

微区原位碳氧同位素分析技术 对碳酸盐岩成岩流体性质的约束

——以塔里木盆地寒武系—奥陶系为例

韩俊¹, 尤东华², 钱一雄², 董少峰³, 彭守涛⁴

1. 中国石化西北油田分公司 勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

3. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500;

4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要: 随着分析测试水平的提高, 微区原位地球化学分析作为揭示复杂沉积—成岩过程的重要技术手段, 越来越受到广泛重视。通过微区原位碳氧同位素分析, 结合常规分样方法获取的碳氧同位素数据, 对比讨论了同生期—埋藏期海水胶结作用、表生期大气淡水的溶蚀—充填作用与多阶段白云石化流体交代—胶结充填作用。结果显示, 微区原位取样碳氧同位素分析有利于揭示胶结物形成过程的多期、多阶段的流体性质演化。常规分样获取的此类胶结物碳氧同位素值可能是多期次产物的混合值。对于相对单一的产物, 如碳酸盐岩基质组分、大气淡水成因方解石等, 常规分样进行碳氧同位素分析基本可以满足研究需要。微区原位取样碳氧同位素分析提供了一种相对“低成本、高精度”的分析手段, 对精确示踪碳酸盐岩成岩演化过程具有重要意义。

关键词: 碳氧同位素; 海水胶结作用; 大气淡水; 白云石化; 碳酸盐岩; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Constraints on carbonate diagenetic fluid properties by microzone in situ analysis of carbon and oxygen isotopes: a case study of Cambrian–Ordovician, Tarim Basin

HAN Jun¹, YOU Donghua², QIAN Yixiong², DONG Shaofeng³, PENG Shoutao⁴

1. Exploration and Development Research Institute, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. School of Geo-Science & Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

Abstract: As an important technological measure to uncover complex sedimentary–diagenetic process, microzone in situ geochemical analysis has drawn more and more attention along with improving analytical and test levels. According to the analysis of microzone in situ carbon and oxygen isotopes in combination with the data about carbon and oxygen isotopes acquired by conventional sample splitting methods, seawater cementation in syngenetic–burial stages, dissolution–infill by meteoric water in hypergenetic stage, and dolomitization fluid alternation–cementation infill in multiple stages were compared and discussed. The results demonstrated that the analysis of carbon and oxygen isotopes by microzone in situ sampling was favorable for revealing multi-stage and multi-period fluid property evolution in the process of cement formation. Carbon and oxygen isotopes of this cement type acquired by conventional sample splitting analysis might be mix values of multi-stage products. With respect to relatively single product (i.e. matrix components in carbonate rocks and calcite with meteoric water genesis), the analysis of carbon and oxygen isotopes by conventional sample splitting could basically meet study requirements. Microzone in situ sampling analysis on carbon and oxygen isotopes could provide a relatively “low cost and high accuracy” analytical measures, which has important meanings for precisely tracing diagenetic evolution of carbonate rocks.

收稿日期: 2022-03-31; 修订日期: 2022-12-15。

作者简介: 韩俊(1983—), 男, 副研究员, 从事油气勘探与综合研究。E-mail: hanj.xbsj@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U19B6003)、国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U21B2063)和中国石化科技部项目(P21033-1)联合资助。

Key words: carbon and oxygen isotopes; seawater cementation; meteoric water; dolomitization; carbonate rocks; Tarim Basin

碳、氧同位素分析是碳酸盐岩研究中最常用的地球化学方法之一,已广泛应用于沉积地球化学^[1-3]、古海水性质^[4-5]、成岩作用及孔隙演化^[6-7]、古流体示踪^[8-12]等领域。由于碳酸盐岩在成岩过程中极易遭受矿物相转变、溶解再沉淀、流体性质变化等多种因素的影响,改变了不同结构组分的碳氧同位素组成。由此,针对碳酸盐岩的碳氧同位素分析方法从传统的全岩、次生胶结物分析逐步向精细化方向发展,如用牙钻手动取样分析(Microdrill)^[13-15]、半自动微区原位取样分析(Miromill)^[11,16]、原位激光剥蚀在线分析(Laser ablation)^[17-21]。

从不同取样方法的分析效果对比看^[22],牙钻手动取样获取的数据具有相对低的空间分辨率(0.5 mm),但具有低成本优势;原位激光剥蚀在线分析的分析速度快,空间分辨率高(20~50 μm),但分析精度较差(尤其是 $\delta^{18}\text{O}$);半自动原位微区取样在满足较高的空间分辨率(100 μm)条件下,同时能获得高精度的同位素值。由此可见,微区原位分析方法兼顾了样品分析的空间分辨率与数据分析精度,所需的样品量小且经济实惠。本文以塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩为研究对象,在岩石学分析基础上通过微区原位碳氧同位素分析,结合流体包裹体等数据,分别讨论同生期—埋藏期海水胶结作用、表生期大气淡水的溶蚀—充填作用、多阶段白云石化流体的交代—充填作用。

1 实验方法

根据研究目的与样品条件,选取具有不同结构组分的碳酸盐岩样品,在同一个切面分别制备普通岩石薄片与0.2~0.5 mm厚的光薄片。首先,通过偏光显微镜对普通岩石薄片进行显微岩石学研究,分析样品的结构、成分以及成岩序列;其次,对光薄片进行岩石学观察,按矿物产状初步厘定几类拟开展取样的碳酸盐矿物样品;再次,对光薄片进行阴极发光分析(CL8200 MK5 阴极发光仪,真空度0.003 Pa,加速电压20 kV,束流0.2 mA),分析不同产状矿物的阴极颜色、强度与矿物自身结构差异;最后,按产状类别选取取样位置,取样直径一般控制在100 μm左右。

原位微区取样通过 RELION 生产的微区取样系统(Microdrilling System)进行,过程如下:①将加厚薄片置于体式显微镜下并固定,观察并寻找拟取

样的位置(如单矿物、矿物的环带、单颗粒组分等);②用脱脂棉花蘸无水乙醇擦除薄片表面的灰尘、指纹等,同时擦拭微区取样仪的钻头(球形钻头),等待1~2 min待无水乙醇挥发;③使用微区取样仪的牙钻附件对取样位置进行低速钻取获得粉末样(钻速过高易产生高温,进而导致对温度敏感的同位素产生分馏),样品量为10~50 μg,1~2个钻孔;④粉末样被收集在微量移液器吸头上;⑤单个微区样品获得之后,使用脱脂棉花蘸无水乙醇擦除加厚薄片表面与微钻钻头后再钻取下一个位置的微区样品。移液器吸头内的粉末在分析前转移到12 mL 硼硅酸盐瓶内,经过氦气的吹扫后再加入约50 μL的99.9%正磷酸,在72℃反应10 min产生的CO₂气体以He为载气进入MAT-253质谱仪进行 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值分析。分析结果以VPDB标准(‰)给出。所有的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均由NBS19标准化,碳同位素分析精度优于0.10‰,氧同位素分析精度优于0.15‰。

