

塔里木盆地巴楚-塔中地区寒武系盐下白云岩储层成岩作用及物性特征

程丽娟^{1,2}, 李忠^{1,2}, 刘嘉庆^{1,2}, 于靖波³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031)

摘要:塔里木盆地巴楚-塔中地区盐下白云岩有效储层空间非均质性较强, 储层分布不仅受颗粒滩、生物礁等高能沉积相带影响, 成岩改造作用成岩改造作用也相当显著。通过对巴楚-塔中地区井下样品的显微观测、地化分析及测井资料配套解释, 详细刻画了盐下白云岩特征, 进一步认识了成岩改造过程及其对白云岩储集体的制约机制。结果表明, 下寒武统盐下白云岩主要为泥粉晶白云岩、颗粒云岩、微生物白云岩和细晶白云岩, 储集体主体呈现出早期经历过大气淡水成岩改造作用, 中期孔隙度保持, 晚期储集体物性进一步改善的演化趋势; 盐下白云岩优质储层是适中白云石化作用、上覆膏盐岩层对下伏层段的遮挡作用, 以及后期热流体溶蚀改造作用共同叠加的结果; 构造-热流体对储层的改造在垂向上分为5个成岩作用带, 即热流体矿物发育带、热流体角砾化作用带、裂缝发育带、溶蚀作用带和热流体白云石胶结带, 其中溶蚀作用带对储层建设作用最强, 其次为裂缝发育带。

关键词:储层; 成岩作用; 热流体白云石化; 盐下白云岩; 寒武系; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Diagenesis and physical properties of subsalt dolomite reservoirs of the Cambrian, Bachu-Tazhong areas, Tarim Basin

Cheng Lijuan^{1,2}, Li Zhong^{1,2}, Liu Jiaqing^{1,2}, Yu Jingbo³

[1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China]

Abstract: The effective subsalt dolomite reservoirs in the Tarim Basin are characterized by great spatial heterogeneity. The reservoir distribution therein is under the influence of both high-energy sedimentary facies belts such as grain shoal and organic reef facies, and diagenetic modification. To further understand the restriction mechanism of diagenetic modification on dolomite reservoirs, we thoroughly described the subsalt dolomite characteristics through microscopic observation, geochemical analysis and logging data interpretation of drilling core samples taken from Bachu-Tazhong areas. The results indicate that the Lower Cambrian subsalt dolomites are dominated by micrite dolomite, grain dolomite, microorganism dolomite and fine-crystalline dolomite. The reservoirs mainly evolved from early-stage diagenetic modification by meteoric water, middle-stage porosity preservation, to continuous improvement of reservoir properties at later stages. The high-quality subsalt dolomite reservoirs are the combined products of proper dolomitization, shielding effect of the overlying gypsolytes on the underlying intervals, and dissolution by thermal fluids in the later periods. Vertically, there are five diagenetic zones in the reservoir under tectonic-hydrothermal modification: hydrothermal mineral developing zone, hydrothermal brecciation zone, fracture developing zone, dissolution zone, and hydrothermal dolomite zone of cementation. Among them, the dissolution zone is the most significant contributor to reservoir improvement, followed by the fracture developing zone.

Key words: reservoir, diagenesis, hydrothermal dolomitization, subsalt dolomite, Cambrian, Tarim Basin

收稿日期: 2019-05-05; 修订日期: 2019-12-26。

第一作者简介: 程丽娟(1987—), 女, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: chenglijuan211@163.com。

通讯作者简介: 李忠(1964—), 男, 研究员, 沉积学与盆地动力学。E-mail: lizhong@mail.iggcas.ac.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05008-003); 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDADA14010201-02)。

目前,盐下碳酸盐岩/白云岩是全球范围内油气勘探的重要领域,在大西洋两岸、西伯利亚和中东等地区已发现大型盐下油气田,巴西盐下贝壳灰岩储层、滨里海盆地和阿姆河右岸盐下礁滩相储层等均有重大工业性油气产出^[1,2]。一般认为,膏盐层不仅具封闭性强的特点,还具有热导率高、生热率低等特征,使膏盐层之下地层成岩作用缓慢,利于原始组构及先存储集空间的保存。近年来,塔里木盆地在中深1、中深1C、中深5等钻井的寒武系盐下碳酸盐岩层位相继获得油气发现,但储层赋存机制及空间展布规律不明确。究其原因,主要是由于塔里木盆地深层-超深层经历复杂埋藏演变,地震探测资料品质较低,加之相关钻井样品稀缺,因此对多期成岩改造及其储层时空效应认识有限。以巴楚、塔中地区下寒武统井下岩心样品为主要分析对象,本文重点针对白云岩化等开展了岩石学、矿物学、地球化学及储集物性测试,结合成像测井等地球物理资料,解析了盐下白云岩类型与形成过程,综合研究了原始沉积组构-后期成岩改造对储层的影响,进而探讨盐下优质白云岩储层成因机制及分布规律。

1 地质背景

塔里木盆地是中国面积最大的含油气内陆盆地,

是在前震旦结晶基底之上叠合不同地质时期、不同属性的原型盆地而长期发展形成的大型叠合盆地。经过长期地质演化,塔里木盆地分为“三隆四坳”七个一级构造单元^[3],巴楚-塔中一带在寒武系沉积之前即为东西走向的古隆起区^[4],因此具有优质储层发育的古地貌条件(图1)。

塔里木盆地寒武系自下而上依次为下寒武统玉尔吐斯组、肖尔布拉克组、吾松格尔组,中寒武统沙依里克组和阿瓦塔格组,上寒武统下丘里塔格组。蒸发盐层主要赋存于中寒武统,以巴楚地区为沉积中心(图1),沿中央隆起带中西段及邻区展布^[5],分布面积在 $2 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[6,7]以上,约占全盆地的1/5,属于区域性盖层及良好的隔挡层、滑脱层;垂向上,巴楚地区膏盐层的累积厚度为120~500 m,塔中地区膏岩层累积厚度在30~140 m,因此,盐下白云岩储层不仅具有十分可观的范围及规模,还具备优质储集体发育条件而成为勘探重点。膏盐层之下的肖尔布拉克组分为“下黑上白”两段^[8],在巴楚地区上下段均发育,厚度可达200 m,其上段物性条件较好而发育有效储集体;向东逐渐减薄,塔中地区仅发育上段颗粒滩沉积(图2)。

