

从成岩-蚀变特征探讨塔深1井白云岩储层成因

尤东华^{1,2}, 王亮³, 胡文瑄¹, 钱一雄², 王小林¹, 陈强路², 张军涛⁴

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 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. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011; 4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 塔深1井钻遇的寒武系地层属于中寒武统阿瓦塔格组 and 上寒武统丘里塔格下亚群。阿瓦塔格组以灰色-深灰色粉晶-细晶藻白云岩为主, 丘里塔格下亚群以灰色-浅灰色晶粒结构白云岩与残余亮晶结构白云岩为主。藻白云岩在阴极发光下以明亮的中等强度砖红色-桔黄色为主要特点, 具有相对偏重的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($-6.3\text{‰} \sim -4.5\text{‰}$, 平均为 -5.3‰ , VPDB)、相对较高的稀土总量以及正常海相碳酸盐岩相似的稀土配分样式。晶粒白云岩与残余亮晶结构白云岩在阴极发光下以偏暗的中等强度蓝紫色-砖红色为主要特点, 具有相对偏轻的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($-9.2\text{‰} \sim -5.7\text{‰}$, 平均为 -7.5‰ , VPDB)、相对偏低的稀土总量、Eu 正异常与重稀土明显亏损为特点的稀土配分模式。阿瓦塔格组和丘里塔格下亚群白云岩在上述岩石学特征和地球化学特征上的差异表明储层发育的成岩-蚀变过程存在差异。研究认为, 埋藏较深的阿瓦塔格组优质储层的形成受多种因素控制, 其中准同生期大气淡水作用下石膏结核的溶解及非稳定碳酸盐矿物的溶解奠定了基础, 后期成岩改造及流体作用进行了强化, 局部遭充填破坏。

关键词: 成岩-蚀变; 塔深1井; 白云岩储层; 超深层; 塔里木盆地

中图分类号: P618.130.2⁺1; P588.24⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6524(2018)01-0034-13

Formation of deep dolomite reservoir of Well TS1: Insights from diagenesis and alteration investigations

YOU Dong-hua^{1,2}, WANG Liang³, HU Wen-xuan¹, QIAN Yi-xiong², WANG Xiao-lin¹,
CHEN Qiang-lu² and ZHANG Jun-tao⁴

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi 214126, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Northwest Oilfield Company of SINOPEC, Urumqi 830011, China; 4. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Cambrian strata of well TS1 are composed of Awatage Formation (middle Cambrian) and the lower Qiulitage Group (upper Cambrian). A detail investigation of cores and analysis of thin sections shows that Awatage Formation is mainly composed of dark gray to gray algal dolomite (micritic to fine-crystal), and Qiulitage Group is mainly composed of gray to light gray crystalline dolomite and ghost structure dolomite. Algal dolomites are present in moderate strength with brick-red to orange colors as the main features under cathodoluminescence together with $\delta^{18}\text{O}$ value from -6.3‰ to -4.5‰ (average value is -5.3‰ , VPDB), and contain a relatively high total rare earth elements (REE) with REE patterns similar to those of normal marine carbonate

收稿日期: 2016-12-02; 接受日期: 2017-11-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2012CB214802); 国家科技重大专项(2011ZX05005-002); 国家自然科学基金青年基金(41702134); 中国石化科技开发部项目(P13069, P16112)

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

rocks. Crystalline dolomites and ghost dolomites show purple to red-brick color in dimly moderate strength under cathodoluminescence with lighter $\delta^{18}\text{O}$ value from -9.2‰ to -5.7‰ (average value is -7.5‰ , VPDB), together with relatively low total rare earth element/positive Eu anomaly and obvious loss of HREE. The difference between Awatage Formation and Lower Qiulitage Group indicates that the diagenesis-alteration process of dolomite reservoirs is different. This study suggests that the high quality reservoir of Awatage Formation in great depth might be controlled by several factors. Among them, dissolution of gypsum nodules and other unstable minerals by meteoric water or sea water in penecontemporaneous period established the foundation, followed by diagenesis-alteration strengthening constructively with fluid action, which even damaged the space by local filling and recrystallization.

Key words: diagenesis-alteration; TS1 well; dolomite reservoir; ultra-deep; Tarim Basin

Fund support: National Key Basic Research Project(“973”Program)(2012CB214802); National Key Scientific Special Project(2011ZX05005-002); National Natural Science Foundation of China(41702134); Technology Department Program of SINOPEC(P13069, P16112)

2006年完钻的亚洲陆上最深井塔深1井在8 408 m($\sim 160^\circ\text{C}$, 80 MPa)的埋深条件下依然揭示了优质的白云岩储层并且赋存液态烃,引起勘探人员与诸多学者的高度关注并开展了相关研究(翟晓先等, 2007; 郑和荣等, 2007; 乔冀超, 2008; 云露等, 2008; 孟祥豪等, 2009, 2010, 2011, 2012; 李开开等, 2010; 蔺军等, 2010; 朱东亚等, 2012, Zhu *et al.*, 2014, 2015),但白云岩储层成因存在较大争议。近年来,随着深层、超深层白云岩勘探不断取得突破并建成规模产能,如四川盆地普光气田、元坝气田、龙岗气田、磨溪-龙王庙气田等,重新审视塔深1井的超深层白云岩储层的成因机制,有利于加快塔里木盆地白云岩领域的油气勘探进程。事实上,塔中隆起上钻探的中深1、中深1C井在中下寒武统白云岩层系已获得工业油气突破(王招明等, 2014a; Li *et al.*, 2015),古城墟隆起钻探的古隆1、古城6、古城8等井在鹰山组中下段白云岩层系也已获得规模天然气发现(王招明等, 2014b; 王铁冠等, 2014)。因此,深入研究塔深1井深层白云岩储层特征对认识塔里木盆地深层、超深层白云岩储层的形成机制和分布特征具有重要意义。

埋藏溶蚀,特别是深部热液溶蚀是深层、超深层碳酸盐岩优质储层得以保存和形成的重要机制(钱一雄等, 2006; 朱东亚等, 2007, 2008; 孟祥豪等, 2009),孔洞胶结物提供的流体包裹体与地球化学数据为埋藏溶蚀成因与热液溶蚀成因观点提供了重要佐证,而碳酸盐岩早期沉积背景与成岩作用对储集空间的贡献经常被忽视。前期对塔深1井寒武系地层的认识为自6 884 m至井底8 408 m共1 524 m厚

的白云岩地层均为上寒武统丘里塔格下亚群,而新钻井地层标定与高精度地震剖面的精细对比结果表明,塔深1井寒武系白云岩地层由中寒武阿瓦塔格组与上寒武统丘里塔格下亚群组成。在此基础上,本研究主要从成岩-蚀变特征角度探讨塔深1井深层白云岩储层成因。

1 地质背景

塔里木盆地的形成演化过程非常复杂,经历了震旦-中泥盆世、晚泥盆世-三叠纪和侏罗纪-第四纪三个伸展-聚敛旋回演化阶段(何登发等, 2005)。复杂的构造运动形成了塔里木盆地目前多个隆坳相间的地质格局(何治亮等, 2005; 何登发等, 2006)。在塔北隆起上先后发现了塔河、轮南、哈拉哈塘、英买力等油田,其中塔河油田是中国发现的第一个陆上古生代海相碳酸盐岩大油气田(康玉柱, 2005)。随着油气勘探开发的进一步深入,逐步开始在塔河油田之外和塔河油田之下寻找油气。在此背景之下,2005年实施钻探了塔深1井。塔深1井位于塔北隆起的塔河油田三维区内(图1a),旨在探索寒武系碳酸盐岩台地边缘建造含油气性。从过井地质剖面上看(图1b),塔深1井厚层白云岩属于中晚寒武世碳酸盐岩台地边缘相带沉积体,具有垂向上叠加生长由西向东的进积叠置样式(云露等, 2008; 蔺军等, 2010; 朱东亚等, 2012)。

