

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

胡安平^{1,2}, 沈安江^{1,2}, 梁峰^{1,2}, 赵建新³, 罗宪婴^{1,2}, 俸月星³, 程婷^{3,4}

(1. 中国石油 杭州地质研究院, 江苏 杭州 310023; 2. 中国石油天然气集团公司 碳酸盐岩储层重点实验室, 江苏 杭州 310023; 3. 昆士兰大学 地球与环境科学学院 放射性同位素实验室, 澳大利亚 布里斯班; QLD 4072 4. 中国地质科学院 北京离子探针中心, 北京 102206)

摘要:古老海相碳酸盐岩铀和铅含量普遍较低、且成岩组构直径小, 很难取得足够的粉末样品, 常规的溶液法铀铅同位素定年在古老海相碳酸盐岩中难以推广应用。针对以上问题, 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室和昆士兰大学(UQ)地球科学院放射性同位素实验室两家共同开发激光原位 U-Pb 同位素定年技术, 并应用于塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组储层成岩-孔隙演化研究。通过充填孔洞、孔隙和裂缝中不同期次白云石和方解石胶结物的测年, 指出寒武系肖尔布拉克组白云岩储层的埋藏成岩过程是孔隙和孔洞逐渐被充填的过程。孔洞的充填作用主要发生在早加里东期, 孔隙的充填作用主要发生在中加里东期和印支期, 加里东和印支期断裂作为热液运移的通道, 为充填孔洞和孔隙的胶结物提供了物源, 未被白云石、方解石和硅质胶结物充填的残留孔洞、孔隙和裂缝构成了主要储集空间, 建立了肖尔布拉克组白云岩储层的成岩-孔隙演化史。这些认识与该地区的构造-埋藏史、盆地热史具有很高的吻合度, 结合下古生界烃源生烃史, 为古老海相胶结物形成时间确定、成岩-孔隙演化研究和油气运移前有效孔隙评价提供了利器。

关键词:白云石和方解石胶结物; 激光原位铀铅同位素定年技术; 成岩-孔隙演化史; 碳酸盐岩储层; 寒武系肖尔布拉克组; 塔里木盆地
中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Application of laser in-situ U-Pb dating to reconstruct the reservoir porosity evolution in the Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

Hu Anping^{1,2}, Shen Anjiang^{1,2}, Liang Feng^{1,2}, Zhao Jianxin³, Luo Xianying^{1,2}, Feng Yuexing³, Cheng Ting^{3,4}

[1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Jiangsu 310023, China; 2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou, Jiangsu 310023, China; 3. Radiogenic Isotope Facility, School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australia; 4. Beijing SHRIMP Center, Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS), Beijing 102206, China]

Abstract: The Laser Ablation (LA) Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (MC-ICP-MS) technique, co-developed by the CNPC Key Laboratory of Carbonate Reservoir and School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland, has huge potential to overcome the difficulty in sampling and dating ultra-low concentration U-Pb minerals in ancient marine carbonates that are relatively smaller in diameter in diagenetic fabric, which was untenable by the conventional isotope dilution (ID) methods. The in-situ analysis by LA combined with MC-ICP-MS has been applied to the study on the diagenesis and porosity evolution of the Cambrian Xiaerbulake reservoir, Tarim Basin. By dating of dolomitic and calcitic cements from filled vugs, matrix pores and fractures in different stages, we suggested that the burial diagenetic history of dolomite reservoir in the Cambrian Xiaerbulake Formation mainly features the filling of primary pores and vugs generated under karstification. The filling of vugs mainly occurred during the early Caledonian, while the filling of matrix pores mainly occurred in the middle Caledonian and Indosinian. Fractures activa-

收稿日期: 2019-07-28; 修订日期: 2019-11-21。

第一作者简介: 胡安平(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 碳酸盐岩储层研究与地球化学实验技术研发。E-mail: huap_hz@petrochina.com.cn。

通讯作者简介: 沈安江(1965—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 碳酸盐岩沉积储层。E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05004-002); 中国石油科技重大专项(2018A-0103); 中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目(2018D-5008-03)。

ted during the Caledonian and Indosinian served as the channels for hydrothermal migration, providing the materials to cement the vugs and pores; while the residual vugs, pores and fractures with no filling of dolomite, calcite and siliceous cements were the main reservoir space. The diagenesis and porosity evolution history of dolomite reservoir in the Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin, was hence established. The understandings mentioned above are highly consistent with the tectonic-burial history and basin thermal history in the study area, which may be effective tools to date the ancient marine carbonate reservoir cements, to reconstruct diagenesis and porosity evolution history, and to evaluate effective pores before hydrocarbon migration in the ancient marine carbonates.

Key words: dolomitic and calcitic cement, in-situ LA U-Pb isotopic dating, diagenesis-porosity evolution history, carbonate reservoir, Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

中国海相碳酸盐岩具年代古老、埋藏深和经历多期成岩叠加改造的特点,成储历程均非常复杂,碳酸盐岩成岩矿物绝对年龄的确定是储层成岩-孔隙演化史恢复的关键。碳酸盐岩 U-Th 溶液法可以进行 0~0.5 Ma 碳酸盐岩样品的绝对年龄测定^[1-2];溶液法铀铅同位素定年技术在中新生代年轻的孔洞和洞穴充填物定年研究中也有不少报道^[3-7],得到了学术界的广泛认可。然而,碳酸盐岩 U-Th 溶液法由于受适用的年龄范围限制,不适用于古老海相碳酸盐岩;而碳酸盐岩溶液稀释法铀-铅同位素定年要求待测样品具有足够高的 U 和 Pb 含量,能够从一块手标本上获得足够量的一组小样(一般需要一组 6~8 个同源和同期的碳酸盐岩样品,每个样品 200 mg),并且这组小样的 U/Pb 比值有足够的变化范围,但是古老海相碳酸盐岩铀和铅含量普遍较低、且成岩组构直径小,很难取得足够的粉末样品,选择同源、同时、封闭体系,且 U/Pb 比有一定变化范围能拟合出等时线的理想定年样品非常困难,所以溶液法铀铅同位素定年法在古老海相碳酸盐岩中测试成功率低,无法广泛应用。

过去 20 年来,随着激光剥蚀技术的日益兴盛,激光原位 U-Pb 同位素定年技术已经广泛应用于测定高 U 矿物比如锆石、独居石、磷钇矿、榍石、金红石、磷灰石和石榴石等矿物的高精度年龄上,成为地质年代学研究领域中最常用的测年方法。近几年,一些低 U 矿物的 U-Pb 定年工作也逐渐受到关注,如石榴子石、锡石和碳酸盐矿物(方解石、文石、白云石和菱镁矿)等。尤其碳酸盐矿物 U-Pb 测年最近受到越来越多的关注^[8-12]。本文针对碳酸盐岩矿物,利用激光剥蚀(LA)与多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)或高分辨单接收电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)联用,建立适用于古老海相碳酸盐岩的激光原位 U-Pb 同位素定年技术。相比较于 TIMS/MC-ICPMS 同位素稀释法 U-Pb 测年^[6],LA-(MC)-ICP-MS 碳酸盐矿物微区 U-Pb 定年技术具有原位、制样流程简单、样品消耗量小、低

本底、空间分辨率高以及分析速度快(单点分析小于 3 mins)等优点。该技术应用于塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组白云岩成岩-孔隙演化研究,取得的认识与工区的构造-埋藏史、盆地热史非常吻合,说明测年数据的可靠性和激光原位 U-Pb 同位素定年技术的有效性,为古老海相碳酸盐岩成岩-孔隙演化研究和油前孔隙评价提供了利器。

1 区域地质背景

塔里木盆地处于塔里木板块中部稳定区,面积约 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$,是发育在前寒武纪基底之上的含油气叠合盆地^[13-14]。塔里木盆地寒武纪地层由下至上包括玉尔吐斯组、肖尔布拉克组、吾松格尔组、沙依里克组、阿瓦塔格组和丘里塔格组(图1)。玉尔吐斯组以灰绿和灰黑色泥岩为主,夹薄层灰岩及硅藻岩,有机碳含量 1.00%~9.43%,平均为 5.50%,厚约 28 m,与下伏地层奇格布拉克组呈不整合接触;肖尔布拉克组下部以灰黑色泥粉晶白云岩为主,中、上部以褐灰-灰白色藻格架、藻砂屑白云岩为主,少量泥晶白云岩,厚约 204 m;吾松格尔组以深灰和灰黑色泥晶白云岩、膏质云岩以及云质膏岩为主,夹少量砂屑白云岩,厚约 103 m;沙依里克组上部以褐灰和深灰色灰岩为主,中、下部以褐灰色膏盐岩为主,厚约 237 m;阿瓦塔格组上部以褐灰和深灰色泥质白云岩、灰质及膏质白云岩为主,中、下部以灰白和浅褐灰色膏盐岩为主,夹膏云岩及少量砂屑白云岩,厚约 326 m;丘里塔格组以灰和深灰色砂屑白云岩以及结晶白云岩为主,厚约 722 m,与上覆地层蓬莱坝组呈整合接触。

2012 年塔里木盆地中深 1 井的突破,揭示了寒武系盐下白云岩领域成藏条件优越,勘探前景广阔^[15-17],所以近几年来下寒武统肖尔布拉克组成为了勘探热点。前人对肖尔布拉克组储集层成因开展了很多研究^[18-21],普遍认为优势丘滩相是肖尔布拉克组储

