

引用: 张友, 李强, 朱可丹, 等. 基于激光原位 U—Pb 定年和元素面扫描的白云岩储层关键成岩期次定量研究: 以塔东古城地区鹰山组为例 [J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 181-194.
Zhang You, Li Qiang, Zhu Kedan, et al. Quantitative study on key diagenetic periods of dolomite reservoir based on laser in-situ U-Pb dating and element area scanning: a case study of the Ordovician Yingshan Formation in Gucheng area, eastern Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(4): 181-194.

基于激光原位 U—Pb 定年和元素面扫描的白云岩储层 关键成岩期次定量研究 ——以塔东古城地区鹰山组为例

张 友^{1,2} 李 强³ 朱可丹^{1,2} 郑兴平^{1,2} 林 彤³ 邵冠铭^{1,2} 孙海航⁴ 孙庭斌⁵

(1 中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室; 2 中国石油杭州地质研究院; 3 中国石油大庆油田公司勘探开发研究院; 4 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院; 5 中国石油集团东方地球物理公司研究院地质研究中心)

摘 要: 塔里木盆地古城地区奥陶系鹰山组三段(鹰三段)白云岩储层在形成过程中经历了多期成岩流体的叠加改造, 使得储层表现出较强的非均质性, 不同产状白云岩的白云石化路径及储层孔隙演化过程存在较大争议。为了明确鹰三段白云岩储层孔隙演化过程中各个期次成岩作用发生的相对次序及其与储层孔隙的耦合关系, 精准锁定关键成岩作用的期次是揭示储层孔隙演化过程的关键。基于激光原位 U—Pb 同位素定年技术、激光原位元素面扫描及成像技术等, 对 4 个样品的围岩基质(粉晶白云石、细—中晶白云石)、孔洞壁中—粗晶白云石和孔洞内充填物(方解石、云化渗流粉砂)等结构组分开展系统的激光原位 U—Pb 定年分析。结果表明, 塔里木盆地古城地区鹰三段高能滩相原始沉积年龄约为 475.35Ma, 奠定了储层发育的物质基础。在储层孔隙演化过程中, 先后经历了两期白云石化作用和一期钙质流体充填作用。其中第一期白云石化流体作用时间约为 470.1Ma, 造成了围岩细—中晶白云岩及局部渗流粉砂的白云石化。第二期白云石化流体作用时间约为 452.1Ma, 造成了围岩白云石晶体的进一步加大变粗, 并形成了第二期孔洞壁中—粗晶白云石。钙质流体的充填不晚于 448Ma, 造成了局部储集空间的破坏。现存白云岩储层孔隙主体来自对先存孔隙的继承, 断裂—热液改造是重要调整, 而并非传统意义上构造—热液溶蚀造孔的概念。以上认识可以为塔里木盆地深层白云岩储层孔隙成因的研究及有效储层预测提供一定的依据。

关键词: 激光原位 U—Pb 定年; 元素面扫描; 关键成岩期次; 储层孔隙演化; 塔东古城地区

中图分类号: TE125.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.04.013

Quantitative study on key diagenetic periods of dolomite reservoir based on laser in-situ U-Pb dating and element area scanning: a case study of the Ordovician Yingshan Formation in Gucheng area, eastern Tarim Basin

Zhang You^{1,2}, Li Qiang³, Zhu Kedan^{1,2}, Zheng Xingping^{1,2}, Lin Tong³, Shao Guanming^{1,2},
Sun Haihang⁴, Sun Tingbin⁵

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“实验研究碳酸盐岩埋藏溶蚀机制及其有利条件”(41802159); 中国石油天然气集团有限公司上游领域基础性前瞻性项目“残留型海相盆地构造—岩相古地理重建技术研究”(2021DJ0501)。

第一作者简介: 张友(1985—), 男, 山东泰安人, 硕士, 2012年毕业于中国石油大学(北京), 高级工程师, 现主要从事碳酸盐岩沉积与储层、勘探部署等方面的研究工作。地址: 浙江省杭州市西湖区西溪路920号中国石油杭州地质研究院, 邮政编码: 310023。E-mail: zhangyou_hz@petrochina.com.cn

通信作者简介: 朱可丹(1991—), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 2020年毕业于东北石油大学, 工程师, 主要从事碳酸盐岩沉积与储层等方面的研究工作。地址: 浙江省杭州市西湖区西溪路920号中国石油杭州地质研究院, 邮政编码: 310023。E-mail: zhukd_hz@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-10-09; 修改日期: 2022-06-03

(1 CNPC Key Laboratory of Carbonate Reservoirs; 2 PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology; 3 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Daqing Oilfield Company; 4 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Tarim Oilfield Company; 5 BGP Geological Research Center, CNPC)

Abstract: The dolomite reservoir in the 3rd member of the Ordovician Yingshan Formation (Ying 3 member) in Gucheng area in Tarim Basin experienced multiple stages of transformation by diagenetic fluids during its evolution process, showing strong reservoir heterogeneity. There are great disputes about the dolomitization pathway and pore evolution process of dolomites with different occurrence. Accurately determining the key diagenesis period is very crucial to identify the relative sequence of diagenesis and its coupling relationship with reservoir pores in the evolution process of Ying 3 member dolomite reservoir. Based on techniques such as laser in-situ U-Pb isotope dating and element area scanning, the systematic laser in situ U-Pb dating is conducted on rock components of four core samples, including the matrix of host rocks (powder crystal dolomite, medium-fine crystal dolomite), medium-coarse crystal dolomite on the wall of vugs, and guest mineral in vugs (calcite and dolomitized vadose siltstone). The study results show that the high energy beach carbonates of Ying 3 member were primarily deposited at a geologic age of approximately 475.35 Ma in Gucheng area in Tarim Basin, laying a material basis for the development of reservoir. The reservoir pore evolution experienced two stages of dolomitization and one stage of calcite filling. The first stage of dolomitization occurred at 470.1 Ma, causing dolomitization of the fine-medium crystal dolomite in host rocks and the local vadose siltstones. The second stage of dolomitization was approximately at 452.1 Ma, leading to the further enlargement and coarsening of dolomite crystals of host rocks and the formation of medium-coarse crystal dolomite on the wall of vugs. The filling of calcite fluid was no later than 448 Ma, which damaged the local reservoir space. The main reservoir space of dolomite was inherited from the pre-existing pore space and adjusted by fault-hydrothermal transformation, rather than the traditional understanding that the pores were formed by the tectonic-hydrothermal corrosion. The above understanding provides basis for the study of pore genesis and prediction of effective dolomite reservoir in deep formation in Tarim Basin.

Key words: laser in-situ U-Pb dating, element area scanning, key diagenetic period, reservoir pore evolution, Gucheng area in eastern Tarim Basin

0 引言

塔里木盆地奥陶系海相碳酸盐岩是油气勘探的主力层系之一,奥陶系已经发现了多个大型碳酸盐岩油气田^[1-8]。自 GC6、GC8、GC9 等井在塔东古城地区奥陶系鹰三段获得突破以来,鹰三段就成为该区勘探的重点层位^[9]。与塔北和塔中奥陶系勘探领域不同,塔东古城地区鹰三段储层以白云岩为主^[5,10-12],其强烈的非均质性成为制约规模优质储层预测的关键问题^[13]。前人对古城地区鹰三段储层进行了大量研究^[14-16],取得了比较丰富的认识:优质储层的主要岩相为残余颗粒结构的细—中晶白云岩,储集空间主要为残余的成岩阶段早期形成的孔隙^[4,17];储层在自准同生期至深埋藏期的整个埋藏过程中,伴随着多期成岩流体的调整改造,其中不乏各种溶蚀作用对储集空间的建设^[18-19],以及硅质与钙质热液充填造成的储集空间破坏^[20]。由此可见,明确储层形成过程中各个期次成岩作用发生的相对次序,乃至探究其对储层影响的绝对时间(地质尺度, Ma 级),对储层成因及其非均质性的研究具有重要意义。

在传统研究中,成岩作用相对次序的确定主要依据岩石宏观及薄片镜下特征表现出来的各期矿物接触关系,其中某期矿物的绝对年龄也可以通过溶液法 U—Pb 同位素年代学测定得出^[21-22]。但上述方法存

在如下弊端:(1)依据各期矿物的接触关系仅能判断出一个样品内部成岩作用相对次序,无法实现多个样品间同种组分形成年代的直接对比;(2)溶液法 U—Pb 同位素年代学测试则要求待测样品具有足够高的 U、Pb 含量,并且消耗样品量较多,但古老海相碳酸盐岩的 U、Pb 含量普遍较低^[23],且各成岩组分直径小,往往无法获得足量的测试样品^[24],从而制约了该方法的应用。近年来,这些问题随着基于激光剥蚀(LA)的原位 U—Pb 同位素定年技术的广泛应用迎刃而解^[25-28]。国内学者在引进、消化国外技术的基础上,开发了针对低 U 含量的碳酸盐矿物激光原位 U—Pb 同位素定年技术 LA-ICP-MS,并得到较为成熟的应用^[24,29-30]。本文以塔东古城地区典型井系统取心为例,应用激光原位 U—Pb 同位素定年技术,辅以岩石薄片鉴定、激光元素面扫描等技术,展开综合分析,对该区奥陶系鹰三段白云岩储层储集空间被破坏的过程进行恢复,以期为该区鹰三段储层非均质性的研究提供一定的依据。

1 地质概况

塔里木盆地古城地区奥陶系碳酸盐岩顶面为一东南隆起并向西北倾伏的大型鼻状构造,因此被称为

古城低凸起^[2]。其北部毗邻满西低凸起，西南部由塔中 1 号断裂与塔中隆起分隔，东部与塔东隆起相连（图 1 左）。古城低凸起于加里东中期初步形成，于加里东末期定型，在海西期由于南部受到挤压而隆升，在印支期—喜马拉雅期构造活动较弱^[31]。