寒武纪-中奥陶末塔里木盆地在伸展构造背景下形成“东盆西台”的盆地格局,台地相区沉积了厚厚的碳酸盐岩地层。早中寒武世台地边缘相带逐渐

由浅水缓坡型向晚寒武世镶边型转变,并向盆地方向迁移(图 1b)。中寒武世在盆地中西部沉积了巨厚膏盐岩,代表了中寒武世大范围海退与干旱的地质

背景。上寒武统以厚层白云岩为主,反映了海侵背景下随海平面上升台地相具有较高的碳酸盐生产速率。

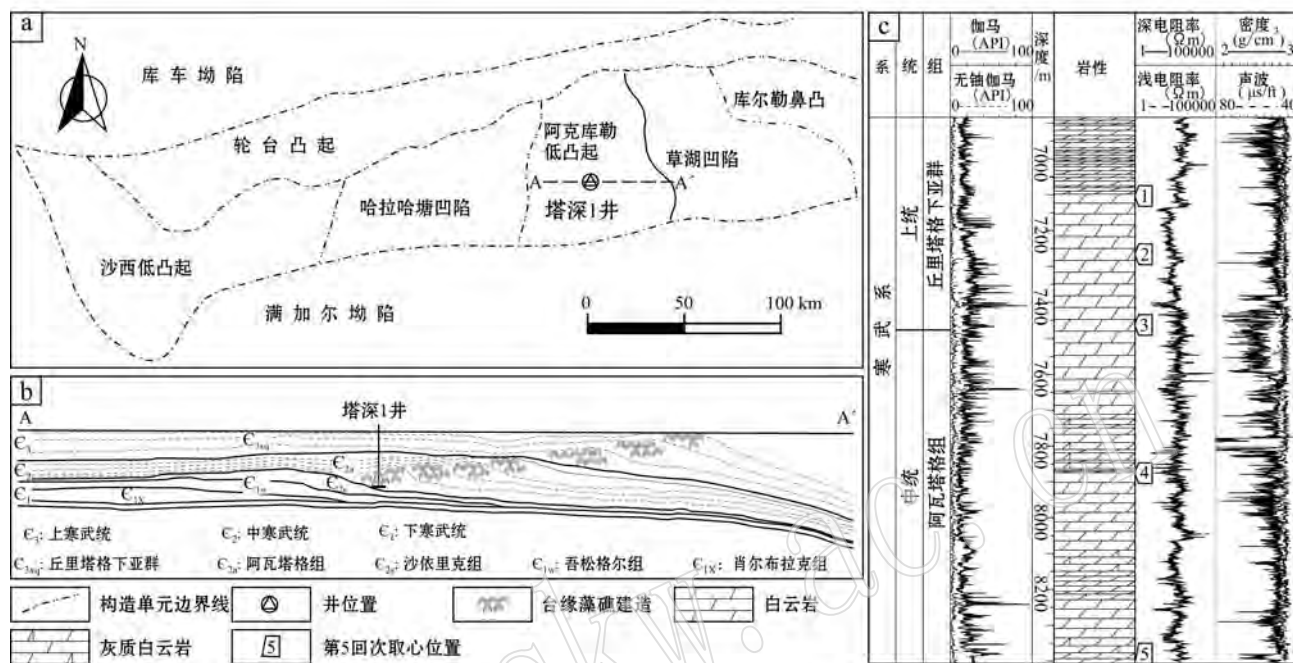


图 1 塔里木盆地塔深 1 井位置(a)、东西方向过塔深 1 井寒武系沉积体系剖面(b)以及塔深 1 井寒武系柱状图(c)

Fig. 1 Location of well TS1 in Tarim basin (a) and the sediment profile through well TS1 in WE direction (b) and the TS1 well column of dolomite reservoir in Cambrian strata (c)

2 样品采集与分析方法

采集阿瓦塔格组与丘里塔格下亚群典型的白云岩岩心样品,开展普通岩石薄片观察、阴极发光分析、碳氧同位素分析与稀土元素分析。岩石薄片制成 0.04 mm 厚,使用 Leica DM4500P 偏光显微镜进行岩石学观察。将需要进行阴极发光分析的样品双面抛光至 0.1 mm 厚。阴极发光分析是在英国 CITL 公司生产的 CL8200 MK5 阴极发光仪上完成的,真空度为 0.003 Pa,加速电压为 20 kV,束流为 0.2 mA。

选取 8 件阿瓦塔格组与 10 件丘里塔格下亚群基质白云岩样品进行稳定碳氧同位素分析。具体分析流程如下:称取约 20 mg 粉末样,并与 100% 正磷酸在 50℃ 下反应 3 h,真空收集产生的 CO_2 气体送入 Mat251 质谱仪分析,分析精度优于 0.1‰。所得碳氧同位素数值的千分差以 VPDB 标准计算。碳氧同位

素分析在核工业北京地质研究院分析测试中心进行。

选取阿瓦塔格组(4 件)与丘里塔格下亚群(6 件)基质白云岩进行稀土元素分析。用 0.075 M 纯硝酸消融约 10 mg 的粉末样,在 HP 4500plus ICP-MS 上进行稀土元素分析。此项分析在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所实验室完成。

3 塔深 1 井寒武系白云岩岩石学特征

根据新钻井层位标定与区域高精度三维地震剖面的精细对比结果,将塔深 1 井原寒武系 1 524 m 厚白云岩地层(6 884~8 408 m)划分为中寒武统阿瓦塔格组(7 465~8 408 m,厚 943 m)与上寒武统丘里塔格下亚群(6 884~7 465 m,厚 581 m)。寒武系白云岩钻孔岩心第 4~5 回次位于阿瓦塔格组,而第 1~3 回次位于丘里塔格下亚群(图 1c)。与丘里塔格下亚群岩心相比,阿瓦塔格组总体颜色更深、储集空间更大、储集性能更好(图 2)。



图2 塔深1井寒武系白云岩储层的典型特征

Fig. 2 The typical characteristics of Cambrian dolomite reservoirs in well TS1

a—阿瓦塔格组深灰色孔洞型白云岩；b—丘里塔格下亚群浅灰色针孔型白云岩

a—dark gray dolomite reservoir with vug in Awatage Formation;

b—light gray dolomite reservoir with pinhole in the lower Qiulitage Group

3.1 中寒武统阿瓦塔格组

以深灰色-灰色细粉晶-细晶藻白云岩为主，以发育近似层面分布的孔洞与形态不规则的孔洞为典型特点(图2a)，局部发育受断裂-裂缝及相关流体改造呈浅灰色-灰白色针孔状细晶白云岩。基质部分为泥晶-粉晶直面半自形白云石，以藻粘结或残余结构为主要特征(图3)；孔洞胶结物主要为细晶-粗晶直面自形-半自形白云石，局部发育鞍状白云石与石英胶结物(蔺军等，2010；孟祥豪，2012)。

3.2 上寒武统丘里塔格下亚群

以灰色-浅灰细晶、中粗晶白云岩为主，以发育大量针孔状小孔-孔隙为特点(图2b)，裂缝及较大的孔洞被巨晶方解石胶结物所充填。一类表现为具有残余亮晶结构的白云岩(图4)，基质部分白云石大小明显受原岩结构控制，局部孔隙发育中粗晶直面自形-半自形白云石胶结物；另一类为晶粒结构白云岩(图4)，晶体大小、自形程度不均一，可见团块状微晶石英集合体。巨晶方解石胶结物充填白云石晶间角孔，有文献报道亦有鞍形白云石胶结物(乔冀超，2008；蔺军等，2010；孟祥豪，2012)。

4 成岩-蚀变特征差异性

4.1 阴极发光差异性

通常认为，碳酸盐矿物中 Mn^{2+} 是阴极发光最主要的激活剂，而 Fe^{2+} 是最重要的猝灭剂(Marshall, 1988; Pagel *et al.*, 2000)。碳酸盐矿物阴极发光的颜色、强度与其赋存的特定微量元素(如 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 等)绝对含量与相对含量相关(黄思静，1992；刘丽红等，2010)。定量研究表明，激发贫 Fe 方解石(黄色-橙色)与贫 Fe 白云石(黄色-红色)产生阴极发光所需的 Mn^{2+} 含量下限可低至 1×10^{-6} (Habermann *et al.*, 1998, 1999; Gillhaus *et al.*, 2001; Richter *et al.*, 2003)。由于 Mn^{2+} 既可取代白云石中 Ca^{2+} 的位置又可取代 Mg^{2+} 的位置，可导致白云石阴极发光下呈不同的颜色(Richter *et al.*, 2003)。成分上，由于白云石交代方解石往往不够彻底，在白云石的内部常具有方解石残余，其可导致阴极发光颜色不均一。结构上，白云石常具有环带构造(尤其是交代成因白云石与不同类型的白云石胶结物)，不同环带的 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 含量有明显差异，可导致阴极发光颜色与强度的变化。白云岩的阴极发光颜色、强度与其成分-结构/成岩-蚀变程度有关。成岩-蚀变过程中特定微量元素的迁出与迁入影响了不同成岩阶段矿物的阴极发光特性(黄思静，1988，1990；黄思静等，2008)。依据白云岩的结构特征与阴极发光差异，可建立成岩作用相对序次并判断成岩-蚀变程度(Cuia *et al.*, 2011)。

