

文章编号:0253-9985(2011)04-0522-09

塔里木盆地肖尔布拉克组溶蚀型白云岩储层发育特征

李庆¹, 胡文瑄², 钱一雄³, 张军涛³, 王小林², 朱井泉⁴

(1. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083; 2. 南京大学 地球科学系 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏南京 210093; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:塔里木盆地肖尔布拉克组为一套深灰色粉晶、细晶白云岩,且发育有不同类型及不同程度的溶蚀孔隙。尤其在肖尔布拉克组顶部附近,顺层发育良好的溶蚀孔,具有较好的储集能力。基于野外观察和显微镜下观测,并结合电子探针和扫描电镜研究分析,发现该区白云岩的溶蚀作用具有多类型,多期次和溶蚀流体多样化的特点。该组的溶蚀作用可以划分为顺层溶蚀、白云岩充填再溶蚀、粒间溶蚀及表生溶蚀等4种类型。顺层溶蚀主要沿层理发育,溶蚀孔直径大小为几毫米,大多溶孔内壁有白云石充填。充填白云石较基质白云石更富含Fe、Mn、Na和Ba等元素,显示其与深部热流体的密切关系。充填白云石亦有发生再溶蚀现象,乃至发生再次沉淀,对已有孔隙进行改造。溶蚀沉淀物富含S、Si、Sr等元素,指示流体成分比较复杂,来源也具有多样性。另外,局部可见颗粒白云岩发生溶蚀,有些地方具有表生溶蚀作用的特点,对白云岩储集空间的发育有一定贡献。

关键词:白云岩;溶蚀;储层发育;肖尔布拉克组;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Features of dissolved dolostone reservoirs in the Xiaerbulak Formation, Tarim Basin

Li Qing¹, Hu Wenxua², Qian Yixiong³, Zhang Juntao³, Wang Xiaolin² and Zhu Jingquan⁴

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. SINOPEC Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China; 4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The Xiaerbulak Formation consists mainly of dark gray silt- and fine-sized crystalline dolostones with dissolution porosity of different types and values. Highly-developed bedding-parallel dissolution pores within the top of the Formation may have high storage capacity. Based on field and microscopic observations as well as EP-MA and SEM analysis, the authors suggest that dolostone dissolution in the area features in multi-period developments and diversified dissolution fluids. The dolostone dissolutions can be classified into four types: bedding-parallel dissolution, dolostone pore-filling re-dissolution, inter-grain dissolution and hypogene dissolution. Bedding-parallel dissolution occurs mainly along the bedding. The diameters of dissolution pores are about a few millimeters and most of the pores are lined with dolomite. Compared with matrix dolomite, the pore-filling dolomite is richer in such elements as Fe, Mn, Na and Ba, indicating its close relationship with deep thermal fluid. Some pore-filling dolomite may re-dissolve and re-precipitate—a process that could alter the existing pores. The precipitates are rich in S, Si, Sr and other elements, indicating a dissolution fluid with complicated compositions and diversified sources. In addition, dissolution of grain dolostone also occurs and shows the characteristics

收稿日期:2010-05-02。

第一作者简介:李庆(1985—),男,博士研究生,石油地质学。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05-05-02-07HZ)。

of hypogene dissolution in some places, which may contribute to the development of reservoir space.

Key words: dolomite, dissolution, reservoir development, Xiaoerbulak Formation, Tarim Basin

白云岩储集层是海相含油气盆地的主要储层之一^[1]。塔里木盆地的下古生界地层主要由白云岩组成,厚达数千米,遍布全盆地,具有很大的勘探潜力,已成为塔里木盆地重要的勘探目标层位^[2-7]。塔里木盆地下寒武统肖尔布拉克组白云岩埋深达到6 000 多米,经过漫长的成岩及后期演化,压实、压溶和胶结作用相当严重,地层中的原生孔隙基本消失殆尽。要想成为有效的油气储层,埋藏成岩过程中以及埋藏成岩作用之后发育的次生溶蚀孔隙是一个必不可少的条件,由后期各种流体活动溶蚀产生的次生孔隙是主要的储集空间^[8-11]。

1 地质背景

塔里木盆地是一个由古生代克拉通盆地与中、新生代前陆盆地组成的大型复合叠合盆地,盆地经历多次沉降隆升^[12-14]。通常以下古生界“三隆四坳”的构造格局将盆地划分为7个一级构造单元:库车坳陷、塔北隆起、北部坳陷、中央隆起、西南坳陷、塔南隆起、东南坳陷。

塔里木盆地西北缘主要构造单元为柯坪断隆。在中生代之前,柯坪断隆与盆地西部的巴楚隆起是连为一体的^[15]。寒武纪一早、中奥陶世,处于拉张的离散大陆边缘环境^[16-17]。塔里木盆地在震旦纪—寒武纪、早奥陶世、二叠纪和白垩

