

文章编号:0253-9985(2008)05-0614-09

构造-热液白云岩化作用与白云岩储层

陈代钊

(中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘要:热液白云岩储层的岩石特征与密西西比 Pb-Zn 硫化矿床的白云岩容矿层相似,以广泛发育的基质交代型和孔-缝充填的鞍形白云石为标型特征,同时含有少量其他热液矿物如闪锌矿、方铅矿、石英、黄铁矿、重晶石以及萤石等,另外还经常可见被鞍形白云石充填的因剪切应力形成的微裂缝、斑马纹构造和白云岩角砾。由于热液流体对原碳酸盐岩(主要是灰岩)的差异性溶蚀,往往保留了未被充满的孔洞、缝,为油气的充注提供了空间。输导热液流体的断裂系统通常为张性或扭张性断裂系统,白云岩化作用主要发生在断裂系统的上盘,并沿着孔渗性相对较好的原岩侧向推进。借助于高分辨率地震属性分析和成像技术,可以对热液白云岩储层进行表征和预测,从而为油气勘探决策提供依据。

关键词:伸展断层;扭张断层;构造控制;热液白云岩;白云岩储层

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Structure-controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs

Chen Daizhao

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Sharing similar lithologic characteristics with dolomite seam hosting MVT Pb-Zn sulfide ores, hydrothermal dolomite reservoirs contains mainly massive-matrix-replacement dolomites and void- or fracture-filling saddle dolomite dotted with small amount of other hydrothermal ores, such as sphalerite, galena, quartz, pyrite, barite, and fluorite. Saddle dolomite-filling microfractures and zebra textures formed by shear stress and dolomite breccias are also common in these reservoirs. Unfilled vugs, fractures, and pores from differential dissolution of the original carbonates (mainly limestone) provide the necessary spaces for later hydrocarbon charges. The hydrothermal fluids preferentially flow upwards along the extensional and transtensional fault systems, where dolomitization preferentially occurs on the hanging walls and extends laterally in the course of fault propagation. The hydrothermal dolomite reservoir can be well characterized and predicted through high-resolution seismic attribute analysis and imaging.

Key words: extensional fault; transtensional fault; structural control; hydrothermal dolomite; dolomite reservoir

对沿构造线分布的白云岩储层的勘探已逾百年的历史,其中许多白云岩储层被认为是热液成因的,如美国东北部的 Lima-Indiana 和 Albion-Scipion 油田的奥陶系白云岩储层^[1,2]。最近 20 多年来,随着对构造-热液白云岩化作用和相关储层兴趣的不断上升,使该类型白云岩的研究成为一

种新的流行模式^[3,4]。通过对一些沉积盆地的白云岩化模式进行重新评估,人们进一步认识到热液白云岩化作用的普遍性及在白云岩储层中的重要作用,这对确定勘探策略和思路有重要的促进作用。

愈来愈多的事实表明,与构造活动有关的热

收稿日期:2008-08-18。

作者简介:陈代钊(1963—),研究员,碳酸盐沉积学和地球化学。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40372062)。

液白云岩化作用在地层记录中是非常普遍的。如在西加拿大盆地(WCSB)泥盆系^[5-8]、加拿大东部和美国东北部的密执根盆地和阿帕拉契亚盆地的奥陶系(局部为志留系和泥盆系)碳酸盐岩储层有相当一部分是热液白云岩储层^[1,9-11]。另外,南-北大西洋边缘裂谷盆地的中生代碳酸盐岩以及西班牙岸上和离岸盆地的白垩系储层也被认为是热液白云岩储层。在海湾地区的二叠系-三叠系和侏罗系碳酸盐岩中,最近在世界最大的油田(沙特的 Ghawar)^[12]和最大的气田(海湾的 North Field)也确认有构造-热液白云岩成分^[4]。

近年来,随着我国在海相碳酸盐岩层系油气勘探取得的重要进展^[13-15]和进一步深化的现实需要,白云岩储层在油气勘探中的重要作用将愈加明显,而构造-热液型白云岩储层作为非常普遍的白云岩储层(特别是对那些深埋的、时代较老的碳酸盐岩储层),是我们在实际工作中不容忽视的问题,如塔里木盆地深部广泛发育的寒武系-奥陶系碳酸盐岩地层。但我国对热液白云岩化机理及相关问题的研究还很少^[16],为了促进在该领域的研究,满足油气勘探中的实际工作需要,本文在此就热液白云岩化作用及白云岩储层的基本特征和规律进行一些简单的介绍,希望能起到抛砖引玉的作用。

1 热液白云石(岩)的基本概念

“热液(hydrothermal)”亦即热水,一般指比周围环境流体温度明显偏热(至少高5℃)的流体^[17]。因此,“热液白云石”系指在比围岩温度高的热流体形成(交代或沉淀)的白云石^[18],而主要由热液白云石组成的白云岩即为热液白云岩。热液白云石(岩)的形成反映了地热异常的地质背景,需要有一种流体运移驱动机制或流体运移通道^[7,8];而断裂/裂缝作用为热流体的运移提供了很好的通道^[9,16,19]。而热源既可以隐伏在地球深部,也可以处在白云化岩体的附近。