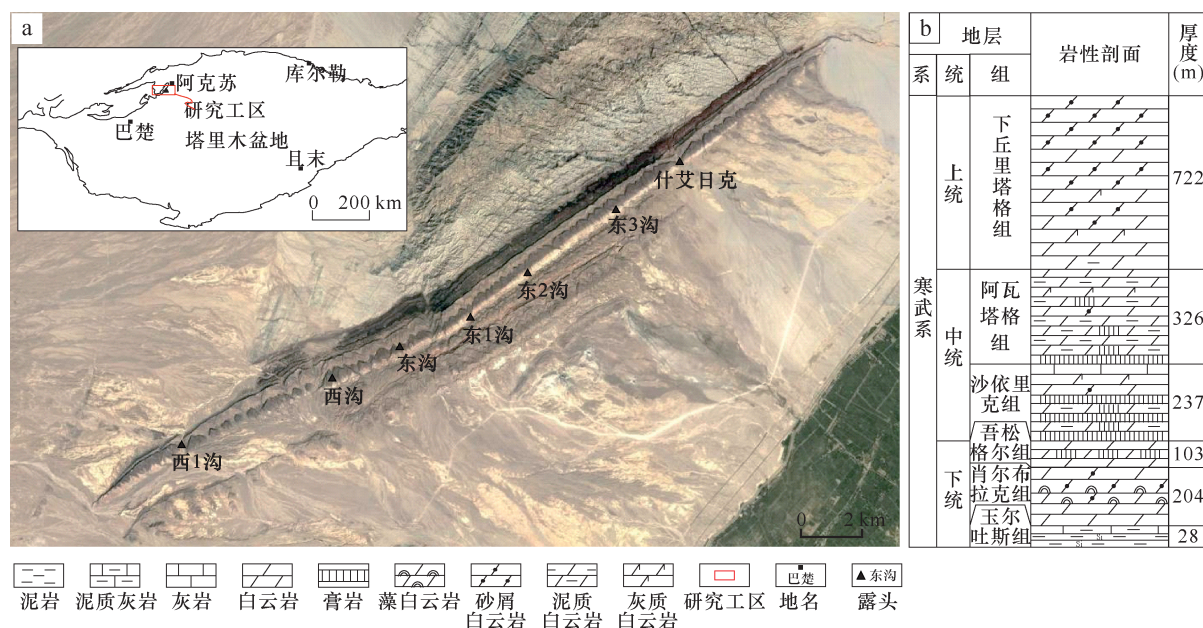


图1 塔里木盆地肖尔布拉克露头区位置(a)及寒武系综合柱状图(b)^[14]

Fig.1 The outcrop location of Xiaoerbulake area(a) and the stratigraphic column of the Cambrian, Tarim Basin(b)^[14]

集层的主控因素之一,但对孔隙形成时间和演化过程还没有进行细致分析。目前全盆地钻遇肖尔布拉克组的井和岩心较少,其中阿克苏地区肖尔布拉克露头区出露多条地层发育完整的剖面(图1),可以对肖尔布拉克组进行精细解剖。钻井和露头也揭示肖尔布拉克组以阿克苏地为典型,阿克苏地区肖尔布拉克组可划分为肖下1段、肖下2段、肖下3段、肖上1段和肖上2段5个地层单元(图2)。肖下1段以灰黑色薄层状层纹石白云岩为主,夹中薄层状藻砂屑白云岩,孔洞和裂缝发育,但被白云石、方解石和硅质完全充填,岩性致密。肖下2段与肖下1段特征相识似,但岩石表面发育大量层状分布的孔洞(2~5 cm)和裂缝,部分被白云石、方解石和硅质充填。肖下3段以灰色中层状凝块石白云岩为主,凝块状及粘结-包壳状结构,岩石表面发育大量层状分布的孔洞(2~5 cm)和裂缝,部分被白云石、方解石和硅质充填。肖上1段下部为灰白色厚层状细-中晶白云岩,局部见藻砂屑白云岩,孔隙发育,富含沥青;中部为灰白色中层状泡沫绵层石白云岩,藻丘格架孔(0.01~2 mm)和裂缝发育,少量孔洞;上部为灰白色厚层状-块状藻团粒、核形石白云岩,夹少量叠层石白云岩,岩性致密。肖上2段黄灰色泥质白云岩、灰色叠层石云岩、褐灰色粒泥(泥粒)白云岩、浅灰色藻砂屑白云岩呈中-薄层状互层,岩性致密。储层发育于肖下、肖下3段和肖上1段。孔隙和孔洞被认为是原生的,并为表生溶蚀作用进一步溶蚀扩大^[19]。

2 样品特征与产状

肖尔布拉克组是塔里木盆地寒武系盐下重要的油气储层,主要发育于肖下2段、肖下3段和肖上1段(图2),累计厚30~50 m。肖下2段和肖下3段储集空间以孔洞为主,伴生裂缝和断裂,为裂缝-孔洞型储层。肖上1段储集空间以藻丘格架孔、晶间(溶)孔、孔洞和粒间孔为主,为裂缝-孔隙-孔洞型储层,并有沥青和少量白云石、方解石和硅质充填^[17]。本文选取阿克苏地区肖尔布拉克西沟剖面、东1沟剖面和舒探1井的充填孔洞的各期胶结物及围岩样品、充填藻丘格架孔、晶间(溶)孔和藻砂屑粒间孔的各期胶结物及围岩样品、充填裂缝的各期胶结物样品,开展定年研究,为成岩-孔隙演化史的建立和油气运移前有效孔隙的确定提供重要信息。定年检测样品来源、层位、产状和检测目的信息见表1和图3。

3 分析方法

针对古老海相碳酸盐岩胶结物难以取得足够量的粉末平行样品、铀铅含量普遍较低等问题,利用激光剥蚀(LA)与多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)或高分辨单接收电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)联用,建立适用于古老海相碳酸盐岩的激光原位U-Pb同位素定年技术。其分析原理是用激光束对待测样品

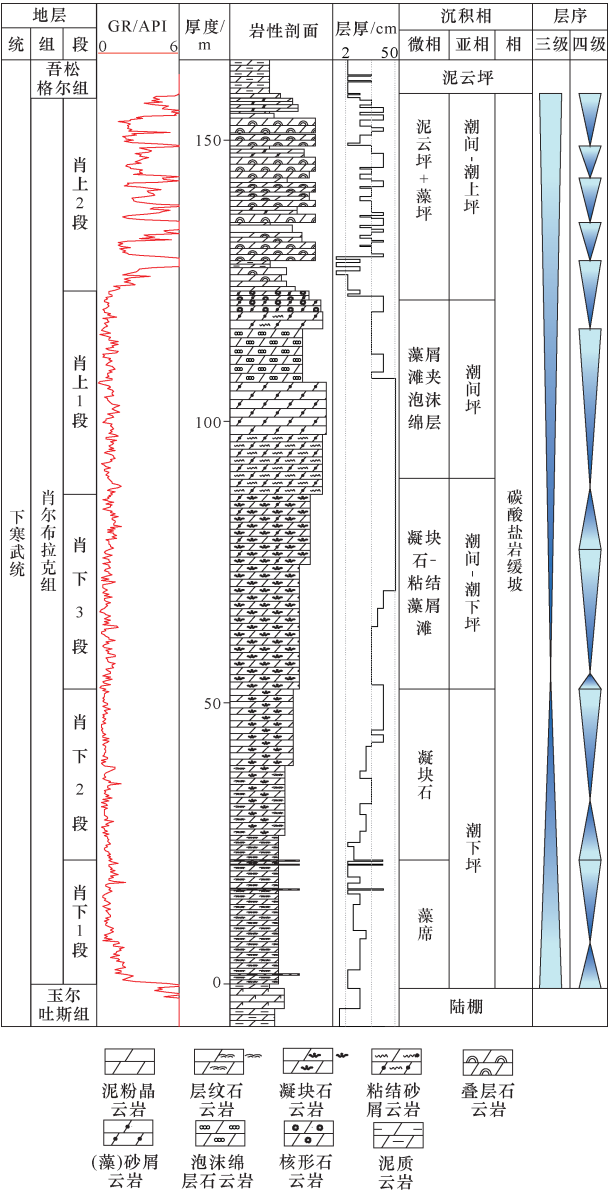


图 2 塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组综合柱状图^[21]

Fig. 2 The composite stratigraphic column of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Aksu area, Tarim Basin^[21]

微区目标进行烧蚀,被烧蚀出来的物质在 Ar 等离子体中发生电离,然后用质谱仪对被电离物质进行同位素比值的测量,再根据被测样品与相应标准样品的同位素比值测量结果进行有关元素含量和被测样品同位素年龄的计算^[22]。激光原位 U-Pb 同位素定年技术主要包括 4 个步骤:样品靶制作,选择待测区域,激光单点剥蚀与质谱分析,数据处理与年龄作图。相关技术方法在国外已有文献报道^[8-12]。本文在已有报道的 LA-MC-ICPMS 方法基础上,针对古老碳酸盐岩铀和铅含量普遍较低的问题,在昆士兰大学的 Nu Plasma II MC-ICPMS 上最高质量端 H10 法拉第杯安装了 10¹² Ω 的高