纪经历了4次地质热事件,其中二叠纪岩浆作用最为强烈,在塔里木盆地分布最为广泛,影响也最大^[18]。

研究区域位于距阿克苏市西南方约50 km柯坪地区的石灰窑—蓬莱坝剖面(图1)。剖面出露了较为完整的寒武系地层。从老到新依次为:下寒武统的玉尔吐斯组、肖尔布拉克组、吾松格尔组;中寒武统的沙依里克组、阿瓦塔格组及上寒武统的丘里塔格下亚群。该剖面寒武系地层主要发育碳酸盐岩沉积,以白云岩为主。

2 白云岩溶蚀类型及特征

从沉积形成到埋藏成岩的漫长演化过程中,肖尔布拉克组白云岩经历了多期次的构造运动事件,也遭受了多种类型的流体改造,各种次生孔隙比较发育,构成现今白云岩储集空间很重要的一部分。蓬莱坝剖面肖尔布拉克组下部为深灰色、暗灰色薄层条带状粉—细晶白云岩,有机质含量较高,水平层理发育。白云岩比较致密,较少有孔隙发育。上部主要为浅灰色中厚层粉—细晶白云岩,水平层理发育,局部发育透镜状层理,表面有针孔状的溶蚀孔,有些区域风化后呈蜂窝孔。根据白云岩溶蚀发育的不同特征,把肖尔布拉克组白云岩溶蚀划分为顺层溶蚀,充填白云石再溶蚀,粒间溶蚀,地表溶蚀4种类型。

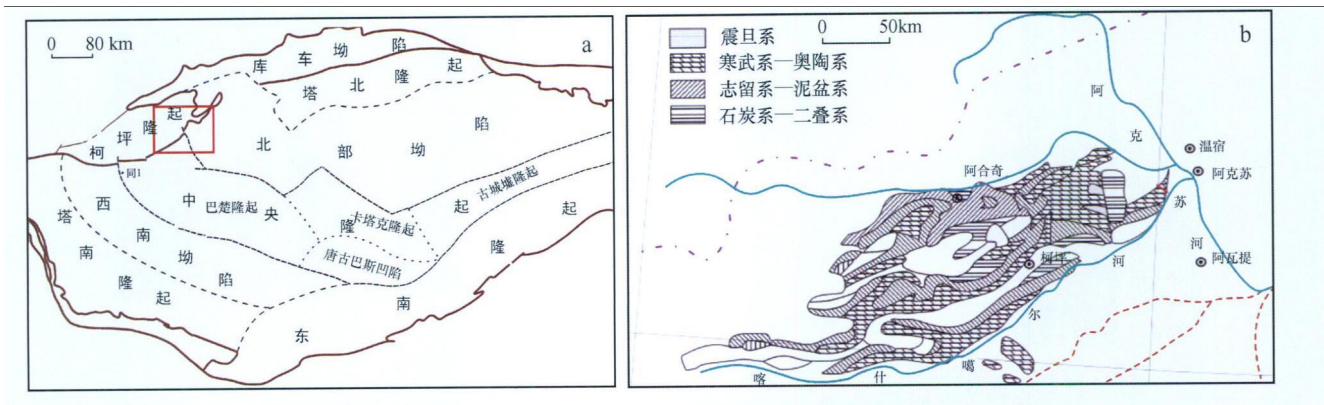


图1 塔里木盆地地理位置及盆地震旦系—二叠系地层
Fig.1 Schematic map showing the location of Tarim Basin and distribution of the Sinian-Permian

2.1 顺层溶蚀

2.1.1 岩石学特征

总体来说,肖尔布拉克组下部孔隙不发育而上部孔隙比较发育,尤其在近顶部的地层发育有良好的溶蚀孔,有望成为良好的储集层。溶孔顺着层理发育,沿着层面有一定的定向性。溶孔在各层中的发育程度不同,表现为从溶孔不发育到比较发育再到不发育的渐变过程。并发育多个类似的渐变旋回。每个旋回大约厚 3~4 m。岩层的颜色也随着岩层中的溶蚀孔发育程度不同而发生变化。一般溶孔比较发育的岩层颜色较浅而溶孔不发育的岩层颜色较深。溶孔多为椭圆形或次圆形,孔洞直径大小约为几毫米到 1 cm 左右,顺层分布(图 2)。孔隙内有少量的白云石充填,充填白云石仅生长在溶孔壁上,未充填整个孔隙,孔隙仍具有较大的储集能力。

显微镜下观察可发现有两种白云石类型:基质白云石(MD)和充填白云石(CD)(图 3)。基质白云

石主要特征为粉-细晶,它形,晶体表面比较污浊,比较致密,较少发育孔隙,局部发生重结晶作用,晶体变大。充填白云石生长在岩石溶蚀孔隙壁上,此类白云石相对于基质白云石有较明显的区别,表现为有较大的晶体,自形较好的晶形,晶体表面比较干净明亮(图 3a)。有的充填白云石又发生后期溶蚀作用(图 3b)。另外孔隙内除了有白云石充填,有时也会见到有方解石,石英的充填物。

