

塔里木盆地奥陶系鹰山组多类型白云岩储层成因机制

尤东华¹,曹自成²,徐明军³,钱一雄¹,王石⁴,王小林⁵

(1. 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; 2. 中国石化西北油田分公司 勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国石油塔里木油田分公司 克拉油气开发部,新疆 库尔勒 841000; 4. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 5. 南京大学地球科学与工程学院,江苏 南京 216023)

摘要:塔里木盆地奥陶系鹰山组是油气勘探重要领域之一,发育多类型白云岩储层,其成因机制是较为关注的问题之一。基于构造-沉积背景分析、薄片鉴定、阴极发光与扫描电镜等分析手段,结合原位微区碳氧同位素、全岩碳-氧-锶同位素和流体包裹体等数据,分别解剖了浅埋藏型、岩溶型与热液改造型白云岩储层的显微岩石学与地球化学特征。浅埋藏白云石化相关储层的白云石自形程度好,不同产状白云石具有较一致的碳氧同位素组成,反应了相似的白云石化流体来源特点。岩溶型白云岩储层表现为去白云石化作用与大气淡水成因方解石的胶结,具有贫¹⁸O和富放射性⁸⁷Sr特征。热液改造型白云岩储层通常以萤石和石英等热液矿物为典型标志。热液流体通常具有高温高盐度特点,形成储集空间的过程中相关白云石与方解石胶结物以贫¹⁸O和Eu正异常为特征。白云岩储层的多成因特点决定其发育分布受岩相、局部构造位置和流体性质等多因素的控制。

关键词:白云石化;去白云石化;热液流体;碳酸盐岩;奥陶系;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Genetic mechanism of multi-type dolomite reservoirs in Ordovician Yingshan Formation, Tarim Basin

You Donghua¹, Cao Zicheng², Xu Mingjun³, Qian Yixiong¹, Wang Shi⁴, Wang Xiaolin⁵

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Northwest Oilfield Branch of SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. Kuqa Oil and Gas Development Department, Tarim Oilfield Branch of PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China; 4. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 5. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 216023, China)

Abstract: The Ordovician Yingshan Formation is one of the most important targets of petroleum exploration in the Tarim Basin. The genetic mechanism of well-developed dolomite reservoirs of multiple types has always been a focus of study here. The micropetrologic and geochemical characteristics of various dolomite reservoirs, including shallow buried, karstified and hydrothermal modification types, are revealed through analyses of tectonic-sedimentary setting, thin section observation and scanning electron microscopy, combined with in-situ carbon-oxygen isotopes, whole-rock carbon-oxygen-strontium isotopes, and fluid inclusion data. The dolomite reservoir of shallow-buried type is characterized by obvious euhedral crystals, and the consistent carbon and oxygen isotope compositions of mineral dolomite with different occurrences, reflecting the similar source of dolomitization fluids. The dolomite reservoir of karstified type is characterized by dedolomitization, calcite cementation of meteoric water origin, and negative $\delta^{18}\text{O}$ values and rich radiogenic ^{87}Sr . The dolomite reservoir of hydrothermal modification type is typically characterized by such hydrothermal minerals as fluorite and quartz. Its hydrothermal fluids are typically high in temperature and salinity, and the dolomite and calcite cements are characterized by negative ^{18}O and Eu positive anomaly in forming the reservoir space. The multiple origins of dolomite reservoirs determine that their development and distribution are controlled by many factors including lithofacies, local structural locations, and fluid properties.

收稿日期:2019-08-01;修订日期:2019-11-25。

第一作者简介:尤东华(1980—),男,博士、副研究员,碳酸盐岩储层地质学。E-mail:youdh.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U1663209,41830425,41972163);中国石化科技开发部项目(P18047-1)。

Key words: dolomitization, dedolomitization, hydrothermal fluid, carbonate rock, Ordovician, Tarim Basin

正如诸多学者所言,白云岩储层对于油气工业的重要性不言而喻。全球范围内,碳酸盐岩储层中白云岩占比高达50%,而北美碳酸盐岩领域80%的油气赋存于白云岩储层中^[1]。白云岩储层是中国深层-超深层领域的重点勘探对象。中国石化和中国石油在四川盆地均已取得了重大油气发现与商业开发,如普光气田、元坝气田和磨溪-高石梯气田等^[2-4]。白云岩储层成因是规模、优质白云岩储集体重要议题之一^[5-6]。多类型白云岩储集空间的形成与白云石化作用密不可分,又受特定地质条件下不同类型流体性质的控制。以白云岩储集空间的来源与相关流体类型为主线,结合构造沉积背景、白云石化作用以及后期流体改造特点可将白云岩储层划分为多种类型,如与蒸发岩溶解相关的白云岩储层^[7-8]、与白云石化相关的白云岩储层^[9]、与岩溶作用相关白云岩储层^[10-11]、与热液白云石化相关白云岩储层^[12]以及热液蚀变相关白云岩储层^[13-14]等。此外,储集空间的形成还可能与去白云石化和硫酸盐热化学还原作用(TSR)等多种地质过程有关^[15-16]。尽管不同学者对其中一些地质过程及机制还存在争议^[17],但较为一致的认为白云岩储集空间的形成与保持是多种地质作用的结果^[6,18]。

塔里木盆地鹰山组白云岩领域已经取得了一些油气发现(如中1井、古隆1井和古城6井等),使其成为当前油气勘探的重要方向之一。鹰山组优质白云岩储层的形成受埋藏重结晶^[19]、埋藏岩溶与埋藏溶蚀作用^[20]、热液溶蚀改造^[21]、表生岩溶和去白云石化^[22]等多因素控制^[23]。尽管塔里木盆地不同地区鹰山组白云岩储层都经历了多种流体的地质作用,但较少报道相对单一流体作用主导下白云岩储集空间形成的研究实例及其之间对比。本文拟分别以麦盖提斜坡玉北8井、卡塔克隆起中19井、古城墟隆起古隆1井为例,基于岩心资料通过显微岩石学研究并结合阴极发光、扫描电镜、原位碳氧同位素、全岩碳氧同位素与锶同位素等方法剖析鹰山组典型的浅埋藏型、岩溶型和热液改造型白云岩储层,阐明相对单一流体作用下形成的白云岩储层特征,由此揭示不同成因类型白云岩储层的矿物-岩石学与地球化学标志及其差异性,为针对性开展不同成因类型白云岩储层的预测与评价提供参考。