灵敏度前置放大器(使灵敏度高 10 倍)和一个离散打拿极倍增器(discrete dynode multiplier),用于静态测量²³⁸U 同位素,前者使测试²³⁸U 离子流的灵敏性比普通法拉第杯提高 10 倍,后者提高 100 倍。当 U 含量足够高时(比如大于 0.1 × 10⁻⁶),使用高灵敏度法拉第杯测量;当 U 含量低时(比如小于 0.1 × 10⁻⁶),使用 multiplier 测量。由于 multiplier 的背景极低,一般 U 含量高于 1 × 10⁻⁹时就能精确测量。

表 1 塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组定年检测样品

Table 1 A list of the samples for dating from the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Aksu area, Tarim Basin

样品编号	样品来源	层位	样品产状	检测目的
X-30-①	肖尔布拉克西沟剖面	肖下 2 段	微生物白云岩围岩	地层年龄或白云石化时间
X-56-①	肖尔布拉克西沟剖面	肖上 1 段	微生物白云岩围岩	
X-17-②	肖尔布拉克西沟剖面	肖下 1 段	充填孔洞白云石	孔洞形成时间和孔洞充填的时间、期次
X-13-①	肖尔布拉克西沟剖面	肖下 1 段	充填孔洞方解石	
ST2-20-②	舒探 1 井,埋深 1 886 m	肖上 1 段	充填藻架孔白云石	孔隙形成时间和孔隙充填的时间、期次
X-56-②	肖尔布拉克西沟剖面	肖上 1 段	充填藻架孔白云石	
X-55-②	肖尔布拉克西沟剖面	肖上 1 段	充填藻架孔白云石	裂缝形成时间及期次
X-30-③	肖尔布拉克西沟剖面	肖下 2 段	充填裂缝方解石	
X-28-②	肖尔布拉克西沟剖面	肖下 2 段	充填裂缝方解石	裂缝形成时间及期次
D ₁ -49-②	肖尔布拉克东 1 沟剖面	肖上 1 段	充填裂缝白云石	
X-35-②	肖尔布拉克西沟剖面	肖下 3 段	充填裂缝白云石	裂缝形成时间及期次
X-35-③	肖尔布拉克西沟剖面	肖下 3 段	充填裂缝白云石	

使用激光法进行碳酸盐矿物 U-Pb 同位素年龄测定的一个重要难题是寻找合适的天然矿物标样,并且为了避免不同矿物间的基体效应,使用的矿物标样在

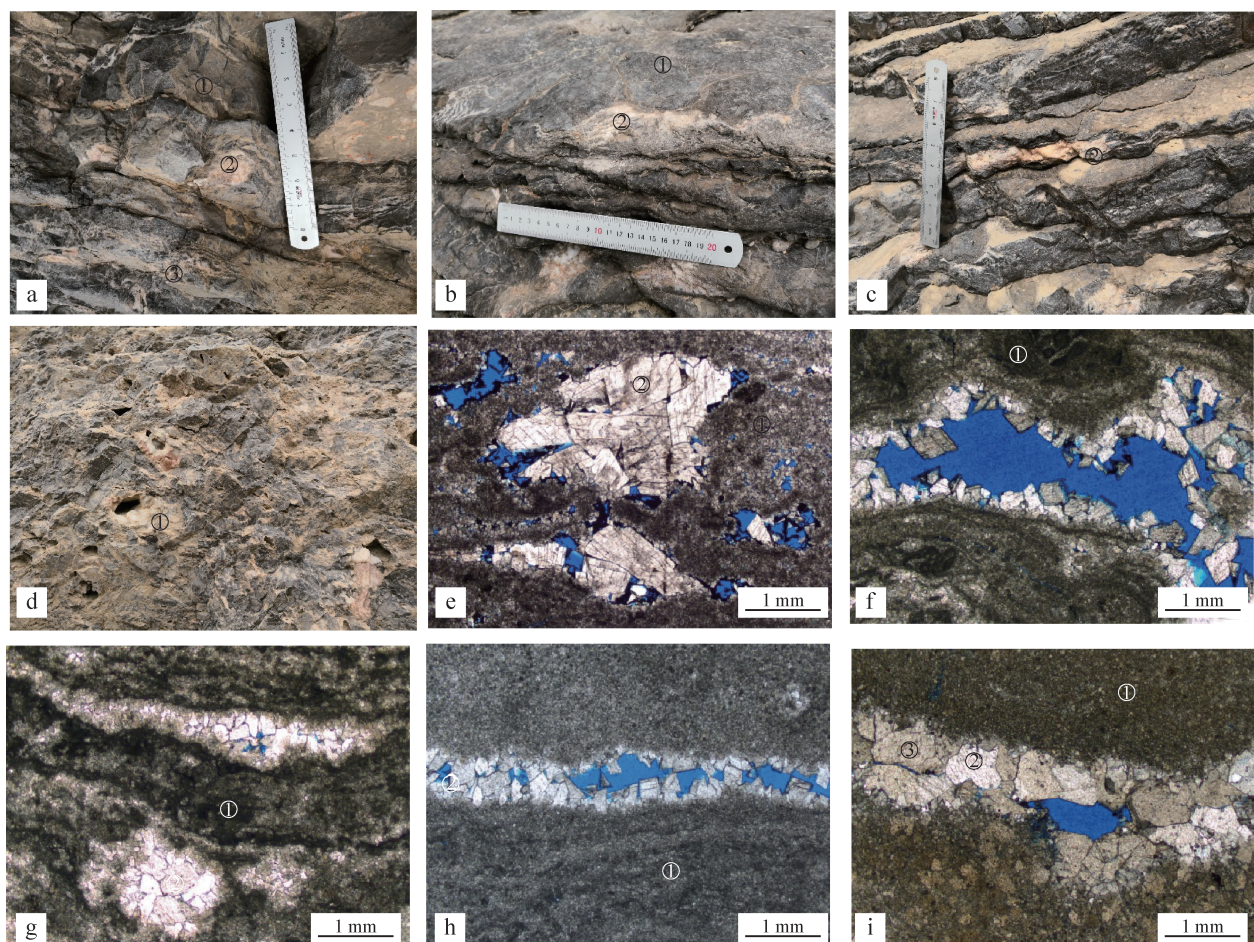


图3 塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组定年检测样品特征

Fig. 3 Characteristics of samples for dating from the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Aksu area, Tarim Basin

a. 灰黑色薄层藻泥晶白云岩,由①至③分别为围岩、充填孔洞白云石和充填裂缝方解石,肖尔布拉克西沟剖面,样品X-30,肖下2段;b. 灰黑色薄层藻泥晶白云岩,由①至②分别为围岩和充填孔洞方解石,肖尔布拉克西沟剖面,样品X-28,肖下2段;c. 灰黑色薄层状泥晶白云岩,由①至②分别为围岩和充填孔洞白云石,样品X-17,肖下1段;d. 灰黑色薄层状藻凝块白云岩,孔洞部分为亮晶方解石(①)充填,样品X-13,肖下1段;e. 凝块白云岩,由①至②分别为围岩和充填孔洞的白云石,舒探1井,肖上1段,样品ST2-20,埋深1886 m;f. 微生物白云岩,由①至②分别为围岩和充填藻架孔的白云石,肖尔布拉克西沟剖面,样品X-56,肖上1段;g. 微生物白云岩,由①至②分别为围岩和充填藻架孔的白云石,肖尔布拉克西沟剖面,样品X-55,肖上1段;h. 凝块白云岩,由①至②分别为围岩和充填裂缝的白云石,肖尔布拉克东1沟剖面,样品D₁-49,肖上1段;i. 灰黑色薄层藻泥晶白云岩,由①至③分别为围岩和充填裂缝的两期白云石,肖尔布拉克西沟剖面,样品X-35,肖下3段

成分和结构上应尽可能与待测样品相近。目前被应用于碳酸盐矿物测年的两个标样分别是 ASH15E(采自以色列 Negev 沙漠的石笋)^[22-24] 和 WC-1(美国新墨西哥城 Whites City 以西 0.5 km 的 Walnut 峡谷的方解石脉)^[8-11],用它们来校正古老海相碳酸盐岩样品,均存在一定的局限性。ASH15E 标样的同位素稀释溶液法标定年龄仅为 3.001 Ma,与古老海相碳酸盐岩年龄相比明显偏年轻得多,不是古老海相碳酸盐岩的理想标样。WC-1 标样的推荐年龄为 254.4 Ma,虽然与古老海相碳酸盐岩年龄相近,但该标样的不均一性导致其自身可能存在 3%~5% 的不确定性^[12]。另外,这两个国际标样极其有限,不适合做为消耗量

极大的我们实验室的工作标样。我们在技术研发过程中,从塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组中发现了更加适合古老海相碳酸盐岩定年的标样 AHX-1, AHX-1 标样为充填沿断裂分布之孔洞的纯净方解石晶体,样品纯净、均一并广泛分布,是同源同期的成岩产物。将标样 ASH15E 与 AHX-1 反复对测 20 多次,使用 ASH15E 的推荐年龄 3.001 Ma 来标定 AHX-1 的年龄,所获得的 20 多组年龄的加权平均值为 209.8 ± 1.3 Ma。