碳酸盐岩的热流体改造作用,尤其是构造-热流体作用是当前碳酸盐岩储层研究的热点^[9-11],塔北、

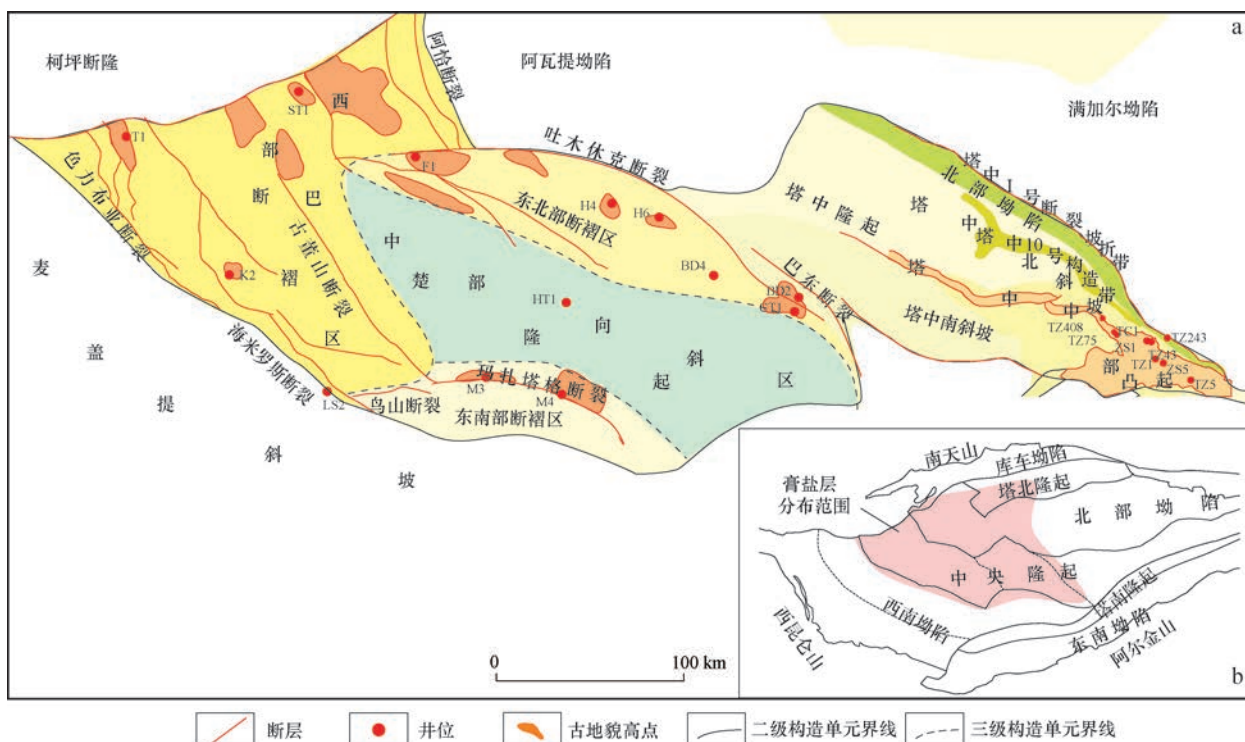


图1 塔里木盆地巴楚-塔中地区构造单元划分及断裂分布

Fig.1 The tectonic unit division and fault distribution in Bachu-Tazhong areas, Tarim Basin

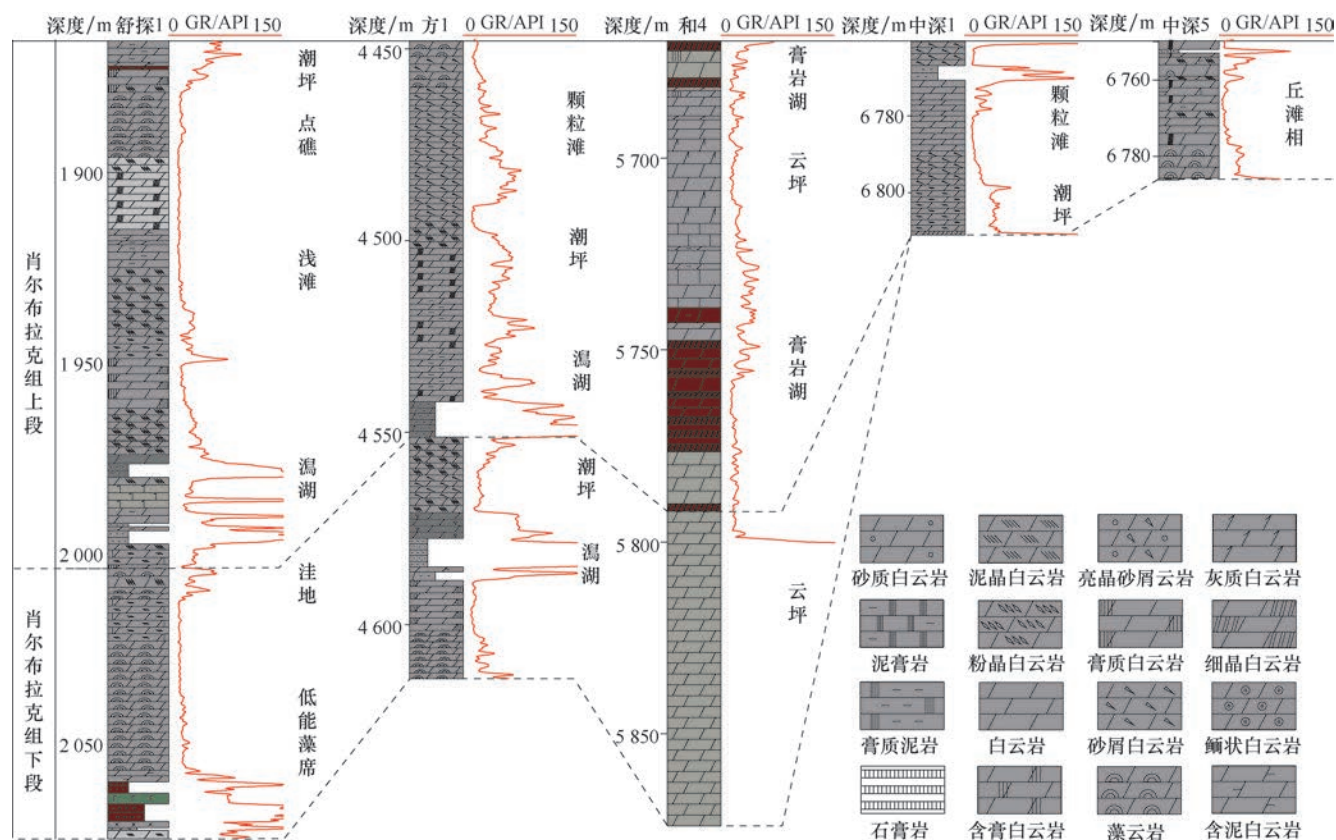


图2 塔里木盆地巴楚-塔中地区肖尔布拉克组地层对比

Fig. 2 Stratigraphic correlation in the Xiaerbulake Formation in Bachu-Tazhong areas, Tarim Basin

塔河、塔中、塔东及柯坪等地区均发育热流体溶蚀作用成因的储层^[12],孔隙度随埋深增加具有加大的现象,近年来众多学者相继提出深部热流体溶蚀模式^[13,14]。塔里木盆地内热流体活动对后期成岩演化具有较强的影响^[15-18],热流体白云石化及热流体溶蚀作用是后期储层形成及改善的关键^[19]。但由于证据链等问题,对于这些认识的争论极大;此外,深层是否存在相关成因的规模储层也莫衷一是。

2 岩石学特征

2.1 白云岩类型

寒武纪时期,塔里木盆地位于赤道附近低纬度带^[20-22],早-中寒武时期随着蒸发作用逐渐加强,由局限台地向蒸发台地逐渐演化^[23]。肖尔布拉克组白云岩原始组构保留程度不同,台内滩环境下形成的颗粒白云岩、鲕粒白云岩和微生物礁环境下形成的泡沫绵层状藻云岩、叠层石等微生物岩原始组构保存较好,而受较强成岩改造形成的细晶白云岩中原始组构几乎消失殆尽^[24](图3)。整体来看,盐下肖尔布拉克组白云岩主要分为4种岩石类型:泥粉晶白云岩、细晶白云

岩、颗粒白云岩和微生物白云岩。盐下白云岩基质部分白云石晶体直径一般在0.2 mm以下,为泥粉晶-粉细晶白云岩,早期白云石化作用较强。

1) 泥晶白云岩,包括泥晶云岩和含膏泥晶白云岩两种(图3a—c),孔隙度普遍偏低,在裂缝发育段或溶蚀作用发育带孔隙度可达1%。泥晶云岩主要分布在肖尔布拉克组下段,在潟湖相中普遍发育;含膏泥晶白云岩主要发育在膏岩湖环境,泥晶白云岩段局部可发生深埋溶蚀作用而具有一定的孔隙度。

2) 颗粒云岩为颗粒滩相沉积,粒间不完全/完全充填白云石、硬石膏、硅质等胶结物而造成孔隙度一般在2%以下,局部可达5%(图3e—f)。由图1可见大部分钻井分布在古地貌高点,古隆起部位发育颗粒滩、生物丘相沉积,对储集体形成具有关键性控制作用^[25],研究区颗粒白云岩有效储集体以舒探1井、楚探1井和中深1井肖尔布拉克组上段为典型代表。