为对比原位微区取样方法进行碳氧同位素分析的优势,通过常规分样方法(岩心标本的肉眼识别、手工碎样)分别挑选基质与胶结物,研磨至200目,通过MAT-253质谱仪进行碳氧同位素分析。与原位微区取样方法相比,常规分样方法需要肉眼能够分辨不同结构组分且需相对较多的样品量。

2 同生期—浅埋藏期海水胶结作用

胶结作用是碳酸盐沉积物在沉积—成岩演化过程中最常见的成岩作用之一。同生期—埋藏期由于孔隙海水的普遍存在,在孔隙空间中普遍存在不同形态的胶结物,揭示不同世代胶结物形成过程伴随孔隙流体性质(如温度、盐度等)的变化^[23-24]。

2.1 研究对象及其岩石学特征

塔里木盆地顺南地区中奥陶统一间房组是天然气勘探的重要层系之一,多口钻井揭示较好油气显示。一间房组之上直接覆盖了哈尔巴克组与却尔却克组,牙形石带的分布特征与碳酸盐岩同位素地层学的研究^[25-27]均表明一间房组顶部不存在地层缺失与(准)同生期的短期暴露,即碳酸盐岩顶面(T₁界面)未受到加里东中期I幕构造运动的影响。由此表明该地区中、上奥陶统为连续沉积,其一间房组碳酸盐岩地层经历了连续的沉积—埋藏过程。在一间房组下段发育近100 m厚的藻灰岩、

亮晶藻砂屑灰岩,发育典型的窗格构造,以微孔隙为主^[28]。其藻灰岩的胶结物充填结构特征揭示了同期—浅埋藏期的海水胶结作用。

藻灰岩整体致密,发育大量分散、孤立的斑点状平行、不规则窗格孔,被亮晶方解石胶结物(CC)全充填(图 1a)。基质部分(MC)以藻类为主,含有少量介形虫、腹足、瓶筐石等生物碎屑。窗格孔常见两期方解石充填(图 1b,1c),早期为纤柱状方解石胶结物(CC1),晚期为粒状方解石(CC2)。阴极

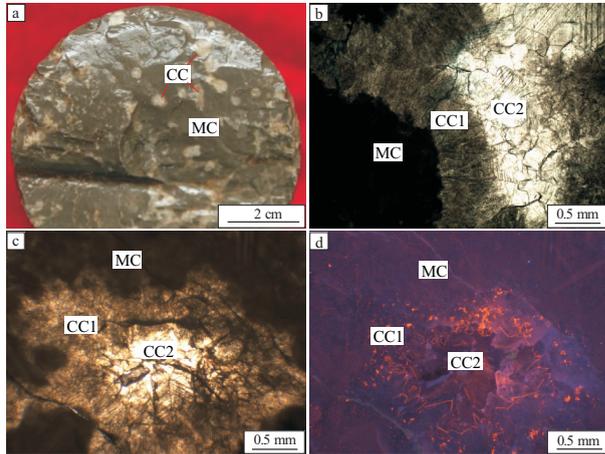


图 1 塔里木盆地顺南地区

奥陶系一间房组藻灰岩岩石学特征

- a. 藻灰岩发育大量斑点状方解石全充填窗格孔;b. 窗格孔中方解石由纤柱状与粒状方解石构成;c. 加厚薄片窗格孔方解石透光性差异;d. 阴极发光下窗格孔中两类方解石具有不同的发光特征

Fig.1 Petrological characteristics of algal limestone of Ordovician Yijianfang Formation in Shunnan area, Tarim Basin

发光下基质部分呈暗褐色发光,早期纤柱状方解石中等明亮呈靛蓝色(晶体边缘呈橘黄色亮边),晚期粒状方解石呈暗橘黄色(图 1d)。

2.2 微区原位碳氧同位素分析与常规分样方法对比

采用常规分样方法采集基质部分(MC)10件与方解石胶结物(CC)2件样品,采用原位微区取样方法分别采集了早期纤柱状方解石胶结物(CC1)3件与晚期粒状方解石胶结物(CC2)2件样品进行碳氧同位素分析,分析结果见表 1。

从分析结果看,灰岩基质部分 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $0.3\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-7.7\text{‰} \sim -7.4\text{‰}$,与前人发表的一间房组灰岩样品的碳氧同位素值基本一致^[26]。常规分析方法获取的方解石胶结物样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $0.5\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-6.5\text{‰} \sim -6.4\text{‰}$,显示基质部分(MC)与方解石胶结物(CC)的差异不明显。微区原位取样方法对方解石胶结物进一步细分,早期纤柱状方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $0.68\text{‰} \sim 1.11\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-5.85\text{‰} \sim -4.28\text{‰}$,晚期粒状方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $0.44\text{‰} \sim 0.55\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-11.60\text{‰} \sim -9.91\text{‰}$ 。显然,原位微区分析数据更好地揭示了不同世代方解石胶结物形成条件的差异,而常规取样方法获取的方解石胶结物数据位于 CC1 和 CC2 的数据之间(图 2),可能代表了两期方解石胶结物的混合信息。

2.3 讨论与意义

从岩石学与碳氧同位素分析结果看(图 2),纤柱状方解石胶结物具有较为偏重的氧同位素特征,

表 1 塔里木盆地顺南地区奥陶系一间房组窗格孔灰岩不同类型方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果

Table 1 Results of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of different calcite types in fenestrated limestone pores of Ordovician Yijianfang Formation, Shunnan area, Tarim Basin

样品深度/m	分析对象	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$	取样方法
6 669.10	灰岩基质(MC)	0.40	-7.40	常规分样
	灰岩基质(MC)	0.40	-7.70	常规分样
	灰岩基质(MC)	0.40	-7.60	常规分样
6 669.20	早期纤柱状方解石胶结物(CC1)	0.68	-5.85	原位微区
	晚期粒状方解石胶结物(CC2)	0.44	-11.60	原位微区
6 669.80	灰岩基质(MC)	0.40	-7.70	常规分样
	方解石胶结物(CC)	0.50	-6.50	常规分样
6 670.00	方解石胶结物(CC)	0.70	-6.40	常规分样
	早期纤柱状方解石胶结物(CC1)	0.84	-4.31	原位微区
6 672.30	灰岩基质(MC)	0.70	-7.50	常规分样
	灰岩基质(MC)	0.30	-7.50	常规分样
6 672.67	早期纤柱状方解石胶结物(CC1)	1.11	-4.28	原位微区
6 672.80	灰岩基质(MC)	0.40	-7.50	常规分样
6 673.40	灰岩基质(MC)	0.30	-7.70	常规分样
	灰岩基质(MC)	0.30	-7.60	常规分样
6 673.75	晚期粒状方解石胶结物(CC2)	0.55	-9.91	原位微区
6 674.10	灰岩基质(MC)	0.30	-7.60	常规分样