电子探针背散射下可以看出肖尔布拉克组的大部分白云岩内部结构比较均一(图 3c),充填白云石与基质白云石晶体内部都较少含有方解石包裹体等交代残余物。充填白云石有良好的晶体结构。有些充填白云石的核部和边部的特征存在差别,核部比较暗,边部相对于核部颜色变浅(图 3d)。

SEM 下可以明显的看出,孔洞充填白云石自形程度很高,晶体生长的非常好,晶体较大,直径达几百个微米,生长在孔洞壁或堆积在孔洞中,晶间孔很发育,有较大的储集空间。而基质白云石则看不到自形的白云石晶体,结构致密(图 3e,f)。

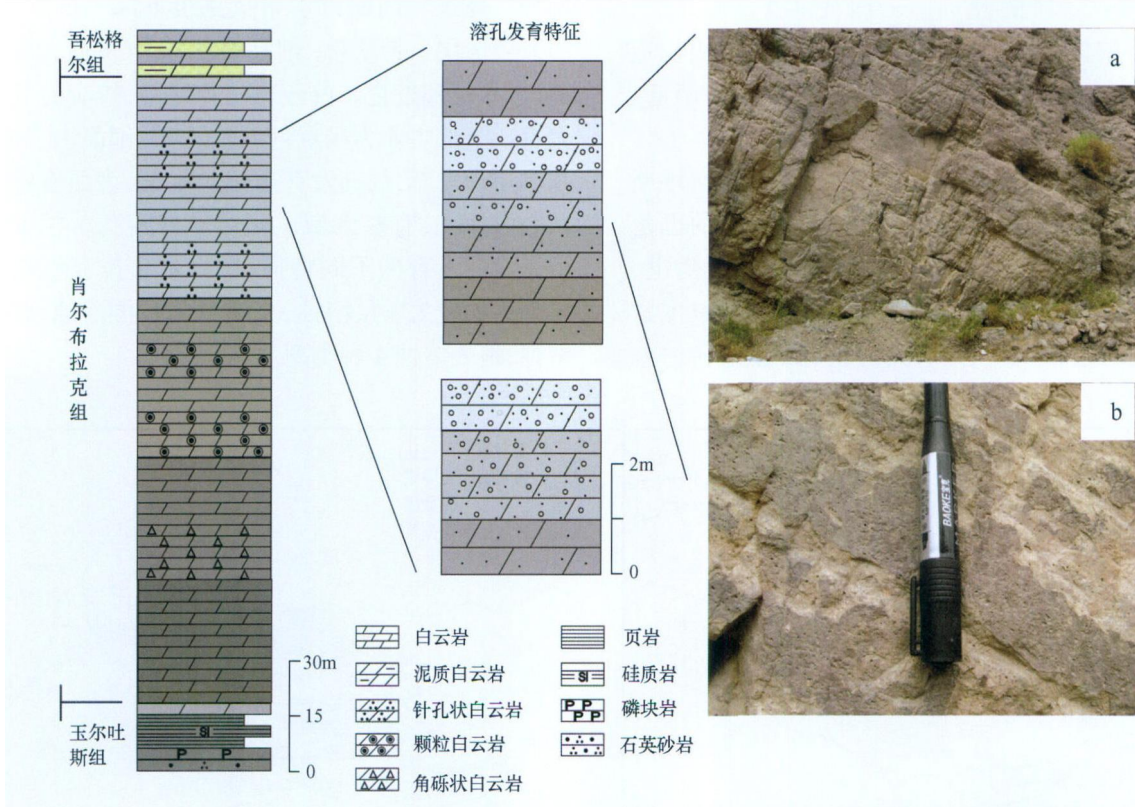


图 2 塔里木盆地肖尔布拉克组岩性剖面图及顶部顺层溶蚀孔发育特征

Fig. 2 Generalized stratigraphy and lithology of the Xiaoerbulak Formation and the occurrences of the bedding-parallel dissolution pores