3) 粉细晶白云岩原始沉积组构几乎消失殆尽,细晶云岩中晶体大小较均匀(主要为0.10~0.25 mm),晶体呈半自形-自形,晶间孔发育,晶间孔大小在0.1 mm以上,前人推测其原岩为颗粒白云岩^[26],在巴楚地区舒探1井肖尔布拉克组上部最为典型,储集

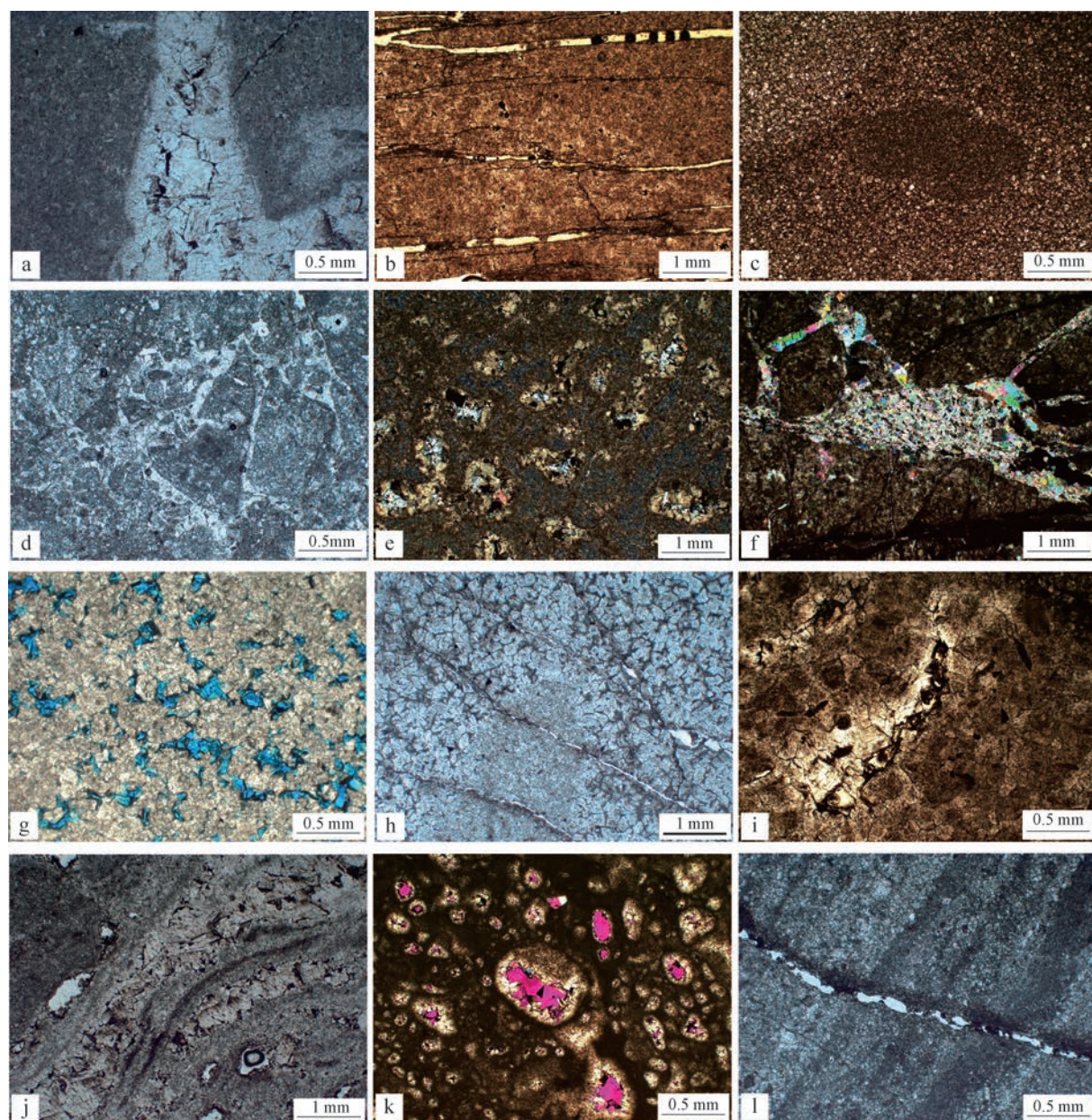


图3 塔里木盆地巴楚-塔中地区下寒武统盐下白云岩类型与物性特征

Fig. 3 Rock types and physical properties of the Lower Cambrian subsalt dolomite in Bachu-Tazhong areas, Tarim Basin

a. 泥晶白云岩裂缝被白云石、石英充填, 舒探1井, 埋深1 992.4 m, $50\times$ -; b. 泥粉晶白云岩裂缝发育, 康2井, 埋深5 491.5 m, $25\times$ -; c. 泥粉晶白云岩, 中深1井, 埋深6 721.97 m, $50\times$ -; d. 角砾化白云岩, 舒探1井, 埋深1 888.6 m, $50\times$ -; e. 硅化的鲕粒白云岩, 康2井, 埋深5 633.49 m, $25\times$ -; f. 早期长柱状硬石膏胶结的泥晶云岩, 方1井, 埋深4 369.5 m, $25\times$ -; g. 细晶白云岩发育晶间孔和晶间溶孔, 舒探1井, 埋深1 917.7 m, $50\times$ -; h. 细晶白云岩裂缝发育, 舒探1井, 埋深1 989.2 m, $25\times$ -; i. 中细晶白云岩, 方1井, 埋深4 572.8 m, $50\times$ -; j. 叠层石, 粗晶鞍状白云石顺层分布, 热流体溶孔发育, 舒探1井, 埋深1 885.8 m, $25\times$ -; k. 泡沫绵层藻云岩, 方1井, 埋深4 599.7 m, $50\times$ -; l. 层纹石, 舒探1井, 埋深1 883.6 m, $50\times$ -

物性良好, 细晶白云岩受白云石化改造相对较强但未发生过白云石化作用, 孔隙度最高可达12.7%。

4) 微生物白云岩, 包括叠层石白云岩和泡沫绵层石白云岩, 形成于肖尔布拉克组沉积期水下藻丘等环境, 孔隙度不均匀分布在0~6%, 但孔隙连通性较差, 连通孔隙一般在3%以下。蓝细菌是塔里木盆地寒武纪时期微生物的主要类型^[8], 微生物岩建造多与蓝细

菌相关。叠层石主要由泥粉晶白云岩基质和亮晶白云石胶结物组成, 具有明暗相间的纹层结构, 类似粘结岩的特征。叠层石储集物性差异较大, 非均质性较强, 不规则溶蚀孔洞主体呈顺层状分布(图3j), 在舒探1井肖尔布拉克组上部最典型。泡沫绵层状藻云岩由泥晶基质和多期胶结物构成, 储层非均质性强, 主要见于方1井肖尔布拉克组下部(图3k)。

2.2 成岩作用特征

流体成因类型及活动方式是深层流体-岩石作用研究的前沿问题^[27]。塔里木盆地巴楚-塔中地区盐下白云岩孔洞及裂缝中充填多期白云石、硬石膏、硅质以及少量的方解石、萤石、重晶石等(图4)。由早到晚成岩序列为:准同生白云石化(D1)(岩溶作

用)、浅埋藏白云石化(D2)、柱状硬石膏(An)、油气充注、深埋藏白云石化(D3)(埋藏溶蚀作用)、热流体白云石化(D4)、热流体方解石充填(C1)、硅质流体(Q1)(热流体溶蚀作用)、油气充注。其中白云石化作用、构造-热流体改造作用和岩溶作用是研究区最主要的成岩作用,对盐下白云岩储层具有显著建设性改造。