大量的岩心和露头白云岩组构观察表明,热液白云岩形成于一种孔隙流体压力(或压力梯度)比较高的剪切应力条件^[20,21],因此有学者提出了热压(thermobaric)白云岩的概念^[4]。而更广义的构造控制的热液白云岩化作用系指在埋藏条件下热流体(典型的卤水)侵位到张性-扭张性断层或

断裂系统周缘或轴向区,在流体温、压升高(通常是短暂的)并比围岩(如灰岩)高的条件下发生的白云岩化作用。除构造作用外,沉积阶段和早期成岩作用也会对交代结构、组构和孔隙类型、体积有很强的控制作用^[4]。

2 热液成因白云岩的主要特征

2.1 岩石学特征

热液白云岩的岩石特征与密西西比(MVT)Pb-Zn硫化矿床的白云岩容矿层相似,以广泛发育的基质交代型和孔-缝充填的鞍形白云石(saddle dolomite or baroque dolomite)为标型特征,同时含有少量其他热液矿物如闪锌矿、方铅矿、石英、黄铁矿、重晶石以及萤石等,另外还经常可见被鞍形白云石充填的因剪切应力形成的微裂缝、斑马纹构造和白云岩角砾(图1)。

鞍形白云石是一种乳白色、灰色或棕色的亮晶白云石晶体,具有独特的尖顶、弯曲晶面(弯月刀状)和晶格,波状消光,珍珠光泽(图1a),丰富的流体包体和晶内微量元素成分变化丰富^[22]。鞍形白云石通常作为铸模孔、晶洞和裂缝的胶结物存在,也有少量的交代型鞍形白云石存在(图1)。虽然鞍形白云石被普遍认为是热液成因的关键性标志^[22,23],但它并不是鉴别热液成因背景的唯一标志,在压溶作用下的局部调整(沿压溶缝)和热化学硫酸盐还原作用下也有可能形成少量的鞍形白云石^[24];不是在所有的热液背景中都有鞍形白云石的存在^[19]。因此,在具体工作中,需要综合考虑鞍形白云石在碳酸盐岩中的产状、含量和共生矿物组合以及地质背景等因素,才能比较准确地判断它们的成因。

在热液白云岩中,最早的组构是剪切作用形成的微裂缝,它们通常被鞍形白云石胶结物充填,代表了岩石大规模断裂前剪切应力作用以及从断裂系统向主宿岩石内注入热流体的开始。当宿主灰岩中基质白云岩化作用开始进行时,会导致钙质生物碎屑、早期方解石胶结物甚至灰岩基质的广泛溶解,并在铸模孔洞中沉淀出鞍形白云石胶结物(图1b)。而如果原始岩石具有高孔渗性,那么也有可能发生广泛的热液交代作用,形成鞍形白云石基质。在许多热液白云岩相中,还经常可

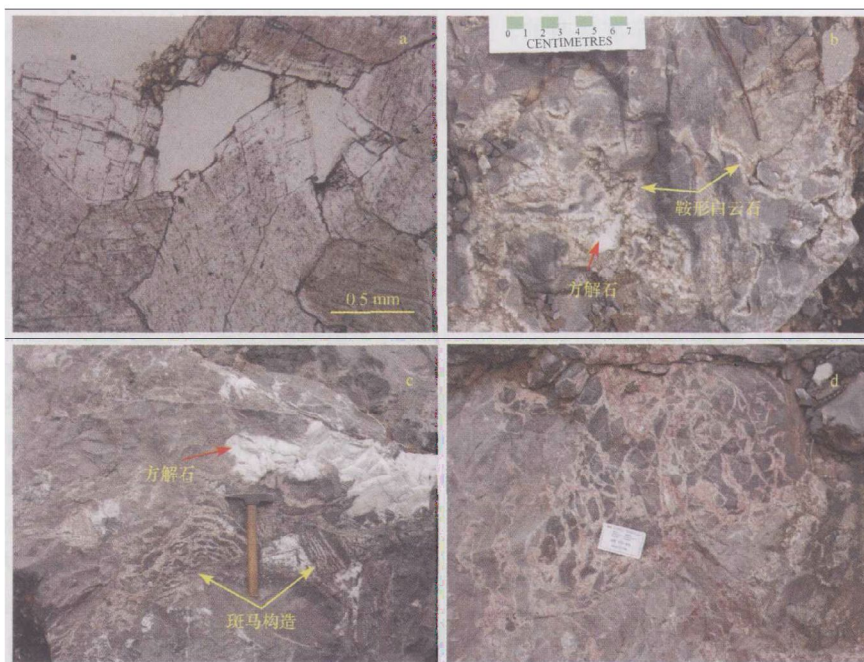


图1 构造-热液白云岩主要岩石学特征

Fig. 1 Petrological features of structure-controlled hydrothermal dolomites

a. 鞍形白云石显微照片,弯月状,存在内生裂纹,充填于晶洞中,存在残留孔隙,单偏光,中泥盆统唐家湾组,桂林;b. 生物碎屑(层孔虫)溶解的铸模孔,被鞍形白云石充填,部分被更后期的方解石充填,晶洞大部分开启,黑色基质为基质白云岩,比例尺以厘米为单位,中泥盆统唐家湾组,桂林付合;c. 断裂带白云岩中的斑马状结构,浅色(粉红-乳白色)为鞍形白云石,暗色为基质(全部白云岩化),残余孔洞被后期巨晶方解石充填,地质锤=35 cm长,下石炭统黄金山组,桂林磨盘山;d. 断裂带白云岩角砾,被鞍形白云石胶结(被后期的岩溶浸染为粉红色),卡片=8.5 cm宽,下石炭统黄金山组,桂林磨盘山