已有研究表明^[14-17]，古城低凸起在早—中奥陶世经历了从弱镶边半局限台地到远端变陡缓坡的演

变。古城地区的中—下奥陶统自下而上依次发育蓬莱坝组、鹰山组、一间房组。鹰山组沉积时期古城地区的台地类型为远端变陡的缓坡，广泛发育滩相沉积^[17]。鹰山组分为 4 段，下部的鹰三段和鹰四段发育较厚的灰质白云岩及白云岩，为一套颗粒滩相白云岩，而上部的鹰一段和鹰二段以石灰岩为主，表现为开阔台地滩间海相沉积，向下白云岩占比逐渐增加（图 1 右）。

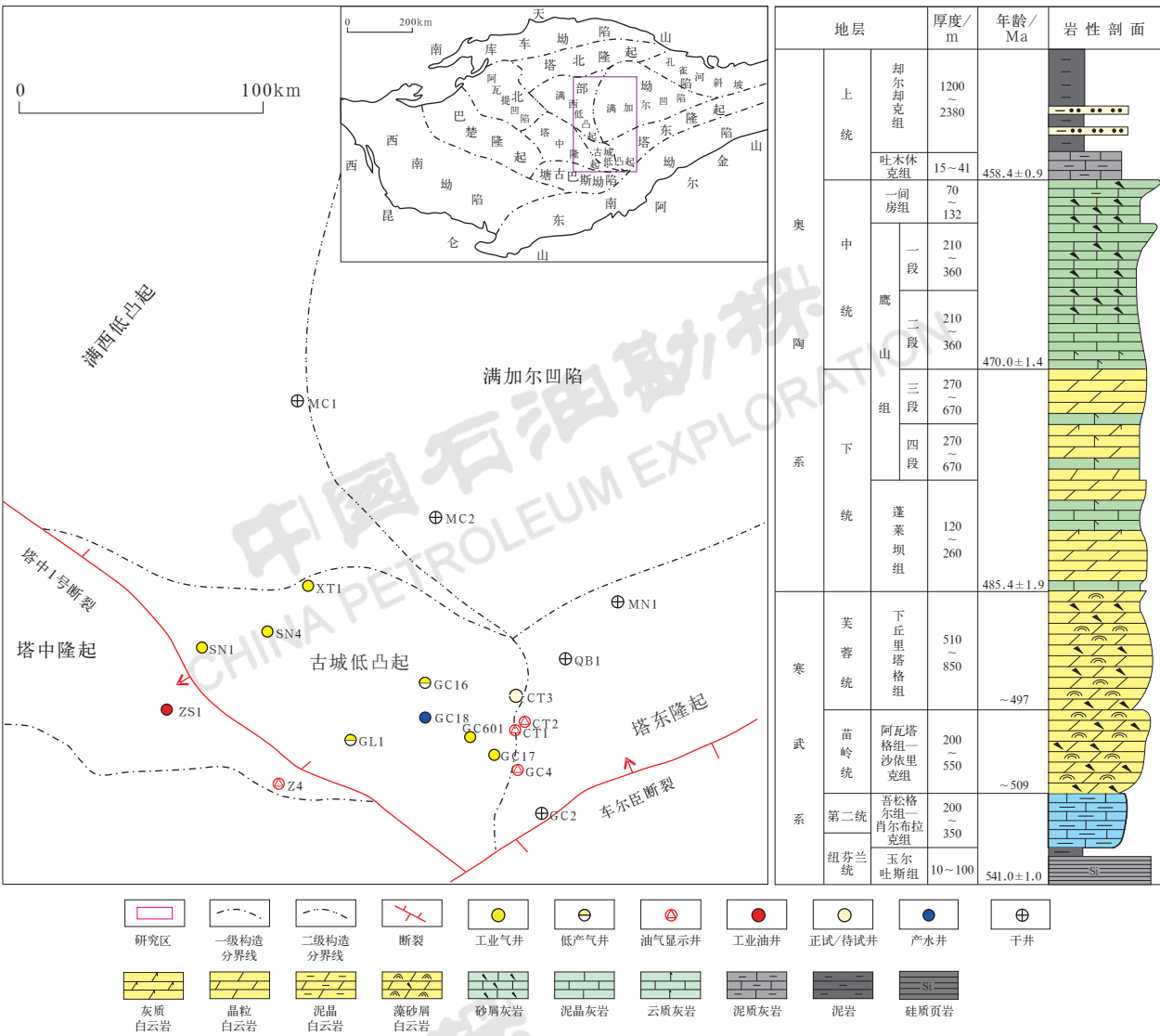


图 1 塔东古城地区构造位置（左）与地层综合柱状图（右）（据文献[14]修改）
Fig.1 Structural location map (left) and comprehensive stratigraphic column (right) in Gucheng area, eastern Tarim Basin (modified after reference [14])

2 储层岩石学特征及定年成岩组分分类

古城地区钻遇的鹰三段岩性以灰色晶粒白云岩或残余颗粒白云岩为主，夹薄层颗粒灰岩，局部见泥晶灰岩（图 2）。储集空间往往集中发育在细—中晶白

云岩内，储集空间类型包括晶间孔、晶间溶孔、残余粒间孔、微裂缝等（图 3）^[13,17]。储层类型以孔隙（洞）型为主、裂缝—孔隙型次之，较大的孔洞常见被白云石、方解石等胶结物充填的现象（图 3a、c）。

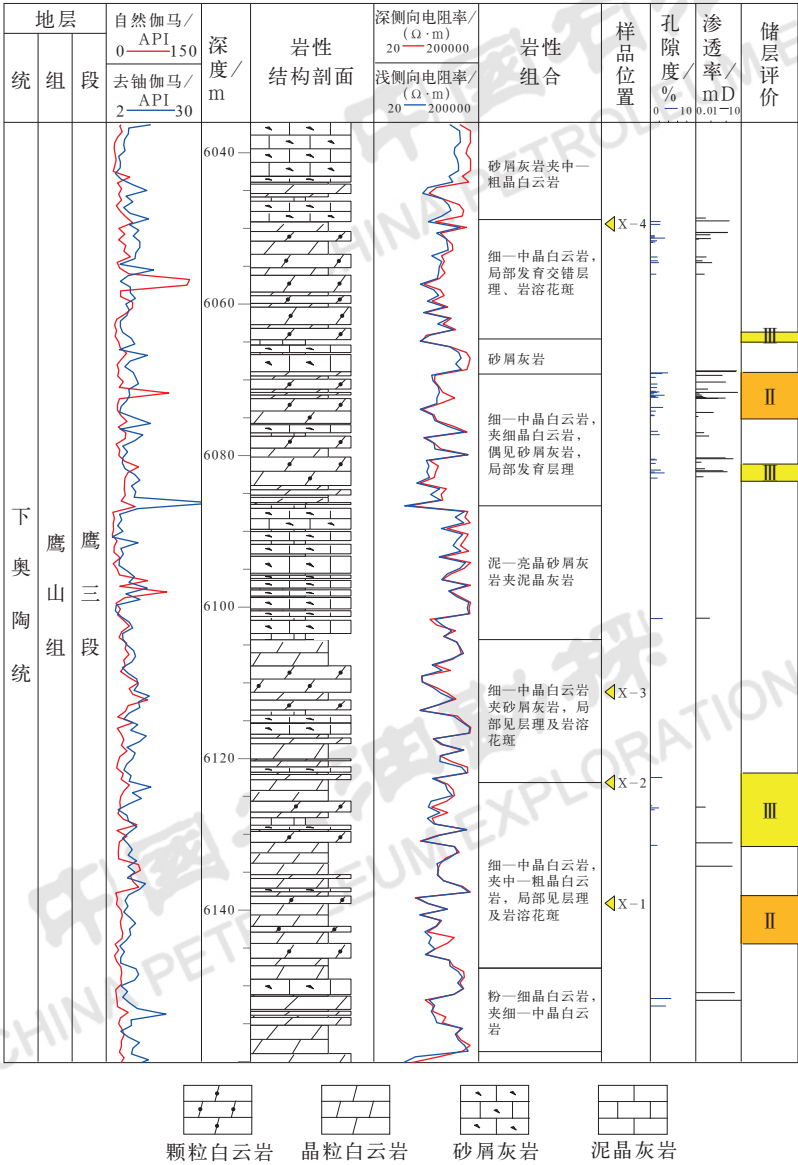


图 2 塔东古城地区典型井沉积储层综合柱状图及样品位置

Fig.2 Comprehensive reservoir column in typical well and sample location in Gucheng area, eastern Tarim Basin

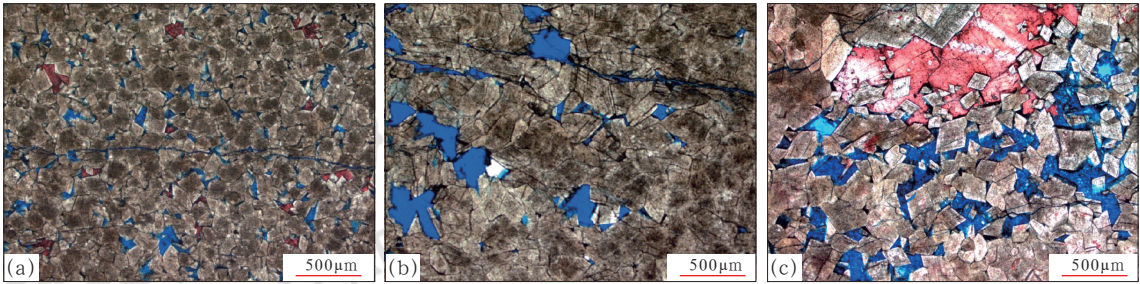


图 3 塔东古城地区 GC601 井白云岩储层及典型储集空间特征

Fig.3 Characteristics of typical reservoir space of dolomite in Well GC601 in Gucheng area, eastern Tarim Basin

