

热液白云岩发育模式

——以扎格罗斯盆地白垩系A油田为例

张涛,苏玉山,余刚,艾合买提江,张德民

(中国石化石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:针对扎格罗斯盆地白垩系A油田Kometan组异常白云岩分布特征,利用岩心岩石学特征描述、裂缝统计、地震、测井资料综合解释及与其他实例对比等方法,分析了研究区热液白云岩化作用的识别标志、发育时间与范围,探讨了其成因模式及对储层的改造。热液白云岩化作用主要改造Kometan组和Shiranish组底部,基质灰岩被热液改造为连晶、半自形、粗晶白云石,早期张性裂缝中充填鞍形白云石和硬石膏,天青石-鞍形白云石-硬石膏为主要热液矿物组合。热液白云岩化作用主要发生在张性或扭张性断裂系统的上盘(地堑内),具有成层性,在断裂破碎带附近的灰岩地层也被热液改造,热液活动的主要时期是生长断层活动期。热液白云岩化作用对储层的改造具有复杂性,在主断层附近由于发生过度白云岩化作用,储层质量无明显改善,而热液改造适中的层段基质孔隙度可提高。同时由于白云岩化作用提高了裂缝发育密度,进而改善了储层的渗流能力。基于对热液白云岩的这些认识,有利于研究区油藏储层建模与生产部署。

关键词:裂缝;热液白云岩;成因模式;碳酸盐岩;白垩系;扎格罗斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

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

Zhang Tao, Su Yushan, She Gang, Ahemaitijiang, Zhang Demin

(Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 10083)

Abstract: Based on core petrographic description, fracture statistics, comprehensive interpretation of seismic and logging data, analogues with other confirmed examples, this paper analyzed the identification marks, development timing, genetic model and distribution of the hydrothermal dolomitization and its alteration on the reservoir quality, so as to analyze the abnormal distribution of dolomite in the Kometan Formation of the Cretaceous oilfield A in Zagros Basin. The most part of Kometan Formation and the lower part of the Shiranish Formation in two wells were altered by hydrothermal dolomitization. The matrix limestone there was replaced by hydrothermal flow with the crystal intergrowth, half automorphic, and coarse grain dolomite. Early extensional fractures were filled with saddle dolomite and anhydrite. Celestine-saddle dolomite-anhydrite is the main hydrothermal mineral assemblage and can be used to identify the hydrothermal origin. The hydrothermal dolomitization preferentially flow upwards along the extensional and transtensional fault systems, where dolomitization mainly occurs on the hanging walls (graben) and extends laterally in the porous and permeable layers. In this case, the geometry of altered rocks was with stratification, the limestone strata near the fractured zone were also altered by hydrothermal dolomitization which display great irregularity. The alteration of hydrothermal dolomitization on reservoir is complicated. The dolostone formed along the main fault has lower matrix porosity than dolomite a little far from main faults, because over-dolomitization usually happened in the position with more active hydrothermal fluid flow. Local reservoir quality is obviously improved with matrix porosity of about 6%. The dolomite is generally more fractured than the limestone, so dolomitization has greatly increased the fracture density and improve the flow capacity of the reservoir. This study is significant for reservoir modeling and production strategies.

Key words: fracture, hydrothermal dolomitization, genetic model, carbonate, Cretaceous, Zagros Basin

热液白云岩作为一种特殊的白云石成因类型及其蕴藏的巨大资源价值而备受关注。加拿大西加盆地的

泥盆系和密西西比系,加拿大东部密歇根盆地和阿巴拉契亚盆地的奥陶系,美国东北部奥陶系中都有多套

收稿日期:2014-12-24;修订日期:2015-05-04。

第一作者简介:张涛(1973—),男,高级工程师,碳酸盐岩沉积。E-mail:zhangtao1973_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05031-002)。

含油层系与热液白云岩有关,成为目前全球日益增长的勘探热点。Graham 在 2006 年系统总结了全球范围内受构造控制热液白云岩储集体形成的区域构造背景、构造控制作用、标型矿物、地化特征、共生次序、岩石组构、定位时间及对产能的影响^[1]。D. Lavoie 在 2010 年报道在魁北克 Gaspé 半岛存在大范围发育热液白云岩化的实例^[2]。近年来,国内学者研究了四川盆地、塔里木盆地热液白云岩的特征、控制因素及识别方法,但国内实例主要是受晚期热液活动影响,分布多局限在破碎带附近,沿断裂或裂缝带分布^[3-8],这些实例中的热液白云岩不具成层性。伊拉克北部库尔德地区 A 油田发现的热液成因白云岩,且具有成层性,对其识别特征、分布范围、储层改善等方面进行系统深入研究,将有利于油藏建模和储量计算的准确性。

1 地质背景

A 油田位于扎格罗斯盆地叠瓦状褶皱带与简单褶

皱带之间的过渡区。Taq Taq 构造是一个简单的背斜,两条主要逆断层出现在褶皱东北和西南两翼,位于两逆断层之间的白垩系油藏显示为断块(图 1),新生界被弯成具有外弧伸展特征的平缓褶皱^[9]。A 油田主要储层是白垩系 Shiranish、Kometan 和 Qamchuqa 组碳酸盐岩。Shiranish 组由厚约 220 ~ 350 m,浅灰色 - 深棕色含有孔虫瓦克灰岩和颗粒质灰岩组成,与泥灰岩和泥质灰岩互层。根据岩性、电性特征可分为七段(S1—S7)。Shiranish 组在 A 油田为致密灰岩,孔隙度小于 2%,裂缝发育。Kometan 组为纯灰岩,部分为白云岩(TT-05 和 TT-08 井),基质孔隙度一般小于 3%,局部为 6% ~ 7%。Qamchuqa 组由上部褐色多孔白云岩段、中部白云岩与灰岩互层段和下部白云岩段组成,分成 7 个小层(图 2),Qamchuqa 上段(Q1—Q3)为 160 m 左右的浅棕色微晶白云岩组成,部分颗粒组被保存,裂缝发育;中段(Q4—Q5)段灰岩泥灰岩互层段,物性较差;下段为白云岩,最上部约 40 m 厚的储层在 TT-01 井的平均孔隙度为 12.75%。