1 区域地质背景

塔里木盆地寒武纪—奥陶纪台地区主要以碳酸盐

岩沉积为主,中寒武世发育一定厚度潟湖相膏盐岩。鹰山组属于早-中奥陶世地层,相当于特马豆克阶-弗洛阶-大坪阶^[24]。其下伏为早奥陶世蓬莱坝组,上覆中奥陶世一间房组。从岩性特征看,台地相区下奥陶统蓬莱坝组以白云岩为主,中、上奥陶统(一间房组与良里塔格组)以灰岩为主。位于两者之间的鹰山组自下而上可划分为4段,分别为白云岩段、灰质云岩段、云质灰岩段和灰岩段^[25]。从岩性变化上看,白云岩自下而上逐渐减少,从厚层白云岩向薄层灰岩-云岩互层过渡,再转变为厚层灰岩为主。这种变化有可能反应了早中奥陶世(自特马豆克阶至大坪阶)古海水性质的系统性变化,表现为海水锶同位素组成的逐渐减低^[26]以及古海水表层温度从约40℃降低到30℃附近^[27],并伴随了海洋无脊椎动物多样性增加。在这之后的达瑞威尔阶发生了奥陶纪生物大辐射事件^[28],以生物灰岩的普遍发育与分布为重要特点。

加里东中期I幕构造运动使得卡塔克隆起区一间房组基本剥蚀殆尽,且鹰山组中上部地层遭受了不同程度的剥蚀。在隆起区形成了 T_1^4 不整合面,表现为上覆良里塔格组(O_3l)与鹰山组(O_{1-2ys})呈不整合接触关系,如卡塔克隆起中19井等(图1,图2)。受加里东晚期至海西早期构造运动的影响,在巴楚-麦盖提斜坡地区志留系至中晚奥陶世地层大量剥蚀,表现为石炭系巴楚组泥岩直接覆盖于鹰山组灰岩地层之上,如麦盖提斜坡玉北8井等(图1,图2)。顺南-古城地区在晚奥陶世沉积期中奥陶统一间房组(O_{2yj})之上覆盖了巨厚的混积陆棚相细粒砂泥岩沉积。加里东晚至海西早期构造运动在该地区表现为石炭系不整合覆盖于却尔却克组之上,一间房组与鹰山组呈整合接触关系,如古城墟隆起古隆1井等(图1,图2)。同时,加里东晚期至海西早期是该区北东向、北东东向走滑断裂活动的主要时期,为深部流体活动提供了通道^[29-31]。塔里木盆地在一些特定时期还伴随着岩浆-火山作用,主要有寒武纪早期、奥陶纪、中二叠世和白垩纪4期岩浆-火山活动事件^[32]。

2 浅埋藏型白云岩储层

诸多学者就白云石化作用与储层的关系进行过论述,涉及多种白云石化模式、白云石化作用对储层物性的直接与间接影响等^[6,18],本文不再讨论。在此介绍

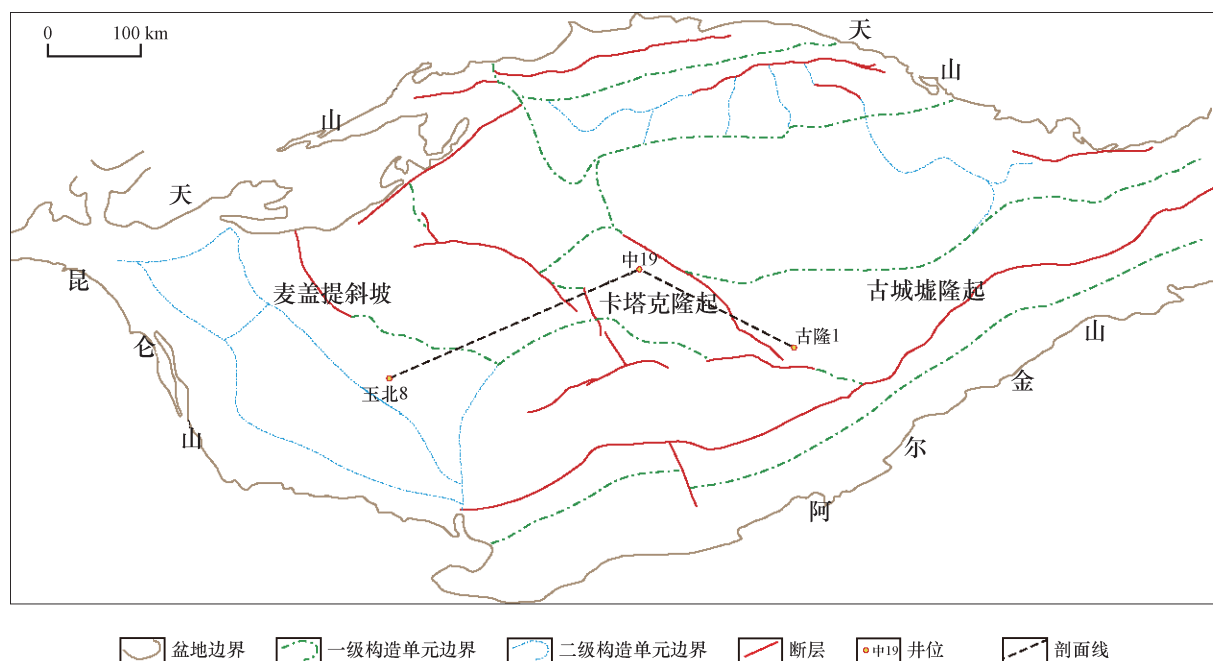


图1 塔里木盆地构造单元及钻井位置

Fig. 1 Structure units and well locations in the Tarim Basin

一个关于浅埋藏白云石化作用形成优质白云岩储层的实例——塔里木盆地玉北8井白云岩储层。

按照目前对鹰山组沉积期岩相古地理的认识,该井鹰山组位于潮下带至局限台地相带,具备渗透-回流白云石化作用的背景条件。井底岩心揭示优质白云岩储层,其现今埋深超过 7 100 m,厚度达 17 m(未见底)。全直径孔隙度高达 10.8%,渗透率高达 $87.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度与渗透率呈正相关关系。白云岩储集空间主要为铸模孔与晶间孔隙。

2.1 显微岩石学特征

岩心与薄片均显示白云岩的原始岩相为含生屑的颗粒(粒屑)灰岩,表现为结构与颜色的不均一性。在透射光下原始的颗粒组分颜色较深,而胶结物颜色相对较浅。尽管强烈的白云石化作用使得原岩结构特征发生了较大改变,但依然存在可识别的生屑铸模孔的轮廓(图3a)。透射光下,铸模孔周围基质白云石颜色较深,呈直面自形,大小约 200 μm ;铸模孔内白云石胶结物相对较为干净透明,直面自形,较基质白云石略大。阴极发光下基质白云石与白云石胶结物均为昏暗发光-不发光呈暗红色,仅孔隙内部自形白云石的边缘存在“亮边”(图3b,c)。

除铸模孔外,还有一类与白云石化作用相关的孔隙。岩心上为呈糖粒状且发育大量小孔,微观上表现为白云石晶体支撑下形成的晶间角孔(图3d,e)。阴

极发光下直面自形白云石呈相似特征,昏暗发光-不发光呈暗红色。局部存在后期成岩流体的改造,使得部分白云石晶间孔隙被连晶方解石胶结物充填。阴极发光下自形白云石发光强度增加,且白云石的亮边变暗,方解石胶结物基本不发光(图3f)。