以见到水平-准水平的席状晶洞(sheet vugs),并被鞍形白云石胶结物充填,这种组构可能为构造破裂、溶解作用甚至原始层间间断面所控制^[25]。

斑马状结构(zebra texture)是热液白云岩最瞩目的一种岩石结构(图1c),它们通常见于低渗的基质白云岩中,被认为是在异常高压条件下由于不能及时释放陡增的孔隙流体压力而发生水力压裂而形成的^[20],所以这种结构在颗粒白云岩中不太常见。水平的剪切应力则可能形成倾斜的斑马状结构。角砾状结构也是许多热液白云岩中常见的一种结构(图1d),它们可以是早期的溶解角砾,也可以是棱角状、膨胀或漂浮的岩石角砾,它们通常发育于断裂带的近端。膨胀角砾主要发育于低渗透的基质白云岩中,所以可能主要与水力压裂作用有关^[26]。热液白云岩角砾常常作为MVT矿床的宿主岩石(容矿体),并有可能增强雁行断裂带和热液白云岩储层的孔隙度。

在热液白云岩中,常常可以见到一些与热液成因有关的矿物组合,如闪锌矿、方铅矿、石英、黄

铁矿、重晶石、萤石、沥青(主要为火沥青)等^[8],这些也是判断热液成因白云岩的一个有用标志。

2.2 流体包裹体测温和地球化学分析

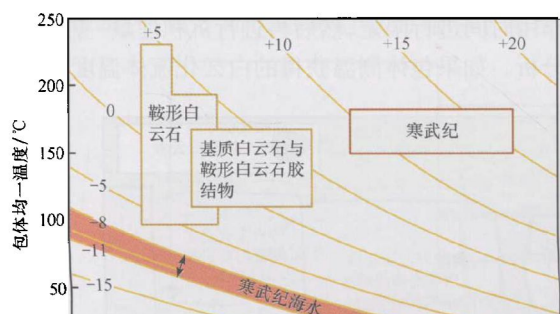
大量的资料表明^[4],鞍形白云石形成于热卤水流体(一般为海水盐度的2~6倍,个别可以达到海水盐度的10倍以上)中^[9],形成温度(均一化温度 T_h)一般在60~250℃,但大部分在100~180℃间变化。这些资料可以通过对白云石生长环带上的流体包体均一化温度(T_h)和最终冰融点温度(T_m)的测量获得。为了减少在均一温度测量过程中发生再平衡现象(拉伸、泄露和颈缩),需选择沿单一生长环带分布、具有稳定的气/液比的一组流体包体集合体(FIA)进行测试^[27]。其中,流体的盐度根据冰融点温度来进行估算^[28]: $[\text{NaCl}](\%) = 1.78T_m - 0.0442T_m^2 + 0.000557T_m^3$ 。

鞍形白云石的氧同位素值($\delta^{18}\text{O}$, VPDB)可在-2.5‰~-18‰间变化,但大部分在-5‰~

-10‰间变化,相对比较负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要与氧同位素的热分馏有关。但是,与同期海水 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值相比,白云化流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般要偏正(如寒武系地层中的鞍形白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值要比同期海水的高 5‰至 15‰;图 2),这种 $\delta^{18}\text{O}$ 值的富集也是热液系统的典型标志^[29]。在这种情况下,如果假设白云化流体是与海水(或轻微改造的海水)相似的流体,并据此以 $\delta^{18}\text{O}$ 值来估计白云化流体的温度,显然就会出现较大的误差(偏低)^[30],特别是在超咸卤水中,从而有可能掩盖真实的热液成因信息。

鞍形白云石的碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$, VPDB)的变化范围比较大(-17‰~6‰),但大部分在-3‰~-5‰变化,其值的变化主要取决于碳酸盐岩围岩无机碳和微生物-有机质热降解来源的有机碳的贡献率。据此,也可以判断鞍形白云石的形成是否与油气运移密切相关。

相对于同期碳酸盐岩(灰岩)保存的海水 Sr 同位素信号(以 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值表示),鞍形白云石中一般比较富集放射性的 Sr,造成这种现象主要取决于源热流体与含泥质和/或长石的碎屑沉积物以及与基底岩石相互作用的时间与强度^[7,8]。



在研究中需要注意的是,必须对不同类型的白云石及同期相关矿物组合进行单独显微取样后再进行同位素分析,这样才能最大限度地保证这些同位素值是不同时期和条件下白云岩化流体性质的真实记录。

