

塔里木盆地下古生界热液白云岩储层的主控因素及识别特征

郑剑锋¹, 沈安江^{1,2}, 潘文庆³, 郑兴平^{1,2}, 刘永福³

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室)

(3 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院)

摘要 塔里木盆地下古生界中热液活动多,相应地也发育较多的热液白云岩储层。认为该类储层的规模具有局限性,更多的是对前期已经形成的储层进行叠加改造,但由于盆地内热液影响的范围大,对储层的改造作用也相当可观。对大量的岩心、薄片及露头研究表明,具有一定孔渗性的石灰岩和白云岩地层为热液白云岩储层的发育提供了物质基础,高角度深大断裂为热液提供了运移通道,而热液溶蚀作用和热液白云石化作用是热液白云岩储层的主控因素。该类储层不仅在岩石学、地球化学特征上与其它类型的白云岩储层有很大差别,其测井及地震响应特征也具有特殊的识别标志。

关键词 塔里木盆地;下古生界;热液作用;白云岩储层;储集层特征;控制因素

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

塔里木盆地下古生界寒武系—奥陶系中广泛分布白云岩。近十年来,虽然许多专家学者对白云岩成因机理及发育模式进行了大量的研究^[1-7],但对白云岩储层形成的主控因素的研究则相对较少,尤其是热液白云岩储层的主控因素及识别方法的研究更是很少见诸报道。有鉴于此,本文根据热液白云岩的定义建立了塔里木盆地的热液白云石化模式,通过大量的岩心、薄片及地球化学资料分析了储层的成岩作用序列和孔隙演化过程,并总结了热液白云岩储层发育的主控因素。此外,还探讨了热液白云岩储层在岩石学、地球化学、测井响应及地震响应上的识别方法,为该类储层的预测提供了依据。

1 热液白云石化模式

自上世纪80年代国外提出“构造控制的热液白云石化作用模式”(Structurally Controlled Hydrothermal Dolomitization, 简称为HTD)以来,至今已经形成了一套较为完整的体系。“构造控制的热液白云石化作用”,其广义定义是:富镁热液(特别是卤水)在温度和压力升高的埋藏条件下沿着拉张断层或走滑断层

或断裂系统向上运移,碰到渗透性差的隔挡层后侧向侵入到渗透性好的围岩中,从而发生白云石化作用^[8]。由此定义,可以总结出发生热液白云石化作用的三要素:(1)热液作用主要受深大断层控制,断层为超压热液流体提供了运移通道;(2)断裂系统及多孔的碳酸盐岩构成热液的输导体系;(3)致密的泥岩或者泥晶灰岩可作为隔挡层,阻止热液继续向上运移。

塔里木盆地在漫长的演化历史中不缺乏热液,盆地内主要发生过4期重要地质热事件,时间分别在震旦纪—寒武纪、早奥陶世、二叠纪和白垩纪^[9]。前两期由于发生时间较早,均未影响到整个奥陶系。白垩纪岩浆活动主要局限于塔里木盆地周边地区,影响范围较小。只有二叠纪火山活动在整个塔里木盆地广泛存在,对塔里木盆地影响较大。二叠纪岩浆作用以大规模基性火山喷发岩为主,还见有中酸性喷发岩,厚度一般有几十米到上百米不等,可见这一时期的岩浆作用规模较大,持续时间较长。岩浆作用过程中不但能直接分异出大量的热液流体,而且能将侵入岩体附近的地层流体加热改造为热液流体。

收稿日期:2011-05-31; 改回日期:2011-07-15

本研究受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号2008ZX05004-002)资助

郑剑峰:1977年生,硕士,工程师。主要从事碳酸盐岩储层方面的研究工作。通讯地址:310023 浙江省杭州市西溪路920号;电话:(0571)85223293

塔里木盆地多期构造运动产生了许多拉张的、走滑的断裂,其中很多断裂是沟通基底的,所以也具备了热液流体的运移通道。热液沿深大断裂及不整合面运移,可以影响下古生界多套碳酸盐岩地层——既可以作用于石灰岩地层,如ZG9井鹰山组(O_{1-2});也可以作用于白云岩地层,如塔北LS2井、塔中TZ75井丘里塔格组(ϵ_3-O_2)。石炭系、白垩系的致密泥岩及奥陶系的致密泥晶灰岩都是很好的热液隔挡层。根据热液白云石化作用的定义以及实际背景资料,可以建立塔里木盆地热液白云石化作用模式图(如图1)。

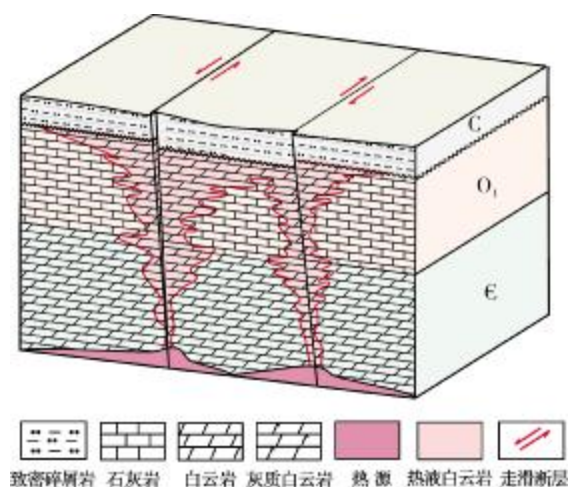


图1 塔里木盆地热液白云石化作用模式图

塔里木热液白云石化作用以出现鞍状白云石为主要特征,并且常伴生萤石、方铅矿、硬石膏、重晶石等热液矿物。对60口发育白云岩的井进行统计发现,寒武系—奥陶系中热液作用的证据几乎“无处不在”,塔北、塔中、巴楚—塔西南和塔东地区都有发育,如TZ75井见热液成因的石膏和萤石, YD2井见天青石和方铅矿, ML1井发育斑马纹状鞍状白云岩等。