2.2 储层成因分析

岩石学特征表明两点:①铸模孔的形成早于白云石化作用;②充填的白云石胶结物与基质白云石具有一定相似性。铸模孔的存在揭示此类孔隙发育具有结构选择性,代表文石质生物壳的溶解且形成于准同生期。浅埋藏阶段,白云石化流体对具有孔渗性的原始灰岩进行白云石化并在孔隙空间生长了直面自形白云石。白云石晶间孔隙的形成主要是由于白云石化过程所需的 CO_3^{2-} 来源于原地方解石的溶解,在浅埋藏阶段的白云石化过程中形成孔隙。

从原位微区碳、氧同位素的分析结果看(图3),铸模孔白云石胶结物、基质白云石以及发育晶间孔的白云石其碳、氧同位素组成基本相似。白云石胶结物与基质白云石相比,碳同位素值差别($\delta^{13}\text{C}$)最大不超过 0.3‰;而 $\delta^{18}\text{O}$ 差别从 0 ~ 1.1‰,但均大于 -5‰。由于白云石氧同位素的分馏主要受温度控制(即白云石化流体温度越高则形成的白云石氧同位素越负),故微区碳、氧同位素特征表明白云石化作用发生于相对低温的埋深阶段。

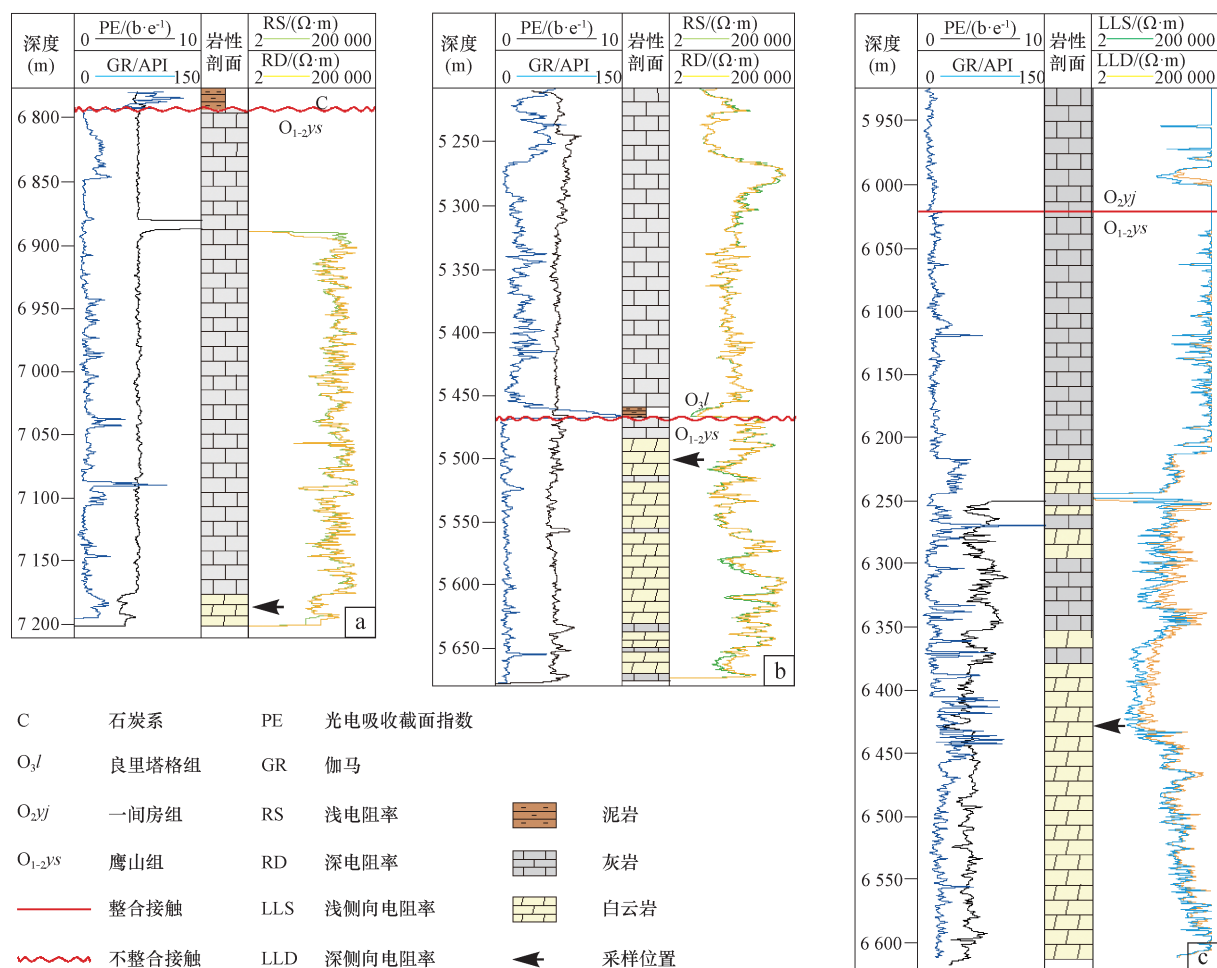


图2 塔里木盆地玉北8井(a)、中19井(b)和古隆1井(c)鹰山组白云岩发育特征及样品采集位置

Fig. 2 Characteristics of dolomite development and sampling locations in the Yingshan Formation in Wells YB8(a)/Z19(b)/GL1(c), Tarim Basin

后期成岩流体一方面在白云石晶间孔隙内形成方解石胶结物,另一方面对先存的直面自形白云石存在强烈的蚀变。主要表现为白云石氧同位素偏负(-6.7‰),而碳同位素变化不大。指示成岩流体产物的方解石胶结物碳同位素为 -3.2‰ ,氧同位素为 -11.1‰ 。

孔隙形成之后对孔隙有重要影响的主要有白云石的次生加大、埋藏阶段少量鞍形白云石的形成以及局部方解石的胶结。由于白云石化作用使得白云岩储层具有更强的抗压实、抗压溶能力^[33],导致浅埋藏期形成的大量孔隙得以保存。

3 岩溶型白云岩储层

在不整合面附近的白云岩由于受到大气淡水不同程度的淋滤改造,易形成岩溶型白云岩储层,使其成为重要的勘探领域之一,如塔里木盆地牙哈-英买力地

区的寒武系白云岩潜山^[10]、卡塔克隆起区 T_7^4 界面之下鹰山组白云岩潜山发育区^[34]。潜山岩溶作用对白云岩的影响一方面表现为溶蚀孔洞、晶间溶孔的形成,另一方面表现为去白云石化作用以及大气淡水成因方解石的胶结作用。以卡塔克隆起中19井鹰山组白云岩为例,介绍岩溶流体作用下白云岩储层的显微岩石学与地球化学响应特征。该井钻井取心完整揭示了 T_7^4 不整合面^[35],据测井资料解释在 T_7^4 面之下白云岩储层厚度达118.5 m,其储集空间以白云石晶间溶孔为主^[22]。