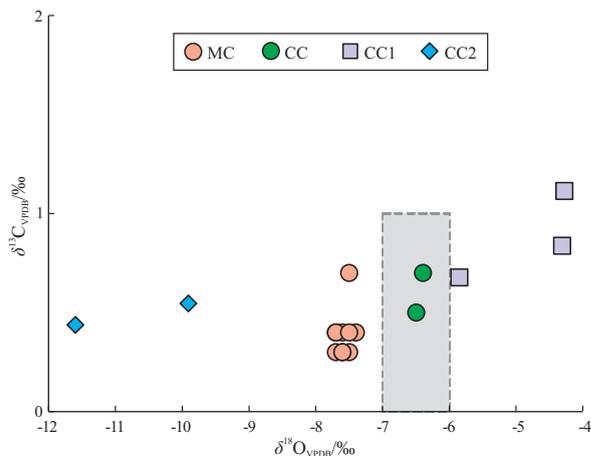


图2 塔里木盆地顺南地区窗格孔灰岩不同类型方解石碳氧同位素分布特征
虚线范围为由腕足碳氧同位素标定的达瑞威尔阶海水背景值^[29-30]
Fig.2 Distribution characteristics of carbon and oxygen isotopes of different calcite types in fenestrated limestone pores in Shunnan area, Tarim Basin

甚至较同期碳酸盐岩中腕足的氧同位素值(-6‰~-7‰)^[29]更高,表明其来源于原始海水结晶的产物(文石/高镁方解石)。灰岩基质的氧同位素值较同期腕足的氧同位素略低,揭示基质部分遭受了一定的成岩蚀变。晚期粒状方解石胶结物氧同位素相对偏轻,显示形成时可能具有较高的流体温度(显微测温显示两相流体包裹体的均一温度主峰范围为130~150℃),表明其形成于埋藏条件。从流体温度—氧同位素平衡关系看,形成晚期粒状方解石胶结物的流体具有比奥陶纪海水更重的氧同位素值(>5‰/SMOW,图3),其可能来源于盐度更高的浓缩海水。基质与胶结物的碳同位素与同期海水背景值(0~1.0‰)^[30]基本一致,揭示相似来源特点。

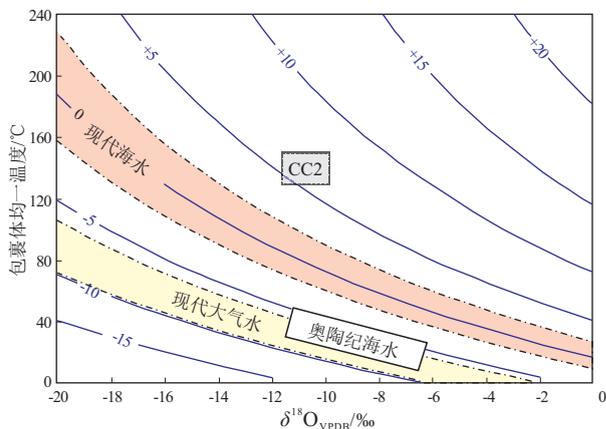


图3 塔里木盆地顺南地区窗格孔灰岩粒状方解石流体包裹体均一温度—氧同位素组成平衡关系
等值线代表与方解石氧同位素平衡的流体氧同位素值,单位为‰

Fig.3 Equilibrium relationship of homogeneity temperature-oxygen isotope of granular calcite fluid inclusions in fenestrated limestone pores in Shunnan area, Tarim Basin

由于顺南地区一间房组具有较好的天然气勘探效果,部分学者大量统计了窗格孔发育数量,提出层序界面控制下的准同生期岩溶、层间岩溶作用的存在^[31-32]。然而,从方解石胶结物的充填结构及其碳氧同位素分析结果看,一间房组灰岩总体经历了沉积—埋藏连续过程,不同期次方解石反映了孔隙流体从正常海水向浓缩海水的演变过程。

3 表生期大气淡水的溶蚀—充填作用

碳酸盐岩在表生成岩阶段由于暴露及接近地表导致其遭受大气淡水的淋滤,形成与岩溶作用相关的成岩现象,如不受碳酸盐岩组构控制的缝洞体系及胶结充填现象、岩溶角砾、渗流结构等。

3.1 研究对象及其岩石学特征

塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩在加里东中晚期、海西早期多次暴露至近地表,遭受较广泛的多期岩溶作用,如沙雅隆起的主体区、塔中隆起Ⅱ号构造带、麦盖提斜坡等地区。其中,加里东中期Ⅰ幕岩溶作用在良里塔格组覆盖区是重要的研究对象之一,如卡塔克隆起区以 T₇ 不整合作为重要标志并被中 15 井、中 19 井等钻井证实^[33-34]。麦盖提斜坡自玉北 1 井在鹰山组岩溶储层获得油气发现后,在展开勘探过程中揭示中西部平台区与东部高陡构造带的储层发育差异性较大^[35-36]。古生物地层学研究证实中西部平台区鹰山组之上直接覆盖了上奥陶统良里塔格组^[37],表明该地区具备发育加里东中期Ⅰ幕岩溶作用的地质条件。目前为止,未有研究报道该地区加里东中期Ⅰ幕岩溶作用的岩石学与地球化学标志。以此地区为例,基于岩石学分析,通过常规碳氧同位素分析与微区原位碳氧同位素分析的对比,讨论表生期大气淡水的溶蚀—充填作用。

鹰山组上部灰岩岩心常见不规则、非均匀分布的亮晶方解石胶结充填特征(图 4a),灰岩基质部分以泥晶方解石为主,少量砂屑与生物碎屑。显微岩石学特征显示,这些不规则的亮晶方解石充填区域发育典型的渗流结构(图 4b),而亮晶方解石不具有明显的矿物光性结构差异。阴极发光下,基质泥晶方解石不发光—弱发光点,亮晶方解石不发光且不具环带结构(图 4c,d)。