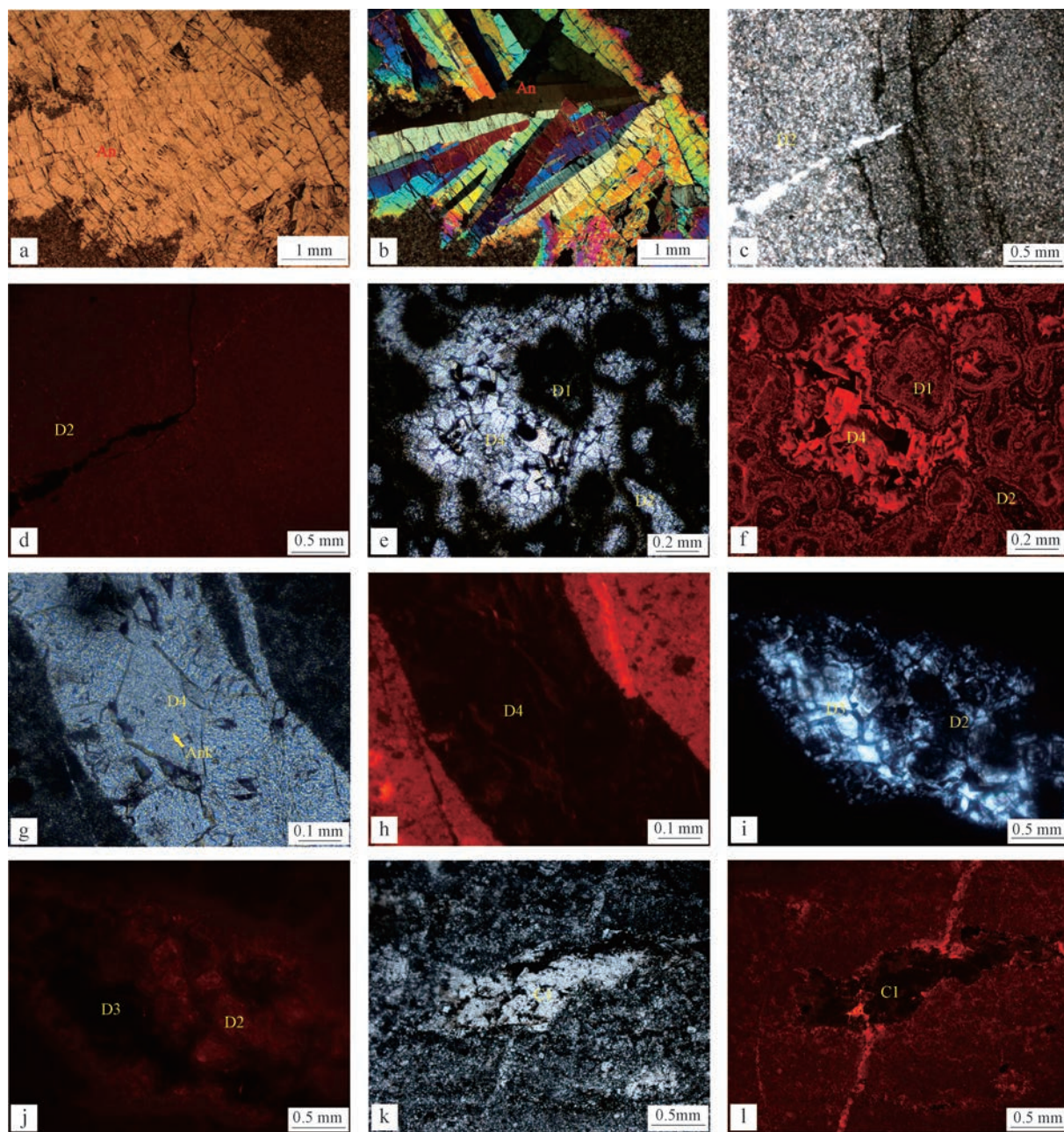


图4 塔里木盆地塔中-巴楚地区盐下白云岩胶结充填类型与特征

Fig. 4 Types and characteristics of the cementation and filling in subsalt dolomites in Tazhong-Bachu areas, Tarim Basin

a. 泥晶白云岩内充填长柱状硬石膏,康2井,埋深5 490.56 m,25×-; b. 同a,25×+; c. 泥粉晶白云岩,康2井,埋深5 491.1 m,50×-; d. 同c,50×+; e. 泡沫绵层藻云岩充填多期白云石胶结物,方1井,埋深4 592.9 m,50×-; f. 同e,阴极发光图(CL); g. 泥晶白云岩裂缝被铁白云石充填,舒探1井,埋深2 062.01 m,100×-; h. 同g,CL图; i. 粉细晶白云岩,舒探1井,埋深1 992.5 m,25×-; j. 同i,CL图; k. 泥粉晶云岩孔洞被方解石充填,舒探1井,埋深1 883.6 m,25×-; l. 同k,CL图

2.2.1 基质白云石化作用

白云石化作用对盐下白云岩矿物成分的改造作用较强,基质部分白云石晶体最大为细晶;白云石胶结物多为细晶白云石,仅部分样品中见中粗晶白云石充填物,且孔洞充填物充填程度较低,证明尽管白云石化期次较多但对白云石晶体大小及形态的改造程度并不高,整体说明盐下白云岩储层未发生过强烈的基质白云石化作用。此外,部分孔洞充填的白云石晶体受后期溶蚀作用改造,因此仍发育有可观的储集空间。

根据岩石学特征分析,对比4种类型的白云岩成岩作用特征(图4),泥晶白云岩主要成岩作用为膏质胶结作用(图4a,b)、准同生白云石化作用(图4c,d)和浅埋藏白云石化作用(图4i,j);颗粒云岩主要成岩作用为泥晶化作用、浅埋藏云化作用和亮晶胶结作用(图3e,f);粉细晶云岩原始组构及早期成岩作用痕迹受晚期成岩作用覆盖,呈现成岩改造后特征,受热流体云化作用显著(图4g,h);微生物云岩成岩作用最复杂,微生物云化作用、埋藏云化作用及热流体云化作用均可见,微生物云岩成岩序列发育最完整(图4e,f)。微生物云岩中藻格架白云石化快速,明显受微生物云化作用较强;早期纤维状胶结物仅发育在泡沫状藻云岩中;藻云岩受藻格架空间形态影响,泡沫绵层状藻云

岩孔洞内充填物显示其成岩流体期次最多、孔隙空间充填相对完全。

2.2.2 构造—热流体作用

塔里木盆地寒武系发育热流体白云岩储层^[12],深部流体尤其是热流体白云石化改造作用显著。研究区见铁白云石(图4g,图4h,图5a)、重晶石(图5a,b)、鞍状白云石、萤石(图5c,d)及石英、玉髓(图5e,f)等热流体成因矿物(图5)。重晶石与铁白云石共生,充填在裂缝内(图5a);鞍状白云石充填孔洞缝,在叠层石内具有顺层分布的特点(图3j),鞍状白云石发育次生溶孔,揭示后期存在酸性流体的注入;萤石化作用一般认为与深部热流体活动相关^[28],方1井泡沫绵层状藻云岩中萤石与鞍状白云石伴生(图5c)。硅质呈半自形粒状石英或隐晶质玉髓充填在中粗晶白云石或鞍状白云石的剩余孔之间,显示石英交代白云石的特征(图5e,f)。热流体白云石晶间孔及晶间溶孔内见沥青充填而非粘土矿物,进一步说明其溶蚀孔洞是热流体溶蚀作用的结果^[13]。构造控制的热流体白云石化作用^[10]是研究区晚成岩阶段储层改善的重要因素,但热流体对储层改善程度、影响规模以及热流体影响的垂向地层学特征等关键细节目前研究尚不深入。