(a) 6148.1m, 深灰色残余颗粒结构细—中晶白云岩, 铸体薄片单偏光照片, 残余粒间孔、晶间孔、微裂缝发育, 局部孔洞被方解石充填;
(b) 6048.51m, 深灰色残余颗粒结构细—中晶白云岩, 铸体薄片单偏光照片, 晶间孔、晶间溶孔、微裂缝发育;
(c) 6066.64m, 深灰色残余颗粒结构细—中晶白云岩, 铸体薄片单偏光照片, 晶间孔、晶间溶孔发育, 局部溶蚀孔洞被方解石充填

为探究塔东奥陶系鹰三段白云岩不同岩石结构组分在储层成岩演化过程中的相对期次及其绝对地质年代,本文选择各个成岩组分的岩石样品作为研究对象,其主要为孔洞被胶结物充填的晶粒白云岩或残余颗粒白云岩(图4、图5)。实际上孔洞内部胶结物类型有很多种,以鞍状白云石、方解石为主,仅局部可见少

量的石英、黄铁矿、萤石等其他热液矿物。后者对于储层孔隙的影响不大,不属于本文讨论的范畴。通过宏观与镜下综合分析,并结合激光元素面扫描图像,可将岩石样品的定年组分分为:围岩基质(粉晶白云石、细—中晶白云石)、孔洞壁中—粗晶白云石和孔洞内充填物(方解石胶结物、云化渗流粉砂)三大类(图5)。

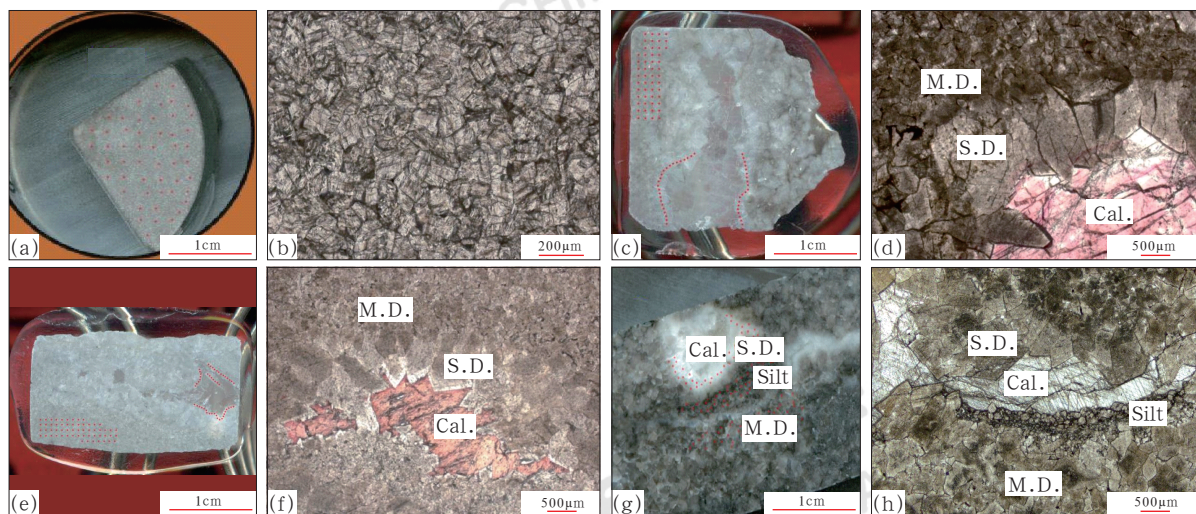


图4 塔东古城地区典型井实验样品宏观、镜下特征与定年组分选点

Fig.4 Macroscopic and microscopic characteristics of core samples in typical wells and test points selection for rock component dating in Gucheng area, eastern Tarim Basin

(a) 样品 X-1 宏观照片, GC601 井 6137.11m, 粉晶白云岩; (b) 样品 X-1 单偏光照片; (c) 样品 X-2 宏观照片, GC601 井 6123.67m, 灰色细—中晶白云岩, 局部孔洞被方解石充填; (d) 样品 X-2 单偏光照片; (e) 样品 X-3 宏观照片, GC601 井 6111.36m, 深灰色细—中晶白云岩, 局部孔洞被方解石充填; (f) 样品 X-3 单偏光照片; (g) 样品 X-4 宏观照片, GC601 井 6049.79m, 深灰色细—中晶白云岩, 局部孔洞被方解石充填; (h) 样品 X-4 单偏光照片。宏观照片中红点为激光剥蚀蚀目标点。M.D.—基质白云石; S.D.—孔洞壁中—粗晶白云石; Cal.—方解石胶结物; Silt—云化渗流粉砂

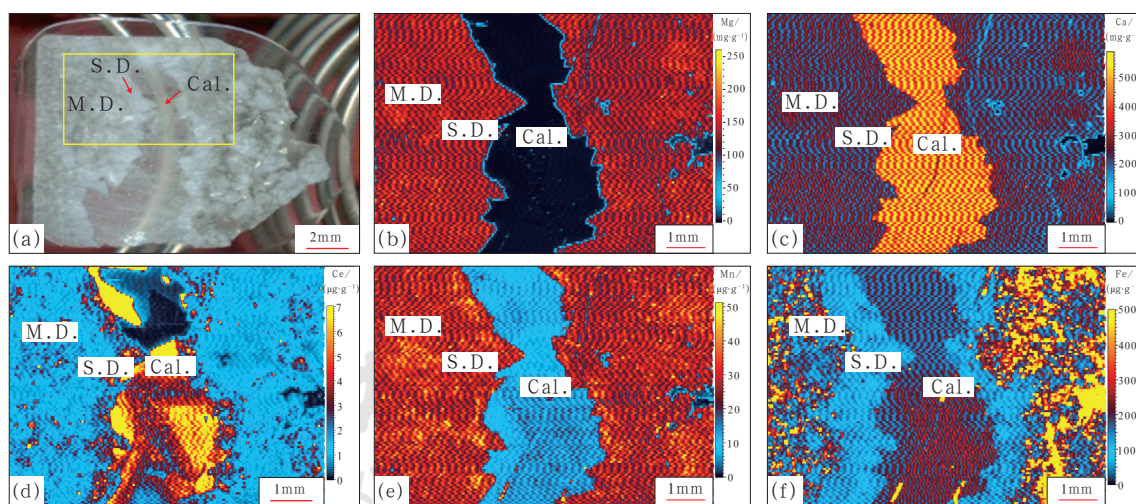


图5 基于宏观、微观和元素面扫描的成岩组分划分

Fig.5 Diagenetic components classification based on macroscopic and microscopic characteristics and element area scanning images

(a) 样品 X-2, GC601 井 6123.67m, 灰色细—中晶白云岩, 元素面扫描薄片宏观照片, 局部孔洞被方解石充填, 黄色方框中为元素面扫描区域; (b) 对应 (a) 中黄色方框区域 Mg 面扫描图像; (c) 对应 (a) 中黄色方框区域 Ca 面扫描图像; (d) 对应 (a) 中黄色方框区域 Ce 面扫描图像; (e) 对应 (a) 中黄色方框区域 Mn 面扫描图像; (f) 对应 (a) 中黄色方框区域 Fe 面扫描图像

2.1 围岩基质

围岩基质为包围岩石孔洞并且不与孔洞直接接触的岩石组分(图4a、b,图5a),包括粉晶、细晶、中晶不同粒级白云石。围岩基质可划分为两类,一类是潮坪相萨布哈成因的粉晶白云石(图4a、b);另一类是细一中晶白云石(图4d),晶体多呈半自形—他形,可见残余颗粒结构,表现为雾心亮边及颗粒幻影,局部可见交错层理。通过元素面扫描图像可以发现,围岩基质表现Mg、Mn和Fe的富集(图5b、e、f)。

2.2 孔洞壁中—粗晶白云石

孔洞壁中—粗晶白云石为岩石孔洞边缘直接与孔洞接触的晶粒白云石(图5a),其晶粒大小一般为中—粗晶。该类白云石晶体背离孔洞一侧往往呈嵌晶状接触,而靠近孔洞一侧往往晶面弯曲,具有鞍状白云石特征,表明其可能为热液成因。通过元素面扫描图像,可以发现从Mg和Ca的含量上看,孔洞壁中—粗晶白云石与围岩基质基本一致(图5b、c);Ce在白云石中的配分模式整体为负异常,但同时呈现出由围岩基质细一中晶白云石经孔洞壁中—粗晶白云石向方解石逐渐富集的特征,反映其受到的热液蚀变程度加大(图5d)。孔洞壁中—粗晶白云石同样表现出Mn的富集,但却因为相对贫Fe而在围岩基质内侧显现出呈条带状产出的特征(图5e、f),显示不同期次成岩流体的差异性。

2.3 孔洞内充填物

本文研究所涉及样品孔洞内的充填物有两种,一种为方解石胶结物,在手标本上表现为白色充填物,将孔洞基本填满(图4、图5);经茜素红染色,在镜下可见其往往表现为巨晶(图4d、f、h)。在元素面扫描图像上,方解石胶结物富Ca贫Mg特征明显(图5b、c),且Ce富集(图5d),易与其他组分区分。表明其可能是在富钙质热液流体的作用下,经历相对缓慢的过程而形成。

还有一种是在充填的孔洞一侧呈近似堆积形态出现的云化渗流粉砂(图4g、h),其主要由细晶白云石组成。在宏观上,与洞内充填的方解石共同组成顶底构造,表明其成因与准同生期的高频旋回暴露岩溶过程存在较大关联。

3 激光 U—Pb 定年测试

本文涉及的4块岩石样品均来自研究区奥陶系鹰三段(图2、图4、表1),并按前述分类方式对岩石组分进行划分。观察各个组分的空间分布可以发现,待测样品中各个组分含量不均,其中围岩基质面积大、分布广,较容易开展测试;而孔洞内方解石胶结物面积较小,其一般在较大的孔洞中集中出现,相比围岩测试难度较高;孔洞壁中—粗晶白云石一般沿孔洞边缘呈线性生长,面积小、分布稀疏,测试条件最差。针对这种复杂的样品条件,激光原位U—Pb同位素定年技术所具有的微区原位、制样流程简单、样品消耗