3.2 微区原位碳氧同位素分析与常规分样方法对比

采用常规分样方法采集基质部分 10 件与方解石胶结物 7 件样品,采用原位微区取样方法分别采集了基质泥晶方解石(M-mm)5 件与亮晶方解石胶结物(C-mm)5 件进行碳氧同位素分析(表 2)。

表 2 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组灰岩不同产状方解石碳氧同位素分析结果

Table 2 Results of carbon and oxygen isotopes of different calcite occurrences in Ordovician Yingshan Formation limestone in Yubei area, Tarim Basin

样品深度/m	分析对象	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$	取样方法
6 918.35	灰岩基质(LM)	-1.00	-7.30	常规分样
	孔洞方解石(CC)	-1.90	-11.90	常规分样
	泥晶基质(M-mm)	-0.75	-6.47	原位微区
	孔洞方解石(C-mm)	-2.19	-10.11	原位微区
6 918.64	泥晶基质(M-mm)	-0.75	-6.54	原位微区
	透明方解石(C-mm)	-1.53	-12.22	原位微区
6 919.22	灰岩基质(LM)	-1.40	-7.10	常规分样
	孔洞方解石(CC)	-1.70	-10.70	常规分样
6 920.00	灰岩基质(LM)	-0.80	-6.70	常规分样
	孔洞方解石(CC)	-1.30	-8.30	常规分样
6 921.05	灰岩基质(LM)	-1.40	-7.30	常规分样
	孔洞方解石(CC)	-2.00	-11.80	常规分样
6 921.05	泥晶基质(M-mm)	-1.08	-6.47	原位微区
	孔洞方解石(C-mm)	-2.36	-10.48	原位微区
6 921.28	灰岩基质(LM)	-1.20	-7.20	常规分样
	孔洞方解石(CC)	-1.70	-10.40	常规分样
6 921.63	灰岩基质(LM)	-1.10	-7.80	常规分样
6 964.05	灰岩基质(LM)	-1.30	-7.70	常规分样
6 967.53	灰岩基质(LM)	-1.40	-7.50	常规分样
6 969.19	灰岩基质(LM)	-1.50	-7.90	常规分样
	孔洞方解石(CC)	-2.40	-12.20	常规分样
	泥晶基质(M-mm)	-0.90	-6.91	原位微区
	孔洞方解石(C-mm)	-1.86	-13.25	原位微区
6 969.64	孔洞方解石(C-mm)	-2.17	-10.72	原位微区
	灰岩基质(LM)	-0.90	-7.40	常规分样
	孔洞方解石(CC)	-2.10	-11.40	常规分样
	泥晶基质(M-mm)	-0.57	-6.93	原位微区

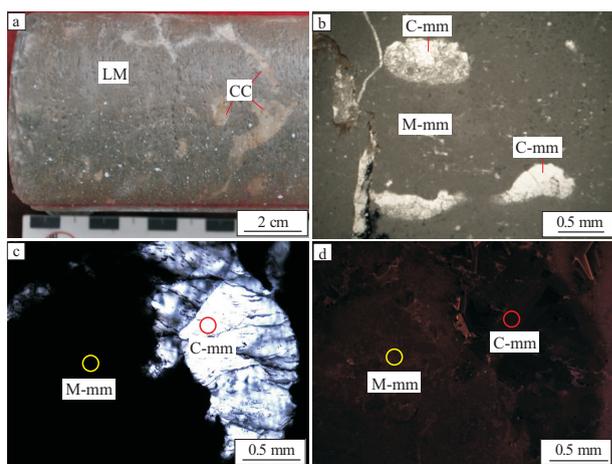


图 4 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组灰岩渗流结构特征

a. 灰岩不规则方解石胶结物充填; b. 泥晶灰岩中渗流粉砂结构; c. 加厚薄片基质与方解石胶结物的透光性差异; d. 阴极发光下两类方解石具有不同的发光特征

Fig. 4 Vadose textural characteristics in Ordovician Yingshan Formation limestone in Yubei area, Tarim Basin

法获取的基质碳氧同位素基本一致,碳氧同位素的数值变化范围较窄($\delta^{13}\text{C}$ 值: $-1.50\text{‰} \sim 0.57\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$ 值: $-7.90\text{‰} \sim -6.47\text{‰}$), 与前人发表的数值基本吻合^[27,37]。方解石胶结物除个别数据异常外,常规方法与微区取样方法获取的碳氧同位素变化范围亦基本一致。与基质泥晶方解石相比,方解石胶结物碳氧同位素整体偏轻且波动范围较大($\delta^{13}\text{C}$ 值: $-2.40\text{‰} \sim 1.30\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$ 值: $-13.25\text{‰} \sim -8.30\text{‰}$)。个别方解石胶结物碳氧同位素值偏重且接近基质泥晶方解石的分析值,可能是由于常规取样过程混入了基质组分导致。

3.3 讨论与意义

从岩石学特征看,研究区鹰山组灰岩中具有渗流结构的不规则方解石胶结物总体反映了表生期大气淡水的溶蚀—充填作用。一方面,由于 T_7^+ 不整合面附近的大气降水作用,在渗流—潜流带形成了典型的渗流粉砂结构,代表了表生期的不规则、非均质的溶蚀作用;另一方面随着地层埋藏深度

从分析结果看(图 5),常规方法与微区取样方

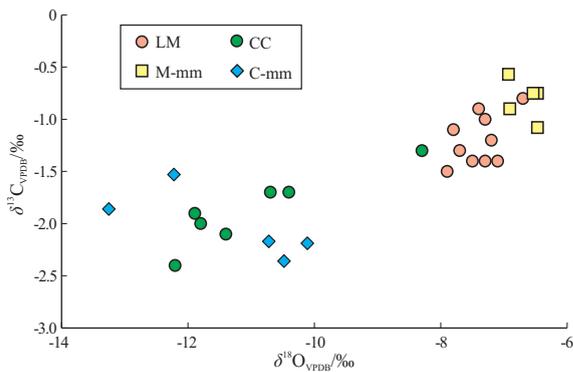


图 5 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组灰岩不同产状方解石的碳氧同位素分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of carbon and oxygen isotopes of different calcite occurrences in Ordovician Yingshan Formation limestone in Yubei area, Tarim Basin

的增加与岩溶流体在下渗过程中 CaCO_3 逐渐饱和, 溶蚀作用形成的不规则流体通道逐渐被胶结充填, 形成粗晶方解石胶结物。由于大气淡水通常具有相对较轻的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 特征, 其 CaCO_3 饱和流体沉淀的方解石通常具有变化范围较大且偏负的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[38]。从分析结果看(图 5), 该地区鹰山组灰岩中与渗流结构共生的亮晶方解石胶结物具有与典型大气淡水成因方解石相似的碳氧同位素分布特征, 证实玉北地区中西部平台区存在加里东中期 I 幕岩溶作用。