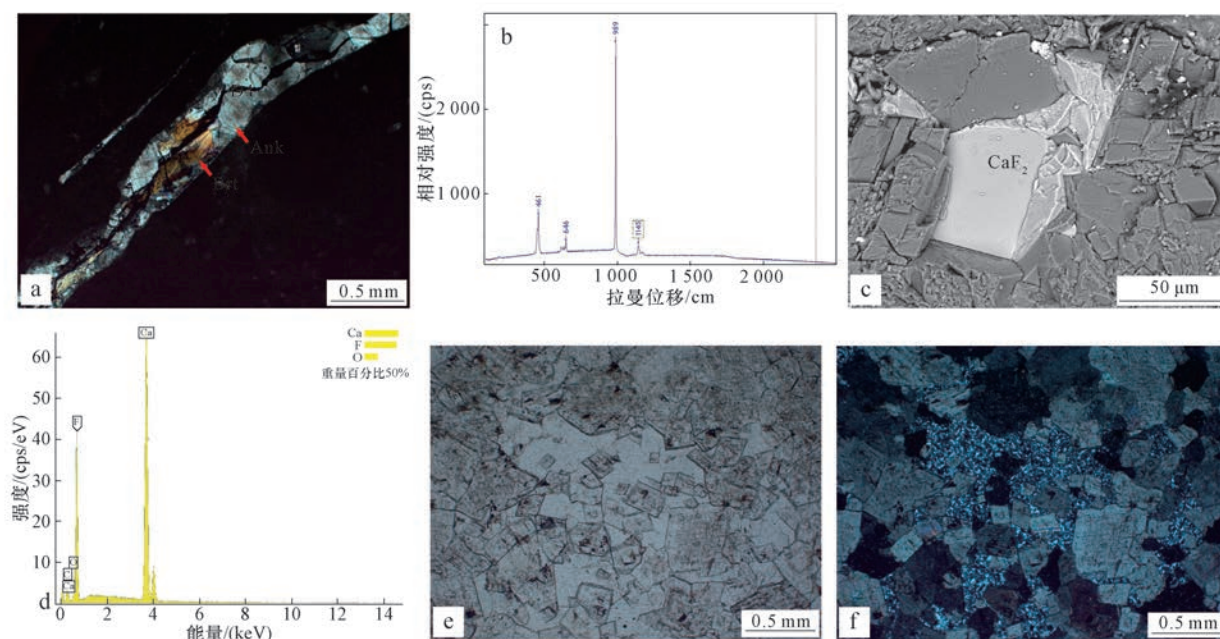


图5 塔里木盆地塔中-巴楚地区盐下白云岩热流体成因矿物

Fig.5 Minerals of hydrothermal fluid origin in the subsalt dolomites in Tazhong-Bachu areas, Tarim Basin

a. 泥晶白云岩裂缝被铁白云石、重晶石充填,舒探1井,埋深2 062.01 m,25×-; b. 图a中重晶石激光拉曼谱图; c. 方1井,埋深4 592.9 m,泡沫绵层藻云岩孔隙中充填白云石、萤石,背散射图,600×; d. 图c中萤石能谱谱图; e. 粉细晶白云岩硅质充填,舒探1井,埋深1 992.6 m,50×-; f. 同e,50×+

3 地球化学特征

3.1 碳氧同位素分布特征

白云石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 受成岩流体性质、温度及盐度的共同影响,因此可以通过 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布特征分析白云石成因及其成岩流体性质。本次研究针对各种类型的白云岩分别进行了 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测试,测试结果(图6)显示盐下体系内不同成因类型的白云石 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在明显的差异。D1 代表的泡沫绵层状藻云岩格架部分 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分别位于 $2.63\text{‰} \sim 3.3\text{‰}$ 和 $-4.48\text{‰} \sim 3.3\text{‰}$ 之间;D2 代表的泥粉晶白云石 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分别位于 $-3.76\text{‰} \sim 1.94\text{‰}$ 和 $-5.89\text{‰} \sim -3.2\text{‰}$ 之间;D3 代表的粉细晶白云石 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分别位于 $-1.74\text{‰} \sim 2.6\text{‰}$ 和 $-8.95\text{‰} \sim -6.17\text{‰}$ 之间;D4 代表的中粗晶白云石 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分别位于 $-1.2\text{‰} \sim 2.1\text{‰}$ 和 $-12.3\text{‰} \sim -9.7\text{‰}$ 之间。

泡沫绵层状藻云岩格架白云石(D1)碳氧同位素均具有明显的正偏特征,形成于蒸发海水环境下,代表最早期快速的白云石化作用^[23,29];泥粉晶白云石(D2) $\delta^{13}\text{C}$ 值相对正偏,主要成岩流体为蒸发海水,属于浅埋藏环境下渗透回流白云石化成因;粉细晶白云石(D3) $\delta^{13}\text{C}$ 值多具有负偏特征,早寒武世全球海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值大约在 $-7\text{‰} \sim -9\text{‰}$ 之间^[30],粉细晶白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与寒武纪海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围相当,显示受海源流体和温度控制较强,代表其形成于中深埋藏阶段;中粗晶白云石(D4) $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -10‰ 以下,具有显著的负偏特征,受

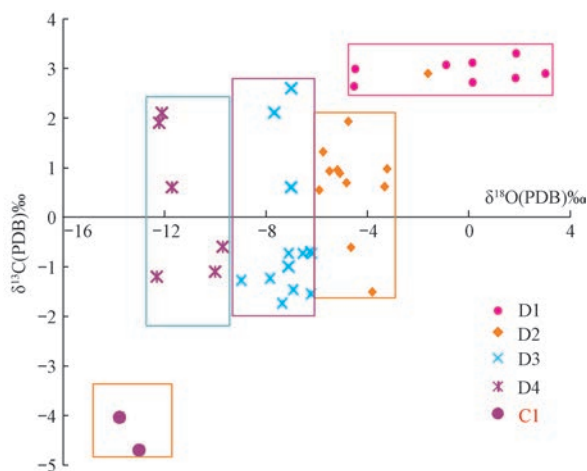


图6 塔里木盆地巴楚-塔中地区寒武系盐下白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 交会图

Fig. 6 The cross-plot of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ for the Lower Cambrian subsalt dolomites in Tazhong-Bachu areas, Tarim Basin

热流体作用影响显著;方解石充填物(C1)分布于中粗晶白云石晶间孔中, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均具有明显的负异常特征,属于热流体成因方解石,为成岩作用晚期 Mg^{2+} 源不足的结果。整体来看,盐下白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有明显正偏的特征,最高可达 $+3.3\text{‰}$,主要原因为盐下白云岩早期形成于较高的盐度环境,后期经受较强的同位素分馏作用。

3.2 锶同位素

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 不受温压条件、盐度等因素影响,因此 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 仍能反映矿物形成时的流体同位素组成特征^[31],寒武纪时期海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布在 $0.7087 \sim 0.7094$ ^[30]。研究区分别对白云石和硬石膏等胶结物进行 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测试,不同成因白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值具有显著的差异(图7)。D2 所代表的泥粉晶白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分布于 $0.709 \sim 0.7116$,D3 代表的粉细晶白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分布于 $0.7066 \sim 0.7092$,D4 代表的中粗晶白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在 0.71 以上。

泥粉晶白云石(D2)具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,结合其部分样品富含粘土矿物及陆源碎屑的岩石学特征,判断其受壳源锶影响较大,受大气淡水作用较强;粉细晶白云岩(D3) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与同时期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 一致,显示海水成岩作用的显著影响;其中发生硅化作用的粉细晶白云岩样品具有明显的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 负异常,是幔源硅质后期叠加改造的结果;中粗晶白云石(D4) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值存在显著正异常,证实其为热流体成因,由于热流体一般含有较多的放射性锶同位素,致使热流体成因白云石锶同位素一般具有正异常特征。此外,大部分硬石膏胶结物受热流体改造而具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。

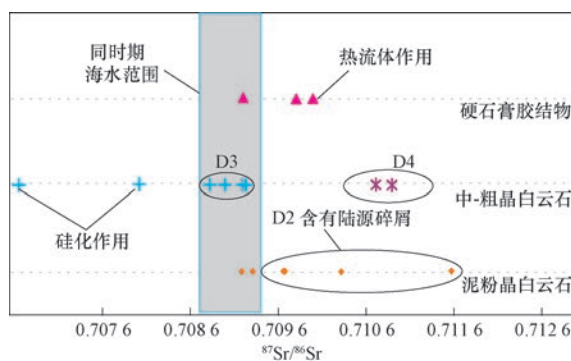


图7 塔里木盆地巴楚-塔中地区寒武系盐下白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分布特征

Fig. 7 Characteristics of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ distribution in the Cambrian subsalt dolomites in Tazhong-Bachu areas, Tarim Basin