3 构造控制热液白云岩化作用

热液系统以及在此形成的相关矿物(床)(包括白云岩)主要发育于大地热流升高的大地构造背景中,这种背景包括伸展大陆边缘地壳变薄区、弧后伸展盆地内部、大型的裂谷盆地和早期的聚敛型大陆边缘盆地。高的热对流异常可能主要沿深大扭张(走滑)基底断裂处发生。所以,尽管广泛的热液系统引起的热液白云岩化作用可以发生在聚敛型盆地的早期(特别是斜向应力引起的深大走滑断裂系统的复活),但主要发生在盆地伸展期,而非盆地挤压期。

大量的文献表明,热流体大规模运移及由此引起的一系列地质作用都与断裂作用有关,并且对一些特殊的构造背景有一定的偏好,这些有利的构造背景包括:①伸展(正)断层,特别是断层的上盘;②扭张(深大走滑)断层,特别在释压断错处(releasing offsets);③上述断层(包括转换断层)的交汇处。

许多的沉积喷流矿床(SEDEX)、密西西比河谷型矿床(MVT)和热液白云岩的产状显示有一定的偏好,即热液矿化作用和白云岩化作用优先发生于张性(或扭张)断层的上盘。对此,曾提出了多种形成机理:热流体浮力(热密度)驱动进入上盘^[31];在断层点传播过程中压力驱动流体优先进

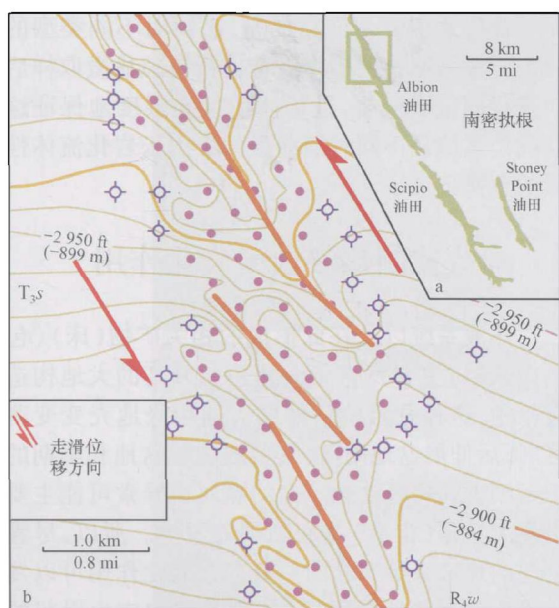


图3 密执根南部 Albion-Scipio 油田构造图

Fig. 3 Structure map of Albion-Scipio oilfield in southern Michigan

a. 走滑控制的热液白云岩储层构造,图中显示的是北部 Albion 油田中奥陶统 Trenton 群顶部构造;b. 等高线间隔为 3 m,可见 NW-SE 向呈雁行排列的凹陷(粗线方位),几乎所有产油井(实圆点)都位于(或靠近)该凹陷内^[4]

(走滑)断层有可能切割台地碳酸盐岩序列之下的砂岩(或碳酸盐岩)含水层,造成热流体周期性充注到幕次活动断层中(图4)。在扭张(走滑)断层

系统中,高温-高压流体主要集中于膨胀释压弯曲部位、伸展叠覆(extensional overlaps)区域^[35]、伸展(拉分)双断带(extensional duplexes)、被剪切带限定的拉开部位、扫帚状断裂的终止部位以及伸展和/或走滑断层的交切部位^[36,37]。流体在向上流动过程中将优先沿旋转断块的角部等特定部位运移^[38]。扭张断裂带上的一些构造和岩石结构单元,如负向鞍状凹陷(负花状构造)、角砾带、多孔白云岩层段,可能与雁行构造系列中的主位移带(PDZ)呈斜交分布(图3)。在剪切应力背景下,雁列构造方向可以用于确定断层位移的矢量方向(左旋、右旋)。连接伸展(正)断层的转换断层的走滑位移区也是矿化和白云岩化作用的有利场所。

4 热液成因白云岩的甄别

要确认为热液成因白云岩,就需要证实白云岩化流体的温度高于碳酸盐岩围岩的温度(至少高 5℃)。而通过对埋藏-热史和白云岩体有机质热演化等方面的分析,可望能获得这些有用的证据。

在综合分析白云岩共生岩序列、地层产状的基础上,辅以同位素定年技术,对热液白云岩化作用时间进行限定,然后再进行沉积埋藏-热历史分析。如果包体测温获得的白云化流体温度(T_h)