4 多阶段白云石化流体交代—胶结作用

白云石化作用是碳酸盐岩成岩过程最为常见的成岩作用之一, 亦是最受关注的研究领域之一。白云石化流体的属性是分析白云石成因、白云岩成因以及白云岩储层成因等问题的关键要素。

4.1 研究对象及其岩石学特征

塔里木盆地寒武系一下奥陶统发育厚层白云岩及相关白云岩储层, 是超深层油气勘探的重要领域。2006 年钻探的塔深 1 井在超过 8 400 m 埋深揭示了优质白云岩储层, 引起诸多学者的关注^[39-42]。随着对该井寒武系地层系统的认识变化, 对其白云岩储层成因亦存在不同观点^[11, 43-44]。在前期基础上, 此次基于常规分样与微区原位的碳氧同位素分析数据的对比, 进一步讨论塔深 1 井中寒武统阿瓦塔格组白云岩储层的成因。

中寒武统阿瓦塔格组沉积期塔里木盆地整体处于干旱—极度干旱的蒸发台地环境, 表现为膏岩—盐岩的广泛发育。准同生期形成的泥晶—粉晶白云石随着埋深增加与重结晶作用的增强形成粉晶—细晶白云石, 为中寒武统主要的基质白云石

类型。塔深 1 井阿瓦塔格组白云岩取心段基质部分以粉晶—细晶白云石(MD)为主, 顺层—似顺层缝洞具有直面自形白云石胶结物(CD), 局部高角度裂缝—孔洞充填鞍形白云石胶结物(SD)。显微岩石学分析显示孔洞白云石胶结物可进一步划分为早期白云石胶结物(MCD1)与晚期白云石胶结物(MCD2)。阴极发光下, 基质白云石(MMD)与早期白云石胶结物具有弱发光呈暗红色, 晚期白云石胶结物具“亮边”特征中等强度发光呈亮红色(图 6)。

4.2 微区原位碳氧同位素分析与常规分样方法对比

采用常规分样方法采集基质白云石(MD) 8 件、直面自形白云石胶结物(CD) 7 件与鞍形白云石胶结物 1 件, 参考了 3 个鞍状白云石的已发表数据^[41]。采用原位微区取样方法分别采集了基质白云石(MMD) 11 件、早期白云石胶结物(MCD1) 6 件与晚期白云石胶结物(MCD2) 9 件进行碳氧同位素分析^[11], 分析结果见表 3, 图 7。

从分析结果看(图 7), 常规分样方法与原位微区获取的基质白云石碳氧同位素分布范围基本一致, $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 0.4‰~1.2‰、0.43‰~1.37‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -6.3‰~-4.5‰、-6.74‰~-3.89‰。常规方法获取的孔洞白云石胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -0.6‰~0.8‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.9‰~-5.5‰, 显示其与基质碳氧同位素值具有小范围的重叠, 但总体偏轻且分布范围变大(图 7)。微区原位方法分别获取的早期白云石胶结物与晚期白云石胶结物的碳

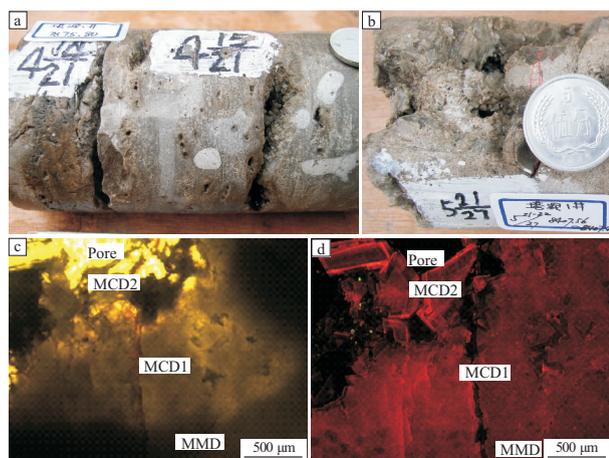


图 6 塔里木盆地塔深 1 井寒武系阿瓦塔格组白云岩岩石学特征

a. 泥晶白云岩中顺层孔洞直面自形白云石充填; b. 泥晶白云岩中高角度缝洞中鞍形白云石充填; c. 加厚薄片基质、早期白云石胶结物、晚期白云石胶结物的透光性具有明显差异; d. 阴极发光下不同类型白云石具有不同的发光特征(与 c 同一视域)

Fig.6 Petrological characteristics of dolomites in Cambrian Awatage Formation in well Tashen 1, Tarim Basin

表 3 塔里木盆地塔深 1 井中寒武统阿瓦塔格组不同类型白云石碳氧同位素分析结果

Table 3 Results of carbon and oxygen isotopes of different dolomite types in Awatage Formation in well Tashen1, Tarim Basin

样品深度/m	分析对象	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$	取样方法
7 873.93	基质, 粉晶—细晶白云石 (MMD)	0.98	-3.89	原位微区
	基质, 粉晶—细晶白云岩 (MD)	0.83	-4.22	原位微区
7 875.70	孔洞白云石胶结物 (CD)	1.20	-4.70	常规分样
	孔洞白云石胶结物 (CD)	0.70	-5.50	常规分样
7 875.79	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	0.80	-7.70	常规分样
	基质, 细晶白云石 (MMD)	0.43	-6.74	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	0.53	-5.03	原位微区
7 875.86	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	-1.10	-5.66	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	-0.19	-5.01	原位微区
8 405.30	基质, 粉晶白云岩 (MD)	0.40	-6.30	常规分样
	孔洞白云石胶结物 (CD)	-0.60	-6.20	常规分样
8 405.52	基质, 粉晶白云岩 (MD)	0.90	-4.50	常规分样
8 406.50	粉晶白云岩孔洞鞍状白云石胶结物 (SD) ^[41]	-0.60	-13.00	常规分样
8 406.60	基质, 粉晶白云岩 (MD)	0.40	-5.60	常规分样
	孔洞白云石胶结物 (CD)	0.50	-6.90	常规分样
8 406.60	基质, 粉晶白云岩 (MD)	0.60	-5.10	常规分样
	孔洞白云石胶结物 (CD)	-0.50	-10.10	常规分样
8 406.95	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	1.15	-4.17	原位微区
	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	1.37	-3.90	原位微区
	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	1.10	-4.44	原位微区
	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	1.06	-4.63	原位微区
	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	1.17	-4.35	原位微区
	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	1.13	-4.16	原位微区
	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	1.18	-4.00	原位微区
	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	0.95	-4.62	原位微区
	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	0.39	-6.38	原位微区
	孔洞边缘早期白云石胶结物 (MCD1)	0.95	-4.62	原位微区
8 407.50	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	0.87	-4.64	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	-0.40	-8.54	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	-0.57	-6.90	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	-1.15	-8.23	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	-1.10	-7.90	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	-0.34	-7.08	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	-0.32	-6.81	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	1.20	-4.90	常规分样
8 407.50	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	0.80	-5.70	常规分样
	裂缝—孔洞鞍形白云石胶结物 (SD)	-2.10	-13.00	常规分样
8 407.55	粉晶白云岩孔洞鞍状白云石胶结物 (SD) ^[41]	-0.90	-12.50	常规分样
8 407.55	粉晶白云岩孔洞鞍状白云石胶结物 (SD) ^[41]	-0.80	-11.60	常规分样
8 407.90	基质, 泥粉晶白云石 (MMD)	0.52	-5.44	原位微区
	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	0.72	-4.81	原位微区
8 408.50	孔洞充填的晚期白云石胶结物 (MCD2)	-1.11	-6.11	原位微区
	基质, 细—中晶白云岩 (MD)	0.50	-6.10	常规分样
	基质, 细晶白云岩 (MD)	0.70	-5.00	常规分样
8 408.50	孔洞白云石胶结物 (CD)	0.70	-10.90	常规分样