中寒武统阿瓦塔格组藻白云岩：阴极射线基下基质粉晶白云石中等明亮的砖红色-桔红色，与孔隙边缘自形白云石共生的自生石英不发光，而孔隙白云石胶结物昏暗发光呈暗红色(图5)。上寒武统丘里塔格下亚群晶粒白云岩：阴极射线基下总体昏暗发光呈暗蓝紫色-紫红色，微晶石英集合体不发光，巨晶方解石昏暗发光-不发光(图6)。依据不同成岩程度白云石的阴极发光特征(宋志敏，1993；Cuia *et al.*, 2011)，丘里塔格下亚群晶粒白云岩较阿瓦塔格组藻白云岩经历了更强的成岩-蚀变作用过程。

4.2 碳氧同位素差异性

应用碳酸盐岩的碳氧同位素组成来评估碳酸盐岩成岩程度是常用研究手段之一(谢小敏等，2009；

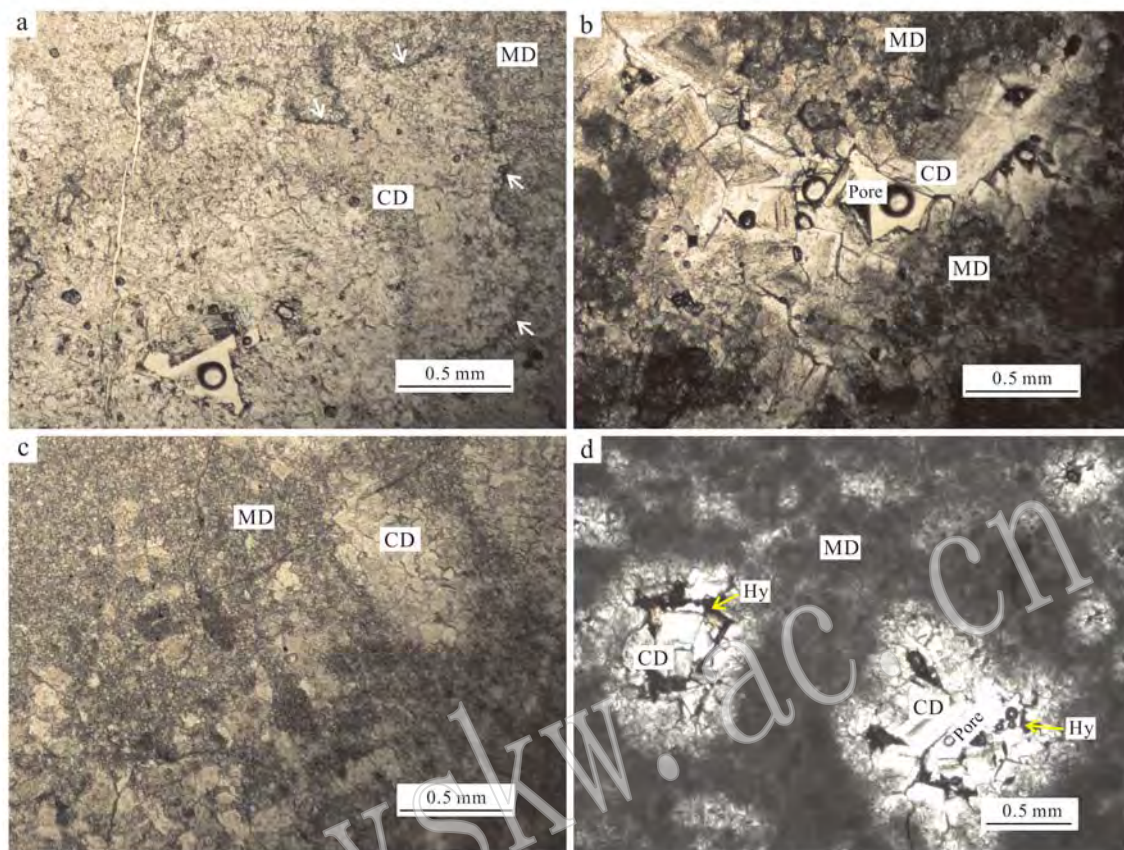


图 3 阿瓦塔格组藻白云岩岩石学特征

Fig. 3 The petrological characteristics of algae dolomite in Awatage Formation

a—残余结构细晶白云岩, 可见原始孔洞边缘与孔洞内部两期胶结物的边界(白色箭头), 7 873.93 m(-); b—残余结构粉晶白云岩, 残留晶间角孔, 7 875.79 m(-); c—残余结构细粉晶白云岩, 早期粒内或粒间亮晶方解石胶结物白云石化后形成细晶白云石胶结物, 8 406.60 m(-); d—具残余结构的细-粉晶白云岩, 黑色液态原油残留于中粗晶白云石胶结物晶间孔隙, 8 406.95 m(-); MD—基质白云石; CD—白云石胶结物; Pore—残余孔隙; Hy—液态油

a—fine-crystalline dolomite with ghost texture and the boundary between matrix dolomite and cement dolomite (white arrow), 7 873.93 m(-); b—micritic dolomite with ghost texture and residual pore between dolomite cements, 7 875.79 m(-); c—micritic dolomite with ghost texture and fine-crystalline dolomite cement formed by dolomitization of calcite cement, 8 406.60 m(-); d—micritic dolomite with ghost texture and some liquid hydrocarbon distributed in residual pores between middle-rough crystal dolomite cements, 8 406.95 m(-); MD—matrix dolomite; CD—cement dolomite; Pore—residual pore space; Hy—liquid hydrocarbon

王小林等, 2011; 姚春彦等, 2011)。通常认为, $\delta^{13}\text{C}$ 值在成岩过程中较为稳定, 而 $\delta^{18}\text{O}$ 值易受后生成岩作用的影响。

中寒武统阿瓦塔格组深灰色藻白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 $0.4\text{‰} \sim 1.2\text{‰}$ (平均 0.7‰ , $N=8$), $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 $-6.3\text{‰} \sim -4.5\text{‰}$ (平均 -5.3‰ , $N=8$); 上寒武统丘里塔格下亚群晶粒白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 $-0.7\text{‰} \sim 1.8\text{‰}$ (平均为 0.6‰ , $N=10$), $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 $-9.2\text{‰} \sim -5.7\text{‰}$ (平均为 -7.5‰ , $N=10$)。

与阿瓦塔格组相比, 丘里塔格下亚群晶粒白云岩总体具有更轻的氧同位素特征(图 7)。碳酸盐矿

物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值受控于流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和温度(郑永飞等, 1997): 在相同温度条件下, 流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值越低, 则从中形成碳酸盐矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 值越低; 在流体 $\delta^{18}\text{O}$ 值一定的情况下, 温度越高, 则从中形成的碳酸盐矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 值越低。从碳酸盐矿物-流体的氧同位素分馏特征看, 流体作用温度对碳酸盐矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响更为显著。丘里塔格下亚群白云岩较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值可能表明其经历了更高的成岩温度, 也就是说, 丘里塔格下亚群基质白云石经历了更强的成岩-蚀变作用, 这与其岩石学特征、阴极发光特征以及后面将涉及的稀土元素配分差异相吻合。