为了验证两个实验室基于不同设备的激光 U-Pb 同位素定年技术和 AHX-1 作为实验室工作标样的可靠性,我们在不同时段,多次在澳大利亚昆士兰大学放

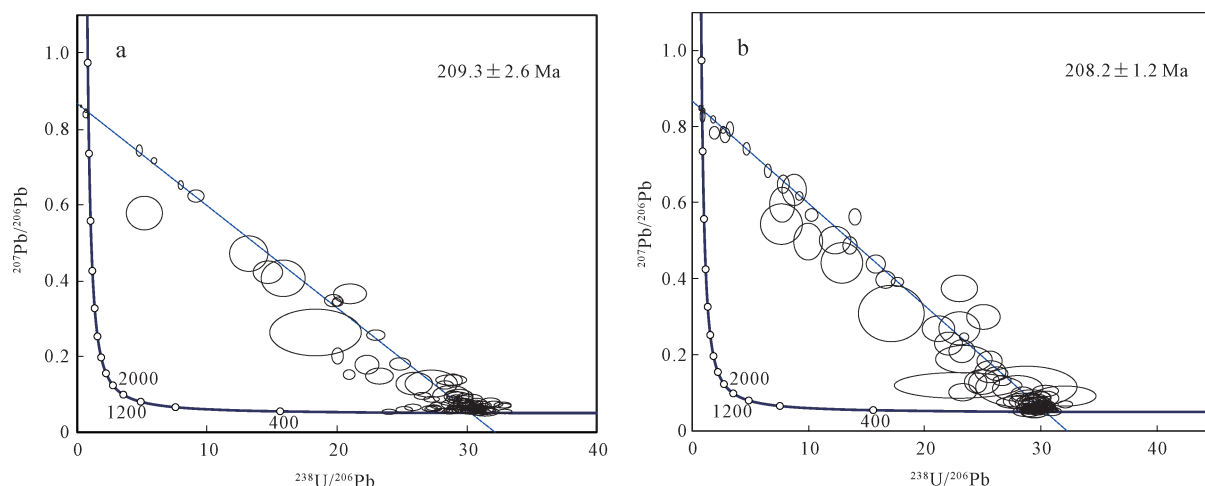


图4 以WC-1为标样检测AHX-1的年龄

Fig. 4 The dating of AHX-1 in taking WC-1 as a standard sample

a. 澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室应用激光法在Nu Plasma II上检测结果为 209.3 ± 2.6 Ma;

b. 中国石油碳酸盐岩储层重点实验室应用激光法在Element XR检测结果 208.2 ± 1.2 Ma

放射性同位素实验室应用激光法在Nu Plasma II上以WC-1为标样检测AHX-1的年龄,在中国石油碳酸盐岩储层重点实验室应用激光法在Element XR上同样以WC-1为标样检测AHX-1的年龄,图4是其中一次测试结果,可以看出以WC-1作为标样在两个实验室两种设备上测得的AHX-1年龄在误差范围内是一致的。

4 结果与讨论

4.1 结果

开展塔里木盆地肖尔布拉克组围岩和白云石、方解石胶结物的激光原位U-Pb同位素定年分析,同时对平行样开展团簇同位素(Δ_{47})、碳氧稳定同位素、微量元素、锶同位素、阴极发光和包裹体均一温度分析。定年分析结果见图5、图6和表2, Δ_{47} 或包裹体均一温度、碳氧稳定同位素以及阴极发光分析结果见表2,微量和稀土元素、锶同位素分析结果见表3。微量和稀土元素、锶同位素数据来自昆士兰大学(UQ)地球科学学院放射性同位素实验室,团簇同位素(Δ_{47})数据来自美国迈阿密大学同位素实验室,阴极发光、碳氧稳定同位素、包裹体均一温度数据来自中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室。激光原位U-Pb同位素定年数据来自中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室和昆士兰大学(UQ)地球科学学院放射性同位素实验室,两家共同开发激光原位U-Pb同位素定年技术,标样测定以及部

分 ^{238}U 含量低于0.1 ppm的样品在澳方LA-MC-ICP-MS(Nu Plasma II)上完成,其他肖尔布拉克组样品年龄测定在中方LA-ICP-MS(Element XR)上完成。使用同位素校正标样为NIST614,定年标样为AHX-1和WC-1。

从表3的地球化学特征可知, ^{238}U 的含量较高,6类结构组分的均值分别达到2.040,0.153,0.644,0.206,0.028和0.029 ppm,高于检测的极限值,来自于U衰变的 ^{206}Pb 和 ^{207}Pb 的含量也较高,满足测年条件,只是普通Pb含量偏高,在计算年龄时需考虑普通Pb的干扰。

4.2 讨论

本文年龄测定使用同位素校正玻璃标样为NIST614,定年标样为AHX-1和WC-1,其中AHX-1和WC-1都为方解石标样。本文检测的对象有方解石也有白云石,最好的标样是白云石对白云石,方解石对方解石。但在没有白云石标样情况下,方解石是可以作为标样进行白云石样品年龄测定的。因为基质效对方解石带来的最大偏差不超过3%,而白云石的成分和晶体结构是介于方解石和NIST614之间的,并且更接近于方解石,基质效应对白云石带来的偏差一定小于3%。因此,本来不矫正偏差就足够小了(小于3%),使用基质非常接近的类似标样矫正后,偏差应该更小,比测量误差要小得多。所以在没有白云石标样的情况下,也可以用方解石标样作为年龄标样进行白云石年龄测定。

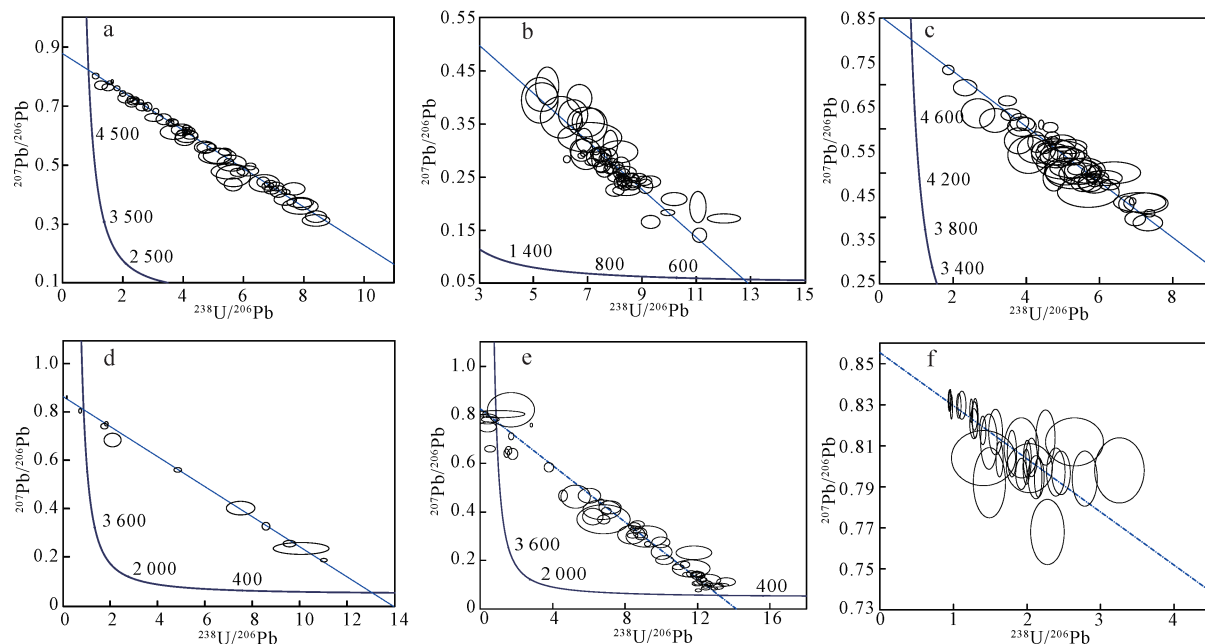


图 5 塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克组样品围岩、充填孔洞白云石和方解石及充填裂缝方解石激光原位 U-Pb 同位素年龄

Fig. 5 In-situ LA U-Pb isotopic dating chart for the sampled matrix rocks, dolomite and calcite filling in pores and vugs, and calcite cements in fractures from the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Aksu area, Tarim Basin

- a. 围岩年龄 491.6 ± 9.2 Ma, 样品号 X-30-①; b. 围岩年龄 488 ± 24 Ma, 样品号 X-56-①; c. 充填孔洞方解石年龄 486 ± 23 Ma, 样品号 X-13-①; d. 充填孔洞白云石年龄 476 ± 13 Ma, 样品号 X-17-②; e. 充填裂缝方解石年龄 471 ± 10 Ma, 样品号 X-28-②; f. 充填裂缝方解石年龄 204 ± 37 Ma, 样品号 X-30-③