氧同位素值具有明显的差异分布范围。早期白云石胶结物的碳氧同位素值 ($\delta^{13}\text{C}$ 值: $0.39\text{‰} \sim 1.18\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$ 值: $-6.38\text{‰} \sim -4.00\text{‰}$) 与基质白云石基本重叠, 显示其来源于早期的继承性白云石化流体。晚期直面自形白云石胶结物的碳氧同位素值 ($\delta^{13}\text{C}$ 值: $-1.15\text{‰} \sim -0.19\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$ 值: $-8.54\text{‰} \sim$

-5.01‰) 偏负, 总体偏轻的氧同位素特征反映其形成的流体温度相对较高、形成时间相对较晚。高角度缝洞充填的鞍形白云石胶结物具有更加偏负 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (分别为 $-2.1\text{‰} \sim -0.6\text{‰}$ 、 $-13.0\text{‰} \sim -11.6\text{‰}$), 表明其为最晚期构造—热液流体活动的产物。

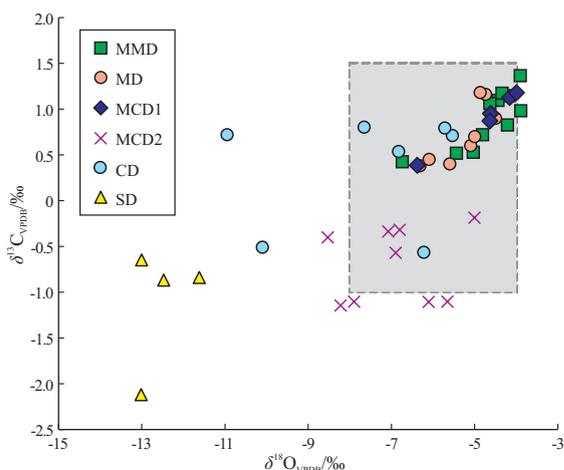


图 7 塔里木盆地塔深 1 井寒武系阿瓦塔格组白云岩不同产状白云石碳氧同位素分布特征
虚线范围为中寒武统鼓山阶—古元阶白云石背景值^[40,45,47]。

Fig.7 Distribution characteristics of carbon and oxygen isotopes of different dolomite occurrences in Cambrian Awatage Formation in well Tashen1, Tarim Basin

4.3 讨论与意义

岩心、显微岩石学与碳氧同位素分析结果表明塔深 1 井阿瓦塔格组白云岩储层中不同类型白云石与多阶段白云石化流体作用相关。基质粉晶—细晶白云石总体反映了中寒武世蒸发海水成岩环境,具有相对偏重的¹³C 与¹⁸O,其与塔里木盆地柯坪寒武系剖面阿瓦塔格组藻白云岩的分析结果($\delta^{13}\text{C}$: $-0.7\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $-7.9\text{‰} \sim -4.5\text{‰}$)具有可比性^[45],亦与全球同期海水的碳氧同位素分析结果($\delta^{13}\text{C}$: $-1.0\text{‰} \sim 1.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $-10.9\text{‰} \sim -4.5\text{‰}$)相一致^[46-47]。顺层—似顺层缝洞中具有早、晚两期白云石胶结物,其 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布范围揭示了白云石结晶温度从低温向相对高温的渐进埋藏过程。由此可以推测,初始的顺层—似顺层缝洞应形成于沉积—浅埋藏的早期成岩阶段。鞍形白云石胶结物流体包裹体具有较高的均一温度^[48],这与其较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相一致,可能揭示晚期构造—热液流体作用在高角度缝洞储集空间的充填胶结作用。

5 结论

微区原位取样进行方解石、白云石的碳氧同位素分析提供了一种相对“低成本、高精度”的分析手段,结合显微岩石学特征的识别,有利于揭示胶结物形成过程的多期、多阶段的流体性质演化,如沉积—埋藏过程的多期次海水胶结作用、多阶段的白云石化流体交代—充填作用。常规分样获取的此类胶结物碳氧同位素值可能是多期次产物的混

合值。对于相对单一的产物,如基质组分、大气淡水成因方解石等,常规分样进行碳氧同位素分析基本可以满足研究需要,分析结果基本一致。

参考文献:

- [1] DERRY L A, KAUFMAN A J, JACOBSEN S B. Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: evidence from stable and radiogenic isotopes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(3): 1317-1329.
- [2] MCDERMOTT F. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7/8): 901-918.
- [3] 董庆民, 胡忠贵, 陈世悦, 等. 川东北地区长兴组—飞仙关组碳酸盐岩同位素地球化学响应及其地质意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1307-1320.
DONG Qingmin, HU Zhonggui, CHEN Shiyue, et al. Isotope geochemical responses and their geological significance of Changxing-Feixianguan formation carbonates, northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1307-1320.
- [4] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/3): 59-88.
- [5] JACOBSEN S B, KAUFMAN A J. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/3): 37-57.
- [6] 刘超, 马骞, 萨如力草克提·沙拉克, 等. 沙垒田地区奥陶系古岩溶储层热液流体改造的地球化学证据 [J]. *断块油气田*, 2021, 28(5): 620-624.
LIU Chao, MA Jiao, SARULICAPKETI Shalake, et al. Geochemical evidences of hydrothermal fluid alterations of Ordovician paleokarst reservoirs in Shaleitian area [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(5): 620-624.
- [7] SWART P K. The geochemistry of carbonate diagenesis: the past, present and future [J]. *Sedimentology*, 2015, 62(5): 1233-1304.
- [8] QING Hairuo, MOUNTJOY E. Large-scale fluid flow in the Middle Devonian Presqu'île barrier, Western Canada Sedimentary Basin [J]. *Geology*, 1992, 20(10): 903-906.
- [9] CHEN Daizhao, QING Hairuo, YANG Chao. Multistage hydrothermal dolomites in the Middle Devonian (Givetian) carbonates from the Guilin area, South China [J]. *Sedimentology*, 2004, 51(5): 1029-1051.
- [10] LI Huili, YOU Donghua, HAN Jun, et al. The origin of fluid in calcite veins and its implications for hydrocarbon accumulation in the Shunnan-Gucheng area of the Tarim Basin, China [J]. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2020, 5(6): 341-353.
- [11] 曹自成, 尤东华, 漆立新, 等. 塔里木盆地塔深 1 井超深层白云岩储层成因新认识: 来自原位碳氧同位素分析的证据 [J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(7): 915-922.
CAO Zicheng, YOU Donghua, QI Lixin, et al. New insights of the genesis of ultra-deep dolomite reservoirs in well TS1, Tarim Basin: evidence from in situ carbon and oxygen isotope analysis [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(7): 915-922.

- [12] 李平平,王淳,邹华耀,等.团簇同位素在白云岩化流体恢复中的应用与局限性[J].石油与天然气地质,2021,42(3):738-746.
LI Pingping, WANG Chun, ZOU Huayao, et al. Application of clumped isotopes to restoration of dolomitizing fluids and its limitations[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 738-746.
- [13] VERSCHURE R H A microscope-mounted drill to isolate microgram quantities of mineral material from thin and polished section[J]. Mineralogical Magazine, 1978, 42(324): 499-503.
- [14] 谢小敏,胡文瑄,王小林,等.新疆柯坪地区寒武纪—奥陶纪碳酸盐岩沉积旋回的碳氧同位素研究[J].地球化学,2009,38(1):75-88.
XIE Xiaomin, HU Wenxuan, WANG Xiaolin, et al. Sedimentary sequences in Keping area, Xinjiang: constraints from carbon and oxygen isotope compositions of Cambrian to Ordovician carbonate rocks[J]. Geochimica, 2009, 38(1): 75-88.
- [15] PREZBINDOWSKI D. Microsampling technique for stable isotopic analyses of carbonates [J]. Journal of Sedimentary Research, 1980, 50(2): 643-644.
- [16] DONG Shaofeng, CHEN Daizhao, QING Hairuo, et al. In situ stable isotopic constraints on dolomitizing fluids for the hydrothermally-originated saddle dolomites at Keping, Tarim Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(23): 2877-2882.
- [17] SMALLEY P C, STIJFHOORN D E, RÅHEIM A, et al. The laser microprobe and its application to the study of C and O isotopes in calcite and aragonite [J]. Sedimentary Geology, 1989, 65(3/4): 211-221.
- [18] DICKSON J A D, SMALLEY P C, RÅHEIM A, et al. Intracrystalline carbon and oxygen isotope variations in calcite revealed by laser microsampling [J]. Geology, 1990, 18(9): 809-811.
- [19] SMALLEY P C, MAILE C N, COLEMAN M L, et al. LASSIE (laser ablation sampler for stable isotope extraction) applied to carbonate minerals [J]. Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, 1992, 101(1/2): 43-52.
- [20] 罗平,苏立萍,罗忠,等.激光显微取样技术在川东北飞仙关组鲕粒白云岩碳氧同位素特征研究中的应用[J].地球化学,2006,35(3):325-330.
LUO Ping, SU Liping, LUO Zhong, et al. Application of laser microsampling technique to analysis of C and O isotopes of oolitic dolomites in Feixianguan Formation, Northeast Sichuan [J]. Geochimica, 2006, 35(3): 325-330.
- [21] 胡安平,沈安江,王永生,等.海相碳酸盐岩储层实验分析技术进展及应用[J].海相油气地质,2020,25(1):1-11.
HU Anping, SHEN Anjiang, WANG Yongsheng, et al. The progress and application of experimental analysis technology for marine carbonate reservoir [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(1): 1-11.
- [22] SPÖIL C, MATTEY D. Stable isotope microsampling of speleothems for palaeoenvironmental studies: a comparison of microdrill, micromill and laser ablation techniques [J]. Chemical Geology, 2006, 235(1/2): 48-58.
- [23] 吕焕泽,邹妞妞,蔡宁宁,等.玛湖凹陷北斜坡百口泉组碳酸盐胶结物形成机理及其地质意义[J].新疆石油地质,2022,43(5):554-562.
LÜ Huanze, ZOU Niuniu, CAI Ningning, et al. Formation mechanism and geological significance of carbonate cements in Baikouquan formation on northern slope of Mahu Sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(5): 554-562.
- [24] 吴梅莲,柴雄,周碧辉,等.缝洞型碳酸盐岩储集层连通性刻画及应用[J].新疆石油地质,2022,43(2):188-193.
WU Meilian, CHAI Xiong, ZHOU Bihui, et al. Connectivity characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs and application [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(2): 188-193.
- [25] 蔡习尧,钱一雄,陈强路,等.塔里木盆地古隆1井奥陶系恰尔巴克组与一间房组的发现及意义[J].石油实验地质,2011,33(4):348-352.
CAI Xiyao, QIAN Yixiong, CHEN Qianglu, et al. Discovery and significance of Qrebake and Yijianfang formations of Ordovician in well GL1, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 348-352.
- [26] 张智礼,李慧莉,熊平,等.塔中北坡中奥陶统一间房组碳同位素地层学研究[J].中国地质,2016,43(2):638-649.
ZHANG Zhili, LI Huili, XIONG Ping, et al. A study of carbon isotope stratigraphy of the middle Ordovician Yijianfang Formation on the north slope of Tazhong area [J]. Geology in China, 2016, 43(2): 638-649.
- [27] 张智礼,李慧莉,谭广辉,等.塔里木中央隆起区奥陶纪碳同位素特征及其地层意义[J].地层学杂志,2014,38(2):181-189.
ZHANG Zhili, LI Huili, TAN Guanghui, et al. Carbon isotope chemostratigraphy of the Ordovician system in central uplift of the Tarim Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 2014, 38(2): 181-189.
- [28] 尤东华,韩俊,胡文瑄,等.超深层灰岩孔隙—微孔隙特征与成因:以塔里木盆地顺南7井和顺托1井一间房组灰岩为例[J].石油与天然气地质,2017,38(4):693-702.
YOU Donghua, HAN Jun, HU Wenxuan, et al. Characteristics and genesis of pores and micro-pores in ultra-deep limestones: a case study of Yijianfang Formation limestones from Shunnan-7 and Shuntuo-1 wells in Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 693-702.
- [29] TROTTER J A, WILLIAMS I S, BARNES C R, et al. Did cooling oceans trigger Ordovician biodiversification? Evidence from conodont thermometry [J]. Science, 2008, 321(5888): 550-554.
- [30] KALJO D, MARTMA T, SAADRE T. Post-Hunnebergian Ordovician carbon isotope trend in Baltoscandia, its environmental implications and some similarities with that of Nevada [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 245(1/2): 138-155.
- [31] 孟万斌,肖春晖,冯明石,等.碳酸盐岩成岩作用及其对储层的影响:以塔中顺南地区一间房组为例[J].岩性油气藏,2016,28(5):26-33.
MENG Wanbin, XIAO Chunhui, FENG Mingshi, et al. Carbonate diagenesis and its influence on reservoir: a case study from Yijianfang Formation in Shunnan area, central Tarim Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(5): 26-33.
- [32] 傅恒,韩建辉,孟万斌,等.塔里木盆地塔中北坡奥陶系碳酸盐岩岩溶储层的形成机理[J].天然气工业,2017,37(3):25-36.
FU Heng, HAN Jianhui, MENG Wanbin, et al. Forming mecha-