表1 塔东古城地区典型井实验样品成岩组分划分及定年结果

Table 1 Diagenetic components classification and U—Pb dating results of samples in typical wells in Gucheng area, eastern Tarim Basin

样品编号	样品深度 /m	岩性	测试组分		定年 /Ma
			代码	成岩组分	
X-1	6137.11	灰色粉晶白云岩	—	围岩基质(粉晶白云石)	492±19
X-2	6123.67	灰色细一中晶白云岩,局部孔洞被方解石充填	M.D.	围岩基质(残余颗粒细一中晶白云石)	478±16
			S.D.	孔洞壁中—粗晶白云石(鞍状白云石)	455±17
X-3	6111.36	深灰色细一中晶白云岩,局部孔洞被方解石充填	M.D.	围岩基质(残余颗粒细一中晶白云石)	474±11
			S.D.	孔洞壁中—粗晶白云石(鞍状白云石)	456±12
			Cal.	孔洞内充填物(方解石胶结物)	464±16
X-4	6049.79	深灰色细一中晶白云岩,局部孔洞被方解石充填	S.D.	孔洞壁中—粗晶白云石(鞍状白云石)	451.4±8.8
			Silt	孔洞内充填物(云化渗流粉砂)	434±15
			M.D.	围岩基质(细一中晶白云石)	475±5.5

量小、低本底、空间分辨率高且分析速度快等特点就能发挥出独到的优势^[24]。其实验仪器由激光剥蚀设备(LA)与高分辨率多接收电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)组成,实验分析时,使用激光束对待测样品目标组分进行微区剥蚀,剥蚀释放出的物质在Ar等离子体中发生电离,利用质谱仪测量其同位素比值,最后根据被测样品与标准样品同位素比值的测量结果进行相关元素含量与被测样品同位素年龄的计算^[21]。

本文实验仪器为 LA-ICP-MS (Element XR), 定年标样为 WC-1 和 AHX-1, 同位素校正标样为 NIST614, 激光束斑直径为 100 μ m, 剥蚀频率为 10Hz。主要实验流程为: (1) 制备样品靶; (2) 依据目标组分情况选择待测区域(激光剥蚀目标点位见图3中红色标记); (3) 在待测区域内逐点进行激光剥蚀与质谱分析; (4) 处理接收到的实验数据并制作年龄图(图6)。所得测试结果见表1。

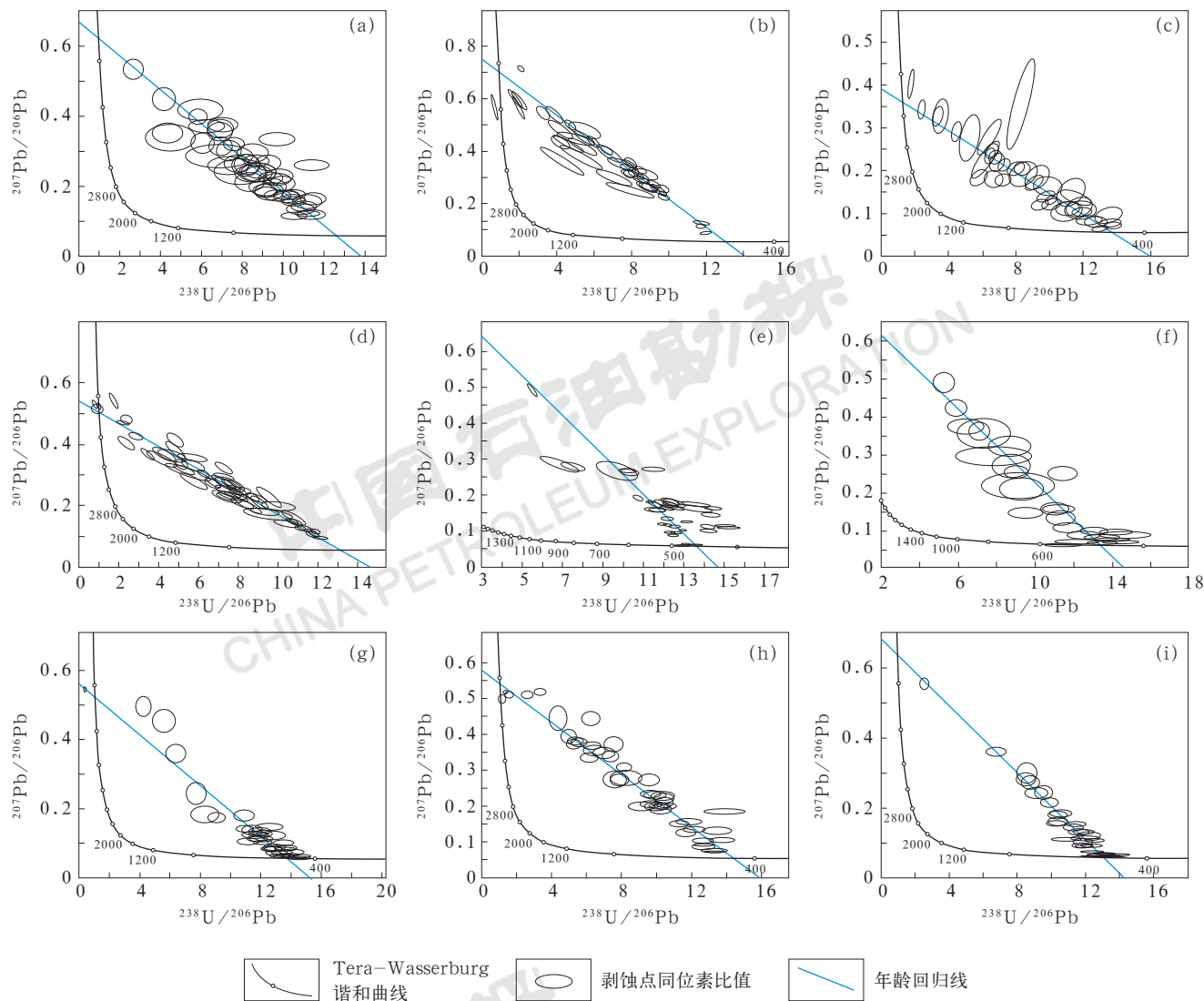


图6 塔东古城地区奥陶系实验样品 U—Pb 同位素年龄图

Fig.6 U—Pb isotope dating diagram of diagenetic components of the Ordovician samples in Gucheng area, eastern Tarim Basin

(a) 样品 X-1, 粉晶白云石, 492Ma \pm 19Ma; (b) 样品 X-2, 残余颗粒细—中晶白云石, 478Ma \pm 16Ma; (c) 样品 X-2, 鞍状白云石, 455Ma \pm 17Ma; (d) 样品 X-3, 残余颗粒细—中晶白云石, 474Ma \pm 11Ma; (e) 样品 X-3, 鞍状白云石, 456Ma \pm 12Ma; (f) 样品 X-3, 孔洞内方解石胶结物, 464Ma \pm 16Ma; (g) 样品 X-4, 鞍状白云石, 451.4Ma \pm 8.8Ma; (h) 样品 X-4, 云化渗流粉砂(细晶白云石), 434Ma \pm 15Ma; (i) 样品 X-4, 围岩细—中晶白云石, 475Ma \pm 5.5Ma

由于定年结果普遍存在误差,某组分定年所得到的年龄下限甚至可能早于目的层位鹰三段碳酸盐沉积物的原始沉积时间。由于储层所经历的一系列成岩

作用均是在沉积之后发生的,原始沉积时间之前的这部分误差显然是不合理的、不可能出现的。因此,在对各个组分形成期次展开分析前,一个重要的工作是

确定目的层位鹰三段的原始沉积时间,以此作为基准,早于该时间的年龄范围不予采信,从而缩小误差范围。前人研究表明鹰山组沉积时期大致对应于国际标准地质年代表中一下奥陶统弗洛阶—大坪阶(距今477.7—467.3Ma)。在本文研究中,X-1号样品为粉晶白云石,其单偏光下可见隐约的纹层结构,对其进行阴极发光观察,可以发现该样品不发光(图7a、b),表明其形成于准同生期蒸发氧化的环境,为典型的潮

坪蒸发岩成因。该样品定年结果为 $492\text{Ma} \pm 19\text{Ma}$,年龄上限为473Ma;在前述鹰山组沉积时期范围内。由于准同生期白云岩的形成时间接近古海洋碳酸盐沉积物的原始沉积时间,据此将鹰三段原始沉积时间限定在X-1粉晶白云石年龄上限473Ma与下奥陶统弗洛阶年龄下限477.7Ma之间,取该范围年龄中值约为475.35Ma(图8)。余下各组分样品的年龄各有差异,但总体上能表现出一定的期次性(图8)。

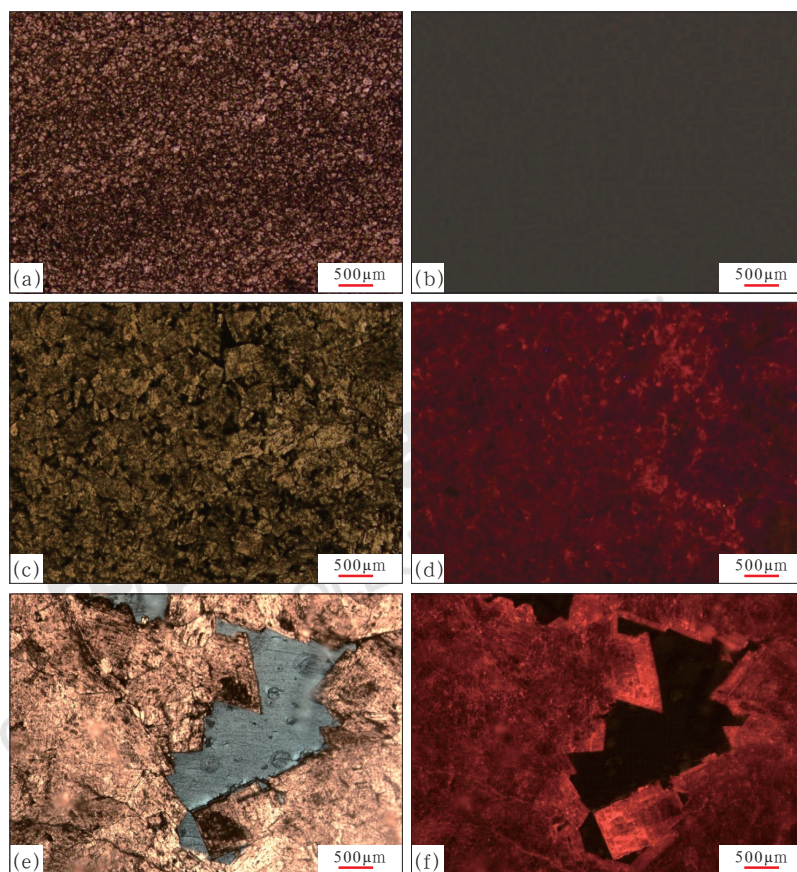


图7 塔东典型井样品镜下照片及同视域阴极发光照片

Fig.7 Microscopic and CL images with the same field of vision of samples in typical wells in Gucheng area, eastern Tarim Basin