3.1 显微岩石学特征

岩心与薄片分析显示该井鹰山组主要由云质泥晶灰岩、云质亮晶-微亮晶似球粒灰岩、云质纹层藻灰岩与生物钻孔白云岩、粉晶-细晶白云岩构成,以厚层白云岩夹薄层灰岩为主要特点。从全区地层对比及局部构造位置看,该井岩性组合特点显示鹰山组中、上部灰

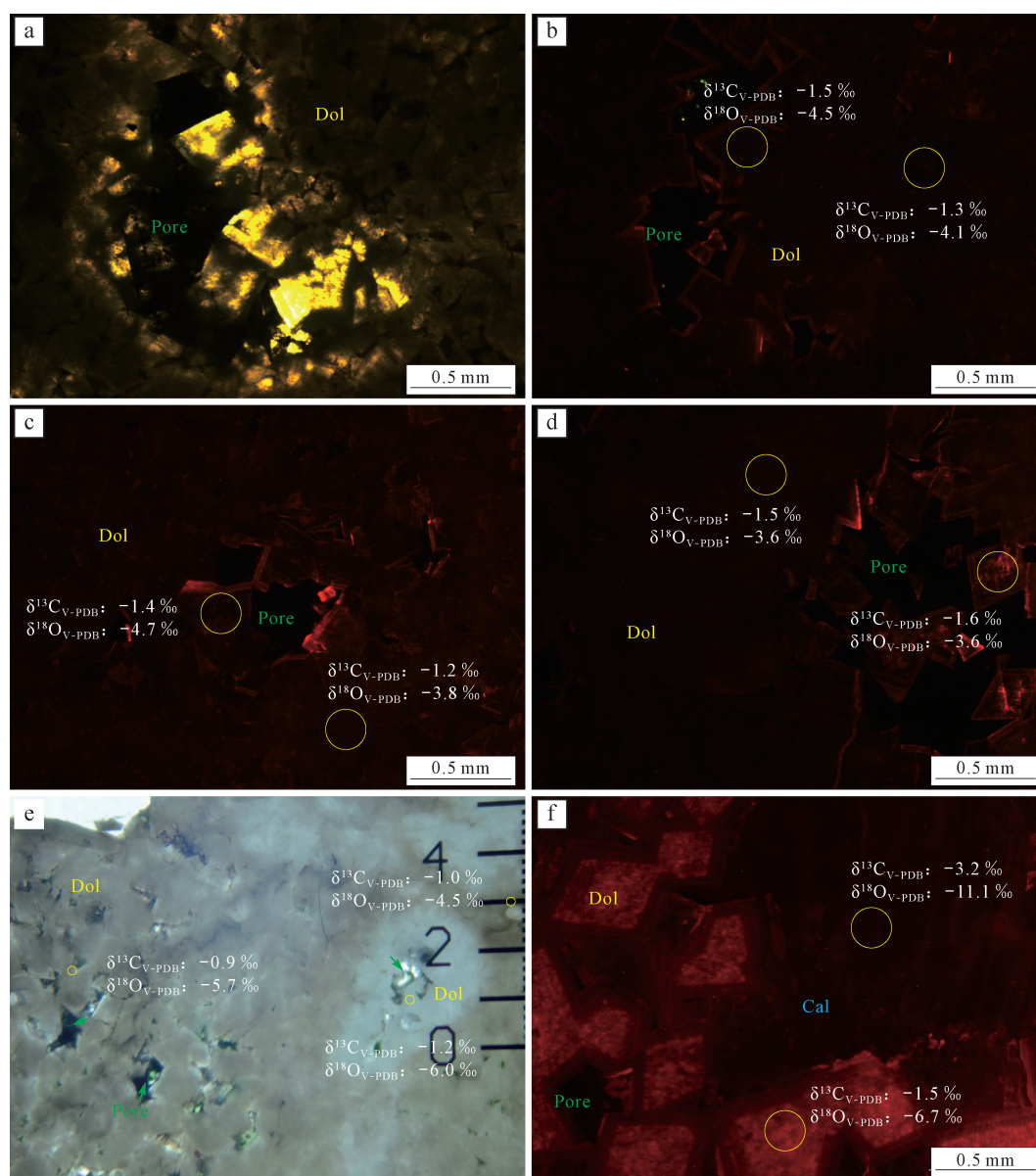


图 3 塔里木盆地玉北 8 井鹰山组白云岩岩石学特征与原位微区碳氧同位素分析结果

Fig. 3 Petrographic characteristics of dolomite sampled from the Yingshan Formation in Well YB8, Tarim Basin, and the in-situ $\delta^{13}\text{C}$ & $\delta^{18}\text{O}$ compositions

a. 加厚薄片,透射光下生屑残余结构及铸模孔轮廓,埋深 7 175.39 m; b. 阴极发光下白云石整体不发光,孔隙内部白云石的边缘呈砖红色,埋深 7 175.39 m,黄色圆圈为原位微区碳、氧同位素样品取样位置,取样直径为 0.2 mm(下同); c. 生屑铸模孔,阴极发光下白云石整体昏暗发光,孔隙内白云石胶结物边缘呈砖红色,埋深 7 175.39 m; d. 阴极发光下孔洞发育区白云石整体不发光,埋深 7 174.56 m; e. 直面自形白云石发育晶间孔隙,埋深 7 176.34 m; f. 直面自形白云石晶间发育方解石胶结物,阴极发光下白云石具中等强度呈砖红色、方解石整体不发光,埋深 7 175.98 m

Dol. 白云石; Cal. 方解石; Pore. 孔隙

岩、云灰岩地层经历了较强的剥蚀作用。由此表明, T_4 界面之下白云岩在上覆良里塔格组沉积前经历了强烈的表生岩溶作用,显微岩石学特征上主要表现为白云石晶间溶孔发育以及去白云石化作用与方解石胶结作用(图 4)。

白云石晶体粒径一般为 0.10~0.25 mm,呈直面自形-半自形特点。晶体内部富含方解石微包体,局部可

见雾心亮边结构。白云石晶间以晶间溶孔为主要特征,少量晶间孔与晶内溶孔。去白云石化作用表现为白云石晶内、晶体边缘被溶蚀成港湾状并被方解石胶结,但依然具有白云石晶体的轮廓(图 4b,c)。白云岩中部溶蚀孔、洞、缝被亮晶方解石胶结物充填,可见方解石晶体中残留的白云石晶体碎片。阴极发光下白云石呈中等强度暗红色,方解石昏暗发光-不发光(图 4d)。