3.3 流体包裹体特征

研究区流体包裹体普遍具有较高的温度和盐度特征(图8)。孔洞内白云石包裹体均一温度分为两个区间,其中粉细晶白云石(D2-3)包裹体主要集中在70~110℃;中粗晶白云石(D4)包裹体主要集中分布在120~180℃,显示热流体成因特征。膏质胶结物内流体包裹体均一温度分布在60~100℃、110~200℃,由于膏质组分易溶解的特征,受成岩流体影响较显著,其高温包裹体的存在再次证明热流体作用的存在。石英包裹体均一温度相对比较稳地,研究区粒状石英多分布在白云石晶间孔中,其包裹体均一温度分布在130~170℃,具有较高的均一温度特征。盐下白云岩受晶体大小及形态等因素影响,深埋白云石化与热流体云化成因白云石样品较多,因而普遍显示白云石形成温度偏高。

4 盐下白云岩优质储集体类型

4.1 大气淡水溶蚀型储集体

由颗粒白云岩、鲕粒白云岩等构成的颗粒滩相高能沉积和叠层石、藻云岩组成的微生物岩构成的藻丘相是盐下白云岩有效储层发育的主要相类型,具有高能沉积的原始沉积组构特征。藻格架及叠层石的纹层结构等原始沉积组构对储集体发育起到决定性的作用,但藻格架将储集空间分割为不规则的形态,孔隙流体的流通等受到一定的阻碍作用,该类储集空间内胶结物形成速率大于溶蚀作用速率,大量胶结物的形成(图4f)对储层物性具有显著地破坏作用,其孔隙度多在2%以下;叠层石储集空间呈顺层状分布,溶蚀作用与胶结作用共存,孔隙度约在5%上下,储集物性相对

较好。颗粒滩相白云岩储层在研究区孔隙度最高可达10%以上,发育优质白云岩储集体(图9)。中深1井是塔中低凸起颗粒滩相沉积的典型代表,该井肖尔布拉克组与上覆吾松格尔组之间存在明显的三级不整合界面,成像测井资料显示肖尔布拉克组发育厚约50m的孔洞缝复合型储集体(图9),其上段物性最好,向下储集空间逐渐减少。肖尔布拉克组颗粒滩体系原始物性较好,叠加早期大气淡水溶蚀作用、上覆膏岩层的遮挡作用,其早期形成的储层空间得到完美保存。

针对储集体发育规模而言,研究区内早期受同生岩溶作用改造与上覆致密遮挡层屏蔽的颗粒滩相沉积区是规模性有效储层发育的最佳区域,颗粒滩相沉积是物质基础,同生准同生期岩溶改造是储集物性进一步改善的重要条件,蒸发岩形成的隔挡层是储层最终保存的重要因素,储集空间主要为保存的原始粒间孔和溶蚀作用形成的孔洞。塔里木盆地前寒武纪基底顶面埋深显示巴楚隆起与塔中隆起在寒武系沉积之前为埋深相对较浅的低凸起^[4],其中塔中隆起区在寒武系沉积之前相对巴楚隆起埋深更浅。整体来看,盐下白云岩有效储集体空间展布特征在横向上受相控显著,在垂向上受早期海平面变化及晚期构造断裂控制明显;岩溶型储层受海平面变化相关的层序地层特征控制较强,其中对颗粒滩等高能沉积相带的改造最为显著。

4.2 构造-热流体白云岩储集体

前人对构造-热流体白云岩储层进行了大量研究,以断裂为中心横向上逐渐由热流体角砾岩化作用带、溶蚀作用带过渡到鞍状白云石充填带已基本成为共识^[10],但缺乏相关垂向成岩地层学研究。本次以舒探1井、方1井为重点研究对象,通过进一步的矿物学、

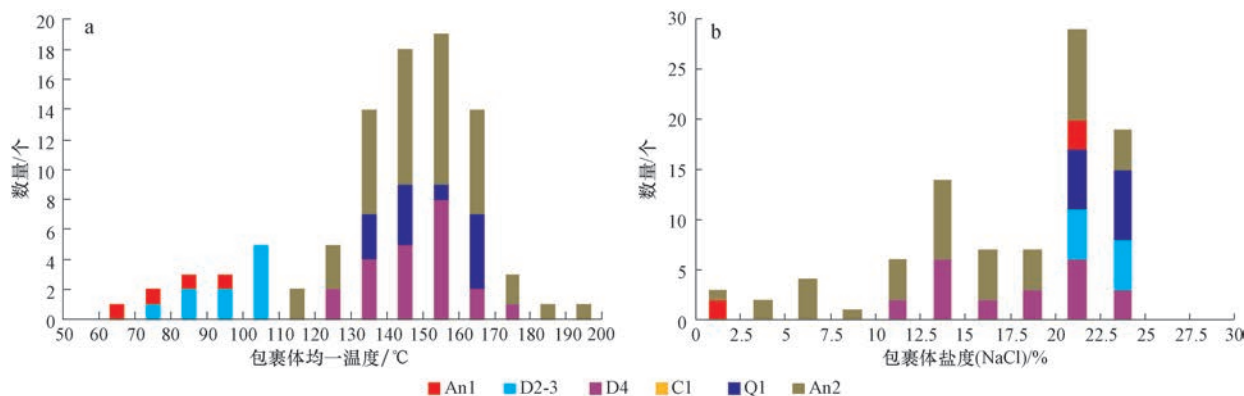


图8 塔里木盆地巴楚-塔中地区寒武系盐下白云岩胶结物包裹体均一温度(a)和盐度分布(b)直方图

Fig. 8 Histograms showing homogenization temperatures(a) and salinities(b) measured from cement inclusions in the Cambrian subsalt dolomites in Tazhong-Bachu areas, Tarim Basin

岩石学及微米 CT 等观测分析,解剖构造-热流体型白云岩储集体垂向成岩地层学演化特征。

研究发现,构造-热流体白云岩储集体从下往上依次发育热流体矿物发育带(A)、热流体角砾化作用带(B)、裂缝发育带(C)、溶蚀作用带(D)和热流体白云石胶结带(E)等5个成岩作用带。热流体矿物发育带(图10a)发育特征矿物充填组合,舒探1井在该带内呈现重晶石与热流体成因铁白云石的矿物组合(图10a),充填物富含Fe、Ba等重金属元素。热流体角砾化作用带(图10b)多被致密胶结,物性条件较差。裂

缝发育带(图10c)发育裂缝型储集体,属于构造-热流体型储集体中较为重要的储层类型,该带内白云石晶体已发生明显的重结晶作用。溶蚀作用带(图10d)多由颗粒滩相等原始高孔渗相带演化而来,热流体改造形成的灰白色细晶白云岩中白云石晶体多呈自形;该带内褪色及溶蚀作用强,对储层建设作用最强,溶蚀孔洞极为发育并伴有微裂缝,属于构造-热流体型储集体中最优质的储层发育段。热流体白云石胶结带(图10e)主要发育热流体成因的胶结物,随着热流体的侵入,流体性质逐渐发生变化且受上覆遮挡层的遮