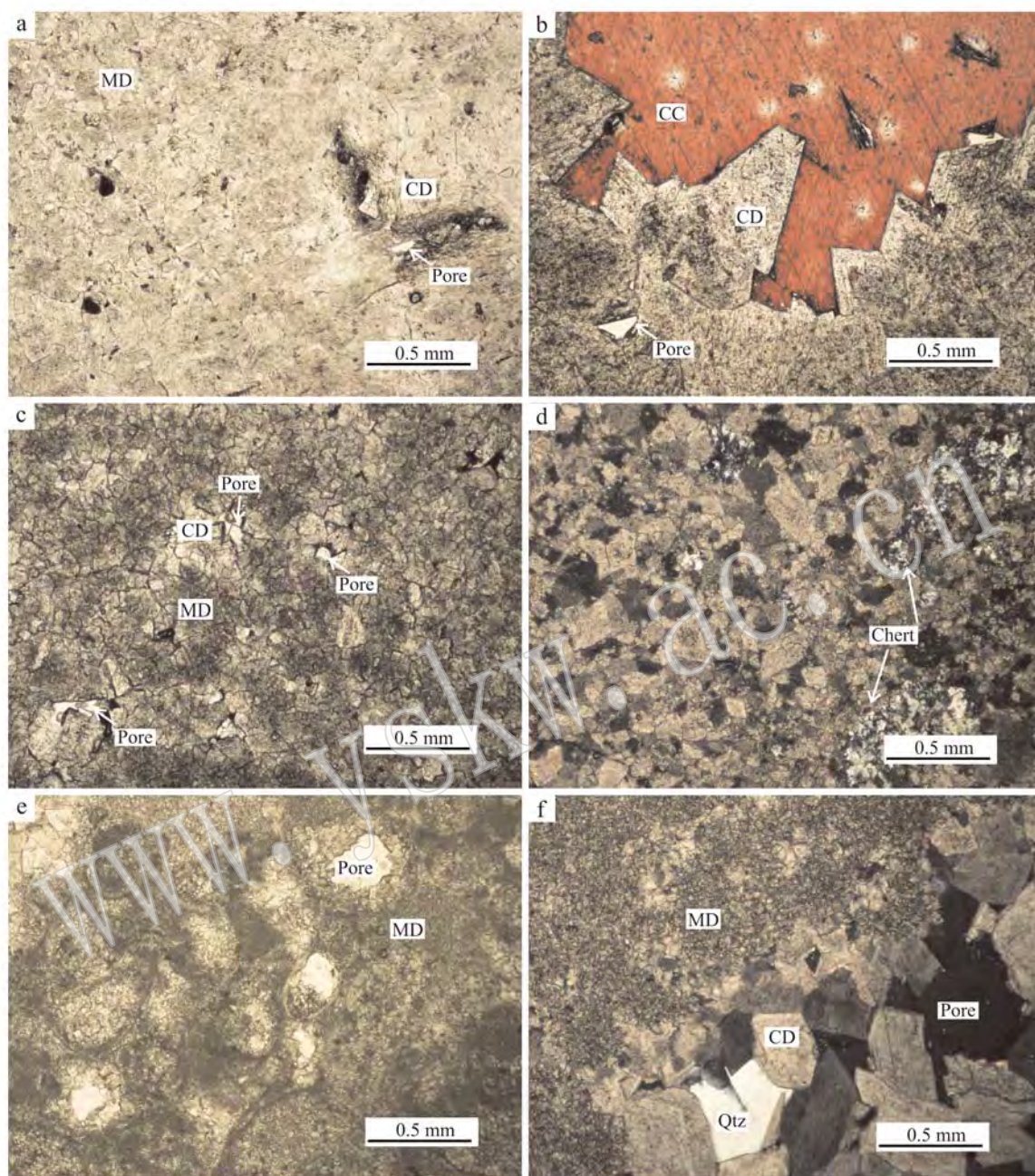


图 4 丘里塔格下亚群晶粒白云岩岩石学特征

Fig. 4 The petrological characteristics of crystalline dolomite in the lower Qiulitage Group

a—细晶-中晶白云岩,局部发育粗晶白云石胶结物并具残留晶间孔隙,7 103.51 m(-); b—粗晶白云岩,白云石晶间孔洞被巨晶方解石胶结物充填,7 104.71 m(-),茜素红染色; c—细晶-粉晶白云岩具残余亮晶颗粒幻影结构,亮晶透明白云石晶间具孔隙,7 264.40 m(-); d—中-细晶白云岩,局部具球粒状微晶石英集合体,7 265.90 m(+); e—残余亮晶生屑针孔状粉晶-细晶白云岩,局部发育少量针状粒间-粒内残余孔,7 461.25 m(-); f—细晶白云岩,孔洞胶结物为中粗晶直面半自形白云石且与粒状石英呈共生关系,7 462.45 m(+); MD—基质白云石; CD—白云石胶结物; CC—方解石胶结物; Pore—残留孔隙; Chert—燧石结核; Qtz—石英胶结物

a—fine-middle crystal dolomite with local rough dolomite cement and residual pores, 7 103.51 m(-); b—rough dolomite with calcite cement filled in vug, 7 104.71 m(-), calcite stained red with Alizarin Red S; c—micritic-fine dolomite with ghost grain texture and some residual pores developed between dolomite cements, 7 264.40 m(-); d—middle-fine crystal dolomite with local chert nodule, 7 265.90 m(+); e—micritic-fine dolomite with ghost texture and pinhole locally developed in intergranular and intragranular bioclast, 7 461.25 m(-); f—fine dolomite coexistent with middle-rough dolomite cement and quartz cement, 7 462.45 m(+); MD—matrix dolomite; CD—dolomite cement; CC—calcite cement; Pore—residual pore; Chert—chert nodule; Qtz—quartz cement

Pore—residual pore; Chert—chert nodule; Qtz—quartz cement

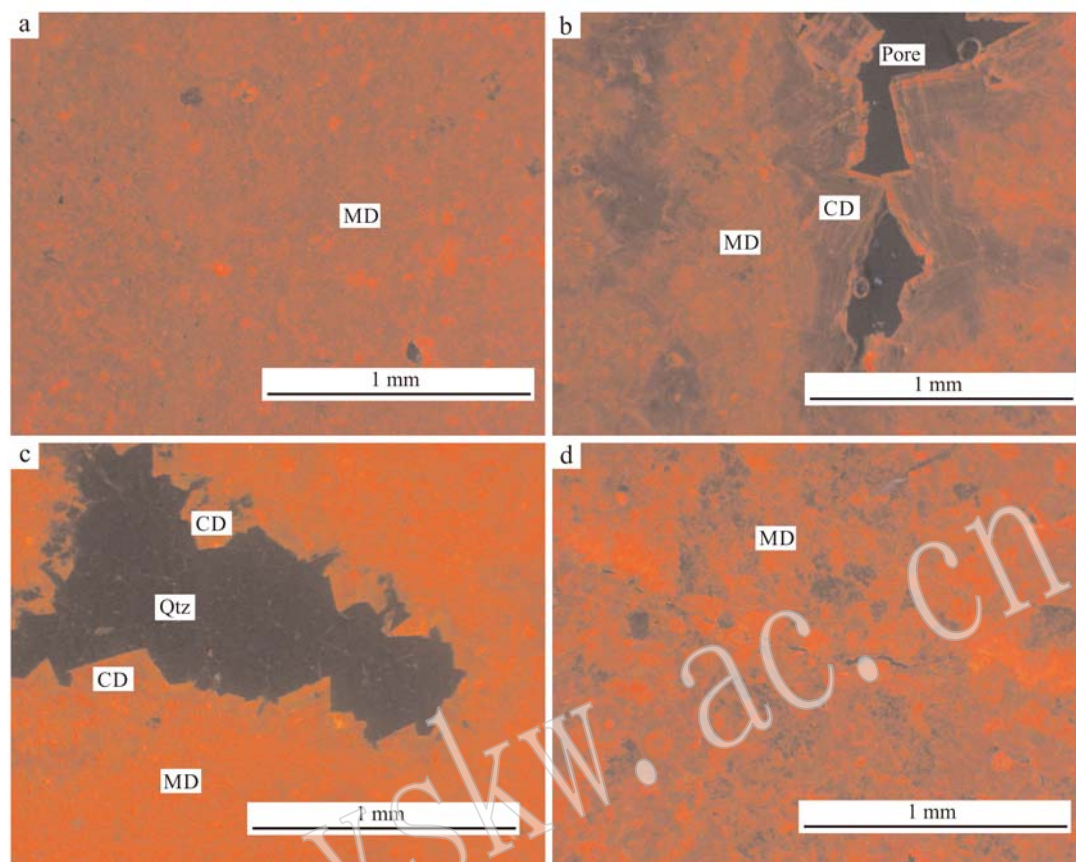


图 5 阿瓦塔格组藻白云岩阴极发光特征

Fig. 5 Cathodoluminescence characteristics of algae dolomite with holes in Awatage Formation