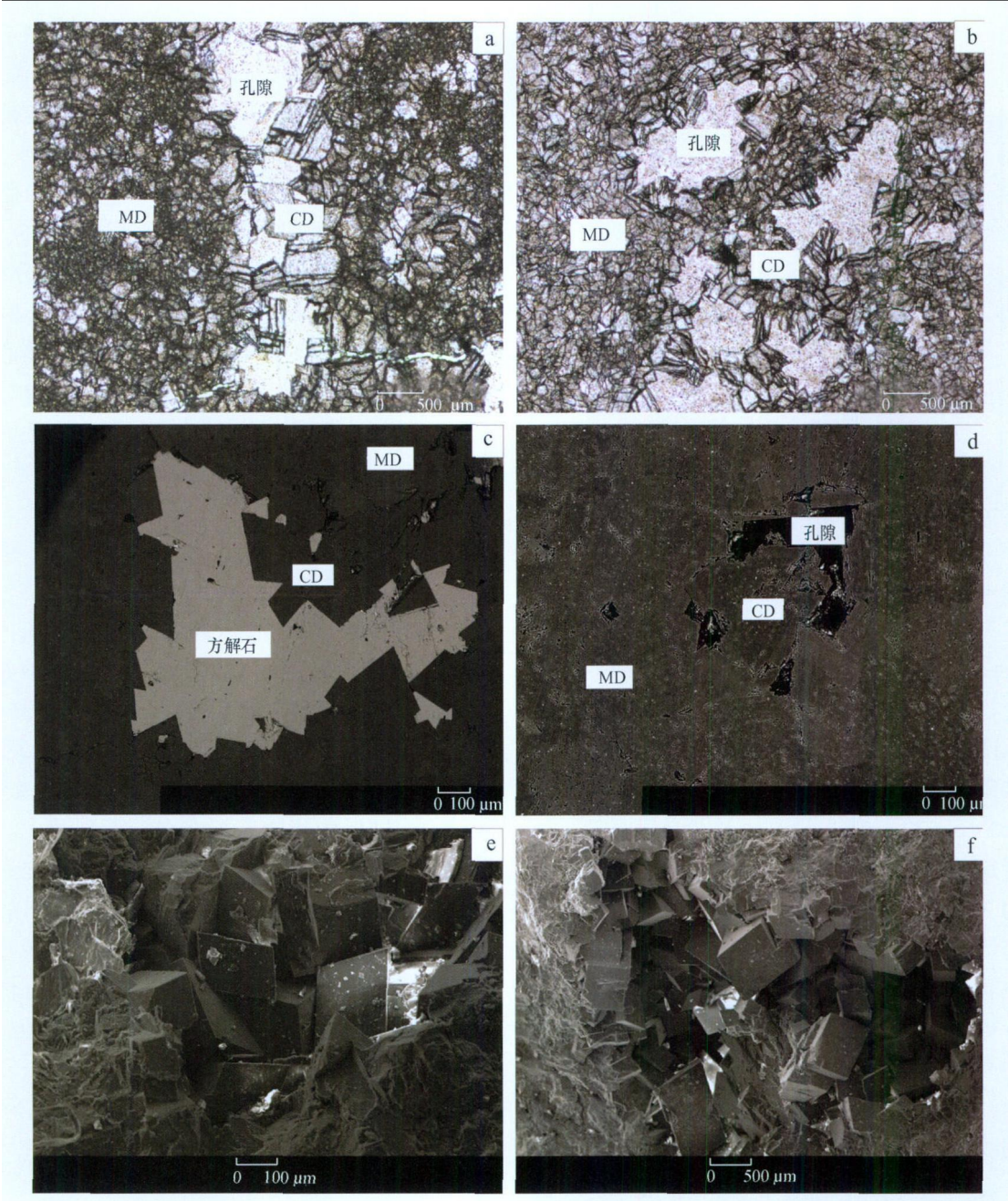


图 3 塔里木盆地肖尔布拉克组白云岩中溶蚀孔的显微镜背散射及扫描电镜观测

Fig. 3 Photomicrographs, BSE and SEM images of dissolution pores in the dolomite of the xiaoerbulak Formation, Tarim Basin
a. 孔隙中有白云石充填,充填白云石(CD)较基质白云石(MD)晶体大,晶形好,表面干净,单偏光;b. 孔洞内充填白云石发生溶蚀,单偏光;c. 充填白云石晶形较好成分均一,方解石充填孔洞,EPMA 背散射;d. 白云石被溶蚀,有雾心亮边结构,EPMA 背散射;e. 孔洞内充填白云石晶体生长较好,SEM;f. 孔洞壁有充填白云石生长,SEM

2.1.2 地球化学特征

不同元素在岩石中的不同含量可以反映成岩环境及成岩流体性质。研究区的充填白云石与基质白云石的元素含量有着较明显的差异(图 4)。从图中可以看出研究区内白云石 Fe,Mn 的含量总体都比较高。充填白云石 Fe 含量在 180×10^{-6} ~

776×10^{-6} 之间,基质白云石 Fe 含量在 171×10^{-6} ~ 445×10^{-6} 之间。充填白云石 Fe 的含量高于基质白云石。充填白云石中 Mn 的含量为 314×10^{-6} ~ 917×10^{-6} ,基质白云石中 Mn 含量为 291×10^{-6} ~ 799×10^{-6} ,充填白云石 Mn 的含量高于基质白云石。Ba 在充填白云石中的含量为 170×10^{-6} ~ 299×10^{-6} ,在基质白云石中的含量为 $42 \times$