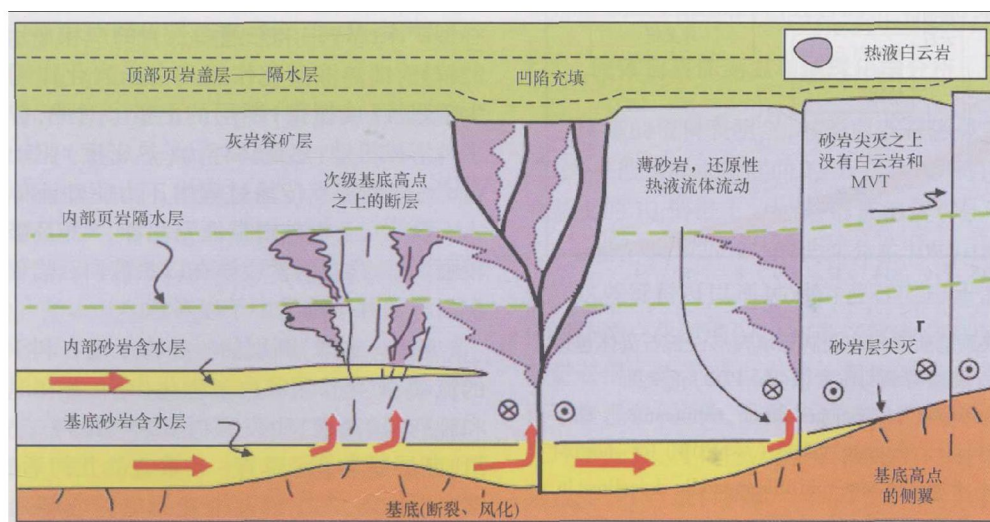


图4 地下地层格架和断裂活动对热液流体运移的影响

Fig. 4 Influences of subsurface stratigraphic framework and faulting upon flowing of hydrothermal fluids

[注意底部含水疏导层、顶部盖层(隔水层)以及基底高点(或弧形穹隆)在热液流体系统(MVT或热液白云岩储层)中的作用。基底侧翼底部含水层变薄或尖灭时,热液流体流量大为减少,矿化和白云化作用弱和缺乏^[4]。]

(最好进行压力校正)比正常埋藏条件下(在正常地温梯度下)的地层温度明显偏高(至少高 5°C),那么这些白云岩就可以认为是热液成因的;反之,则不是热液成因的(即使白云岩形成的温度比较高)^[18]。

在短暂的地热异常过程中,幕次性的热液流体会充注到宿主碳酸盐岩中,并引起局部的有机质“强迫性成熟”^[4],致使热液白云岩化区域的有机质热演化程度比周围碳酸盐岩地层的要高。在这种情况下,白云岩体的有机质光学和反射强度(如镜质组反射率 R_o)要比周边碳酸盐岩的高。在这些短暂高热流异常区,往往会形成各向异性的有机质显微结构,与正常的区域埋藏-热成熟条件下形成的结构不相符。在这些白云岩中的火沥青有时会发育一种在正常地热背景烘烤下不常见的光学显微结构^[39]。鞍形白云石中的烃类包体也有可能是这类热液白云岩化作用同期的“强迫性成熟”产物,而非区域性烃源岩成熟的标志^[4]。

5 构造-热液白云岩在油气勘探中的意义

如前所述,由构造控制的热液白云岩演化作用主要发生在伸展(正)断层的上盘和扭张(走滑)断裂带内,由于断层拆离造成的地层下沉作

用,在岩层顶部往往会出现线状凹陷(或洼地)。岩层内部由于破裂以及随后可能因热卤水流体充注引起的水力压裂,形成碳酸盐岩层内丰富的裂缝和角砾,并发生广泛的基质(交代)白云岩化作用,引起白云岩孔隙度的增加(摩尔体积置换效应);而幕次性热卤水流体的再次充注,就有可能对充分白云岩化的斑块状白云岩(主要位于断裂带上部和外侧)中的灰岩斑块(常常为生物碎屑)进行溶解,形成晶洞,并被鞍形白云石部分充填,同时对基质白云岩发生广泛的重结晶(或新生变形作用)^[16]。如果热液溶解作用足够强,甚至可造成岩层的局部垮塌,从而增强岩层的下陷作用,故有人称之为热液岩溶作用^[40]。与周围的碳酸盐岩围岩(主要为灰岩)相比,这些白云岩通常具有比较多的孔、洞、缝,可以成为潜在的优质储层。但是,这些白云岩并不总是能成为好的油气储层。其他一些条件(或因素),如顶部有无好的盖层、底部有无高渗透的疏导层以及有无镁离子的充足来源(白云岩化不充分或过度白云岩化)、流体性质是否改变等也有可能影响白云岩储层的品质和含油性。

这种线状凹陷的宽度从数百米到数千米不等,长度数千米到数十千米不等,白云岩岩体的厚度从10 m到数十米不等。可以通过横切其轴向的二维地震剖面很好地识别这种凹陷(图5);而

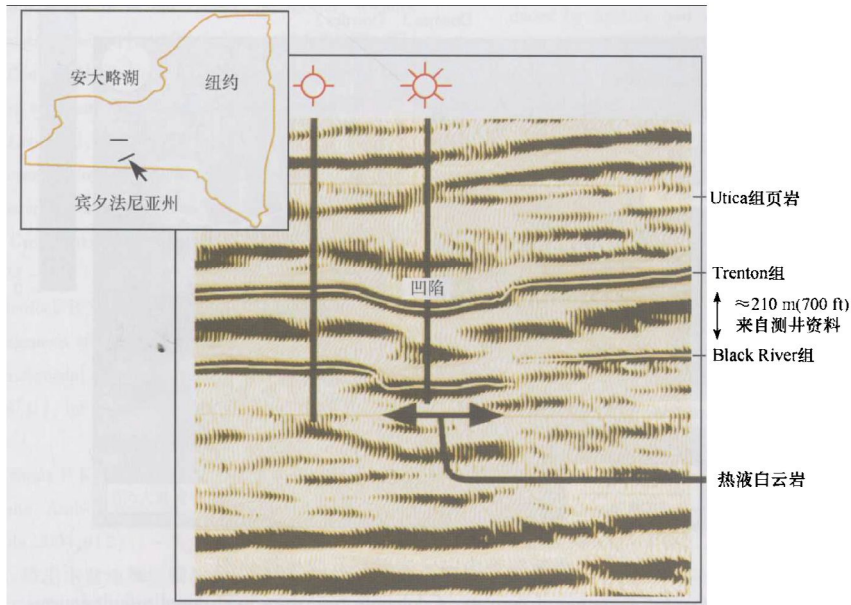


图5 横切美国纽约州 Trenton-Black 油田狭窄线状凹陷的地震剖面

Fig. 5 Seismic profile across the narrow linear sag at Trenton-Black oilfield, New York, USA