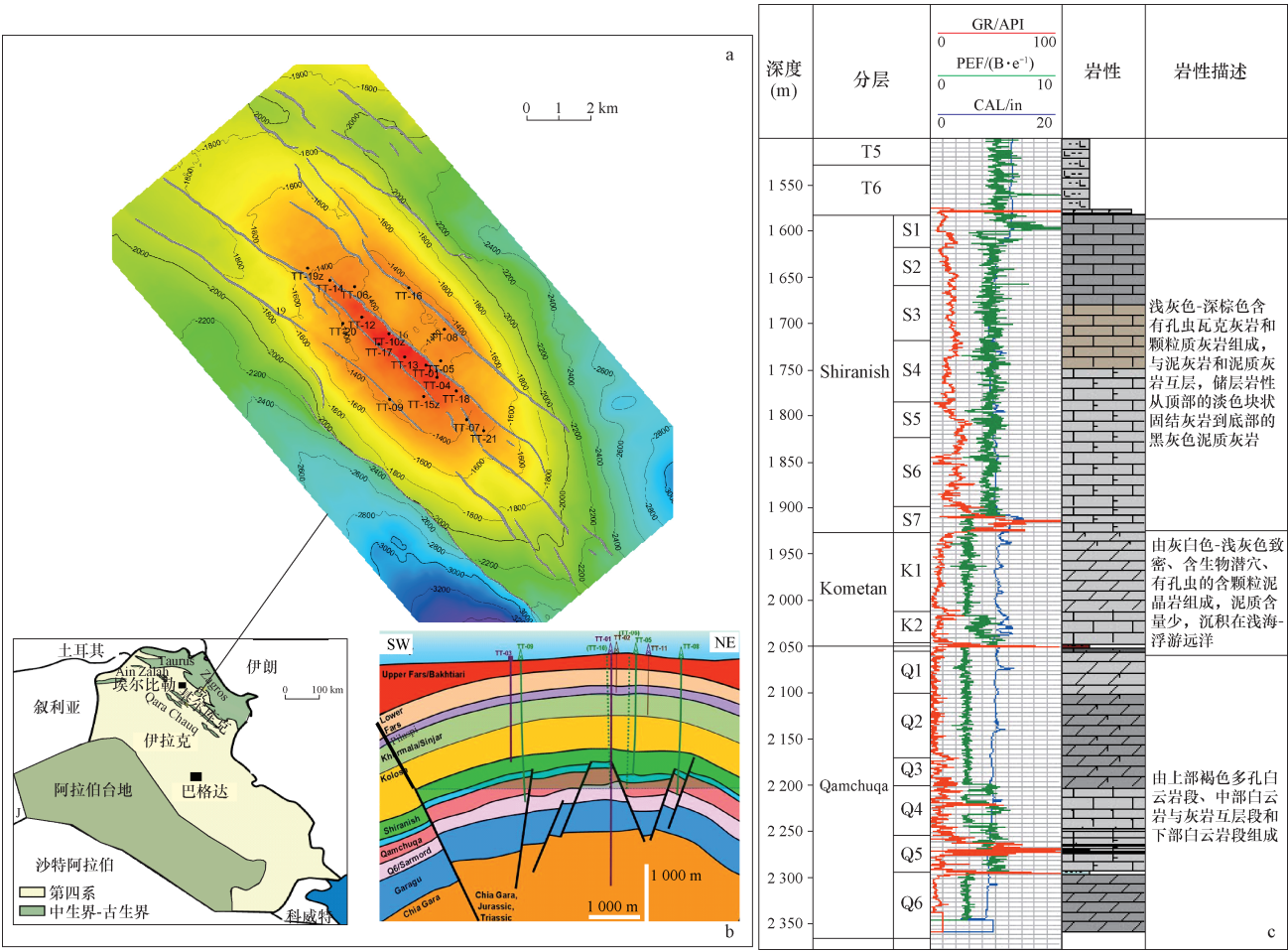


图 1 A 油田构造位置 a)、油藏结构 b)^[9] 及地层综合柱状图 c)
Fig. 1 Study area a), geological cross-section b) and stratigraphic histogram c) of oilfield A