2 热液白云岩储层的主控因素

热液白云岩储层,是指形成于深埋藏环境中与热液白云石化作用相关的白云岩储层^[10]。塔里木盆地热液白云岩储层的岩性可以是粗晶、中晶、细晶或不等晶白云岩,原岩以颗粒灰岩为主。其孔隙类型与埋藏白云岩储层的孔隙类型相似,主要为晶间孔和晶间溶孔。与埋藏白云石化作用相似,晶间孔是热液白云石交代方解石或白云石的重结晶作用形成的;晶间溶孔是热液对白云石晶体及其之间残留灰泥的非组构选择性溶蚀导致的晶间孔扩大。热液溶蚀作用与埋藏溶

蚀作用结果的最大区别在于:前者能在地层深部形成洞穴,但更多形成于石灰岩地层中(如鹰山组顶部地层中的热液矿坑),而白云岩地层中则相对较少。

根据储层的岩石特征、孔隙特征,可以恢复储层形成的主要成岩作用序列,从而分析出热液白云岩储层发育的主控因素,下面以塔中地区ZG9井下奥陶统鹰山组发育的热液白云岩储层为例。

塔中ZG9井鹰山组石灰岩背景地层中发育一套优质的白云岩储层(日产水234.96 m³,日产气1256 m³), I—II类有效储层的厚度为78.5 m,测井孔隙度为3.7%~16%。该井只在白云岩段才发育储层,孔隙类型为晶间孔和晶间溶孔,而未白云石化的石灰岩段无孔隙。根据6260.66~6268.21 m井段岩心、薄片可以看出,白云石化作用后保留了部分原岩结构,并且具有粗粒结构原岩发育中晶白云石、细粒结构发育细晶白云石的特征。恢复其经历的主要成岩作用序列有:压实压溶作用、构造裂缝作用、热液溶蚀作用、热液白云石化作用、油气充注(埋藏溶蚀)作用和方解石胶结作用(图2),其中热液溶蚀作用和热液白云石化作用是最主要的建设性成岩作用,为孔隙的最终形成奠定了基础,是热液白云岩储层发育的主控因素。

热液沿断层向上运移过程中为何只影响部分石灰岩井段呢?可以肯定的是,这些发生白云石化的石灰岩地层本身具有较好的物性,所以热液在向上运移过程中才能进入其中。从ZG203井相同层位粒间孔发育的颗粒灰岩来看,也证实了这一观点。此外,多孔地层之上是致密的颗粒泥晶灰岩,它能阻止热液流体向上大规模分流,从而使热液在多孔的石灰岩中充分发生化学作用,改造原有的储层形成更好的热液白云岩储层,并最终保存下来。

综合ZG9井热液白云岩储层的地质背景、主要经历的成岩作用、地震响应特征(图3a)及孔隙特征(图3b),可得出这套储层的发育条件为:(1)邻近高角度大断裂,为富镁热液的运移提供通道;(2)高孔渗的颗粒灰岩既能对热液起输导作用,也能成为热液的汇集区;(3)鹰山组顶部的致密颗粒泥晶灰岩可作为热液的隔挡层,阻止热液上窜,从而使热液在汇集区与岩石充分作用并发生溶蚀和白云石化。