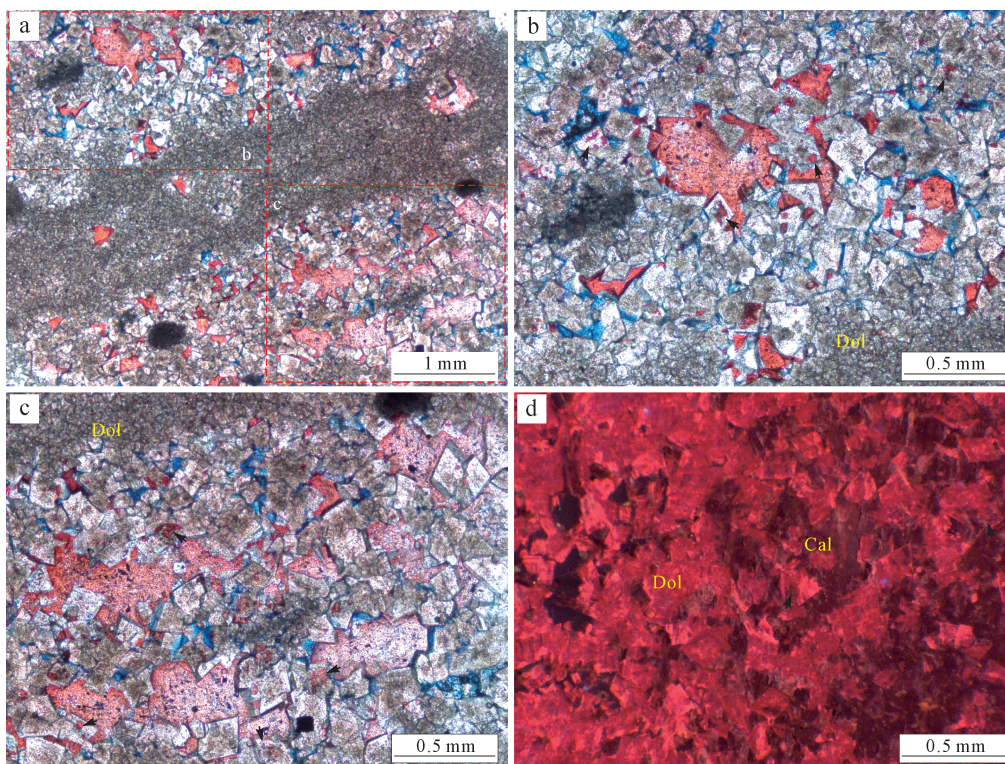


图4 塔里木盆地中19井鹰山组白云岩储层去白云石化作用特征

Fig. 4 Characteristics of reservoir dedolomitization in the Yingshan Formation in Well Z19, Tarim Basin

a. 铸体光片,大气淡水成因方解石胶结大量白云石晶间孔,茜素红染色,蓝色为残余晶间孔、晶间溶孔,埋深5 520.60 m;b,c. 图a局部放大,部分白云石发生去白云石化(黑色箭头),埋深5 520.60 m;d. 阴极发光下白云石具中等强度发光呈砖红色、晶间与晶内方解石胶结物不发光,埋深5 551.27 m;
Dol. 白云石;Cal. 方解石

3.2 储层成因分析

岩溶作用对白云岩的影响一方面表现为大气淡水对原岩矿物的非组构选择性溶解形成次生孔隙,另一方面在溶蚀孔隙中形成大气淡水成因方解石胶结物。在此过程中,白云石(岩)必然会受到流体作用的影响,包括碳氧同位素^[35]、锶同位素与微量元素组成^[22]。

鹰山组灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-2.1\text{‰} \sim -0.8\text{‰}$ (平均 -1.3‰ , 样品数 $n=12$), $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-9\text{‰} \sim -6.9\text{‰}$ (平均 -7.7‰ , $n=12$)。该分析结果与盆地范围内鹰山组灰岩的分析数据基本一致,代表了同时期海相灰岩的碳、氧同位素组成特征。白云岩全岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-2\text{‰} \sim -0.7\text{‰}$ (平均 -1.2‰ , $n=14$), $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-10\text{‰} \sim -7\text{‰}$ (平均 -8.1‰ , $n=14$)。白云岩碳同位素组成与灰岩基本一致,这是因为 $\delta^{13}\text{C}$ 值在成岩过程中较为稳定。一方面,白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要代表前驱物灰岩,而不是白云石化流体的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征^[36];另一方面,大气淡水成岩环境中只有水岩比大于1 000的情况下才有可能改变碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[37]。氧同位素对成岩过程的响应则较为敏感。碳酸盐岩中如果白云石与方解石具有相

似的流体来源,白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 值通常比共生方解石偏重 $2\text{‰} \sim 3\text{‰}$ 左右^[38-39]。鹰山组白云岩与灰岩互层共生关系表明其应该具有相似的沉积-成岩流体特征,白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值应该比灰岩偏重。与此恰恰相反,该井白云岩全岩样品 $\delta^{18}\text{O}$ 组成反而偏轻,最高达 -10‰ (平均值偏轻 0.3‰)。碳酸盐矿物氧同位素的分馏主要受流体温度与盐度控制,贫¹⁸O 通常反映流体具有较低盐度或者较高的温度。从白云岩储层发育的地质背景及其显微岩石学特征分析,由于其经历了不整合面相关岩溶流体的影响以及次生方解石胶结物的发育导致其全岩氧同位素组成偏负。

鹰山组白云岩锶同位素的组成特征亦可反映岩溶流体作用的响应。灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 $0.708\ 81 \sim 0.709\ 82$ (平均值为 $0.709\ 00$, $n=12$), 该分析结果与前人研究数据基本一致^[40]。白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 $0.708\ 77 \sim 0.713\ 53$ (平均值为 $0.709\ 82$, $n=13$), 明显较灰岩富放射性⁸⁷Sr, 主要是由于 T_7^4 不整合面附近岩溶流体携带了一定量的壳源锶。在岩溶流体对白云岩改造过程中,影响了全岩样品的锶同位素组成,尤其是大气淡水成因方解石胶结物的发育。

4 热液改造型白云岩储层

已有较多文献论述了盆地深部流体对碳酸盐岩的改造作用^[13-14,41-42],充分表明热液改造相关白云岩储层是重要勘探对象之一。此类白云岩储集空间的形成主要与白云石化之后的热液流体作用相关,以次生热液矿物组合为主要标志。热液流体性质的差异一定程度上控制了热液改造型白云岩储层的复杂多变。原始白云岩的成分与结构对储集空间的形成亦有一定的制约^[43-51]。在此,以古隆1井为例介绍含硅热液流体对鹰山组白云岩储层的改造。古隆1井位于塔中I号带以北,临近北东东向断裂。鹰山组白云岩是主要的天然气产层,储集空间以裂缝、孔隙为主,代表性热液矿物微晶石英。

4.1 显微岩石学特征

由于二氧化硅溶解度随温度增加而显著增加,因此深部来源含硅热液自下而上进入白云岩地层主要表现为石英的沉淀,白云石晶间孔隙被大量微晶石英充

填胶结(图5b,c)。含硅热液具有一定的酸性组分(如 CO_2),扫描电镜下可见白云石晶面的弱溶蚀(图5d)。单个白云石晶体包含了多个颗粒组分及粒间胶结物,表明原岩为颗粒结构灰岩(图5a,b)。白云石晶间的初始孔隙可能来源于白云石化作用,而非灰泥组分的溶解。在铸体薄片与电子探针背散射条件下可见微晶石英英晶间发育一些微孔隙。