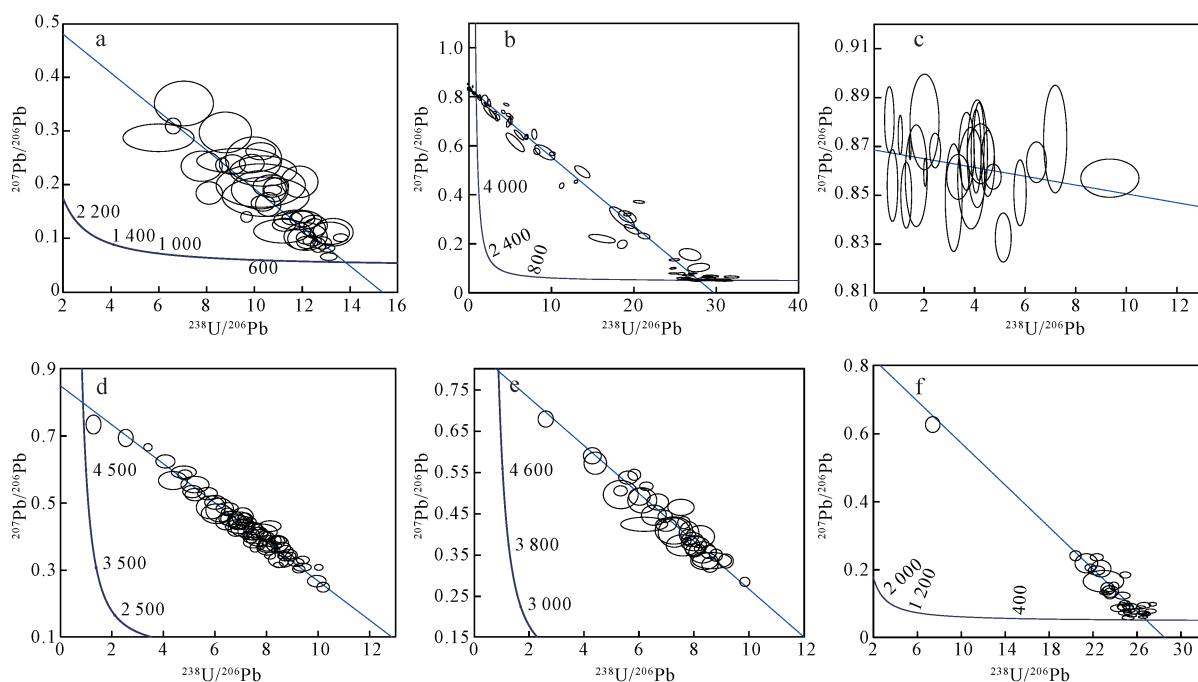


图 6 塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克组样品充填裂缝白云石和充填藻架孔白云石激光原位 U-Pb 同位素年龄

Fig. 6 The in-situ LA U-Pb isotopic dating chart for the dolomitic cements in fractures and algal framework pores sampled from the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Aksu area, Tarim Basin

- a. 充填裂缝白云石年龄 450 ± 15 Ma, 样品号 D1-49-②; b. 充填裂缝白云石年龄 227.0 ± 4.5 Ma, 样品号 X-35-②; c. 充填裂缝白云石年龄 14 ± 13 Ma, 样品号 X-35-③; d. 充填藻架孔白云石年龄 458 ± 12 Ma, 样品号 X-56-②; e. 充填藻架孔白云石年龄 457 ± 17 Ma, 样品号 X-55-②; f. 充填藻架孔白云石年龄 235.9 ± 4.0 Ma, 样品号 ST2-20-②

表 2 塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克组样品围岩和白云石、方解石胶结物 U-Pb 同位素年龄及其他地球化学特征

Table 2 The U-Pb isotopic dating of the sampled matrix rocks, dolomitic and calcite cements of the samples taken from the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Aksu area, Tarim Basin, and their other geochemical features

样品编号	样品产状	同位素 年龄/Ma	阴极发光	地球化学特征		
				Δ_{47} 或包裹体均一温度/°C	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})/\text{‰}$
X-30-①	围岩	491.6 ± 9.2	不发光	—	0 ~ 2	-2 ~ -4
X-56-①	围岩	488 ± 24	昏暗发光	—	0 ~ 2	0 ~ -3
X-17-②	充填孔洞白云石	476 ± 13	橙黄色明亮发光	149.3	-1 ~ 3	-6 ~ -12
X-13-①	充填孔洞方解石	486 ± 23	橙黄色中等发光	225	-2 ~ 2	-9 ~ -17
ST2-20-②	充填藻架孔白云石	235.9 ± 4.0	橙黄色明亮发光	205	—	—
X-56-②	充填藻架孔白云石	458 ± 12	橙黄色中等发光	—	—	—
X-55-②	充填藻架孔白云石	457 ± 17	橙黄色中等发光	—	—	—
X-30-③	充填裂缝方解石	204 ± 37	亮黄色明亮发光	141.5	-1 ~ 2	-7 ~ -14
X-28-②	充填裂缝方解石	471 ± 10	亮黄色明亮发光	137.5	-2 ~ 2	-8 ~ -15
D ₁ -49-②	充填裂缝白云石	450 ± 15	橙黄色明亮发光	135	-2 ~ 2	-7 ~ -12
X-35-②	充填裂缝白云石	227.0 ± 4.5	橙黄色中等/明亮发光	—	—	—
X-35-③	充填裂缝白云石	14 ± 13	橙黄色中等/明亮发光	—	—	—

注:—表示该项未检测。

表 3 塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克组样品围岩、白云石和方解石胶结物的微量元素、稀土元素和锶同位素地球化学特征

Table 3 The geochemical features of the sampled matrix rocks, trace element & REE and strontium isotope of dolomitic and calcite cements of the samples taken from the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Aksu area, Tarim Basin

样品编号	样品产状	$^{176}\text{Lu}/10^{-6}$	$^{178}\text{Hf}/10^{-6}$	$^{206}\text{Pb}/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}/10^{-6}$	$^{208}\text{Pb}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	Sr 同位素
X-30-①	围岩	0.011 67	0.005 1	0.690	0.310 0	0.330 0	1.220 0	0.708 673
X-56-①	围岩	0.034 20	0.048 0	3.230	2.180 0	2.210 0	2.860 0	0.708 922
X-17-②	充填孔洞白云石	0.007 06	0.000 9	0.275	0.221 0	0.219 0	0.153 3	0.709 756
X-13-①	充填孔洞方解石	0.010 09	0	0.205	0.022 1	0.009 1	0.644 0	0.708 808
ST2-20-②	充填藻架孔白云石	0.008 10	0	0.164	0.136 0	0.154 0	0.225 0	0.709 809
X-56-②	充填藻架孔白云石	0.009 40	0.001 3	0.177	0.162 0	0.176 0	0.267 0	0.709 106
X-55-②	充填藻架孔白云石	0.020 40	0	1.010	0.980 0	0.950 0	0.125 0	—
X-30-③	充填裂缝方解石	0.018 90	0.001 1	3.090	2.980 0	3.060 0	0.014 0	0.709 386
X-28-②	充填裂缝方解石	0.007 85	0.006 0	2.210	2.150 0	2.210 0	0.042 0	0.709 308
D ₁ -49-②	充填裂缝白云石	0.043 90	0.000 6	0.094	0.082 0	0.093 0	0.025 6	0.709 357
X-35-②	充填裂缝白云石	0.017 50	0	0.211	0.176 0	0.171 0	0.035 0	—
X-35-③	充填裂缝白云石	0.045 50	0	0.279	0.250 0	0.249 0	0.026 0	—

注:—表示该项未检测。

塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组白云岩储集空间主要发育于藻纹层、藻叠层和藻凝块白云岩中,具有相控性,类型主要有孔洞(2 ~ 100 mm)、孔隙(0.01 ~ 2 mm)和裂缝^[19]。孔洞和孔隙均有原生、表生溶蚀和埋藏-热液溶蚀 3 种成因观点^[25-27],裂缝的期次及对孔洞、孔隙发育与充填的影响更是认识的空白。本文根据成岩产物碳酸盐矿物的激光原位 U-Pb 同位素定年数据及团簇同位素、碳氧同位素、锶同位素、微量和稀土元素地球化学特征,结合构造-埋藏史、盆地热史和烃源岩生烃史,分析塔里木盆地寒武系肖尔布拉克

组白云岩储层的孔隙成因和成岩-孔隙演化史,为油气运移前有效孔隙评价提供依据。

4.2.1 围岩和孔、洞、缝充填物绝对年龄

白云岩围岩:测得 2 个围岩(藻纹层或藻叠层白云岩)的年龄数据,分别为 491.6 ± 9.2 Ma 和 488 ± 24 Ma,相当于中-晚寒武世的年龄,与早寒武世肖尔布拉克组年龄相比略偏年轻。这可能不代表地层年龄,更可能反映了白云石化的年龄,或地层年龄与白云石化年龄的中值。从白云岩仍保留原岩的藻纹层、藻叠层结构分

析,白云石化的时间应该是早期的,与同沉积期蒸发气候背景有关^[28],与地层年龄几乎同时或略晚,这与测得的两个年龄数据是一致的。而且白云石化是一个持续的过程,至早—中奥陶世完成了由灰岩向白云岩的转变。阴极发光下不发光或昏暗发光、碳同位素低正值(1‰~3‰,PDB)、氧同位素低负值(-2‰~-4‰,PDB)也佐证了早期白云石化这一认识^[29]。

孔洞充填物:充填孔洞方解石的年龄为 486 ± 23 Ma,充填孔洞白云石的年龄为 476 ± 13 Ma,略晚于地层年龄和发生白云石化的年龄,而且是先充填方解石,再充填白云石,与孔洞中方解石和白云石胶结物的充填序次是一致的。这组年龄代表了地层沉积后不久,原生格架孔洞或表生溶蚀孔洞就开始进入逐渐被充填的阶段,是早加里东期持续的热液活动和充填事件的体现。孔洞形成于埋藏前,不是埋藏溶蚀成因的,埋藏过程是孔洞逐渐被充填的过程,而且由下至上(肖下1段—肖下2段—肖下3段—肖上1段),充填作用逐渐减弱。