热液作用于白云岩地层或作用于石灰岩地层所形成热液白云岩储层的机理是一样的,只不过前者是地层中的白云石发生重结晶作用,而后者是方解石发生交代作用。



图2 塔里木盆地中一下奥陶统鹰山组热液白云岩储层成岩作用及孔隙特征综合评价柱状图

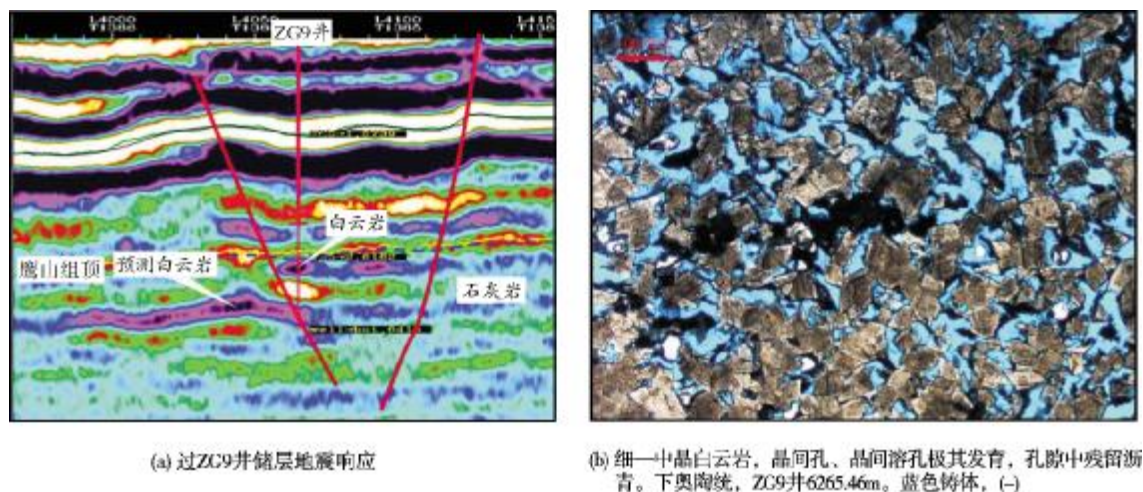


图3 塔里木盆地 ZG9 井热液白云岩储层地震响应特征及孔隙特征

热液白云岩除了作为交代作用的产物,还可以作为胶结作用的产物,如沿裂缝或溶孔、溶洞边缘胶结充填的产物——粗晶鞍状白云石。在塔北地区LS2井发育有出现鞍状白云石胶结物的热液白云岩储层(图4a),对比国外热液白云岩储层的岩心资料(图4b),可以分析出孔隙形成的演化序列:(1)热液溶蚀石灰岩(白云岩)形成孔洞;(2)白云石交代石灰岩或对早期形成的白云岩重结晶作用形成晶间孔;(3)鞍状白云石胶结(或热液矿物的沉淀)。

根据上述孔隙演化序列可以看出,鞍状白云石沿裂缝、孔洞胶结及热液矿物的沉淀是一种破坏孔隙的作用^[11],故热液作用是一把“双刃剑”,既对储层

起建设性作用,又对储层起破坏性作用。那么在塔里木盆地哪种作用对储层的影响更大呢?对TZ75井、LS2井、YD2井等发育鞍状白云石或沉淀热液矿物的白云岩储层段的247个岩心物性样品进行了统计,其中20个样品的孔隙度大于4.5%,28个样品的孔隙度在2.5%~4.5%之间,孔隙度大于2.5%的样品约占总样品数的19%,65个样品的的孔隙度在1.5%~2.5%之间,134个样品的孔隙度小于1.5%,对比埋藏白云岩储层的物性(孔隙度大于2.5%的样品约占总样品数的17%),热液白云岩储层物性比埋藏白云岩储层稍好,这说明了热液作用的建设性作用总体上要大于破坏性作用。

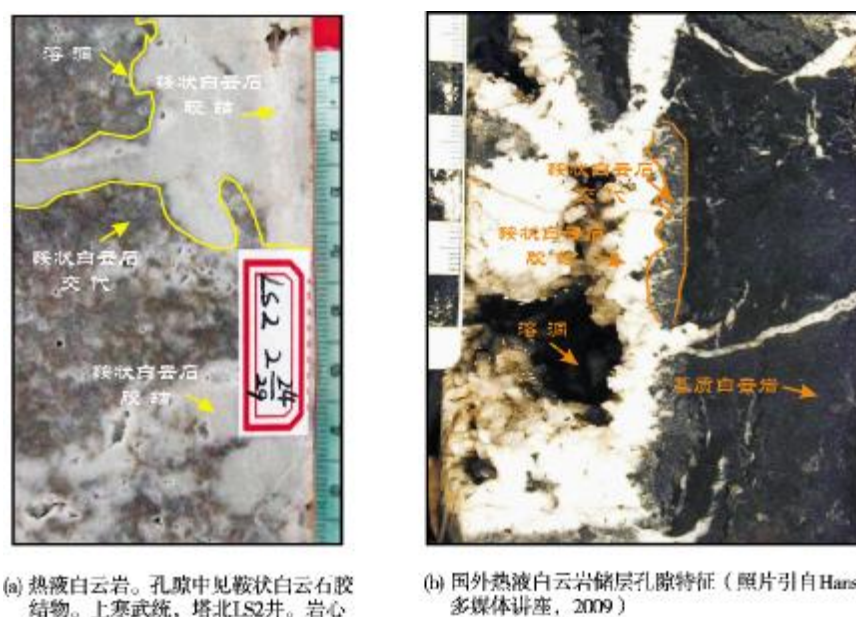


图4 塔里木盆地与国外热液白云岩储层孔隙特征对比

由于热液白云石化作用必须要有沿深大断裂向上运移的热液流体,故不大可能发育大规模的热液白云岩,所以通过热液作用形成的单一成因的储层是不多见的,更多见的是对前期已经形成的储层进行叠加改造。虽然热液不能独自形成大规模的热液白云岩储层,但是由于塔里木盆地热液影响的范围很大,所以热液对于储层改造作用是不可小视的。

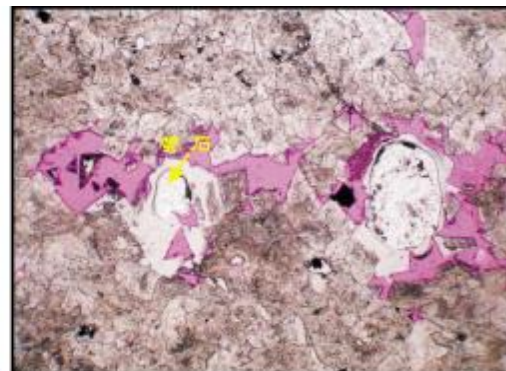
3 热液白云岩储层识别特征

3.1 岩石学特征

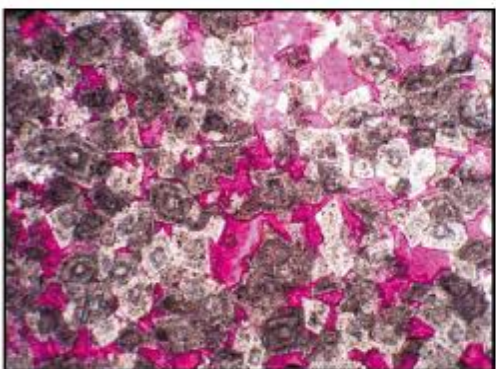
正因为热液白云岩的特殊性,其岩石特征相对其他成因的白云岩更容易识别,在宏观和微观上都有许多独特的识别标志,具体特征有:



(a) 白云岩裂缝中充填粗晶鞍状白云石,残留溶孔。中下奥陶统鹰山组, H4井4477.55 m。红色铸体, (-) × 40



(b) 中晶白云岩,溶孔中沉淀萤石。下奥陶统蓬莱坝组, S1井3875.72m。红色铸体, (-) × 40



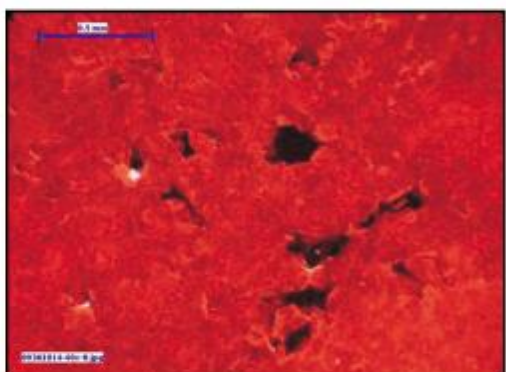
(c) 中晶白云岩。晶体具环带结构,晶间溶孔十分发育。下奥陶统蓬莱坝组, TZ4井3863.9m。红色铸体, (-) × 40



(d) 褐灰色中晶白云岩。网状裂缝极其发育,切割岩石呈角砾状,沿裂缝局部发育大溶孔。裂缝及孔隙边缘充填鞍状白云石及石膏,残留部分孔隙。上寒武统, TZ75井4810.3m。岩心



(e) 灰色细晶白云岩。发育高角度裂缝,破碎岩石呈角砾状,角砾间充填白色鞍状白云石,残留部分溶孔;岩心表面见油气侵染现象。上寒武统, TZ7井4097.80m。岩心



(f) 细晶白云岩。白云石发棕红—桔红色光。下奥陶统蓬莱坝组, TZ12井5298.85m。阴极发光

图5 塔里木盆地热液白云岩储层岩石特征

(1)白云石晶体以中晶—粗晶为主,岩石表面呈砂糖状(图 5a—5e);

(2)沿裂缝、孔洞边缘胶结白色半透明的并且在显微镜下具有镜面弯曲、波状消光特征的鞍状白云石(图 5a,5e);

(3)裂缝、孔洞中常充填萤石、重晶石、方铅矿、高温石膏等热液矿物(图 5b,5d)。

3.2 地球化学特征

地球化学特征显示塔里木盆地发育的这套白云岩储层与热液作用有关:

(1)Fe、Mn 元素含量高,阴极发光发明亮红色或橙色光(图 5f);

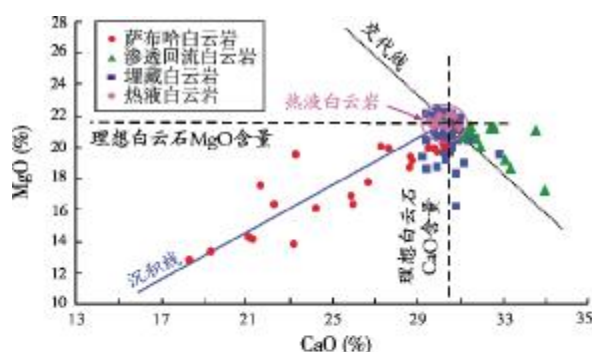
(2)MgO/CaO 摩尔比接近 1,有序度高(图 6a);

(3)稀土元素(REE)中 Eu 元素出现正异常(图 6b);

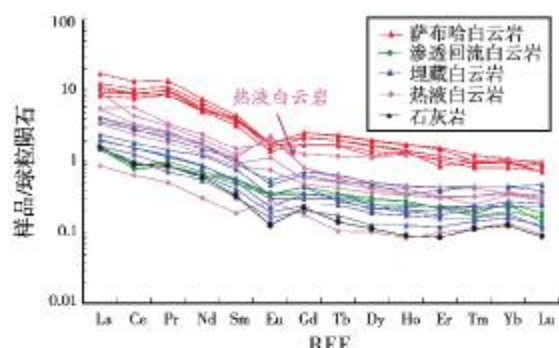
(4) $\delta^{18}\text{O}$ 值异常偏负,一般小于 -10‰ PDB(图 6c);

(5) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 总体在 0.7088~0.7098 之间,Mg/Ca 值在 1 附近(图 6d);