a—粉晶-细晶白云石中等明亮呈砖红色, 7 873.93 m; b—基质粉晶白云石中等明亮呈砖红色, 孔洞边缘白云石昏暗发光呈暗红色, 7 875.79 m; c—基质粉晶白云石以及白云石胶结物明亮发光呈桔红色, 自生石英胶结物不发光, 8 406.95 m; d—粉晶白云石不发光, 重结晶形成的细晶白云石中等明亮-昏暗发光呈桔红色, 8 407.90 m; MD—基质白云石; CD—白云石胶结物; Pore—残留孔隙; Qtz—石英
a—micritic-fine crystal dolomite with brick-red and moderate strength, 7 873.93 m; b—matrix micritic dolomite with brick-red and moderate strength, dolomite cement with dark red and dusky light, 7 875.79 m; c—matrix dolomite and dolomite cement exhibiting salmon pink color, the quartz cement filled in pore with nonluminescence, 8 406.95 m; d—micritic dolomite with nonluminescence and fine crystal dolomite exhibiting salmon pink color and moderate-dusky strength due to recrystallization, 8 407.90 m; MD—matrix dolomite; CD—dolomite cement; Pore—residual pore; Qtz—quartz cement

4.3 稀土元素差异性

碳酸盐岩成岩过程是稀土元素流失、轻重稀土分异增大的过程, 即其稀土总量降低、Eu 正异常以及重稀土亏损。因此, 可通过分析不同类型的白云岩稀土元素特征对比其成岩蚀变程度差异。

选取阿瓦塔格组与丘里塔格下亚群孔洞发育程度存在差异的 10 件全岩基质样品进行稀土元素分析, 结果见表 1。由于海水与海相碳酸盐岩有更加直接的亲缘关系(王小林等, 2009; 胡文瑄等, 2010; Wang *et al.*, 2014), 本次研究使用太平洋表层海水的稀土元素含量进行标准化, 并且使用标准化之后的稀土元素比值及配分模式描述稀土元素分异特征

(图 8)。

阿瓦塔格组孔洞发育的深灰色粉晶藻云岩稀土总量为 $5.84 \times 10^{-6} \sim 8.83 \times 10^{-6}$, 平均 7.02×10^{-6} ($N=4$)。其稀土配分模式为 Ce 正异常($\delta\text{Ce}_{\text{SWN}}$: 3.1~4.4)、不明显的 Eu 异常($\delta\text{Eu}_{\text{SWN}}$: 1.0~1.1)、轻稀土轻微富集重稀土平坦、轻重稀土分异相对较小($\text{LREE}/\text{HREE}_{\text{SWN}}$: 1.8~2.8; $\text{La}/\text{Yb}_{\text{SWN}}$: 1.5~2.2)。丘里塔格下亚群浅灰色针孔型粉晶-中粗晶白云岩(部分样品可见具残余颗粒结构)稀土总量为 $1.55 \times 10^{-6} \sim 4.13 \times 10^{-6}$, 平均 2.60×10^{-6} ($N=6$)。稀土配分模式为 Ce 正异常($\delta\text{Ce}_{\text{SWN}}$: 2.7~5.5)、部分样品具明显的正 Eu 异常($\delta\text{Eu}_{\text{SWN}}$: 1.1~

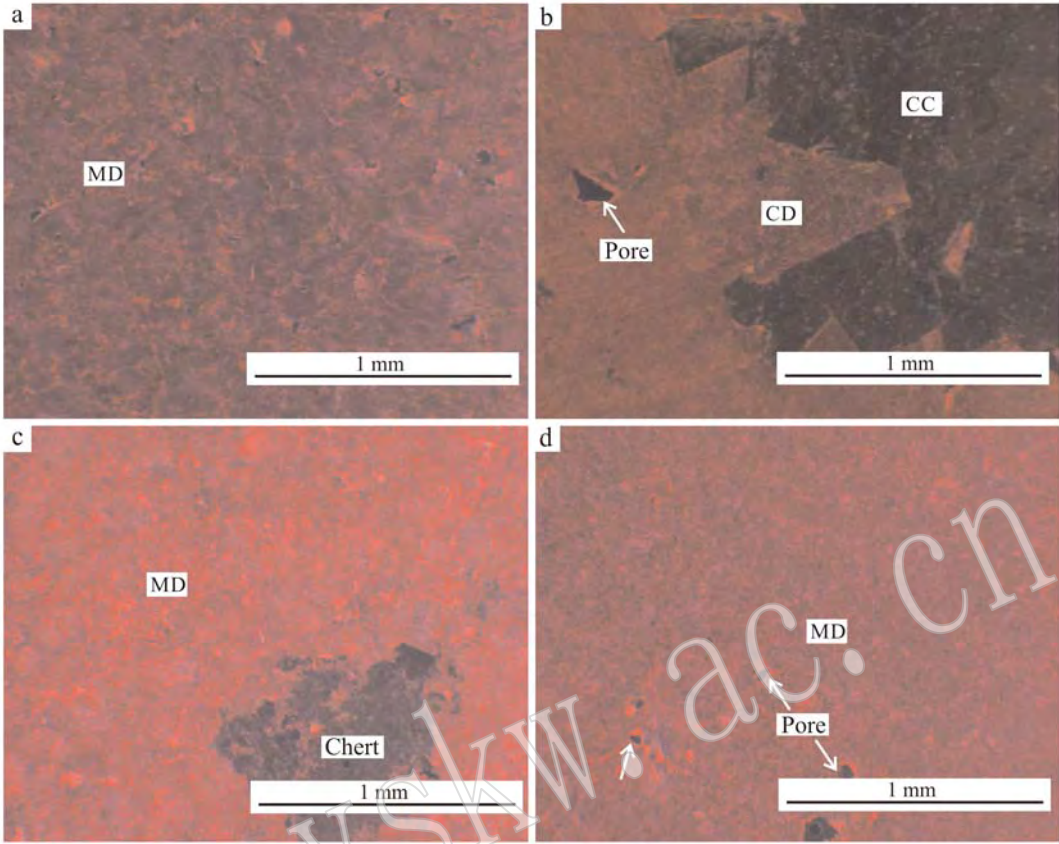


图 6 丘里塔格下亚群晶粒白云岩阴极发光特征

Fig. 6 Cathodoluminescence characteristics of crystalline dolomite in the lower Qiulitage Group

a—基质细晶白云石与中粗晶白云石胶结物昏暗发光呈暗蓝紫色, 7 103.51 m; b—粗晶白云石昏暗发光呈暗砖红色, 方解石胶结物不发光, 7 104.71 m; c—细晶-中晶白云石中等明亮呈紫红色, 燧石结核不发光, 7 264.35 m; d—基质白云石中等明亮呈蓝紫色, 7 266.22 m; MD—基质白云石; CD—白云石胶结物; Pore—残留孔隙; CC—方解石胶结物; Chert—燧石结核
a—the matrix fine-grained dolomite and the medium-grained dolomite cements exhibiting dusky dark blue-purple color, 7 103.51 m; b—coarse crystal dolomite in dusky dark brick-red color and with calcite cement with nonluminescence, 7 104.71 m; c—fine-middle crystal dolomite exhibiting moderate purple color and having chert nodule with nonluminescence, 7 264.35 m; d—matrix dolomite with moderate strength and in blue-purple color, 7 266.22 m; MD—matrix dolomite; CD—dolomite cement; Pore—residual pore; CC—calcite cement; Chert—chert nodule

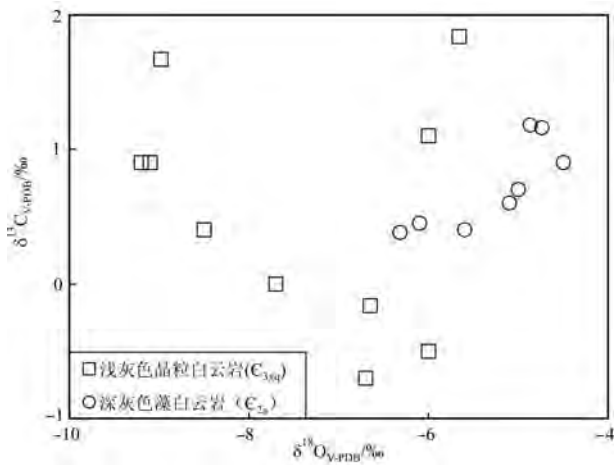


图 7 阿瓦塔格组藻白云岩与丘里塔格下亚群晶粒白云岩的基质白云石碳氧同位素对比

Fig. 7 The comparison of carbonate and oxygen isotope features in matrix dolomite between Awatage Formation and the lower Qiulitage Group