孔隙充填物:藻架孔以充填白云石胶结物为主,测得3个年龄数据,分别为 235.9 ± 4.0 Ma, 458 ± 12 Ma和 457 ± 17 Ma。 458 ± 12 Ma和 457 ± 17 Ma两个年龄数据与充填孔洞的方解石、白云石年龄相当或略晚,两者几乎是同期的,为中加里东期持续的热液活动和充填作用的产物。 235.9 ± 4.0 Ma的白云石胶结物年龄代表印支期热液活动和充填作用的产物。这说明肖上1段白云岩储层的孔隙经历了两期充填作用。

裂缝充填物:裂缝中充填有白云石、方解石和硅质胶结物。方解石胶结物测得两个年龄数据,分别为 471 ± 10 Ma和 204 ± 37 Ma,代表早加里东期和印支期热液活动的产物,分别与充填孔洞的两期胶结物年龄相当。白云石胶结物测得3个年龄数据,分别为 450 ± 15 Ma, 227.0 ± 4.5 Ma, 14 ± 13 Ma。其中, 450 ± 15 Ma和 227.0 ± 4.5 Ma两个年龄数据与孔隙中白云石胶结物测得的两个年龄数据相当,代表中加里东期和印支期热液活动的产物。 14 ± 13 Ma白云石胶结物年龄可能与晚燕山期—喜马拉雅期的热液活动有关。这说明研究区发育早中加里东、印支、晚燕山期—喜马拉雅期3期断裂活动和热液矿物充填事件,其中,早中加里东和印支期构造活动形成的断裂系统成为热液的通道,并导致肖尔布拉克组孔洞和孔隙部分被白云石、方解石和硅质充填。晚燕山期—喜马拉雅期构造活动形成的白云石胶结物主要充填于裂缝中。

充填孔洞、孔隙和裂缝的白云石和方解石胶结物在阴极发光下呈橙黄色中等—明亮发光、高 Δ_{47} 温度、氧同位素高负值,以及锶同位素值高于围岩,均佐证了胶结物的热液成因,受断裂活动控制(表2)。

孔隙和孔洞中充填的早加里东期、中加里东期和印支期3期白云石和方解石胶结物在产状和特征上有很大的差异,同样,裂缝中充填的白云石、方解石胶结物与孔隙、孔洞中充填的白云石、方解石胶结物在产状和特征上也有很大的差异,常规的技术手段很难将它们的成因期次相关联,碳酸盐矿物的激光原位U-Pb同位素定年技术为不同产状和特征胶结物成因期次对比研究提供了技术手段。

4.2.2 成岩—孔隙演化史重建及应用

白云石和方解石胶结物绝对年龄的获得为塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克组白云岩储层的成因提供了新证据,更为储层成岩—孔隙演化史和有效孔隙评价提供了手段。肖尔布拉克组白云岩储层的储集空间形成于埋藏前的沉积和表生环境,既有沉积原生孔隙(藻格架孔、粒间孔),又有溶蚀扩大的孔洞。孔洞中充填的早加里东期白云石和方解石胶结物年龄略晚于地层年龄,说明这些孔洞形成于地层沉积后不久,不是晚期埋藏溶蚀作用的产物,肖尔布拉克组白云岩储层的埋藏过程实际上是孔隙和孔洞逐渐被充填的过程。根据白云石和方解胶结物的绝对年龄,孔洞的充填作用发生在早加里东期,孔隙的充填作用主要发生于中加里东和印支期,裂缝作为成岩介质的运移通道为充填孔洞和孔隙的胶结物提供了物源,未被胶结物充填的残留孔洞、孔隙和裂缝构成了主要储集空间。

参照Clyde H. Moore(2001)^[29]的初始孔隙度值和镜下残留孔隙、胶结物分布面积累加,初始孔隙度选30%,表生溶蚀作用增孔10%,埋藏前的总孔隙度达到40%。早加里东期白云石和方解石胶结物使平均孔隙度由40%降至20%,中加里东期白云石和方解石胶结物使平均孔隙度由20%降至15%,此后,该孔隙度得到长期持续的保持,直到印支期孔隙的充填作用,使孔隙度由15%降至8%,燕山期—喜马拉雅期构造活动对孔隙和孔洞的充填改造作用不强烈,导致肖尔布拉克组白云岩储层的现今孔隙度保持在6%~8%,裂缝对孔隙的贡献不大,主要是作为埋藏—热液的通道,而且大多被充填。据此建立了塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克组白云岩储层的成岩—孔隙演化史(图7),综合寒武系肖尔布拉克组的构造—埋藏史、盆地热史^[30-31]和寒武系玉尔吐斯组烃源岩的生烃史^[32-33],就可对油气运移时间、油气运移前孔隙和成藏期次作出评价。

塔里木盆地主要发育以下古生界碳酸盐岩为主的塔中、塔北、塔西南和塔东南四大古隆起。古隆起构造演化具有阶段性、继承性与迁移性,并经历了5期构造

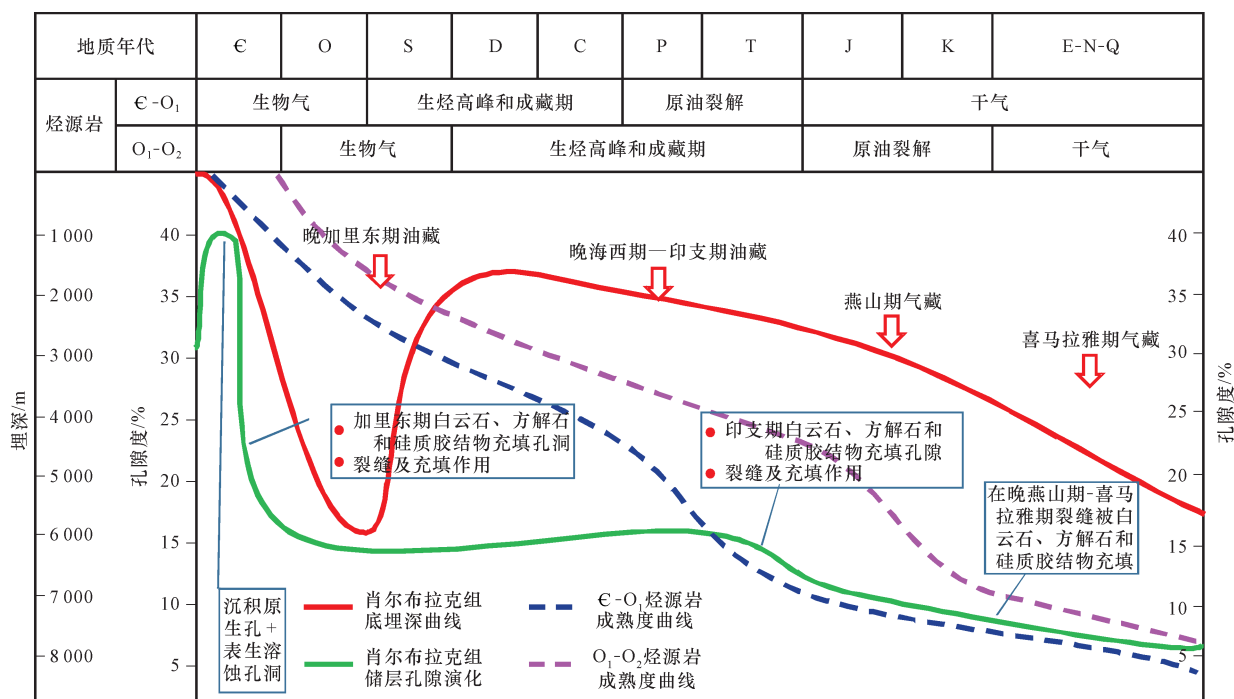


图 7 塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克组构造-埋藏史、成烃史、成岩-孔隙演化史和油气成藏史

Fig. 7 A diagram showing the tectonic-burial history, hydrocarbon generation history, diagenesis-porosity evolution history, and hydrocarbon accumulation history in the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Aksu area, Tarim Basin

演化阶段^[34-39]。分别为:①前震旦纪基底隆起雏形期, 伴随裂陷的发育;②震旦纪—奥陶纪岩石圈发生伸展运动, 形成坳陷的同时, 伴生早奥陶世末古隆起的形成和奥陶纪末古隆起的定型, 构成隆—坳相间的格局, 控制寒武系—奥陶系烃源岩的发育和成熟;③志留纪—石炭纪岩石圈发生聚敛运动, 古隆起发生进一步抬升和迁移, 导致隆起区志留系—石炭系的部分缺失, 并控制晚加里东期的成藏;④石炭纪末—三叠纪岩石圈再次进入区域拉张背景, 古隆起发生改造和调整, 并控制晚海西期—印支期的成藏;⑤三叠纪末—新生代进入前陆盆地演化阶段, 古隆起发生差异沉降, 古油藏发生裂解和调整。