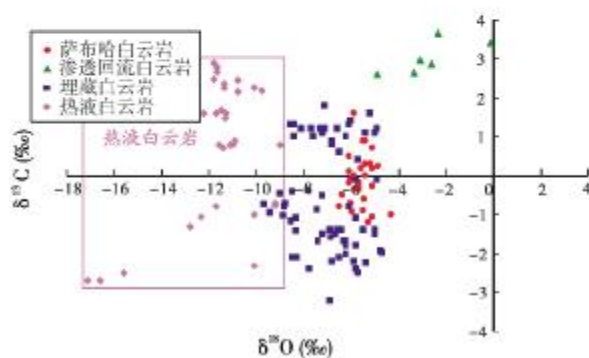
(6)出现高于埋藏成岩环境的异常高温包裹体,均一温度一般在 110~240℃之间。



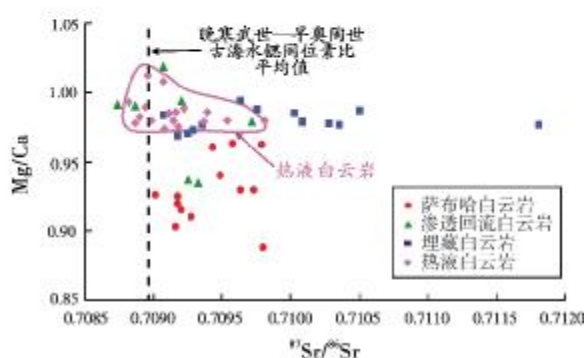
(a) MgO—CaO交汇图



(b) 稀土元素标准化配分曲线图



(c) Co稳定同位素交汇图



(d) Mg/Ca— $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 交汇图

图 6 塔里木盆地热液白云岩储层地球化学特征(部分数据引用自陈永权资料)

3.3 测井响应特征

3.3.1 利用 U、Th、K 测井识别具有热液矿物充填的热液白云岩储层

自然伽马(GR)能谱测井能分别测量 U、Th 和 K 元素,根据 U 不反映黏土含量而 Th 和 K 反映黏土含量的特性,可以分析 GR 测井值的升高是

由热液矿物沉淀引起的还是由泥质矿物引起的。当 U 值出现异常增高,而 Th 和 K 没有出现异常时,再结合 Rd 和 Rs 测井曲线反映高角度裂缝的双轨特征及成像测井资料,就可以定性判别出该储层段发育热液白云岩储层。如 TZ75 井上寒武统 4 795~4 820 m 井段(图 7a),引起 U 异常的位置正好是鞍状白云石、高温硬石膏沿裂缝沉淀的位置(图 7b,7c)。