(a) 粉晶白云石; (b) 与(a)相同视域, 阴极射线之下几乎不发光; (c) 围岩细—中晶白云石; (d) 与(c)相同视域, 阴极射线之下发光昏暗, 局部棕褐色光; (e) 孔洞壁中—粗晶白云石; (f) 与(e)相同视域, 阴极射线之下发橘红色光, 局部具有红色亮边

4 孔隙演化过程分析

深层碳酸盐岩储层在成岩演化过程中经历了构造体制、热体制、压力体制、流体体制和时间等多期的流体—成岩环境变迁,成岩过程复杂、多期叠加改造、储层非均质性强。不同的构造—埋藏热演化史阶段,温压场特征及流体类型均有所不同。

理论上,获得不同组分的同位素年龄后,将不同组分的年龄相对比就可以直接获得各组分形成的先后顺序,从而恢复孔隙演化的过程。但是由于地质过程

的复杂性,后续成岩作用及流体不可避免地会对先存成岩作用产物进行改造。这就造成样品通过定年技术得到的同位素年龄,是一个包括误差范围的年龄区间,各个组分年龄虽然表现出了期次性,但是不同组分的年龄区间可能存在重合的范围,给成岩期次的划分造成困难。同时需要认识到,定年结果仅代表该区间的年龄中值,并不意味着年龄中值所代表的年龄具有更高的可能性,因此,对于同一样品不同组分及不同样品之间直接对比年龄中值也是不科学的。为了解决上述问题,本文采用激光原位U—Pb同位素年龄、阴

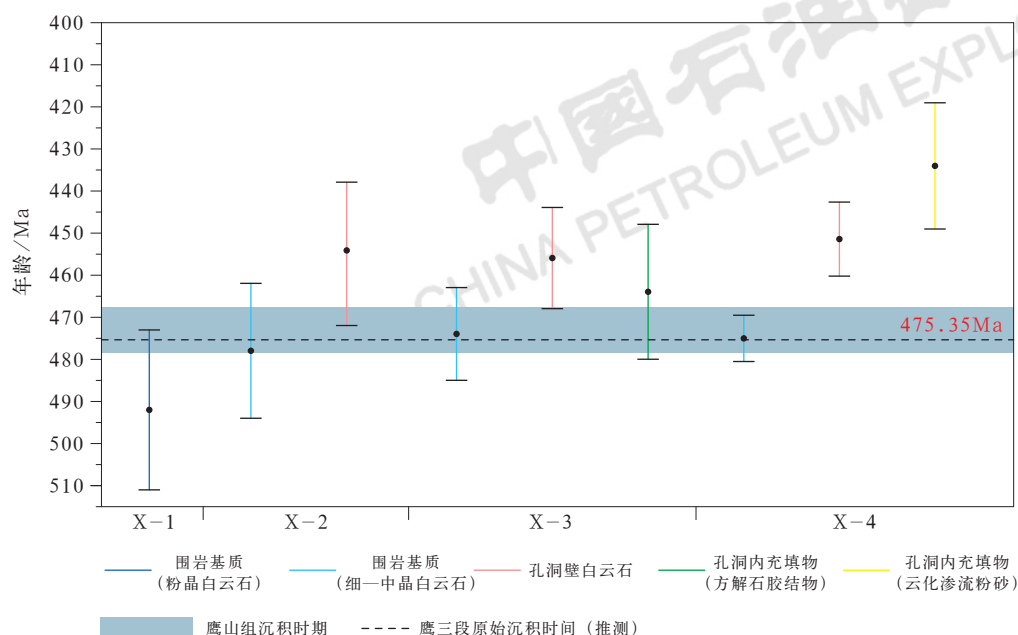


图8 典型井定年样品年龄分布图及鹰三段原始沉积时间的确定

Fig.8 Dating results of samples in typical wells and determination of the primary deposition period of the third member of Yingshan Formation

极发光、元素面扫描、各组分宏观、微观接触关系，结合埋藏史、镜质组反射率、自生矿物等，综合确定白云岩储层的成岩演化序列。

4.1 白云石化作用期次的确定

对比样品 X-2、X-3 和 X-4 的围岩基质细—中晶白云石的定年结果，可以发现三者的年龄均位于推测的鹰三段原始沉积时间 475.35Ma 附近，并且其年龄均明显具有比样品 X-1 粉晶白云石更年轻的趋势（图 8）。这就表明，鹰三段白云岩储层围岩样品白云石化作用发生的时代比较早，应该处于稍晚于准同生期的浅埋藏期。使用前文厘定的鹰三段原始沉积时间 475.35Ma 作为统一的下限截止值，可以有效缩小围岩基质组分定年数据的误差范围（图 9）。该 3 个样品围岩基质组分修正后的年龄分别为：468.7Ma±6.7Ma、469.2Ma±6.2Ma 和 472.4Ma±2.9Ma。因此，取修正后年龄中值的平均值约 470.1Ma 作为围岩基质细—中晶白云石发生白云石化作用的年代。围岩基质细—中晶白云石在阴极射线下总体以昏暗或棕褐色光、棕色光最为多见（图 7c、d），从另一方面说明研究区围岩基质（残余颗粒结构的细—中晶白云石）以埋藏交代成因为主，局部受到晚期热液的改造。

同样，对比这 3 个样品孔洞壁中—粗晶白云石的年龄，可以发现它们均显著晚于鹰山组沉积时期，年龄范围比较一致（图 10）。据此认为，孔洞壁中—

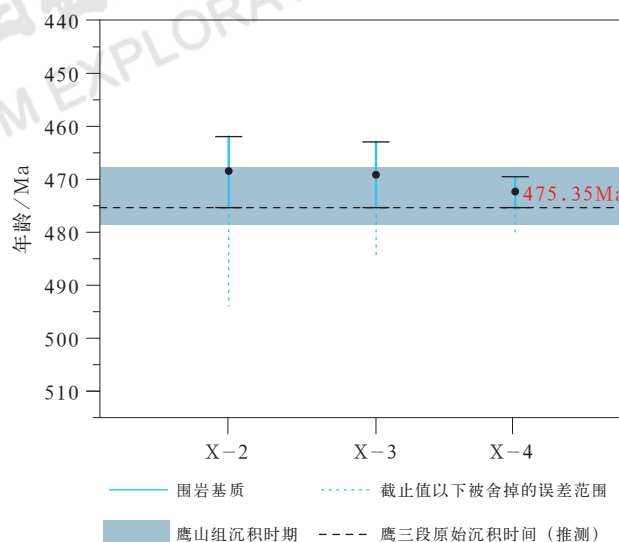


图9 典型井定年样品围岩基质组分定年结果对比

Fig.9 Dating results of matrix component of host rock samples in typical wells

粗晶白云石形成于同一期，该期白云石化作用发生的时代可以用 3 个样品定年结果重叠出最小范围的中值约 452.1Ma 来表示。由于 3 个样品孔洞壁白云石的产状均具有鞍状白云石的特征（图 4d、f、h），因此可以推断，于 452.1Ma 左右发生了第二期热液白云石化流体的侵入，伴随孔洞壁被中—粗晶白云石的充填，局部表现出 Ce 富集（图 5d），阴极射线下总体以橘红色光或明亮色光最为多见，晶体具相对较亮的红色环边（图 7e、f）。

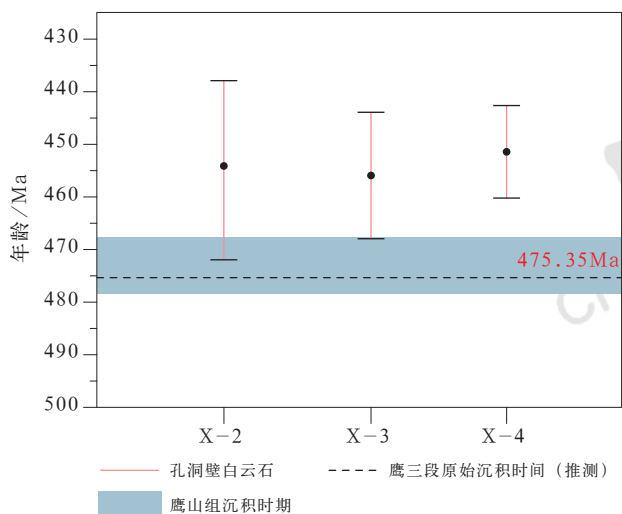


图 10 典型井定年样品孔洞壁白云石组分定年结果对比
Fig.10 Dating results of dolomite components on the wall of vugs of samples in typical wells

