层和白云石含量逐渐增多, 裂缝密度呈现出随深度加深而变大的趋势。构造运动中地应力控制构造缝的走向, 两组走向的裂缝分别平行于最大水平应力方向和最小水平应力方向。

4) 热液流体活动的时间与生长断层活动的时间一致。断层和裂缝是热液流体运移的通道, 热液白云岩发育在 Kometan 组靠近生长断层或裂缝带分布的地堑内。岩心上的粗晶白云岩和显微镜下的鞍形白云石

是热液白云岩的标志型矿物。热液改造对 Kometan 组储层质量具有积极的改善作用。

参 考 文 献

- [1] 白国平. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征[J]. 古地理学报, 2006, 8(2): 241-250.
Bai Guoping. Distribution patterns of giant carbonate fields in the world[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(2): 241-250.
- [2] 贾小乐, 何登发, 童晓光. 扎格斯前陆盆地大油气田的形成条件与分布规律[J]. 中国石油勘探, 2013, 5(18): 54-67.
Jia Xiaole, He Dengfa, Tong Xiaoguang. Formation and distribution of giant oil and gas fields in Zagros Foreland Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 5(18): 54-67.
- [3] Vera JD, Gines J, Oehlers M, et al. Structure of the Zagros fold and thrust belt in the Kurdistan Region, northern Iraq[J]. Trabajos De Geología, 2009, 29(29): 213-217.
- [4] Lawa F, Koyi H A, Ibrahim A. Tectonostratigraphic evolution of the NE segment of the zagros fold-thrust belt, kurdistan, NE Iraq[J]. Journal of Petroleum Geology, 2013, 36(1): 75-96.
- [5] Saller A H, J A D Dickson, S A Boyd. Cycle stratigraphy and porosity in Pennsylvanian and Lower Permian shelf limestone, Eastern Central Basin Platform, Texas[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(12): 1820-1842.
- [6] 吕修祥, 李建交, 汪伟光. 海相碳酸盐岩储层对断裂活动的响应[J]. 地质科技情报, 2009, 28(3): 1-5.
Lu Xiuxiang, Li Jianjiao, Wang Weiguang. Responses of Marine Carbonate Reservoirs to Fault Activities[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(3): 1-5.
- [7] 张震, 李浩武, 段宏臻, 等. 扎格斯盆地新生界 Asmari-Gachsar

- ran 成藏组合地质特征及成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 190–199.
- Zhang Zhen, Li Haowu, Duan Hongzhen, et al. Geological characteristics and hydrocarbon accumulation model of the Cenozoic Asmari-Gachsran play, Zagros Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 190–199.
- [8] Alavi M. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution[J]. American Journal of Science, 2004, 304(1): 1–20.
- [9] 王强, 程绪彬, 张玮璧, 等. 扎格罗斯前陆盆地山前带油气成藏探讨[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(2): 204–206.
- Wang Qiang, Cheng Xubin, Zhang Weibi, et al. Approach to hydrocarbon accumulation in piedmont of Zagros Foreland Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(2): 204–206.
- [10] Lang P, Manickacasagar M, Budett C, et al. Tectono-stratigraphy and general structure of the northwestern Zagros collision zone across the Iraq-Iran border[J]. Journal of Environment & Earth Science, 2014, 4(4): 92–110.
- [11] B Al-Qayim F, Rashid F. Reservoir characteristics of the albian upper qamchuqa formation carbonates, Taq Taq oilfield, Kurdistan, Iraq[J]. Journal of Petroleum Geology, 2012, 35(4): 317–341.
- [12] Al-Ameri T K, Najaf A A, Al-Khafaji A S, et al. Hydrocarbon potential of the Sargelu Formation, North Iraq[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 7(3): 987–1000.
- [13] Mohialdeen I M J, Hakimi M H, Al-Beyati F M. Biomarker characteristics of certain crude oils and the oil-source rock correlation for the Kurdistan oilfields, Northern Iraq[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(1): 507–523.
- [14] 何登发, 何金友, 文竹, 等. 伊拉克油气地质与勘探潜力[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- He Dengfa, He Jinyou, Wen Zhu, et al. Hydrocarbon geology and exploration potential of Iraq[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [15] Al-Ameri T K, Zumberge J. Middle and Upper Jurassic hydrocarbon potential of the Zagros Fold Belt, North Iraq[J]. Marine & Petroleum Geology, 2012, 36(1): 13–34.
- [16] Pitman J K, Steinshouer D, M. D. Lewan. Petroleum generation and migration in the Mesopotamian Basin and Zagros Fold Belt of Iraq: results from a basin-modeling study[J]. GeoArabia, 2004, 9(4): 41–72.
- [17] 吴胜和, 蔡正旗, 施尚明. 油矿地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
- Wu Shenghe, Cai Zhengqi, Shi Shangming. Industrial Geology of Petroleum[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.
- [18] 穆龙新, 赵国良, 田中元, 等. 储层裂缝预测研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- Mu Longxin, Zhao Guoliang, Tian Zhongyuan, et al. Prediction research of reservoir fracture[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [19] Awdal A H, Braathen A, Wennberg O P, et al. The characteristics of fracture networks in the Shiranish formation of the Bina Bawi Anticline: comparison with the Taq Taq Field, Zagros, Kurdistan, NE Iraq[J]. Petroleum Geoscience, 2013, 19(2): 139–155.
- [20] Reif D, Decker K, Grasemann B, et al. Fracture patterns in the Zagros fold-and-thrust belt, Kurdistan Region of Iraq[J]. Tectonophysics, 2012, 576–577: 46–62.
- [21] Wennberg O P, Svana T, Azizzadeh M, et al. Fracture intensity vs. mechanical stratigraphy in platform top carbonates: the Aquitanian of the Asmari Formation, Khaviz Anticline, Zagros, SW Iran[J]. Petroleum Geoscience, 2006, 12(3): 235–245.
- [22] 张涛, 苏玉山, 余刚, 等. 热液白云岩发育模式——以扎格罗斯盆地白垩系 A 油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 393–401.
- Zhang Tao, Su Yushan, She Gang, et al. A study on the genetic model of hydrothermal dolomitization in Taq Taq oilfield, Kurdistan region, Iraq—taking oilfield A in the Cretaceous in Zagros Basin as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 393–401.
- [23] Davies GR, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641–1690.
- [24] 陈代钊. 构造—热液白云岩化作用与白云岩储层[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 614–622.
- Chen Daizhao. Structure-controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 614–622.
- [25] Souza R S De, L F De Ros, Morad S. Dolomite diagenesis and porosity preservation in lithic reservoirs: Carnopolis member, Sergipe-Alagoas Basin, northeastern Brazil[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(5): 725–748.
- [26] Luczaj John A, William B, Harrison Iii, Natalie Smith Williams. Fractured hydrothermal dolomite reservoirs in the Devonian dundee formation of the Central Michigan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1787–1801.
- [27] Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview; Discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(9): 1339–1341.
- [28] 李朋, 任建业, 阳怀忠, 等. 巴楚地区断裂带内热液流体活动及对碳酸盐岩改造的特征分析[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 378–385.
- Li Peng, Ren Jianye, Yang Huaizhong, et al. Hydrothermal activities in the fault system and their effects on carbonate rocks in the Bachu area[J]. Geotectonica & Metallogenia, 2011, 35(3): 378–385.

(编辑 董立)