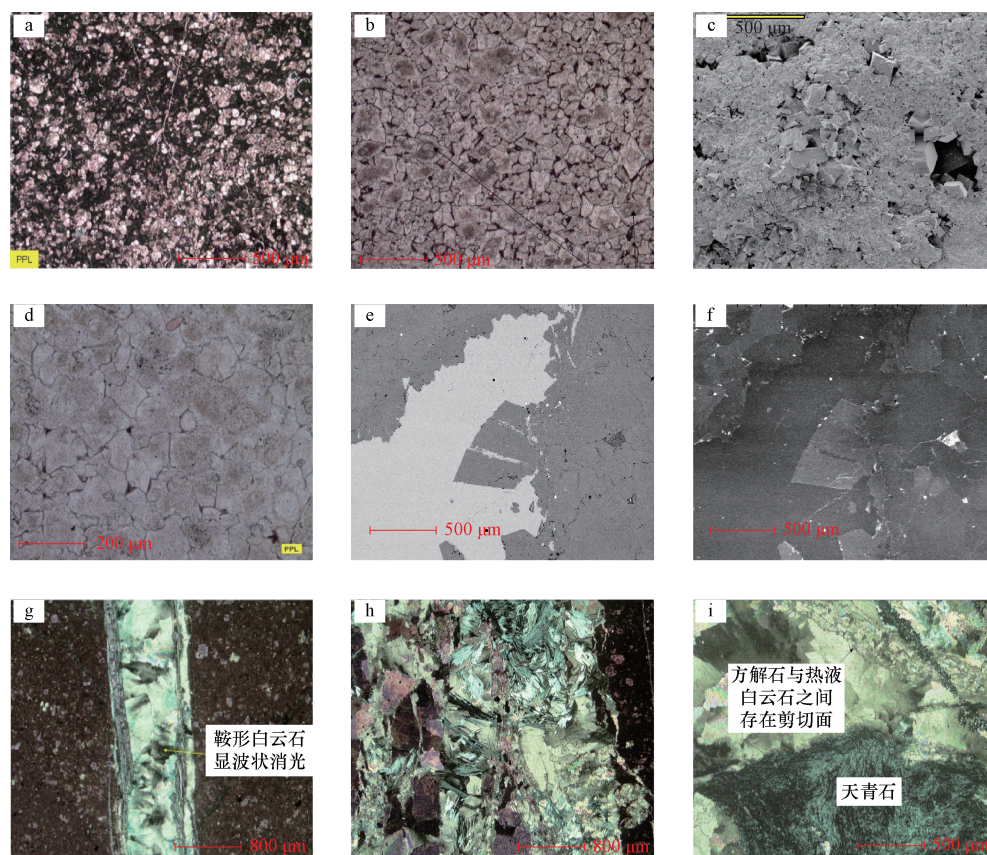


图2 A油田岩石微观特征镜下图版

Fig. 2 Microscopic photos showing the characteristics of petrology in oilfield A

a. TT-06井, K1, 灰岩, 浮游有孔虫; b. TT-05井, K1, 粗晶(100~300 μm)白云岩, 浮游有孔虫幻影; c. TT-06井, Q1 细粉晶白云岩, 扫描电镜; d. TT-05井, K1, 嵌晶状白云岩, 浮游有孔虫幻影; e. TT-08井, 背散射电子成像, 浅灰色为嵌晶硬石膏充填于中间裂缝孔隙中, 深灰色为马鞍状白云石晶体; f. 与e同视野, 阴极发光, 白云石和硬石膏都不发光; g. TT-04井, 岩心, S4, 裂缝充填(方解石, 鞍形白云石)与未充填裂缝, 鞍形白云石显波状消光; h. TT-04井, 埋深1787.4 m, 边缘被部分充填的垂直裂缝; i. 天青石晶体形成粘结状、放射状团块, 显示为较低干涉色

2 热液白云岩存在的证据及分布模式

2.1 岩性分布差异

在A油田, Kometan组是一套灰白色-浅灰色致密、含生物潜穴与有孔虫的含颗粒泥晶灰岩, 发育成层的缝合线, 泥质含量少, 生物扰动作用以模糊的亚平行到平行潜穴为主, 常见丛藻迹和动藻迹, 属中陆棚至外陆棚沉积。该组区域上分布广, 厚度相对稳定^[9]。有两口位于地堑内的钻井(TT-05与TT-08)在Kometan组和S7段下部钻遇白云岩, 且大套地层被白云岩化。从光电吸收截面指数(PEF)曲线上看, K1到S7中下部的PEF平均值值为2.89, 说明该段被白云岩化作用改造了。理论上方解石的PEF值为5.05, 白云石的PEF值为3.14^[10], 因此利用PEF值识别灰岩和白云岩比较准确。相邻两口井(TT-06与TT-05)的测井曲线特征相似, 但岩性差异大。TT-06井Kometan组为灰岩, 含浮游有孔虫(图2a); 而TT-05井Kometan组被整段白云岩化, 无选择性, 晶粒较粗(100~200 μm), 含有浮游

有孔虫幻影(图2b)。距TT-05井最近(相距580 m)的TT-04井位于地垒上, 但靠近断层, Kometan组主要是灰岩, 从Pef曲线上可判断该组部分层段为白云岩。

2.2 岩石学证据

一般准同生白云岩为粉晶-细晶白云岩, 如TT-06井Q1细晶-粉晶白云岩, 晶体大小为2~10 μm, 而经过热液改造的白云岩晶体较粗, 可达100~300 μm(图2c, d)。从背散射电子成像(图2e)可以看出, 浅灰色为嵌晶硬石膏充填于中间裂缝孔隙中, 深灰色为马鞍状白云石晶体, 阴极发光图片上白云石和硬石膏都不发光(图2f)。中-粗晶鞍形白云石被视为热液白云岩的标型矿物之一^[11-15]。

条带状构造与角砾状构造是热液白云岩的典型构造^[16-17], 图3显示早期高角度裂缝复杂充填和多次扩大的证据, 也直观展示了热液矿物的共生次序。首先是具有一定渗透性的基质发生白云岩化作用, 即石灰岩溶解伴随基质白云岩化形成印模或残存原灰岩组构幻影, 在含石膏层也可能形成溶解垮塌角砾岩; 进而发生角砾岩化作用, 主要在断层附近, 呈棱角状, 是由水

力破裂作用造成的;最后是鞍形白云石胶结,在溶蚀的孔洞和扩大裂缝中沉淀晶粒较粗的鞍形白云石和硬石膏。该层位热液白云岩的共生次序与多数热液白云岩实例是一致的。发育基质交代型和孔-缝充填型的鞍形白云石为标型特征,在岩心及薄片上可以观察到共生次序:石灰岩主岩—基质白云岩化和交代鞍形白云石—孔(裂)隙充填鞍形白云石—硬石膏。在 TT-04 井 S4 段张性裂缝中充填鞍形白云石+天青石组合(图 2g—i),天青石晶体形成粘结状、放射状团块,显示为较低干涉色。

2.3 流体包裹体证据

裂缝中充填鞍形白云石的流体包裹体均一温度分

布在 85 ~ 105 °C,代表了鞍形白云石形成时的温度。K. Thamer在 2014 年利用 petrolMod 软件模拟该区 TT-01 井温度和镜质体反射率(R_o)随深度变化曲线,结果显示 Kometan 和 Shiranish 组经历的最高温度为 60 °C, R_o 约为 0.5%^[18]。显然形成白云岩的流体温度高于宿主灰岩周围的温度,这是白云岩热液成因的证据之一。按照最终熔化温度计算的流体包裹体的含盐度是现代海水的 3 ~ 7 倍(图 4),这是鞍形白云石的另一特征。