[在中奥陶 Trenton 和 Black 组(主要热液白云岩储层)顶部揭示出发育极好的凹陷,顶部为 Utica 页岩(上奥陶统)所充填^[4]。]

对其大小、形状和深度的更详细描述,则需要通过三维地震资料的解释获得^[41]。美国和加拿大东部的密执根和阿巴拉契亚盆地的中奥陶统 Trenton - Black River 组被认为是这种构造控制热液白云岩储层的经典实例,勘探和研究最为详细,其中最为丰产的油田包括密执根盆地的 Lima - Indiana (储量 $5\,962 \times 10^4 \text{ m}^3$, 45% 的产能来自这种构造控制的白云岩储层) 和 Albion - Scipio 油田 (储量 $3\,458 \times 10^4 \text{ m}^3$), 因此俗称为“金色峡谷”^[1]。另外,高分辨率的航磁资料(经过滤波处理)也可以对这种线

状凹陷的控边断层(特别是基底走滑断层)的走向和构造格架提供约束。

断层的几何形态可以通过地震资料的振幅和相关体分析进行描绘^[42],而白云岩的孔隙度及其空间变化则可望从地震属性和测井资料的综合分析进行比较准确的刻画(图6),反过来又对白云岩化作用范围进行限定^[41],从而使我们对此类白云岩储层发育的控制因素有更加感性和客观的认识。这些资料对于油气勘探和开发方案的制定将提供重要的科学和决策依据。

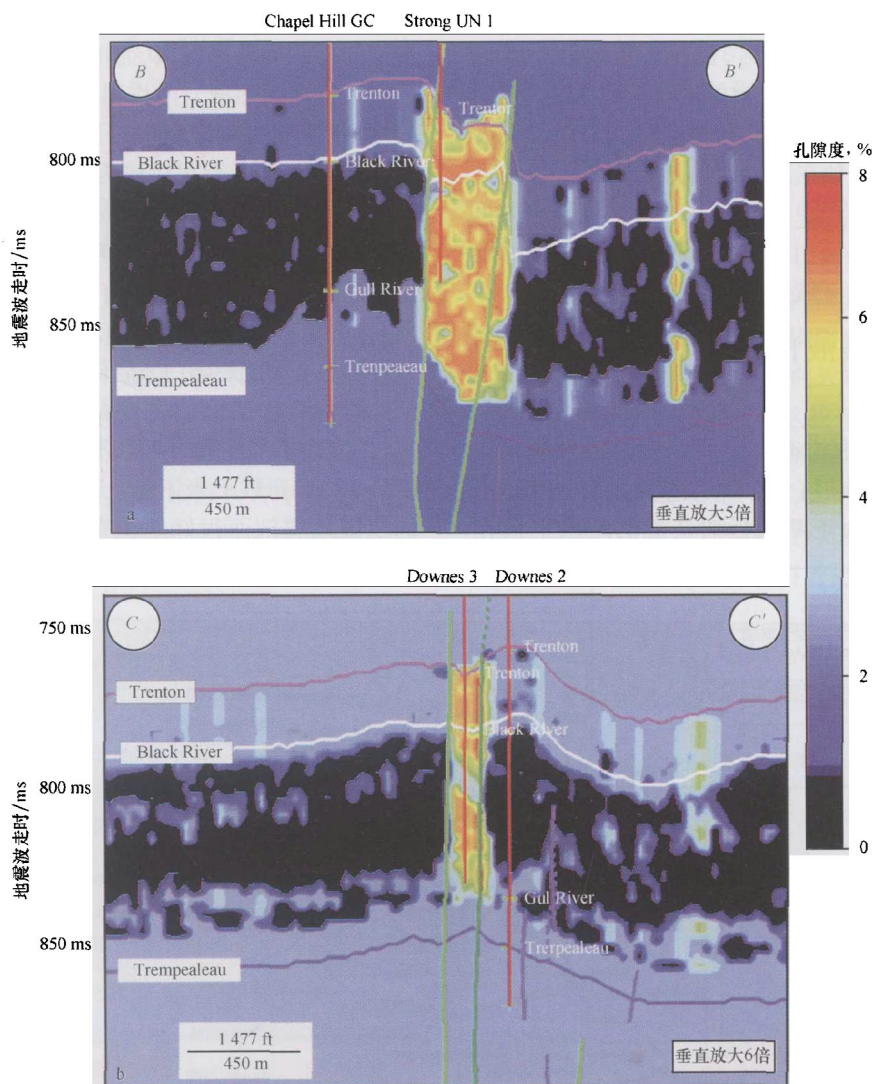


图6 走滑断裂带内白云岩储层孔隙度变化图

Fig. 6 Map showing variation of porosity of dolomite reservoirs in strike-slip fault zones