1.6)、轻稀土富集重稀土亏损、轻重稀土分异较大 ($LREE/HREE_{SWN}$: 3.3 ~ 4.5; La/Yb_{SWN} : 3.6 ~ 13.5)。

由此表明丘里塔格下亚群晶粒白云岩较阿瓦塔格组藻白云岩经历了更强的成岩-蚀变过程(如重结晶作用或热液重结晶作用), 导致其稀土元素流失、轻重稀土进一步分异与明显正 Eu 异常。

5 讨论

5.1 地层系统变化对储层成因认识的挑战

塔里木盆地早中寒武世总体表现为海侵至海退的沉积旋回, 中寒武世阿瓦塔格组潟湖相厚层膏盐、盐岩沉积代表了最大海退期(赵宗举等, 2011; 郑剑锋等, 2013)。晚寒武世大规模海侵背景下沉积了厚层碳酸盐岩(后期白云石化), 残余亮晶结构代表

表 1 塔深 1 井白云岩稀土元素分析结果

$w_B/10^{-6}$

Table 1 Rare earth elements analytical results of dolomites about the TS1 Well

层位	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
丘里塔格下亚群	2-4	1.1	1.4	0.24	0.78	0.14	0.04	0.13	0.03	0.09	0.03	0.04	0.020	0.06	0.001	4.13
	2-22	0.6	0.5	0.11	0.41	0.09	0.02	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.010	0.01	0.001	1.81
	2-32	0.5	0.4	0.11	0.39	0.06	0.02	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	0.010	0.01	0.001	1.55
	2-49	0.6	1.0	0.14	0.54	0.10	0.03	0.07	0.02	0.04	0.03	0.03	0.010	0.04	0.001	2.68
	3-2	0.6	0.5	0.14	0.43	0.09	0.02	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01	0.010	0.01	0.001	1.96
阿瓦塔格组	3-17	1.0	1.1	0.20	0.68	0.13	0.03	0.11	0.02	0.08	0.03	0.03	0.020	0.06	0.001	3.45
	5-4	2.1	1.9	0.51	1.92	0.42	0.10	0.41	0.08	0.57	0.08	0.35	0.040	0.31	0.043	8.83
	5-11	1.5	1.5	0.31	1.21	0.23	0.06	0.25	0.05	0.25	0.07	0.19	0.005	0.16	0.018	5.84
	5-13	1.9	1.9	0.39	1.58	0.32	0.07	0.28	0.06	0.37	0.09	0.22	0.017	0.25	0.026	7.41
	5-25	1.5	1.8	0.32	1.15	0.26	0.06	0.22	0.04	0.25	0.06	0.18	0.005	0.17	0.018	6.00

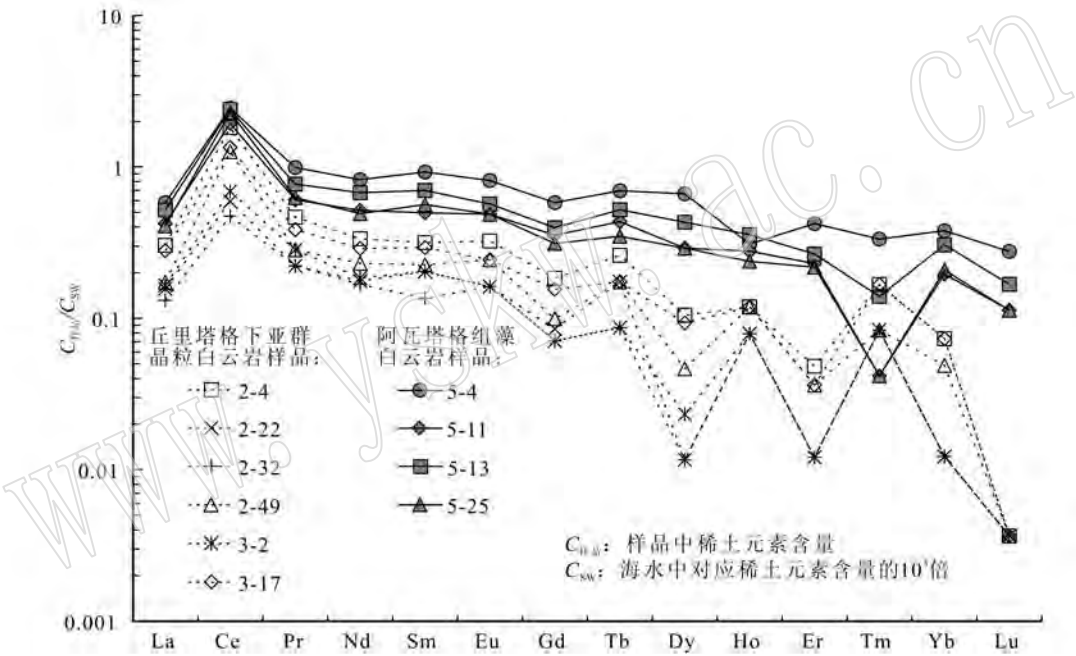


图 8 基质白云石的海水标准化稀土配分样式

Fig. 8 Seawater normalized REE patterns of matrix dolomite from well TS1

了水体相对高能沉积环境。

早期基于塔深 1 井寒武系白云岩地层均属于丘里塔格下亚群的认识,在研究随着埋深增加白云岩孔洞-孔径增加、储集性能更好的现象时,热液改造模式较为合理,尤其是孔洞胶结物(鞍形白云石、石英、方解石)提供了相关的流体包裹体数据与同位素数据(孟祥豪等, 2009; 李开开等, 2010; 蔺军等, 2010; 焦存礼等, 2011; Zhu *et al.*, 2014, 2015)。由于中晚寒武世构造、沉积背景的巨大差异,塔深 1 井寒武系地层系统认识的变化对已有储层成因的认识带来挑战,有必要重新探讨中上寒武统白云岩储层发育的物质基础与储层成因的关系。

地层系统认识的变化与岩心揭示的岩石学特征相一致。从岩石学特征看(图 3、图 4),阿瓦塔格组白云岩的基质以泥粉晶白云石为主并且具有藻的残余结构特征;而丘里塔格下亚群白云岩以晶粒结构的细晶-粗晶白云石为主,部分具有残余亮晶颗粒结构。从塔深 1 井的岩相古地理位置看,中寒武阿瓦塔格组沉积期具备沉积以藻结构为特征的藻礁建造的条件,以区别于潟湖相膏盐岩沉积;同时,在极度干旱的气候背景下,强烈蒸发导致古地貌高部位可能形成石膏结核,此时,在蒸发泵作用下将导致准同生期白云石化作用的发生,进而形成以泥粉晶白云石为基质的主要特征岩性。准同生期的海水或大气

淡水淋滤有利于石膏结核等蒸发岩矿物的溶解。丘里塔格下亚群白云岩的残余亮晶结构与晶粒结构均与成岩期的白云石化作用、(热液)重结晶作用相关。

5.2 成岩-蚀变差异性对储层成因的启示

由于中晚寒武世白云岩储层发育的物质基础完全不同,在揭示的岩心从主体颜色深浅、白云岩基质、孔洞丰度、孔径大小、充填物差异方面均存在明显差异(图2,图4)。差异性同样表现在成岩-蚀变特征上,可以从阴极发光特征、碳氧同位素与稀土元素组成等方面加以区分(图5,图8)。