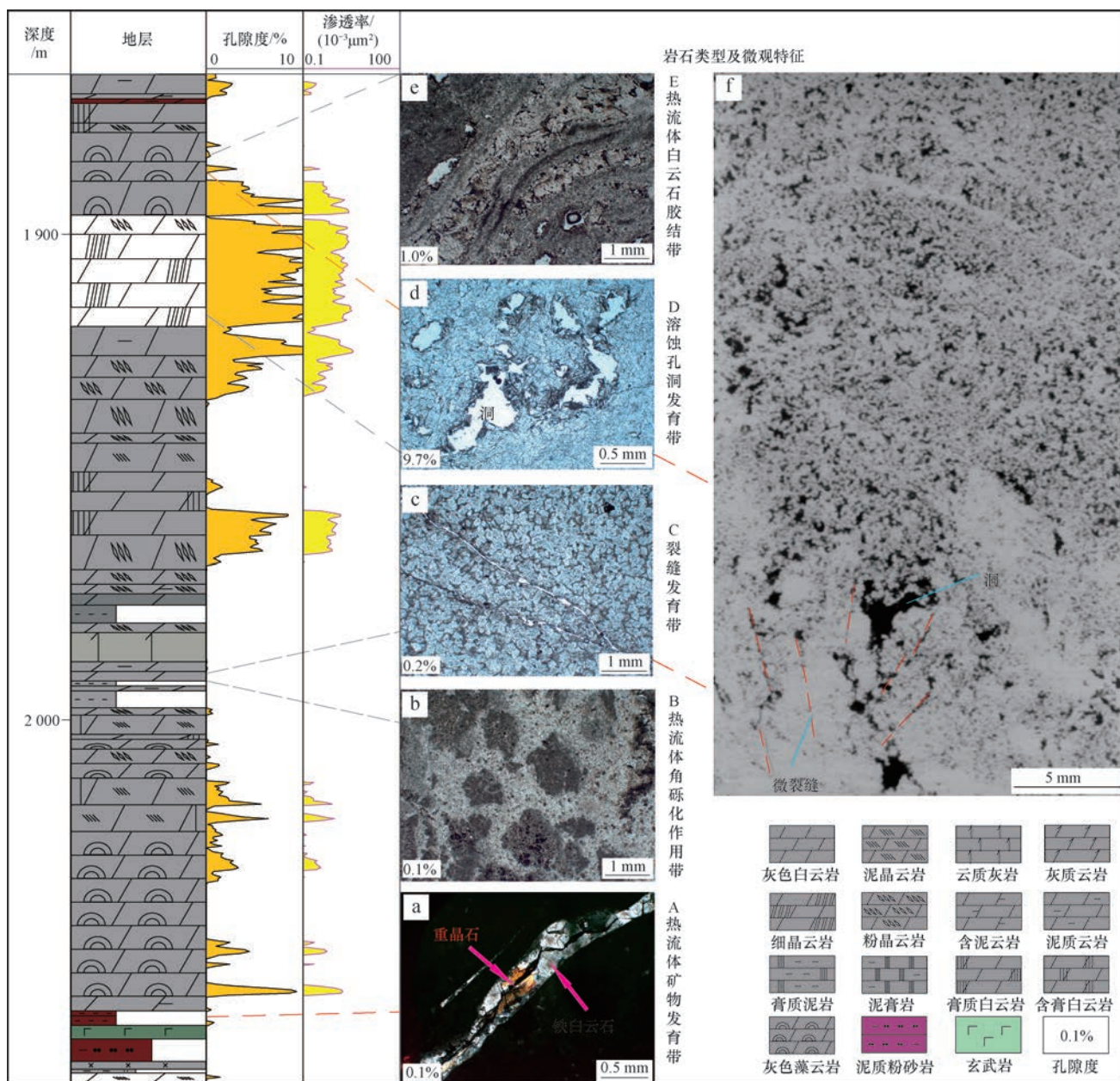


图10 塔里木盆地巴楚-塔中地区构造-热流体改造型白云岩储层垂向演化特征

Fig. 10 Vertical evolution of dolomite reservoirs modified by deformation and hydrothermal fluids in Tazhong-Bachu areas, Tarim Basin
a. 泥晶白云岩裂缝被重晶石、铁白云石充填,舒探1井,埋深2 062.01 m, 25 × -; b. 角砾云岩,埋深1 992.64 m, 25 × -; c. 灰色含泥白云岩,埋深1 989.26 m, 25 × -; d. 细晶云岩,埋深1 918.71 m, 25 × -; e. 叠层石白云岩,埋深1 885.78 m, 50 × -; f. 细晶云岩 CT 成像特征,埋深1 916.97 m

挡作用,热流体成因的白云石等胶结物在该段发生沉淀,与热流体矿物发育带内的白云石相比,该段的白云石铁质等重金属含量低,阴极发光呈亮红色特征。受限的热流体活动使得低渗透性的泥晶云岩段(A-B段)热流体白云石化不发育;在受上覆遮挡层遮挡作用的相对高渗透性的叠层石段热流体白云石胶结物发育,存在一定量的热流体溶蚀孔;在高渗透性的细晶云岩段,地层发生强褪色溶蚀作用,D-E两个作用带发育规模受相带横向展布规模及热流体改造强度的共同控制。

构造-热流体改造型白云岩储层一般发育在断裂体系发育的背斜构造单元内,构造-热流体改造的证据不仅在图10所展示的200 m垂向范围内,在厘米级尺度上也有较好的显示特征(图10f),在实际研究中由于地层物性、展布规律及分布规模的复杂性,这五个成岩作用带的发育各有其独特的特征,这样的实例是进行垂向成岩地层学研究很好的选择^[32]。构造-热流体型白云岩储层在垂向的展布规模主要受断裂分布控制;在横向的展布范围和强度主要受原始沉积组构控制,孔渗条件优质相带为相对开放性体系,利于热流体对岩石进行溶蚀作用,使原始孔渗等物性进一步改造而形成规模储层。热流体溶蚀作用发育部位不仅与断裂分布紧密相关,还与高孔渗层段的分布有一定相关性。

5 结论

1) 下寒武统盐下白云岩主要为泥粉晶白云岩、颗粒白云岩、微生物白云岩和细晶白云岩四类。优质储层发育在细晶白云岩、颗粒白云岩中,微生物白云岩储层中叠层石物性较好,泡沫绵层状藻云岩储层物性较差。

2) 盐下白云岩优质储层成岩成因类型主要为大气淡水溶蚀型储集体和构造-热流体改造型储集体,前者是早期大气淡水淋滤作用、后期膏岩层对颗粒滩相先存孔隙保存作用的叠加结果,后者则与适中白云石化、上覆膏岩层屏蔽和热流体溶蚀的共同作用密切相关。总体上,优质储层呈现早期经历大气淡水改造作用,中期孔隙度保持,晚期储集空间进一步改善的演化趋势。

3) 热流体对储层的改造具有明显的垂向成岩改造特征,由下向上依次发育5个成岩作用带:热流体矿物发育带(A)、热流体角砾化作用带(B)、裂缝发育带(C)、溶蚀作用带(D)和热流体白云石胶结带(E),其中溶蚀作用带对储层建设作用最强,其次为裂缝发育带。