2.4 热液白云岩的定位时间

如何解释热液定位过程、流体来源、构造背景以及储集体演化等特征是确定热液进入碳酸盐岩主体时

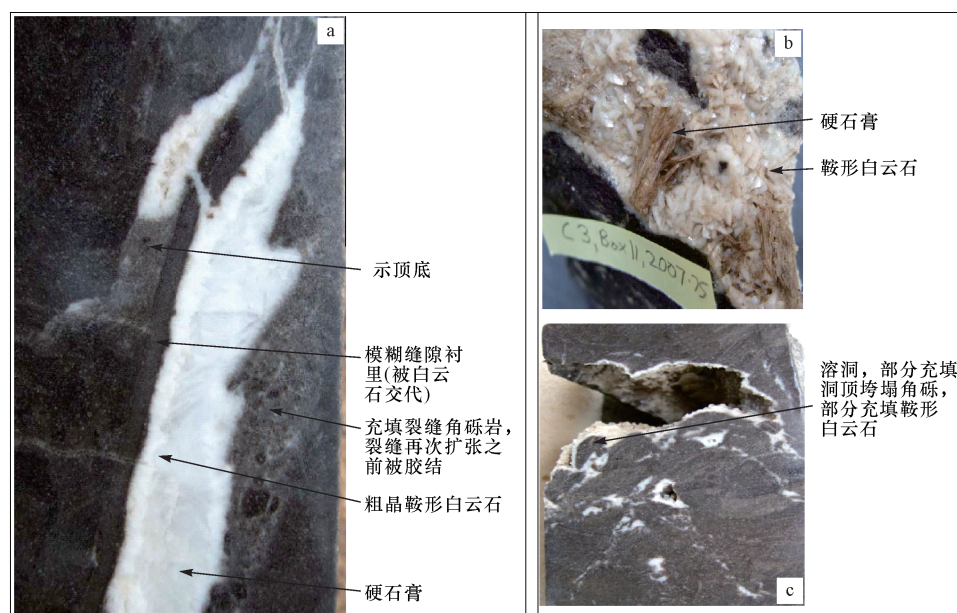


图3 A油田早期高角度裂缝复杂充填和多次扩大显示热液矿物的共生次序

Fig. 3 Complex cementation and multiple opening in early-formed high-angle fractures showing paragenesis of hydrothermal minerals in oilfield A

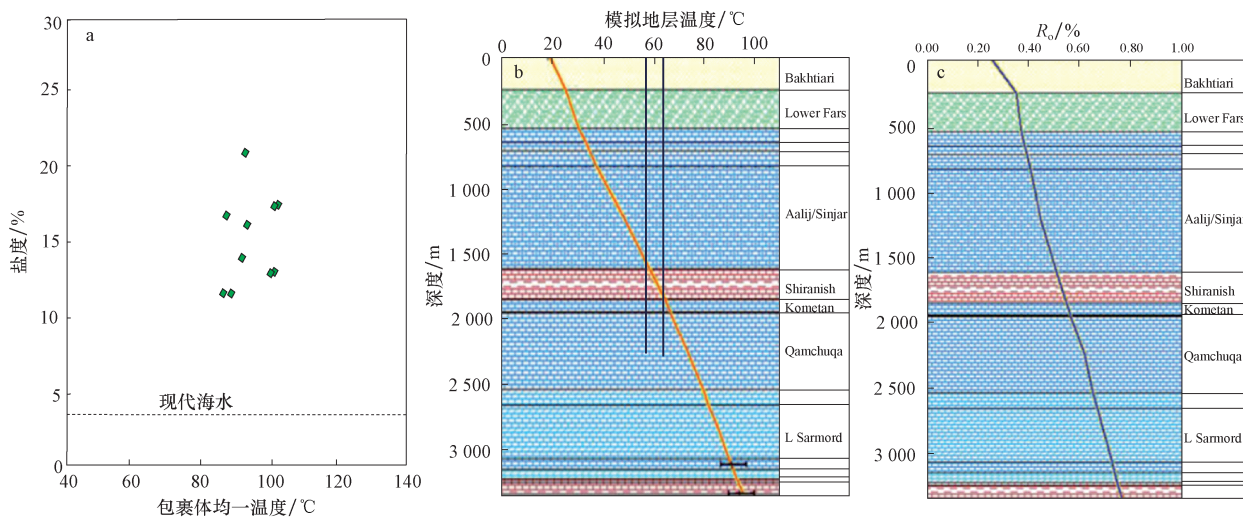


图4 A油田 TT-05 井裂缝充填鞍形白云石热液成因证据

Fig. 4 Hydrothermal genetic evidences for fracture-filling saddle dolomite in Well TT-05 in oilfield A

a. 鞍形白云石包裹体均一温度与盐度关系;b. 模拟地层温度与深度关系;c. 镜质体反射率(R_o)与深度关系

间的关键。目前多数研究者利用埋藏史与热史曲线,结合闪锌矿、方解石、萤石放射性测年法,以及磷灰石裂变径迹的方法得出所发生的白云岩化作用的时间和埋深^[1,13,19]。

本文通过利用3D地震解释结果推测断层活动时期来确定热液流动的大致时间范围。研究区TT-05井Shiranish组比TT-04井Shiranish组厚108 m,垒-堑结构,发育生长断层(图5)。从Q6—S1等时图上看,存在沉积厚度的差异和垒堑结构(图5a);在K1—S4等时图上看,相同区域存在与Q6—S1等时图相似的特征(图5b);Q1—K1等时图显示较大范围的厚度差异,说明该沉积段主要受古高地影响(图5c)。钻井解释该区S1—S4以及K1—Q1段的厚度相对稳定,依此推断生长断层活动时期应该在K1沉积后,S1沉积之前。从位于地垒的钻井(TT-04井)与位于地堑钻井(TT-05井)计算出的生长指数图上(图5d),可以准确推测生长断层的活动时期主要集中在S6—S7沉积期。

且在S7段发现无磨损、非成岩成因的斜长石晶体,解释为晶屑凝灰岩,揭示该沉积期周边存在火山活动。白垩纪中晚期,伊拉克东北部是伸展构造环境,发育被动陆缘碳酸盐岩沉积环境,与区域构造环境一致。