4.2 储层成因分析

盆地深部热液流体通常含有 CO_2 、HF和 H_2S 等酸性组分,沿断裂上侵过程中其与碳酸盐岩发生水-岩相互反应。一方面形成溶蚀性储集空间,另一方面热液流体中物质组分或流体-岩石相互作用的产物在储集空间中形成热液矿物。

萤石是典型的热液矿物之一,已有较多研究表明其主要来源于盆地深部^[41]。顺南501井萤石流体包裹体分析表明其温度达 $165 \sim 175\text{ }^\circ\text{C}$,盐度为 $15.5\% \sim 17.5\%$ (NaCl)。热液流体对白云岩改造过程中导致白云石与次生方解石相对富集 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} ^[52]。与萤石相比,石英是热液流体活动更为常见的产物。目

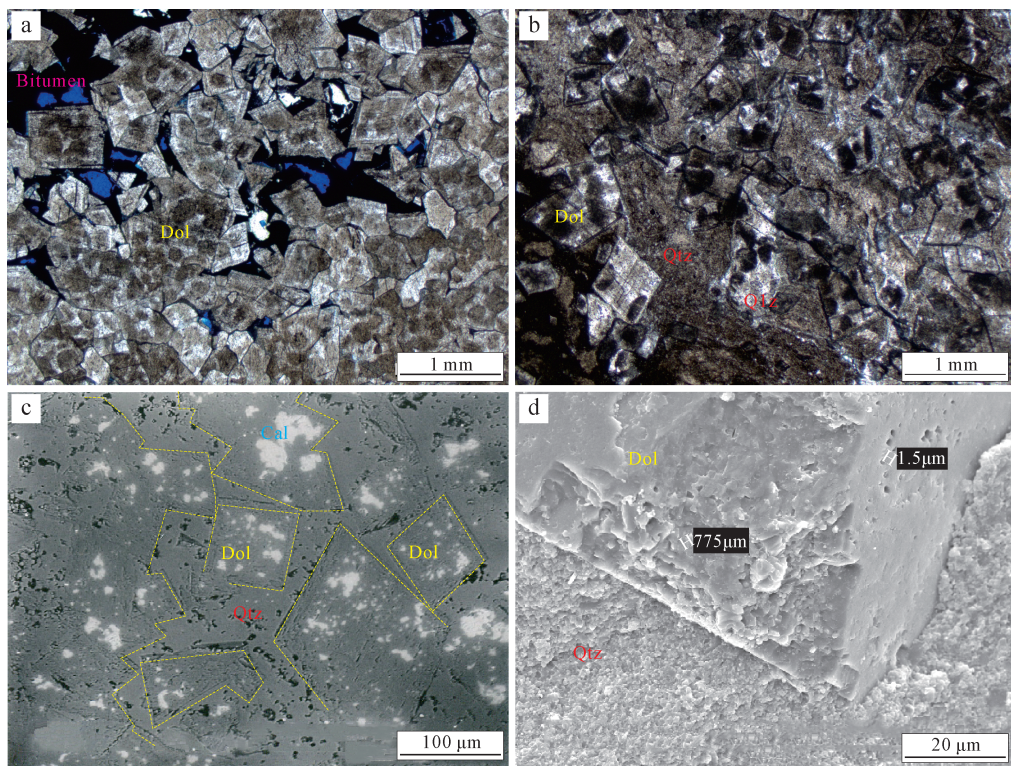


图5 塔里木盆地古隆1井鹰山组白云岩岩石学特征

Fig. 5 Petrographic characteristics of dolomite in the Yingshan Formation in Well GL1, Tarim Basin

a. 白云石晶体内具有多个颗粒组分结构特征,晶间发育固态沥青及残余孔隙,埋深6 431.60 m;b. 具颗粒结构特征的白云石晶间被微晶石英胶结充填,埋深6 431.60 m;c. 背散射条件下,白云石晶间微晶石英发育一些微孔隙,白云石晶内具残余方解石成分,埋深6 431.60 m;d. 扫描电镜下可见被微晶石英包裹的白云石晶面发育溶蚀微孔,埋深6 530.54 m;

Dol. 白云石;Qtz. 石英;Cal. 方解石

前研究认为,硅化储集空间的形成主要与其中的 CO_2 组分有关^[53],热液流体中溶解的二氧化硅主要表现为石英沉淀。受流体中二氧化硅饱和程度、流体与围岩相互作用过程温度平衡等因素的影响,从含硅流体中快速析出的微晶石英晶间可发育一些微孔隙,其类似于加拿大西加盆地 Parkland 气田热液成因燧石储层的形成^[54]。受热液蚀变影响的白云石、次生白云石与方解石胶结物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较同时期灰岩、白云岩明显偏负(古隆1井裂缝白云石胶结物 $\delta^{18}\text{O}$ 值达 -14‰ ,方解石胶结物 $\delta^{18}\text{O}$ 值达 -12‰)。原位稀土元素分析表明,热液改造白云石呈明显的 Eu 正异常特征^[55]。

5 结论

浅埋藏型白云岩储层以高孔、高渗为典型特征,白云石自形程度好,晶间孔隙发育。不同类型白云石具有相对一致的碳、氧同位素组成,基本反应了其形成于浅埋藏阶段且具有相似流体来源的特点。岩溶型白云岩储层与不整合面密切相关,大气淡水作用下导致白云石晶间孔、晶间溶孔的形成,伴随去白云石化与方解石胶结物的形成。白云岩全岩呈贫 ^{18}O 、富 ^{87}Sr 特征。热液改造型白云岩储层呈非均质性特征,热液流体与白云岩相互作用过程中一方面形成晶间孔、晶间溶孔,另一方面伴生萤石、石英与方解石等热液成因胶结物。热液矿物流体包裹体通常具有高温高盐度特点,相关白云石与方解石以贫 ^{18}O 、Eu 正异常为典型特征。浅埋藏型白云岩储层可能受沉积相、沉积微相的控制,岩溶型白云岩储层主要受不整合面相关岩溶作用的控制,而热液改造型白云岩储层与断裂相关热液流体活动密切相关。