塔里木盆地盐下寒武统肖尔布拉克组的烃源被认为主要来自早寒武世玉尔吐斯组^[32-33], 随着加里东期的持续埋藏, Є-O₁ 烃源岩在志留纪开始生烃并发生初次运移和成藏, 此时的有效孔隙度可以达到 15%。志留纪末油藏随着泥盆纪—石炭纪的构造抬升发生裂解, 原油裂解气逸散或聚集成藏, 残留薄膜状沥青主要分布于孔洞中, 此时的孔隙度保持在 15% 左右。石炭纪末开始的区域拉张背景和持续深埋, Є-O₁ 烃源岩和 O₁-O₂ 烃源岩进入生烃高峰期, 在海西末期—印支期(晚二叠世末—三叠纪)聚集成藏, 是主成藏期, 此时的孔隙度为 8%~15%。随着埋深的持续加大, 原油发生裂解, 形成斑块状沥青充填于孔洞中, 原油裂解气逸散或聚集成藏, 形成燕山期气藏, 此时的孔隙度可以达到 6%~8%。喜

马拉雅期为气藏的调整期, 燕喜马拉雅期气藏经喜山构造运动改造发生调整, 部分被调整到喜马拉雅期构造圈闭中聚集成藏, 此时的孔隙度保持在 6%~8%。

综上所述, 碳酸盐矿物的激光原位 U-Pb 同位素定年技术的开发不仅解决了碳酸盐矿物的绝对年龄问题, 而且还可以通过碳酸盐胶结物的绝对年龄和含量, 恢复储层的成岩—孔隙演化史, 结合构造—埋藏史和生烃史, 评价油气运移前的有效孔隙度和成藏有效性。前人主要通过油气包裹体均一温度确定成藏期次, 油气运移前有效孔隙度和成藏有效性评价为油气成藏期次的确定开辟了更为有效的途径^[40-43]。

5 结论

碳酸盐岩胶结物是盆地流体活动的直接产物, 对其展开年代学研究可以揭示盆地流体活动历史和储层孔隙演化历史, 近些年激光原位 U-Pb 定年迅速发展, 但也面临一些难题, 例如可用样偏少, 超低铀含量古老碳酸盐矿物检测难等问题。中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室和昆士兰大学(UQ)地球科学学院放射性同位素实验室两家联合开发适用于古老海相碳酸盐岩的激光原位 U-Pb 同位素定年技术, 开发了年龄为 209.8 Ma 的方解石标样, 可精确测定铀含量高于 1×10^{-9} 的碳酸盐矿物的年代, 为碳酸盐岩储层成岩—

孔隙演化史研究提供重要的技术手段。

激光原位 U-Pb 同位素定年技术应用于塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组储层成岩-孔隙演化研究。通过充填孔洞、孔隙和裂缝中不同期次白云石和方解石胶结物的测年,指出寒武系肖尔布拉克组白云岩储层的埋藏成岩过程是孔隙和孔洞逐渐被充填的过程。孔洞的充填作用主要发生在早加里东期,孔隙的充填作用主要发生在中加里东期和印支期,加里东和印支期断裂作为热液运移的通道,为充填孔洞和孔隙的胶结物提供了物源,未被白云石、方解石和硅质胶结物充填的残留孔洞、孔隙和裂缝构成了主要储集空间,建立了塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组白云岩储层的成岩-孔隙演化史。综合寒武系肖尔布拉克组的构造-埋藏史、盆地热史和寒武系玉尔吐斯组烃源岩的生烃史,可对油气运移时间、油气运移前孔隙和成藏期次作出评价。

参 考 文 献

- [1] 王兆荣,彭子成,倪守斌,等. 高精度热电离质谱定年对石笋古温度研究的意义[J]. 自然杂志,1999,21(5):281-284.
Wang Zhaorong, Peng Zicheng, Ni Shoubin, et al. Dating by high-precision thermal ionization mass spectrometry (TIMS) to the paleotemperature stalagmites from cave meaning[J]. Nature Magazine, 1999, 21(5):281-284.
- [2] Zhao J X, Neil D T, Feng Yu X, et al. High-precision U-series dating of very young cyclone-transported coral reef blocks from Heron and Wistari reefs, southern Great Barrier Reef, Australia[J]. Quaternary International, 2009, 195 (1-2):122-127.
- [3] Woodhead J, Hellstrom J, Maas R, et al. U-Pb geochronology of speleothems by MC-ICP-MS[J]. Quaternary Geochronology, 2009, 1(3):208-221.
- [4] Rasbury E T and Cole J M. Directly dating geologic events: U-Pb dating of carbonates[J]. Reviews of Geophysics, 2009, 47(3):4288-4309.
- [5] Pickering R, Kramers J D. A re-appraisal of the stratigraphy and new U/Pb dates at the Sterkfontein hominin site, South Africa[J]. Journal of Human Evolution, 2010, 56:70-86.
- [6] Woodhead J, Pickering R. Beyond 500ka: 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, 322-323:290-299.
- [7] Hill C A, Polyak V J, Asmerom Y, et al. Constraints on a Late Cretaceous uplift, denudation, and incision of the Grand Canyon region, southwestern Colorado Plateau, USA, from U-Pb dating of lacustrine limestone[J]. Tectonics, 2016, 35(4):896-906.
- [8] 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.
- [9] Coogan L A, Parrish R R, Roberts N M W. Early hydrothermal carbon uptake by the upper oceanic crust: Insight from in situ U-Pb dating[J]. Geology, 2016, 44(2):147-150.
- [10] Roberts N M W, Rasbury T E, 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.
- [11] Godeau N, Deschamps P, Guihou A, et al. U-Pb dating of calcite cement and diagenetic history in microporous carbonate reservoirs: Case of the Urgonian Limestone, France[J]. Geology, 2018, 46(3):247-250.
- [12] Roberts N M W, Richard W J. U-Pb geochronology of calcite-mineralized faults: absolute timing of rift-related fault events on the northeast Atlantic margin[J]. Geology, 2016, 44(7):531-534.
- [13] 吴林, 管树巍, 任荣, 等. 前寒武纪沉积盆地发育特征与深层烃源岩分布——以塔里木新元古代盆地与下寒武统烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6):905-915.
Wu Lin, Guan Shuwei, Ren Rong, et al. The characteristics of Precambrian sedimentary basin and the distribution of deep source rock: a case study of Tarim Basin in Neoproterozoic and source rocks in Early Cambrian, Western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6):905-915.
- [14] 郑剑锋, 袁文芳, 黄理力, 等. 塔里木盆地肖尔布拉克露头区下寒武统肖尔布拉克组沉积相模式及其勘探意义[J]. 古地理学报, 2019, 8(4):589-602.
Zheng Jianfeng, Yuan Wenfang, Huang Lili, et al. Sedimentary facies model and its exploration significance of the Lower Cambrian Xiaoerblak Formation in Xiaoerblak area, Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 8(4):589-602.
- [15] 杜金虎, 潘文庆. 塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3):327-339.
Du Jinhua, Pan Wenqing. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3):327-339.
- [16] 潘文庆, 陈永权, 熊益学, 等. 塔里木盆地寒武统烃源岩沉积相研究及其油气勘探指导意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7):1224-1232.
Pan Wenqing, Chen Yongquan, Xiong Yixue, et al. Sedimentary facies research and implications to advantaged exploration regions on Lower Cambrian source rocks, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7):1224-1232.
- [17] 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 塔里木盆地寒武系与蒸发岩相关的白云岩储层特征及主控因素[J]. 沉积学报, 2013, 31(1):89-98.
Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Main controlling factors and characteristics of Cambrian dolomite reservoirs related to evaporite in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1):89-98.
- [18] 严威, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组白云岩储层特征及成因[J]. 海相油气地质, 2017, 22(4):35-43.
Yan Wei, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, et al. Characteristics and genesis of dolomite reservoir in the Lower Cambrian Xiaoerblak Formation, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(4):35-43.
- [19] 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.
- [20] 黄擎宇, 胡素云, 潘文庆, 等. 台内微生物丘沉积特征及其对储层发育的控制: 以塔里木盆地柯坪—巴楚地区下寒武统肖尔布拉克组为例[J]. *天然气工业*, 2016, 36(6): 21–29.
- Huang Qinyu, Hu Suyun, Pan Wenqing, et al. Sedimentary characteristics of intraplate microbial mounds and their controlling effects on the development of reservoirs: a case study of the Lower Cambrian Xiaerbulake Fm. in the Keping-Bachu area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(6): 21–29.
- [21] 乔占峰, 沈安江, 倪新锋, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组丘滩体系类型及其勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 392–402.
- Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Ni Xinfeng, et al. Types of mound-shoal complex of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Tarim Basin, northwest China, and its implications for exploration[J]. *2019*, 40(2): 392–402.
- [22] Vaks A, Woodhead J, Bar-Matthews M, et al. Pliocene-Pleistocene climate of the northern margin of Saharan-Arabian Desert recorded in speleothems from the Negev Desert, Israel[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 368: 88–100.
- [23] Mason A J, Henderson G M and Vaks A. An acetic acid-based extraction protocol for the recovery of U, Th and Pb from calcium carbonates for U-(Th)-Pb geochronology[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2013, 37(3): 261–275.
- [24] Nuriel P, Weinberger R, Kylander-Clark A R C, et al. The onset of the Dead Sea transform based on calcite age-strain analyses[J]. *Geology*, 2017, 45(7): 587–590.
- [25] 郑剑锋, 严威, 黄理力, 等. 苏盖特布拉克剖面肖尔布拉克组储层建模研究及其勘探意义[J]. *沉积学报*, 2013, 37(3): 601–609.
- Zheng Jianfeng, Yan Wei, Huang Lili, et al. Reservoir modeling of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in the Sugaitblak section and its significance for exploring regions in the Tarim Basin, NW China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(3): 601–609.
- [26] 李斌, 彭军, 杨素举, 等. 塔里木盆地巴楚地区寒武系肖尔布拉克组储层特征及成因模式[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(6): 797–804.
- Li Bin, Peng Jun, Yang Suju, et al. Genetic model and characteristics of the Cambrian Shorebulake reservoir in Bachu area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(6): 797–804.
- [27] 王珊, 曹颖辉, 杜德道, 等. 塔里木盆地柯坪—巴楚地区肖尔布拉克组储层特征与主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(6): 784–795.
- Wang Shan, Cao Yinghui, Du Dedao, et al. The characteristics and main controlling factors of dolomite reservoir in Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Keping-Bachu area, Tarim Basin, NW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(6): 784–795.
- [28] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 545–554.
- Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 545–554.
- [29] Clyde H M. Carbonate reservoirs-porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Amsterdam: Elsevier, 2001, 293–298.
- [30] 李慧莉, 邱楠生, 金之钧, 等. 塔里木盆地的热史[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 613–617.
- Li Huili, Qiu Nansheng, Jin Zhijun, et al. Geothermal history of Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 613–617.
- [31] 庄新兵, 顾忆, 邵志兵, 等. 塔里木盆地地温场对油气成藏过程的控制作用—以古城墟隆起为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(5): 502–511.
- Zhuang Xinbing, Gu Yi, Shao Zhibing, et al. Control effect of geothermal field on hydrocarbon accumulation process in Tarim Basin: a case study of Guchengxu uplift[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(5): 502–511.
- [32] 张水昌, 高志勇, 李建军, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系海相烃源岩识别与分布预测[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 285–294.
- Zhang Shuichang, Gao Zhiyong, Li Jianjun, et al. Identification and distribution of marine hydrocarbon source rocks in the Ordovician and Cambrian of the Tarim Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 285–294.
- [33] 云金表, 金之钧, 解国军, 等. 塔里木盆地古生界主力烃源岩分布[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 827–838.
- Yun Jinbiao, Jin Zhijun, Xie Guojun. Distribution of major hydrocarbon source rocks in the Lower Palaeozoic, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 827–838.
- [34] 张光亚, 赵文智, 王红军, 等. 塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(5): 653–663.
- Zhang Guangya, Zhao Wenzhi, Wang Hongjun, et al. Multicycle tectonic evolution and composite petroleum system in the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(5): 653–663.
- [35] 杨勇, 汤良杰, 刁新东, 等. 塔里木盆地雅克拉断凸断裂差异变形特征及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 89–97.
- Yang Yong, Tang Liangjie, Diao Xindong, et al. Differential deformation and its control mechanism of fault structures in Yakela fault-salient, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 89–97.
- [36] 刘红光, 刘波, 曹鉴华, 等. 塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统储层发育特征及控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 107–118.
- Liu Hongguang, Liu Bo, Cao Jianhua, et al. Characteristics and controlling factors of Lower-Middle Ordovician reservoirs in Yubei area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 107–118.
- [37] 黄诚. 叠合盆地内部小尺度走滑断裂幕式活动特征及期次判别: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 379–389.
- Huang Cheng. Multi-stage activity characteristics of small-scale strike-slip faults in superimposed basin and its identification method: a case study of Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(3): 379–389.
- [38] 韩强, 黄太柱, 耿锋, 等. 塔里木盆地北部雅克拉地区海相油气成藏特征与运聚过程[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(5): 648–656.
- Han Qiang, Huang Taizhu, Geng Feng, et al. Marine oil and gas ac-