4.2 孔洞内充填物期次的确定

测试了样品 X-4 中围岩基质 (细—中晶白云石)、孔洞壁中—粗晶白云石和孔洞内充填物 (云化渗流粉砂) 3 种结构组分, 这 3 种组分的年龄表现出了明显的期次性 (图 8)。通过宏观和微观矿物接触关系可以发现 (图 4g、h), 细—中晶白云石内侧为云化渗流粉砂, 后者的内侧与孔洞胶结物直接接触的是孔洞壁中—粗晶白云石, 孔洞内方解石胶结物将孔洞完全充填占据。而从典型井岩心上识别出的米级旋回中可以发现 (图 11a), 类似 X-4 样品中表现出来的由云化渗流粉砂和方解石胶结物构成的示顶构造, 往往发育于高频旋回的顶部 (图 11b、c), 显示出准同生期岩溶暴露面的特征。

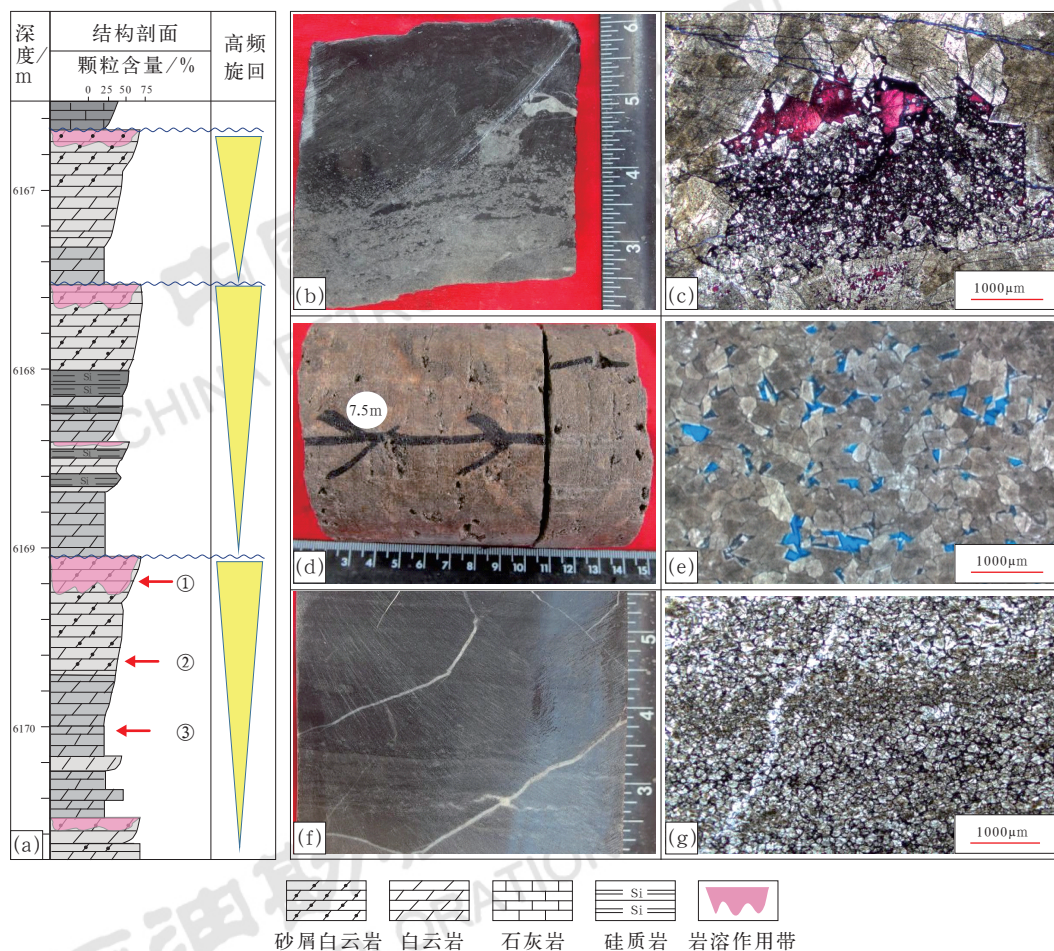


图 11 塔东典型井鹰三段岩心识别的高频米级旋回特征

Fig.11 Characteristics of the meter-level high-frequency cycles identified on core samples of the third member of Yingshan Formation in typical wells, eastern Tarim Basin

(a) 典型井岩心高频旋回柱状图; (b) 对应 (a) 中 6169.02m, 样品位置①, 岩心宏观照片, 深灰色白云岩, 具有岩溶花斑, 局部见示顶构造; (c) 对应 (a) 中 6169.02m, 样品位置①, 单偏光照片, 见孔洞内云化渗流粉砂, 孔洞空间被方解石充填破坏, 围岩具有残余颗粒结构; (d) 对应 (a) 中 6169.57m, 样品位置②, 岩心宏观照片, 深灰色细—中晶白云岩, 局部见孔洞发育, 具有层理; (e) 对应 (a) 中 6169.57m, 样品位置②, 单偏光照片, 见细—中晶白云石残余颗粒结构, 晶间孔沿层理发育; (f) 对应 (a) 中 6170.37m, 样品位置③, 岩心宏观照片, 深灰色粉晶白云岩, 具有水平层理, 局部见方解石充填缝; (g) 对应 (a) 中 6170.37m, 样品位置③, 单偏光照片, 局部见方解石充填缝, 孔隙不发育

而 X-4 样品围岩基质(细—中晶白云石)组分的定年结果为 $475\text{Ma} \pm 5.5\text{Ma}$, 显示其年龄十分接近推测的鹰三段原始沉积时间 475.35Ma 。该组分表现出明显的残余颗粒结构(图 4h), 与米级旋回中岩溶暴露面之下的残余颗粒细—中晶白云岩(图 11d、e)相似。高频旋回底部的粉晶白云岩(图 11f、g)与样品 X-1 类似, 准同生期白云石化的时间接近于古海洋碳酸盐沉积物的原始沉积时间。

从定年数据来看, X-4 样品云化渗流粉砂的年龄 $434\text{Ma} \pm 15\text{Ma}$ 明显晚于围岩基质(细—中晶白云石)的 $475\text{Ma} \pm 5.5\text{Ma}$, 并且似乎比孔洞壁中—粗晶白云石 $451.4\text{Ma} \pm 8.8\text{Ma}$ 还晚。实际上, 渗流粉砂的形成受控于高频海平面升降旋回, 是一种准同生期暴露岩溶的产物(图 11b)。由于渗流粉砂具有较好的孔渗特征, 在浅埋藏阶段难免受到后期热液流体的改造, 并打上“晚期热液流体的烙印”。因此推断渗流粉砂与围岩基质(细—中晶白云石)两者白云石化的年代接近, 为 470.1Ma 左右的浅埋藏阶段的第一期白云石化作用。

受限于 U 含量太低的影响, X-4 样品孔洞内方解石充填物的年龄没有测定出来。X-3 样品孔洞内方解石胶结物定年浮动较大, 但是其年龄上限为 448Ma

(图 8)。综合宏观和微观矿物接触关系(图 4g、h), 推测 X-4 样品孔洞壁中—粗晶白云石形成后不久, 该孔洞即被随后而来的富钙质热液流体所充填, 造成了局部储集空间的破坏, 富钙质热液流体充填发生的时间不晚于 448Ma 。

4.3 白云岩储层孔隙演化序列的建立

通过上述对激光原位 U—Pb 同位素定年、元素面扫及成像的综合分析, 结合埋藏史—热演化史图可知(图 12), 加里东期、海西期等多期次构造热事件对深层油气成藏起到关键的调整改造作用^[32]。构造热液的侵入作用改变了当时的地温场, 频繁的火成岩侵入活动导致较高的地温梯度, 使得塔东地区下寒武统玉尔吐斯组、中寒武统莫合尔山组与中—下奥陶统黑土凹组 3 套烃源岩的镜质组反射率普遍大于 1.5% , 为高一过成熟烃源岩^[33-35]。从质量平衡及不同温压场条件下矿物的溶解—沉淀机制来说, 溶蚀作用(或扩溶)与胶结作用(充填作用)是对立统一的。热液流体沿断裂及裂缝活动过程中, 随着温度、压力条件的改变及与围岩的相互作用, 会沉淀出一些特殊的矿物, 如鞍状白云石、方解石, 局部也可见少量的石英、黄铁矿、萤石等其他自生热液矿物^[36-37]。

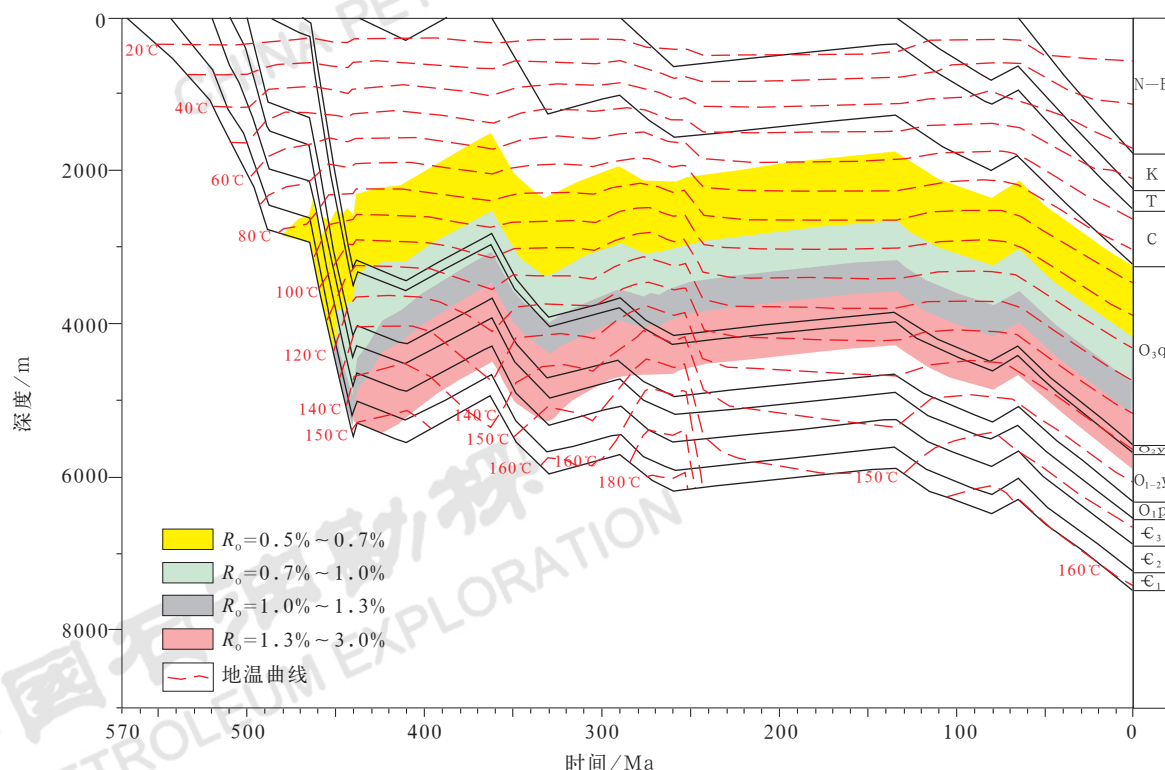


图 12 塔东古城地区典型井埋藏史—热演化史图

Fig.12 Burial-thermal evolution history of typical wells in Gucheng area, eastern Tarim Basin