2.5 热液流动的优先位置及发育模式

在研究区北东—南西向地震剖面上,发现热液白云岩的上部灰岩层出现凹陷(图6)。根据前文分析,凹陷成因主要与生长断层活动有关,由于断层拉张作用导致断块塌陷和角砾岩化,在岩层顶部出现线状凹陷^[1,19-20]。目前钻井揭示Komatan组白云岩主要分布在生长断层的上盘,即垒-堑结构的地堑内及断层附近。Warren J与陈代钊指出热液白云岩化作用主要发生在断裂系统的上盘,并沿孔渗性相对较好的原岩侧向推进。输导热液流动的断裂体系通常为张性或扭张性断裂,对应生长断层发育期^[3,21]。因此可以推断该区热液白云岩主要发育在地堑内。

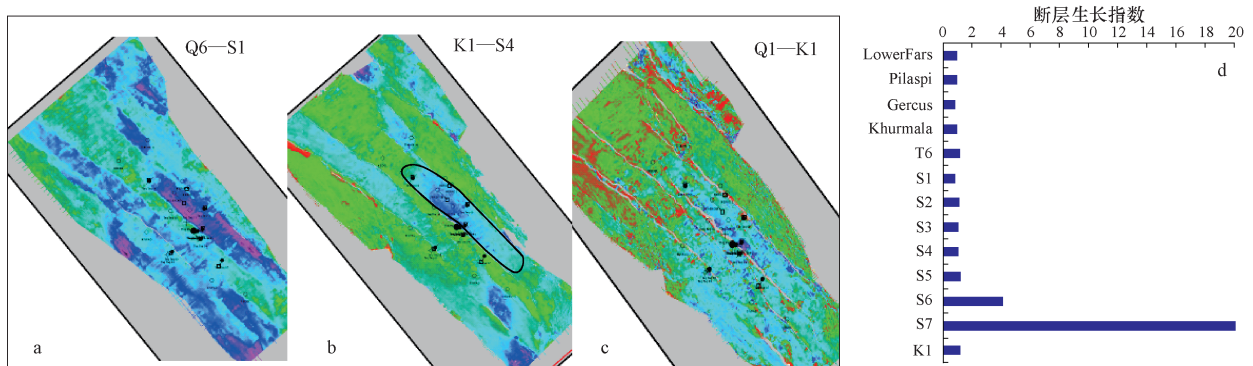


图5 A油田Shiranish组、Komatan组以及Qamchuqa组各段构造特征及断层生长指数

Fig. 5 Tectonic features and fault growth index of the Shiranish, Komatan and Qamchuqa Formations in oilfield A

a. Shiranish 构造特征; b. Komatan 构造特征; c. Qamchuqa 构造特征; d. 断层生长指数

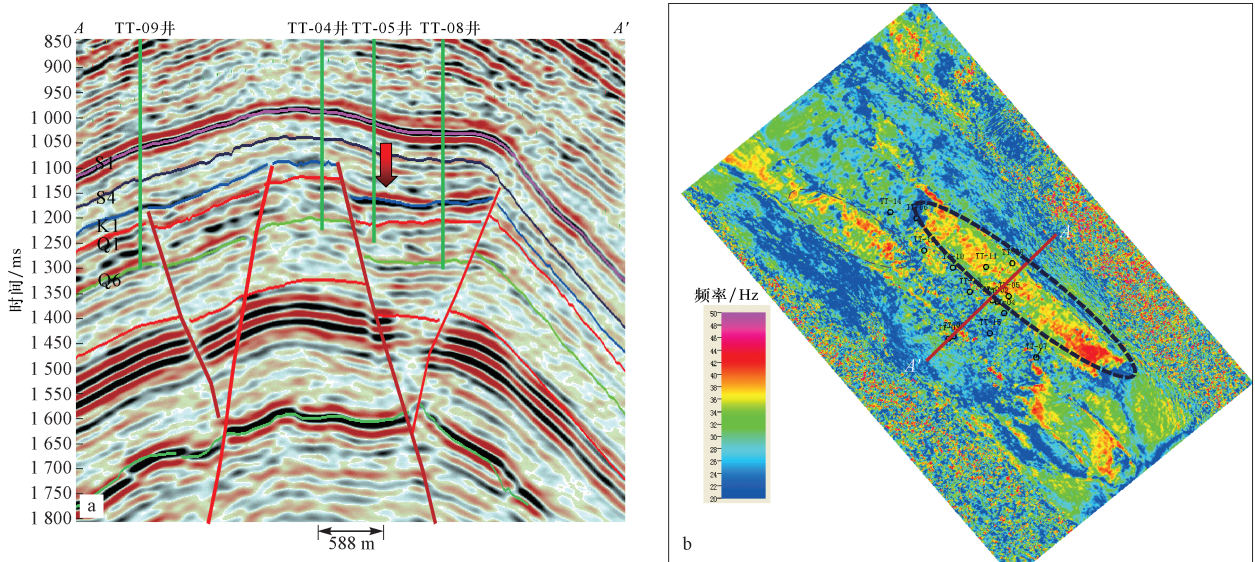


图6 A油田凹陷热液白云岩及Komatan组顶面瞬时频率切片

Fig. 6 Seismic section of hydrothermal dolomite samples and instantaneous frequency slides of top Komatan Formation in the sag of oilfield A

Graham R. Davies 统计了世界上大量热液白云岩实例,约80%热液白云岩作用发生在早期、浅埋藏阶段,基质白云石与鞍形白云石基本上是同时期的产物。白云岩化作用的形成机理为:热液上升导致裂隙带内流体压力聚集,大于围岩孔隙流体压力,通过水力破裂作用导致断层扩展,而且断层带内的热液流体垂直上升,加之早期浅埋藏阶段 Kometan 组地层压实作用不强,岩石具有一定孔渗性,上升的大部分热液在顶部受阻情况下在因生长断层形成的凹陷中渗透、聚集和循环,与具有渗透性的灰岩发生白云岩化作用,因此在断层上盘(凹陷区)的白云岩化更为广泛。热液改造白云石也具有成层性,同时热液沿断裂带向上,在地垒上的 kometan 组部分层段(图5中 TT-04 井)及上部 S4 段的早期张性裂隙中仍观察到受到热液改造的鞍形白云石充填物(图2g)。因此可以通过凹陷分布范围的预测来估计热液白云岩发育的范围,主要利用 S4-K1 的等时图或等厚图预测热液白云岩的发育范围,即厚度增大的区域代表生长断层断距较大,也就是热液活动强烈的区域(图5b)。