- cumulation in Yakela area, northern Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(5): 648–656.
- [39] 郭光辉, 李启明, 肖中尧, 等. 塔里木盆地古隆起演化特征及油气勘探[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 124–130.
- Wu Guanghui, Li Qimign, Xiao Zhongyao, et al. The evolution characteristics of palaeo-uplifts in Tarim Basin and its exploration directions for oil and gas[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 124–130.
- [40] 谭万仓. 群克构造志留系储层包裹体特征与油气成藏过程[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37(4): 38–43.
- Tan Wanchang. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon accumulation process for Silurian reservoirs in Qunke structure[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(4): 38–43.
- [41] 乔桂林, 赵永强, 沙旭光, 等. 塔里木盆地塔中隆起南坡油气勘探领域[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(5): 630–637.
- Qiao Guilin, Zhao Yongqiang, Sha Xuguang, et al. Oil and gas exploration domains on the southern slope of Central Tarim Uplift, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(5): 630–637.
- [42] 李宏卫, 曹建劲, 李红中, 等. 油气包裹体在确定油气成藏年代及期次中的应用[J]. *中山大学研究生学刊(自然科学、医学版)*, 2008, 29(4): 29–35.
- Li Hongwei, Cao Jianjin, Li Hongzhong, et al. Application of oil-gas inclusion to the reservoir formation time and accumulation periods of the oil-gas reservoirs[J]. *Journal of the Graduates Sun Tai-sen University(Natural Science, Medicine)*, 2008, 29(4): 29–35.
- [43] 刘文汇, 王杰, 陶成, 等. 中国海相系油气成藏年代学[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 199–209.
- Liu Wenhui, Wang Jie, Tao cheng, et al. The geochronology of petroleum accumulation of China marine sequence[J]. *Natural Gas Geosciences*, 2013, 24(2): 199–209.

(编辑 张亚雄)

(上接第36页)

- [26] Swett K, Knoll A H. Stromatolitic bioherms and microphytolites from the late proterozoic draken conglomerate formation, spitsbergen[J]. *Precambrian Research*, 1985, 28(3): 327–347.
- [27] Mancini E A, Benson D J, Bruce S H. Appleton field case study (Eastern Gulf Coastal Plain): field development model for Upper Jurassic microbial reef reservoirs associated with paleotopographic basement structures[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(11): 1699–1717.
- [28] Goldscheider N, Mádl-Szőnyi A E, Judit S E. Review: thermal water resources in carbonate rock aquifers[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18: 1303–1318.
- [29] Palmer A N. Origin and morphology of limestone caves[J]. *AAPG*, 1991, 103(1): 1–21.
- [30] Dublyansky Y V. Hydrothermal speleogenesis: its settings and peculiar features[M]//Klimchouk A B, Ford D C, Palmer A N, Dreybrodt W(eds) speleogenesis evolution of karst aquifers. Huntsville: National Speleological Society, 2000: 298–303.
- [31] 范明, 何治亮, 李志明, 等. 碳酸盐岩溶蚀窗的形成及地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(4): 499–505.
- Fan Ming, He Zhiliang, Li Zhiming, et al. Dissolution windows of carbonate rocks and its geological significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(4): 499–505.
- [32] 周瑞良. 华北平原北部深层地下水活动及其对地温场的影响[J]. *中国科学院 562 综合大队集刊*, 1987, 6: 17–35.
- Zhou Ruiliang. The activity of deep underground water in the northern part of the North China Plain and its effect on the geothermal field[J]. *Bulletin of the 562 Comprehensive Geological Brigade Chinese Academy of Geological Sciences*, 1987, 6: 17–35.
- [33] 陈墨香, 汪集暘. 华北断陷盆地热场特征及其形成机制[J]. *地质学报*, 1999, 1: 80–90.
- Chen Moxiang, Wang Jiyang. The characteristics of the geothermal field and its formation mechanism in the North China down-faulted basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 1: 80–90.
- [34] 阎敦实, 于英太. 京津冀油区地热资源评价与利用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000, 40–46.
- Yan Dunshi, Yu Yingtai. The geothermal resource assessment and utilization of oil field in Beijing, Tianjing and Hebei province[J]. *Wuhan: China University of Geoscience Press*, 2000, 40–46.
- [35] 王永才, 张根深, 孙宝元. 牛驼镇凸起基岩水地质地球化学特征与映震灵敏性分析[J]. *地球与环境*, 1994, (5): 69–72.
- Wang Yongcai, Zhang Genshen, Sun Baoyuan. Hydrogeological and geochemical characteristics and seismic sensitivity analysis of the bedrock of Niutuozen uplift[J]. *Earth and Environment*, 1994, (5): 69–72.
- [36] 李俊峰, 靳宝珍, 程万庆, 等. 天津蓟县系雾迷山组地热流体水化学特征研究[J]. *地质调查与研究*, 2008, 31(4): 339–345.
- Li Junfeng, Jin Baozhen, Cheng Wanqing, et al. Chemical characters of the geothermal field in the Wumishan Formation of Jixian system in Tianjin[J]. *Geological Study and Research*, 2008, 31(4): 339–345.
- [37] 杨永江, 庞海, 靳宝珍, 等. 天津周良庄地质构造背景和地热成因探讨[J]. *世界地质*, 2010, 29(4): 646–657.
- Yang Yongjiang, Pang Hai, Jin Baozhen, et al. Discussion on the geological tectonic setting and geothermal origin in Zhouliangzhuang area of Tianjin[J]. *Global Geology*, 2010, 29(4): 646–657.
- [38] Wang Shufang, Pang Zhonghe, Liu Jiurong, et al. Origin and evolution characteristics of geothermal water in the Niutuozen Geothermal Field, North China Plain[J]. *Journal of Earth Science*, 2013, 24(6): 891–902.
- [39] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(12): 2749–2765.

(编辑 张亚雄)