岩石学特征与成岩-蚀变特征分析显示,阿瓦塔格组与丘里塔格下亚群白云岩经历了不同的沉积-成岩过程,埋深的增加和后期成岩流体作用的影响并没有彻底改变阿瓦塔格组的白云岩结构、构造特征。假设热液流体对储集空间的形成起主要贡献,并且造成了下部储集空间好于上部地层的储层特征,那么下部白云岩与流体发生了更为强烈的水-岩反应,也就是说,下部白云岩地层经历的热液蚀变应更为显著。而本文的成岩-蚀变特征分析显示,上部白云岩地层(丘里塔格下亚群)经历了更强的成岩-蚀变作用(重结晶作用、热液重结晶作用等),这说明热液主导的超深层白云岩储集空间形成的解释可能是不恰当的。需要强调的是,本文并未完全排除阿瓦塔格组存在热液流体的改造作用的可能。详细的岩心观察和已发表的文献均表明阿瓦塔格组储集空间的形成可能受多种因素的控制(郑和荣等,2007),准同生期大气淡水或海水对石膏结核以及不稳定矿物的溶解奠定了重要的物质基础,局部存在热液溶蚀、热液重结晶以及充填作用。

6 结论

(1) 塔深1井钻遇的寒武系地层属于中寒武统阿瓦塔格组和上寒武统丘里塔格下亚群。阿瓦塔格组白云岩主要由深灰色-灰色粉晶-细晶藻白云岩构成,储集空间大,孔隙充填物主要为白云石;丘里塔格下亚群白云岩主要由灰色-浅灰色晶粒结构白云岩构成,储集空间小,孔隙充填物主要为方解石。

(2) 阿瓦塔格组藻白云岩在阴极发光下呈明亮的中等强度砖红色-桔黄色,具有相对偏重的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(平均为 -5.3‰ , VPDB)、相对较高的稀土总量以及与正常海相灰岩相似的稀土配分模式;丘里塔格下亚群晶粒白云岩在阴极发光下呈偏暗的中等强度

蓝紫色-砖红色,具相对偏轻的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(平均值为 -7.5‰ , VPDB)、相对偏低的稀土总量、 Eu 的正异常与重稀土的明显亏损为特点的稀土配分特征。研究表明,塔深1井阿瓦塔格组优质白云岩储层的发育受并非仅受控于热液改造,沉积环境和早期成岩改造为深层白云岩储集空间的保存和改善奠定了基础。

References

- Cuia R D, Riva A, Scifoni A, *et al.* 2011. Dolomite characteristics and diagenetic model of the Calcarei Grigi Group (Asiago Plateau, Southern Alps-Italy): an example of multiphase dolomitization[J]. *Sedimentology*, 58(6): 1347~1369.
- Gillhaus A, Richter D K, Meijer J, *et al.* 2001. Quantitative high resolution cathodoluminescence spectroscopy of diagenetic and hydrothermal dolomites[J]. *Sedimentary Geology*, 140: 191~199.
- Habermann D, Meijer J, Neuser R D, *et al.* 1999. Micro-PIXE and quantitative cathodoluminescence spectroscopy: combined high resolution trace element analyses in minerals[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B150: 470~477.
- Habermann D, Neuser R D and Richter D K. 1998. Low limit of Mn^{2+} -activated cathodoluminescence of calcite: state of the art [J]. *Sedimentary Geology*, 116: 13~24.
- He Zhiliang, Xu Hongjie and Duan Tiejun. 2005. A preliminary analysis on compound structural styles in the Tarim polycyclic basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 40(2): 153~166 (in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Jia Chengzao, Li Desheng, *et al.* 2005. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 26(1): 64~77 (in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Zhou Xinyuan, Zhang Chaojun, *et al.* 2006. Characteristics of geologic framework of multicycle superimposed basin in Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 1: 31~41 (in Chinese with English abstract).
- Hu Wenxuan, Chen Qi, Wang Xiaolin, *et al.* 2010. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 31(6): 810~818 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing. 1992. Relationship between cathodoluminescence and concentration of iron and manganese in carbonate minerals[J]. *Mineralogy and Petrology*, 12(4): 74~79 (in Chinese with English ab-

- stract).
- Huang Sijing. 1988. The cathodoluminescence and diagenesis of the carbonates of Guanwushan formation, middle Devonian, Ganxi, north-western Sichuan[J]. Journal of Chendu College of Geology, 15(1): 50~56(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing. 1990. Cathodoluminescence and diagenetic alteration of marine carbonate minerals[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 4: 9~15(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, *et al.* 2008. Cathodoluminescence and diagenesis of the carbonate rocks in Feixianguan formation of Triassic, eastern Sichuan Basin of China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 33(1): 26~34 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Cunli, He Zhiliang, Xing Xiujian, *et al.* 2011. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(1): 277~284(in Chinese with English abstract).
- Kang Yuzhu. 2005. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (part 4): Tahe oilfield in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 10(4): 31~38(in Chinese with English abstract).
- Li Sumei, Alon Amrani, Pang Xiongqi, *et al.* 2015. Origin and quantitative source assessment of deep oils in the Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. Organic Geochemistry, 78: 1~22.
- Li Kaikai, Cai Chunfang, Cai Liulu, *et al.* 2010. Hydrothermal fluid activities and main controlling factors of deep reservoir development in the lower Paleozoic of the Tahe oilfield[J]. Petroleum Geology & Experiment, 32(1): 46~51(in Chinese with English abstract).
- Lin Jun, Zhou Fangfang and Yuan Guofen. 2010. Features of deep-burial dolomitization of the Cambrian reservoirs in Tahe region[J]. Oil & Gas Geology, 31(1): 13~21 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lihong, Huang Sijing, Wang Chunlian, *et al.* 2010. Cathodoluminescence zonal texture of calcite cement in carbonate rock and its relationship with trace element composition: a case of Ordovician carbonate rock of Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 15(1): 55~60(in Chinese with English abstract).
- Marshall J D. 1988. Cathodoluminescence of Geological Materials [M]. Boston: Unwin Hyman, 146.
- Meng Xianghao. 2012. A research of the deep Cambrian high-quality reservoir characteristics and formation mechanism in Tahe area[D]. Cheng Du: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Meng Xianghao, Zhang Shaonan, Li Xiuhua, *et al.* 2010. Reservoir space in the Cambrian in the ultradeep well No. 1, Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica of Sichuang, 30(1): 31~34(in Chinese with English abstract).
- Meng Xianghao, Zhang Shaonan, Lin Jun, *et al.* 2009. Geochemical tracing of isotopic fluid of the Cambrian dolomite reservoir in well Tashen 1[J]. Mineralogy and Petrology, 29(4): 75~82(in Chinese with English abstract).
- Meng Xianghao, Zhang Shaonan, Lin Jun, *et al.* 2011. Analysis on main controlling factors of Cambrian reservoir space with high quality for Well Tashen 1, the deepest subaerial well in China[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 18(1): 1~5(in Chinese with English abstract).
- Pagel M, Barbin V, Blanc P, *et al.* 2000. Cathodoluminescence in Geosciences [M]. Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer, 514.
- Qian Yixiong, Chen Yue, Chen Qianlu, *et al.* 2006. General characteristics of burial dissolution for Ordovician carbonate reservoirs in the northwest of Tazhong area[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 47~52(in Chinese with English abstract).
- Qiao Jichao. 2008. Research about the reservoir characteristics of the Cambrian dolomite in TS1 well, and its geochemical characteristics [D]. Cheng Du: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Richter D K, Götze T H, Götze J, *et al.* 2003. Progress in application of cathodoluminescence (CL) in sedimentary petrology[J]. Mineralogy and Petrology, 79: 127~166.
- Song Zhimin. 1993. Cathodoluminescence of Geology Basis [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 43~60(in Chinese with English abstract).
- Wang Lichao, Hu Wenxuan, Wang Xiaolin, *et al.* 2014. Seawater normalized REE patterns of dolomites in Geshan and Panlongdong sections, China: Implications for tracing dolomitization and diagenetic fluids[J]. Marine and Petroleum Geology, 56: 63~73.
- Wang Tieguan, Song Daofu, Li Meijun, *et al.* 2014. Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 35(6): 753~762(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolin, Hu Wenxuan, Li Qing, *et al.* 2011. Negative carbon isotope excursion on the Cambrian series 2- series 3 boundary for Penglaiba section in Tarim Basin and its significances[J]. Geological