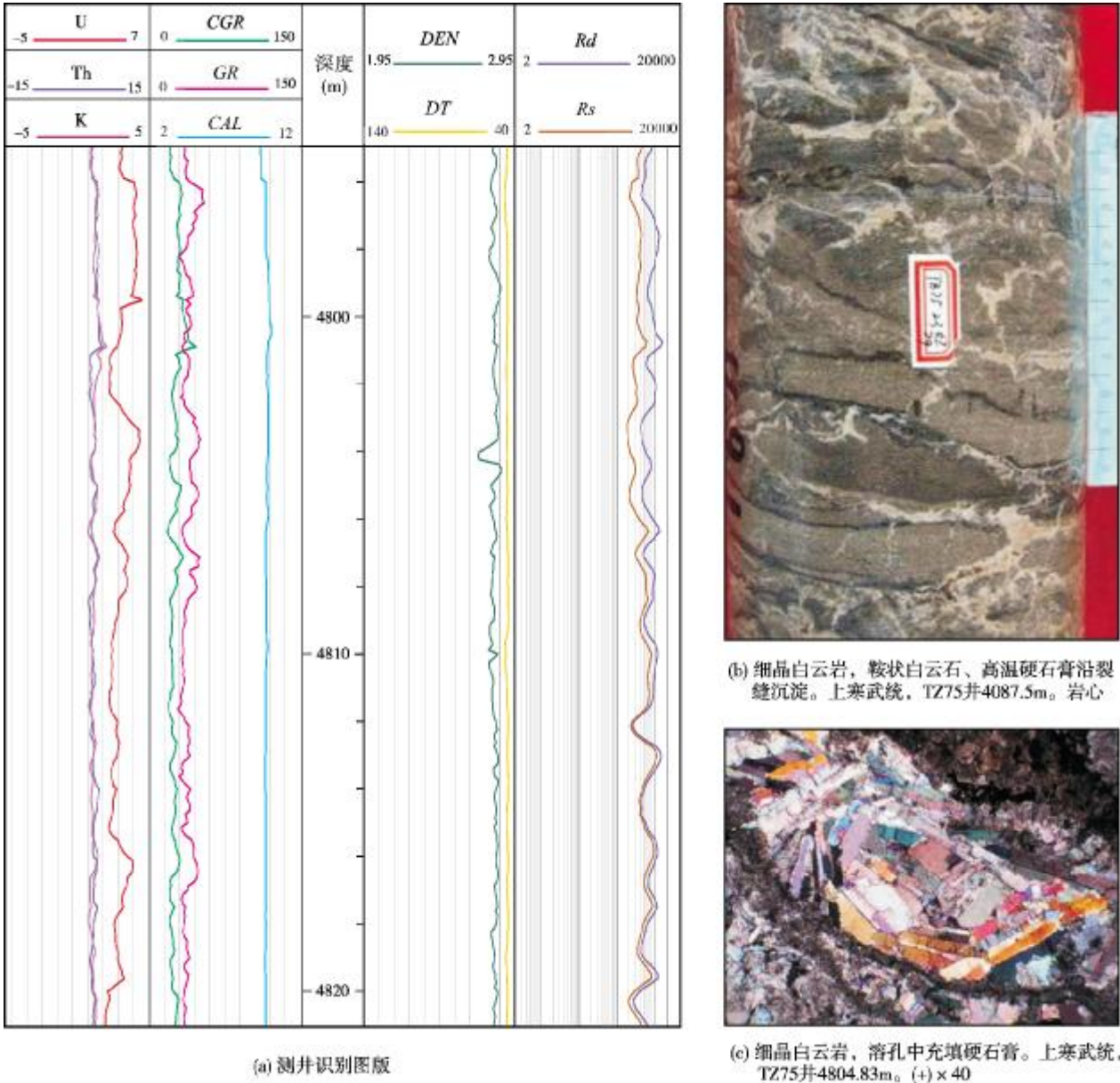


图 7 塔里木盆地 TZ75 井热液白云岩储层特征

3.3.2 利用成像测井资料识别无热液矿物沉淀的热液白云岩储层

热液白云岩储层形成于多孔的地层中，且顶底还需要有好的封隔层，而阻挡层的岩性一般是致密的、脆性的碳酸盐岩，那么当钻遇到热液白云岩储层时，储层顶部阻挡层由于储层段应力的释放很容易产生诱导缝。根据这一特性，就能利用成像测井资料识别热液白云岩储层的发育位置，如 ZG9 井鹰山组热液白云岩储层的识别。该井发育多层热液白云岩储层，每一层储层段及上下地层的成像特征具有惊

人的相似性，即在多孔的热液白云岩储层的顶底都见发育诱导缝的致密石灰岩，紧邻发育诱导缝的致密石灰岩是纹层状的致密石灰岩。此外最顶部一层热液白云岩储层的溶孔最大，这正好说明了热液具有向上运移并在顶部最为富集的特征(图 8)。