(根据神经网络原理对地震和测井资料分析和处理所得,高孔隙度区以红、黄颜色表示。在这些测线内,断层可以清晰鉴别,高孔隙度区明显位于负花状构造两翼内。红垂线代表井位,位于俄亥俄州 Saybrook 油田中奥陶统 Trenton - Black River 群^[38]。)

参 考 文 献

- Hurley N F, Budros R. Albion-Scipio and Stoney Point fields—USA Michigan Basin [A]. In: Beaumont E A, Foster N H, eds. Stratigraphic traps I [C]. AAPG Treatise Petrol Geol Atlas of Oil and Gas Fields, 1990, 1: 37
- Wickstrom L H, Gray J D, Stieglitz R D. Stratigraphy, structure, and production history of the Trenton Limestone (Ordovician) and adjacent strata in northwestern Ohio [Z]. Ohio Geol Survey Invest Report, 1992, 143: 78
- Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal [A]. In: Braithwaite C J R, Rizzi G, Darke G, eds. The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs [C]. Geol Soci (London) Special Publ, 2004, 235: 7–63
- Davies G R, Smith B S Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90 (11): 1 641–1 690
- Mountjoy E W, Halim-Dihardja M K. Multiple phase fracture and fault-controlled burial dolomitization, Upper Devonian Wabamun Group, Alberta [J]. Jour Sed Petrol, 1991, 61: 590–612
- Duggan J P, Mountjoy E W, Stasiuk I. D. Fault controlled dolomitization at Swan Hills Simonette oil field (Devonian), deep basin west-central Alberta, Canada [J]. Sedimentology, 2001, 48: 301–323
- Qing H, Mountjoy E W. Large-scale fluid flow in the Middle Devonian Presqu'ile Barrier, Western Canada sedimentary basin [J]. Geology, 1992, 20: 903–906
- Qing H, Mountjoy E W. Formation of coarsely crystalline, hydrothermal dolomite reservoirs in the Presqu'ile Barrier, Western Canada sedimentary basin [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78: 55–77
- Middleton K, Coniglio M, Sherlock R, et al. Dolomitization of Middle Ordovician carbonate reservoirs, southwestern Ontario [J]. Canad Petrol Geol Bull, 1993, 41: 150–163
- Keith B D. Reservoirs resulting from facies-independent dolomitization: case histories from the Trenton and Black River carbonate rocks of the Great Lake areas [J]. Carbonate and Evaporites, 1986, 1(1): 74–82
- Coniglio M, Sherlock R, Williams-Jones A E, et al. Burial and hydrothermal diagenesis of Ordovician carbonates from the Michigan Basin, Ontario, Canada [A]. In: Purser B, Tucker M E, Zenger D, eds. Dolomites [C]. Int Assoc Sediment Special Publ, 1994, 21: 231–254
- Cantrell D L, Swart P K, Hagerty R M. Genesis and characterization of dolomite, Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia [J]. GeoArabia, 2004, 9(2): 1–26
- 张涛, 闫相宾. 塔里木盆地深层碳酸盐岩储层主控因素探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 745–754
- 韩革华, 漆立新, 李宋杰, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 860–870, 878
- 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
- Chen D Z, Qing H R, Yang C. Multistage hydrothermal dolomites in the Middle Devonian (Givetian) carbonates from Guilin area, South China [J]. Sedimentology, 2004, 51: 1 029–1 051
- White D E. Thermal waters of volcanic origin [J]. Geol Soci Amer Bull, 1957, 68: 1 637–1 658
- Machel H G, Lonnee J. Hydrothermal dolomite—a product of poor definition and imagination [J]. Sediment Geol, 2002, 152: 163–171
- Braithwaite C J R, Rizzi G. The geometry and petrogenesis of hydrothermal dolomites at Navan, Ireland [J]. Sedimentology, 1997, 44: 421–440
- Nielsen P, Swennen R, Muchez Ph, et al. Origin of Dinantian zebra dolomites south of the Brabant-Wales Massif, Belgium [J]. Sedimentology, 1998, 45: 727–743
- Boni M, Parente G, Bechstadt T, et al. Hydrothermal dolomites in SW Sardinia (Italy): evidence for a widespread late-Variscan fluids flow event [J]. Sed Geol, 2000, 131: 181–200
- Radke B M, Mathis R L. On the formation and occurrence of saddle dolomite [J]. Jour Sed Petrol, 1980, 50(4): 1 149–1 168
- Gregg J M. On the formation and occurrence of saddle dolomite—discussion [J]. Jour Sed Petrol, 1983, 53: 1 025–1 033
- Machel H G. Saddle dolomite as a by-product of chemical compaction and thermochemical sulfate reduction [J]. Geology, 1987, 15: 936–940
- Wallace M W, Both R A, Ruano S M, et al. Zebra textures from carbonate-hosted sulphide deposits: sheet cavity networks produced by fracture and solution enhancement [J]. Econ Geol, 1994, 89: 1 183–1 191
- Tarasiewicz J P T, Woodcock H H, Dickson J A D. Carbonate dilation breccias: examples from the damage zone of the Dent fault, northwest England [J]. Geol Soci Amer Bull, 2005, 117: 736–745
- Goldstein R H, Reynolds T J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals [M]. SEPM Short Course, 1994, 31: 199
- Bodnar R J. Revised equation and table for determination in the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1993, 57: 683–684
- Spencer R J. Origin of Ca-Cl brines in Devonian formations, Western Canada sedimentary basin [J]. Applied Geochem, 1987, 2: 373–384
- Green D G, Mountjoy E W. Fault and conduit controlled burial dolomitization of the Devonian west-central Alberta deep basin [J]. Canad Petrol Geol Bull, 2005, 53(2): 101–129
- Phillips W J. Hydraulic fracturing and mineralization [J]. Jour Geol Soci (London), 1972, 128: 337–359
- Knipe R J. The influence of fault zone processes and diagenesis on fluid flow [A]. In: Horbury A D, Robinson A G, eds. Diagenesis and basin development [C]. AAPG Studies in Geology, 1993, 36:

- 135-151
- 33 Steen Q, Sverdrup E, Hanssen T II. Predicting the distribution of small faults in hydrocarbon reservoirs by combining outcrop, seismic and well data [A]. In: Jones G, Fisher Q J, Knipe R J, eds. Faulting, fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs [C]. Geol Soci (London) Special Publ, 1998, 147: 27-50
 - 34 Sylvester A G. Strike-slip faults [J]. Geol Soci Amer Bull, 1988, 100: 1 666-1 703
 - 35 Connolly P, Cosgrove J. Prediction of fracture-induced permeability and fluid flow in the crust using experimental stress data [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(5): 757-777
 - 36 Woodcock N H, Fischer M. Strike-slip duplexes [J]. Jour Struct Geol, 1986, 8: 725-735
 - 37 Sibson R H. Faulting and fluid flow [A]. In: Nesbitt B E, ed. Fluids in tectonically active regimes of the continental crust [M]. Mineral Assoc Canada Short Course Handbook, 1990, 18: 93-132
 - 38 Lewis H, Couples D D. Carboniferous basin evolution of central Ireland—simulation of structural controls on mineralization [A]. In: McCaffrey K, Lonergan L, Wilkinson J, eds. Fractures, fluid flow and mineralization [C]. Geol Soci (London) Special Publ, 1999, 155: 277-302
 - 39 Gize A P, Manning D A C. Aspects of the organic geochemistry and petrology of metalliferous ores [A]. In: Engel M H, Macko S A, eds. Organic geochemistry, principles and applications [M]. New York: Plenum Press, 1993. 565-577
 - 40 Sass-Gustkiewicz M. Internal sediment as a key to understanding the hydrothermal karst origin of the Upper Silesian Zn-Pb ore deposits [A]. In: Sangster D F, ed. Carbonate-hosted lead-zinc deposits [C]. Soci Econ Geol, Special Publ, 1996, 4: 171-181
 - 41 Sagan J A, Hart B S. Three-dimensional seismic-based definition of fault-related porosity development: Trenton-Black River interval, Saybrook, Ohio [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1 763-1 785
 - 42 Russel B, Hampson D, Scheulke J, et al. Multi-attribute analysis [J]. The Leading Edge, 1997, 16: 1 439-1 443

(编辑 李 军)

.....

(上接第588页)

- 29 Sun S, Li J, Lin J, et al. Indosinides in China and the consumption of Eastern Paleotethys. In: Muller D W, McKenzie J A, Weissert H, eds. Controversies in modern geology: evolution of geological theories in sedimentology, earth history and tectonics [M]. London: Academic Press, 1989. 363-384
- 30 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造 [J]. 中国科学 (B 辑), 1995, 25(9): 994-1 003
- 31 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 1-855
- 32 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 1-231
- 33 Wang X, Metcalfe I, Ping J, et al. The Jinshajiang- Ailaoshan Suture Zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18: 675-690
- 34 Metcalfe I. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20: 551-566
- 35 Li P, Gao R, Cui J, et al. Paleomagnetic analysis of eastern Tibet: implications for the collisional and amalgamation history of the Three Rivers Region, SW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 24: 291-310
- 36 Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. Tectonophysics, 2000, 326: 269-287
- 37 Yan D P, Zhou M F, Song H L, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze block (South China) [J]. Tectonophysics, 2003, 361: 239-254
- 38 Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. Science, 2001, 294: 1 671-1 677
- 39 Teng L S. Geotectonic evolution of Late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan [J]. Tectonophysics, 1990, 183: 57-76
- 40 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1985. 1-853
- 41 尹赞勋, 张守信, 谢翠华. 论褶皱幕 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 1-106
- 42 Li X, Tatsumoto P M, et al. Age and origin of the Tanghu granite, southeast China: result from U-Pb single zircon and Nd isotopes [J]. Geology, 1989, 17: 395-399
- 43 Chen J, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. Tectonophysics, 1998, 284: 101-133
- 44 杨树峰. 成对花岗岩带和板块构造 [M]. 北京: 科学出版社, 1987. 1-98

(编辑 董 立)