参 考 文 献

- [1] Zenger D H, Dunham J B. Concepts and models of dolomitization [M]. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1980: 1 - 259.
- [2] 马永生,郭旭升,郭彤楼,等.四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J].地质论评,2005,51(4):477 - 480.
Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Guo Tonglou, et al. Discovery of the large-scale Puguang gas field in the Sichuan Basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting [J]. Geological Review, 2005, 51 (4): 477 - 480.
- [3] Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Guo Tonglou, et al. The Puguang gas field; new giant discovery in the mature Sichuan Basin, southwest China [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (5): 627 - 643.
- [4] Zou Caineng, Hou Lianhua, Hu Suyun, et al. Prospect of ultra-deep petroleum onshore China [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2014, 32 (1): 19 - 40.
- [5] 黄思静,王春梅,黄培培,等.碳酸盐成岩作用的研究前沿和值得思考的问题[J].成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(1):1 - 10.
Huang Sijing, Wang Chunmei, Huang Peipei, et al. Scientific research frontiers and considerable questions of carbonate diagenesis [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35 (1): 1 - 10.
- [6] 陈代钊,钱一雄.深层-超深层白云岩储集层:机遇与挑战[J].古地理学报,2017,19(2):187 - 196.
Chen Daizhao, Qian Yixiong. Deep or super-deep dolostone reservoirs: opportunities and challenges [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19 (2): 187 - 196.
- [7] 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 evaporate in Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31 (1): 89 - 98.
- [8] 倪新锋,黄理力,陈永权,等.塔中地区深层寒武系盐下白云岩储层特征及主控因素[J].石油与天然气地质,2017,38(3):489 - 498.
Ni Xinfeng, Huang Lili, Chen Yongquan, et al. Characteristics and main controlling factors of the Cambrian pre-salt dolomite reservoirs in Tazhong Block, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38 (3): 489 - 498.
- [9] 李开开,张学丰,贺训云,等.川东北飞仙关组白云岩化作用对鲕粒滩储层的孔隙改造效应[J].石油与天然气地质,2018,39(4):706 - 718.
Li Kaikai, Zhang Xuefeng, He Xunyun, et al. Modification of dolomitization on pores in oolitic shoal reservoirs of the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39 (4): 706 - 718.
- [10] 张德民,鲍志东,郝雁,等.塔里木盆地牙哈-英买力寒武系潜山区优质储层形成模式[J].天然气地球科学,2016,27(10):1797 - 1807.
Zhang Demin, Bao Zhidong, Hao Yan, et al. Formation model of high-quality reservoirs within Cambrian buried hill in Yaha-Yingmaili area, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27 (10): 1797 - 1807.
- [11] 孙玉景,周立发.关于风化壳岩溶型白云岩储层的两个问题思考[J].非常规油气,2019,6(3):106 - 113.
Sun Yujing, Zhou Lifa. Reflections on two problems of the weathering crust karst dolomite reservoirs [J]. Unconventional oil & gas, 2019, 6 (3): 106 - 113.
- [12] Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90 (11): 1641 - 1690.
- [13] 朱东亚,金之钧,胡文瑄.塔中地区热液改造型白云岩储层[J].石油学报,2009,30(5):698 - 704.
Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30 (5): 698 - 704.
- [14] 朱东亚,金之钧,胡文瑄.塔北地区下奥陶统白云岩热液重结晶作用及其油气储集意义[J].中国科学:地球科学,2010,40(2):156 - 170.
Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal recrystallization of the Lower Ordovician dolomite and its significance to reservoir in northern Tarim Basin [J]. Science China: Earth Science, 2010, 40

- (2):156–170.
- [15] Fu Qilong, Qing Hairuo, Bergman K M, et al. Dedolomitization and calcite cementation in the Middle Devonian Winnipegosis Formation in Central Saskatchewan, Canada[J]. *Sedimentology*, 2008, 55:1623–1642.
- [16] Jiang Lei, Worden R H, Cai Chunfang. Thermochemical sulfate reduction and fluid evolution of the Lower Triassic Feixianguan Formation sour gas reservoirs, northeast Sichuan Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(5):947–973.
- [17] Hao Fang, Zhang Xuefeng, Wang Cunwu, et al. The fate of CO₂ derived from thermochemical sulfate reduction (TSR) and effect of TSR on carbonate porosity and permeability, Sichuan Basin, China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 141:154–177.
- [18] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52:1–81.
- [19] 赵宗举, 王招明, 吴兴宁, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系储层成因类型及分布预测[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(1):40–46.
- Zhao Zongju, Wang Zhaoming, Wu Xingning, et al. Genetic types and distribution forecast of available carbonate reservoirs in Ordovician in the central area of Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(1):40–46.
- [20] 钱一雄, 陈跃, 陈强路, 等. 塔中西北部奥陶系碳酸盐岩埋藏溶蚀作用[J]. *石油学报*, 2006, 27(3):47–52.
- Qian Yixiong, Chen Yue, Chen Qianglu, et al. General characteristics of burial dissolution for Ordovician carbonate reservoirs in the north-west of Tazhong area[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2006, 27(3):47–52.
- [21] 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*, 28(3):783–792.
- [22] 吴仕强, 钱一雄, 李慧莉, 等. 塔里木盆地卡塔克隆起中下奥陶统鹰山组白云岩储集层特征及主控因素[J]. *古地理学报*, 2012, 14(2):209–218.
- Wu Shiqiang, Qian Yixiong, Li Huili, et al. Characteristics and main controlling factors of dolostone reservoir of the Middle-Lower Ordovician Yingshan Formation in Katak uplift of Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(2):209–218.
- [23] 郑兴平, 刘永福, 张杰, 等. 塔里木盆地塔中隆起北坡鹰山组白云岩储层特征与成因[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(2):157–161.
- Zheng Xingping, Liu Yongfu, Zhang Jie, et al. Characteristics and origin of dolomite reservoirs in Lower Ordovician Yingshan Formation, northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(2):157–161.
- [24] 熊剑飞, 余腾孝, 曹自成, 等. 塔里木盆地奥陶系“鹰山组”的解体及中下统界线的划分[J]. *地层学杂志*, 2013, 37(3):283–291.
- Xiong Jianfei, Yu Tengxiao, Cao Zicheng, et al. The breakup of the Ordovician Yingshan Formation and the Lower-Middle Ordovician boundary in the Tarim Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2013, 37(3):283–291.
- [25] 蔡习尧, 钱一雄, 陈跃, 等. 塔中地区中下奥陶统划分与对比[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(3):292–295.
- Cai Xiyao, Qian Yixiong, Chen Yue, et al. Division and correlation of Middle-Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(3):292–295.
- [26] Young S A, Saltzman M R, Foland K A, et al. A major drop in seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr during the Middle Ordovician (Darrivilina): links to volcanism and climate? [J]. *Geology*, 2009, 37:951–954.
- [27] Trotter J A, Williams I S, Barnes C R, et al. Did cooling oceans trigger Ordovician biodiversification? Evidence from conodont thermometry[J]. *Science*, 2008, 321:550–554.
- [28] Liu Mu, Chen Daizhao, Zhou Xiqiang, et al. Climatic and oceanic changes during the Middle-Late Ordovician transition in the Tarim Basin, NW China and implications for the Great Ordovician Biodiversification Event[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 514:522–535.
- [29] 杨圣彬, 刘军, 李慧莉, 等. 塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(6):797–802.
- Yang Shengbin, Liu Jun, Li Huili, et al. Characteristics of the NE-trending strike-slip fault system and its control on oil accumulation in north peri-cline area of the Tazhong paleouplift[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(6):797–802.
- [30] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3):257–267.
- Huang Taizhu. Structural interpretation and petroleum exploration targets in northern slope of middle Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3):257–267.
- [31] 宁飞, 金之钧, 张仲培, 等. 塔中北坡走滑断裂成因机理与油气成藏[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1):98–106.
- Ning Fei, Jin Zhijun, Zhang Zhongpei, et al. Mechanism of strike-slip faulting and hydrocarbon accumulation in northern slope of Tazhong area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1):98–106.
- [32] 陈汉林, 杨树锋, 董传万, 等. 塔里木盆地地质热事件研究[J]. *科学通报*, 1997, 42(10):1096–1098.
- Chen Hanlin, Yang Shufeng, Dong Chuanwan, et al. Geological thermal events in Tarim Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(10):1096–1098.
- [33] Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics[J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(2):186–204.
- [34] 李让彬, 樊太亮, 高志前, 等. 塔里木盆地卡塔克隆起卡1三维区块奥陶系鹰山组储层特征与影响因素[J]. *中国地质*, 2011, 38(4):1016–1024.
- Li Rangbin, Fan Tailiang, Gao Zhiqian, et al. Characteristics and influencing factors of reservoirs in the Ordovician Yinshan Formation of the Ka1 three dimensional seismic area within Katak uplift, Tarim basin[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4):1016–1024.
- [35] 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]. *地学前缘*, 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. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1):260–274.
- [36] Land L S. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: The state of the art[M]//Zenger D H, Dunham J B. Concepts and models of dolomitization. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1980:87–110.