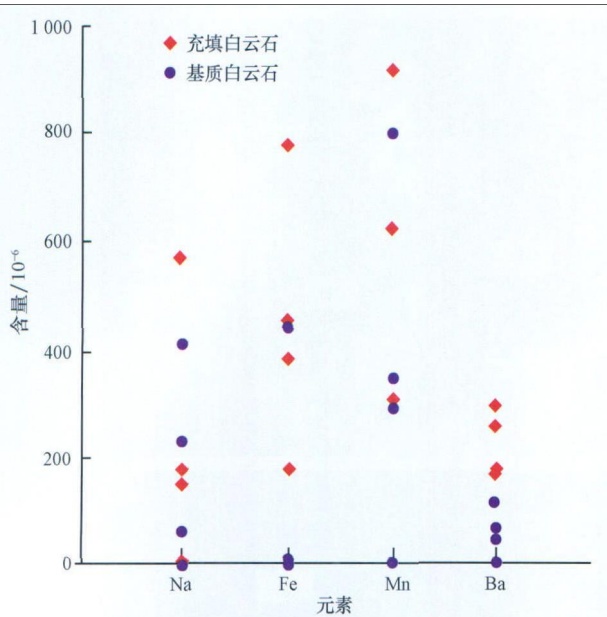


图 4 塔里木盆地肖尔布拉克组充填白云石与基质白云石微量元素含量特征

Fig. 4 Contents of trace elements in pore-filling dolomites and matrix dolomites

$10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$, 明显充填白云石中 Ba 的含量高于基质白云石。Na 在充填白云石里的含量为 $150 \times 10^{-6} \sim 570 \times 10^{-6}$, 也高于其在基质白云石中的含量 $58 \times 10^{-6} \sim 418 \times 10^{-6}$ 。可以看出, 充填白云石的 Na, Fe, Mn, Ba 的含量都高于基质白云石。

充填白云石有较高的 Fe, Mn 可能说明后期改造流体具有较高的 Fe, Mn 含量, 或者流体处于 Fe, Mn 更容易进入白云石晶体的还原环境下。Ba 只有在高温下才能进入晶格, 充填白云石中较高的 Ba 含量可能说明其沉淀于高温流体或受高温流体的改造。充填白云石相对于基质白云石有较

高的 Fe, Mn, Ba 的含量, 表明它们形成条件及成岩流体性质存在差异, 流体来源可能并非自源流体, 而为异源流体。充填白云石的流体可能是富含 Fe, Mn, Ba, Na 的还原性高温热流体。

有些充填白云石的核部和边部的特征也存在差异, 核部比较暗, 边部相对于核部颜色变浅。对于白云石晶体的暗心和亮边进行微区分析(图 5), 可以看出白云石晶体的边部相对于核部富 Fe, Na, Mn, Ba 而亏 Sr, Al。表明白云石暗心和亮边形成时的流体性质也发生了变化。相对于核部, 白云石边部受到富含 Fe, Mn, Ba 的还原热液的影响更为强烈, 流体性质变的更加还原, 温度增高。

2.2 充填白云石的再溶蚀

溶孔内充填的白云石亦有着被后期流体再溶蚀的现象(图 3b, 图 6), 白云石晶体被溶蚀并有的生成沉淀物充填在孔隙或沉淀在白云石晶体上。有的充填白云石晶体发生强烈的溶蚀现象, 晶体上发育很多溶蚀微孔, 溶孔直径为几十微米(图 6a)。溶蚀后的产物充填在白云石裂隙中。可以推断此次溶蚀是发生在顺层溶蚀及充填之后的又一次溶蚀作用。从 SEM 能谱中可以看出溶蚀产物里富含 S, 并且被溶蚀白云石晶体含有少量的 Si (图 6b)。有的白云石晶体棱角被溶蚀, 晶体表面可以看到溶蚀作用留下的反应痕迹及溶蚀后又生成的沉淀物(图 6c)。SEM 能谱显示, 白云石晶体表面除了含有 Mg, Ca 元素, 也富含 Si, S, Sr 等元素(图 6d)。

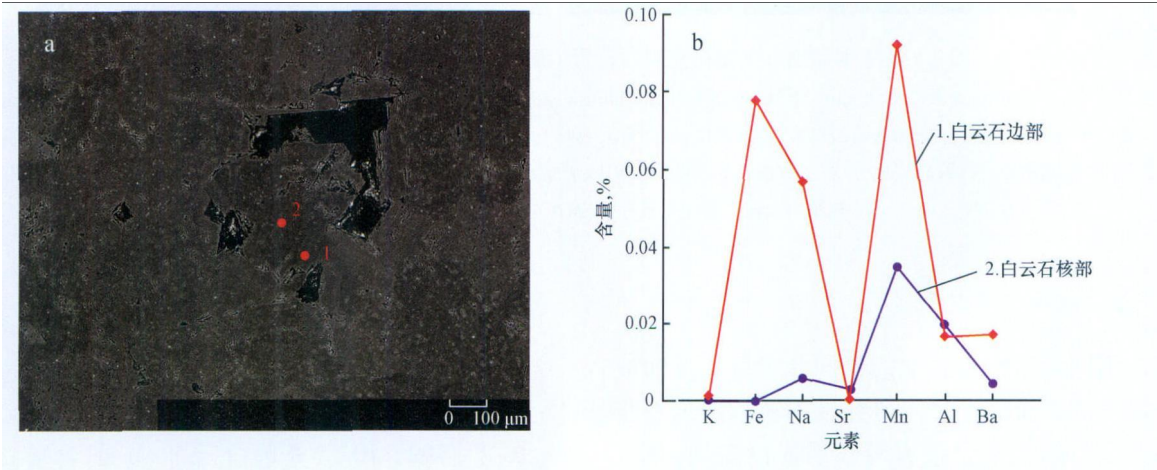


图 5 塔里木盆地肖尔布拉克组充填白云石核部与边部特征对比

Fig. 5 Comparison of trace element contents at the core and the cortex of pore-filling dolomite