- nism of the Ordovician karst carbonate reservoirs on the northern slope of central Tarim Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(3): 25-36.
- [33] 尤东华,曹自成,徐明军,等.塔里木盆地奥陶系鹰山组多类型白云岩储层成因机制[J].*石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 92-101.
YOU Donghua, CAO Zicheng, XU Mingjun, et al. Genetic mechanism of multi-type dolomite reservoirs in Ordovician Yingshan Formation, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 92-101.
- [34] 钱一雄,沙旭光,李慧莉,等.塔里木盆地塔中西部加里东中、晚期构造—层序结构与奥陶系碳酸盐岩储集体分布[J].*地质前沿*, 2013, 20(1): 260-274.
QIAN Yixiong, SHA Xuguang, LI Huili, et al. An approach to Caledonian unconformities and sequence stratigraphic patterns and distribution of reservoirs of Ordovician carbonate in the western Tazhong area, Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 260-274.
- [35] 乔桂林,钱一雄,曹自成,等.塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组储层特征及岩溶模式[J].*石油实验地质*, 2014, 36(4): 416-421.
QIAO Guilin, QIAN Yixiong, CAO Zicheng, et al. Reservoir characteristics and karst model of Ordovician Yingshan Formation in Yubei area, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(4): 416-421.
- [36] 李映涛,袁晓宇,叶宁,等.塔里木盆地玉北地区鹰山组储层特征及主控因素[J].*海相油气地质*, 2014, 19(4): 9-18.
LI Yingtao, YUAN Xiaoyu, YE Ning, et al. Reservoir characterization and controlling factors of Lower-Middle Ordovician Yingshan reservoir in Yubei area, Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2014, 19(4): 9-18.
- [37] 蔡习尧,赵丽娜,李慧莉,等.麦盖提斜坡上奥陶统良里塔格组的确认及意义[J].*新疆石油地质*, 2015, 36(3): 351-356.
CAI Xiyao, ZHAO Lina, LI Huili, et al. Confirmation and significance of Lianglitage Formation of Upper Ordovician in Maigaiti Slope, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(3): 351-356.
- [38] 孟庆强,朱东亚,胡文瑄,等.热力学和动力学双重控制下的大气降水溶蚀—充填机制[J].*中国科学:地球科学*, 2013, 43(11): 1797-1806.
MENG Qingqiang, ZHU Dongya, HU Wenxuan, et al. Dissolution-filling mechanism of atmospheric precipitation controlled by both thermodynamics and kinetics [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(12): 2150-2159.
- [39] 云露,翟晓先.塔里木盆地塔深 1 井寒武系储层与成藏特征探讨[J].*石油与天然气地质*, 2008, 29(6): 726-732.
YUN Lu, ZHAI Xiaoxian. Discussion on characteristics of the Cambrian reservoirs and hydrocarbon accumulation in well Tashen-1, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(6): 726-732.
- [40] 孟祥豪,张哨楠,蔺军,等.塔深 1 井寒武系白云岩储层同位素流体地球化学示踪[J].*矿物岩石*, 2009, 29(4): 75-82.
MENG Xianghao, ZHANG Shaonan, LIN Jun, et al. Geochemical tracing of isotopic fluid of the Cambrian dolomite reservoir in well Tashen 1 [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2009, 29(4): 75-82.
- [41] 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.
- [42] ZHU Dongya, MENG Qingqiang, JIN Zhijun, et al. Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim Basin, northwestern China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 232-244.
- [43] EHRENBERG S N, BJØRRLYKKE K. Comments regarding hydrothermal dolomitization and porosity development in the paper "Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim Basin, northwestern China" by Zhu et al. (2015) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 480-481.
- [44] 尤东华,王亮,胡文瑄,等.从成岩—蚀变特征探讨塔深 1 井白云岩储层成因[J].*岩石矿物学杂志*, 2018, 37(1): 34-46.
YOU Donghua, WANG Liang, HU Wenxuan, et al. Formation of deep dolomite reservoir of well TS1: insights from diagenesis and alteration investigations [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2018, 37(1): 34-46.
- [45] WANG Lichao, HU Wenxuan, WANG Xiaolin, et al. Seawater normalized REE patterns of dolomites in Geshan and Panlongdong sections, China: implications for tracing dolomitization and diagenetic fluids [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 56: 63-73.
- [46] ZHU Maoyan, BABCOCK L E, PENG Shanchi. Advances in Cambrian Stratigraphy and paleontology: integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction [J]. *Palaeoworld*, 2006, 15(3/4): 217-222.
- [47] GOMEZ F J, OGLE N, ASTINI R A, et al. Paleoenvironmental and carbon-oxygen isotope record of Middle Cambrian carbonates (La Laja Formation) in the Argentine Precordillera [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(10): 826-842.
- [48] 焦存礼,何治亮,邢秀娟,等.塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J].*岩石学报*, 2011, 27(1): 277-284.
JIAO Cunli, HE Zhiliang, XING Xiujuan, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 277-284.