- [37] Banner J L, Hanson G N. Calculation of simultaneous isotopic and trace element variations during water-rock interaction with applications to carbonate diagenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 3123–3137.
- [38] Milliken K L, Land L S, Loucks R G. History of burial diagenesis determined from isotopic geochemistry, Frio Formation, Brazoria country, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 1981, 65(8): 1397–1413.
- [39] Vasconcelos C, McKenzie J A, Warthmann R, et al. Calibration of the $\delta^{18}\text{O}$ paleothermometer for dolomite precipitated in microbial cultures and natural environments[J]. *Geology*, 2005, 33(4): 317–320.
- [40] 刘存革, 李国蓉, 张一伟, 等. 锶同位素在古岩溶研究中的应用[J]. *地质学报*, 2007, 81(10): 1398–1406.
- Liu Cunge, Li Guorong, Zhang Yiwei, et al. Application of strontium isotope to the study of paleokarst — An case from Ordovician in the Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(10): 1398–1406.
- [41] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 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, et al. 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.
- [42] Dong Shaofeng, Chen Daizhao, Qing Hairuo, et al. Hydrothermal alteration of dolostones in the Lower Ordovician, Tarim Basin, NW China: Multiple constraints from petrology, isotope geochemistry and fluid inclusion microthermometry[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 46: 270–286.
- [43] 王小林, 胡文瑄, 张军涛, 等. 白云岩物质组分与结构对微孔储集体系形成的制约[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(3): 320–326.
- Wang Xiaolin, Hu Wenxuan, Zhang Juntao, et al. Dolomite composition and texture constrain the formation of micropore reservoir: An example from low Paleozoic dolomite, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(3): 320–326.
- [44] 吕修祥, 陈佩佩, 陈坤, 等. 深层碳酸盐岩差异成岩作用对油气分层聚集的影响——以塔里木盆地塔中隆起北斜坡鹰山组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 957–971.
- Lyu Xiuxiang, Chen Peipei, Chen Kun, et al. Effects of differential diagenesis of deep carbonate rocks on hydrocarbon zonation and accumulation: A case study of Yingshan Formation on northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 957–971.
- [45] 张尔华, 鞠林波, 宋永忠, 等. 古城地区鹰山组碳酸盐岩储层地震岩石物理特征[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(5): 101–108.
- Zhang Erhua, Ju Linbo, Song Yongzhong, et al. Seismic petrophysical characteristics of the carbonate reservoirs in Yingshan Formation of Gucheng area [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(5): 101–108.
- [46] 丁寒生. 塔东古城地区鹰山组白云岩暴露标志识别及其油气地质意义[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 36(4): 15–19.
- Ding Hansheng. Identification of the dolomite exposure marks in Eagle Mountain Formation and its petroleum geological significance in Gucheng area of East Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2017, 36(4): 15–19.
- [47] 林新. 玉北地区鹰山组储集层成岩作用及孔隙演化[J]. *石油地质与工程*, 2017, 31(1): 12–16.
- Lin Xin. Diagenesis and porosity evolution of Yingshan formation in Yubei area [J]. *Potroleum Geology & Engineering*, 2017, 31(1): 12–16.
- [48] 王义武, 蒋飞虎, 慕小水, 等. 湖相碳酸盐岩成因及其石油地质意义: 以东濮凹陷沙河街组四段为例[J]. *断块油气田*, 2018, 25(5): 568–572.
- Wang Yiwu, Jiang Feihu, Mu Xiaoshui, et al. Origin of lacustrine carbonate rocks and its significance to petroleum geology: taking fourth Member of Shahejie Formation in Dongpu Sag as an example [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(5): 568–572.
- [49] 赫俊民, 王小垚, 孙建芳, 等. 塔里木盆地塔河地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 1022–1030.
- Hao Junmin, Wang Xiaoyao, Sun Jianfang, et al. Characteristics and main controlling factors of natural fractures in the Lower-to-Middle Ordovician carbonate reservoirs in Tahe area, Northern Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 1022–1030.
- [50] 刘宇坤, 何生, 何治亮, 等. 碳酸盐岩超压岩石物理模拟实验及超压预测理论模型[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 716–724.
- Liu Yukun, He Sheng, He Zhiliang, et al. The rock physics modeling experiment under overpressure and theoretical model for overpressure prediction in carbonate rocks [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 716–724.
- [51] 王鸣川, 段太忠, 杜秀娟, 等. 沉积相耦合岩石物理类型的孔隙型碳酸盐岩油藏建模方法[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(2): 253–259.
- Wang Mingchuan, Duan Taizhong, Du Xiujuan, et al. Geological modeling method based on sedimentary facies coupled rock type for porous carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(2): 253–259.
- [52] 尤东华, 韩俊, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地顺南 501 井鹰山组白云岩储层特征与成因[J]. *沉积学报*, 2018, 36(6): 1206–1217.
- You Donghua, Han Jun, Hu Wenxuan, et al. Characteristics and genesis of dolomite reservoirs in the Yingshan Formation of well SN501 in the Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(6): 1206–1217.
- [53] Dong Shaofeng, You Donghua, Guo Zenghui, et al. Intense silicification of Ordovician carbonates in the Tarim Basin: Constraints from fluid inclusion Rb-Sr isotope dating and geochemistry of quartz[J]. *Terra Nova*, 2018, 30: 406–413.
- [54] Packard J J, Al-Aasm I, Samson I, et al. A Devonian hydrothermal chert reservoir: the 225 bcf Parkland field, British Columbia, Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(1): 51–84.
- [55] 王小林, 金之钧, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地地下古生界白云石微区 REE 配分特征及其成因研究[J]. *中国科学·地球科学*, 2009, 39(6): 721–733.
- Wang Xiaolin, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, et al. Using *in situ* REE analysis to study the origin and diagenesis of dolomite of Lower Paleozoic, Tarim Basin [J]. *Science China: Earth Science*, 2009, 39(6): 721–733.