同时也可以采用对岩性较为敏感的地震属性来确定,如用 Kometan 顶部瞬时频率时间切片来圈定热液白云岩发育范围(图6b),瞬时频率属性能够反映组成地层的岩性变化。Kometan 组在本区主要为灰岩,局部发育的热液白云岩在以灰岩为背景的瞬时频率图上显示为异常区。在研究区地垒东侧的地堑内已有两口井验证热液白云岩发育,利用等厚图和瞬时频率预测在地垒西侧也存在一个地堑且断距较大的区域发育热液白云岩(图6b),本区新钻井(TT-20)已验证 Kometan 组为白云岩,而在同一地堑的 TT-15 井的 Kometan 组则为灰岩。

3 热液改造对储集体的意义

对本区而言,热液白云岩化作用对储集体改造主要体现在两个方面,一是基质孔隙度是否提高,二是岩性的变化(从灰岩变为白云岩)将导致裂缝发育密度的改变。

3.1 对基质孔隙的改造

Weyl 提出白云岩化作用可以提高孔隙度,理论上,文石和方解石的摩尔体积比白云石大8%和13%,白云岩化作用可以使孔隙度提高,但有两个前提,一是没有外来成分造成白云石的沉淀,二是没有发生随后的压实作用^[22-23],这在地质时期是很少发生的。

测井解释 TT-04 井 Kometan 组部分层段基质孔隙度较高,且与 PEF 曲线有较好的对应关系。PEF 值

低的层段,基质孔隙度高,即部分被热液白云岩化作用改造的层段基质孔隙度增大,该井位于地垒且紧靠主断层。考虑到该段裂缝发育,声波曲线的波动和增幅会造成孔隙度计算偏大^[24-25],但基质孔隙度依然很高,测井解释孔隙度均值为10%。而该井未被热液改造的灰岩的孔隙度为2%。TT-06 井 Kometan 组,由于该井未受热液改造,整体为灰岩地层,深浅双侧向电阻率曲线显示为正异常,表明该组裂缝发育,但测井解释和岩心测试均表明该段孔隙度较低(孔隙度平均值为2%~3%),基质致密。TT-05 井和 TT-08 井的 S7-K1 完全被白云岩化作用改造,部分层段的孔隙度增大(图7)。TT-05 井的 Kometan 组基质孔隙发育段厚度较薄,且层数较少;TT-08 井 K1-S7 下段也全部被白云岩化,但基质孔隙度发育段相对于 TT-05 井较多,原因是 TT-05 井的 Kometan 组更靠近主生长断层,位于地堑内,热液流动活跃,被热液白云岩化作用改造强烈,基质被过度白云岩化。图2d显示白云石晶体较粗,呈嵌晶状分布,孔隙多被充填。这些现象说明热液白云岩化作用既可能改善也可能降低储层的质量,取决于主岩的性质、流体成分和相对于构造的位置。上行流体的流动速度、断层间距等因素影响热液白云岩化的程度^[26],在该区体现的较为明显。

3.2 对裂缝密度的影响

区域上 Shiranish 组(S1-S7)含泥灰岩,Kometan 组(K1-K2)是泥质含量较低的含浮游有孔虫的纯灰岩。因此,局部 Kometan 组和 S7 是白云岩的层段均被热液白云岩化作用改造,岩心统计表明白云岩层裂缝发育频率是灰岩的4~6倍(图8)。经过热液白云岩化作用改造区域的裂缝密度高于同层灰岩的裂缝密度,图7显示 TT-06 井的 Kometan 组石灰岩的裂缝密度明显低于 TT-08 井 Kometan 组热液改造白云岩的裂缝发育密度。因此储层白云岩化作用之后由于构造变形产生的张开缝的发育程度是提高油藏产量和采收率的关键因素^[1,27],同时对裂缝建模参数选取及储量计算具有指导意义。