参考文献

- [1] Thompson D L, Stilwell J D, Hall M. Lacustrine carbonate reservoirs from Early Cretaceous rift lakes of Western Gondwana: Pre-Salt coquinas of Brazil and West Africa[J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(1): 26-51.
- [2] Muniz M C, Bosence D W J. Pre-salt microbialites from the Campos Basin (offshore Brazil): image log facies, facies model and cyclicity in lacustrine carbonates[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2015, 418(1): 221-242.
- [3] 贾承造, 魏国齐, 姚慧君, 等. 盆地构造演化与区域构造地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 6-42.
Jia Chengzao, Wei Guoqi, Yao Huijun, et al. Basin tectonic evolution and regional tectonic geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 174.
- [4] 邹光辉, 李浩武, 徐彦龙, 等. 塔里木克拉通基底古隆起构造-热事件及其结构与演化[J]. *岩石学报*, 2011, 28(8): 2435-2452.
Wu Guanghui, Li Haowu, Xu Yanlong, et al. The tectonothermal events, architecture and evolution of Tarim craton basement palaeo-uplifts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 28(8): 2435-2452.
- [5] 汤良杰, 黄太柱, 邱海峻, 等. 塔里木盆地中央隆起带中、西段及邻区中、下寒武统盐相关构造及其变形机理[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(1): 33-43.
Tang Liangjie, Huang Taizhu, Qiu Haijun, et al. Salt-related structure and deformation mechanism of the Middle-Lower Cambrian in the middle-west parts of the Central Uplift and adjacent areas of the Tarim Basin[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2013, 43(1): 33-43.
- [6] 郑和荣, 吴茂炳, 邹兴威, 等. 塔里木盆地地下古生界白云岩储层油气勘探前景[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 1-8.
Zheng Herong, Wu Maobing, Wu Xingwei, et al. Oil-gas exploration prospect of dolomite reservoir in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 28(2): 1-8.
- [7] 吴根耀, 李曰俊, 刘亚雷, 等. 塔里木西北部乌什-柯坪-巴楚地区古生代沉积-构造演化及成盆动力学背景[J]. *古地理学报*, 2013, 15(2): 203-218.
Wu Genyao, Li Yuejun, Liu Yalei, et al. Paleozoic sedimento-tectonic evolution and basin dynamic settings in Wushi-Kalpin-Bachu area, northwest Tarim[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(2): 203-218.
- [8] 余浩元, 蔡春芳, 郑剑锋, 等. 微生物结构对微生物白云岩孔隙特征的影响: 以塔里木盆地柯坪地区肖尔布拉克组为例[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(2): 233-243.
Yu Haoyuan, Cai Chunfang, Zheng Jianfeng, et al. Influence of microbial textures on pore characteristics of microbial dolomites: a case study of Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Keping area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(2): 233-243.
- [9] Machel H G, and J. Lonner, Hydrothermal dolomite—a product of poor definition and imagination[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3-4): 163-171.
- [10] Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [11] Cai C, Hu W, Worden R H. Thermochemical sulphate reduction in Cambro-Ordovician Carbonates in Central Tarim[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(6): 729-741.
- [12] 邵小明, 文山师, 刘存革, 等. 塔河油田下寒武统肖尔布拉克组构造控制热液白云岩储层分布与勘探前景[J]. *地质科技情报*, 2017(02): 151-155.

- Shao Xiaoming, Wen Shanshi, Liu Cunge, et al. Distribution and exploration prospect of structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir in Xiaerbulake formation of Lower Cambrian, Tahe oil field [J]. Geological Science and Technology Information, 2017 (02): 151-155.
- [13] 凌东明, 姚仙洲, 田军, 等. 地震振幅差异属性在低序级断层定向识别中的应用——以塔里木盆地轮南油田为例[J]. 断块油气田, 2019, 26(01): 33-36.
- Ling Dongming, Yao Xianzhou, Tian Jun, et al. Application of seismic amplitude change attribute to direction identification of low-level fault: a case study of Lunnan Oilfield, Tarim Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(01): 33-36.
- [14] Zhu D, Meng Q, Jin Z, et al. Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim basin, northwestern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59(59): 232-244.
- [15] 王玉伟, 陈红汉, 郭会芳, 等. 塔里木盆地顺1走滑断裂带超深储层油气充注历史[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 972-989.
- Wang Yuwei, Chen Honghan, Guo Huifang, et al. Hydrocarbon charging history of the ultra-deep reservoir in Shun 1 strike-slip fault zone, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 972-989.
- [16] 李晓剑, 王毅, 李慧莉, 等. 塔里木盆地中央隆起带: 新元古代造山型基底拼合带——来自深钻孔的碎屑记录证据[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1131-1145.
- Li Xiaojian, Wang Yi, Li Huili, et al. Central uplift of Tarim Basin being the Neoproterozoic basement structure zone of orogeny origin: Evidences from clastic samples of deep holes [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1131-1145.
- [17] 杨宗玉, 罗平, 刘波, 等. 塔里木盆地阿克苏地区下寒武统玉尔吐斯组两套黑色岩系的差异及成因[J]. 岩石学报, 2017, 33(6): 1893-1918.
- Yang Zongyu, Luo Ping, Liu Bo, et al. The difference and sedimentation of two black rock series from Yurtus Formation during the earliest Cambrian in the Aksu area of Tarim Basin, Northwest China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(6): 1893-1918.
- [18] 李佳蔚, 李忠, 邱楠生, 等. 塔里木盆地石炭-二叠纪异常热演化及其对深部构造-岩浆活动的指示[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9): 3318-3329.
- Li Jiawei, Li Zhong, Qiu Nansheng, et al. Carboniferous-Permian abnormal thermal evolution of the Tarim basin and its implication for deep structure and magmatic activity [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(9): 3318-3329.
- [19] 黄擎宇, 刘迪, 叶宁, 等. 塔里木盆地寒武系白云岩储层特征及成岩作用[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(6): 63-74.
- Huang Qingyu, Liu Di, Ye Ning, et al. Reservoir characteristics and diagenesis of the Cambrian dolomite in Tarim basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(6): 63-74.
- [20] 方大钧, 沈忠悦. 塔里木地块各时代视磁极及板块漂移[J]. 浙江大学学报(理学版), 2001, 28(1): 100-106.
- Fang Dajun, Shen Zhongyue. Phanerozoic apparent polar-wander paths of Tarim and plate motion [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2001, 28(1): 100-106.
- [21] Li X Z, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis [J]. Precambrian Research, 2008, 160(1-2): 179-210.
- [22] 王洪浩, 李江海, 杨静懿, 等. 塔里木陆块新元古代-早古生代古板块再造及漂移轨迹[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6): 637-647.
- Wang Honghao, Li Jianghai, Yang Jingyi, et al. Paleo-plate reconstruction and drift path of Tarim block from Neoproterozoic to early Palaeozoic [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(6): 637-647.
- [23] 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 340-349.
- Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, et al. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoirs in Lower-Middle Cambrian, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 340-349.
- [24] 倪新锋, 黄理力, 陈永权, 等. 塔中地区深层寒武系盐下白云岩储层特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2017(3): 489-498.
- Ni Xinfeng, Huang Lili, Chen Yongquan, et al. Characteristics and main controlling factors of the Cambrian pre-salt dolomite reservoirs in Tazhong Block, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017(3): 489-498.
- [25] 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.
- Zhang Tao, Yan Xiangbin. A discussion on main factors controlling deep carbonate reservoirs in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 745-754.
- [26] 李庆, 胡文瑄, 钱一雄, 等. 塔里木盆地肖尔布拉克组溶蚀型白云岩储层发育特征[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 522-530.
- Li Qing, Hu Wenxuan, Qian Yixion, et al. Features of dissolved dolostone reservoirs in the Xiaerbulak Formation, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 522-530.
- [27] 李忠. 盆地深层流体-岩石作用与油气形成研究前沿[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 807-816.
- Li Zhong. Research frontiers of fluid-rock interaction and oil-gas formation in deep-buried basins [J]. Bulletin of mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 807-816.
- [28] 李忠, 刘嘉庆. 沉积盆地成岩作用的动力机制与时空分布研究若干问题及趋向[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 837-848.
- Li Zhong, Liu Jiaqing. Key problems and research trend of diagenetic geodynamic mechanism and spatio-temporal distribution in sedimentary basins [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 837-848.
- [29] 吕修祥, 陈佩佩, 陈坤, 等. 深层碳酸盐岩差异成岩作用对油气分层聚集的影响——以塔里木盆地塔中隆起北斜坡鹰山组为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 957-971.
- Lyu Xiuxiang, Chen Peipei, Chen Kun, et al. Effects of differential diagenesis of deep carbonate rocks on hydrocarbon zonation and accumulation: A case study of Yingshan Formation on northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 957-971.
- [30] Veizer, J. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. Chemical Geology, 1999, 161(1): 1586-1586.
- [31] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 235(1): 7-63.
- [32] Whitaker F F, Y Xiao. Reactive transport modeling of early burial dolomitization of carbonate platforms by geothermal convection [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(6): 889-917.