在上述综合分析的基础上,建立起塔东古城地区鹰三段白云岩储层孔隙演化序列(图13)及相应的演化模式(图14):于475.35Ma左右,鹰三段浅缓坡内带多孔的滩相颗粒灰岩沉积,奠定了储层孔隙的物质基础。储层孔隙演化过程中,先后经历了两期白云石化作用和一期钙质流体充填作用。首先,准同生期发生暴露岩溶,形成局部岩溶孔洞,部分石灰岩围岩垮塌成为渗流粉砂;其后,在470.1Ma左右的

浅埋藏阶段发生第一期白云石化作用,形成了围岩及局部渗流粉砂的白云石化,并在局部孔洞壁形成第一期孔洞壁白云石,晶间孔隙主要继承自残余的早期孔隙—孔洞;于452.1Ma左右发生第二期白云石化作用,导致了早期白云石的次生加大,使孔隙—孔洞进一步缩减;在不晚于448Ma钙质流体侵入,造成局部储集空间的破坏。同时,成岩流体也可能沿裂缝在局部造成扩溶,形成溶蚀孔洞。

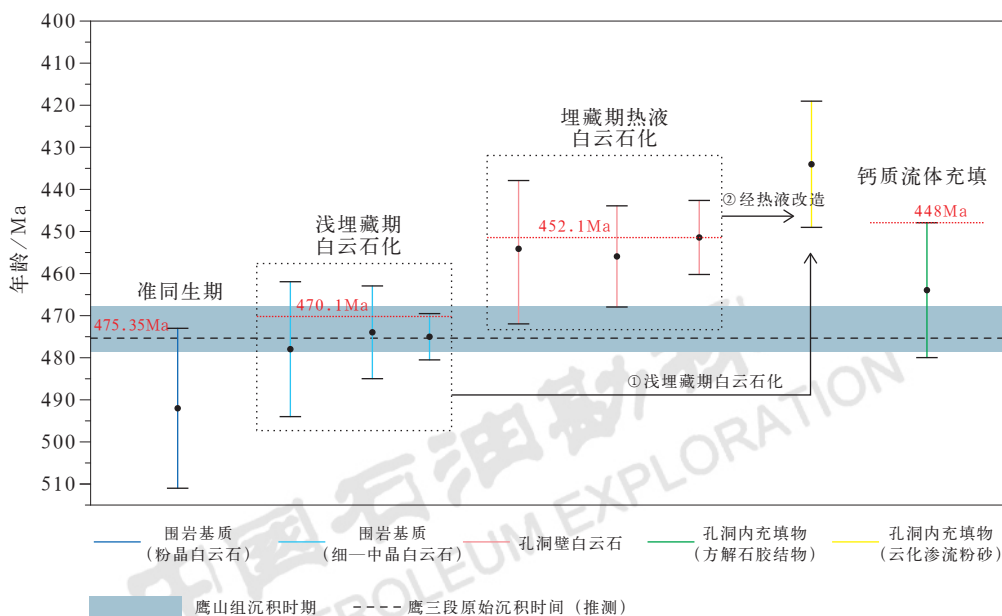


图13 塔东古城地区鹰三段白云岩储层孔隙演化序列定量研究

Fig.13 Quantitative analysis of pore evolution sequence of dolomite reservoir of the third member of Yingshan Formation in typical wells, eastern Tarim Basin

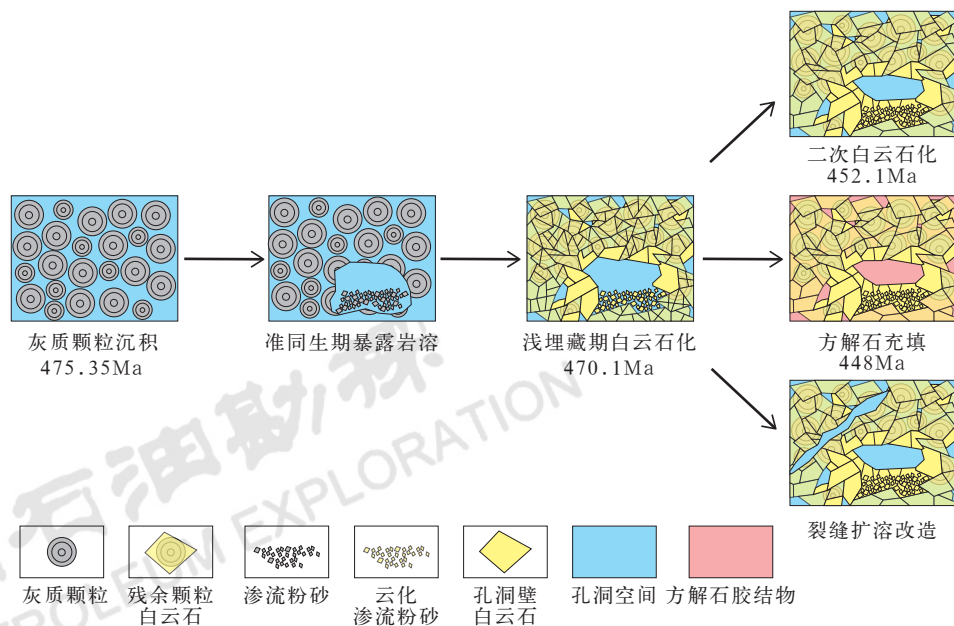


图14 塔东古城地区鹰三段白云岩储层孔隙演化模式

Fig.14 Pore evolution mode of dolomite reservoir of the third member of Yingshan Formation in typical wells, eastern Tarim Basin

在白云岩储层充填序列、成岩过程及孔隙演化过程研究的基础上, 结合大量薄片孔隙—充填特征统计发现, 构造热液对储层的调整改造是一把“双刃剑”, 即“充填减孔与溶蚀改造”并存。白云岩储层孔隙主体来自对先存云化滩孔隙的继承(比重可达2%~4%), 局部在断裂带附近可形成裂缝—孔洞型优质白云岩储层(可增孔1%, 孔隙度达到3%~5%), 构造热液的末端往往表现为方解石、鞍状白云石等自生热液矿物的充填减孔(减孔率可达1%~4%)。

5 结论

(1) 激光原位 U—Pb 同位素定年技术在储层成岩期次与孔隙演化研究中能够发挥重要的作用。实验分析表明, 塔里木盆地古城地区奥陶系鹰三段高能滩相原始沉积年龄约为475.35Ma, 奠定了储层发育的物质基础, 并在储层演化过程中先后经历了两期明显的白云石化作用和一期钙质流体充填作用。其中第一期白云石化流体作用时间约为470.1Ma, 造成了围岩的白云石化, 并在局部孔洞壁形成了第一期的孔洞壁白云石。第二期白云石化流体作用时间约为452.1Ma, 造成了局部的云化渗流粉砂、围岩白云石晶体的进一步加大变粗, 并形成了第二期孔洞壁白云石。钙质流体的充填发生不晚于448Ma, 造成了局部储集空间的破坏。

(2) 基于激光原位 U—Pb 同位素定年技术精准锁定了关键成岩作用的期次, 明确储层孔隙演化过程, 指出塔里木盆地古城地区奥陶系鹰三段白云岩储层现存孔隙主要继承自残余的早期孔隙, 而并非传统意义上的构造—热液溶蚀造孔。建议进一步加强鹰三段高能滩相储层属性的优选及滩体的精细刻画, 为靶点及侧钻提供依据。

参考文献

- [1] 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2016, 20(1): 3-14.
He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, *et al.* Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultradeep marine carbonates in China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 20(1): 3-14.
- [2] 厉玉乐, 王显东, 孙效东, 等. 古城低凸起构造演化及有利勘探方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(5): 97-102.
Li Yule, Wang Xiandong, Sun Xiaodong, *et al.* Structural evolution and favorable exploration direction for Gucheng Low Uplift[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(5): 97-102.
- [3] 郑孟林, 王毅, 金之钧, 等. 塔里木盆地叠合演化与油气聚集[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 925-934.
Zheng Menglin, Wang Yi, Jin Zhijun, *et al.* Superimposition,