4 结论

1) 通过区域地质背景认识、岩石学特征、热液矿物组合、地震、测井资料解释及与国外相关实例对比,可以甄别和预测热液白云岩作用形成时间及发育范围。

2) 热液白云岩化作用由两个主要事件组成,初始交代作用和次生充填作用。斑马状、角砾状结构较为常见,这些特征表现为毫米级交代白云石层、充填层的

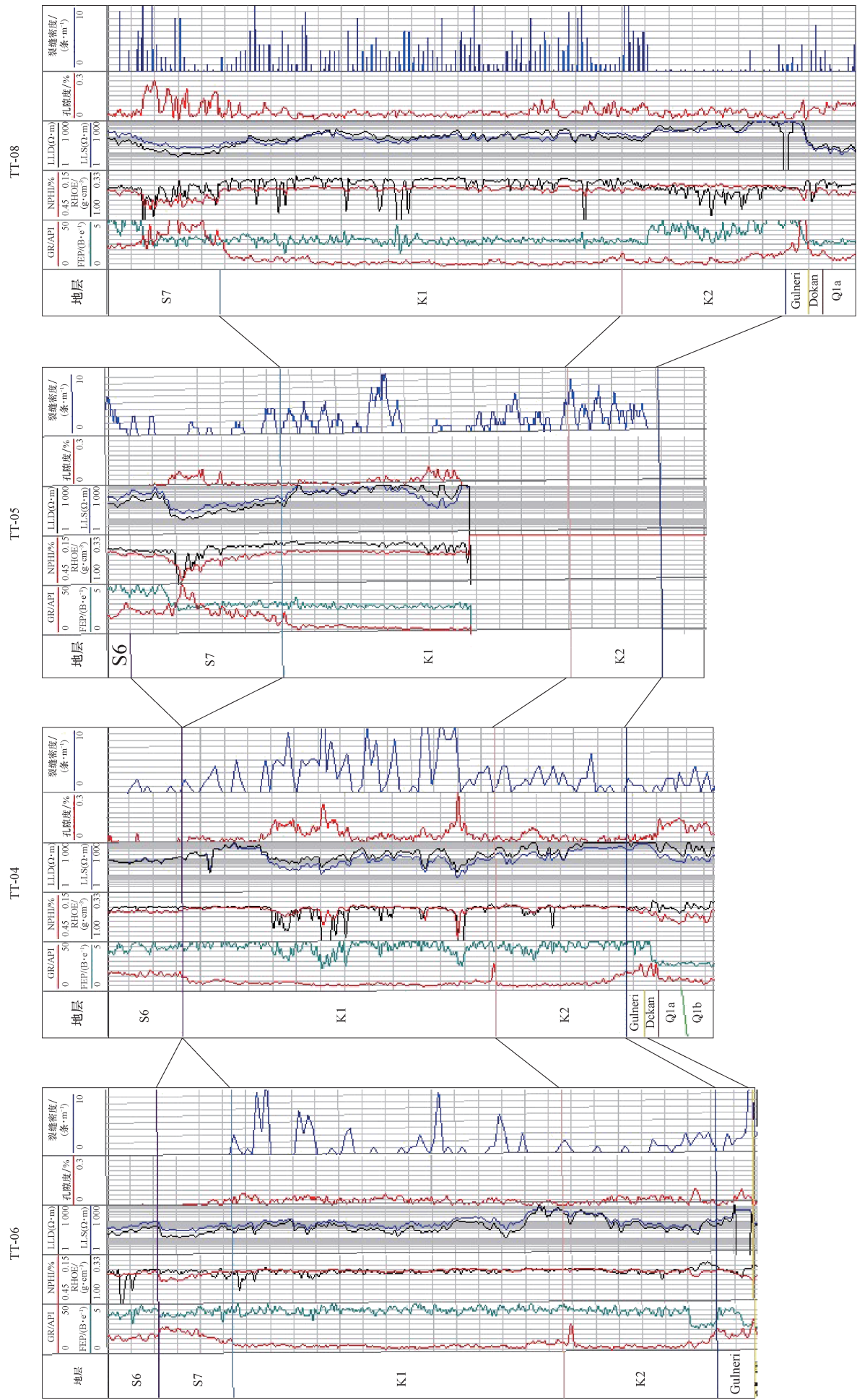


图7 Kometan组裂缝密度和孔隙度横向变化
Fig.7 Cross well section showing the lateral variation of fracture intensity and porosity

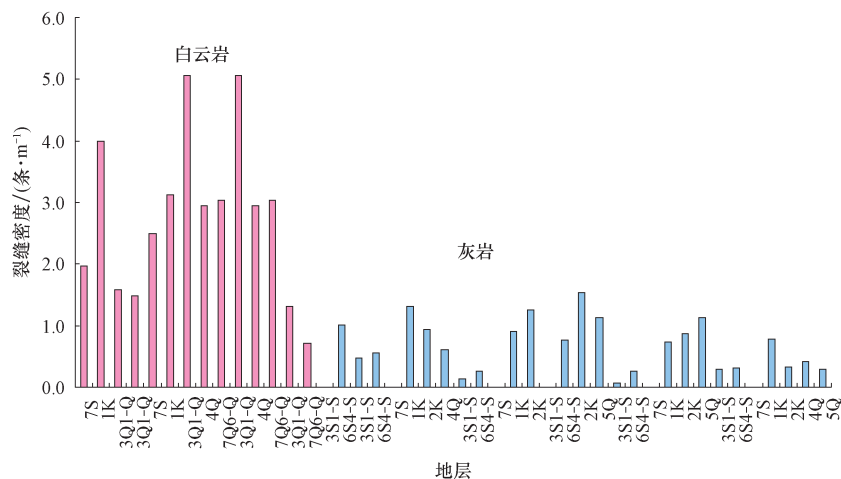


图8 白云岩和灰岩段裂缝密度分布特征

Fig. 8 Histogram showing the difference between the fracture density of limestone and dolomite

重复叠置、局部孔洞发育及后期方解石充填。大量粗晶、晶面弯曲、鞍形白云石是标型矿物。

3) 热液改造事件多发生在构造拉张期,正断层发育,如被改造层段处于在早成岩、浅埋藏期,热液改造白云岩体具有成层性,同时也沿断裂带分布;如果热液活动发生在成岩晚期,热液白云岩多呈不规则状沿断裂带分布。

4) 热液白云岩化作用既可改善也可降低储层的质量,取决于主岩的性质、流体成分和相对构造位置,上行流体的流动速度、断层间距等因素影响热液白云岩化的程度。适度热液改造可提高基质储层的孔渗性,过度白云岩化作用则破坏储集体。

致谢:本文资料来源于中国石化国际石油勘探开发有限公司,感谢李卫忠和 Chris Garland 给予的指导和帮助!

参考文献

- [1] Davies G R, Smith B S Jr. structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90 (11): 1641 - 1690.
- [2] Lavoie D, Chi G, Urbatsch M, et al. Massive dolomitization of a pinnacle reef in the Lower Devonian West Point Formation (Gaspé Peninsula, Quebec): An extreme case of hydrothermal dolomitization through fault-focused circulation of magmatic fluids [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94 (4): 513 - 531.
- [3] 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.
- [4] 吕修祥, 杨宁, 解启来, 等. 塔中地区深部流体对碳酸盐岩储层的改造作用 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26 (3): 284 - 289, 296.
Lv Xiuxiang, Yang Ning, Xie Qilai, et al. Carbonate reservoirs transformed by deep fluid in Tazhong area [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26 (3): 284 - 289, 296.
- [5] 陈轩, 赵文智, 张利萍, 等. 川中地区中二叠统构造热液白云岩的发现及其勘探意义 [J]. 石油学报, 2012, 33 (4): 562 - 569.
Chen Xuan, Zhao Wenzhi, Zhang Liping, et al. Discovery and exploration significance of structure-controlled hydrothermal dolomites in the middle Permian of the central Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33 (4): 562 - 569.
- [6] 宋光永, 刘树根, 黄文明, 等. 川东南丁山-林滩场构造灯影组热液白云岩特征 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2009, 36 (6): 706 - 715.
Song Guangyong, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Characteristics of hydrothermal dolomite of Upper Sinian Dengying Formation in the Dingshan-Lintanchang structural zone, Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36 (6): 706 - 715.
- [7] 刘树根, 黄文明, 陈翠华, 等. 四川盆地震旦系-古生界热液作用及其成藏成矿效应初探 [J]. 矿物岩石, 2008, 28 (3): 41 - 50.
Liu Shugen, Huang Wenming, Chen Cuihua, et al. Primary study on hydrothermal fluids activities and their effectiveness on petroleum and mineral accumulation of sinian system-palaeozoic in Sichuan Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28 (3): 41 - 50.
- [8] 焦存礼, 何治亮, 邢秀娟, 等. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义 [J]. 岩石学报, 2011, 27 (1): 277 - 284.
Jiao Cunli, He Zhiliang, Xing Xiujuan, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (1): 277 - 284.
- [9] Garland C R, Abalioglu I, Akca L. Appraisal and development of the Taq Taq field, Kurdistan region, Iraq [J]. Petroleum Geology Conference series, 2010, 7: 801 - 810.
- [10] 赵良孝, 补勇. 碳酸盐岩储层测井评价技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
Zhao Liangxiao, Bu Yong. Logging evaluation technology of carbonate reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [11] 赵闯, 于炳松, 张聪, 等. 塔中地区与热液有关白云岩的形成机理探讨 [J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31 (2): 164 - 172.
Zhao Chuang, Yu Bingsong, Zhang Cong, et al. A discussion on the formation mechanism of dolomite associated with hydrothermal solution in Tazhong area [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2012, 31 (2): 164 - 172.