a. 充填白云石具有雾心亮边结构, EPMA 背散射; b. 充填白云石核部和边部微量元素对比

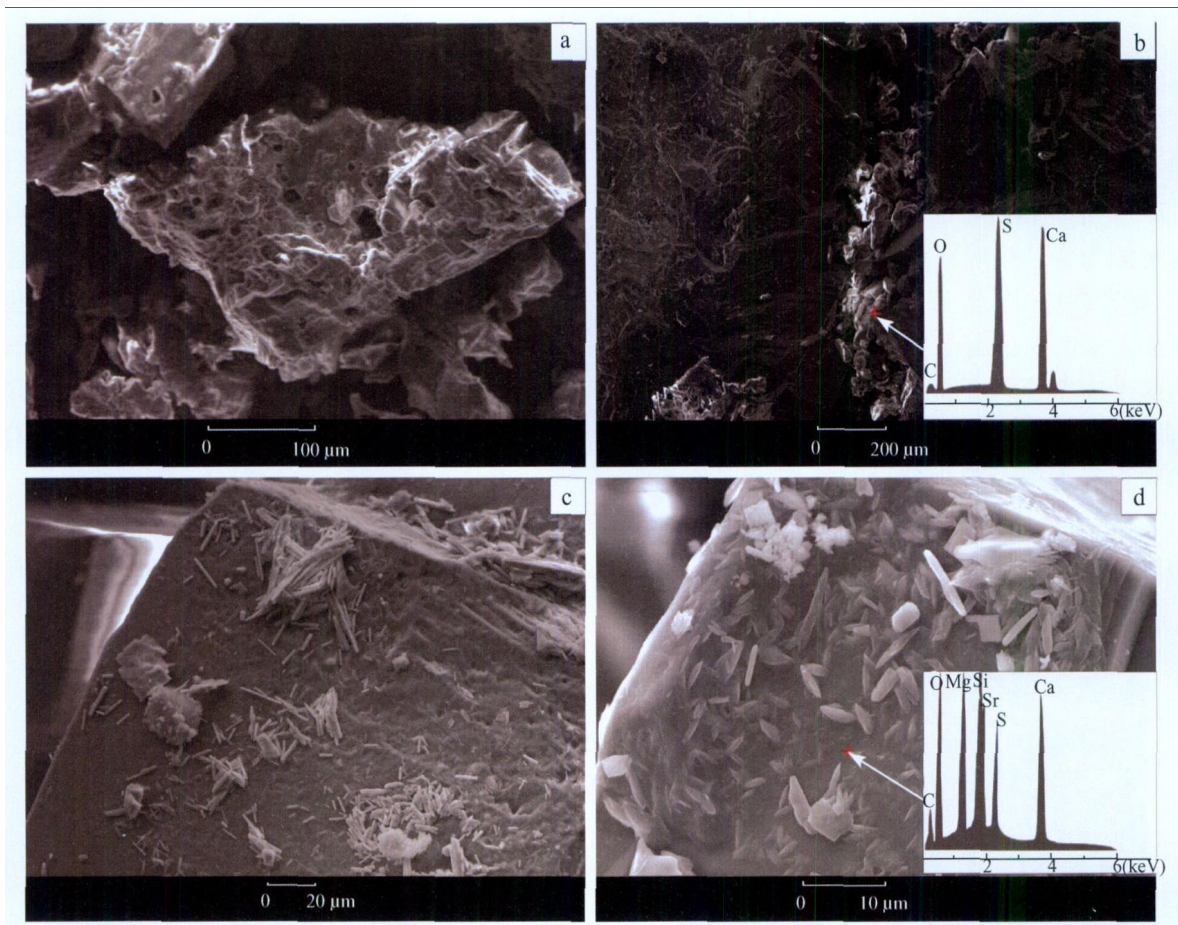


图6 塔里木盆地肖尔布拉克组充填白云石晶体溶蚀及沉淀物

Fig. 6 Dissolutions and precipitation of pore - filling dolomite crystals

a. 白云石晶体发生强烈的溶蚀现象,发育溶蚀孔洞,孔洞大小为几十微米,SEM;b. 溶蚀后的沉淀物充填在白云石缝隙中,沉淀物富含S,SEM;c. 白云石晶体的棱角发生溶蚀,并在晶体上沉淀柱状的沉积物,SEM;d. 白云石晶体表面残留溶蚀反应的痕迹,晶体表面富含Sr、S及Si,SEM

塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组白云岩埋深达到六千多米,在深部高温($>75^{\circ}\text{C}$)高压($>20\text{ MPa}$)条件下,白云岩比灰岩更容易溶蚀,更易形成次生孔洞^[19]。深部环境可能存在多种流体对白云岩进行的溶蚀改造。包括:1)有机酸溶蚀。在深埋成岩作用下,有机质成熟作用及烃类热降解过程中会产生一定数量的有机酸和多种类型的气体如 CO_2 、 H_2S 等^[20-22]。肖尔布拉克组底部为富含有机质的碳酸盐岩,随着埋藏深度的增加,温度升高,有机质开始进入成熟阶段,由于脱羧作用产生大量的 CO_2 和 H_2S 等,使水介质变成对碳酸盐岩矿物具有溶蚀性的酸性水;2)热化学硫酸盐还原作用(TSR)溶蚀。热化学硫酸盐还原作用(TSR)发生在($>120^{\circ}\text{C}$)条件下,储集层埋藏深、温度高,有利于TSR作用和溶蚀作用的发生,作用过程中产生 H_2S 和 CO_2 溶于水后形成酸性流体对白云岩进行溶蚀^[19,23],TSR作用对于深埋环境中

白云岩的改造十分有利;3)热液溶蚀。研究区寒武系碳酸盐岩中发育比较明显的热液改造作用,主要表现在:a)岩石具有热褪色现象;b)发现萤石、石英、鞍状白云石等与热流体相关的矿物组合;c)包裹体测温表明该地区白云岩包裹体温度大于 100°C ,甚至可达 368°C ^[24-25];d)充填白云石含有较高的Fe、Mn、Ba等与热液密切相关的元素。深部流体可以沿着断裂裂缝、不整合面等通道进入碳酸盐岩地层,进而对碳酸盐岩产生溶蚀作用。深部流体自上而下运移主要是受热对流机制和其中所含挥发组分浮力作用的控制,与地表大气降水相比流动性较弱,量也较少^[26]。所以深部流体对碳酸盐岩溶蚀作用不像地表大气淡水溶蚀作用那样形成大型的溶蚀孔洞,而是在碳酸盐岩中产生大量小的针孔状溶孔。由此可见,深部埋藏溶蚀作用对于肖尔布拉克组顶部储集层发育有着重要的建设作用。

3 结论

1) 塔里木盆地下寒武统肖尔布拉克组白云岩发育较多的溶蚀孔隙,尤其在肖尔布拉克岩层的近顶部发育大量顺层分布的溶蚀孔,有望成为良好的储集层。溶孔在岩层中具有旋回性,孔内有少量白云石充填。充填白云石比基质白云石富含 Fe、Mn、Ba 等元素,指示充填白云石流体的与热液相关。

2) 溶蚀流体表现出多期次多来源的特征。孔内充填白云石再次经历溶蚀作用并产生溶蚀沉淀物沉淀在白云石晶体表面或白云石裂隙内。溶蚀白云石具有富 S、Si、Sr 的特点,可能是在深埋成岩作用下,有机质降解及 TSR 作用形成富含有机酸、H₂S 的流体并伴随富含 Si、Sr 的热流体对白云石发生溶蚀作用的结果。

3) 颗粒白云岩的颗粒边缘及胶结物被溶蚀,发育溶蚀微孔。地表溶蚀作用也对白云岩孔隙发育有重要影响。

致谢:内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室(南京大学)的张文兰博士和李娟分别在 EPMA 与 SEM 分析过程中给予了悉心指导与帮助。在此成致谢忱!

参 考 文 献

- [1] Sun S D. Dolomite reservoirs, porosity evolution and reservoir characteristics[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79:186-204.
- [2] 沈昭国,陈永武,郭建华. 塔里木盆地下古生界白云石化成因机理及模式探讨[J]. 新疆石油地质, 1995, 16(4): 319-323.
Shen Zhaoguo, Chen Yongwu, Guo Jianhua. Discussion on genetic mechanism and model for dolomitization, lower Paleozoic, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1995, 16(4): 319-323.
- [3] 张新华,黄文辉,王安嘉,等. 塔里木盆地下古生界白云岩储层发育控制因素分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(2):288-292.
Zhang Xinhua, Huang Wenhui, Wang Anjia, et al. Analysis of the reservoir development controlling factors of the Cambro-Lower Ordovician dolomite in Tarim Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(2):288-292.
- [4] 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.
- [5] 马锋,许坏先,顾家裕,等. 塔东寒武系白云岩成因及储集层演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2):144-155.
Ma Feng, Xu Huaixian, Gu Jiayu, et al. Cambrian dolomite origin and reservoir evolution in east Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2):144-155.
- [6] 杨玉芳,钟建华,陈志鹏,等. 塔中地区寒武—奥陶系白云岩成因类型及空间分布[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4):455-462.
Yang Yufang, Zhong Jianhua, Chen Zhipeng, et al. Genesis types and distribution pattern of the Cambrian and Ordovician dolomites in Tazhong area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4):455-462.
- [7] 李慧莉,钱一雄,沙旭光,等. 塔里木盆地卡塔克隆起西北倾没端良里塔格组碳酸盐岩储层发育特征与影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1):69-75.
Li Huili, Qian Yixiong, Sha Xuguang, et al. Development characteristics and influencing factors of carbonate reservoirs in the Ordovician Lianglitage Formation at the northwest pitching end of the Katake Uplift, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1):69-75.
- [8] 朱东亚,金之钧,胡文瑄. 塔中地区热液改造型白云岩储层[J]. 石油学报, 2009, 30(5):698-704.
Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5):698-704.
- [9] 朱井泉,吴仕强,王国学,等. 塔里木盆地寒武—奥陶系主要白云岩类型及孔隙发育特征[J]. 地学前缘, 2008, 15(2):67-79.
Zhu Jingquan, Wu Shiqiang, Wang Guoxue, et al. Types and porosity characteristics of the Cambrian—Ordovician dolomite in Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 67-79.
- [10] 蔺军,周芳芳,袁国芬. 塔河地区寒武系储层深埋藏白云石化特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1):13-21.
Lin Jun, Zhou Fangfang, Yuan Guofen. Features of deep-burial dolomitization of the Cambrian reservoirs in Tahe region[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1):13-21.
- [11] 漆立新,云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1):1-12.
Qi Lixin, Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1):1-12.
- [12] 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3):177-183.
Jia Chenzao. Structural characteristics and oil/gas accumulation