- evolution and petroleum accumulation of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 925-934.
- [4] 曹颖辉, 王珊, 张亚金, 等. 塔里木盆地古城地区下古生界碳酸盐岩油气地质条件与勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1099-1114.
Cao Yinghui, Wang Shan, Zhang Yajin, *et al.* Petroleum geological conditions and exploration potential of Lower Paleozoic carbonate rocks in Gucheng Area, Tarim Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1099-1114.
 - [5] 刘伟, 沈安江, 柳广弟, 等. 塔里木盆地塔东地区下古生界碳酸盐岩储层特征与勘探领域[J]. 海相油气地质, 2016, 21(2): 1-12.
Liu Wei, Shen Anjiang, Liu Guangdi, *et al.* Characteristics and exploration domains of lower paleozoic carbonate reservoirs in eastern Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2016, 21(2): 1-12.
 - [6] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 102-111.
Qi Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 102-111.
 - [7] 李阳, 康志江, 薛兆杰, 等. 碳酸盐岩深层油气开发技术助推我国石油工业快速发展[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(3): 33-42.
Li Yang, Kang Zhijiang, Xue Zhaojie, *et al.* Deep carbonate oil and gas development technology fuels China's petroleum industrial development[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(3): 33-42.
 - [8] 杨海军, 邓兴梁, 张银涛, 等. 塔里木盆地满深1井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 13-23.
Yang Haijun, Deng Xingliang, Zhang Yintao, *et al.* A great discovery and its significance for exploration of Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs in Well Manshen 1 in the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 13-23.
 - [9] 张亚金, 张湘娟, 张振伟, 等. 古城地区奥陶系鹰山组白云岩储层特征及其控制因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(4): 1-8.
Zhang Yajin, Zhang Xiangjuan, Zhang Zhenwei, *et al.* Characteristics and their controlling factors of Ordovician dolomite reservoir in Yingshan Formation in Gucheng area[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(4): 1-8.
 - [10] 胡明毅, 付晓树, 蔡全升, 等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系鹰山组一间房组岩溶储层特征及成因模式[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1476-1486.
Hu Mingyi, Fu Xiaoshu, Cai Quansheng, *et al.* Characteristics and genetic model of karst reservoirs of Ordovician Yingshan-Yijianfang Formation in Halahatang area, northern Tarim Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1476-1486.
 - [11] 赵宗举, 李宇平, 吴兴宁, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系特大型岩性油气藏成藏条件及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2004, 9(5): 12-20.
Zhao Zongju, Li Yuping, Wu Xingning, *et al.* Conditions for migration and accumulation of Ordovician giant lithologic oil and gas reservoirs in Tazhong region and exploration potential[J]. China Petroleum Exploration, 2004, 9(5): 12-20.
 - [12] 冯子辉, 李强, 张亚金, 等. 古城低凸起奥陶系油气成藏条件与分布规律[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 87-93.
Feng Zihui, Li Qiang, Zhang Yajin, *et al.* Accumulating conditions and distribution laws of Ordovician hydrocarbon in Gucheng Low Uplift[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 87-93.
 - [13] 朱可丹, 张友, 林彤, 等. 基于CT成像的白云岩储层孔喉非均质性分析: 以塔东古城地区奥陶系GC601井鹰三段为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 862-873.
Zhu Kedan, Zhang You, Lin Tong, *et al.* Pore-throat heterogeneity in dolomite reservoirs based on CT imaging: a case study of the 3rd member of the Ordovician Yingshan Formation

- in Well GC601 in Gucheng area, eastern Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020,41(4):862–873.
- [14] 张友, 李强, 郑兴平, 等. 塔里木盆地东部古城—肖塘地区寒武纪—奥陶纪台地类型、演化过程及有利相带评价[J]. *石油学报*, 2021, 42(4):447–465.
- Zhang You, Li Qiang, Zheng Xingping, *et al.* Types, evolution and favorable reservoir facies belts in the Cambrian–Ordovician platform in Gucheng–Xiaotang area, eastern Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021,42(4):447–465.
- [15] 曹彦清, 张友, 沈安江, 等. 塔里木盆地古城地区奥陶系碳酸盐岩成储与成藏[J]. *海相油气地质*, 2020,25(4):303–311.
- Cao Yanqing, Zhang You, Shen Anjiang, *et al.* Carbonate reservoir formation and hydrocarbon accumulation of Ordovician in Gucheng area, Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020,25(4):303–311.
- [16] 沈安江, 张友, 冯子辉, 等. 塔里木盆地古城地区碳酸盐岩储层地质认识与勘探领域[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(3):96–106.
- Shen Anjiang, Zhang You, Feng Zihui, *et al.* Geological understanding and exploration prospects of carbonate reservoirs in Gucheng area, Tadong, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(3):96–106.
- [17] 王珊, 曹颖辉, 杜德道, 等. 塔里木盆地古城地区奥陶系鹰山组白云岩特征及孔隙成因[J]. *岩石学报*, 2020,36(11):3477–3492.
- Wang Shan, Cao Yinghui, Du Dedao, *et al.* Characteristics and pore genesis of dolomite in Ordovician Yingshan Formation in Gucheng area, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020,36(11):3477–3492.
- [18] 刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 塔里木盆地热液特点及其对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. *天然气工业*, 2016,36(3):14–21.
- Liu Wei, Huang Qingyu, Wang Kun, *et al.* Characteristics of hydrothermal activity in the Tarim Basin and its reworking effect on carbonate reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(3):14–21.
- [19] 杨海军, 李开开, 潘文庆, 等. 塔中地区奥陶系埋藏热液溶蚀流体活动及其对深部储层的改造作用[J]. *岩石学报*, 2012,28(3):783–792.
- Yang Haijun, Li Kaikai, Pan Wenqing, *et al.* Burial hydrothermal dissolution fluid activity and its transforming effect on the reservoirs in Ordovician in Central Tarim[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012,28(3):783–792.
- [20] 高波. 古城地区鹰下段碳酸盐岩中硅质特征及其对储层的影响[J]. *西部探矿工程*, 2019,31(9):69–71.
- Gao Bo. Characteristics of silica in Lower Yingshan Formation carbonate at Gucheng area and its effect on reservoir[J]. *West–China Exploration Engineering*, 2019,31(9):69–71.
- [21] Woodhead J, Hellstrom J, Maas R, *et al.* U–Pb geochronology of speleothems by MC–ICPMS[J]. *Quaternary Geochronology*, 2006,1(3):208–221.
- [22] Woodhead J, Pickering R. Beyond 500 ka: Progress and prospects in the U–Pb chronology of speleothems, and their application to studies in palaeoclimate, human evolution, biodiversity and tectonics[J]. *Chemical Geology*, 2012,322:290–299.
- [23] Pickering R, Kramers J D, Partridge T, *et al.* U–Pb dating of calcite–aragonite layers in speleothems from hominin sites in south Africa by MC–ICP–MS[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010,5(5):544–558.
- [24] 胡安平, 沈安江, 梁峰, 等. 激光铀铅同位素定年技术在塔里木盆地肖尔布拉克组储层孔隙演化研究中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2020,41(1):37–49.
- Hu Anping, Shen Anjiang, Liang Feng, *et al.* Application of laser in-situ U–Pb dating to reconstruct the reservoir porosity evolution in the Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020,41(1):37–49.
- [25] Roberts N M W, Drost K, Horstwood M S A, *et al.* Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA–ICP–MS) U–Pb carbonate geochronology: strategies, progress, and limitations[J]. *Geochronology*, 2020,2(1):33–61.
- [26] Li Q, Parrish R R, Horstwood M S A, *et al.* U–Pb dating of cements in Mesozoic ammonites[J]. *Chemical Geology*, 2014, 376:76–83.
- [27] Coogan L A, Parrish R R, Roberts N M. Early hydrothermal carbon uptake by the upper oceanic crust: insight from in situ U–Pb dating[J]. *Geology*, 2016,44(2):147–150.
- [28] Roberts N M, Rasbury E T, Parrish R R, *et al.* A calcite reference material for LA–ICP–MS U–Pb geochronology[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017,18(7):2807–2814.
- [29] 乔占峰, 张哨楠, 沈安江, 等. 基于激光 U–Pb 定年的埋藏白云岩形成过程: 以塔里木盆地永安坝剖面下奥陶统蓬莱坝组为例[J]. *岩石学报*, 2020,36(11):3493–3509.
- Qiao Zhanfeng, Zhang Shaonan, Shen Anjiang, *et al.* Laser ablated U–Pb dating–based determination of burial dolomitization process: a case study of Lower Ordovician Penglaiba Formation of Yonganba outcrop in Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020,36(11):3493–3509.
- [30] Shen A, Hu A, Cheng T, *et al.* Laser ablation in situ U–Pb dating and its application to diagenesis–porosity evolution of carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019,46(6):1127–1140.
- [31] 王招明, 杨海军, 齐英敏, 等. 塔里木盆地古城地区奥陶系天然气勘探重大突破及其启示[J]. *天然气工业*, 2014,34(1):1–9.
- Wang Zhaoming, Yang Haijun, Qi Yingmin, *et al.* Ordovician gas exploration breakthrough in the Gucheng Lower Uplift of the Tarim Basin and its enlightenment[J]. *Natural Gas Industry*, 2014,34(1):1–9.
- [32] 冉启贵, 程宏岗, 肖中尧, 等. 塔东地区构造热事件及其对原油裂解的影响[J]. *现代地质*, 2008,22(4):541–548.
- Ran Qigui, Cheng Honggang, Xiao Zhongyao, *et al.* Tectono–thermal event and its influence on cracking of crude oil in eastern Tarim Basin[J]. *Geoscience*, 2008,22(4):541–548.
- [33] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. *天然气地球科学*, 2016,27(1):8–21.
- Zhu Guangyou, Chen Feiran, Chen Zhiyong, *et al.* Discovery and basic characteristics of the high–quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016,27(1):8–21.
- [34] 管树巍, 张春宇, 任荣, 等. 塔里木北部早寒武世同沉积构造: 兼论寒武系盐下和深层勘探[J]. *石油勘探与开发*, 2019,46(6):1075–1086.
- Guan Shuwei, Zhang Chunyu, Ren Rong, *et al.* Early Cambrian syndepositional structure of the northern Tarim Basin and a discussion of Cambrian subsalt and deep exploration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019,46(6):1075–1086.
- [35] 杨海军, 陈永权, 田军, 等. 塔里木盆地轮探 1 井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(2):62–72.
- Yang Haijun, Chen Yongquan, Tian Jun, *et al.* Great discovery and its significance of ultra–deep oil and gas exploration in Well Luntan–1 of the Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(2):62–72.
- [36] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. *地质学报*, 2006,80(2): 245–253.
- Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006,80(2):245–253.
- [37] 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.