- [12] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1/3): 1–81.
- [13] Lonnee J, Machel H G. Pervasive dolomitization with subsequent hydrothermal alteration in the Clarke Lake gas field, Middle Devonian Slave Point Formation, British Columbia, Canada[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1739–1761.
- [14] Qing, H. R., and E. W. Mountjoy, Formation of coarsely crystalline, hydrothermal dolomite reservoirs in the Presqu'île barrier, Western Canada sedimentary basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1994, v. 78, p. 55–77.
- [15] Hans-G H. Machel, saddle dolomite as a by-product of chemical compaction and thermochemical sulfate reduction[J]. *Geology*, 1987, 15(10): 936–940.
- [16] David A. Barnes¹, Thomas M. Parris², and G. Michael Grammer. Hydrothermal Dolomitization of Fluid Reservoirs in the Michigan Basin, USA 2008, oral presentation at AAPG Annual Convention, San Antonio, Texas, April 20–23.
- [17] I. Al-Aasma, J. Lonnee, J. Clarck, Multiple fluid flow events and the formation of saddle dolomite: Examples from Middle Devonian carbonates of the Western Canada Sedimentary Basin[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69, 11–15.
- [18] Thamer K. Al-Ameri & Ahmed A. Hydrocarbon potential of the Sargelu Formation, North Iraq[J]. *Arab J Geosci* (2014) 7: 987–1000.
- [19] Luczaj J A, Harrison I W, Williams N S. Fractured hydrothermal dolomite reservoirs in the Devonian Dundee Formation of the central Michigan Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1787–1801.
- [20] DAVIES G R. Hydrothermal (thermobaric) dolomite and leached limestone reservoirs: general principles genetic connections, and economic significance in Canada[C]. *Annual Meeting Expanded Abstracts*. AAPG Bulletin, 2004: 32.
- [21] Smith J. Origin and reservoir characteristics of Upper Ordovician Trenton-Black River hydrothermal dolomite reservoirs in New York[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1691–1718.
- [22] Weyl, P. K. , Porosity through dolomitization: Conservation of mass requirements[J]. *Sediment. Petrol.* 1960, 30, 85–90.
- [23] Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics. AAPG Bulletin. 1995. 79: 186–204. [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186–204.
- [24] 李国平, 王青, 赵新民. 复杂储集空间储层测井解释方法研究[J]. *油气地质与采收率*, 2003, 10(2): 6–8.
- Li Guoping, Wang Qing, Zhao Xinmin. Study on logging interpretation method for complex accumulated space reservoir[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10(2): 6–8.
- [25] 范晓敏, 李舟波. 裂缝性碳酸盐岩储层声波时差曲线的波动和增幅分析[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(1): 168–173.
- Fan Xiaomin, Li Zhoubo. Analysis of fluctuation and amplitude increase in sonic Logs caused by fractures in carbonate rocks[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(1): 168–173.
- [26] 舒晓辉, 张军涛, 李国蓉, 等. 四川盆地北部栖霞组–茅口组热液白云岩特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 442–448, 458.
- Shu Xiaohui, Zhang Juntao, Li Guorong, et al. Characteristics and Genesis of hydrothermal dolomites of Qixia and Maokou Formations in northern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 442–448, 458.
- [27] 郑剑锋, 沈安江, 潘文庆, 等. 塔里木盆地古生界热液白云岩储层的主控因素及识别特征[J]. *海相油气地质*, 2011, 16(4): 47–56.
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Pan Wenqing, et al. Key controlling factors and identification characteristics of lower paleozoic hydrothermal dolostone reservoirs in tarim basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011, 16(4): 47–56.
- [28] 蒋小琼, 管宏林, 郑和荣, 等. 四川盆地普光气田飞仙关组白云岩储层成因探讨[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 332–336.
- Jiang Xiaoqiong, Guan Honglin, Zheng Herong, et al. Discussion on origin of dolomite reservoirs in Feixianguan Formation, Puguang Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 332–336.
- [29] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地中二叠统中–粗晶白云岩成因[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(4): 503–510.
- Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Genesis of medium-macro-crystalline dolomite in the Middle Permian of Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 503–510.
- [30] 郑兴平, 刘永福, 张杰, 等. 塔里木盆地塔中隆起北坡鹰山组白云岩储层特征与成因[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(2): 157–161.
- Zheng Xingping, Liu Yongfu, Zhang Jie, et al. Characteristics and origin of dolomite reservoirs in Lower Ordovician Yingshan Formation, northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(2): 157–161.
- [31] 黄擎宇, 张哨楠, 叶宁, 等. 玉北地区下奥陶统白云岩岩石学、地球化学特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 391–400.
- Huang Qingyu, Zhang Shaonan, Ye Ning, et al. Petrologic, geochemical characteristics and origin of the Lower Ordovician dolomite in Yubei area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(3): 391–400.

(编辑 董立)