- Review, 57(1): 16~23(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolin, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, *et al.* 2009. Using in situ REE analysis to study the origin and diagenesis of dolomite of lower Paleozoic, Tarim Basin[J]. *Sci. China Ser. D—Earth Sci.*, 39(6): 721~733(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, *et al.* 2014a. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 well in Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 19(2): 1~13(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaoming, Yang Haijun, Qi Yingmin, *et al.* 2014b. Ordovician gas exploration breakthrough in the Gucheng lower uplift of the Tarim Basin and its enlightenment[J]. *Natural Gas Industry*, 34(1): 1~9(in Chinese with English abstract).
- Xie Xiaomin, Hu Wenxuan, Wang Xiaolin, *et al.* 2009. Sedimentary sequences in Keping area, Xinjiang: Constraints from carbon and oxygen isotope compositions of Cambrian to Ordovician carbonate rocks[J]. *Geochimica*, 38(1): 75~88(in Chinese with English abstract).
- Yao Chunyan, Ma Dongsheng, Ding Haifeng, *et al.* 2011. Reconstruction of the early Cambrian carbonate sedimentary environment in Akesu area of Xinjiang, China: Evidences from trace elements and carbon isotope excursion[J]. *Geochimica*, 40(1): 63~71(in Chinese with English abstract).
- Yun Lu and Zhai Xiaoxian. 2008. Discussion on characteristics of the Cambrian reservoirs and hydrocarbon accumulation in well Tashen-1, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 29(6): 726~732(in Chinese with English abstract).
- Zhai Xiaoxian, Gu Yi, Qian Yixiong, *et al.* 2007. Geochemical characteristics of the Cambrian oil and gas in well Tashen 1, the Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(4): 329~333(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zongju, Luo Jiahong, Zhang Yunbo, *et al.* 2011. Lithofacies paleogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 32(6): 937~948(in Chinese with English abstract).
- Zheng Herong, Wu Maobing, Wu Xingwei, *et al.* 2007. Oil-gas exploration prospect of dolomite reservoir in the lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 28(2): 1~8(in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, *et al.* 2013. Main controlling factors and characteristics of Cambrian dolomite reservoirs related to evaporate in Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 89~98(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Zhou Gentao and Gong Bin. 1997. Theoretical study of oxygen isotope fractionation in carbonate minerals[J]. *Geological Journal of China Universities*, 3(3): 241~255(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Zhang Xuefeng, *et al.* 2007. Characteristics of burial dissolution in the Ordovician limestone of Tahe Oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 28(5): 57~62(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, *et al.* 2008. Effects of deep fluid on carbonates reservoir in Tarim basin[J]. *Geological Review*, 54(3): 348~354(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Hu Wenxuan, *et al.* 2012. Deep Cambrian surface-karst dolomite reservoir and its alteration by later fluid in Tarim Basin[J]. *Geological Review*, 58(4): 691~701(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Jin Zhijun, *et al.* 2014. Fluid environment for preservation of pore spaces in a deep dolomite reservoir[J]. *Geofluids*, 1~19.
- Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Jin Zhijun, *et al.* 2015. Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim basin, northwestern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 232~244.

附中文参考文献

- 何治亮, 徐宏节, 段铁军. 2005. 塔里木多旋回盆地复合构造样式初步分析[J]. *地质科学*, 40(2): 153~166.
- 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 2005. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 26(1): 64~77.
- 何登发, 周新源, 张朝军, 等. 2006. 塔里木多旋回叠合盆地地质结构特征[J]. *中国石油勘探*, 1: 31~41.
- 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 2010. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. *石油与天然气地质*, 31(6): 810~818.
- 黄思静. 1992. 碳酸盐矿物的阴极发光性与其 Fe, Mn 含量的关系[J]. *矿物岩石*, 12(4): 74~79.
- 黄思静. 1988. 北川甘溪观雾山组碳酸盐岩的阴极发光特征和成岩作用[J]. *成都地质学院学报*, 15(1): 50~56.
- 黄思静. 1990. 海相碳酸盐矿物的阴极发光性与其成岩蚀变的关系[J]. *岩相古地理*, 4: 9~15.

- 黄思静, 卿海若, 胡作维, 等. 2008. 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 33(1): 26~34.
- 焦存礼, 何治亮, 邢秀娟, 等. 2011. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J]. 岩石学报, 27(1): 277~284.
- 康玉柱. 2005. 中国海相油气田勘探实例之四 塔里木盆地塔河油田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 10(4): 31~38.
- 李开开, 蔡春芳, 蔡璐, 等. 2010. 塔河地区下古生界热液流体及储层发育主控因素探讨——以 S88 和 TS1 井为例[J]. 石油实验地质, 32(1): 46~51.
- 蔺军, 周芳芳, 袁国芬. 2010. 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, 31(1): 13~21.
- 刘丽红, 黄思静, 王春连, 等. 2010. 碳酸盐岩中方解石胶结物的阴极发光环带与微量元素构成的关系——以塔河油田奥陶系碳酸盐岩为例[J]. 海相油气地质, 15(1): 55~60.
- 孟祥豪. 2012. 塔河深层寒武系优质储层特征及形成机理研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 孟祥豪, 张哨楠, 蔺军, 等. 2009. 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, 29(4): 75~82.
- 孟祥豪, 张哨楠, 李秀华, 等. 2010. 塔深 1 井寒武系超深层优质储集空间特征[J]. 四川地质学报, 30(1): 31~34.
- 孟祥豪, 张哨楠, 蔺军. 2011. 中国陆上最深井塔深 1 井寒武系优质储集空间主控因素分析[J]. 断块油气田, 18(1): 1~5.
- 钱一雄, 陈跃, 陈强路, 等. 2006. 塔中西北部奥陶系碳酸盐岩埋藏溶蚀作用[J]. 石油学报, 27(3): 47~52.
- 乔冀超. 2008. 塔深 1 井寒武系白云岩储层特征及其地球化学特征研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 宋志敏. 1993. 阴极发光地质学基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 43~60.
- 王招明, 谢会文, 陈永权, 等. 2014a. 塔里木盆地中深 1 井寒武系盐下白云岩原生气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 19(2): 1~13.
- 王招明, 杨海军, 齐英敏, 等. 2014b. 塔里木盆地古城地区奥陶系天然气勘探重大突破及其启示[J]. 天然气工业, 34(1): 1~9.
- 王铁冠, 宋到福, 李美俊, 等. 2014. 塔里木盆地顺南-古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 35(6): 753~762.
- 王小林, 胡文瑄, 李庆, 等. 2011. 塔里木盆地蓬莱坝剖面寒武系第二统-第三统界线处碳同位素负异常及其地质意义[J]. 地质论评, 57(1): 16~23.
- 王小林, 金之钧, 胡文瑄, 等. 2009. 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(D 辑: 地球科学), 39(6): 721~733.
- 谢小敏, 胡文瑄, 王小林, 等. 2009. 新疆柯坪地区寒武纪-奥陶纪碳酸盐岩沉积旋回的碳同位素研究[J]. 地球化学, 38(1): 75~88.
- 姚春彦, 马东升, 丁海峰, 等. 2011. 新疆阿克苏地区早寒武世碳酸盐岩沉积环境: 微量元素和碳同位素证据[J]. 地球化学, 40(1): 63~71.
- 云露, 翟晓先. 2008. 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, 29(6): 726~732.
- 翟晓先, 顾忆, 钱一雄, 等. 2007. 塔里木盆地塔深 1 井寒武系油气地球化学特征[J]. 石油实验地质, 29(4): 329~333.
- 赵宗举, 罗家洪, 张运波, 等. 2011. 塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理[J]. 石油学报, 32(6): 937~948.
- 郑和荣, 吴茂炳, 郭兴威, 等. 2007. 塔里木盆地地下古生界白云岩储层油气勘探前景[J]. 石油学报, 28(2): 1~8.
- 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 2013. 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, 31(1): 89~98.
- 郑永飞, 周根陶, 龚冰. 1997. 碳酸盐矿物氧同位素分馏的理论研究[J]. 高校地质学报, 3(3): 241~255.
- 朱东亚, 胡文瑄, 张学丰, 等. 2007. 塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征[J]. 石油学报, 28(5): 57~62.
- 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄, 等. 2008. 塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响[J]. 地质论评, 54(3): 348~354.
- 朱东亚, 孟庆强, 胡文瑄, 等. 2012. 塔里木盆地深层寒武系地表岩溶型白云岩储层及后期流体改造作用[J]. 地质论评, 58(4): 691~701.