根据 ZG9 井热液白云岩储层成像测井特征，可建立识别无热液矿物沉淀的热液白云岩储层模式(图 9)：

致密碳酸盐岩—发育诱导缝的致密碳酸盐岩—多孔白云岩—发育诱导缝的致密碳酸盐岩—致密碳酸盐岩。

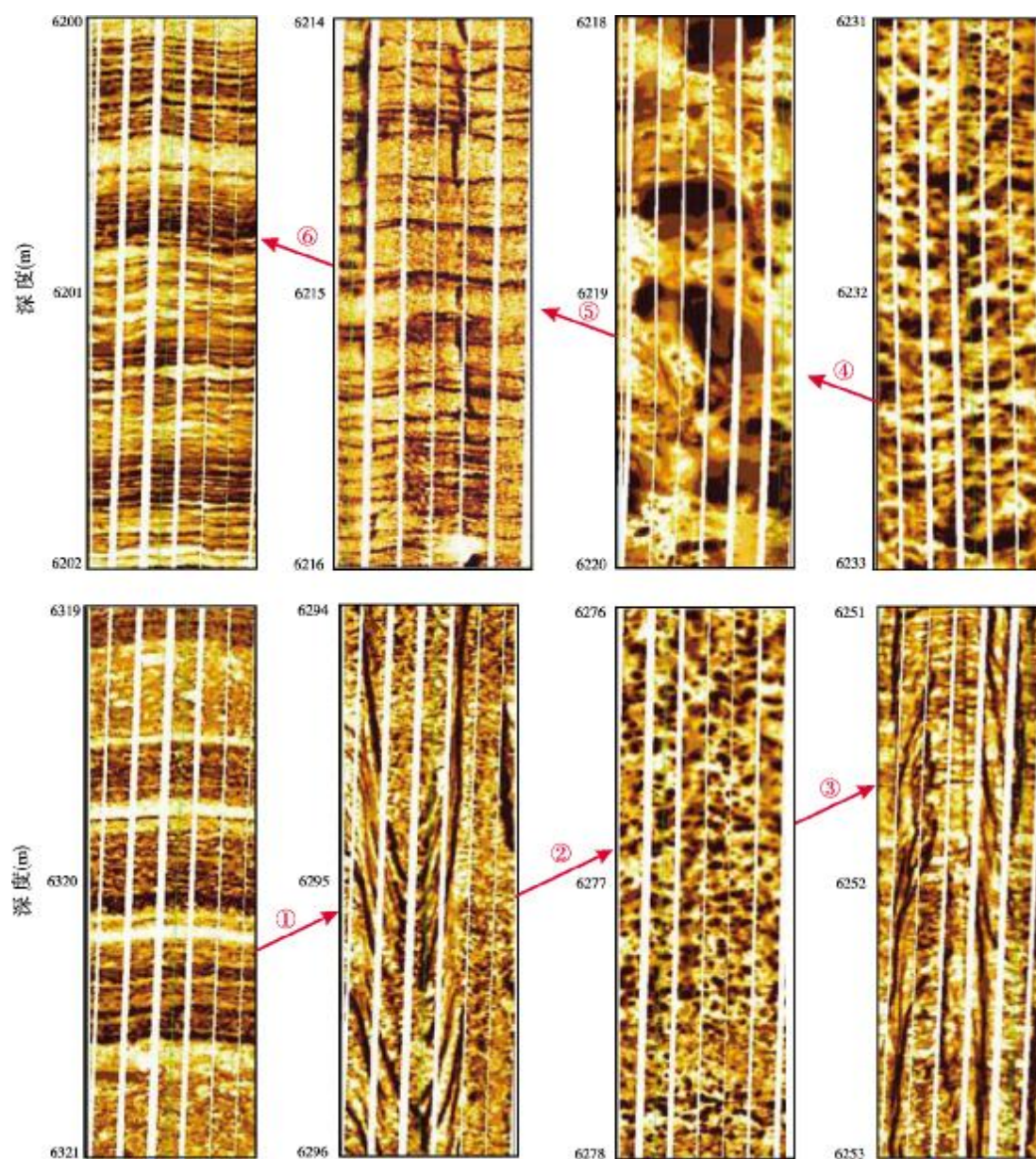


图8 塔里木盆地 ZG9 井热液白云岩储层测井识别图标

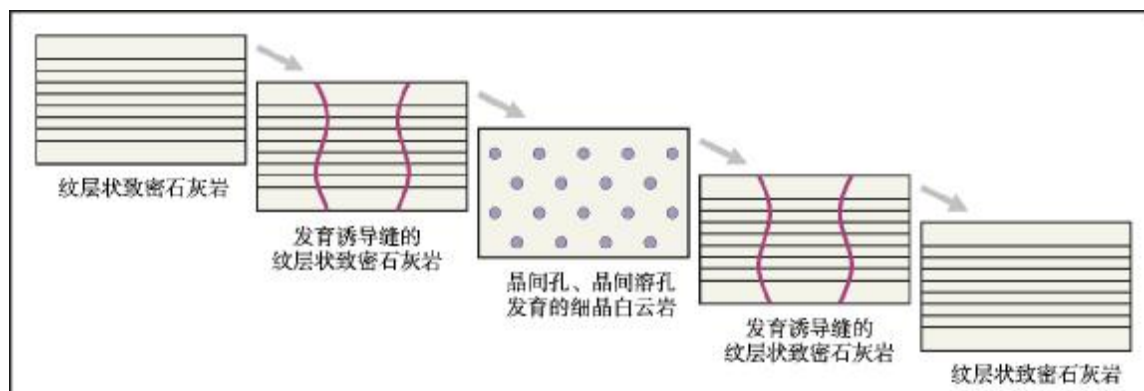


图9 塔里木盆地热液白云岩储层成像测井识别模式

3.4 地震响应特征

热液白云石化作用主要发生在拉张断层的上盘和与拉张断层有关的走滑断层的走滑位移部位,由于断层拉张作用导致断块塌陷和角砾岩化,在岩层顶部往往会出现线状凹陷或洼地^[12-13]。根据这一特

性,可以利用地震响应特征来识别热液白云岩储层。如塔北地区 YM1 井区的地震特征(图 10a)与美国纽约州上奥陶统黑河组热液白云岩储层的地震响应特征(图 10b)十分相似,即在每一个层界面之下都发育极好的凹陷,且顶部都有一个致密泥岩层作为盖层。