- tive regularity in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3):177-183.
- [13] 金之钧,王清晨. 中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展——以塔里木盆地为例[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34:1-12.
- Jin Zhijun, Wang Qingchen. New progresses in research of China's typical superimposed basins and reservoiring of hydrocarbons: taking Tarim basin as an example[J]. Science in China Ser. D, 2004, 34:1-12.
- [14] Tuo J, Philp R P. Occurrence and distribution of high molecular weight hydrocarbons in selected non-marine source rocks from the Liaohe, Qaidam and Tarim Basins[J]. China. Organic Geochemistry, 2003, 34:1543-1558.
- [15] 张臣,郑多明,李红海. 柯坪断隆古生代的构造属性及其演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4):314-318.
- Zhang Chen, Zheng Duoming, Li Honghai. Attribute of Paleozoic structures and its evolution characteristics in Keping fault-uplift[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4):314-318.
- [16] 丁文龙,林畅松,漆立新,等. 塔里木盆地巴楚隆起构造格架及形成演化[J]. 地学前缘, 2008, 15(2):242-252.
- Ding Wenlong, Lin Changsong, Qi Lixin, et al. Structural framework and evolution of Bachu uplift in Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2):242-252.
- [17] 吕海涛,张仲培,邵志兵,等. 塔里木盆地巴楚-麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1):76-90.
- Lü Haitao, Zhang Zhongpei, Shao Zhibing, et al. Structural evolution and exploration significance of the Early Paleozoic Palaeouplifts in Bachu-Maigaiti area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1):76-90.
- [18] 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):1096-1099.
- Chen Hanlin, Yang Shufeng, Dong Chuanwan, et al. A study of geological thermal events of Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(10):1096-1099.
- [19] 张静,胡见义,罗平,等. 深埋优质白云岩储集层发育的主控因素与勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2):203-210.
- Zhang Jing, Hu Jianyi, Luo Ping, et al. Master control factors of deep high-quality dolomite reservoirs and the exploration significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2):203-210.
- [20] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence: a new approach to oil and gas exploration[M]. New York: Springer-Verlag, 1978, 538.
- [21] Surdam R C, Boese S W, Crossey L J. Role of organic and inorganic reactions in development of secondary porosity in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66:635.
- [22] 朱东亚. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩次生孔隙发育和形成机理[D]. 南京:南京大学, 2005, 60-63.
- Zhu Dongya. Characteristics and formation mechanism of secondary dissolution porosity in Ordovician carbonate, Tarim Basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2005, 60-63.
- [23] 朱光有,张水昌,梁英波,等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. 岩石学报, 2006, 22(8):2182-2194.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep-quality carbonate reservoirs in Sichuan basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8):2182-2194.
- [24] Zhang Juntao, Hu Wenxuan, Qian Yixiong, et al. Formation of saddle dolomites in Upper Cambrian carbonates, western Tarim Basin, (NW China): implication for fault-controlled fluid flow events[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26:1428-1440.
- [25] 邢凤存,张文淮,李思田. 热流体对深埋白云岩储集性影响及其油气勘探意义——塔里木盆地柯坪露头区研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(1):266-276.
- Xing Fengcun, Zhang Wenhui, Li Sitian. Influence of hot fluids on reservoir property of deep buried dolomite strata and its significance for petroleum exploration: A case study of Keping outcrop in Tarim basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1):266-276.
- [26] 朱东亚,金之钧,胡文瑄,等. 塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响[J]. 地质论评, 2008, 54(3):348-354.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, et al. Effects of deep fluid on carbonates reservoir in Tarim Basin[J]. Geological Review, 2008, 54(3):348-354.

(编辑 高岩)