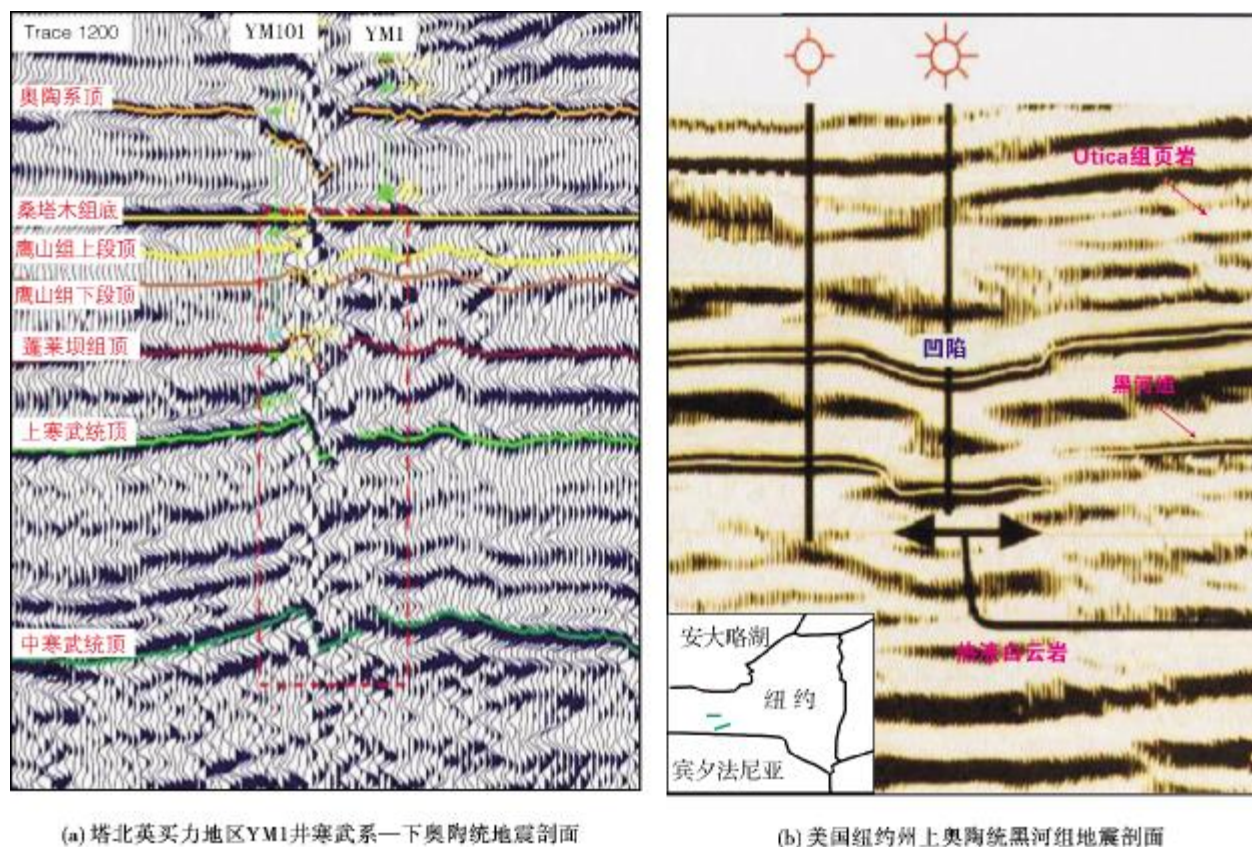


图 10 塔里木盆地与美国热液白云岩储层地震响应特征对照

4 结 论

(1)具有一定孔渗性的石灰岩或白云岩地层为热液白云岩储层的发育提供了物质基础,高角度深大断裂为热液提供了运移通道,而热液溶蚀作用和热液白云石化作用是塔里木盆地热液白云岩储层发育的主控因素。

(2)热液进入孔渗性好的围岩,并与之发生作用的主要成岩序列为:先发生溶蚀作用,再发生交代作用,最后沉淀鞍状白云石等热液矿物。由于伴生热液矿物的沉淀会充填孔洞从而破坏孔隙,所以热液作用既起建设性作用又起破坏性作用,但总的来说,建

设性作用大于破坏性作用。

(3)上覆地层岩性致密的潜山面附近是热液白云岩储层的有利发育区,有沟通基底断裂的渗透性好的台缘或台内礁滩体是热液白云岩储层的有利发育区。

(4)综合利用岩石学、地球化学、测井响应及地震响应特征资料能较好地识别热液白云岩储层。

参 考 文 献

- [1] 顾家裕. 塔里木盆地奥陶统白云岩特征及成因[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(2): 120-122.
- [2] 何莹, 鲍志东, 沈安江, 等. 塔里木盆地牙哈—英买力地区寒武系一下奥陶统白云岩形成机理[J]. 沉积学报, 2006, 24

- (6):806-818.
- [3] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. 地质科技情报, 2006, 25(5): 32-40.
 - [4] 李凌, 谭秀成, 陈景山, 等. 塔中北部中下奥陶统鹰山组白云岩特征及成因[J]. 西南石油大学学报, 2007, 27(3): 35-40.
 - [5] 陈永权, 周新源, 杨文静. 塔里木盆地寒武系白云岩的主要成因类型及储层评价[J]. 海相油气地质, 2009, 14(4): 10-17.
 - [6] 郑剑锋, 沈安江, 莫妮亚, 等. 塔里木盆地寒武系—下奥陶统白云岩成因及识别特征[J]. 海相油气地质, 2010, 15(1): 6-14.
 - [7] 沈安江, 潘文庆, 郑兴平, 等. 塔里木盆地地下古生界岩溶型储层类型及特征[J]. 海相油气地质, 2010, 14(2): 20-29.
 - [8] 李荣, 焦养泉, 吴立群, 等. 构造热液白云石化——一种国际碳酸盐岩领域的新模式[J]. 地质科技情报, 2008, 27(3): 35-40.
 - [9] 陈汉林, 杨树锋, 董传万, 等. 塔里木盆地地质热事件研究[J]. 科学通报, 1997, 42(10): 90-93.
 - [10] 沈安江, 郑剑锋, 潘文庆, 等. 塔里木盆地地下古生界白云岩储层类型及特征[J]. 海相油气地质, 2009, 14(4): 1-9.
 - [11] Smith L B Jr. Origin and reservoir characteristics of Upper Ordovician Trenton-Black River hydrothermal dolomite reservoirs in New York[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1691-1718.
 - [12] Davies G R, Smith L B Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
 - [13] Luczaj J A, Harrison W B III, 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.

编辑:赵国宪

Key Controlling Factors and Identification Characteristics of Lower Paleozoic Hydrothermal Dolostone Reservoirs in Tarim Basin

Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Pan Wenqing, Zheng Xingping, Liu Yongfu

Abstract: Many evidences of hydrothermal actions exist in lower Paleozoic rocks in Tarim Basin and so many hydrothermal dolostone reservoirs develop. The research on hydrothermal dolostone reservoirs indicates that this type of reservoirs can not be widely distributed in scale while otherwise the hydrothermal actions just repeatedly reformed the reservoirs that formed before. Due to hydrothermal actions infective widely in the basin, this reformation can be considerable. The analysis of lots of data from cores, thin sections and outcrops has shown that the limestone and dolostone with definite porosity and permeability supply the material base for developing hydrothermal dolostone reservoirs and high-angle thrusts supply the migration pathways so it is concluded that the hydrothermal dissolution and hydrothermal dolomitization are the key controlling factors. These hydrothermal reservoirs can be identified from the other reservoirs by many particular identifiable indications in petrology and geochemistry beside in log response and seismic response.

Key words: Lower Palaeozoic; Hydrothermal process; Dolostone reservoir; Reservoir characteristics; Controlling factor; Tarim Basin

Zheng Jianfeng: male, Master, Geologist. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China